

简明钎焊工手册

方洪渊 主编



机械工业出版社
China Machine Press

简 明 钎 焊 工 手 册

方洪渊 主编

钱乙余 主审



机 械 工 业 出 版 社

1
10.1.185/10
本手册共十章，比较系统地介绍了钎焊的基本原理、钎焊材料、工艺方法及各种材料的钎焊连接问题。本手册以钎焊工艺方法的介绍为主线，着重介绍各种常用钎焊方法的基本原理、工艺要求和操作技巧以及常规材料钎焊工艺的制定，并结合工厂企业的实际情况介绍了一些当前比较广泛应用的典型产品的钎焊实例。本手册在选材上以实用为主，兼顾先进性，文字叙述较为通俗。

本手册是一本以从事实际操作的钎焊工人为主要读者对象的小型工具书，内容着重于工程应用，适合于在航空航天、机械、电子、轻工、家电等行业从事钎焊工作的工程技术人员和工人阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

简明钎焊工手册/方洪渊主编. - 北京: 机械工业出版社, 1999.12

ISBN 7-111-07629-X

I. 简… II. 方… III. 钎焊-手册 IV. TG454-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 62952 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 俞逢英 金晓玲 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京市密云县印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

2001 年 4 月第 1 版第 2 次印刷

787mm×1092mm^{1/32} · 12 印张 · 1 插页 · 331 千字

4 001—7 000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

目 录

前 言

绪 论	1
0.1 钎焊连接的基本特征	1
0.2 钎焊方法的分类	2
0.3 钎焊的历史、发展及应用	3
第 1 章 钎焊接头形成的基本原理	5
1.1 钎料的润湿与铺展	5
1.1.1 润湿与铺展	5
1.1.2 影响钎料润湿性的因素	6
1.2 液态钎料的毛细填缝过程	10
1.3 钎料与母材间的相互作用	12
1.3.1 母材向液态钎料中的溶解	12
1.3.2 钎料向固态母材中的扩散	14
1.4 钎缝组织形态	18
1.4.1 钎缝组织的不均匀性	18
1.4.2 结合区的组织形态	19
1.5 钎焊性的测量与评定	25
1.5.1 润湿角测量法	25
1.5.2 铺展面积测定法	25
1.5.3 填缝长度的测定	26
1.5.4 复合板流动系数的测定	27
1.5.5 润湿时间的测定	27
1.5.6 润湿力的测定	28
第 2 章 钎剂和气体介质	30

2.1 钎剂的作用和应有的性能	30
2.1.1 钎剂的作用	30
2.1.2 钎剂应有的性能	31
2.2 钎剂的组成、分类和选择	31
2.2.1 钎剂的组成	32
2.2.2 钎剂的分类	33
2.2.3 钎剂的选择	34
2.3 常用钎剂	35
2.3.1 软钎剂	35
2.3.2 硬钎剂	38
2.3.3 铝用钎剂	40
2.3.4 气体钎剂	43
2.4 气体介质	44
2.4.1 中性气体	45
2.4.2 活性气体	45
2.4.3 真空	46
第3章 钎料	47
3.1 钎料的分类及选用原则	47
3.1.1 钎料的分类	47
3.1.2 对钎料的基本要求	48
3.1.3 选用钎料的原则	49
3.2 软钎料	51
3.2.1 锡铅钎料	51
3.2.2 铝用软钎料	59
3.2.3 高温软钎料和低温软钎料	62
3.2.4 微组装用软钎料	65
3.3 硬钎料	68
3.3.1 铝基钎料	68
3.3.2 银基钎料	69
3.3.3 铜基钎料	79

3.3.4 镍基钎料	88
3.3.5 锰基钎料	95
3.3.6 金基钎料	99
3.3.7 钼基钎料	102
3.3.8 钛基钎料	102
3.4 膏状钎料	104
3.5 非晶态钎料	108
第4章 钎焊接头的设计	111
4.1 钎焊接头的形式	111
4.2 钎接头搭接长度的确定	114
4.3 钎接头间隙的选定	117
4.4 钎缝强度实验方法	122
4.4.1 钎缝的拉伸试验方法	122
4.4.2 钎缝的剪切实验方法	124
第5章 钎焊工艺	126
5.1 钎焊前零件表面的制备	126
5.1.1 清除油脂	126
5.1.2 去除氧化膜	128
5.1.3 镀覆金属	130
5.1.4 涂覆阻流剂	131
5.2 零件的装配和定位	132
5.2.1 自身定位	132
5.2.2 夹具定位	133
5.3 钎料的放置	135
5.3.1 钎料的放置原则	135
5.3.2 钎料的放置方式	135
5.4 钎焊工艺参数的确定	136
5.4.1 钎焊温度	136
5.4.2 保温时间	137
5.4.3 加热速度和冷却速度	138

5.5 钎焊后的处理	138
5.5.1 钎剂残渣的清除	138
5.5.2 阻流剂的清除	140
5.5.3 钎焊后的热处理	140
5.6 钎焊工艺规程	141
第6章 钎焊方法	144
6.1 火焰钎焊	145
6.2 电加热钎焊	147
6.2.1 炉中钎焊	147
6.2.2 感应钎焊	152
6.2.3 电阻钎焊	156
6.2.4 电弧钎焊	158
6.3 浸渍钎焊	159
6.3.1 盐浴钎焊	160
6.3.2 熔化钎料中浸渍钎焊	161
6.4 扩散钎焊	162
6.5 烙铁钎焊	165
6.6 波峰钎焊	166
6.7 再流钎焊	167
6.7.1 气相钎焊	167
6.7.2 红外钎焊	169
6.7.3 激光钎焊	170
6.7.4 热板钎焊	171
6.7.5 热风钎焊	172
6.8 其它钎焊方法	172
6.8.1 刮擦钎焊	172
6.8.2 超声波钎焊	173
6.8.3 光束钎焊	174
6.8.4 电子束钎焊	174
6.9 各种钎焊方法的比较	175

第7章 钎焊缺陷及质量检验	178
7.1 钎焊缺陷的种类及产生原因	178
7.1.1 钎焊缺陷的种类	178
7.1.2 缺陷的发生原因及改进措施	179
7.2 钎焊的质量检验方法	183
7.2.1 非破坏性检验	184
7.2.2 破坏性检验	191
第8章 常用材料的钎焊	195
8.1 碳钢、低合金钢的钎焊	195
8.1.1 钎焊特点	195
8.1.2 接头间隙设计	196
8.1.3 钎料、钎剂和保护气体	196
8.1.4 钎焊工艺	197
8.2 不锈钢的钎焊	199
8.2.1 钎焊特点	200
8.2.2 钎料、钎剂和保护气体	201
8.2.3 钎焊工艺	206
8.3 工具钢和硬质合金的钎焊	208
8.3.1 钎焊特点	210
8.3.2 钎料、钎剂和保护气体	210
8.3.3 钎焊工艺	212
8.4 高温合金的钎焊	215
8.4.1 钎焊特点	216
8.4.2 钎料、钎剂和保护气体	216
8.4.3 钎焊工艺	220
8.5 铸铁的钎焊	222
8.5.1 钎焊特点	222
8.5.2 钎料和钎剂	222
8.5.3 钎焊工艺	223
8.6 铝及其合金的钎焊	224

8.6.1 钎焊特点	224
8.6.2 钎料、钎剂和保护气体	230
8.6.3 钎焊工艺	232
8.6.4 铝与其它金属的钎焊	239
8.7 铜及其合金的钎焊	240
8.7.1 钎焊特点	240
8.7.2 钎料、钎剂和保护气体	241
8.7.3 钎焊工艺	244
8.7.4 铜与其它金属的钎焊	246
8.8 钛及其合金的钎焊	247
8.8.1 钎焊特点	248
8.8.2 钎料	249
8.8.3 钎剂和保护气氛	251
8.8.4 钎焊工艺	251
8.9 难熔金属的钎焊	252
8.9.1 钨的钎焊	252
8.9.2 钼的钎焊	254
8.9.3 钽和铌的钎焊	256
8.10 贵金属触点的钎焊	259
8.10.1 钎焊特点	259
8.10.2 钎料选择	259
8.10.3 钎焊工艺	260
8.11 非金属材料的钎焊	261
8.11.1 陶瓷材料的钎焊	261
8.11.2 石墨和金刚石聚晶的钎焊	267
8.11.3 复合材料的钎焊	269
第9章 钎焊操作中的安全保护	271
9.1 不安全及不卫生因素	271
9.2 钎焊操作的注意事项及安全防护	272
9.2.1 有毒物品的安全管理	272

9.2.2 通风	273
9.2.3 其它应注意的事项	274
第 10 章 钎焊应用实例	276
10.1 印制电路板的钎焊	276
10.1.1 元器件引线的成形	276
10.1.2 电烙铁钎焊印制电路板	280
10.1.3 手工浸焊印制电路板	282
10.2 硬质合金车刀火焰钎焊	284
10.2.1 钎焊前准备	284
10.2.2 钎焊	285
10.2.3 钎焊后处理	285
10.3 自行车车架的火焰钎焊	286
10.4 大型发电机转子线圈接头电阻钎焊	288
10.4.1 电阻钎焊装置	289
10.4.2 钎焊过程	289
10.5 核工程用液位计电接点的真空钎焊	291
10.5.1 电接点性能要求	291
10.5.2 钎料的选择	291
10.5.3 钎焊工艺	292
10.6 汽车分电器主轴部件高频钎焊	292
10.6.1 高频钎焊装置	294
10.6.2 钎焊工艺	294
10.7 大型铝板翅式换热器的浸渍钎焊	295
10.7.1 钎料和盐浴成分的确定	295
10.7.2 钎焊工艺	296
10.8 铝合金翅式机箱气体保护钎焊	297
10.8.1 钎焊加热炉	297
10.8.2 钎焊工艺	297
10.9 毫米波器件接触反应钎焊	299
10.9.1 毫米波器件钎前电刷镀	300

10.9.2 接触反应钎焊工艺	302
10.10 计算机芯片载体电路板	303
10.10.1 电路板的组成	303
10.10.2 钎焊前处理	303
10.10.3 钎焊过程	303
10.11 轿车发动机用陶瓷面钢制挺杆	304
10.11.1 挺杆的组成	304
10.11.2 钎焊材料	304
10.11.3 钎焊前处理	304
10.11.4 钎焊过程	304
10.12 不锈钢锅的复合底	305
10.12.1 复合底的组成	305
10.12.2 钎料和钎剂	305
10.12.3 钎焊前处理	305
10.12.4 钎焊过程	305
10.13 单层钎焊管的制造	305
10.13.1 钎焊管的组成	306
10.13.2 钎焊材料	306
10.13.3 钎焊工艺	306
10.13.4 钎焊后处理	306
10.14 柴油机用电热塞	306
10.14.1 电热塞的组成	306
10.14.2 钎焊前准备	307
10.14.3 钎焊过程	307
10.15 接触器的银钨触头	307
10.15.1 触头的组成	307
10.15.2 钎焊要求	307
10.15.3 钎焊工艺	308
10.16 发动机的整流器	308
10.16.1 钎焊要求	308

10.16.2	钎焊前准备	308
10.16.3	钎焊参数	308
10.17	燃油喷嘴组件	309
10.17.1	喷嘴组件的组成	309
10.17.2	钎焊要求	309
10.17.3	钎焊前准备	309
10.17.4	钎焊工艺	309
10.17.5	钎焊后处理	309
10.18	自行车车架接头	309
10.18.1	车架接头的组成	309
10.18.2	钎焊前准备	310
10.18.3	钎焊过程	310
附录 A	我国钎焊材料主要生产和研制单位及主要 产品	311
附录 B	我国与其它国家近似钎料型号对照表	323
附录 C	我国钎焊标准目录	333
附录 D	国外有关钎焊和钎料标准目录	337
附录 E	我国部分钎料及钎焊专利	348
附录 F	中国焊接学会钎焊专业委员会团体会员单位及 联系人名单	354
参考文献		361

绪 论

0.1 钎焊连接的基本特征

钎焊是完成材料连接的一种重要方法，它与熔焊和压焊一起构成了现代焊接技术的三个重要组成部分。与熔焊和压焊相比较，钎焊与其虽有一些共同之处，但却存在本质上的差异。以搭接接头的连接为例（见图 0-1），来看一看三类焊接技术的特点和差异。

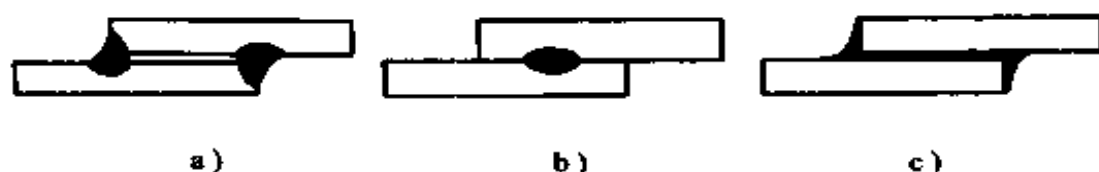


图 0-1 三类焊接方法的对比

a) 熔焊 b) 压焊 c) 钎焊

在制造熔焊接头时，可以加入（也可不加入）填充金属，利用外加热源将被焊金属（一般称为母材）和填充金属（一般为焊条或焊丝）一起加热熔化，冷却后即可形成一具有明显冶金特征的不可拆卸的连接接头。在制造压焊接头时，一般不需加入填充金属，在外加压力的作用下使母材发生明显的塑性变形，并且在电阻焊时，还可利用接合面处的电阻热使母材局部发生熔融，冷却后同样可形成一具有明显冶金特征的不可拆卸的连接接头。当采用钎焊方法进行材料连接时，一般情况下都需要加入填充金属（一般称为钎料），利用外热源使填充金属熔化，但要使母材仍保持为固态，待熔化的钎料自动流入被连接工件的间隙并冷却凝固后，就可以形成同样具有冶金特征，并且在一定程度上又可以拆卸的连接接头。表 0-1 列出了三类焊接方法的特征对比，这种对比是针对最普通和最常用的情况而言的。当然，由于材料连接技术的不断发展和进步，对每一类方法都可能出现一些

例外的情况。

表 0-1 三类焊接技术特征的对比

连接方法	母材受热	填充材料	热源	压力	接头的可拆卸性	结合特征
熔 焊	熔 化	有或无	外加	无	不可拆卸	冶金结合
压 焊	熔融或不熔	无	内部	有	不可拆卸	
钎 焊	不熔化	有	外加	无	部分可拆卸	

钎焊作为一类连接方法的总称，尽管在具体实施操作上可以存在明显的差异，但就其接头形成的本质来看应是基本相同的。因此，可以对钎焊做出如下的定义：钎焊是把被连接材料（又称母材）加热到适当的温度，并使填充材料（又称钎料）熔化，利用毛细作用使液态钎料填充固态母材之间的间隙，经母材与钎料发生相互作用，然后冷却凝固，从而形成冶金结合的一类连接方法。

0.2 钎焊方法的分类

按照不同的特征和标准，可将钎焊方法分成各种类型，归纳起来大体上有以下几种分类方式：

(1) 按照钎料的熔点分类 按照美国焊接学会推荐的标准，可将钎焊分为两类。当所采用的钎料的熔点（或液相线）低于 450°C 时，称为软钎焊，而当其高于 450°C 时，称为硬钎焊。

(2) 按照钎焊温度的高低分类 可以分为高温钎焊、中温钎焊和低温钎焊，但是这种高中低温的划分是相对于母材的熔点而言的，并且其温度分界标准也是不十分明确的，只是一种约定俗成的说法。例如：对于钢等熔点较高的母材金属来说，加热温度高于 800°C 称为高温钎焊，加热温度在 $550\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间时称为中温钎焊，而加热温度低于 550°C 时称为低温钎焊；但对于铝合金来说，当加热温度高于 450°C 称为高温钎焊，加热温度在 $300\sim 450^{\circ}\text{C}$ 之间时称为中温钎焊，而加热温度低于 300°C 时称为低温钎焊。

(3) 按照热源种类和加热方式分类 根据热源种类和加热方式的不同，可以将其分为：火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、电弧钎焊、浸渍钎焊，红外钎焊、激光钎焊、气相钎焊、烙铁钎焊及

超声波钎焊等。

(4) 按照环境介质的差异及去除母材表面氧化膜的方式分类 可以分为：钎剂钎焊、无钎剂钎焊、自钎剂钎焊、刮擦钎焊、气体保护钎焊及真空钎焊等。

(5) 按照接头形成的特点分类 又可分为：毛细钎焊和非毛细钎焊。对于那些液态钎料依靠毛细作用填入钎缝间隙的情况，称为毛细钎焊，而对于那些毛细作用在钎焊接头形成过程中不起主要作用的情形，则称为非毛细钎焊。接触反应钎焊和扩散钎焊就是最典型的非毛细钎焊过程。

除了上述分类方法之外，人们还习惯于用被连接的母材种类来区分钎焊方法，如所谓铝钎焊、不锈钢钎焊、钛合金钎焊、高温合金钎焊、陶瓷钎焊、复合材料钎焊等。但当人们说银钎焊时，一般并不是指银母材的钎焊，而是指用银基钎料进行钎焊。对于铜钎焊的说法，也同样存在类似的情况。

0.3 钎焊的历史、发展及应用

钎焊具有悠久的历史，它是人类最早使用的材料连接方法之一。早在青铜器时代就已经出现了采用钎焊进行连接的物品。我国最早见诸于文献记载的是汉代班固所撰《汉书》中有云：“胡桐泪盲似眼泪也可以汗金银也今工匠皆用之”。明代宋应星所著《天工开物》中有“中华小钎用白铜末，大钎则竭力挥锤而强合之”的记载。明代方以智所撰《物理小识》云：“焊药以硼砂合铜为之，若以胡桐汁合银，坚如石。今玉石刀柄之类焊药，加银一分其中，则永不脱。试以圆盆口点焊药于其一隅，其药自走，周而环之，亦一奇也”。这一记述明确指出了铜钎焊应以硼砂做钎剂而银钎焊则可以胡桐树脂为钎剂，并且对钎料的填缝行为做了非常精彩的描述。

尽管钎焊技术出现很早，但其发展却是很缓慢的。进入 20 世纪后，其已经远远落后于熔焊技术。本世纪 30 年代后，随着冶金和化工等技术的不断进步，钎焊技术才获得了长足的发展并逐渐成为一种独立的工业生产技术。随着许多新的钎焊方法的出现，其应用也越来

越广泛。

目前在各工业生产部门和在日常生活中，使用钎焊技术的例子随处可见。例如：机械加工中的硬质合金刀具和钻探采掘用的钻头，有许多是用钎焊技术进行加工制造的；汽车和拖拉机的水箱和空调器、中冷器也多采用钎焊技术进行密封钎焊；家电行业中的电视机、收录机和电冰箱等也离不开钎焊技术；电工电子行业中的各种印制电路板的组装更是非钎焊技术不可。此外，在原子能工业、航空航天和仪器仪表等行业也都可以发现采用钎焊技术进行制造加工的产品。

与其它材料连接技术相比，钎焊技术有以下几方面的优点：

(1) 钎焊技术具有很高的生产效率 例如：原苏联制造的推力为750N的液体火箭发动机，其燃烧室内的钎缝长度达750m，可通过钎焊一次完成；又如：大型电子设备的印制电路板上可能有成千上万个焊点，也是采用钎焊方法一次完成连接的。

(2) 钎焊技术可完成高精度、复杂零件的连接 例如：采用接触反应钎焊方法连接铜质毫米波器件，取得了连接尺寸偏差小于0.02mm，钎缝圆角半径小于0.2mm的精度；又如：结构复杂、需要多次拼接的雷达微波器件，以及薄壁、密集安装的列管式航空散热器等产品，由于其空间可达性的限制，也只有采用钎焊方法才能实现优质连接。

(3) 钎焊技术对被连接母材具有广泛的适用性 钎焊技术不但可以连接常规金属材料，对于其它一些焊接方法难以连接的材料也可实现连接。此外，钎焊技术还可用于陶瓷、玻璃、石墨及金刚石等非金属材料的连接。

尽管钎焊方法与熔焊和压焊方法相比具有其自身的特点和优越性，但它也存在其固有的缺陷，例如：钎焊接头的强度一般比较低，耐热性能较差；并且由于较多地采用搭接接头，因而增加了母材的消耗量和结构的重量。因此，应根据产品的材质、结构特点和工作条件等因素，合理选择连接方法。对于那些要求精密、尺寸微小、结构复杂、接缝曲折可达性差以及涉及异种材料连接等问题的工件，应优先考虑采用钎焊方法焊接。

第1章 钎焊接头形成的基本原理

钎焊接头的形成是在一定的条件下，液态钎料自行流入固态母材之间的间隙，并依靠毛细作用力保持在间隙内，经冷却后，钎料凝固而形成的。因此，在钎焊接头的形成过程中，必然涉及到钎料在母材上的润湿与铺展、钎料的流动及毛细填缝等问题。

1.1 钎料的润湿与铺展

1.1.1 润湿与铺展

要使液态钎料填充到钎缝的毛细间隙中去，其前提条件是液态钎料必须能够良好地润湿母材。从化学热力学的角度来看，所谓润湿，是指由固-液相界面来取代固-气相界面，从而使体系的自由能降低的过程。换句话说，也就是液态钎料在与固态母材接触时，钎料将母材表面处的气体排开，沿着母材表面铺展，形成新的固体与液体界面的过程。

固体和液体的表面以及固-液相界面间都存在有表面张力或界面张力。严格地说，固体的表面张力应称为固-气界面张力，液体的表面张力应称为液-气相界面张力。它们与固-液相界面张力的相对大小决定了液态钎料在固态母材上润湿和铺展的行为。当构成这一系统的材料的物理化学性质不同时、所表现出的润湿和铺展情况也不相同。举例来说，在清洁的玻璃板上滴一滴水，水滴则可在玻璃板上完全铺展；如果滴的是一滴油，则油滴会形成一球块，发生有限铺展的情况；若滴一滴水银，则水银将形成一个球体在玻璃板上滚动。这种差异的产生是由于固-液相界面张力和液体表面张力的不同所造成的。对于体系铺展后的最终形状可由杨氏（Young）方程（或称润湿平衡方程）来描述（见图 1-1）：

$$\sigma_{sg} - \sigma_d - \sigma_{lg} \cos \theta = 0 \quad (1-1)$$

式中 σ_{sg} ——固-气相界面张力；

σ_{lg} ——液-气相界面张力；

σ_{sl} ——固-液相界面张力；

θ ——平衡状态下的接触角。

由杨氏方程可以推导出接触角与各界面张力的关系：

$$\cos\theta = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl})/\sigma_{lg} \quad (1-2)$$

接触角的大小表征了体系润湿与铺展能力的强弱。 $\theta = 0^\circ$ 时，称为完全润湿； $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时，称为润湿； $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时，称为不润湿； $\theta = 180^\circ$ 时，称为完全不润湿。

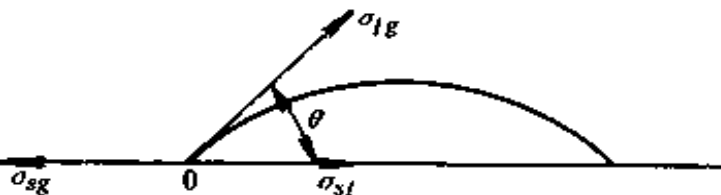


图 1-1 铺展时界面张力平衡示意图

钎焊时，液态钎料

对固态母材的润湿是最基本的过程。因此，要获得优质的钎焊接头，就必须保证液态钎料能良好地润湿母材，只有这样，钎料才能顺利填充钎缝间隙，所以，一般情况下希望液态钎料在母材上的接触角要小于 20° 。

1.1.2 影响钎料润湿性的因素

由式 (1-2) 可以看出，任何可以使润湿角 θ 减小，使固-气相界面张力 σ_{sg} 增大，或使固-液相界面张力 σ_{sl} 以及液-气相界面张力 σ_{lg} 减小的因素都可以改善钎料对母材的润湿性。 σ_{lg} 的减小意味着液体内部原子对表面原子的吸引力减弱，液体原子有趋向于表面并使表面积增大的趋势，因而可以促进润湿； σ_{sl} 下降则意味着固体原子对液体原子的吸引力增加，使液体原子被拉向固-液界面，因而也可以促进润湿。

在实际钎焊过程中，影响钎料润湿性的因素主要有以下几个方面：

1. 钎料和母材成分的影响

不同的材料具有不同的表面自由能。因此，当钎料和母材的成分发生变化时，其界面张力值必然发生变化，这将直接影响到钎料对母

材的润湿与铺展。一般来说,如果构成钎料和母材的各元素之间可以发生相互作用,形成固溶体、共晶体或金属间化合物,就会表现出良好的润湿性,反之,润湿性就较差。例如:Bi、Cd、Pb等元素与Fe之间基本上不存在明显的相互作用,因此,这些元素在Fe表面上表现为明显的不润湿;而Fe-Cu和Cu-Sn等体系,元素间存在较明显的相互作用,因而其润湿效果良好。又如:Cu和Pb之间无相互作用,因此Pb在Cu表面上表现为不润湿,当向Pb中加入Sn后,由于Sn和Cu之间存在相互作用,因此就可以发生润湿,并且,随着Sn含量的增加,润湿性也相应提高。图1-2给出了真空条件下Sn-Pb在Cu母材上的润湿情况。由图可见,当钎料成分发生变化时,其润湿角也发生变化。低Pb含量时的润湿角比高Pb含量时的大,并且以Sn-Pb共晶成分附近为最小。这是因为共晶成分的熔点最低,与给定实验温度的温差最大。但是如果钎料与母材间的相互作用太强,则由于钎料在充分铺展之前就已经与母材发生了过分的相互作用,使液态钎料的熔点升高及粘度增大,造成液态钎料的流动性降低,因而也会造成润湿性下降。

2. 温度的影响

对于大多数液体来说,其表面张力都表现为随温度的升高而降低。对于这一现象也可以从化学热力学的角度加以证明。在温度变化范围不大时,表面张力随温度的升高而呈线性下降。各种液态金属表

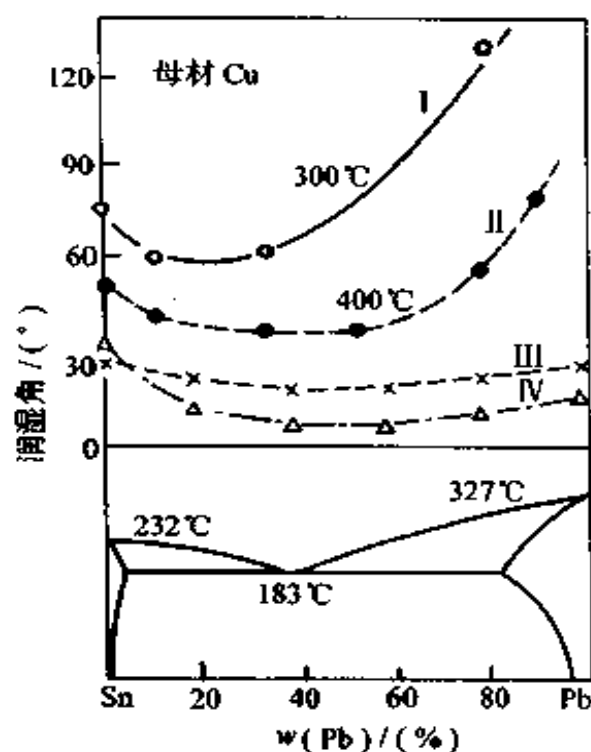


图 1-2 润湿角与 Sn-Pb 钎料成分的关系

I、II—真空中(熔融)

III、IV— $\text{ZnCl}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$ 共晶

III—液相 + 50°C

IV—III 凝固后

面张力随温度的变化大体上都可以归结为这种关系。图 1-3 为 Sn 的表面张力随温度变化的实测结果，可以看出，不同研究者的数据虽然并不相同，但都定性满足这种线性关系。

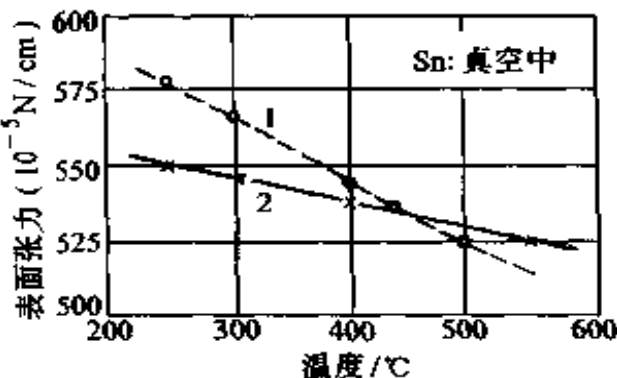


图 1-3 Sn 的表面张力随温度的变化

一般说来，温度越高，润湿效果就越好，铺展面积也就越大。但是，如果温度过高，就可能造成母材晶粒过分长大、过热、过烧等问题，并且，钎料的铺展能力过强时，容易造成钎料的过分流失，不易填满钎缝，同时也容易造成溶蚀等钎焊缺陷。因此，在实际钎焊过程中，钎焊温度不宜过高，一般常取为钎料液相线以上 20~40℃，或取为钎料熔点的 1.05~1.15 倍。

3. 金属表面氧化物的影响

在常规条件下，大多数金属表面都有一层氧化膜（物）。氧化物的熔点一般都比较低，在钎焊温度下为固态，其表面张力值很低，因此，钎焊时将导致 $\sigma_{\text{液}} < \sigma_{\text{固}}$ ，产生不润湿现象，表现为钎料成球，不铺展。

另外，许多钎料合金表面也存在一层氧化膜。当钎料熔化后被自身的氧化膜包裹，此时其与母材之间是两种固态的氧化膜在接触，因此产生不润湿。例如：当用 Al-Si 共晶钎料（熔点 577℃）置于 Al 母材（熔点 660℃）上加热到 600℃ 时，钎料熔化但不在母材表面上铺展。液态钎料因受固态氧化膜的制约而成为不规则球形。此时用钢针刺入钎料并刺破表面的氧化膜，钎料就会在母材 Al 与其表面的 Al_2O_3 膜之间铺展，从而将 Al_2O_3 膜“抬起”，形成所谓的“皮下潜流”现象。所以在钎焊过程中必须采取适当的措施来去除母材和钎料表面的氧化膜，以改善钎料对母材的润湿。

4. 钎剂的影响

去除氧化膜最有效的方法是采用钎剂。当用钎剂去除了母材和钎

料表面的氧化膜后，液态钎料就可以和母材金属直接接触，从而改善润湿。另外，当母材和钎料表面覆盖了一层液态钎剂后，系统的界面张力就发生了变化（见图 1-4），当铺展达到平衡时，由杨氏方程有：

$$\sigma_{sf} - \sigma_{sl} - \sigma_{lf} \cos \theta = 0 \quad (1-3)$$

$$\cos \theta = (\sigma_{sf} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lf} \quad (1-4)$$

式中 σ_{sl} ——母材与钎剂间的界面张力；

σ_{sl} ——母材与钎料间的界面张力；

σ_{lf} ——钎剂与钎料间的界面张力。

与无钎剂时相比，只要满足 $\sigma_{lf} < \sigma_{sl}$ 或 $\sigma_{sf} > \sigma_{sl}$ ，就可以增强钎料对母材的润湿。同样，钎剂成分的变化将造成 σ_{lf} 和 σ_{sl} 的变化，从而也会影响到钎料对母材的润湿性。

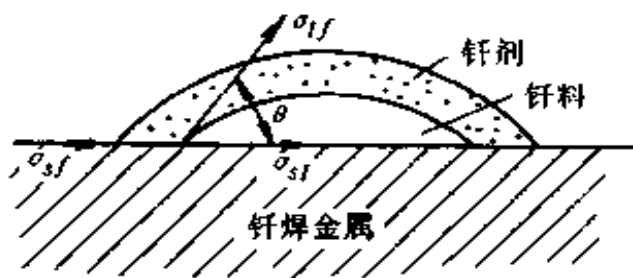


图 1-4 使用钎剂使母材表面上液态钎料所受的界面张力

5. 母材表面状态的影响

母材的表面粗糙度在许多情况下会影响到钎料对它的润湿。在实际钎焊过程中，不同

钎料在不同状态的表面上的润湿情况也确实不同。如：将 Cu 和 LF21 铝合金的圆片分成四分，各部分分别采用抛光、钢丝刷刷、砂纸打磨和化学清洗的方法来处理。在 Cu 片中心位置放 S-Sn60 Pb40 钎料，在 LF21 铝合金片中心放置 S-Sn80 Zn20 钎料进行铺展实验。实验结果表明：在 Cu 试片上以钢丝刷刷过的区域处铺展面积最大，抛光区域处的铺展面积最小；但在 LF21 铝合金试片上，各部分的铺展面积几乎相同。铜试片上铺展面积的差异显然是由于不同的表面处理方法产生不同的表面粗糙度，从而影响到其铺展面积。而对 LF21 铝合金来说，由于 S-Sn80 Zn20 钎料与母材之间的相互作用十分强烈，母材的显微不平处迅速溶解进入钎料，从而降低了表面粗糙度的影响，使得各部分的铺展面积基本相同。

Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上的铺展与锡-铅钎料在铜上的情况

类似（见图 1-5），在酸洗过的表面上铺展面积最大，而在抛光表面上最小。

1.2 液态钎料的毛细填充过程

钎料可以润湿母材仅仅是完成钎焊连接的一个最基本的前提条件。要获得优质的钎焊接头，需要保证液态钎料能够自动地流入到钎缝间隙中去，这样才能完成两构件之间的连接。液态钎料自动填充间隙的作用力来源于毛细作用，毛细作用是液体在狭窄间隙中流动时所表现出来的固有特性。举例来说，当将两块相互平行的金属板垂直插入到液态钎料中时，由于毛细作用的存在，金属板间隙内部液态钎料液面的高度将不同于板外侧的液面高度。如果液态钎料可以润湿金属板，则间隙内的液面高度将比板外侧的高（见图 1-6a）。反之，板外侧的液面高度就会比间隙内高（见图 1-6b）。

对于毛细作用的强弱可以用间隙内液面的爬升高度值来评价。液态钎料在处于垂直位置的平行间隙中的最大爬升高度，在假设金属板无限大，钎料量无限多的前提下，可以按照式（1-5）来计算

$$h = 2(\sigma_{\text{sg}} - \sigma_{\text{sl}}) / \rho g a$$

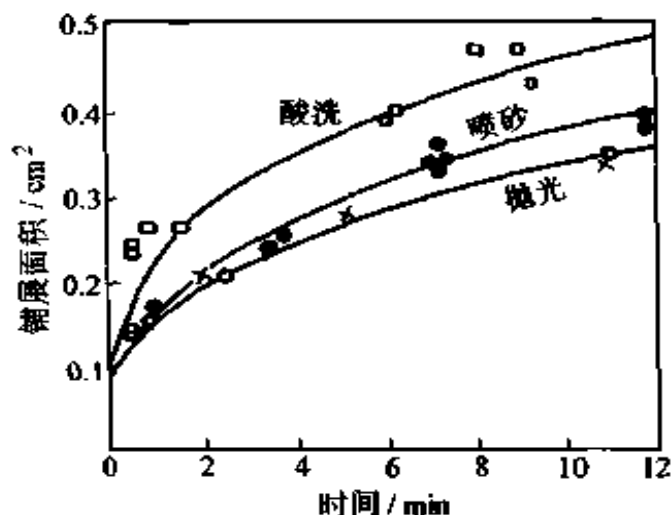


图 1-5 表面处理对 Ag-20Pd-5Mn 钎料在不锈钢上铺展面积的影响

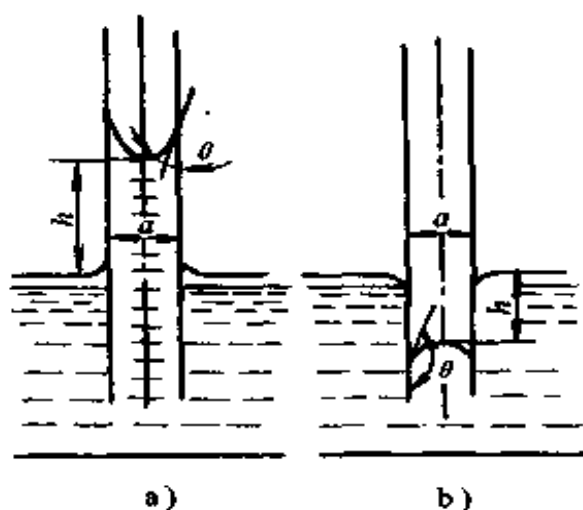


图 1-6 平行板间液体的毛细作用

a) 钎料润湿母材

b) 钎料不润湿母材

$$= 2\sigma_k \cos\theta / \rho g a \quad (1-5)$$

式中 h ——钎料最大爬升高度, $h > 0$ 表示间隙内液面升高, $h < 0$ 表示间隙内液面降低;

a ——平行板的间隙;

ρ ——液态钎料的密度;

g ——重力加速度。

由上式可以看出, 液态钎料的爬升高度与液-气相界面张力 σ_k 及润湿角的余弦值 $\cos\theta$ 成正比, 而与间隙的大小 a 成反比。也就是说, 润湿性越好和间隙值越小时、爬升高度就越大, 反之, 爬升高度就越低。进一步分析还可以看出, 液态钎料有优先填充微小间隙的倾向, 对于不平行的间隙来说, 液态钎料将首先填充小间隙部分, 然后再从小间隙处向大间隙部分推进, 这一点已为实验所证实。

在实际钎焊过程中, 钎缝可能处于水平或倾斜等各种位置, 但不论钎缝处于何种位置, 液态钎料优先填充小间隙部位这一特点始终是成立的。例如, 在由理想表面构成平行水平间隙时, 钎料的流动前沿是平齐的, 而在由实际表面构成的水平位置平行间隙内, 由于表面粗糙度的影响, 使得间隙内各处的实际值的大小不同, 因而造成钎料流动前沿紊乱。

对于在钎缝间隙内预置钎料片的情形(见图 1-7a), 润湿和毛细作用仍具有重要的意义。当钎料对母材润湿性良好, 并且钎缝间隙适宜的情况下, 熔融钎料可以填满钎缝间隙并在钎缝周围形成圆角(见图 1-7b)。如果润湿性不好, 则会造成填缝不良, 同时也无优良圆角形成。如果钎料对母材完全不润湿, 则液态钎料就会

从间隙中流出并形成钎料球(见图 1-7c), 因而不能形成钎焊接头。

应当指出的是, 在实际钎焊过程中, 液态钎料的流动和爬升并不是在瞬间完成的, 而需要一定的时间。液态钎料在毛细力作用下的流

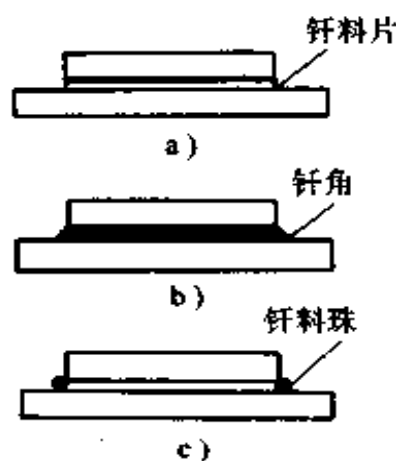


图 1-7 预置钎料时的润湿情况

a) 预置钎料 b) 润湿性好
c) 润湿性差

动速度 v 可表示为:

$$v = \sigma_g a \cos\theta / 4\eta h \quad (1-6)$$

式中 η ——液态钎料的粘度。

粘度的增加将使液态钎料的流动速度降低,这一点是显而易见的。润湿角增大,意味着钎料对母材的润湿性变差,这也将降低液态钎料的流动速度。此外钎料的爬升高度 h 与流动速度成反比,由此可以预见,在液态钎料填缝的初期,填缝速度较快,而随着填缝过程的逐渐进行,速度会逐渐减慢。因此,要保证钎料填满钎缝间隙,就需要有足够长的保温时间。

1.3 钎料与母材间的相互作用

钎焊过程中,液态钎料在毛细填缝的同时就与母材发生相互作用,这种相互作用的推动力则来源于钎料与母材间的浓度梯度所造成的扩散。可以将这种相互作用分为两类:一是母材向液态钎料中的溶解;二是钎料组分向母材中的扩散。这些相互作用的结果会对钎焊接头的性能产生很大影响,因此有必要分析其作用的规律。

1.3.1 母材向液态钎料中的溶解

在钎焊过程中,溶解现象是普遍存在的。例如:在 1150°C 下用 Cu 作为钎料来钎焊钢时,钎缝中的 Fe 的质量分数可以达到 4.7%;当在 250°C 下用 Sn-Pb 钎料钎焊 Cu 时,可在钎缝中发现块状金属间化合物 Cu_6Sn_5 。又如:电子整机厂的钎焊工使用的电烙铁经常出现“缺口”“咬牙”等现象,这就是铜质的烙铁头向钎料中溶解所造成的。

一般来说,母材适量地溶解,可以改变钎缝的组织成分,对钎料成分起合金化作用,有利于提高钎焊接头的强度。而母材过度溶解,会使液态钎料的熔点和粘度升高,流动性变差,造成不能填满钎缝间隙而形成未钎透缺陷。也有可能使母材表面出现溶蚀缺陷,严重时甚至造成母材溶穿。

在钎焊过程中,影响母材向液态钎料中溶解的因素大体上可以分为材料因素和工艺因素两类。

(1) 材料因素 所谓材料因素是指与母材和钎料的物性相关联的影响溶解过程的因素。可以想象，不同成分的母材或母材的不同组分在不同成分的液态钎料中的溶解情况显然是不同的。这种差异则主要取决于母材组分在液态钎料中的极限溶解度和极限固溶度。对此可以简单的二元共晶相图为例来加以定性的分析。

若母材 A 与钎料 B 构成如图 1-8 所示的简单共晶相图，即二者在固态下无互溶，在液态下完全互溶，

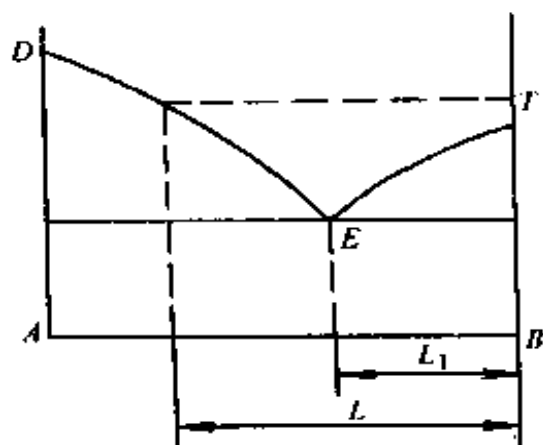


图 1-8 简单共晶类型相图

则在钎焊温度为 T 时，A 在 B 中的最大溶解量取决于 A 在 B 中的极限溶解度（线段 L ），极限溶解度越大，溶解量越多。共晶点 E 越靠近母材 A，则 DE 线段就越倾斜， L 就越长，A 的溶解量也就越大。如果用 AB 的共晶合金 E 作为钎料来钎焊 A，则在钎焊温度 T 时，A 在共晶钎料中的溶解量就取决于线段 $(L - L_1)$ 的长度。此时可以认为是钎料中已经预先溶解了“ L_1 ”这么多的 A。所以此时的最大溶解量为 $(L - L_1)$ 。若共晶点 E 越靠近母材 A，则 $(L - L_1)$ 线段就越短，A 的溶解量就越少。

因此，为减少母材的溶解，可以在钎料中加入母材金属的组分。例如在 Sn-Pb 钎料中加入少量的 Cu 或 Ag，就可以减弱母材中 Cu 或 Ag 向钎料中的溶解。

(2) 工艺因素

1) 温度的影响。溶解速度与温度之间存在着如图 1-9 所示的关系，一般来说，随着钎焊温度的升高，母材在钎料中的溶解速度将增加，因而单位时间内的溶解量增加（见图 1-9a）。如果钎焊时在母材与钎料的交界面上形成金属间化合物，则溶解速度与温度之间就存在如图 1-9b 所示的关系，总体趋势仍表现为温度升高使溶解速度升高，但在某一温度区间内会出现溶解速度下降的现象。图 1-10 所示的铜在锡中的溶解速度曲线表现为在温度低于 340°C 时，随着温度的升

高, 溶解速度增大。在 $340 \sim 410^{\circ}\text{C}$ 之间, 随着温度的升高, 溶解速度减小。正是在这一温度区间内, 在界面处开始形成金属间化合物, 而化合物层的出现, 阻碍了母材向钎料中的扩散, 因而使溶解速度降低。当温度超过 410°C 时, 界面处形成的化合物层已经具有了一定的厚度, 此时的溶解已经表现为化合物层向液态钎料中的溶解, 因此溶解速度又表现为随着温度的升高而继续增大。

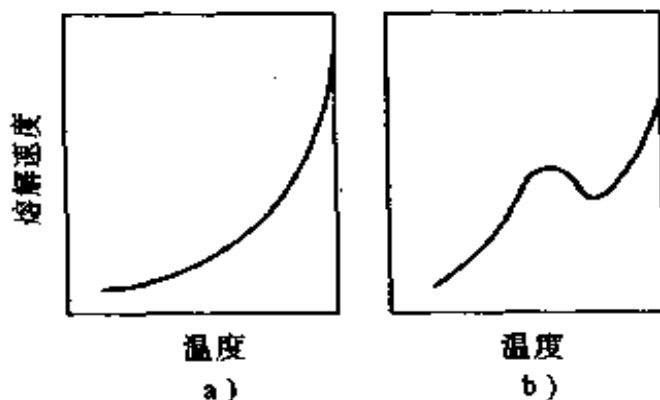


图 1-9 母材的溶解速度与温度的关系

2) 加热保温时间的影响。一般来说, 在达到极限溶解度之前, 溶解量是随着保温时间的延长而增加的, 并且增加量基本上满足抛物线规律。即增加量与时间的平方根成正比。图 1-11 给出了铜在液态锌中的溶解情况。

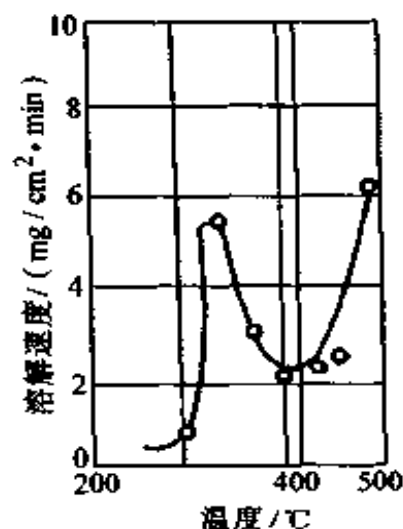


图 1-10 铜在锌中的溶解速度曲线

3) 钎料量的影响。显而易见的是钎料量的增加将导致溶解量的增加。这也说明为什么在熔融钎料中进行浸渍钎焊时易于发生溶蚀, 而在钎缝间隙较小的情况下, 母材的溶解很快就达到饱和状态。

通过上述分析可以看出, 母材的溶解与钎料的成分及其与母材的组配情况和与钎焊工艺参数之间存在着密切的关系, 因此要控制母材的溶解, 就要选择适当的钎料并选择合理的工艺参数。

1.3.2 钎料向固态母材中的扩散

钎焊过程中, 在钎料润湿母材的同时就伴有扩散现象的发生。并且在此后的过程中扩散过程将继续进行。扩散本身是一种物质传输过程, 在金属与合金的晶体中, 原子由于热运动而导致其位置的转移。

在存在浓度梯度和化学位梯度的情况下，原子的热运动可以造成物质的宏观流动，这种现象称之为扩散。

一般来说，扩散现象可以分成自扩散和互扩散两类。所谓自扩散是指不伴有浓度梯度变化的扩散，这类扩散与浓度梯度无关，只发生在纯金属和均匀固溶体中。例如在纯金属晶粒长大时，大晶粒逐渐吞并小晶粒，从晶界的移动就可以看出金属原子从小晶粒向大晶粒迁移。在此过程中并不伴有浓度的变化，其推动力是界面能的降低，这一过程就是所谓的自扩散过程。

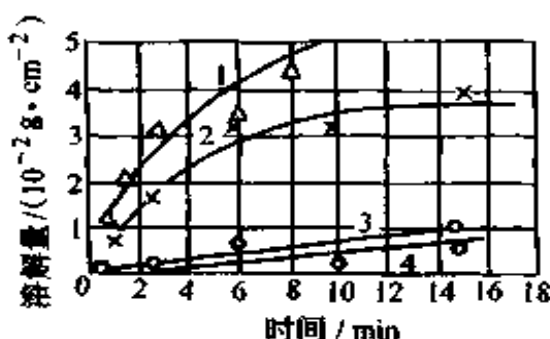


图 1-11 铜在液态锌中的溶解

1—620℃ 2—580℃ 3—480℃
4—440℃

互扩散是伴有浓度梯度变化的扩散，它与异种原子的浓度差有关。在互扩散过程中，异种原子相互扩散，互相渗透，所以又叫做“异扩散”或“化学扩散”。互扩散又可分为“下坡扩散”和“上坡扩散”。前者是指沿浓度梯度下降方向进行扩散，其结果使浓度趋于均匀化；后者则是指沿浓度梯度升高的方向扩散，即由低浓度向高浓度方向扩散，其结果是使浓度发生两极分化。

互扩散还可以分成“原子扩散”和“反应扩散”两类。如果在扩散过程中，基体晶格始终不变，没有新相生成，这种扩散就称为原子扩散。反之，在扩散过程中，当浓度变化到一定程度时造成了基体晶格的转变或形成新相，这样的扩散就称之为反应扩散。

如果按照扩散优先发生的部位来划分，又可分为晶内扩散、晶界扩散和表面扩散等。

根据扩散定律，钎焊时钎料向母材中的扩散可确定如下：

$$dm = -DS(dC/dx)dt \quad (1-7)$$

式中 dm ——钎料组分的扩散量；

D ——扩散系数；

S ——扩散面积；

dC/dx ——在扩散方向上扩散组分的浓度梯度；

dt ——扩散时间。

由上式可见，钎料组分的扩散量与浓度梯度、扩散系数、扩散时间和扩散面积有关。扩散自高浓度向低浓度方向进行，当钎料中某组元的含量比母材中高时，由于存在浓度梯度，就会发生该组元向母材金属中的扩散。浓度梯度越大，扩散量就越多。

用铜钎焊铁时，会发生液态铜向铁中的扩散。图 1-12 给出了在 1100℃ 下 Cu 在 Fe 中的分布。随着保温时间的延长，不但 Cu 的扩散深度增大，而且扩散层中的 Cu 含量也增多。用 Al-28Cu-6Si 钎料钎焊 Al 时，也可发现钎料组分向母材铝合金中扩散的现象（见图 1-13）。在钎缝中靠近界面处的母

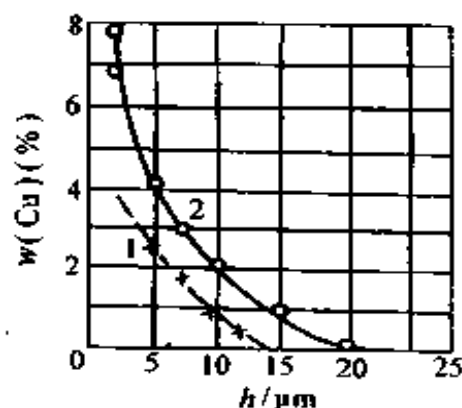


图 1-12 铜钎焊铁时，铜在扩散区中的分布

1—保温 1min 2—保温 1h

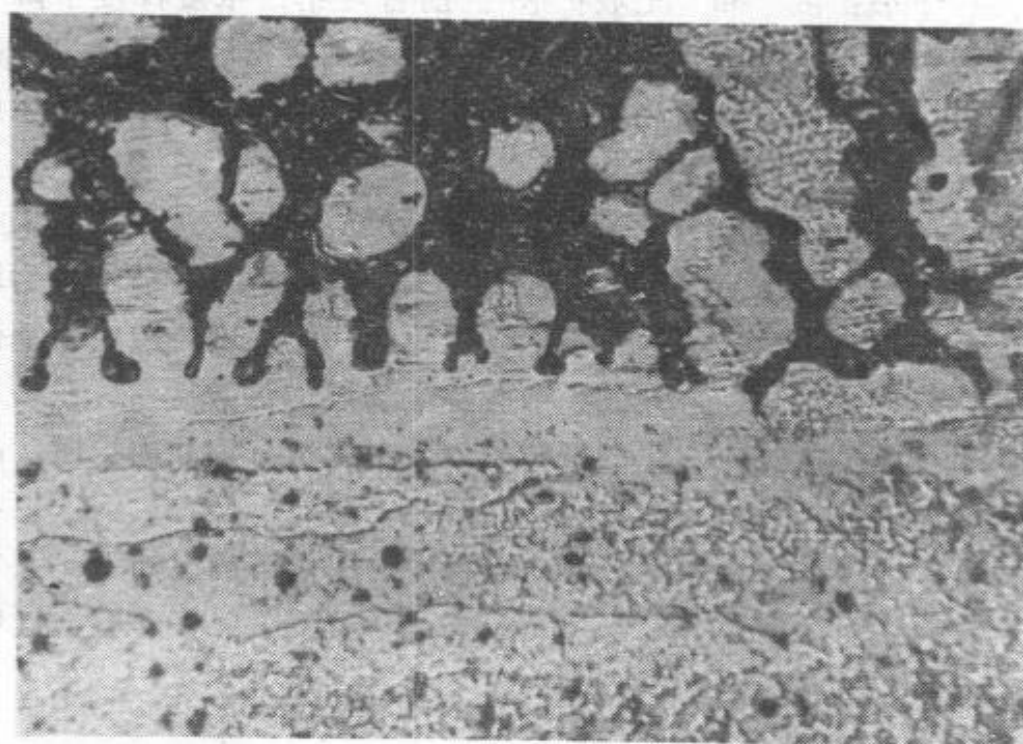


图 1-13 Al-28Cu-6Si 钎料钎焊铝合金时的金相组织

材上可以看到一条与钎缝平行的明亮条带，它是钎焊时液态钎料中的 Si 和 Cu 向母材 Al 中扩散而形成的固溶体。

上述扩散现象均为晶内扩散，或称为体扩散。如果扩散进入母材的钎料组分浓度在饱和溶解度之内，则形成固溶体组织，这对接头的性能没有不良影响。若冷却时扩散区发生相变，则组织会产生相应的变化，并因此而影响到接头的性能。

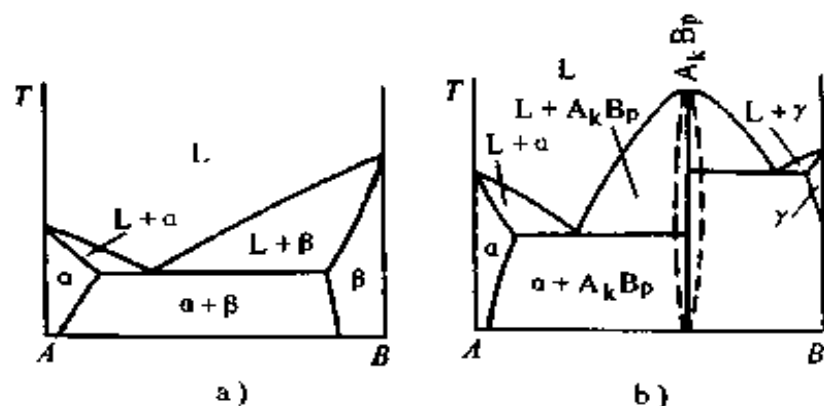


图 1-14 产生晶间渗入的钎料与母材系统的典型相图

a) 简单共晶型 b) 存在中间相型

除了体扩散之外，钎焊时也可能发生钎料组分向母材的晶间渗入的情况。表 1-1 给出了几种钎焊接头出现晶间渗入的实例。由表可见，钎料和母材所构成的相图中都具有低熔点共晶体（见图 1-14a 和 b）。晶间渗入的产生是因为在液态钎料与母材接触中，钎料组分向母

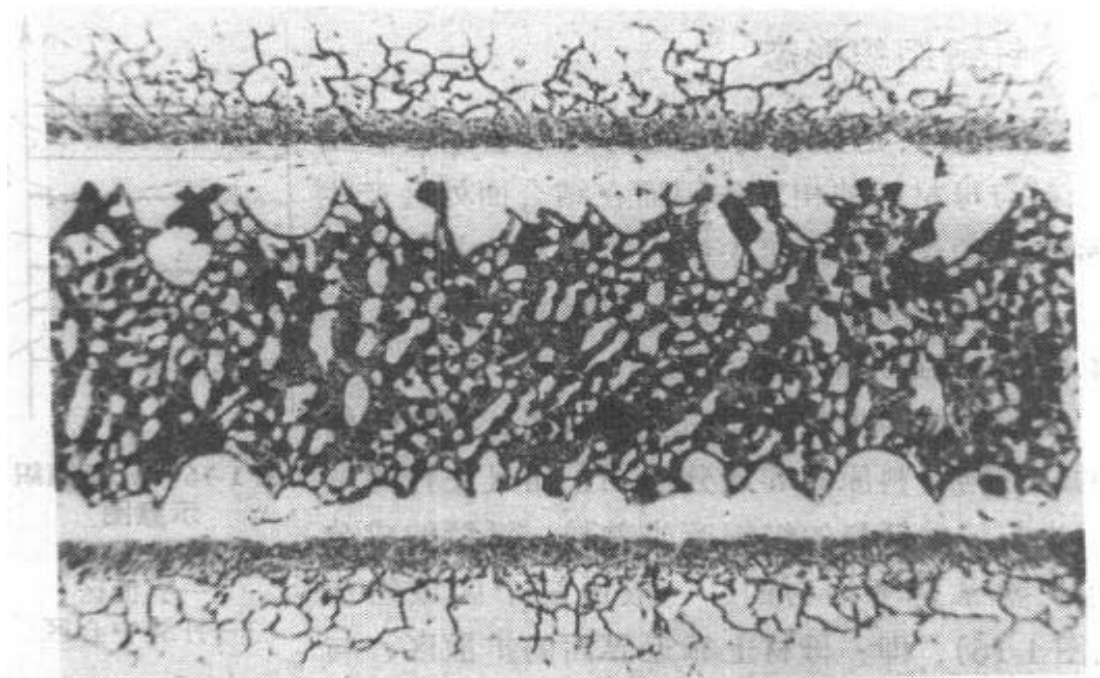


图 1-15 含硼镍基钎料钎焊不锈钢时的晶间渗入

材中扩散, 由于晶界处空隙较多, 扩散速度较快, 结果造成了在晶界处首先形成钎料组分与母材金属的低熔点共晶体。由于其熔点低于钎焊温度, 这样就在晶界处形成了一层液态层, 这就是所谓的晶间渗入。

当采用含硼镍基钎料钎焊不锈钢和高温合金时, 就可能发生硼向母材晶间渗入的情况(见图 1-15)。晶间渗入的产物大都比较脆, 会对钎焊接头产生极为不利的影响, 尤其是在钎焊薄件时, 晶间渗入可能贯穿整个焊件厚度而使接头脆化, 因此应尽量避免接头中产生晶间渗入。

表 1-1 几种钎料-母材系统中出现的晶间渗入

母材	钎料	系 统	相图类型	钎料在母材中的溶解度 ^① (%)	晶间渗入情况
Zn	Sn	Zn-Sn	图 1-14a	~0.1	中等
Bi	Sn	Bi-Sn	图 1-14a	~0.1	中等
Ni	Ni-4B	Ni-B	图 1-14b	0	强烈
Ni	Ni-3Be	Ni-Be	图 1-14b	2.7	中等
Cu	Ni-8P	Cu-P	图 1-14b	1.75	中等

① 指质量分数。

1.4 钎缝组织形态

钎焊接头是异种材料之间的冶金结合, 由于钎料与母材间的相互作用而在结合面处会产生各种各样的现象, 给接头组织带来各种各样的变化, 并对接头的性能产生很大的影响。

1.4.1 钎缝组织的不均匀性

由于钎料与母材之间的相互作用, 不但使钎缝的成分与钎料原有的成分不同, 而且使钎缝的组织也与原始钎料的组织产生差异。钎缝的成分和组织常常是不均匀的, 一般由三个区域组成(见图 1-16), 即: 母材上靠近界面的扩散区, 与

之相邻的钎缝界面区和钎缝中心区。扩散区是由钎料组分向母材中扩

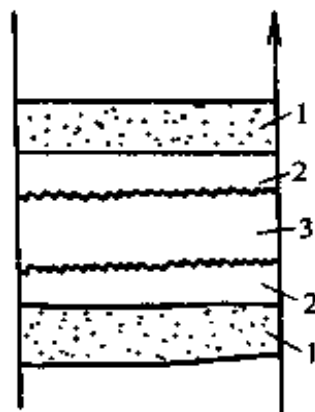


图 1-16 钎缝组织示意图

1—扩散区
2—界面区
3—钎缝中心区

散所形成的：界面区是母材组分向钎料中溶解并冷却后形成的，它可能是固溶体或金属间化合物；钎缝中心区由于母材的溶解和钎料组分的扩散以及结晶时的偏析，其组织也不同与钎料的原始组织成分，钎缝间隙较大时，该区的组织形态与钎料原始组织形态比较接近，而间隙小时，则二者之间可能存在极大的差别。例如：用 Ni-Cr-B-Si 钎料钎焊不锈钢的小间隙钎缝时，钎料本身为包晶组织，而钎缝却由固溶体组成（见图 1-17）。

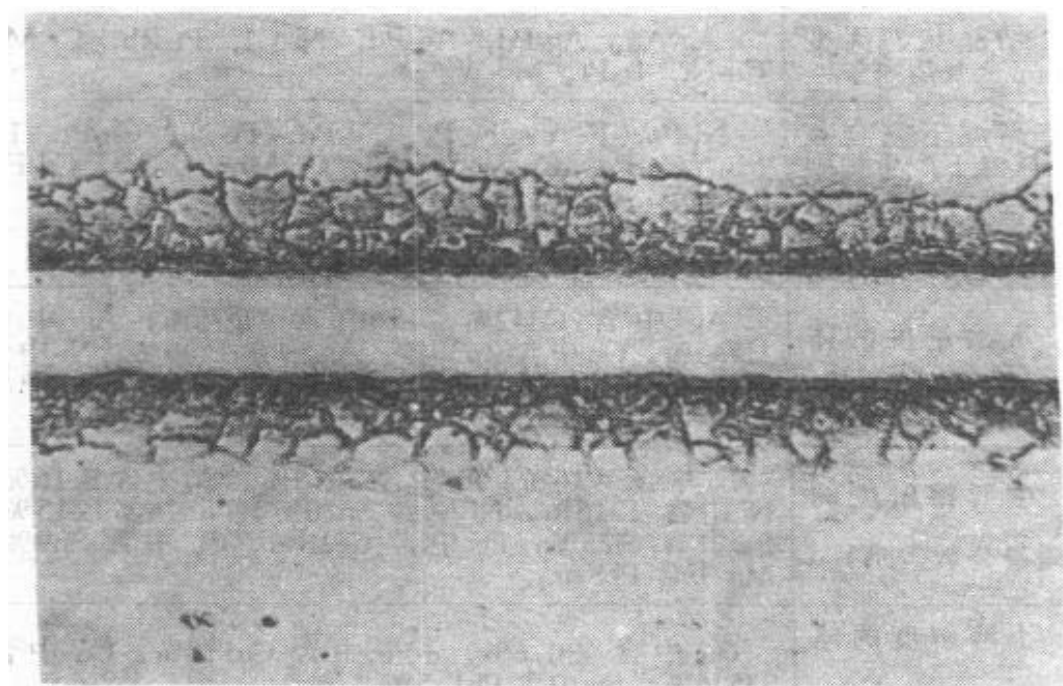


图 1-17 用 Ni-Cr-B-Si 钎料钎焊不锈钢小间隙钎缝的显微组织（晶间渗入）
(1160℃, 10min, 150×)

1.4.2 结合区的组织形态

母材与钎料的结合可以形成多种多样的组织形态。在构成钎缝的三个区域中，界面区的情况是最复杂的，并且加热温度和加热时间等因素的影响使其进一步复杂化，并且对接头的性能也产生很大的影响。

考虑钎焊中最简单的形式，即用纯金属钎料来钎焊纯金属母材，并且两被连接工件的材质相同的情形。此时尽管存在两个相邻的界面，但其情况和条件相同，故考虑一侧界面的情况即可。对于这种体

系，由于发生了固-液相金属（母材与钎料）之间的溶解和扩散，所以界面处就表现出二元合金相图所规定的关系。因此，可以将母材与钎料所构成的二元相图进行分类，来阐述其性质。表 1-2 给出了一些二元系的相互溶解度的对比情况。当然，实际钎缝的成分常常是多元的，因而对其情况要综合考虑具体分析。

表 1-2 二元合金系的相互溶解度

溶解度特征	二 元 系
1. 结晶状态无变化的完全互溶系	Ag-Au, Ag-Pd, Au-Pd, Ni-Pd, Pt-Rh, Cr-Mo, Cu-Ni, Ir-Pt, Mo-W
2. 高温下完全互溶，低温下产生规则或不规则变态和同素异构转变或形成化合物的体系	Ni-Pt, Fe-V, Fe-Pt, Fe-Pd, Fe-Ni, Cu-Pt, Fe-Mn, Cu-Pd, Cr-Fe, Co-Ni, Cu-Mn, Co-Fe, Cd-Fe, Cd-Mg, Au-Pt, Au-Cu, Ni-Mn
3. 大溶解度的体系 (用质量分数表示)	Ag 中含 Cd42%, Li 中含 Hg75%, Ag 中含 Hg36%, Cu 中含 Zn38%, Ag 中含 Pt40%, Ni 中含 Zn40%, Al 中含 Zn66%, Cr 中含 Ni47%, Pb 中含 In67%,
4. 中等溶解度的体系 (用质量分数表示)	Ni 中含 W16%, Fe 中含 Zn18%, Cu 中含 Be16%, Ni 中含 Ta16%, Ni 中含 Sn10%, Ni 中含 Be15%, Fe 中含 Si25%, Fe 中含 Ge18%, Cu 中含 Sn9%, Mg 中含 Pb8%
5. 小溶解度的体系 (用质量分数表示)	Cu 中含 Zn0.6%, α -Fe 中含 Cu1.2%, Cu 中含 Ti5.6%, Sn 中含 Pb1.5%
6. 极小溶解度的体系	W 中含 Ni, Sn 中含 Ni, Si 中含 Ni, Zn 中含 Mn, Zn 中含 Mg, Sn 中含 Mg, Ni 中含 Mg, Cu 中含 B

1.4.2.1 固溶体类型的界面区组织

结晶系相同（晶格类型相同），原子半径相近的元素间大多可以以任意比例固溶，这类金属间的界面成分从一侧到另一侧连续变化。图 1-18 给出了 Ni-Cu 二元系的相图。Ni-Cu 系的熔化温度连续变化，浓度也连续变化，在一个大晶粒内部的浓度也有所变化，其过渡区呈现出特殊的嵌镶结构。

当钎料与母材为同基的合金时，在界面区也常常形成固溶体组

织。例如:当采用 Al-11.7Si 钎料钎焊 Al 合金时,钎料本身虽然是共晶体,但界面区却可以得到固溶体组织。这是因为在钎焊过程发生 Al 的溶解,使与母材相接触的钎料层中的 Al 含量增加。在 600℃ 进行钎焊时,Al 的质量分数可达 90% 左右(见图 1-19),冷却凝固时,首先从母材表面处开始结晶,而最先结晶出来的是 α 固溶体,最后才是共晶体。因此,可以看出界面区为一层参差不齐地向钎料方向生长的 Si 在 Al 中的固溶体组织。在钎缝中心区则仍保留着原始钎料的共晶组织,但也会出现少量的固溶体相(见图 1-20)。

当用黄铜钎料钎焊铜材时,还可以看到黄铜晶粒在铜晶粒的基础上连续生长,形成共同晶粒的现象。

一般来说,晶体结构和原子状态越类似,原子半径和原子价越接近,固溶体的比例就越大。正离子半径大的元素容易固溶原子半径小的元素。在钎焊过程中,如果钎料和母材在相图上可以形成固溶体时,钎后的界面区也极可能出现固溶体。固溶体组织的机械性能和电气性能与母材相比没有很大的不连续性,这对接头是有利的。

1.4.2.2 共晶体类型的界面区组织

如果母材和钎料构成共晶体相图的话,那么钎缝中就可能出现共晶体组织。图 1-21 给出了三种二元合金系的共晶相图。接头处啮合组织的疏密是由共晶点的位置来决定的。这一现象与机械啮合的结合

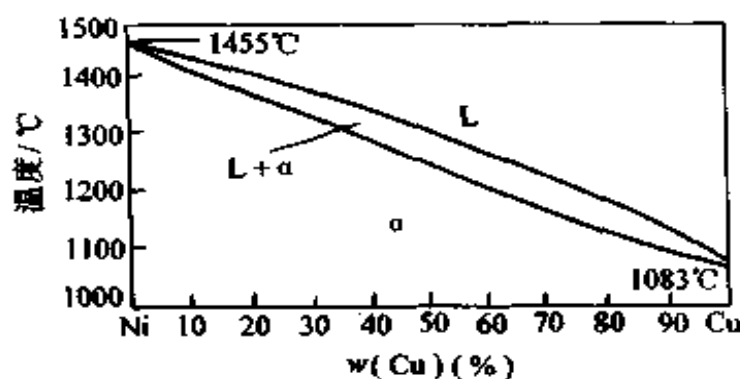


图 1-18 铜-镍二元合金相图

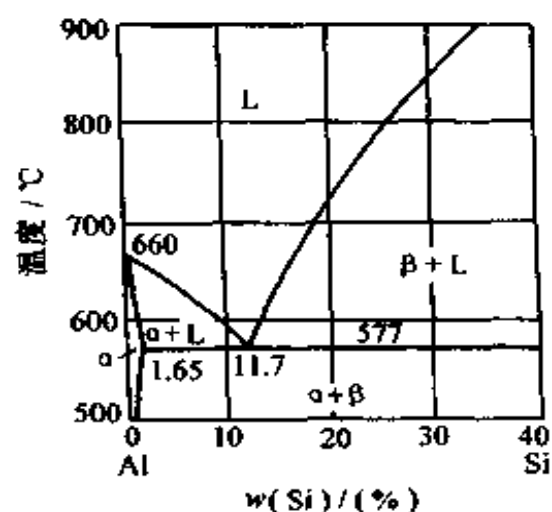


图 1-19 Al-Si 二元合金相图

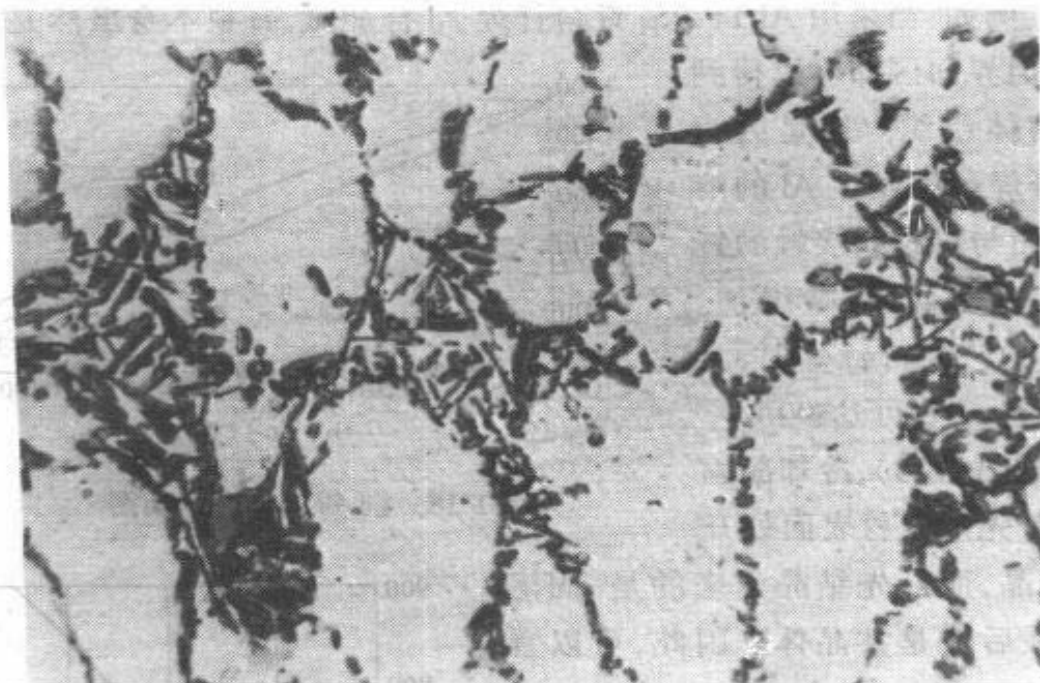


图 1-20 Al-Si 钎焊铝时的组织形态

(Al-Si 钎焊铝合金的钎缝组织、600℃、10min、150×)

力有关。实际上, Al 与 Sn 并不结合, 这类金属接触时, 在其共晶温度下就开始熔化, 可以认为, 共晶温度比组成金属的熔点越低, 相互作用就越大。而 Al-Sn 的共晶温度仅比 Sn 的熔点低 3℃, 因此不可能得到强有力的接头。

对于母材和钎料可以形成共晶体的体系, 钎焊时, 加热温度

不必高于其某一组元的熔点, 而只要高于其共晶点即可进行。这种利

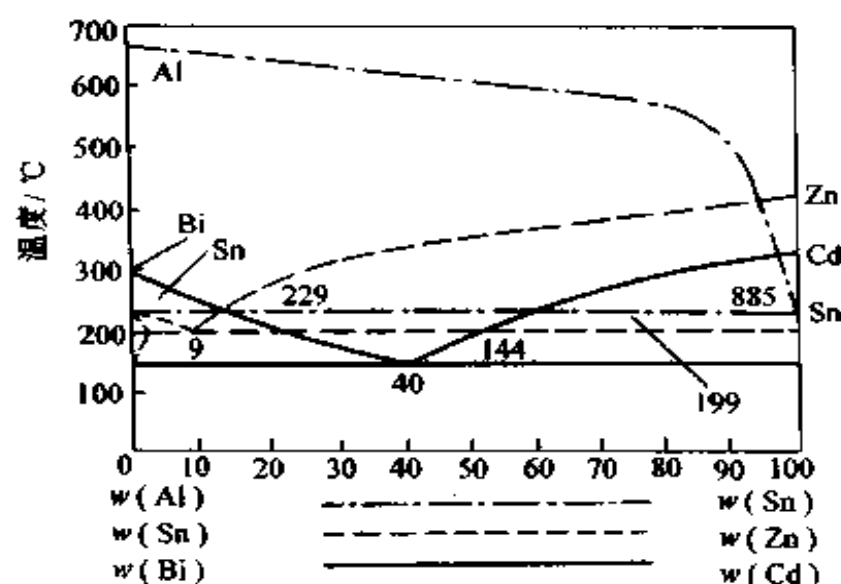


图 1-21 典型二元合金共晶类型相图

用钎料与母材的接触溶解而形成共晶体钎焊接头的方法被称之为接触反应钎焊。例如：Ag-Cu 二元系在 $W(\text{Cu}) 28\%$ 时形成熔点为 779°C 的共晶（Ag 的熔点为 960°C ，Cu 的熔点为 1083°C ），因此可利用这一特点来进行接触反应钎焊。如将一 Ag 箔置于两铜工件之间，稍加压力使之良好接触，然后加热到 800°C 左右。这时 Ag 虽然不能熔化，但由于 Ag 和 Cu 之间的相互扩散，在界面处形成熔融的 Ag-Cu 共晶体，借助与这层液态共晶体层，就可将两 Cu 工件连接起来。又如，在 Al-Cu 二元系中，存在一温度为 548°C 、成分为 Cu 的质量分数为 33% 的共晶点。如果将 Cu 和 Al 紧密接触并加热到 548°C 以上，在界面处就会形成 Al-Cu 共晶，从而将 Al 和 Cu 连接起来。

1.4.2.3 金属间化合物类型的界面区组织

许多金属之间可以形成金属间化合物，这种化合物不能用普通化学的原子价概念来解释，其成分也不能用化学计量来确定。两种金属结合时，如果在界面处形成金属间化合物相，就如同一种新的物质（新相）在被连接金属之间起作用。

母材和钎料在界面处形成化合物的过程可能如下：在温度为 T 时以 B 钎焊 A，A 向 B 中迅速溶解，界面区的浓度可达到 C ，冷却凝固时，首先在界面处析出金属间化合物。例如： 250°C 下以 Sn 钎焊 Cu 时，在界面区就形成 Cu_6Sn_5 化合物相（见图 1-22）。如果 A-B 体系存在几种化合物，在一定条件下（如钎焊温度过高），母材向钎料中的溶解使得界面区生成含母材成分较少的一种化合物后仍未达到该温度下的平衡状态，则 A 和 B 之间将继续扩散，冷却凝固后就有可能出现几种化合物。例如在 350°C 下用 Sn 钎焊 Cu 时，在界面区除形成 Cu_6Sn_5 (η 相) 之外，在 η 与母材 Cu 间又出现了 Cu_3Sn (ϵ 相)。 ϵ 相是含 Cu 较高的化合物。

除了上述的扩散作用之外，界面区的化合物也可能直接由母材与钎料发生化学反应而形成。

钎焊时，母材 A 和钎料 B 可能形成化合物的典型相图如 1-25a 和 b 所示。属于图 a 类型的有 Ag-Cd, Ag-Ca, Ag-Ti, Ag-Sb, Ag-Zn, Ag-Sn, Ag-Al, Al-Ti, Cu-Zn, Fe-Zn 等二元系；属于图 b 类型的有：

Al-Cu, Al-Mg, Cu-P, Fe-Si, Ti-Sn 等二元系。

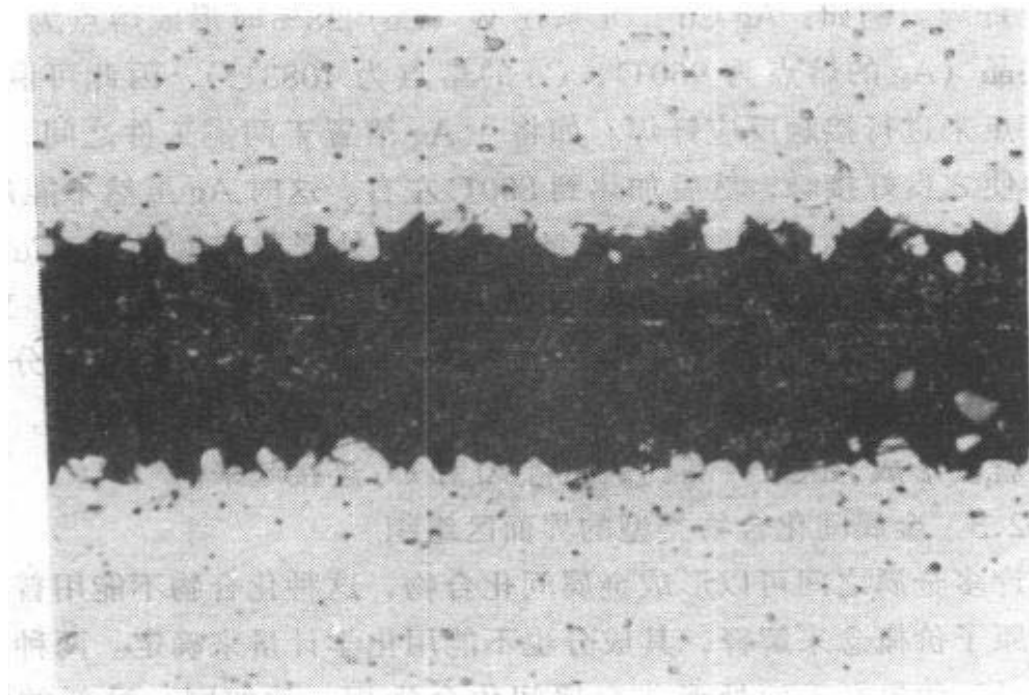


图 1-22 锡钎焊铜时的化合物组织

(2509℃, 10min, 150×)

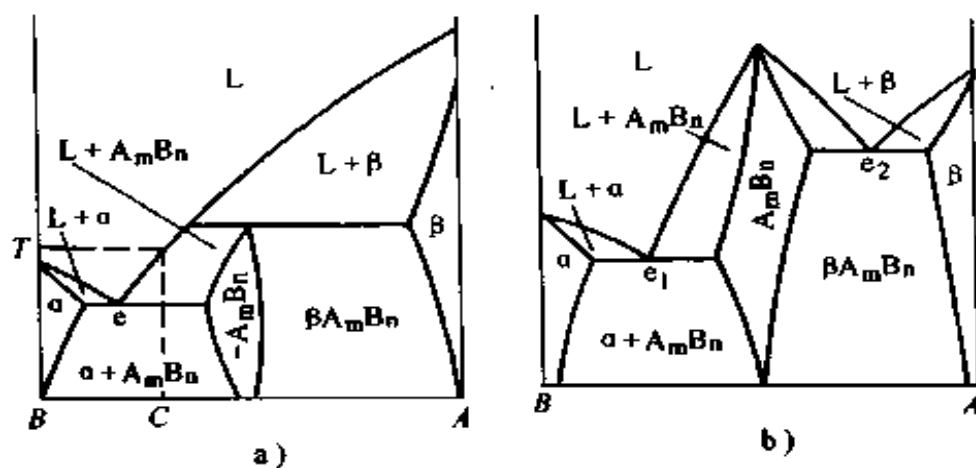


图 1-23 形成化合物的典型二元合金相图

以上是纯金属母材与纯金属钎料钎焊时的情形。在使用合金钎料时情况要复杂得多。这方面的规律目前还不十分清楚，从已有的资料来看，用合金钎料进行钎焊时，钎料组分能否与母材金属形成金属间化合物，除了取决于该组分与母材的相图外，还取决于它与母材金属

和钎料其它组元金属之间的亲和力对比以及其在钎料中的浓度。

化合物相一般硬而脆，对接头的力学性能有不利的影晌。当化合物分散不连续分布时，其影响较小，且可能由于弥散强化作用而强化接头，但是，当化合物层形成连续层而夹在母材与钎料之间，且厚度较大时，其影响较大，会使接头明显变脆，强度显著下降。

为减缓界面处化合物相的生成，可采用如下措施：

1) 在钎料中加入不与母材和钎料基体金属形成化合物的组元。例如：在 Sn 中加入 Pb 钎焊 Cu 时，可以使 Cu_6Sn_5 层减薄，当 Pb 的质量分数达到 70% 时，化合物层甚至可能完全消失。

2) 在钎料中加入只能与钎料基体金属形成化合物而不与母材形成化合物的组元。例如：在 Sn 中加 Ag 钎焊 Cu 时，可在钎缝中形成 Ag_3Sn 金属间化合物，从而使 Cu_6Sn_5 层减薄。

1.5 钎焊性的测量与评定

熔融钎料对母材的润湿性能是钎料的重要工艺性能指标。因此在工程上需要对其进行评定，尤其是希望能进行定量的评定。但目前还无法从理论上完全精确确定实际工程体系的润湿性的优劣。其原因之一是缺乏各种材料匹配（钎料与母材的组合）之间的润湿角数据，此外，实际钎焊过程中的条件比较复杂，影响因素众多也是原因之一。因此，一般只能借助于实验方法来评定其润湿性。下面介绍几种工程上常用的方法。

1.5.1 润湿角测量法

将一定量的钎料放在给定尺寸的母材上，采用相应的去除氧化膜的措施（如施加钎剂）如图 1-24a 所示。加热到规定的温度，保温一定的时间，使钎料在母材上铺展。冷却后，沿铺展钎料的中心线截取剖面，并从剖面上来测量钎料与母材的接触角 θ ，如图 1-24b 所示。以 θ 角的大小作为指标来评定钎料润湿性的优劣，较小的 θ 值表示钎料润湿性能良好。工程上一般希望 $\theta < 20^\circ$

1.5.2 铺展面积测定法

试件的制备方法与测量润湿角时相同，在冷却后的试件上直接测

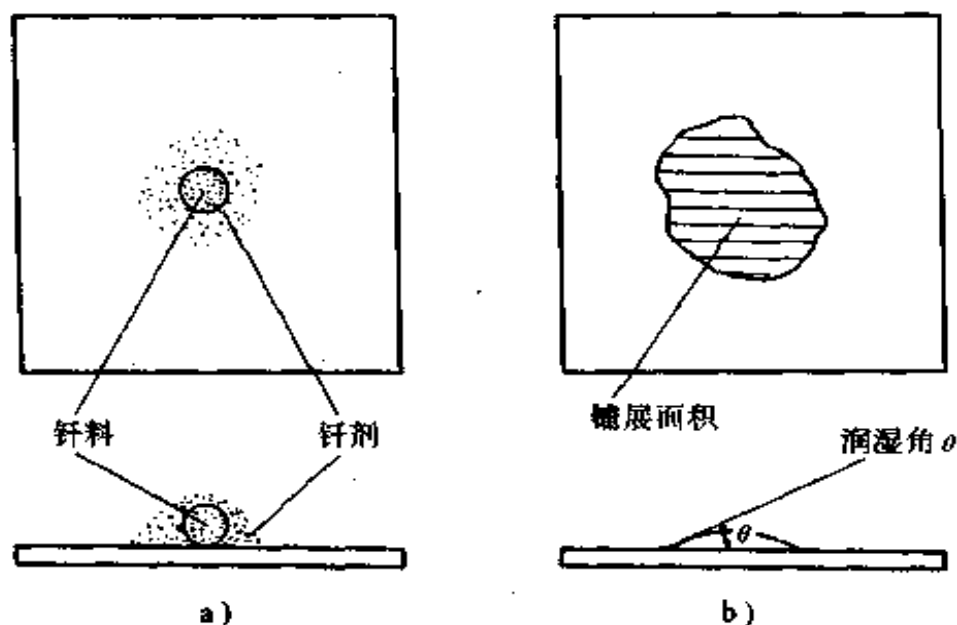


图 1-24 润湿角及铺展面积的测量

a) 加热前 b) 加热后

量钎料的铺展面积（见图 1-24）。铺展面积越大则表示钎料的润湿性就越好。对于钎料铺展后的形状比较规则且外表轮廓近似于球冠的试件（如 Sn、Pb 在 Cu 上铺展的情况），可采用式(1-8)计算铺展面积。

$$S = \pi(D_1 + D_2)/16 \quad (1-8)$$

式中 D_1 、 D_2 ——为沿母材表面两垂直方向上的球冠直径。

而对于钎料铺展形状不规则的体系（如 Zn 在 Al 上铺展的情况），则需实测铺展面积。

1.5.3 填缝长度的测定

取两块规定尺寸的平板构成 T 形接头，在试件的一端放置一定量的钎料和钎剂，在规定温度下保温一定的时间，然后冷却并测量钎料填充间隙的长度 L （即钎料流动的距离）（见图 1-25）。可按 L 值的大小来评定钎料的润湿及流动性能， L 值越大，则润湿填缝性能越好。应注意，在进行互相对比时，应保证各试件的间隙大

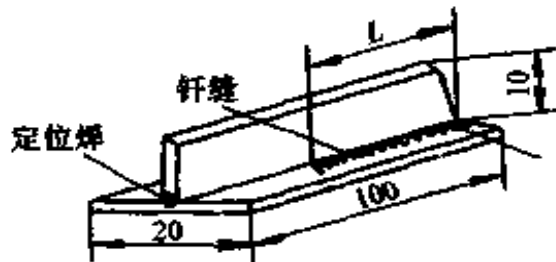


图 1-25 填缝长度的测量方法

小相同。

1.5.4 复合板流动系数的测定

对表面涂有钎料合金的复合板, 采用如图 1-26 所示的 T 形接头进行钎焊。钎焊后采用流动系数 K 来表征钎料的润湿性:

$$K = V_f/V = A_s n / l \delta \quad (1.9)$$

式中 V_f ——单位长度钎缝圆角的总体积;

V ——单位长度复合板上钎料总体积;

A_s ——钎缝圆角的截面积 ($A_s \approx (1 - \pi/4) R^2 = 0.125 R^2$);

n ——钎缝圆角数, 取单侧时为 1, 取双侧时为 2;

l ——复合板的宽度;

δ ——钎料涂层的厚度。

流动系数 K 值大时, 表示钎缝圆角半径 R 值大, 则钎料的润湿性能好。

1.5.5 润湿时间的测定 (焊球法)

焊球法测定润湿时间的过程如图 1-27 所示。将一定重量的钎料球放在测试台上加热熔化, 将丝状母材置于测试探针的下方 (与探针尖端的间隙约为 0.50mm)。测试时将探针和丝状母材一起压向熔化的钎料球, 当丝状母材与钎料球接触时, 测试仪器开始计时, 而当钎料完全润湿并包敷丝状母材, 从而与其上方的测试探针相接触时, 停止测试。从丝状母材与钎料接触到完全被钎料润湿并包敷所需的时间 t 为润湿时间。 t 越小, 说明熔融钎料对母材的润湿作用越迅速, 润湿性越好。这一方法的优点在于可以给出定量的数据, 缺点是只适用于加热温度较低的情况, 当钎料的熔点较高时, 该方法受到限制。

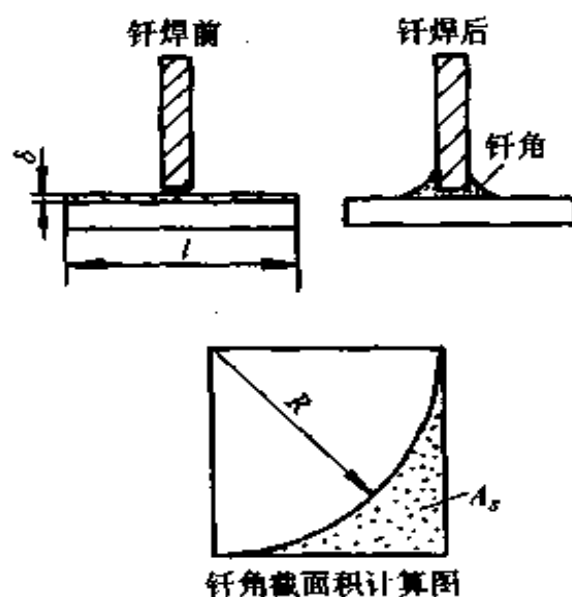


图 1-26 复合板 T 形接头钎焊时的流动系数

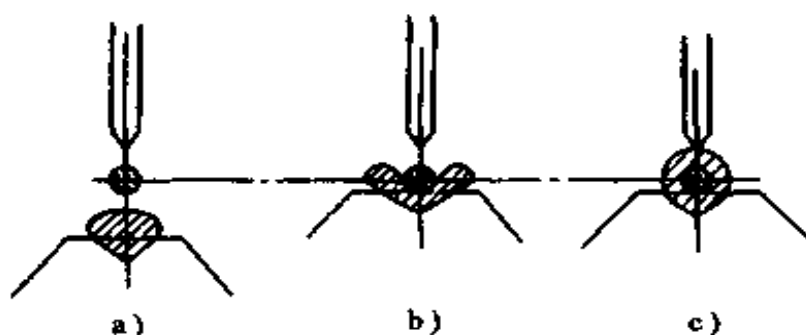


图 1-27 润湿时间测量示意图

a) 钎料熔化 b) 熔融钎料开始接触母材 c) 熔融钎料接触探针

1.5.6 润湿力的测定

将丝状或片状母材以一定的速度插入到规定温度的熔融钎料槽中，当插入深度达到规定值（一般为 3mm）时停止试件的运动。使被测试件端部在液态钎料中停留一段时间后，将其上提取出。测试方法的过程示意图 1-28a。在此过程中通过一个类似于电子天平的装置来测量试件上所受到的作用力的变化情况，其测量曲线的典型形状如图 1-28b 所示。

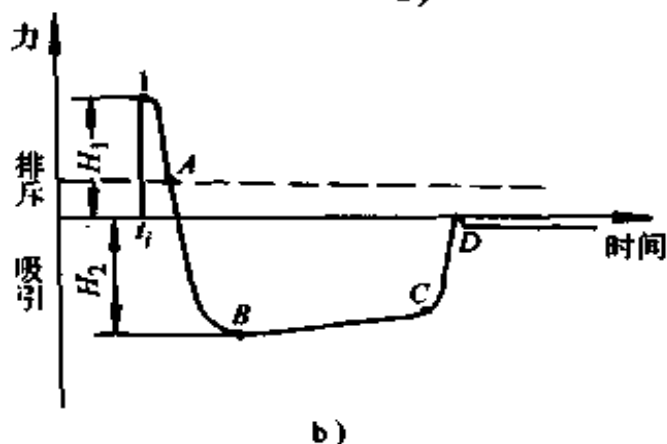
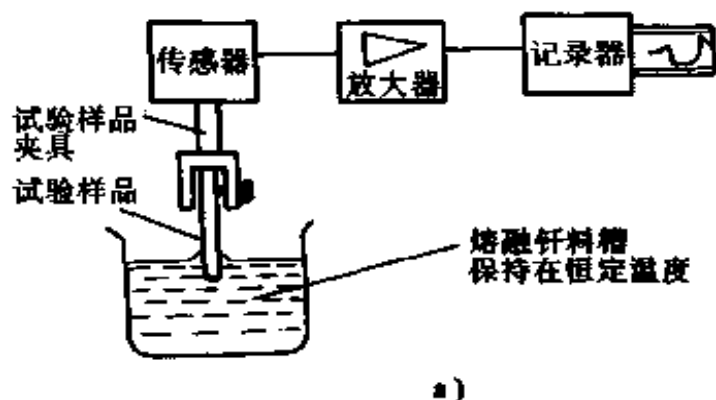


图 1-28 润湿力的测量

a) 测量装置示意图 b) 测量曲线

测量过程中，当试件端部与液态钎料接触并向下插入时，试件受到浮力的作用。浮力的大小等于试件端部所排开的钎料的重量。随着钎料对母材的逐渐润湿，浮力的作用逐渐被抵

消，曲线由正向负变化。当合力为零时，记录其时间，称为零交时间 t_0 。测试过程继续进行，合力负值继续增大，将浸入时间 $t = 3\text{s}$ 时的力记录为 F_3 。当合力不再随时间变化时，将该时刻的力记录为 $F_{\max}$ ，然后将试件从钎料槽中取出，完成测试。 t_0 越短，说明润湿作用越迅速； $F_{\max}$ 越负（负值越大），说明 σ_{ad} 和 σ_{be} 值越大。在工程应用上，一般取 F_3 和 t_0 作为评定指标， t_0 越小， F_3 越负，说明钎料对母材的润湿性越好。

第2章 钎剂和气体介质

任何处在大气中的金属材料，其表面都被一层氧化膜所覆盖。在钎焊时，若母材表面有氧化膜存在，它就不能被液态钎料润湿；同样，若液态钎料被氧化膜包裹，它就不能在母材上铺展。因此，要完成钎焊过程并得到优质接头，彻底清除母材和钎料表面的氧化膜，是十分重要的。

通常，在钎焊前也安排清除母材表面氧化膜的工序，但这还远远不能满足要求。这是因为在钎焊加热过程中，母材和熔化钎料的表面还面临着更为迅速的氧化作用，在表面会立即生成新的一层薄氧化膜。因此，在钎焊过程中仍需采取必要的措施，清除待焊母材和液态钎料表面的氧化膜并防止它们再被氧化。为达到这个目的，在实际钎焊中广泛采用了钎剂和气体介质的方法，从而促进了钎焊接头的顺利形成。

2.1 钎剂的作用和应有的性能

2.1.1 钎剂的作用

在利用钎剂促进钎焊接头形成的过程中，钎剂主要起到如下作用：

1. 去膜作用

去除母材和钎料表面的氧化物，为液态钎料在母材上铺展填缝创造必要条件。

2. 保护作用

以液体薄层覆盖母材和钎料表面，隔绝空气而起到防止氧化作用。

3. 活化作用

促进界面活化，改善液态钎料对母材表面的润湿能力。

2.1.2 钎剂应有的性能

在配制或选用钎剂时，必须根据所焊母材和钎料的特性，使钎剂满足下列性能的要求：

1. 去膜性能

通过物理化学作用，钎剂应足以溶解或破坏母材和钎料表面的氧化膜。

2. 润湿和保护性能

钎剂在钎焊温度范围内应该表面张力小、粘度低和流动性好，以便于钎剂和液态钎料在母材表面的润湿和铺展；同时，钎剂及其作用产物的密度应小于液态钎料的密度，这样钎剂才能均匀地呈薄层覆盖钎料和母材，有效地隔绝空气，起到保护作用。

3. 熔化性能

钎剂的熔点应低于钎料的熔点，且二者相差不能过大，这样才能保证钎剂在钎料熔化之前有效地发挥作用，去除钎缝间隙和钎料表面的氧化膜，为钎料的润湿铺展准备条件。

4. 热稳定性能

钎剂在加热过程中应保持其成分和作用稳定不变，不致于发生钎剂组分的分解、蒸发或碳化而丧失其应有的作用。一般希望钎剂具有不小于 100℃ 的热稳定温度范围。

5. 除渣性能

钎剂及其作用产物的密度应小于液态钎料的密度，以利于液态钎料在填缝时将它们从间隙中排出，防止它们滞留在钎缝中形成夹渣。此外，钎剂在钎焊后所形成的残渣应当容易清除。

6. 腐蚀性和毒性

钎剂及其残渣不应对母材和钎缝有强烈的腐蚀作用，也不应具有毒性或在使用中析出有害气体。

事实上，实用的钎剂并不总能全面满足上述的性能要求，特别是在去膜能力和腐蚀作用两种性能之间往往出现矛盾，通常只能在满足去膜能力要求的前提下依靠工艺措施来防止其腐蚀作用。

2.2 钎剂的组成、分类和选择

2.2.1 钎剂的组成

采用何种物质作钎剂的组分，主要取决于所要清除的氧化膜的物理化学性质。早期的钎剂常是单组分的物质（如硼砂或松香等），而现代的钎剂已发展成为多组分的复杂系统。从各组分的作用来看，复杂成分的钎剂主要由下列组分构成：

1. 基体组分

不同类型的钎剂，具有不同的基体组分。硬钎剂的基体组分多采用热稳定的金属盐或金属盐系统，如硼化物、碱金属或碱土金属的氟化物。软钎剂的基体组分则采用高沸点的有机物。

钎剂中基体组分的作用是：使钎剂具有需要的熔点；起到溶解钎剂中其它组分的作用；铺展时形成致密的液膜，覆盖母材和钎料表面，防止空气的有害作用。

2. 去膜组分

钎剂中的去膜组分通常采用碱金属或碱土金属的氟化物。这类物质能起到溶解母材和钎料表面氧化膜的作用。但各种氟化物对不同的金属氧化物的溶解能力是不同的，因此应根据需要清除的氧化膜性质来选用。例如，用于不锈钢和耐热合金的硬钎剂常选用氟化钙或氟化钾作为去膜组分，而铝用硬钎剂中则选用氟化钠或氟化锂作为去膜组分。

应该注意的是，钎剂中作为去膜组分的氟化物的添加量应通过试验确定，一般不应加得太多。否则，会提高钎剂的熔点，降低钎剂的流动性，从而影响钎剂的性能。

3. 活性组分

由于钎剂中去膜组分的添加量受到限制，有时氧化膜的溶解相当缓慢，以致不能完全去除氧化膜。在这种情况下必须添加活性组分以加速氧化膜的清除并改善钎料的铺展。

常用的活性组分有重金属卤化物（如氯化锌等）和氧化物（如硼酐等）。前者能与一些母材作用，从而破坏氧化膜与母材的结合，并在母材表面析出薄层纯金属，促进钎料的铺展；而后者能与氧化物形成低熔点的络合物，加速氧化膜的清除。

应该指出,组成钎剂的组分在钎剂中所起的作用往往不是单一的,而是共同起着上述三方面的作用,因此只能按其主要作用加以划分。另外,电子工业所用的软钎剂中,除上述三类组分外,在不影响钎剂主要性能的情况下,有时还加些起特殊作用的组分,如阻燃剂、缓蚀剂和消光剂等,但它们是不影响钎焊过程的。

2.2.2 钎剂的分类

从不同的角度出发,可将钎剂分为多种类型。例如,按使用温度不同,分为软钎剂和硬钎剂;按用途不同,分为普通钎剂和专用钎剂。此外,考虑到作用状态的特征不同,又可分出一类气体钎剂。因此,这里将根据实际情况,将钎剂分为软钎剂、硬钎剂、专用钎剂和气体钎剂等类别,其详细划分见图 2-1。



图 2-1 钎剂分类

1. 软钎剂

软钎剂主要指的是在 450°C 以下钎焊用的钎剂,按其成分可分为无机软钎剂和有机软钎剂两类。其中,无机软钎剂又分为无机盐类软钎剂和无机酸类软钎剂,而有机软钎剂又分为水溶性有机软钎剂和松香类有机软钎剂。

2. 硬钎剂

硬钎剂主要指的是在 450°C 以上钎焊用的钎剂。

3. 专用钎剂

专用钎剂是为那些氧化膜难于去除的金属材料进行钎焊而设计的钎剂，如铝用钎剂和钛用钎剂等。对铝用钎剂按其使用温度可分为铝用软钎剂和铝用硬钎剂两类，其中铝用软钎剂又可分为铝用有机钎剂和铝用反应钎剂

4. 气体钎剂

气体钎剂是一种特殊类型的钎剂，按钎焊方法可分为炉中钎焊用气体钎剂和火焰钎焊用气体钎剂两类。

2.2.3 钎剂的选择

在使用钎剂的钎焊中，钎剂是保证钎焊过程顺利进行和获得牢固钎焊接头的必要条件。某种材料能否被钎焊上，往往取决于能否选择到合适的钎剂。对所有钎焊过程都适用的钎剂是不存在的，不同组成的钎剂都有其最适宜的钎焊条件及应用范围。因此，选择钎剂时，一定要从诸如母材及钎料、钎焊方法、钎焊加热温度及时间、钎缝形状等具体因素出发。

1. 母材和钎料的考虑

母材及钎料的种类是选择钎剂首先应当考虑的因素。例如，用锡铅钎料钎焊铜时，可用活性较小的松香钎剂（有机软钎剂），钎焊钢时可用活性较强的氯化锌水溶液（无机软钎剂）；钎焊不锈钢时可选用活性很强的氯化锌盐酸溶液（无机软钎剂）。又如，用黄铜钎料钎焊普通铜及铜合金时多采用脱水硼砂（硬钎剂），有时还附加硼酸；而在钎焊不锈钢时使用硼砂和硼酸的钎剂就感到活性不够，必须在钎剂中加入氟化物及其它盐（硬钎剂）。在钎焊铝及铝合金时，由于氧化铝膜稳定性大，因此必须选用铝钎焊专用钎剂。

2. 钎焊方法的考虑

不同的钎焊方法对钎剂提出了不同的要求。如用电阻钎焊时，钎剂应具有一定的导电性；用浸沾钎焊时，钎剂应去除水分，以免沸腾和爆炸。又如感应钎焊的钎焊时间短，加热速度快，要求钎剂的反应要快，活性要大；而炉中钎焊的钎焊时间长，加热速度慢，要求钎剂的活性可小些，但热稳定性要好。

3. 钎焊温度的考虑

钎焊温度是由母材和钎料决定的,选择钎剂时要使其熔化温度与钎焊温度相适应。钎剂的熔点应低于钎料的熔点,以使钎料在熔化前便由熔化的钎剂所覆盖,并为钎料的润湿铺展准备条件;为了防止钎剂的蒸发,钎剂的沸点应比钎焊温度高;钎剂的最低活性温度不能比钎料的熔化温度低得太多,否则氧化膜去除过早,随后还会重新生成,而钎剂已消耗完,这点对于钎焊时间长、加热速度缓慢的钎焊过程尤为重要。

4. 钎缝形状的考虑

对于钎缝形状复杂的钎焊接头,由于钎焊后钎剂及其残渣不容易完全去除,因此应选择腐蚀性小且易去除的钎剂。

2.3 常用钎剂

2.3.1 软钎剂

1. 无机软钎剂

常用无机软钎剂列于表 2-1 中。这类钎剂主要由无机盐或无机酸组成,其特点是化学活性强,热稳定性好,能有效去除母材表面的氧化物,促进液态钎料对母材的润湿。可用于包括不锈钢、耐热钢和镍基合金在内的黑色金属和有色金属的钎焊。但钎剂残渣对钎焊接头具有强烈的腐蚀性,钎焊后的残留物必须清除干净。

(1) 无机盐类软钎剂 这类钎剂中的最基本成分是氯化锌。其中,氯化锌水溶液(如 RJ1)是最常用的无机盐类软钎剂;在氯化锌中加入氯化铵(如 RJ3),提高了钎剂的活性并降低了熔点;在氯化锌中加入盐酸等组分(如 RJ5),提高了钎剂的活性;在氯化锌中同时加入氯化铵和盐酸(如 RJ6),进一步提高了钎剂的活性。此外,还可添加诸如氯化镉、氯化钠等其它组分(如 QJ205),以便提高钎剂的熔点。

无机盐类软钎剂与金属氧化物作用所生成的金属氯化物能同氯化铵或氯化锌形成易熔的化合物或共晶,因而容易被清除掉。

(2) 无机酸类软钎剂 可作为钎剂的无机酸有磷酸、盐酸和氢氟酸。通常以水溶液或酒精溶液形式使用,也可与凡士林调成膏状使用。其中,磷酸溶液(质量分数为 40%~60%)是常用的无机软钎剂,它比盐酸与氢氟酸溶液既方便又安全,且具有较强的去除氧化膜

的能力。钎焊青铜和不锈钢等合金时，磷酸溶液是适宜的钎剂。由于受其挥发温度的限制，磷酸钎剂只限于 300℃ 以下使用。

表 2-1 常用无机软钎剂的组分和用途

牌号	组分的质量分数 (%)	适用母材
RJ1	氯化锌 40, 水 60	钢, 铜、黄铜和青铜
RJ2	氯化锌 25, 水 75	铜及铜合金
RJ3	氯化锌 40, 氯化铵 5, 水 55	钢、铜、黄铜和青铜
RJ4	氯化锌 18, 氯化铵 6, 水 76	铜及铜合金
RJ5	氯化锌 25, 盐酸 (密度 1.19kg/m ³) 25, 水 50	不锈钢, 碳钢, 铜合金
RJ6	氯化锌 6, 氯化铵 4, 盐酸 (密度 1.19kg/m ³) 10, 水 80	钢, 铜及铜合金
RJ7	氯化锌 40, 氯化锡 5, 氯化亚铜 0.5, 盐酸 3.5, 水 51	钢, 铸铁
RJ8	氯化锌 65, 氯化钾 14, 氯化钠 11, 氯化铵 10	铜及铜合金
RJ9	氯化锌 45, 氯化钾 5, 氯化锡 2, 水 48	铜及铜合金
RJ10	氯化锌 15, 氯化铵 1.5, 盐酸 36, 变性酒精 12.8, 正磷酸 2.2, 氯化铁 0.6, 水余量	碳钢
RJ11	正磷酸 60, 水 40	不锈钢, 铸铁
QJ205	氯化锌 50, 氯化铵 15, 氯化锡 30, 氯化钠 5	钢, 铜及铜合金

盐酸与氢氟酸能强烈腐蚀母材，并在加热中析出有害气体，故很少使用，只在某些钎剂中作为添加成分。

2. 有机软钎剂

常用有机软钎剂列于表 2-2 中。这类钎剂主要包括水溶性有机软钎剂和松香类有机软钎剂两种，与无机软钎剂相比，其特点是化学活性较弱，热稳定性尚好，对母材的腐蚀作用小。在电子工业上广泛用于钎焊铜及铜合金、金、银、钎，其中活性松香钎剂还可用于钎焊镍、钢及不锈钢等。

表 2-2 常用有机钎剂的组分和用途

牌号	组分的质量分数 (%)	适用范围
—	乳酸 15, 水 85	铜、黄铜和青铜
—	盐酸胍 5, 水 95	铜、黄铜和青铜
—	松香 100	铜、铜、锡和银
—	松香 25, 酒精 75	铜、铜、锡和银
—	松香 40, 盐酸谷氨酸 2, 酒精余量	铜及铜合金
—	松香 40, 三硬脂酸甘油酯 4, 酒精余量	铜及铜合金
—	松香 40, 水杨酸 2.8, 三乙醇胺 1.4, 酒精余量	铜及铜合金
—	松香 70, 氯化铵 10, 溴酸 20	铜、锌和镍
—	松香 24, 盐酸二乙胺 4, 三乙醇胺 2, 酒精余量	铜、锌和镍
201	树脂 A20, 溴化水杨酸 10, 松香 20, 酒精余量	波峰焊和浸渍焊
201-2	溴化水杨酸 10, 松香 29.5, 甘油 0.5, 酒精余量	同 201
202-B	溴化胍 8, 甘油 4, 松香 20, 水 20, 酒精余量	引线搪锡
SD-1	改性酚醛 55, 松香 30, 溴化水杨酸 15	印刷电路板的波峰焊、浸沾焊和引线搪锡
HY-3B	溴化水杨酸 12, 松香 20, 改性丙烯酸树脂 1.3, 缓蚀剂 0.25, 酒精余量	同 SD-1
氟碳 B	氟碳 0.23, 松香 23, 异丙醇 76.7	同 SD-1
—	聚丙二醇 40~50, 正磷酸 10~20, 松香 35, 盐酸二乙胺 5	镍铬丝的钎焊
RJ11	工业凡士林 80, 松香 15, 氯化锌 4, 氯化铵 1	铜及铜合金
RJ12	松香 30, 氯化锌 3, 氯化铵 1, 酒精余量	镀锌铁皮、铜及铜合金
RJ13	松香 25, 二乙胺 5, 三羟乙基胺 2, 酒精余量	铜、铜及铜合金
RJ14	凡士林 35, 松香 20, 硬脂酸 20, 氯化锌 13, 盐酸苯胺 3, 水 9	铜、铜及铜合金

(续)

牌号	组分的质量分数 (%)	适用范围
RJ15	松香 34, 蓖麻油 26, 硬脂酸 14, 氯化锌 7, 氯化铵 8, 水 11	铜合金和镀锌板
RJ16	松香 28, 氯化锌 5, 氯化铵 2, 酒精 65	黄铜挂锡
RJ18	松香 24, 氯化锌 1, 酒精 75	铜及铜合金
RJ19	松香 18, 甘油 25, 氯化锌 1, 酒精 56	同 RJ18
RJ21	松香 38, 正磷酸 12, 酒精 50	铬钢、镍铬不锈钢的挂锡和钎焊
RJ24	松香 55, 盐酸苯胺 2, 甘油 2, 酒精 41	铜及铜合金

(1) 水溶性有机软钎剂 组成水溶性有机软钎剂的基本物质可以是有机酸、有机胺盐、有机胺和醇类等。其中, 有机酸和有机胺盐是最常用的物质, 并具有较强的去氧化物的能力, 但残渣也有一定的腐蚀性, 属于弱腐蚀性钎剂, 钎焊后还应清除钎剂的残渣。

(2) 松香类有机软钎剂 松香类钎剂是最常用的有机软钎剂, 按其组成可分为普通松香钎剂和活性松香钎剂。普通松香钎剂是以松香粉末或以松香的酒精、松节油溶液形式使用的钎剂。活性松香钎剂是在松香中通过添加活性物质而构成的钎剂, 添加的活性物质可以是无机盐, 也可以是有机酸或有机胺盐。

普通松香钎剂钎焊后的钎剂残渣无腐蚀性, 电绝缘性好, 但钎焊温度不能超过 300℃, 否则松香将碳化而丧失去膜能力。活性松香钎剂比普通松香钎剂的活性大, 去除氧化膜的能力强, 但钎剂残渣有轻微的腐蚀性, 钎焊后应予清除。

2.3.2 硬钎剂

常用硬钎剂列于表 2-3 中。这类钎剂主要是以硼砂、硼酸及它们的混合物为基体, 以某些碱金属或碱土金属的氟化物、氟硼酸盐等为添加剂, 具有合适的活性温度范围和去氧化物能力的高熔点钎剂。可用于钎焊碳钢、铸铁、不锈钢、硬质合金、高温合金、铜及铜合金等多种金属材料。但此类钎剂的残渣具有不同程度的腐蚀性, 钎焊后应予清除。

表 2-3 常用硬钎剂的组分和用途

牌号	组分的质量分数 (%)	钎焊温度 /℃	用 途
YJ1	硼砂 100	800~1150	铜基钎料钎焊碳钢、 铜、铸铁和硬质合金
YJ2	硼砂 25, 硼酸 75	850~1150	同 YJ1
YJ6	硼砂 15, 硼酸 80, 氟化钙 5	850~1150	铜基钎料钎焊不锈钢和 高温合金
YJ7	硼砂 50, 硼酸 35, 氟化钾 15	650~850	银基钎料钎焊铜、铜合 金、不锈钢和高温合金
YJ8	硼砂 50, 硼酸 10, 氟化钾 40	>800	铜基钎料钎焊硬质合金
YJ11	硼砂 95, 过锰酸钾 5	>800	铜锌钎料钎焊铸铁
QJ101	硼酸 30, 氟硼酸钾 70	550~850	银基钎料钎焊铜及铜合 金、钢、不锈钢和高温合 金
QJ102	氟化钾 42, 硼酐 35, 氟硼 酸钾 23	650~850	同 QJ101
QJ103	氟硼酸钾 >95, 碳酸钾 <5	550~750	银铜锌锡钎料钎焊铜及 铜合金、钢和不锈钢
QJ104	硼砂 50, 硼酸 35, 氟化钾 15	650~850	银基钎料炉中钎焊铜合 金、钢和不锈钢
QJ105	氯化锡 29~31, 氯化锂 24 ~26, 氯化钾 24~26, 氯化 锌 13~16, 氯化铵 4.5~5.5	450~600	钎焊铜及铜合金
200	硼酐 66 ± 2 , 脱水硼砂 $19 \pm$ 2, 氟化钙 15 ± 1	850~1150	铜基钎料或镍基钎料钎 焊不锈钢和高温合金
201	硼酐 77 ± 1 , 脱水硼砂 12 ± 1 , 氟化钙 10 ± 0.5	850~1150	同 200
284	氟化钾 (脱水) 35, 氟硼酸 钾 42, 硼酐 23	500~850	同 QJ101
F301	硼砂 30, 硼酸 70	850~1150	同 YJ1
铸铁 钎剂	硼酸 40~45, 碳酸锂 11~ 18, 碳酸钠 24~27, 氟化钠 加氯化钠 10~20 (二者比例 27:73)	650~750	银基钎料和低熔点铜基 钎料钎焊和修补铸铁

硼砂和硼酸的混合物是应用很广的硬钎剂，但其去膜能力不强，不能去除铬、硅、铝、钛等金属的氧化物，而且钎剂的活性温度高（800℃以上）、钎剂残渣难于去除，因此只能配合一些高熔点钎料（如铜基钎料）来使用，不能钎焊含铬、硅、铝、钛较多的合金钢、不锈钢和高温合金。

为了降低硼砂-硼酸钎剂的活性温度，改善其润湿能力和提高去除氧化物的能力，常在硼化物中加入一些碱金属和碱土金属的氟化物。加入氟化钙（如 201），可提高钎剂的去氧化物能力，使钎剂可用于钎焊不锈钢和高温合金；加入氟化钾（如 QJ104），不仅提高了钎剂的去膜能力，而且能够降低钎剂的熔点和表面张力；加入氟硼酸钾（如 QJ102），能进一步降低钎剂的熔点，提高钎剂的去膜能力。此外，由于氟硼酸钾熔点低，去氧化物能力强，也可作为钎剂的主体使用（如 QJ103）。

应该注意的是，含氟量高的钎剂在熔化状态下能与母材强烈作用，引起腐蚀，并可能在钎缝中形成气孔，同时产生大量的含氟气体，危害人体健康。特别是含大量氟硼酸钾的钎剂，温度高于 750℃ 时迅速分解，析出有毒的三氟化硼气体。因此，应在低于 750℃、通风良好的条件下使用。此外，由于加热分解，它们也不适用于加热速度缓慢的炉中钎焊。

2.3.3 铝用钎剂

1. 铝用软钎剂

铝用软钎剂按其去除氧化膜的方式分为有机钎剂和反应钎剂，其组分和特性列于表 2-4 中。

（1）铝用有机钎剂 这类钎剂的基体组分为三乙醇胺，去膜组分为氟硼酸或氟硼酸胺，活性组分为重金属的氟硼酸盐。其特点是活性小，热稳定性差，温度高于 275℃ 时迅速发生炭化，但腐蚀性小，且残渣易于用水去除。采用此类钎剂，可在 180～275℃ 温度范围内钎焊铝及铝合金，但难于获得致密牢固的钎焊接头。

（2）铝用反应钎剂 这类钎剂的主要组分是锌、锡等重金属的氟化物。为提高活性，添加了少量的钾、钠、锂的氟化物。为降低熔点

及改善润湿性，一般还加入氯化铵或溴化铵。与铝用有机钎剂相比，这种钎剂的活性大，去膜能力强，但腐蚀性也高，焊后必须清除干净。该钎剂一般以粉末状或溶于有机溶剂（如乙醇等）中使用，但不能以水溶液形式使用，同时应密封保存，以防受潮失效。

应该指出，无论是铝用有机钎剂还是铝用反应钎剂，钎焊时都会产生大量白色有刺激性和腐蚀性的浓烟，使用时应注意通风。

表 2-4 铝用软钎剂的组分和特性

类 型	牌 号	组分的质量分数 (%)	钎焊温度 /℃	腐蚀性	导电性
有机钎剂	QJ204	三乙醇胺 82.5, 氟硼酸铵 5, 氟硼酸锡 10, 氟硼酸锌 2.5	180~275	小	中
有机钎剂	—	三乙醇胺 82, 氟硼酸铵 8, 氟硼酸锡 10	180~275	小	中
有机钎剂	—	三乙醇胺 82, 氟硼酸铵 8, 氟硼酸锌 10	180~275	小	中
有机钎剂	—	三乙醇胺 83, 氟硼酸锌 10, 氟硼酸锡 7	180~275	小	中
反应钎剂	QJ203	氯化锌 55, 氯化锡 28, 溴化铵 15, 氯化钠 2	280~350	大	高
反应钎剂	—	氯化锌 88, 氯化铵 10, 氯化钠 2	330~385	大	高
反应钎剂	—	氯化锡 88, 氯化铵 10, 氯化钠 2	300~340	大	高
反应钎剂	—	氯化锌 65, 氯化铵 25, 氯化钠 10	330~450	大	高
反应钎剂	Φ220A	氯化锌 90, 氯化铵 8, 氟化钾 1.2, 氟化锂 0.6, 氟化钠 0.2	320~450	大	高

2. 铝用硬钎剂

铝用硬钎剂按其组成可分为氯化物基硬钎剂和氟化物基硬钎剂两类，其组分和用途列于表 2-5 中。

(1) 氯化物基铝用硬钎剂 这类钎剂的基体组分为碱金属或碱土金属的氯化物的低熔点混合物，去膜组分为氟化物，活性组分为易熔重金属的氯化物。其特点是去氧化物能力强，流动性好；但对母材的腐蚀作用大，钎焊后必须彻底清除钎剂残渣。

表 2-5 铝用硬钎剂的组分和用途

牌号	组分的质量分数 (%)	钎焊温度 /℃	适用方法
QJ201	氯化钾 50, 氯化锂 32, 氯化锌 8, 氟化钠 10	450~620	火焰钎焊, 炉中钎焊
QJ202	氯化钾 28, 氯化锂 42, 氯化锌 24, 氟化钠 6	420~620	火焰钎焊
QJ206	氯化钾 32, 氯化锂 25, 氯化锌 8, 氯化铯 25, 氟化锂 10	550~620	火焰钎焊, 炉中钎焊
QJ207	氯化钾 45, 氯化锂 28, 氯化钠 20, 氯化锌 2, 氯化钙 2, 氟化锂 3	>550	火焰钎焊, 炉中钎焊
Φ5	氯化钾 45, 氯化锂 38, 氟化钠 10, 氯化锡 3, 氯化镉 4	420~620	炉中钎焊
Φ124	氯化钾 47, 氯化锂 13, 氯化钠 25, 氯化锌 8, 氟化钠 7	560~620	炉中钎焊
YJ17	氯化钾 51, 氯化锂 41, 氟化钾-氟化铝共晶 8	500~560	浸沾钎焊
Y-1	氯化钾 45, 氯化锂 20, 氯化钠 12, 氯化锌 8, 氟化钠 10, 氟化铝 4, 氯化铅 1	580~590	火焰钎焊
1712B	氯化钾 47, 氯化锂 23.5, 氯化钠 21, 氟化铝 3, 氯化锌 1.5, 氯化镉 2, 氯化铈 2	>500	火焰钎焊, 炉中钎焊
H701	氯化钾 46, 氯化锂 12, 氯化钠 26, 氟化钾-氟化铝共晶 10, 氯化锌 1.3, 氯化镉 4.7	>560	火焰钎焊, 炉中钎焊
QF	氟化钾 42-氟化铝 58 (氟化钾-氟化铝共晶)	>570	炉中钎焊
211	氯化钾 47, 氯化锂 14, 氯化钠 27, 氯化镉 4, 氯化锌 3, 氟化铝 5	>550	火焰钎焊, 炉中钎焊
—	氯化钾 44, 氯化锂 34, 氯化钠 12, 氟化钾-氟化铝共晶 10	550~620	浸沾钎焊
—	氟化钾 39, 氟化铝 56, 氯化锌 0.3, 氯化钾 4.7	>540	炉中钎焊

(2) 氟化物基铝用硬钎剂 由氟化钾与氟化铝组成的共晶型钎剂 (牌号 QF), 是一种新型的氟化物基铝用硬钎剂。该钎剂流动性好, 去膜能力强, 无腐蚀作用, 可以粉末状、块状或膏状形式使用。但其熔点高, 热稳定性差, 只能配合铝硅钎料使用, 并应注意控制钎

焊温度和加热速度。

应当指出，当以不同的钎焊方法钎焊铝及铝合金时，必须根据这些方法各自的工艺特点，选用不同的钎剂（见表 2-5），以便能使钎剂发挥应有的作用，并尽量减小对母材的溶蚀。

2.3.4 气体钎剂

常用气体钎剂列于表 2-6 中。这类钎剂的最大优点是钎焊后没有钎剂残渣，钎后接头不需清洗。但这类钎剂及其反应物大都具有一定的毒性，使用时应采取相应的安全措施。

表 2-6 常用气体钎剂的种类和用途

气 体	适用方法	钎焊温度 /℃	适用母材
三氟化硼	炉中钎焊	1050~1150	不锈钢，耐热合金
三氯化硼	炉中钎焊	300~1000	铜及铜合金，铝及铝合金，碳钢及不锈钢
三氯化磷	炉中钎焊	300~1000	铜及铜合金，铝及铝合金，碳钢及不锈钢
硼酸甲酯	火焰钎焊	>900	碳钢，铜及铜合金

1. 炉中钎焊用气体钎剂

在炉中钎焊中可用作钎剂的气体主要是气态的无机卤化物，包括氯化氢、氟化氢、三氟化硼、三氯化硼和三氯化磷等气体。

氯化氢和氟化氢对母材有强烈的腐蚀性，一般不单独使用，只在惰性气体保护钎焊中添加少量来提高去膜能力。

三氟化硼是最常用的炉中钎焊用气体钎剂，其特点是对母材的腐蚀作用小，去膜能力强，能保证钎料有较好的润湿性，可用于钎焊不锈钢和耐热合金。但去膜后生成的产物熔点较高，只适合于高温（1050~1150℃）钎焊。三氟化硼可以由放在钎焊容器中的氟硼酸钾在 800~900℃ 完全分解产生，并添加在惰性气体中使用，其体积分数控制在 0.001%~0.1% 的范围内。

三氯化硼和三氯化磷气体对氧化物具有更强的活性，且反应生成

的产物熔点较低或易挥发，可在包括高温和中温的宽温度范围（300~1000℃）内进行碳钢及不锈钢、铜及铜合金、铝及铝合金的钎焊。该气体钎剂也应添加到惰性气体中使用，并使体积分数控制在0.001%~0.1%的范围内。

2. 火焰钎焊用气体钎剂

火焰钎焊时，可采用硼有机化合物的蒸气作为气体钎剂，如硼酸甲脂蒸气等。该蒸气在燃气中供给，并在火焰中与氧反应生成硼酐，从而起到钎剂作用，可在高于900℃的温度钎焊碳钢、铜及铜合金等。

2.4 气体介质

钎焊时采用钎剂去膜带来了清洗残渣的困难，而且在少数情况下由于各种原因不能完全清除干净，这往往造成接头的腐蚀破坏。因此，近年来借助气体介质去膜的无钎剂钎焊方法已得到很大的发展。从气体本身的性质来看，钎焊时使用的气体介质主要包括中性气体、活性气体和真空等三大类别，其中常用的气体介质列于表2-7中。至于选用何种气体介质，则要根据待钎焊的母材的性质、钎焊成本及对钎焊接头的质量要求而定。

表 2-7 常用气体介质的种类和用途

名 称	成分（体积分数，%） 真空度/Pa	适 用 母 材
干燥燃气	氢 15~16，氮 73~75，一氧化碳 10~11	铜 ^② ，黄铜 ^① ，低碳钢，中碳钢 ^③ ，高碳钢，蒙乃尔合金，镍及镍合金
分解氨	氢 75，氮 25	铜 ^② ，黄铜 ^① ，低碳钢，中碳钢 ^③ ，高碳钢，蒙乃尔合金，镍及镍合金，铬合金 ^④
瓶装氢	氢 97~100	铜 ^② ，黄铜 ^① ，低碳钢，中碳钢 ^③ ，镍，蒙乃尔合金
纯 氢	氢 100	铜 ^② ，黄铜 ^① ，低碳钢，中碳钢 ^③ ，高碳钢，蒙乃尔合金，镍及镍合金，钴、铬、钨合金和硬质合金 ^④
纯 氮	氮 100	铜 ^② ，铜合金 ^①
纯 氩	氩 100	铜 ^② ，黄铜 ^① ，低碳钢，中碳钢 ^③ ，高碳钢，蒙乃尔合金，镍及镍合金，铬合金 ^④ ，钛、锆和铪

(续)

名 称	成分 (体积分数, %) 真空度 /Pa	适 用 母 材
真 空	>266	铜
真 空	66.5~266	低碳钢, 铜
真 空	0.133~66.5	碳钢, 低合金钢和铜
真 空	<0.133	耐热钢, 耐蚀钢, 铝, 钛, 锆和难熔金属

- ① 当合金中含有挥发性元素时, 气氛中应加入钎剂。
- ② 铜必须完全脱氧或无氧。
- ③ 加热时间要保持最短, 以防止有害的脱碳。
- ④ 如果铝、钛、硅或钼含量显著, 气氛中应加入钎剂。

2.4.1 中性气体

钎焊中使用中性气体主要包括氩气和氮气等。采用这种中性气体, 大大降低了钎焊区中氧的分压, 除能防止母材的氧化外, 还能促进原有的表面氧化膜的分解。但对于含有与氧亲合力大的元素的合金, 钎焊时除采用中性气体外, 尚需采用自钎剂钎料或通入少量活性气体以及配合使用钎剂等, 才能有效去除氧化膜, 取得满意的结果。

1. 氩气

氩是惰性气体, 在钎焊过程中与母材表面的氧化膜和母材本身均不发生相互作用, 可作为任何金属材料钎焊时的气体介质, 尤其是含有易挥发金属元素的合金材料, 采用氩气更为合适。

2. 氮气

氮作为中性气体多与活性气体混合使用, 有时也可单独使用。但氮与某些金属能够相互作用生成氮化物, 不但影响母材的力学性能, 而且妨碍钎料对母材表面的润湿, 降低钎焊接头的结合强度。在这种情况下, 应慎重或避免采用氮气作为气体介质。

2.4.2 活性气体

钎焊中使用的活性气体主要是还原性气体, 包括氢和一氧化碳等。这些还原性气体, 除能防止母材和钎料被氧化及保证钎焊区的低

氧分压外，还直接与氧化膜进行反应，从而将其去除。

1. 氢气

氢是一种化学性质很活泼的还原剂，能与许多金属氧化物发生反应，可用于除含镁、铝、钛、铍等元素较多的金属材料的钎焊中。但氢会与某些母材相互作用而影响母材本身的性能，如使钢表层脱碳、使铜及钛等金属脆化等，这时应慎重选用。为防止氢与空气混合发生爆炸，应将排出的废气烧掉。此外，为减少爆炸危险及降低成本，可采用分解氨和燃气代替氢。

2. 一氧化碳

一氧化碳是一种活性还原剂，但其活性不如氢，一般与氢和氮混合使用。采用一氧化碳，可有效地钎焊铜、镍、钴和碳钢等。在钎焊碳钢时，一氧化碳可以使碳钢渗碳。一氧化碳分解时会放出氧气，这对钎焊是不利的。此外，一氧化碳有毒，使用时必须通风良好，并将废气烧掉。

2.4.3 真空

真空是压力低于正常大气压的气体空间。采用真空进行钎焊，可使金属表面的氧化物通过分解、还原、挥发或溶解等方式而去除，同时还对母材起到保护和除气作用，不但能避免钎剂带来的夹渣、焊后清洗残渣或产品腐蚀等问题，而且能消除其它气体介质造成钎缝形成气孔的可能性。目前，真空钎焊方法已得到了迅速发展和广泛应用，已成功地钎焊了那些用钎剂或其它气体介质难以钎焊的金属和合金，诸如钛、锆、铌、不锈钢和高温合金等，且钎焊接头具有光洁的外表和优异的致密性。

真空钎焊的缺点是：含易挥发元素的母材会因元素的挥发而影响本身的性能，这时应采用复杂的工艺措施；对钎焊前零件表面的粗糙度、装配质量和配合公差等的影响比较敏感，对工作环境和工人的理论水平要求高；真空设备复杂，一次性投资大，维修费用高。

第3章 钎 料

3.1 钎料的分类及选用原则

3.1.1 钎料的分类

所谓钎料，是指在钎焊过程中用于形成钎焊接头而添加的金属。按照钎料熔化温度的不同，可将其分为两大类。一类为熔化温度低于450℃的钎料被称之为软钎料，另一类为熔化温度高于450℃的钎料被称之为硬钎料。450℃这一分界温度是人为规定的，“软”和“硬”也是相对的。在行业上，也有人习惯于将钎料分为高温钎料、中温钎料和低温钎料，这种高、中、低的划分更没有明确的分界温度，并且对于不同的母材金属，其划分的大致温度也有较大的差异，因而存在着更大的不确定性。

钎料种类划分的另一种常见方法是按其组成的主体金属来命名。如软钎料可以分为锡基钎料、锡基钎料、锡基钎料、铅基钎料、锡基钎料、锡基钎料等，其熔点范围如图3-1所示。硬钎料可分为铝基钎

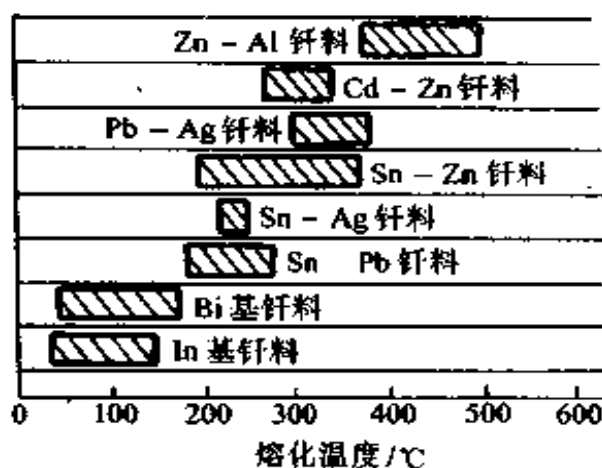


图 3-1 各种软钎料的熔点范围

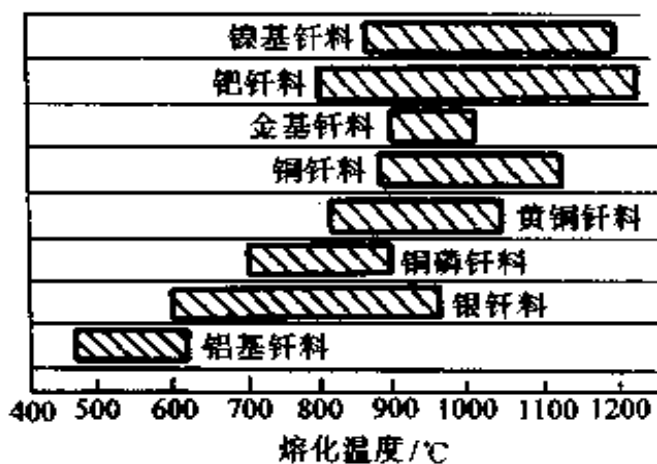


图 3-2 各种硬钎料的熔点范围

钎料、锡基钎料等，其熔点范围如图3-1所示。硬钎料可分为铝基钎

料、银基钎料、铜基钎料、锰基钎料、镍基钎料等，其熔点范围如图3-2所示。

3.1.2 对钎料的基本要求

钎料自身的性能及其与母材间的相互作用性能在很大程度上决定了钎焊接头的性能。因此，要获得优质的钎焊接头，钎料一般要满足以下几项基本要求：

1. 具有适当的熔点

一般来说，钎料的熔点至少应比母材的熔点低几十度。若二者熔点过分接近，则使钎焊过程不易控制，甚至可能导致母材晶粒过分长大、过烧或局部熔化。

以纯金属为钎料的情况是很少见的，大多数钎料都是合金。作为合金，它通常从固态熔化转变为液态要经过一个温度区间，在此温度区间内的任一温度下，固相将和液相并存。从金属学的知识可知，此温度区间的下限是为固相线，在固相线以下合金处于纯固态。而此温度区间的上限为液相线，在液相线以上合金处于完全液态。在固液相共存时合金的粘度较大，流动性较差，这对钎焊接头的形成是不利的。共晶合金是一些特殊成分的合金，其熔化时不是发生于某一温度区间，而是像纯金属一样在一特定的温度下完成固液相转变，即其固相线与液相线相等。因而，共晶成分的钎料通常都具有较好的流动性。

2. 具有良好的润湿性能及填缝性能

钎料应具有良好的润湿性能及填缝性能，应能在母材表面充分铺展并能充分填满钎缝间隙。通常液态钎料是依靠毛细作用填充到钎缝间隙中去的，并且钎料对母材润湿性的优劣将直接影响到钎料填缝的效果。此外，为保证钎料良好填缝，在钎料流入接头间隙之前就应处于完全熔化状态。因此，应将钎料的液相线看成是钎焊时可采用的最低温度，接头的整个截面必须加热到液相线温度或更高的温度。

3. 能与母材发生充分作用并形成牢固的冶金结合

钎料应能与母材发生溶解、扩散等相互作用，从而形成牢固的冶金结合。当液态钎料润湿母材时，钎料与母材之间就会发生母材成分

向液态钎料中溶解和钎料组分向母材中扩散这样的相互作用。这种相互作用会影响到钎焊接头及母材的物理性能和力学性能。不同的母材钎料体系的相互作用程度和效果是不同的，适当的作用可以使钎料发生合金化作用，从而提高接头的力学性能。而相互作用过度就会影响到钎料的流动性并降低接头的性能。

4. 具有稳定和均匀的成分

钎料应具有稳定和均匀的成分，在钎焊过程中应尽量避免出现偏析现象和易挥发元素的损耗。如果在钎焊过程中钎料的某些组元易发生偏析或易于挥发烧损，这将使钎料的成分和均匀性发生变化，造成接头性能的不均匀和不稳定，从而会影响钎焊接头的承载能力。

5. 能满足使用要求

所得到的钎焊接头应能满足使用要求，如力学性能（常温、高温或低温下的强度、塑性和冲击韧性等）和物理化学性能（如导电、导热、抗氧化和抗腐蚀等）方面的要求。此外，还应考虑钎料的经济性，在满足工艺性能和使用性能的前提下，应尽量少用或不用稀有金属和贵金属，从而降低生产成本。

3.1.3 选用钎料的原则

钎料的种类繁多，使用过程的影响因素也比较多，因而钎料的选择是一个比较复杂的问题。对此，从原则上来说，选用钎料应从以下几个方面来考虑：

1. 钎料与母材的匹配问题

对于确定的母材来说，所选用的钎料应具有适当的熔点，对母材具有良好的润湿性和填缝能力。其与母材相互作用能产生有益的结果，应能避免形成脆性的金属间化合物，不产生晶间渗入，避免因母材过分溶解而造成溶蚀，以及避免热膨胀系数失配等。

2. 钎料与钎焊方法匹配的问题

不同的钎焊方法对钎料性能的要求也是不同的。对于具体的情况要做具体的分析。如采用电阻钎焊方法时，希望钎料的电阻率比母材的电阻率大一些，以提高加热效率；进行炉中钎焊时，钎料中易挥发元素的含量应较少，从而保证在相对较长的钎焊时间内不会因为合金

元素的挥发而影响到钎料的性能；真空钎焊时，钎料中一般不应含有蒸气压高的合金元素，从而避免对真空系统的污染；而火焰钎焊时，钎料的熔点应与母材的熔点相差尽可能大，从而避免可能产生的母材局部过热、过烧或熔化等。

3. 保证满足使用要求

不同产品在不同的工作环境和条件下对钎焊接头性能的要求是不同的。这些要求可能涉及到导电性、导热性、工作温度、强度、塑性、密封性、防氧化性、抗腐蚀性等问题。但对于一个具体的钎焊件来说，同时要求其各方面都具有优异的性能是不现实的，也是没有必要的。因此，选择钎料时应着重考虑其最主要的使用要求。对钎料最常见的要求是在高温下的强度、耐蚀性和抗氧化性，对这些问题最好在实际工作条件下进行实验。当钎焊接头在低温下工作时，用大多数钎料钎焊的接头的拉伸、剪切和冲击性能不会产生有害的影响。而当有疑问时，也应取些试件在规定的温度下进行实验来确定接头是否满足必要的工作时间、温度和强度的要求。

4. 钎焊结构的要求

钎焊结构本身的复杂性和钎焊方法的限制使得手工送进钎料这种最简单的钎料添加方法在很多情况下不能采用，因而常常需要将钎料预先加工成形，如制成环状、垫圈、垫片及箔材和粉末等形式，并预先放置在钎焊间隙中或其附近。因此，在选用钎料时还要充分考虑其加工性能是否可以制成所需要的形式。例如，某些极脆的材料尽管其具有优异的钎焊性能和可以满足使用要求，但由于其难以加工成形，所以其应用仍然受到了极大的限制。

5. 生产成本问题

生产成本问题包括钎料的材料成本，成形加工成本和钎焊方法及设备投资等方面的成本。含有贵金属和稀有金属的钎料，其材料成本必然提高，因此，应尽量避免采用。但有时材料成本与钎料加工成本或生产设备的投资相比是微不足道的。因此在生产批量不大时，应优先考虑产品的性能和质量。而对于大批量生产来说，钎料材料成本的微小降低都可能具有重要的经济意义。

3.2 软钎料

所谓软钎料是指熔点在 450°C 以下的钎料。这类钎料在许多工业领域，尤其是在电子、医疗器械、金银首饰及机械等工业中得到了广泛的应用。

软钎料中主要的金属元素是锡，其次是铅、铋、锌、铟、锑、镉、银、铜等。这些金属的不同组配构成了种类繁多、性能各异的软钎料。图 3-3 为二元合金软钎料的典型例子。

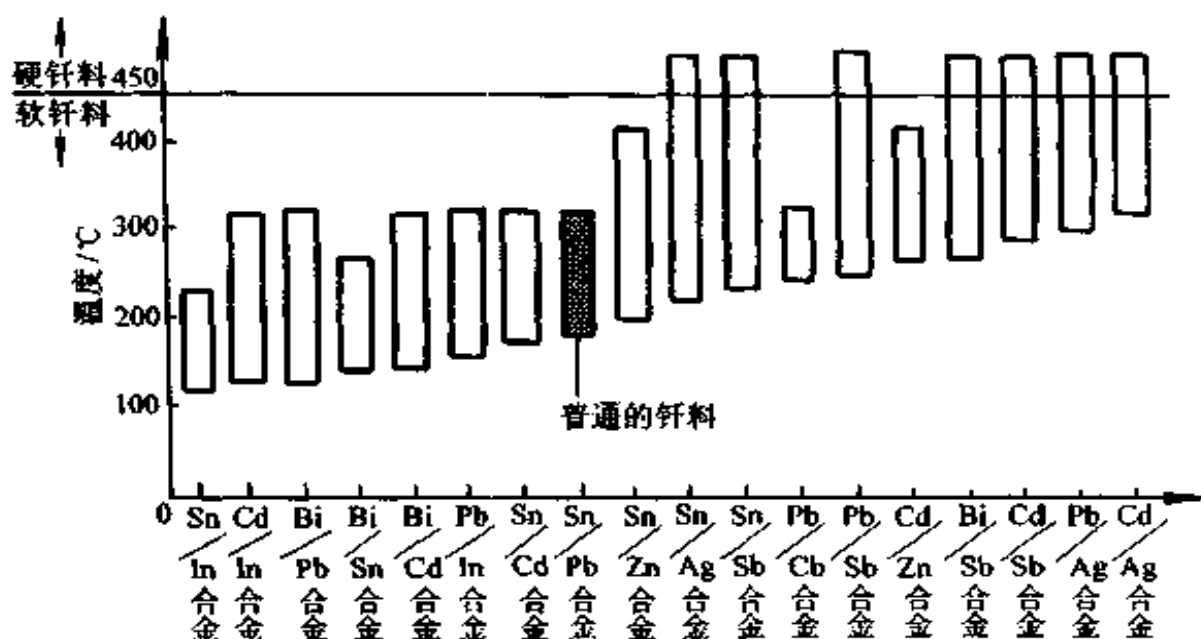


图 3-3 典型的二元合金软钎料

3.2.1 锡铅钎料

3.2.1.1 锡铅钎料的物理性能和力学性能

软钎料中应用最广泛的是锡铅钎料。国内外锡铅钎料的牌号和品种极多，为了便于了解和掌握其物理性能和力学性能，我们首先来分析一下锡铅二元合金的平衡相图（图 3-4）。由图 3-4 可以看到，锡铅二元合金构成的是典型的共晶相图，其共晶成分为 $w(\text{Sn}) 61.9\%$ 、 $w(\text{Pb}) 38.1\%$ ，共晶温度为 183°C 。共晶体由面心立方的 $\alpha(\text{Pb})$ 相和体心立方的 $\beta(\text{Sn})$ 相组成。在共晶温度下，Sn 在 Pb 中的溶解度为 19.5% ，随温度降低其溶解度下降，同时析出 $\beta(\text{Sn})$ 固溶体；

室温时 Sn 在 Pb 中仅能溶解 2%~3%。共晶温度时, Pb 在 Sn 中的溶解度为 2.5%, 温度下降时析出 α (Pb) 固溶体, 室温时 Pb 在 Sn 中的溶解度仅为万分之几。实际上, 在室温下的 β (Sn) 几乎为纯 Sn。图 3-5 为锡铅共晶合金的金相组织照片。

由于锡铅合金的熔点较低, 其再结晶温度低于室温, 因此不能产生冷作硬化, 而是表现出明显的粘性特征。当锡铅合金的变形量增大时可以促使 β (Sn) 相从过饱和的 α (Pb) 相中析出, 使其强度降低, 因而表现出经过变形的锡铅合金的强度要比铸态时低。在较高温度下 (100~150℃) 元素的扩散速度较快, 此时的力学性能明显下降。

锡铅钎料在冶炼过程中难以排除各种杂质的影响, 所以其物理性能和力学性能的实验数据往往与理论数据不一致。目前, 工业用锡铅合金的锡的质量分数为 73% 时, 具有最佳的力学性能, 图 3-6 和表 3-1 给出了电导率、密度、抗拉强度、抗剪强度、伸长率、硬度和冲击韧度等性能随合金成分的变化。

图 3-7 给出了锡铅钎料的流动性及表面张力随合金成分变化的曲线。由图可见, 纯锡、纯铅和共晶合金都具有良好的流动性, 而在固液相线温度区间最大处 [$w(\text{Sn})$ 为 19.5%] 合金的流动性最差。

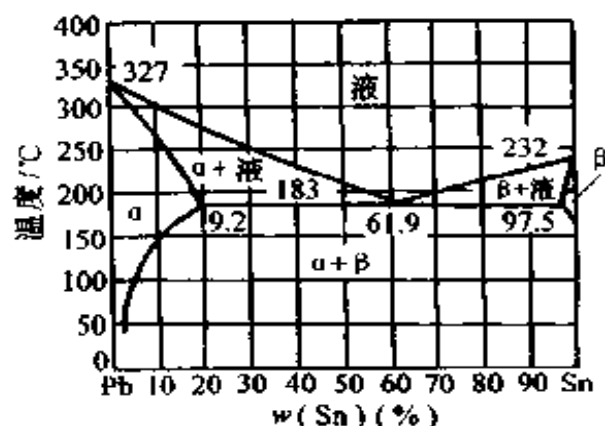


图 3-4 锡铅二元合金相图

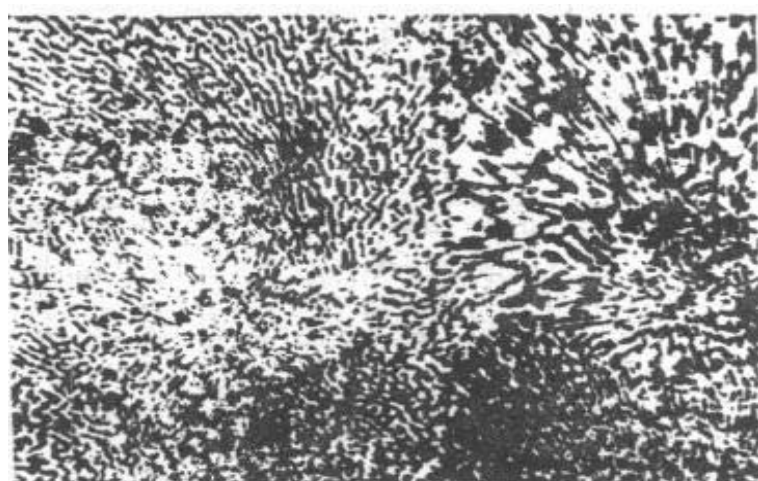


图 3-5 锡铅共晶合金的显微组织

钎料的流动性是评价钎料工艺性能的主要指标之一，流动性好的钎料具有良好的填缝性能，可以保证获得稳定、良好的钎缝质量。

锡铅钎料对铜等多种母材金属均具有良好的润湿性能和铺展能力，尤其是共晶成分的钎料合金，在适当的温度下其铺展面积明显增大（见图 3-8）。加之其表面张力最小，流动性最好，力学性能也十分优异，因此成为电子工业中应用最为广泛的钎料合金。

3.2.1.2 锡铅钎料中杂质及合金元素对钎料性能的影响

锡铅钎料中的杂质是指钎料中的其它元素或化

合物，这些物质是原始存在于钎料中的，其可能来源于原料矿石或源于钎焊操作期间的污染，而不是为获得某些性能而人为加入的合金元素。杂质元素的存在，有些是无害甚至有益的，而有些元素，即使是微量混入也会使钎料的工艺性能恶化，对结合性能产生各种不利的影响。

锡铅钎料中所含的杂质元素主要有：

(1) 铜 铜在锡或铅中的溶解度是非常小的，但铜和锡之间可以形成 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5 两种金属间化合物。这些化合物在室温下就可以观察到。由于所形成的铜锡化合物的电阻率较低，因而铜的存在降低了钎料的总电阻率。此外，铜还会使钎料的熔点升高，结合强度

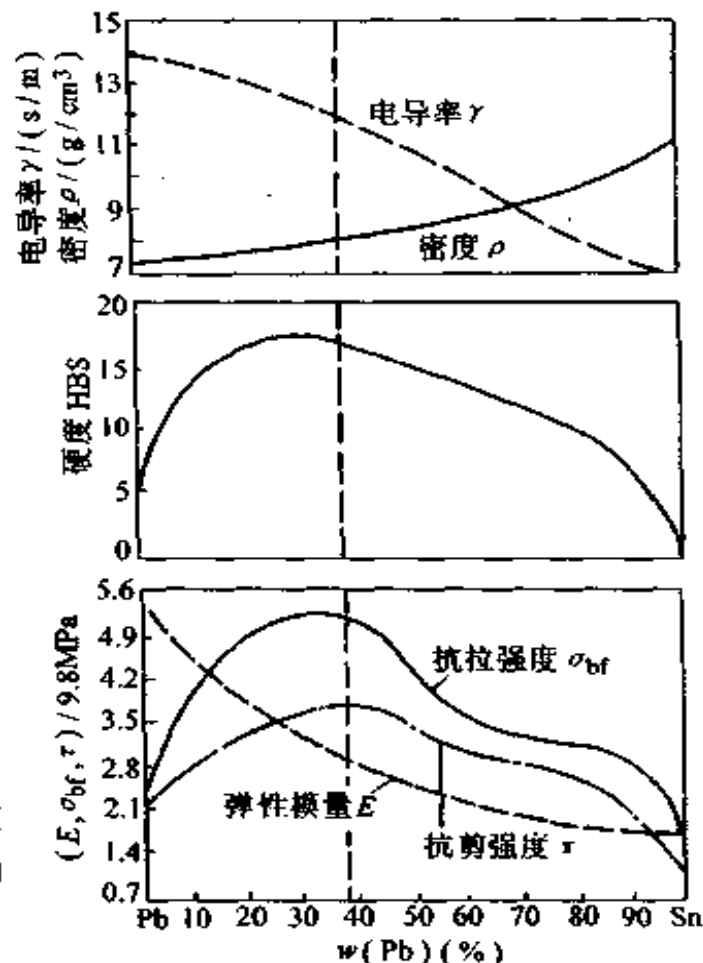


图 3-6 锡铅钎料的性能与成分的关系

表 3-1 锡铅钎料的物理性能和力学性能

钎料成分(%)		熔化温度/℃		密度 (g/cm ³)	与纯铜 电导率 之比 (%)	电阻率 (mΩ·cm)	热导率 (W/m·K)	线膨胀 系数× 10 ⁻⁶ /℃	抗拉 强度 (MPa)	抗剪 强度 (MPa)	冲击 韧度 (10J/cm ²)	伸长 率 (%)	硬度 (MPa)
w (Sn)	w (Pb)	固相 线	液相 线										
100	0	232	232	7.31	13.9	12.85	0.157	22.4	1.9	2.19	5.29	43	6.2
90	10	183	220	7.57	—	—	0.15	26.0	4.3	2.70	1.85	25	13.0
80	20	183	208	7.87	—	—	—	—	4.5	5.01	1.37	22	13.5
75	25	183	196	8.02	—	—	—	—	4.4	4.13	2.23	22	14.9
62	38	183	183	8.35	11.9	14.13	—	24.7	4.1	4.34	2.75	34	10.5
50	50	183	209	8.87	11.0	15.82	—	—	3.6	3.54	4.59	32	15.6
40	60	183	235	9.31	10.2	17.07	0.095	25.0	3.2	3.67	4.75	63	12.6
33	67	183	250	9.61	9.7	—	—	—	3.2	3.35	4.36	66	15.6
30	70	183	256	9.69	9.5	—	0.094	26.5	3.3	2.90	4.67	58	10.1
25	75	183	265	9.94	9.1	—	—	—	2.8	2.85	3.68	52.1	10.5
20	80	183	277	10.2	8.6	20.50	—	26.5	2.8	2.52	3.86	67	10.5
18	82	183	277	10.2	8.6	—	0.093	26.0	2.8	2.52	3.86	67	10.5
15	85	225	287	10.3	8.3	—	—	—	2.4	2.52	3.60	41	9.7
10	90	265	302	10.8	—	—	—	24.6	3.2	2.46	3.49	32	9.7
5	95	300	314	11.0	—	—	—	—	—	2.35	2.51	21	8.1
0	100	327	277	11.4	7.9	20.00	0.08	29.5	1.1	1.27	2.11	45	3.3

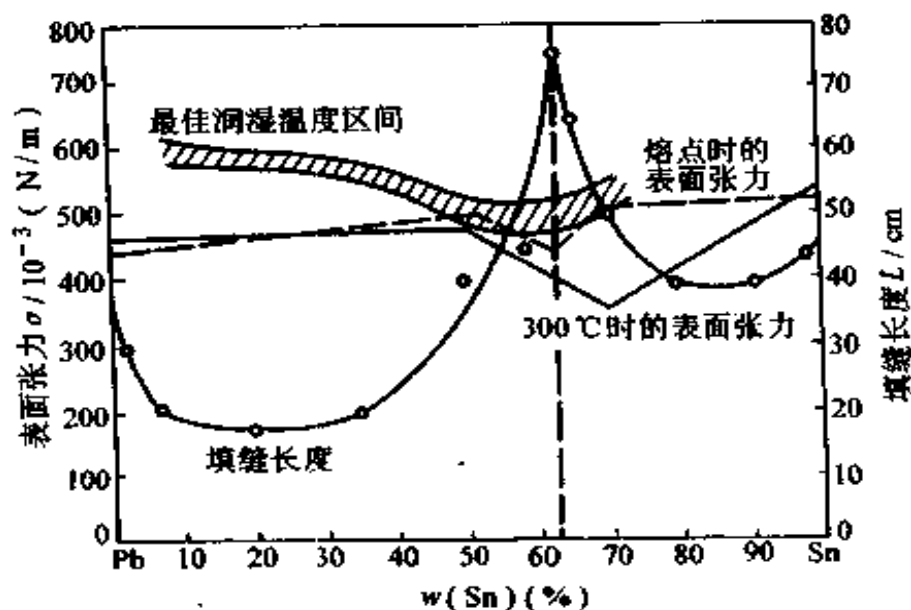


图 3-7 锡铅钎料的流动性及表面张力

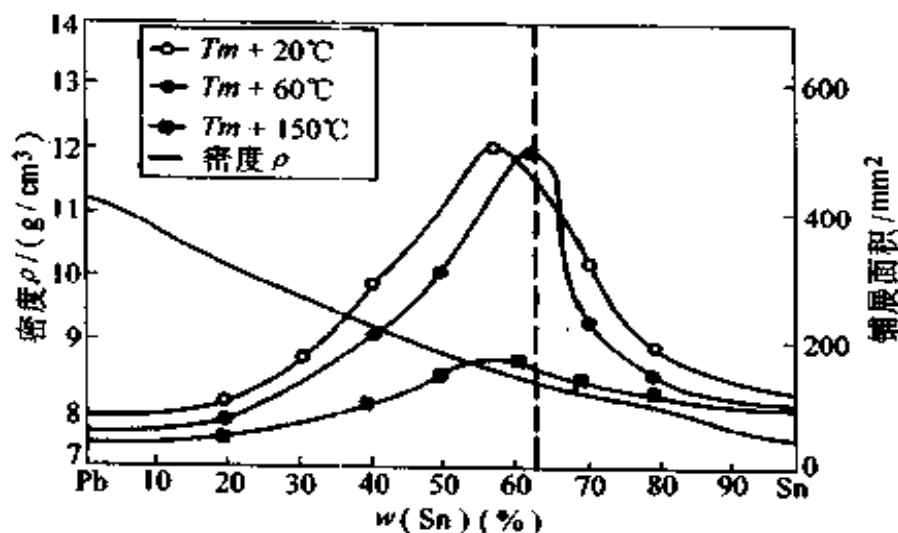


图 3-8 锡铅钎料的铺展面积

增大。当铜的质量分数在 1% 以内时就具有使蠕变抗力增大的效果，并可使钎料的铺展面积略有增加。当铜的质量分数超过 2.4% 时，会使钎料的熔点迅速升高，粘度增加，流动性变差。

(2) 铈 铈实际上不是钎料中的杂质，而常常是作为合金元素而加入的。铈的加入可以改善钎料的润湿性，使机械强度增加，但也会使钎料的电阻率增大。通常铈的添加质量分数在 0.3% ~ 3% 内，最多可以加到 6%。在此范围内既可增加钎料的强度，从而用作高温软钎料，又可增大蠕变抗力。但超过 6% 时，会使钎料变硬、变脆，润湿性和铺展能力下降，并且易被腐蚀。

(3) 铋 铋的加入可使钎料的熔点下降，润湿及铺展能力提高，但同时也使钎料的电阻率增大并使钎料变脆，冷却时会产生微裂纹，因而不宜用于气密性封装。

(4) 铝 铝在锡或铅中都不固溶。当铝的质量分数在 0.001% 时就开始表现出不良的影响，铝的存在严重影响钎料的润湿和铺展性能，除了使外观和操作性能恶化之外，还容易产生氧化和腐蚀。

(5) 锌 锌不固溶于铅，在锡中的溶解度也很小，并且其与锡铅合金也不形成金属间化合物。锌的存在对钎料合金是有害的，锌的质量分数为 0.001% 时就会产生影响，当达到 0.01% 时会损害外观，降低润湿性和铺展性，但锌可使钎料的电阻率降低。

(6) 镉 镉可以使钎料的熔点下降, 但会使钎料的晶粒粗化并失去金属光泽。镉的质量分数超过 0.001% 时就会因氧化等非金属夹杂物的存在而增大粘性, 降低钎料的铺展性能并产生脆化影响。

(7) 砷 砷在锡或铅中均无互溶, 但可与锡形成 Sn_3As_2 和 SnAs 两种金属间化合物, 以长针形存在于显微结构中。钎料中砷的含量应严格控制, 即使含量极少也会使外观变差, 脆性增加, 但其却可使铺展性得到改善。

(8) 铁 铁与锡可以形成 FeSn 和 FeSn_2 两种金属间化合物。当钎料中铁的质量分数达到 1% 时就会使熔点升高, 铺展性下降, 并且会使钎料带有磁性。

(9) 镁 镁与锡和铅可形成 Mg_2Sn 和 Mg_2Pb 金属间化合物。镁对钎料有着与铝同样的影响。

(10) 镍 镍可以与锡形成 Ni_3Sn 、 Ni_3Sn_2 和 Ni_3Sn_4 三种金属间化合物。镍可以改善锡铅钎料的铺展性能, 对钎料没有不良影响。

(11) 金 金可与锡和铅形成 AuSn 、 AuSn_2 、 AuSn_4 、 Au_6Sn 、 Au_2Pb 、 AuPb_2 等多种金属间化合物, 钎焊时, 如果使加热时间稍长就会看到极暗的并且象浮渣似的表面, 这是由于化合物相上浮到表面造成的。当金的质量分数超过 0.2% 时, 钎料的流动性明显变差。由于金是极为贵重的金属, 具有回收价值, 因此在实际钎料中的金含量是极微小的。

(12) 银 银在锡和铅中均无固溶度, 但可与锡形成 Ag_6Sn 和 Ag_3Sn 两种金属间化合物。在钎料中加入银的质量分数达到 0.1% 时, 表面光泽减退。而当银的质量分数超过 0.5% 时, 表面光泽又变好, 此时抗拉强度明显增加, 而伸长率下降。钎料的熔点随银含量的增加而降低, 当银的质量分数为 1% 时, 熔点为 178°C 。银的加入对铺展性能无明显影响, 银的质量分数超过 3% 时, 会失去光泽, 加工表面呈现出白颗粒状, 外观光泽减退。从经济性、工艺性及熔点变化等方面来考虑, 银的加入质量分数一般控制在 0.5%~2% 左右。银的加入还可以提高钎料的热强性。

(13) 硫 钎料中硫的质量分数超过 7×10^{-6} 时就会对润湿性产

生极恶劣的影响。

(14) 磷 少量的磷可以增加钎料的铺展能力,但对钎焊烙铁头有腐蚀作用。

(15) 铈镧混合稀土 锡铅钎料中加入少量的铈镧混合稀土就可以明显改善钎料的力学性能,并且对钎料的铺展性能没有明显的影响。当稀土的质量分数为 0.05% 时,抗拉强度可以提高 40%,伸长率略有下降,而且其抗蠕变能力成倍提高。随着稀土含量的增加,钎料的抗拉强度进一步提高,蠕变抗力也随之增大。当稀土的质量分数超过 1% 时,蠕变抗力降低。此时可在钎料显微组织中发现 CeSn 金属间化合物相。

3.2.1.3 国产锡铅钎料概述

我国生产的锡铅钎料的型号、成分及主要性能见表 3-2。用这些钎料钎焊不同母材时的接头强度见表 3-3。

表 3-2 国产锡铅钎料的成分和性能

型 号	化学成分的 质量分数(%)	熔 点 /℃	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	电阻率 / $\mu\Omega\cdot m$	密度 /(g/ cm ³)
S-Sn60Pb39Sb	Sn59~61Pb39Sb<0.8	183~185	46	34	0.145	8.50
S-Sn18Pb80Sb	Sn17~18Pb80Sb2~2.5	183~277	27	67	0.220	10.23
S-Sn30Pb68Sb	Sn29~31Pb68Sb1.5~2	183~256	32	—	0.182	9.69
S-Sn40Pb58Sb	Sn39~41Pb58Sb1.5~2	183~235	37	63	0.170	9.31
S-Sn90Pb10	Sn89~91Pb10Sb<0.15	183~222	42	25	0.120	7.57
S-Sn50Pb50	Sn49~51Pb50Sb<0.8	183~210	37	32	0.156	8.83

表 3-3 锡铅钎料钎焊接头强度

钎 料 型 号	母 材 金 属	接头抗拉强 度 /MPa	接头抗剪强 度 /MPa
S-Sn60Pb39Sb1	纯铜	93.2	34.3
	黄铜	78.3	34.3
	钢	95.9	35.2
S-Sn18Pb80Sb2	纯铜	84.2	37.2
	黄铜	92.0	37.2
	低碳钢	102.8	49.9
	镀锌铁皮	—	42.1
	镀锡铁皮	—	46.0
	1Cr18Ni9Ti	—	21.5

(续)

钎料型号	母材金属	接头抗拉强度/MPa	接头抗剪强度/MPa
S-Sn30Pb68Sb2	纯铜	76.4	36.2
	黄铜	86.2	37.2
	低碳钢	112.6	49.0
	镀锌铁皮	—	41.1
	镀锡铁皮	—	35.2
	1Cr18Ni9Ti	—	32.3
S-Sn40Pb58Sb2	纯铜	76.4	36.2
	黄铜	78.3	45.0
	低碳钢	98.8	59.7
	镀锌铁皮	—	55.8
	镀锡铁皮	—	48.0
	1Cr18Ni9Ti	—	31.1
S-Sn90Pb10	纯铜	88.1	45.0
	黄铜	89.1	44.1
	1Cr18Ni9Ti	—	32.3

S-Sn60Pb39Sb1 (HL600) 是含锡 60% 的共晶型锡铅钎料, 其熔点低, 流动性好。用于钎焊工作温度较低及要求钎缝光洁的零件。如: 无线电零件、电气开关零件、计算机零件、易熔金属制品以及热处理件的钎焊。

S-Sn18Pb80Sb2 (HL601) 是锡的质量分数为 18% 的锡铅钎料, 其含锡量很低, 熔点高, 结晶间隔大。因此当用烙铁进行钎焊时比较困难, 力学性能也较差。主要用于钎焊铜及铜合金和镀锌铁皮等强度要求不高的零件。

S-Sn30Pb68Sb2 (HL602) 锡的质量分数为 30%, 是应用较广的锡铅钎料。其铺展性能及力学性能都较好。常用于钎焊铜、黄铜、铁、镀锌铁皮、白铁皮等, 如散热器、仪表、无线电元件、电缆护套及电机的扎线等产品。

S-Sn40Pb58Sb2 (HL603) 锡的质量分数为 40%, 是应用最广的锡铅钎料。其熔点低, 铺展性好, 可得到较光洁的表面, 并且力学性能也较好。常用于钎焊铜及铜合金、钢、锌制零件, 如钎焊散热器、

无线电及电气开关设备、工业仪表、镀锌铁皮及白铁皮等。

S-Sn90Pb10 (HL604) 是锡的质量分数为 90% 的高锡型钎料，具有较好的抗蚀性。由于其含铅量低，故多用于钎焊食品器皿及医疗器材。此钎料可以钎焊大多数钢材及其它金属。

S-Sn50Pb50 (HL613) 为锡的质量分数为 50% 的锡铅钎料。其性能与 S-Sn40Pb58Sb2 接近，但熔点要低一些。该钎料适用于钎焊铜、黄铜、镀锌或镀锡铁皮，以及散热器、计算机零件等。

3.2.2 铝用软钎料

铝用软钎料大体可以分为三类：低温软钎料，中温软钎料和高温软钎料。通常将熔点在 $150\sim 260^{\circ}\text{C}$ 的钎料看成是低温软钎料，其主要是在锡或锡铅合金中加入一些锌（少量），以提高钎料与铝母材的结合强度。这类钎料的熔点低，操作方便，但接头的抗腐蚀性差。熔点在 $260\sim 370^{\circ}\text{C}$ 的铝用钎料，一般称为中温软钎料的主要有锡锌合金和锌镉合金。由于其锌的含量较高，所以其熔点也较高。这类钎料与铝的结合性能优良，接头的强度和耐蚀性也较好，但操作难度较大。高温软钎料为熔点在 $370\sim 450^{\circ}\text{C}$ 的钎料。这类钎料主要是以锌为基体，加入少量的铝，铜等合金元素。由于合金元素的含量不同，有时其液相线可能超过 450°C ，但习惯上仍将其归入此类钎料中。这类钎料与铝的结合性能良好，具有优良的强度和耐蚀性能，但其钎焊操作时的困难性也较大。表 3-4 给出了这三类钎料性能的对比。表 3-5 给出了一些软钎料的组成。

铅铋系钎料用于铝软钎焊，它具有优异的抗腐蚀性能，但其润湿和铺展性能极差，这使其应用受到了极大的限制。为改善钎料对母材的润湿性，可以加入少量的锡。但锡加入过量会使抗腐蚀性能明显降低。加入锌的质量分数为 2% 左右可提高合金的强度，加入铋的质量分数为 1% 左右可进一步提高潮湿条件下的抗腐蚀性能，但对润湿性能有所降低。典型合金的组成（质量分数）为铅 55%～65%，铋 20%～30%，锡 5%～10%，银 0.5%～2% 或镉 0.75%～3%。这种钎料的润湿性和抗腐蚀性能优异，其熔化温度为 $168\sim 252^{\circ}\text{C}$ ，可用于烙铁钎焊。

表 3-4 铝用软钎料使用性能的对比

种 类	熔点范围/℃	一般组成	操作	与铝结合	强度	耐蚀性	对母材影响
低温软钎料	150~260	Sn-Zn 系 Sn-Pb 系 Sn-Zn-Cd 系	容易	可	低	差	小
中温软钎料	260~370	Zn-Cd 系 Zn-Sn 系	中等	优良	中	中	中
高温软钎料	370~450	Zn-Al 系 Zn-Al-Cu 系	困难	优秀	高	好	小

表 3-5 铝用软钎料的成分及用途

序 号	组 成									熔化温度 /℃	钎焊方法	接头性能	用 途
	Sn	Zn	Ag	Al	Cd	Sb	Cu	Pb	Te				
1	91	9								199	烙铁、刮擦钎焊	需防腐蚀处理，强度为 20~50	低温用软钎料
2	80	20								199~270			
3	70	30								199~311			
4	60	40								199~340			
5	30	70								199~375			
6	70	20	1							260~280			
	80	30	20								大气中耐蚀性良好		
7	50	40	2	2						320~350			
	65	44	3	4									
8	86				6	6	2			(250±5)		需要防腐	电缆连接用软钎料
9	40				8			52		141~215			
10	40	2						58		169~216			
11	70	20			9.7				0.3	199~269	火焰、浸渍、炉中钎焊	强度为 50~100	中温软钎料
12		17.5			82.5					265~365			
13		60			40					265~335			
14	90			10						265~399			
15	25	2		73						265~289			
16	95	5								420~450			
17	95		5							382~391		耐蚀性好，需急冷，强度 100~150	高温用软钎料
18	95		4			1				382~390			
19	95		5						0.01	382~391			
20	85		15							382~450			
21	70		30							460~510			

在一些铝用软钎料中加入镓可使钎料具有自钎剂作用,即在钎焊操作时可以不用钎剂。并且镓的加入还可以增加连接强度。已见著报道的含镓钎料合金有 Zn-Sn20%-Ga0.5%~1.5%, Sn-Cd18%-20%-Ag0.5%-1.0%-Ga0.5%-1.5%, 以及 Ga-Al50%-65%-Cu2.5%-5%-Cr0.1%-4%-Mn0.2%-4%-Mg1.6%-3.2%, 这种钎料可提高接头强度和耐蚀性能,钎焊温度为 150~200℃, 焊后可耐 300℃ 以上温度,耐热循环性能、耐振动冲击性能良好,钎焊铝时可不用钎剂。

国产典型铝用软钎料的牌号、组成、性能及接头强度等见表 3-6。

表 3-6 钎焊铝用软钎料的成分性能及接头强度

类别	型 号	熔化温度/℃	钎料抗拉强度/MPa	钎焊接头强度/MPa	
				σ_b	τ
低温	S-Pb51Sn31Cd9Zn9 S-Sn91Zn9	150~210 199	61.7 —	(纯铝)67.6	40.1
中温	S-Zn58Sn40Cu2	200~350	88.3	(纯铝)61.7	38.2
	S-Zn60Cd40	266~335	—	(铝铜)62.7	40.1
				(纯铝)63.6	42.1
	S-Sn70Zn30	199~311	—	(铝铜)62.7	42.1
高温	S-Zn72Al28	430~500	196—245	(纯铝)63.6	39.2
				(LF21)94.0	54.8
				(LY12)138	83.2
	S-Zn95Al5	380	—		
	S-Zn93Ag4.5Al2.5Si	390~420	—		
	S-Zn65Al50Cu15	415~425	—		

S-Pb51Sn31Cd9Zn9 是含有 Cd 和 Zn 的锡铅钎料,其熔点低,流动性好。但耐蚀性较差,所以通常其接头应涂漆保护。这种钎料可以配合 QJ204 铝软钎剂使用,用于铝芯电缆的钎焊等。S-Zn58Sn40Cu2 是含铜的锌锡钎料。由于其结晶温度区间较大,故适用于铝及铝合金的刮擦钎焊,也可用于铝与铜和钢等异种金属的钎焊。刮擦钎焊时可不用钎剂,而其它情况下可与 QJ205 配合使用。S-Zn60Cd40 是锌镉钎料,具有优良的流动性和填缝能力。其耐蚀性优于锡铅钎料,但比锌铝钎料差。此钎料可配合 QJ205 和 QJ206 用于铝及铝合金、铜与铜合

金、铝与铜、铝与钢等的钎焊。钎焊后应将残留钎剂和残渣彻底清除。S-Zn72Al28 是锌铝钎料,具有良好的流动性和填缝能力,耐蚀性能好。此钎料适用于铝及铝合金的火焰钎焊,可与 QJ201 或 QJ202 配合使用。钎后应彻底清除钎剂残渣。

3.2.3 高温软钎料和低温软钎料

锡铅钎料,尤其是共晶成分的锡铅钎料多用于电子产品及电气制品的连接。而对于非电气制品,一般板金件及热交换器和医疗、食品工业中的钎焊问题,以及要求较高工作温度或要求较低熔点的场合,仅仅依靠普通锡铅钎料是难以全面满足要求的。因此,除锡铅钎料外,人们还开发了多种软钎料,以适应不同环境条件下的应用。

3.2.3.1 高温软钎料

由锡铅二元合金相图(图 3-4)可知,当锡的质量分数小于 19.5% 时,由于固相线温度升高,因此在此温度范围内的钎料可以用作高温钎料。此外还有其它一些熔点在 230℃ 以上的钎料也可用于使用温度要求相对较高的场合。见表 3-7 给出了一些高温软钎料的组成和特性。

表 3-7 高温软钎料的组成和特性

钎料成分的质量分数 (%)						熔化温度/℃		抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	固有电阻/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Sn	Pb	Cd	Zn	Ag	其它	固相线	液相线			
—	97.5	—	—	2.5	—	304	304	35	—	—
1~2	93~95	—	—	5~6	—	302	304	—	—	—
1	97.5	—	—	1.5	—	309	309	—	—	—
8	90	—	—	2	—	285	295	34	67	21.61
95	5	—	—	—	—	300	314	—	—	—
100	—	—	—	—	—	232	232	—	—	—
95	—	—	—	—	Sb5	232	240	—	—	—
1~2	—	94~95	—	5~6	—	385	391	—	—	—
—	85	10	5	—	—	234	254	37	63	17.45
—	75	—	—	—	In25	230.3	230.3	—	—	—
—	95	—	—	—	In5	314	314	—	—	—
—	—	82.5	17.5	—	—	265	268	—	—	—
—	—	88	10	2	—	269	294	95	71	8.31
—	—	73	25	2	—	273	295	104	69	7.79
—	—	63	35	2	—	271	305	124	64	7.84

应当指出的是，富锡的高温钎料由于其钎焊温度较高，以及其工作环境温度可能较高等原因，在与母材铜之间可能形成脆性的金属间化合物 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5 ，并可能形成裂纹，从而影响接头的承载能力。

3.2.3.2 低温软钎料

随着环境温度的降低，锡铅系钎料的强度虽然增加，但却变脆，并且抗冲击能力也随之降低。此外，富锡（锡的质量分数为 60% 以上）钎料在低温环境中会产生称之为“锡疫”的相变，严重恶化钎料性能。为防止这种现象的发生，就要使用含有少量 Sb、Bi 或 In 的钎料。

在电子产品的钎焊过程中，某些对热敏感的电子元器件可能因钎焊热循环温度过高而影响其电性能。因此，有时需要使用低熔点钎料来完成连接。

低熔点钎料大多数由铋、锡、铅、镉、铟金属元素组成。同锡铅系钎料相比，含铋的钎料缺乏光泽，质地很脆。表 3-8 和表 3-9 列出了一些低温软钎料的熔点和力学性能。

表 3-8 低熔点软钎料

钎料成分（质量分数，%）						熔化温度/℃	
Bi	Pb	Sn	Cd	In	其它	固相线	液相线
42.91	21.7	7.97	5.09	18.33	Hg4.0	38	43
44.7	22.6	11.3	5.3	16.1	—	44.7	52.2
44.7	22.6	8.3	5.3	19.1	—	47.5	47.5
47.5	25.4	12.6	9.5	5	—	56.7	65.0
49	18	15	—	18	—	57.8	68.9
49	18	12	—	21	—	58	58
53.5	17.0	19	—	—	Hg10.0	60	60
50	25	12.5	12.5	—	—	60.5	60.5
50.1	26.6	13.3	10.0	—	—	68	68
50	26.7	13.3	10	—	—	70	70
50.5	27.8	12.4	9.3	—	—	70	73
50	25	12.5	12.5	—	—	70	74

(续)

钎料成分 (质量分数, %)						熔化温度 /℃	
Bi	Pb	Sn	Cd	In	其它	固相线	液相线
50	34.5	9.3	6.2	—	—	70	79
42.5	37.7	11.3	8.5	—	—	70	90
50.7	30.91	14.97	3.4	—	—	70	84
35.1	36.4	19.06	9.44	—	—	70	101
57	17	—	—	26	—	78.9	78.9
51.6	40.2	—	8.2	—	—	91.5	91.5
50	30	20	—	—	—	92	92
50	25	25	—	—	—	93	93
52.5	32.0	15.5	—	—	—	95	95
50	31.25	18.75	—	—	—	95	95
56	22	22	—	—	—	95	104.5
67	16	17	—	—	—	95	149
50	28	22	—	—	—	95.5	109.5
50	28	22	—	—	—	100	100
33.33	33.34	33.33	—	—	—	101	143
54.0	—	26.0	20	—	—	103	103
48.0	28.5	14.5	—	—	Sb9.0	103	127
40	40	20	—	—	—	113	113
55.5	44.5	—	—	—	—	124	124
56.0	—	40.0	—	—	Zn4.0	130	130
58.0	—	42.0	—	—	—	138.5	138.5
40	—	60	—	—	—	138.5	170
60	—	—	40	—	—	144	144
—	32.0	49.8	18.2	—	—	145	145

表 3-9 低熔点合金的性能

合金名称	成分 (质量分数, %)					抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	布氏硬度 (HBS)	熔化温度 /℃
	Sn	Pb	Bi	Cd	其它				
—	43.0	43.0	14.0	—	—	4.82	—	—	—
马洛特合金	34.2	19.7	46.1	—	—	5.59	100	10	96~123
—	20.2	35.0	35.5	9.5	—	4.18	15	18	—
—	15.0	31.0	39.0	15.0	—	4.57	9	—	70~97
塞露马合金	14.5	28.5	48.0	—	Sb9	9.14	1	19	103~227
利波维兹合金	13.3	26.7	50.0	10.0	—	4.27	6	20	70~73
五德合金	12.5	25.0	50.0	12.5	—	4.22	6	20	70~72
—	11.5	23.0	57.0	8.5	—	3.45	10	12	70~—

3.2.4 微组装用软钎料

在半导体器件的组装制造过程中,主要有以下三方面的内容,即①半导体芯片与管座的连接,通常称为芯片焊接;②半导体芯片上的金属化电极与外引线框架之间的连接,通常的连接方法使属于压焊范畴的金丝球焊或铝丝超声楔焊,但对于梁式引线或倒装芯片的结构形式,则会涉及到软钎焊的问题;③管壳的气密封装,对于金属管壳,可采用电阻焊或钎焊方式,而对于陶瓷管壳则必须采用钎焊方式来封装。

这类连接的焊点不仅仅起机械连接的作用,它同时还是电气通道,因此在电气和机械方面均要求其可靠,并且在生产成本方面也要给以充分的考虑。此外,被连接材料(母材)种类繁多,并且多为微米数量级的细丝、薄膜、镀层、箔、带等细微结构,因此对其所用钎料常有一些特殊的要求。通常希望钎料尽可能满足以下各项要求:

- 1) 钎料合金应不含低蒸气压的金属;
- 2) 杂质含量应尽可能少;
- 3) 氧化作用应尽可能低;
- 4) 应尽可能不溶解被焊母材;
- 5) 少用或不用钎剂也可以进行钎焊;
- 6) 整流性和温差电动势应尽可能小;
- 7) 可获得良好的欧姆接触;
- 8) 可保证焊点的电气性能和机械性能稳定;
- 9) 具有适当的熔点、硬度和强度;
- 10) 可制成适合于自动化操作的形状。

要寻求能满足上述全部要求的钎料是困难的。因此,应根据具体的工艺条件和使用要求来选择最合适的钎料。表 3-10 列出了一些主要钎料及其特性,表 3-11 则列出了一些主要钎料的典型用途。

Au 的化学性质特别稳定,导电性能也很优良,但由于其价格昂贵,通常很少作为钎料合金使用。而在微组装行业中,对某些产品的钎焊连接却经常用到金基钎料。Au-Si 和 Au-Ge 均可以形成低熔共晶,当把纯金加热到 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时,将半导体硅片与其摩擦就可以形成共晶合金液膜,并形成良好的欧姆接触。在 450°C 以下进行钎焊

时一般可使用(质量分数) Au-Si2% 或 Au-Ge7% 等钎料。考虑到 Si 和 Ge 易氧化, 所以通常在氮气保护条件下进行钎焊。

如果在 Au 中加入质量分数为 20% 的 Sn, 则可形成熔点为 280℃ 的共晶合金, 此合金可作为芯片焊接及管壳封装的钎料, 这种钎料具有良好的润湿性, 其力学性能和化学性能都比较稳定。

表 3-10 微组装用软钎料及其特性

合金组成的质量 分数 (%)					熔化温度/℃		抗拉强度	伸长率	布氏硬度	电导率
Ag	Pb	Sn	Sb	In	固相线	液相线	/9.8MPa	(%)	(HBS)	(IACS) ^①
		48		52	117	117	0.12	83	5	11.7
				100	157	157	0.04	41	—	24.0
5	15			80	149	149	0.18	58	5	13.0
	38	62			183	183	0.54	30	17	12.2
	47	50	3		186	204	0.59	29	16	9.6
	50			50	180	209	0.33	55	10	6.0
	50	50			183	212	0.43	40	14	10.9
	10	90			183	213	0.57	50	19	12.1
3.5	96.5				221	221	0.20	73	40	14.0
	5	95			183	222	0.28	47	—	13.6
	55	45			183	227	0.39	38	—	10.2
10				90	204	230	0.11	61	2.7	22.1
		100			232	232	0.28	55	14	13.1
	60	40			183	238	0.38	48	12	10.1
		95	5		232	240	0.41	38	13	—
	65	35			183	247	0.40	25	—	9.9
5		95			221	250	0.56	30	14	12.6
	70	30			183	257	0.52	22	—	9.3
	80	20			183	280	0.34	22	11	8.7
	90	10			224	302	0.41	45	15	8.5
2.5	97.5				303	303	0.31	42	—	8.8
1.5	97.5	1			309	309	0.31	23	10	—
5	90			5	290	310	0.40	23	9	5.6
	95			5	315	315	0.30	52	6	5.1

① IACS—相对标准退火铜线电导率的百分比。

表 3-11 一些软钎料的典型用途

钎料组成的质量分数(%)						熔化温度 /℃	主 要 用 途
Au	Si	Ge	Ag	Sn	Pb		
98	2					370	片式有源器件的芯片焊接
88		12				356	
					100	327	无引线变换器、梁式引线、到装片和无源器件的安装
		1.5	1	97.5		309	
80				20		280	片式有源器件芯片焊接, 管壳密封
		3.5		96.5		221	无引线变换器、梁式引线、到装片和无源器件的安装, 引线焊接及管壳封装
		2		62	36	181	
				63	37	183	

在金基钎料当中加入少量的 Sb、As、Ga、In 和 B 等元素可以改进欧姆接触, 加入少量的氧化亲和力强的元素可防止钎料与母材的氧化并可改善润湿性, 因而得到应用。然而由于金基钎料硬而脆, 故通常仅用于小尺寸的芯片, 对于大尺寸的芯片则接合时必须使用 Mo 或可伐合金等的温度补偿片。此外, Au 与 Sn、Pb 系金属之间可以生成金属间化合物, 这会影响接头的机械性能。

Pb 可与 Au、Ag、Sb 等形成共晶合金, 也可作为钎料来使用。由于 Pb-Au 钎料产生脆性的金属间化合物, 因此在对机械强度有要求的地方不宜使用。以往曾用其钎焊晶体管的芯片, 但随着器件集成度的提高, 提出了 Pb 产生 α 射线造成器件损伤的问题。此外, Pb-Sn 系钎料多用于陶瓷管壳的密封, 随着 Pb 产生 α 射线造成器件损伤这一问题的提出, 就不得不改用 Au-Sn20% 钎料。

Sn 的熔点低, 润湿性好, 可与多种金属形成金属间化合物。Sn 基钎料中经常添加一些 Sb, 但当其质量分数超过 7% 时, 就会在基体中产生 Sn-Sb 金属间化合物的所谓 β 相结晶。这种合金很脆, 但可以通过控制冷却速度来控制其晶粒度, 因而能够在一定程度上改变钎料的力学性能。

In 与 Pb 接近于无限互溶, 并且固-液相区间很小, 是具有较强抗热疲劳能力的软质钎料合金。In 对 Au、Ag 和 Pd 的溶解作用明显小于 Sn, 因而常常用于混合电路的焊接。在半导体器件方面, 可用于引线接点的钎焊及晶体管的电极钎焊, 但通常都是加入 Sn、Pb、Ag、Zn 等合金

元素。由于 In 的价格昂贵,所以一般仅限于特殊用途使用。

3.3 硬钎料

3.3.1 铝基钎料

铝的熔点为 660°C , 其蒸气压极低 (800°C 时约为 10^{-2}Pa)。铝基钎料主要用来钎焊铝及铝合金, 用其来钎焊其它金属时, 由于钎料表面的氧化物不易去除, 并且铝易与其它金属形成脆性的金属间化合物, 影响接头质量, 因而不宜采用。

Al 与 Si 可以形成共晶, 共晶点 Si 的质量分数为 11.7%, 熔点为 577°C (见图 3-9), 是目前最为主要的铝基钎料。在铝硅合金的基础上添加其它合金元素, 可以构成不同性能的钎料。在真空钎焊时, 由

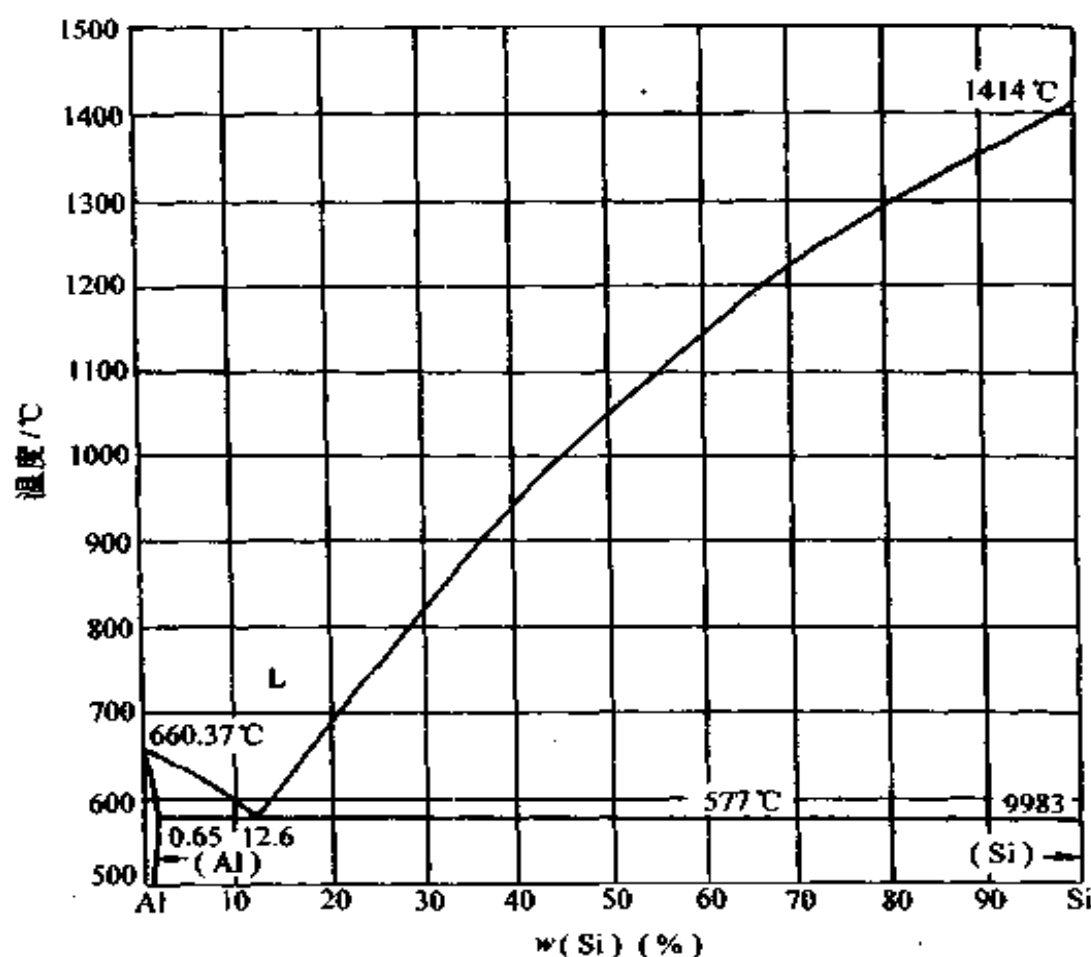


图 3-9 铝硅二元合金相图

于不能采用钎剂，因而要在铝硅合金的基础上添加合金元素镁。由于镁是极强的活化剂，在钎焊过程中，镁蒸气既可与钎焊气氛中的剩余氧或水蒸气中的氧结合，保护工件不致氧化，又可能渗入铝工件表面未清除的氧化膜而将其除去。不含镁的铝基钎料几乎无法用于铝及铝合金的真空钎焊。

表 3-12 列出了几种常用的铝基钎料及接头性能。

铝硅钎料具有良好的润湿性能，钎焊接头具有优良的抗腐蚀性能，钎料具有一定的塑性，可以加工成丝和片等，因而其应用广泛。铝硅钎料的缺点是熔点较高，操作时必须注意。这种钎料可用于铝及其铝合金的炉中钎焊和火焰钎焊。钎焊时应配合 QJ206 或 QJ201 使用。

铝硅铜钎料的熔点低，铺展性好，易于操作。配合 QJ201 使用，可用于铝及铝合金的火焰钎焊。但由于钎料很脆，难以加工成形，因而使用不方便。另外由于铜可与铝形成 CuAl_2 金属间化合物，使接头抗腐蚀性能下降。

铝硅铜锌钎料的熔点更低，但铺展性却稍差，钎焊接头的抗腐蚀性能也更差一些，并且由于含锌的质量分数 10% 左右，易于产生腐蚀，故操作时应严格控制温度。这种钎料可用于 LD2 和 ZL103 的炉中钎焊和盐浴钎焊，也可用于纯铝 L3 和防锈铝 LF2 及 LF21 的钎焊，钎焊时需配合 QJ201 钎剂使用。

铝硅锆钎料的熔点较低，可将钎焊温度控制在 550℃ 左右。可用于纯铝、部分锻铝和防锈铝的钎焊。但其钎焊接头的强度较低，只适合于静载工况下使用。

含镁的铝基钎料均为真空钎焊用的。这类钎料一般不适合于钎剂钎焊。随着含镁量的增加，钎料的流动性提高，但同时母材的熔蚀作用也加剧。钎料中加入少量的铈（质量分数为 0.1%）可以减少钎料中镁的添加量，改善润湿性，并可降低对真空度的要求。

3.3.2 银基钎料

银基钎料通常是以银或银基固溶体为主的合金。这类钎料具有优异的工艺性能，熔点不高，润湿性能及填缝性能良好，强度、塑性、导电、耐蚀等性能优异，可用来钎焊除铝、镁及其它低熔点金属外的

表 3-12 铝基钎料的化学成分及性能

钎料牌号	化学成分(质量分数, %)					钎焊温度/℃	接头强度/MPa	备注
	Si	Cu	Zn	Mg	其它			
B-Al 88Si	11.0~13.0	<0.30	<0.2	<0.1		577~580	$\sigma_b = 96^*$, $\sigma_b = 59.79^{**}$	HL400
B-Al 90Si	9.0~11.0	<0.30	<0.1	<0.05		577~590		
B-Al 92Si	6.8~8.2	<0.25	<0.2			577~615	$\sigma_b = 98$, $\tau = 58^*$	
B-Al 67CuSi	5.5~6.5	27~29	<0.2			525~535	$\sigma_b = 68$, $\tau = 40^{**}$	HL401
B-Al 86SiCu	9.3~10.7	3.3~4.7	<0.2			520~585		HL402
B-Al 86SiMg	11.0~13.0		<0.2	1.0~2.0		559~579		
B-Al 88SiMg	9.0~10.5		<0.2	1.0~2.0		559~591	$\sigma_b = 130$, $\tau = 68^*$	
B-Al 89SiMg	9.5~11.0		<0.2	0.2~1.0		559~582		
B-Al 90SiMg	6.8~8.2		<0.2	2.0~3.0		559~607		
B-Al 76SiZnCu	10	4	10			516~560	$\sigma_b = 93$, $\tau = 56^*$	HL403
B-Al 79SiZnCu	10	4	6~7			525~560	$\sigma_b = 67$, $\tau = 41^{**}$	Y-1
B-Al 50ZnCuSi	3.5	20	25		Mn=1.5	480~500		B62
B-Al 60GeSi	5				Ge=35	455~480		
B-Al 45ZnSi	4.8		50			460~475		
B-Al 89SiSrLa	10.5~11.5				Sr=0.03 La=0.03	572~577		Al-Si-Sr-La

注: * 母材为 LF21; ** 母材为 L3。

几乎所有黑色金属和有色金属，因而得到广泛的应用。

银基钎料的种类繁多，但常用的银基钎料几乎都含有铜。为降低熔点和减少银含量，通常加入锌、镍、镉等合金元素，构成三元或多元合金。图 3-10 为银铜锌三元合金相图。

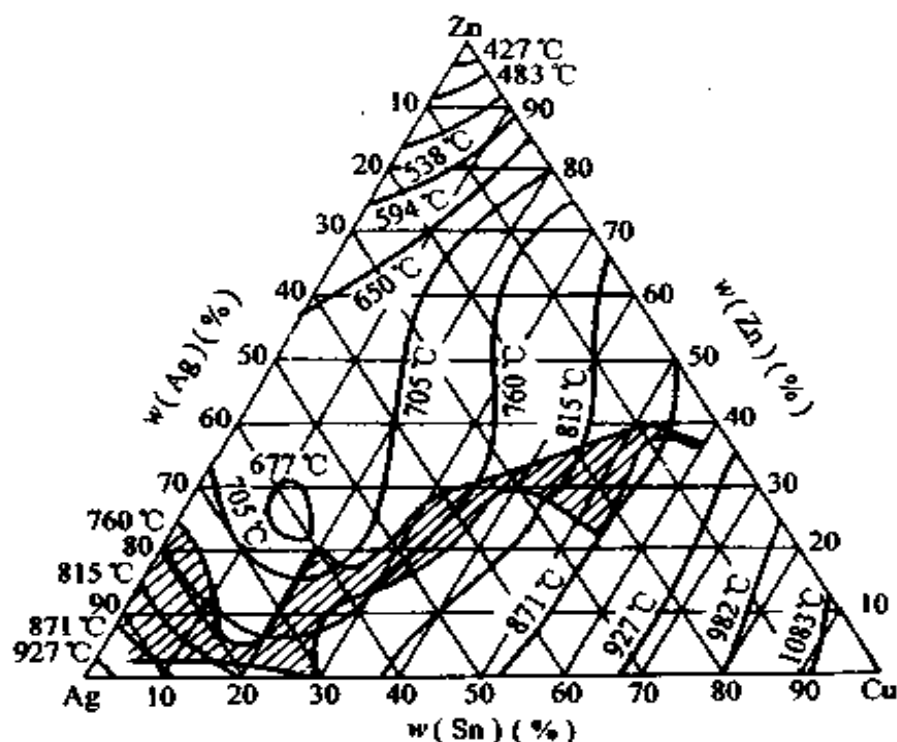


图 3-10 银铜锌三元合金相图

银基钎料一般抗拉强度在 300~400MPa，大约接近黄铜及低碳钢的强度水平，所以可获得强度高、可靠性好的钎焊接头。通常银钎焊接头的工作温度不宜超过 300℃，超过 300℃后强度会急剧下降。含镍的银基钎料可以工作到 400℃左右。

银基钎料适合于各种钎焊方法，但除在真空或保护气氛中钎焊外，一般需要配合银钎剂共同使用。银基钎料最主要的问题是钎料的成本较高(含有贵金属银)，因此降低钎料中银的含量一直是钎焊材料方面的重要研究方向之一。一些钎料的银的质量分数低于 50%，但由于其性能和使用场合与银基钎料相近，所以习惯上仍将其归类于银钎料的范畴。

表 3-13 列出了各种银基钎料的成分及熔化温度等参数。

B-Ag72Cu (HL308) 是在电真空器件中应用最广泛的共晶型钎

料，其熔点低，结晶时没有温度间隔，钎焊工艺性能好，在铜及镍上具有良好的润湿性和流动性，导电性也很好。但此钎料的脆性大，强度低，对不锈钢、合金钢、高温合金等润湿性极差。因此，钎焊这类工件时应预先在被钎表面上镀铜或镀镍，以改善钎料的润湿铺展性能。此钎料还可用于钛及钛合金的前级钎焊。

B-Ag50Cu (HL305) 性能与 B-Ag72Cu 接近，但银含量较低，使塑性改善。但熔化温度范围增大，适宜于钎焊宽间隙接头，可用于多级钎焊时的前级钎焊。

B-Ag92Cu 流动性好，强度及耐腐蚀性能比前两种有提高。多用于钎焊钛及钛合金，钛及不锈钢等。由于熔点较高，可用于分级钎焊的第一级钎焊。

B-Ag85Mn (HL320) 熔点高，高温强度好，可用于钎焊 400℃ 以下工作的不锈钢及钛合金。

B-Ag80Au 是一种性能优异的耐热钎料，但由于成本太高而很少使用。

B-Ag90Pd 的中温强度高，耐腐蚀性、抗氧化性、润湿性等优异，接头塑性好。B-Ag80Pd 在强度方面及对低合金钢、不锈钢及高温合金的润湿性能上得到进一步改善。但由于 Pd 的价格比 Ag 还要昂贵，因而在可以满足使用要求的前提下，应尽可能降低 Pd 的含量，B-Ag95Pd 就是为这一目的研制的。由于 Pd 的蒸气压极低，所以银钯钎料特别适合于电真空重要部件或非金属的钎焊。

B-Ag95Al 是银基钎料中强度高、抗腐蚀性能及耐热性能均相当优异的钎料。主要用于钎焊 400℃ 以下使用的受力构件。当钎焊 Ti-11Cr-13V-3Al 合金时，室温抗剪强度 $\tau \geq 150\text{MPa}$ ，在 400℃ 时的抗剪强度为 $\tau \geq 100\text{MPa}$ 。

B-Ag87Al 的熔点比 B-Ag95Al 低，其性能也与之接近。主要用于钎焊 α 钛合金和 $\alpha + \beta$ 双相钛合金。

B-Ag94Al (Mn) 是在 B-Ag95Al 的基础上加入了不足 1% 的锰 (质量分数)。用这种钎料钎焊钛合金可以显著提高接头的抗腐蚀性。

以上银基钎料基本上都是二元合金类型的。在三元合金类型的银

表 3-13 银基钎料的成分及性能

分 类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 °C	钎焊温度 °C	抗拉强度 MPa	备 注
银铜	B-Ag50Cu	Ag-Cu50	779~850	850~950		HL305
	B-Ag72Cu	Ag-Cu28	779	779~900	343	HL308
	B-Ag92Cu	Ag-Cu8	830~890	900~980		
银铝	B-Ag87Al	Ag-Al 13	735~750	750~820		
	B-Ag94Al(Mn)	Ag-Al 5-Mn1	780~825	825~925		
	B-Ag95Al	Ag-Al 5	840~870	870~960		
银锰	B-Ag85Mn	Ag-Mn15	960~970	970~1050		HL320
银金	B-Ag80Au	Ag-Au20	970~985	985~1065		
银钯	B-Ag80Pd	Ag-Pd20	1070~1160	1170~1200		
	B-Ag90Pd	Ag-Pd10	1002~1065	1070~1150		
	B-Ag95Pd	Ag-Pd5	970~1010	1015~1100		
银铜锌	B-Ag10CuZn	Ag-Cu53-Zn37	815~850	850~950	451	HL301
	B-Ag15CuZn	Ag-Cu47-Zn38	787~808	820~870		QCu15Ag
	B-Ag25CuZn	Ag-Cu40-Zn35	745~775	780~850	353	HL302
	B-Ag45CuZn	Ag-Cu30-Zn25	660~725	730~800	386	HL303
	B-Ag50CuZn	Ag-Cu34-Zn16	690~775	780~850	343	HL304
	B-Ag65CuZn	Ag-Cu20-Zn15	685~720	720~800	384	HL306
	B-Ag70CuZn	Ag-Cu26-Zn4	730~755	760~830	353	HL307

(续)

分 类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa	备 注
银铜镍	B-Ag56CuNi	Ag-Cu42-Ni2	790~830	830~900	313	HL317
	B-Ag63CuNi	Ag-Cu32-Ni5	785~820	840~905		
	B-Ag77CuNi	Ag-Cu20-Ni3	780~820	820~880		
银铜钯	B-Ag52CuPd	Ag-Cu28-Pd20	875~900	910~1020		
	B-Ag54CuPd	Ag-Cu25-Pd21	900~950	960~1050		
	B-Ag58CuPd	Ag-Cu32-Pd10	825~850	860~950		
	B-Ag65CuPd	Ag-Cu20-Pd15	859~900	910~1020		
	B-Ag68CuPd	Ag-Cu22-Pd10	830~860	880~950		
	B-Ag69CuPd	Ag-Cu26-Pd5	805~810	850~920		
银铜铟	B-Ag60CuIn	Ag-Cu30-In10	600~720	750~820		
	B-Ag61CuIn	Ag-Cu24-In15	625~705	730~800		
	B-Ag63CuIn	Ag-Cu27-In10	660~730	800~900		
银铜铋	B-Ag92CuLi	Ag-Cu7-Li0.4	779~880	890~950		B-Ag-19
	B-Ag72CuLi	Ag-Cu28-Li0.4	766~780	766~871		
	B-Ag72CuNiLi	Ag-Cu27-Ni 1-Li0.5	780~800	800~850		
银铜锡	B-Ag43CuSn	Ag-Cu32-Sn25	540~570	585~620		
	B-Ag63CuSn	Ag-Cu27-Sn10	600~780	780~850		
	B-Ag68CuSn	Ag-Cu27-Sn5	604~730	730~800		
银钯锰	B-Ag64PdMn	Ag-Pd33-Mn3	1120~1170	1170~1200		
	B-Ag75PdMn	Ag-Pd20-Mn5	1071~1121	1150~1200		
银铜锰镍	B-Ag65CuMnNi	Ag-Cu28-Mn5-Ni2	780~825	850~950		

(续)

分 类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa	备 注
银铜锡镍	B-Ag63Cu30SnNi	Ag-Cu29-Sn5-Ni3	780~800	800~890		
银铜锡锰	B-Ag56Cu30SnMn	Ag-Cu31-Sn10-Mn3	660~720	720~840		
银铜锌锡	B-Ag18Cu46Zn34-Sn2	Ag-Cu46-Zn34-Sn2	780~810	820~900		HL309
	B-Ag30Cu46Zn34-Sn2	Ag-Cu36-Zn22-Sn2	710~760	710~770		HL310
	B-Ag34Cu46Zn34-Sn3	Ag-Cu28-Zn27-Sn3	720~730	760~850		
	B-Ag56Cu46Zn34-Sn5	Ag-Cu22-Zn17-Sn5	620~650	670~750		HL316
	B-Ag56Cu46Zn34-SnP	Ag-Cu22-Zn17-Sn5-P0.5	565~610	615~685		
	B-Ag40Cu46Zn34-SnNi	Ag-Cu25-Zn31-Sn3-Ni1	630~640	650~750		HL322
	B-Ag50Cu46Zn34-SnNi	Ag-Cu21-Zn27-Sn1-Ni0.5	650~670	670~750	390	HL324
	B-Ag54Cu46Zn34-SnNi	Ag-Cu23-Zn17-Sn7-Ni1	610~660	670~750	440	902#
银铜锌镉	B-Ag50Cu46Zn34-SnCd	Ag-Cu15-Zn17-Cd18	625~635	640~720	420	HL313
	B-Ag35Cu46Zn34-SnCd	Ag-Cu26-Zn18-Cd21	630~690	700~800	441	HL314
	B-Ag30Cu46Zn34-SnCd	Ag-Cu28-Zn21-Cd21	600~690	690~770		HL311
	B-Ag40Cu46Zn34-SnCdNi	Ag-Cu16-Zn18-Cd26-Ni0.2	595~605	610~700	392	HL312
	B-Ag50Cu46Zn34-SnCdNi	Ag-Cu15-Zn17-Cd15-Ni3	632~688	700~800	431	HL315
银铜锌镍	B-Ag54Cu46Zn34-SnNi	Ag-Cu40-Zn5-Ni1	720~860	870~970	323	
	B-Ag58Cu46Zn34-SnNi	Ag-Cu18-Zn19-Ni5	690~710	720~800		
银铜锌锰	B-Ag20Cu46Zn34-SnMn	Ag-Cu40-Zn35-Mn5	740~790	800~890		
	B-Ag49Cu46Zn34-SnMnNi	Ag-Cu16-Zn33-Mn7-Ni1	625~705	715~775		HL321

基钎料中，最为常见的是银铜锌系钎料。B-Ag10CuZn (HL301) 的含银量很低，价格较低。但其熔点较高，铺展性差，接头的塑性也较差，因而应用不够广泛。其主要用于钎焊铜及铜合金、钢及硬质合金等。B-Ag25CuZn (HL302) 与前者相比银的质量分数提高了 15%，所带来的效果是熔点明显下降，铺展性能得到了改善，钎缝也比较光洁。这种钎料常用于钎焊铜及铜合金、钢及不锈钢等。B-Ag45CuZn (HL303) 是最常用的银钎料。其熔点低，具有良好的铺展性和填缝能力，钎缝表面光洁。接头的强度高，耐冲击载荷的能力也很好。B-Ag50CuZn also 具有良好的铺展能力和填缝能力，接头可以承受多次冲击载荷。这种钎料常制成箔片状使用，可用于铜及其合金和钢等的钎焊，如用于带锯的钎焊。B-Ag65CuZn (HL306) 的含银量较高，但熔点较低，铺展性较好，钎缝光洁，接头的强度和塑性也很好。经常用于食品器皿、带锯、仪表以及波导等多种产品的钎焊。B-Ag70CuZn (HL307) 的含银量更高，接头具有高强度和优良的塑性，并且导电性好。适用于铜、黄铜及银的钎焊。常用于钎焊引线及其它要求高导电性的零部件。

银铜钯三元合金系钎料的性能与银钯钎料相近，但其熔化温度要低一些，对不锈钢的润湿性能好，并且其钎焊温度与不锈钢的热处理温度相适应。这类钎料广泛用于陶瓷材料与金属材料的钎焊。银铜钯系钎料中，以 B-Ag54PdCu 的综合力学性能为最好，主要用于航空发动机部件，以代替金镍钎料来钎焊工作温度不高于 400℃ 的组件。

银铜镍系钎料与银铜钎料相比，由于镍的加入，导致了熔化温度的上升，但却使钎料的润湿性能大为提高。并且钎料的强度、塑性都优于银铜钎料，可用于要求强度较高的低合金钢、不锈钢、钛及钛合金等的钎焊。

银铜铟系钎料 (B-Ag61CuIn, B-Ag63CuIn)，由于铟的加入而使熔化温度进一步降低，但同时也使结晶温度区间增大。因而，在钎焊时需要快速加热以避免钎料偏析。另外，铟的蒸气压极低，适合于真空受静力的器件，特别是 α 型和 $\alpha + \beta$ 型钛合金的钎焊。在电子工业中被广泛用作作为电真空器件的末级钎焊用钎料。

银铜锡钎料对钢和镍的润湿性优异，但强度低，脆性大。B-Ag42CuSn 钎料的熔点很低，可以在 600℃ 以下进行钎焊，多用于受静载的接头。

银钯锰钎料的熔化温度较高，高温性能好，可用于钎焊工作温度在 600~700℃ 的零件。特别是 B-Ag64PdMn 钎料钎焊件的工作温度可达到 800℃。但这类钎料钎焊的钎缝在高温下长期工作时会发生成分偏析，使钎缝中出现富银相固溶体，降低接头的力学性能。这类钎料多用于航空航天发动机的中温高强度部件的钎焊。

银铜锂钎料由于含有锂而使其具有自钎剂作用，因而在使用时可不用钎剂。

三元银钎料的熔化温度普遍在 700℃ 以上，温度较高。银铜铜的熔化温度虽然较低，但却使用了大量的贵金属铜，因而不宜大量使用。而银铜锡钎料的熔化温度虽也比较低，但其强度太差。因此为保证钎料的强度，同时又可以降低钎料的熔点，人们开发了一些四元，甚至五元合金的银基钎料，首要的当为银铜锌镉钎料。由于镉能溶于银和铜，形成固溶体，在银铜钎料中加入适量的镉，即可降低钎料的熔点，改善润湿性，有能保证钎料具有较高的塑性。但含镉量过大时也会产生脆性相。所以一般情况下，镉和锌的共同加入量不宜超过 40%。又由于镉在银中的溶解度比较大，所以钎料的含银量不能太低，一般在 40%~50% 为宜。B-Ag40CdZnCu (HL312) 钎料具有良好的润湿性和填缝能力。由于其钎焊温度低于一些合金钢的回火温度，因此适合于钎焊淬火合金钢及分级钎焊中末级钎焊。此外，这种钎料的工艺性能好，强度高，因而越来越多地取代着银铜钎料。B-Ag50CdZnCu (HL313) 钎料与前者相比，含银量稍高一些。这使钎料的熔点稍高，但强度也有提高。因此适合于钎焊那些对温度要求不高，而对接头强度要求较高的工件。B-Ag35CuCdZn (HL314) 钎料的结晶温度区间大，流动性差，适合于用火焰、高频等快速加热方法来钎焊铜及其合金、钢、不锈钢等间隙不均匀的接头。B-Ag50CdZnCuNi (HL315) 是在 B-Ag50CdZnCu (HL313) 钎料中以约 3% 的镍（质量分数）来代替等量的镉。镍的加入提高了钎料对硬质

合金的润湿性，因而更适合与钎焊硬质合金。同时镍还可以提高不锈钢钎焊接头的抗腐蚀性。这种钎料钎焊的不锈钢接头的抗腐蚀性在各种银钎料中几乎是最好的。

含镉的银基钎料虽然具有熔点低，工艺性能好的优点，但镉是有毒元素，其蒸气压很高，钎焊时挥发出来的镉蒸气可能对人体造成危害。所以，含镉钎料的使用在国内外均受到限制。而无镉银基钎料也就受到重视和发展。

银铜锌镍钎料是在银铜锌钎料的基础上加入少量的镍。B-Ag54CuZnNi (HL316) 钎料中锌和镍的含量均不多，熔点较高，钎焊接头的耐热性和耐蚀性好，但钎料铺展性能差。由于该钎料中的挥发性元素的含量低，所以适合于炉中钎焊。B-Ag50CuZnNi (HL321) 钎料中的锌和镍的含量要稍多一些，其熔点较低，结晶温度区间较窄。具有良好的铺展性和填缝能力，适用于不锈钢的钎焊。

银铜锌锡钎料主要是在银铜锌钎料中加入锡来代替镉。但为避免钎料的塑性明显下降，锡的加入量不能过高。B-Ag56CuZnSn (HL903) 钎料是一种通用型无镉银钎料，其性能与 B-Ag50CdZnCu 钎料相当，但其含银量较高。可代替含镉钎料用于铜合金、钢和不锈钢等的钎焊。接头具有优良的力学性能。在 B-Ag56CuZnSn 钎料中加入少量的磷可以使钎料的熔点进一步降低。但由于磷的存在，所以主要用于加热温度不允许过高的铜及铜合金的钎焊。B-Ag30CuZnSn (HL905) 钎料的性能与 B-Ag50CuZn 及 B-Ag45CuZn 相当，但含银量要低得多，经济性好。可用于铜及铜合金，钢和不锈钢的钎焊。

在银铜锌锡中加入少量的镍就构成了一些五元的银钎料，如 B-Ag40ZnCuSnNi (HL322)、B-Ag50ZnCuSnNi (HL324) 和 B-Ag54CuZnSnNi (HL904) 钎料。镍的加入可以提高钎料的强度、耐热性和耐蚀性，并改善钎料的润湿性。其熔点仍维持较低，可以替代 B-Ag50CdZnCu (HL313) 钎料用于铜及不锈钢等的钎焊。

B-Ag65CuMnNi 是不含锌和镉的钎料，其高温强度高。由于锰和镍的含量较高，大大改善了钎料的润湿性能，在硬质合金上具有良好的流动性。可用于钎焊奥氏体不锈钢和沉淀硬化型高温合金。镍的质

量分数为 5% 可使钎料不易产生裂纹腐蚀，特别是对马氏体型不锈钢，可在边缘处形成富镍层，从而避免了裂纹腐蚀。这种钎料在发动机不锈钢零件的钎焊上得到了应用。

B-Ag63CuNiSn 钎料是在 B-Ag63CuNi 的基础上加入锡的质量分数 5%，使钎料的熔点进一步降低，而性能无明显差异。此钎料的润湿性和流动性有所下降，钎焊时要考虑适当增加保温时间。

银钎焊接头强度见表 3-14。

表 3-14 银钎焊接头强度

钎料牌号	钎料 σ_b /MPa	纯 铜		H62 黄铜		不锈钢		备注
		σ_b /MPa	τ /MPa	σ_b /MPa	τ /MPa	σ_b /MPa	τ /MPa	
B-Ag10CuZn	451	166	157	313	166	386	198	HL301
B-Ag25CuZn	353	171	166	315	184	343	190	HL302
B-Ag45CuZn	386	181	177	325	215	395	198	HL303
B-Ag50CuZn	343	171	171	328	208	375	201	HL304
B-Ag65CuZn	384	181	175	334	208	382	197	HL306
B-Ag70CuZn	340	169	170	328	203	369	202	HL307
B-Ag72Cu	343	177	164	—	—	—	—	HL308
B-Ag40CuZnCdNi	400	183	171	346	198	383	209	HL312
B-Ag50CuZnCd	428	225	181	382	231	427	265	HL313
B-Ag35CuZnCd	450	171	168	335	203	368	198	HL314
B-Ag50CuZnCdNi	420	210	—	—	—	—	—	HL315
B-Ag56CuZnSn	330	—	—	—	—	370	223	HL316
B-Ag50CuNi	320	—	—	—	—	360	225	HL317
B-Ag40CuZnSnNi	390	176	98	294	245	330	196	HL322
B-Ag50CuZnSnNi	449	220	断于母材	340	断于母材	390	断于母材	HL324

3.3.3 铜基钎料

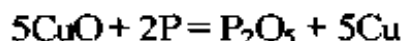
铜的熔点为 1083℃，它可以直接用作钎料在还原性气氛、惰性气氛和真空条件下钎焊低碳钢、低合金钢、钨、钼、铁和可伐合金，以及镍和镍基合金等。其钎焊温度通常为 1100~1150℃，由于铜对钢的润湿性和填缝能力都很好，所以以纯铜作为钎料钎焊这类材料时要求接头间隙很小（0~0.05mm）。

特别值得注意的是，用作钎料的铜必须是无氧铜，即不含有氧化亚铜。否则，在氢气中加热时氧化亚铜被还原，同时形成水蒸气。当水蒸气压强较高时，在钎焊的加热和冷却过程中，会在钎缝内造成气孔等不致密性缺陷。

纯铜作为钎料的缺点是其熔点高、耐腐蚀及抗氧化性能差。容易使一些被焊金属或合金的晶粒过分长大，导致力学性能变坏。不良的抗氧化性使其不适合于用来钎焊在大气中工作温度高于 400℃ 的零件。为了克服纯铜作为钎料的缺点，可以在铜中加入合金元素磷、锌、锑、锡、镍、锰、钼、钴、金、银等。表 3-15 列出了特点不同的一系列铜基钎料。

1. 铜磷钎料

铜磷钎料是在生产上广泛应用的空气自钎剂钎料。在铜中加入磷的好处之一是可以显著降低钎料的熔点，由铜磷二元合金相图（见图 3-11）可知，当磷的质量分数为 8.38% 时，铜与磷可以形成熔点为 714℃ 的低熔共晶，共晶体由 $\alpha + \text{Cu}_3\text{P}$ 组成。 Cu_3P 的存在使钎料明显变脆，造成加工的困难，因而限制了铜磷钎料的应用。但是随着急冷技术和热挤压技术的发展，目前不仅可以使铜磷钎料制成非晶态箔片，而且可将铜磷钎料制成冷弯角接近于 180° 的丝材以及直径约为 10mm 的钎料环。加入磷的第二个好处是可以使钎料在钎焊铜时具有自钎剂作用。这是由于磷在钎焊过程中能还原氧化铜：



还原产物 P_2O_5 又可以与氧化铜形成液态的复合氧化物并覆盖于母材表面，从而防止母材进一步氧化。

含磷的铜基钎料在钎焊铜及铜合金时都具有这种自钎剂作用。我们将这种具有自钎剂作用的钎料称为自钎剂钎料。当在这类钎料中加入少量的金属锂时，可以使自钎剂作用进一步增强，并可用于钎焊不锈钢。

铜磷钎料中加入银可以改善钎料的塑性和加工性能，提高抗拉强度和导电性并降低钎料的熔点。此外，银的加入还可以提高钎料的润湿性，并因而适合于各种碳钢的钎焊。由于银为贵金属，因此也有人

表 3-15 铜基钎料的成分及性能

分类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 ℃	钎焊温度 ℃	抗拉强度 MPa	备 注
铜	B-Cu	Cu99.95	1083	1100~1150		
铜磷	B-Cu94P	Cu-P6.3	720~800	810~900	441	HL202
	B-Cu93P	Cu-P7.1	710~800	810~900	470	HL201
	B-Cu91PAg	Cu-P7-Ag2	645~790	750~810		HL209
	B-Cu89PAg	Cu-P6-Ag5	645~815	820~860	519	HL205
	B-Cu80PAg	Cu-P5-Ag15	630~780	810~850	503	HL204
	B-Cu70PAg	Cu-P5-Ag25	650~710	730~790		HLAgCu70-5
	B-Cu28PAg	Cu-P1-Ag71	750~795	810~870		
	B-Cu86PSn	Cu-P5.5-Sn7.5	620~670	700~780		
	B-Cu92PSn	Cu-P5.5-Sn2.5	640~680	710~800	560	
	B-Cu89PSn	Cu-P6.5-Sn5.5	650~800	810~890		HL208
	B-Cu83PNi	Cu-P8-Ni9	648~685	710~790		QWY-1
	B-Cu92PSb	Cu-P6-Sb2	690~800	820~880	305	HL203
	B-Cu81PSnNi	Cu-P3~10-Sn3~10-Ni2~10	620~660	680~800		HL206
	B-Cu77PSnNi	Cu-P7-Sn10-Ni6	585~647	680~800		QWY-3
	B-Cu86PSnNi	Cu-P5-Sn8-Ni1	620~670	700~800		
	B-Cu80PSnAg	Cu-P5-Sn10-Ag5	560~650	680~800	250	HL207
	B-Cu81PAgNi	Cu-P7-Ag2-Ni2	631~680	700~800		QJY-2A

(续)

分类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa	备 注
铜 锌	B-Cu36Zn	Cu-Zn62~66	800~823	850~950	29.4	HL101
	B-Cu48Zn	Cu-Zn50~54	860~870	890~990	205.9	HL102
	B-Cu54Zn	Cu-Zn44~48	885~888	910~1000	25409	HL103
	B-Cu62Zn	Cu-Zn37~39	890~905	930~1020	313.8	H62
	B-Cu62ZnSi	Cu-Zn37.5-Si0.5	905	930~1020	333.4	QWY-12
	B-Cu60ZnSn	Cu-Zn35-Sn5	800~808	820~920		
	B-Cu60ZnSn-R	Cu-Zn39-Sn1-Si0.2	890~905	930~1020	343.2	
	B-Cu58ZnFe-R	Cu-Zn40-Fe1-Sn0.8-Si0.1	865~890	930~1020	391.6	丝 221
	B-Cu62ZnMn	Cu-Zn35-Mn3	890~905	930~1020	343	丝 222
	B-Cu58ZnMn	Cu-Zn38-Mn4	880~909	930~1320		HL105
	B-Cu57ZnMnCo	Cu-Zn39-Mn2-Co2	890~930	950~1050		HL106
	B-Cu48ZnNi	Cu-Zn42-Ni10-Si0.2	921~935	960~1050		
	B-Cu62ZnSiSnNi	Cu-Zn37-Si0.5-Sn0.4-Ni0.4	858~875	900~990	390	HL104
	B-Cu96Si	Cu-Si4	910~1000	1010~1170		
铜 锆	B-Cu92Ge	Cu-Ge8	945~960	960~1016		
	B-Cu90Ge	Cu-Ge10	880~910	920~1000		
	B-Cu88Ge	Cu-Ge12-Ni0.25	850~880	880~960		

(续)

分类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa	备 注
铜锆	B-Cu94GeNi	Cu-Ge4Ni2	1041~1069	1100~1200		
	B-Cu93GeSi	Cu-Ge4.5-Si2.5	912~1006	1030~1120		
	B-Cu88GeTi	Cu-Ge12-Ti0.2				
	B-Cu88GeAg	Cu-Ge10-Ag2	950~1000	1130~1200		
铜镍	B-Cu98Ni	Cu-Ni2	1085~1100	1090~1200		
	B-Cu90Ni	Cu-Ni10	1130~1145	1150~1230		
	B-Cu75Ni	Cu-Ni25	1170~1225	1240~1300		
	B-Cu97NiB	Cu-Ni3-B0.04	980~1045	1100~1150		
	B-Cu93NiSi	Cu-Ni5-Si1	995~1110	1120~1200		
	B-Cu71NiSi	Cu-Ni25-Si4	1035~1140	1160~1250		
	B-Cu67NiCr	Cu-Ni17-Cr16	1010~1180	1185~1250		
	B-Cu50NiMn	Cu-Ni30-Mn20	1050~1100	1150~1250		
	B-Cu77NiCrCo	Cu-Ni10-Cr8-Co5	1065~1180	1180~1250		
	B-Cu67NiSiBFe	Cu-Ni29-Si2-B0.2-Fe1.5	1080~1120	1150~1250		
铜锰	B-Cu98Mn	Cu-Mn2	970~1060	1080~1150		

(续)

分类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa	备 注
铜锰	B-Cu87MnCo	Cu-Mn10-Co3	960~1030	1050~1100		
	B-Cu74MnCoSn	Cu-Mn14-Co6-Sn6	960~1030	1050~1100		
	B-Cu67MnCo	Cu-Mn24-Co9	870~940	950~1050		
	B-Cu58MnCo	Cu-Mn32-Co10	883~943	970~1050		
	B-Cu64MnNi	Cu-Mn30-Ni6	860~900	900~1080		
	B-Cu52MnNi	Cu-Mn38-Ni10	880~925	950~1070		
	B-Cu50MnNi	Cu-Mn40-Ni5	880~925	950~1030		
	B-Cu76MnNiSnIn	Cu-Mn15-Ni5-Sn2-In2	890~950	980~1050		
	B-Cu52MnAuNi	Cu-Mn29-Au15-Ni4	880~910	940~1100		
铜金	B-Cu70Au	Cu-Au30	1015~1035	1050~1150		
	B-Cu65Au	Cu-Au35	975~1030	1030~1090		
	B-Cu62Au	Cu-Au38	980~1000	1010~1100		
	B-Cu62AuNi	Cu-Au35-Ni3	974~1028	1040~1150		
铜钯	B-Cu82Pd	Cu-Pd18	1080~1090	1100~1200		
	B-Cu55PdNiMn	Cu-Pd20Ni15Mn10	1070~1105	1100~1200		
	B-Cu35PdNiMn	Cu-Pd30Ni20Mn15	1050~1090	1100~1200		

考虑用锡、锑、镍等来降低铜磷钎料的熔点，但随之而来的是钎料强度的降低。铜磷钎料钎焊接头强度见表 3-16。

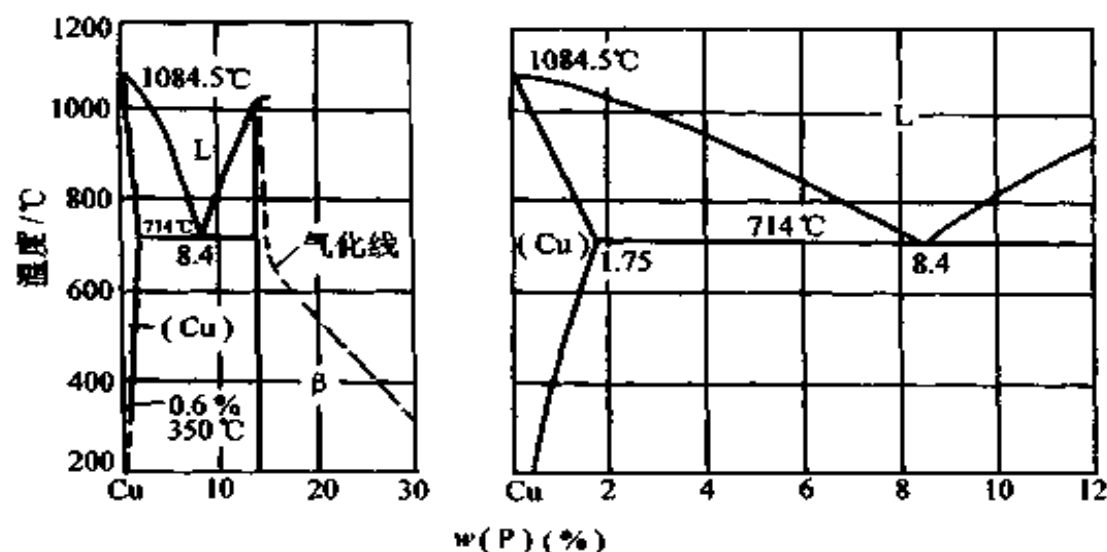


图 3-11 铜磷二元合金相图

表 3-16 铜磷钎料钎焊接头强度

钎料牌 号	接头强度/MPa				备 注
	纯 铜		H62 黄铜		
	σ_b	τ	σ_b	τ	
B-Cu93P	141	151	156	200	HL201
B-Cu94P	150	160	160	200	HL202
B-Cu94PSb	150	167	176	224	HL203
B-Cu80PAg	188	163	228	340	HL204
B-Cu89PAg	180	169	200	300	HL205
B-Cu80PSnAg	144	168	—	—	HL207
B-Cu91PAg	190	170	200	180	HL209

2. 铜锌钎料

铜锌合金作为钎料主要用于以气体火焰钎焊、感应钎焊，盐浴浸渍钎焊等方法来钎焊铜及铜合金、镍、钢、铸铁及硬质合金等。

由铜锌二元合金相图（见图 3-12，见全文后）可知，当含锌量小于 40% 时，合金为强度和塑性均表现优良的 α 固溶体，随着锌含量的增加，合金的熔点明显降低，但合金中出现高强度、低塑性的 β 相化合物，当锌的质量分数超过 60% 时，合金成为极脆的 γ 相 (Cu_2Zn_3) 化合物。因此，在通过添加锌来降低钎料熔点的同时，应

充分考虑锌含量对合金性能的影响。

B-Cu36Zn 是熔点最低的铜锌钎料，但由于是 γ 相组织，所以非常脆，接头性能差。这种钎料通常用于钎焊铜、黄铜、和其它铜合金，目的是通过母材向钎料中的适量溶解使接头的性能得以改善。B-Cu48Zn 的熔点也比较低，为 $\beta + \gamma$ 组织，仍然很脆，接头的塑性也较差。这种钎料主要用来钎焊不承受冲击和弯曲的铜的质量分数大于 68% 的铜合金工件。B-Cu54Zn 钎料的强度和塑性比前两种有所改善，但接头性能仍不算高，主要用于钎焊铜、青铜和钢等不受冲击和弯曲的工件。B-Cu62Zn 钎料即为 H62 黄铜，为 α 固溶体组织，具有优良的强度和塑性，是应用最广泛的铜锌钎料，可用于钎焊需要接头受力大、塑性好的铜、镍、钢质工件。

黄铜钎料在钎焊时锌极易挥发，造成钎料熔点升高，接头中产生气孔，破坏钎缝的致密性。为抑制锌的挥发，可在钎料中加入硅。硅可以与钎剂中的硼酸盐形成低熔点的硅酸盐并覆盖在钎料表面，从而抑制锌的挥发。但是，硅能显著降低锌在铜中的溶解度，促进 β 相的生成，使钎料变脆，并且硅氧化后不易去除，因而，硅的添加量不宜超过 0.5%（质量分数）。H62 黄铜中添加少量的锡和镍可以提高钎料的铺展性，但锡同样会降低锌在铜中的溶解度，因而，添加量一般不宜超过 1%（质量分数）。在 H62 黄铜中以 4%（质量分数）左右的锰部分替代铜，可以提高钎料的强度、塑性和润湿性，因而适合于钎焊硬质合金刀具等。

3. 铜锗钎料

向铜中加入锗可以使合金熔点明显降低，但铜和锗可以形成 ζ 相 (Cu_5Ge)、 ϵ 相 (Cu_3Ge)、 ϵ_1 相 (斜方 Cu_3Ge)、 ϵ_2 相 (体心立方 Cu_3Ge) 等多种金属间化合物。当将锗的添加量控制在 12% (质量分数) 以内时，可以保证合金为 α 固溶体组织 (见图 3-13)。铜锗钎料的蒸气压很低，主要用于钎焊电真空器件。向铜锗钎料中加入少量的镍，可以使钎料良好润湿钼、钨、镍、铁及其合金，增加流动性和塑性，可用于陶瓷-金属的封接。加入银可以改善钎料的润湿性和流动性，适合于钎焊可伐、镍、钼、钨及陶瓷-金属封接等。加入硅可以使钎料熔点降低，加入钛则可

改善钎料的塑性,提高钎缝的强度和降低表面粗糙度,获得较细的晶粒,保证对金属化陶瓷的润湿性和封接的可靠性。

用铜锗钎料进行陶瓷-金属封接,可以获得很高的抗拉强度,但由于这类钎料的固-液相温度区间较宽,因而钎料的流动性较差。

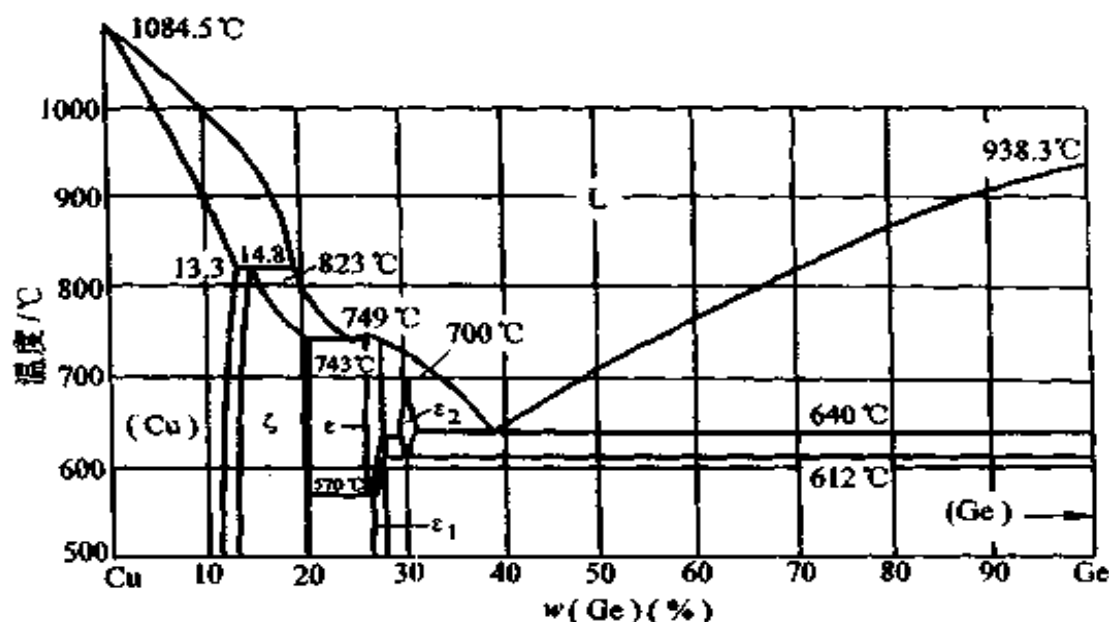


图 3-13 铜锗二元合金相图

4. 铜镍钎料

铜和镍可以形成无限互溶的连续固溶体 (见图 1-18), 镍的加入可以提高钎料的高温强度, 但却伴随着熔点的提高。

B-Cu98Ni、B-Cu90Ni 和 B-Cu75Ni 可用作电真空工业中的低蒸气压钎料, 用于钎焊可伐、钨、钼、不锈钢、铁、镍等。为降低钎料的熔点, 可以加入适量的硅和少量的硼。硅和硼又可以改善钎料的润湿性, 提高钎料在不锈钢上的铺展能力。例如, B-Cu67NiSiBFe 即为这类钎料中最典型的牌号, 该钎料在室温和高温下都几乎与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢等强度, 在 600°C 下钎料的抗氧化性也与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢很相近。这种钎料填缝能力好, 对接头间隙要求不严, 同时具有较好的塑性, 可以加工成各种形状。该钎料的缺点是熔点太高, 如操作不当, 会导致不锈钢晶粒长大和近缝区麻面等缺陷。

5. 铜锰钎料

仅由铜和锰两元素构成的钎料并不多见，通常是在铜锰合金中加入镍或钴，其目的是为了提¹高钎料在室温以及高温下的强度。铜锰镍钎料，如 B-Cu64MnNi 和 B-Cu52MnNi 的强度高，润湿性也很好，广泛用于钎焊钢、高温合金及硬质合金等。铜锰钴钎料的性能还要优于铜锰镍钎料，是铜基钎料中熔化温度较低而强度最高的钎料。其钎焊温度与不锈钢热处理温度相接近，接头塑性优于镍基钎料，并且对钎焊间隙没有镍基钎料那样敏感，主要用于取代金基钎料来钎焊航空发电机的重要部件。B-Cu52MnAuNi 钎料对非金属石墨、金刚石聚晶等具有良好的润湿性，可用于制造金刚石聚晶工具。其熔化温度对金刚石物化性能影响很小。

3.3.4 镍基钎料

由于镍具有优良的抗腐蚀性、抗氧化性和塑性，因此，镍基钎料常用于钎焊在高温下工作的零件。但镍的熔点较高(1452℃)，热强度也不够，因此必须添加一些合金元素来降低其熔点和提高其热强度，常用的合金元素有铬、硼、硅、锰、钨、磷、铜、碳及贵金属金和钯等。

镍与铬可以形成固溶体（见图 3-14），铬在镍中起固溶强化作用，

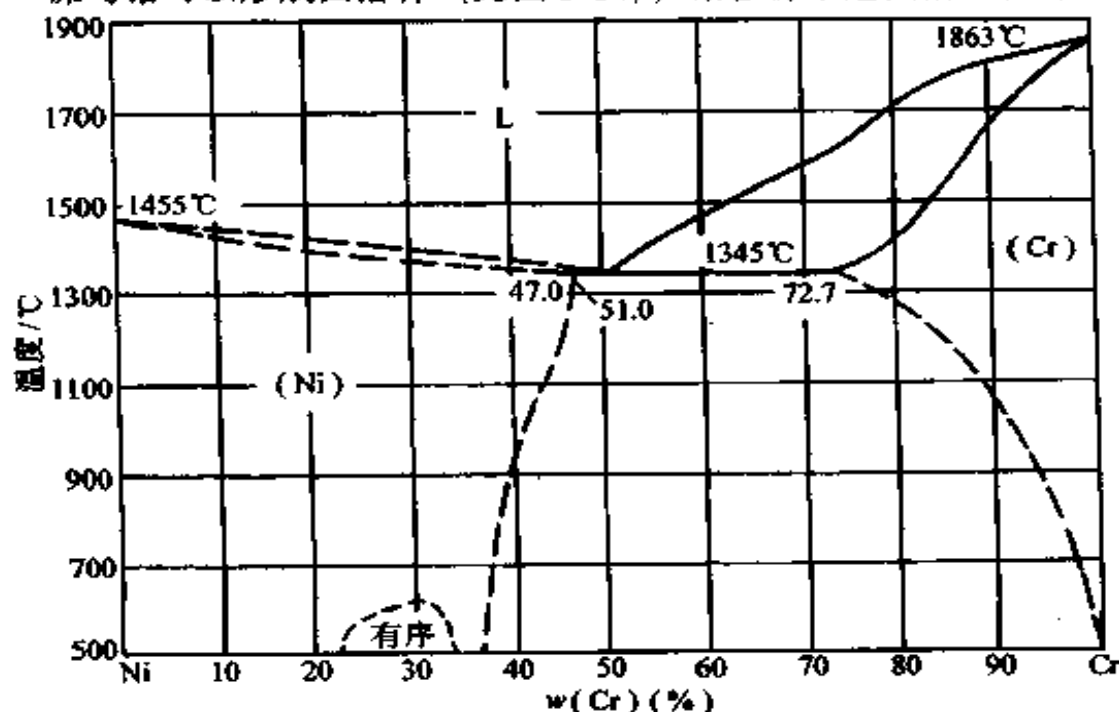


图 3-14 镍铬二元合金相图

使钎料合金的抗氧化性、抗腐蚀性及热强性得到提高，并且对润湿性也有改善。但加入铬并不足以使钎料的熔点明显降低，因此还需寻求其它合金元素。

硼是可以使镍的熔点大幅度降低的元素，当硼的质量分数约为4%时，可以使合金熔点降低到1140℃（见图3-15）。硼能显著提高钎料的高温强度和润湿性，但硼含量的增加却使钎料对母材的溶蚀倾向大大增加。并且硼在镍中的溶解度极小，可与镍形成金属间化合物，因而使合金变脆。因此，硼的添加量（质量分数）不宜过高，通常都控制在4%以内。

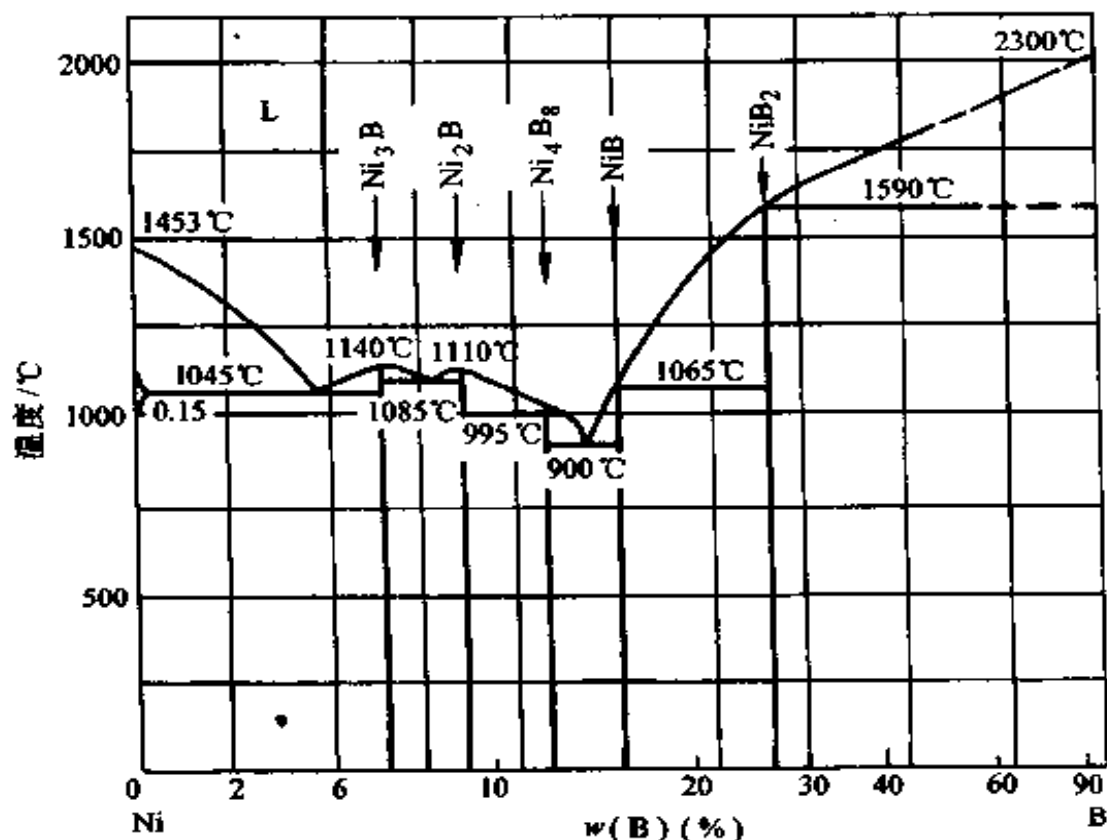


图 3-15 镍硼二元合金相图

硅同样可以降低钎料的熔点，当镍中硅的质量分数达到11%时，可使熔点达到1152℃。但是，硅的质量分数必须控制在6%以内，因为超过6%，不但会使钎料的高温强度降低，而且还会形成脆性的金属间化合物，使接头变脆。镍硅二元合金相图见图3-16。

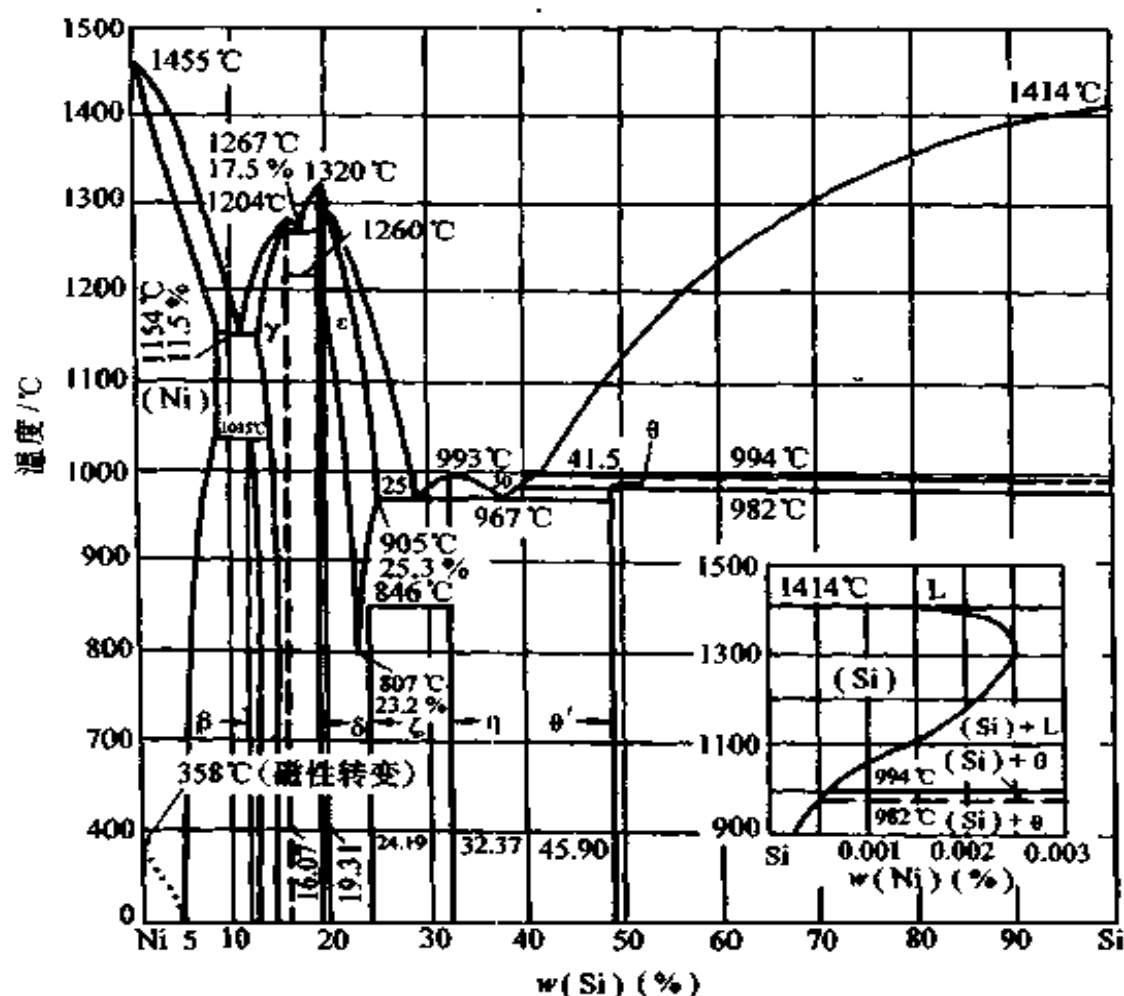


图 3-16 镍硅二元合金相图

磷是降低熔点作用最为明显的元素，当磷的质量分数达到 11% 时，合金熔点可达 880℃（见图 3-17）。磷还可以有效地提高润湿性。但是，磷含量过高会使高温强度下降，并且，磷的质量分数超过 11% 时，会形成脆性的金属间化合物，使接头性能降低。因此，磷的添加量（质量分数）一般不超过 11%。

锰的降低熔点作用也十分明显，还可以改善润湿性能和提高流动性，并且对其它性能的影响也不大。锰的最大问题在于其蒸气压较高，因此，当钎料的含锰量较高时，不适合于真空钎焊。

钯可与镍形成无限互溶的固溶体，并且可以使熔点降低，改善流动性。含钯钎料对含铝和钛的耐热合金具有良好的润湿性，并有助于减小晶间渗入。但是钯为贵金属，添加钯会使钎料的成本增加。

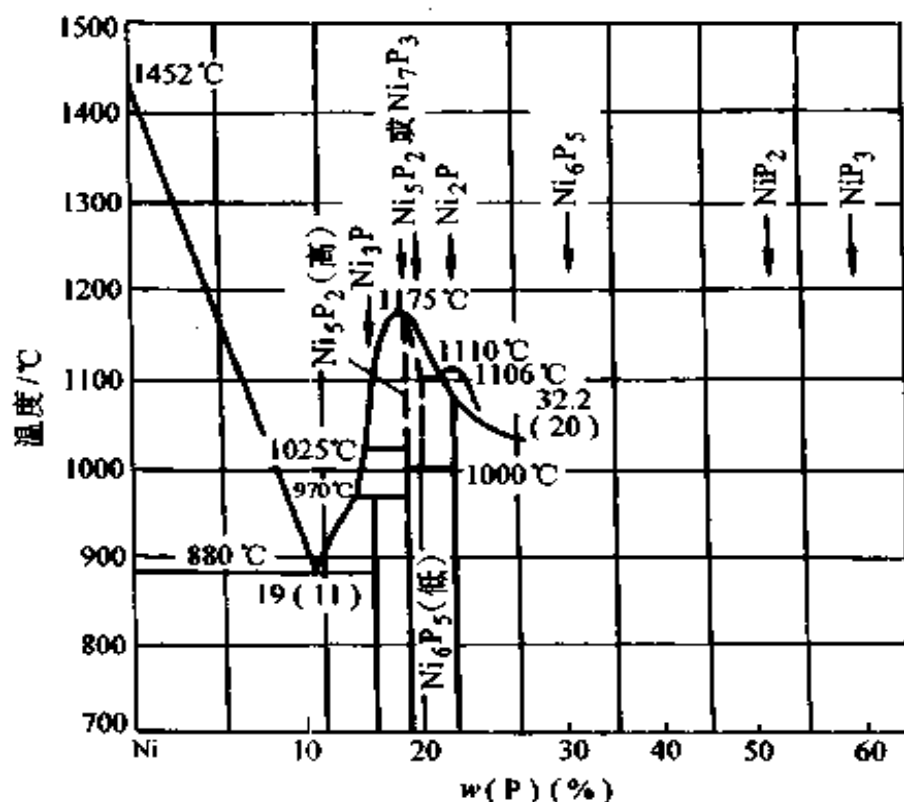


图 3-17 镍磷二元合金相图

碳也可以降低熔点和增加钎料强度，但其作用较弱。碳扩散进入基体金属内会引起塑性和抗腐蚀性下降，因此，钎料中碳的质量分数一般都控制在 0.5% 以下。

钨是熔点最高的金属元素（3830℃），在镍基钎料中可起固溶强化的作用。钨进入镍铬固溶体后，可以提高钎缝的再结晶温度，并能析出稳定的碳化物，提高钎缝的高温强度。

应当指出，含有硼和硅等元素的镍基钎料，由于形成了一系列的金属间化合物脆性相，使得钎料无法压延成形，通常只能以粉状供应，使用不便。这类钎料可采用急冷技术制成非晶态钎料箔使用。

镍基钎料的成分及性能见表 3-17。

B-Ni89P 钎料为镍磷二元共晶合金，熔点为 875℃。可用来钎焊不锈钢、铜和可伐合金等，是原子能工业中常用的钎料。其缺点是脆性较大，多用于静载接头的钎焊。

B-Ni76CrP 是三元共晶钎料，含铬的质量分数为 14%，钎料的

表 3-17 镍基钎料的化学成分及熔化温度

分 类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 °C	钎焊温度 °C	备 注
镍磷	B-Ni89P	Ni-P11-C0.1	875	925~1025	
镍铬磷	B-Ni76CrP	Ni-Cr14-P10	890	925~1040	
	B-Ni80CrP	Ni-Cr10-P8-Si1-B0.5-Fe0.2		980~1095	
	B-Ni84CrP	Ni-Cr8-P6-Si1-B0.6-Fe0.4		1010~1120	
	B-Ni87CrP	Ni-Cr8-P4-Si2-B0.6-Fe0.4		1010~1150	
镍铬硅磷	B-Ni66CrSiP	Ni-Cr13-Si9-Fe10-P1.8	1050~1120	1120~1250	
镍硅硼	B-Ni92SiB	Ni-Si4.5-B3-Fe0.5-C0.06	980~1040	1040~1175	
	B-Ni93SiB	Ni-Si3.5-B2-Fe1.5-C0.06	980~1065	1065~1175	
	B-Ni95SiB	Ni-Si3-B2	995~1065	1065~1175	
	B-Ni71CrSi	Ni-Cr19-Si10-B0.03-C0.1	1080~1135	1150~1205	
镍铬硅	B-Ni71CrSiW	Ni-Cr16-Si9.5-W2.5	1065~1130	1160~1205	
	B-Ni68CrSiWB	Ni-Cr10-Si4-B2.5-W12	970~1095	1135~1205	
	B-Ni77CrSi	Ni-Cr15-Si8	1085~1120	1165~1205	
	B-Ni71CrSiB	Ni-Cr16-Si4.5-B3.7-Fe<5	970~1070	1070~1200	HL701
镍铬硅硼	B-Ni74CrSiB	Ni-Cr14-Si4.5-B3-Fe4.5	975~1040	1065~1205	
	B-Ni75CrSiB	Ni-Cr13-Si4.5-B3-Fe4.5	975~1075	1075~1205	HL702
	B-Ni77CrSiB	Ni-Cr9-Si6.3-B3.7-Fe6.3	1000~1080	1080~1220	GHJ-6-2

(续)

分 类	钎料牌号	化学成分(质量分数, %)	熔化温度 ℃	钎焊温度 ℃	备 注
镍铬硅钼	B-Ni79CrSiB	Ni-Cr10-Si-6.3-B2.2-Fe<4	970~1000	1010~1175	
	B-Ni80CrSiB	Ni-Cr11-Si3.5-B3-Fe3.5	1090~1105	1110~1230	
	B-Ni82CrSiB	Ni-Cr7-Si5-B3-Fe3	970~1000	1010~1175	
镍铬硅钼	B-Ni71CrSiMn	Ni-Cr16-Si4.5-Mo3-B1.4-Fe3	967~1100	1100~1220	HfNi-2
镍铬钴钼	B-Ni62CrCoMoB	Ni-Cr15-Co5-Mo-B3	1120~1140	1140~1260	
镍金铬硅	B-Ni65AuCrSiB	Ni-Au20-Cr6-Si4-B2.5-Fe2.3	943~960	980~1120	
	B-Ni66AuCrSiB	Ni-Au21-Cr5-Si4-B2-Fe2	947~959	980~1120	
	B-Ni82AuCrSiB	Ni-Au11-Cr6-Si5-B3-Fe3	943~950	960~1120	
	B-Ni39CrPdSi	Ni-Cr33-Pd24-Si4	982~1177	1177~1200	
镍钼基	B-Ni48MnPd	Ni-Mn31-Pd21	982~1120	1150~1200	
	B-Ni50PdCrBSi	Ni-Pd36-Cr10-B3-Si1	825~955	980~1150	
	B-Ni59PdBSi	Ni-Pd37-B2.4-Si2.2	900~980	1010~1130	
	B-Ni62PdCrSiB	Ni-Pd20-Cr9-Si7-B2.5	838~966	1000~1150	
	B-Ni75CrSiPdB	Ni-Cr10-Si8-Pd5-B2.2	832~914	930~1050	
	B-Ni66MnSiCu	Ni-Mn23-Si7-Cu4	980~1010	1010~1095	
镍锰硅钼	B-Ni57MnCrSiB	Ni-Mn35-Cr4-Si2-B1-Fe1	980~1065	1065~1120	

高温强度和抗氧化性均比 B-Ni89P 有提高，用途也与其相同。

在 B-Ni76CrP 钎料中降低铬的含量并添加少量的硅、硼、铁等元素，可以改善钎料的润湿性能和钎焊工艺性能，提高接头的高温强度。所形成的 B-Ni80CrP、B-Ni84CrP、B-Ni87CrP 钎料主要用于钎焊不锈钢、合金钢等薄壁零件，在航空航天工业中多用于钎焊蜂窝结构。

镍铬硅系钎料 B-Ni71CrSi 和 B-Ni77CrSi，由于其不含硼，因而对母材的溶蚀性小。较高的铬和硅含量使其具有良好的高温强度和抗氧化性。这类钎料主要用于钎焊高温合金。钎焊不锈钢时易于引起晶粒长大。在这类钎料中加入钨可以进一步提高高温性能，可用来钎焊钨、钼等难熔金属以及涡轮叶片和发动机热端部件热疲劳裂纹的钎焊修补。钨的加入将使钎料的熔化温度升高，流动性变差。

B-Ni82CrSiB 钎料是镍基钎料中应用最广泛的钎料。其熔化温度低，润湿性及流动性优良，具有较高的强度和抗氧化性及抗腐蚀性，并且这种钎料的钎焊温度范围与不锈钢及高温合金的热处理制度相吻合，被广泛用于钎焊不锈钢零件。较高的硼、硅含量，使钎缝易于形成硼化物和硅化物，可有效地提高接头的高温性能。但钎焊间隙超过 0.10mm 时，会因共晶相和化合物脆性相过多而使接头冲击韧度下降。对于壁厚小于 0.30mm 的薄壁零件，不推荐使用这种钎料。在 B-Ni82CrSiB 中铬、铁含量（如 B-Ni74CrSiB、B-Ni75CrSiB）可以使钎料高温性能有所提高，但熔化温度区间变宽，钎焊温度提高，工艺性能变差。

B-Ni95SiB 的熔化温度较低，流动性好，对金属及一些非金属有良好的润湿性。适用于搭接量较长的接头，可用于钎焊要求大钎缝圆角和大钎焊间隙的零件，也可用于钎焊表面有 TiN 涂层、石墨等非金属零件。这种钎料的高温性能较差。在这种钎料中增加硅、硼含量可使熔化温度进一步降低，改善工艺性能，但溶蚀倾向增加，因此不推荐在薄壁零件上使用。

含金的镍基钎料 B-Ni64AuCrSiBFe、B-Ni65AuCrSiBFe，由于金的加入而得到大量的固溶体组织，使化合物相减少，改善了力学性能。

这类钎料广泛用于 800℃ 以下工作的高温部件。钎料工艺性能好，接头质量高。但因钎料的价格过高，因而只用于重要部件。B-Ni₈₃AuCrSiBFe 的金含量要比前两种钎料少一半，因而价格降低。并且硼、硅含量的增加使钎料的熔化温度范围缩小，液相线下降。

含钯的镍基钎料 B-Ni₄₈MnPd，其综合力学性能极好，钎焊工艺性能也很好，对钎焊间隙也不敏感。因为不含硼，可以用于薄壁零件，广泛用于钎焊高温合金、钨、钼、钽等难熔金属和碳化钨等非金属。其缺点是熔化温度太高，不适合于钎焊不锈钢，并且含钯量高，价格贵。B-Ni₃₉CrPdSi 高温性能好，润湿性优良，溶蚀小，可钎焊含铝和钛的不锈钢。加入硼后，使钎焊温度降低，但高温性能变差。并且溶蚀倾向增加，因而不推荐用于薄壁零件。调整硅、硼含量并减少钯含量，可降低钎料成本，降低熔化温度，可钎焊奥氏体不锈钢、合金结构钢、钛及钛合金等。不足之处是综合性能有所降低。

几种镍基钎料的性能与应用范围的综合比较情况见表 3-18。

3.3.5 锰基钎料

对于要求在较高温度（600~700℃）下工作的接头，可以采用锰基钎料进行钎焊。锰基钎料都是在锰镍合金的基础上添加铬、钴、铜、铁、硼等元素所构成的。锰的熔点为 1246℃，可与镍形成一系列固溶体，合金的最低熔化温度为 1020℃（见图 3-18）。其它合金元素的添加有助于进一步降低熔点，改善抗热性和抗腐蚀性。

锰基钎料主要用于钎焊碳钢、合金钢、不锈钢和高温合金。钎焊不锈钢时，无明显的溶蚀及晶间渗入现象，适合于钎焊薄壁零件。锰基钎料的蒸气压较高，不适合在高真空条件下使用，同时应快速加热。表 3-19 给出了锰基钎料的成分与性能。

B-Mn₇₀Ni 钎料的综合力学性能较高，润湿性和流动性较好，对钎焊间隙要求不严，主要用于钎焊高温合金结构和核反应堆零件。但其熔点太高，钎焊不锈钢时容易引起晶粒长大。增加镍含量，构成的 B-Mn₆₈Ni 和 B-Mn₆₀Ni 的熔化温度大大降低，可用来钎焊工作温度高达 815℃ 的组件，钎缝具有耐钠盐腐蚀作用。

B-Mn₇₀NiCr 润湿性好，溶蚀倾向小，可用于钎焊薄壁零件。但

表 3-18 国外标准镍基钎料应用范围

国外标准镍基钎料牌号	BNi-1	BNi-2	BNi-3	BNi-4	BNi-5	BNi-6	BNi-7
对应的国内钎料	B-Ni74SiB	B-Ni83CrSiB	B-Ni92SiB	B-Ni93SiB	B-Ni71CrSi	B-Ni89P	B-Ni77CrP
高温下受大应力的部件	A	B	B	C	A	C	C
受大静力的结构	A	A	B	B	A	C	C
蜂窝结构及其它薄壁结构	C	B	B	B	A	A	A
核反应堆	含硼,不适用于核反应堆						
大的可加工的圆角	B	C	C	C	C	C	C
同液态钠、钾接触	A	A	A	A	A	C	A
用于紧密的或深的接头	C	B	B	B	B	A	A
接头强度	1	1	2	3	1	4	2
母材的溶解	1	2	2	3	4	4	5
流动性	3	2	2	3	2	1	1
接头的抗氧化性	1	3	3	5	2	5	5
钎焊用保护气氛	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b	a,b,c,d	a,b,c,d
接头间隙/mm	0.05~0.125	0.025~0.125	0~0.05	0.05~0.1	0.025~0.1	0~0.075	0~0.075

注: 1. A—最好; B—满意; C—不太满意;

2. 从 1 到 5 依次降低;

3. a—干燥纯氢或氩; b—真空; c—分解氮; d—放热反应气体。

因熔点较高,钎焊不锈钢时易于造成晶粒长大。提高镍、铬含量(B-Mn55NiCr 和 B-Mn54NiCr),有助于改善高温性能,并使蒸气压略有降低。这类钎料主要用于钎焊热交换器,燃气涡轮发电机和双层金属结构。

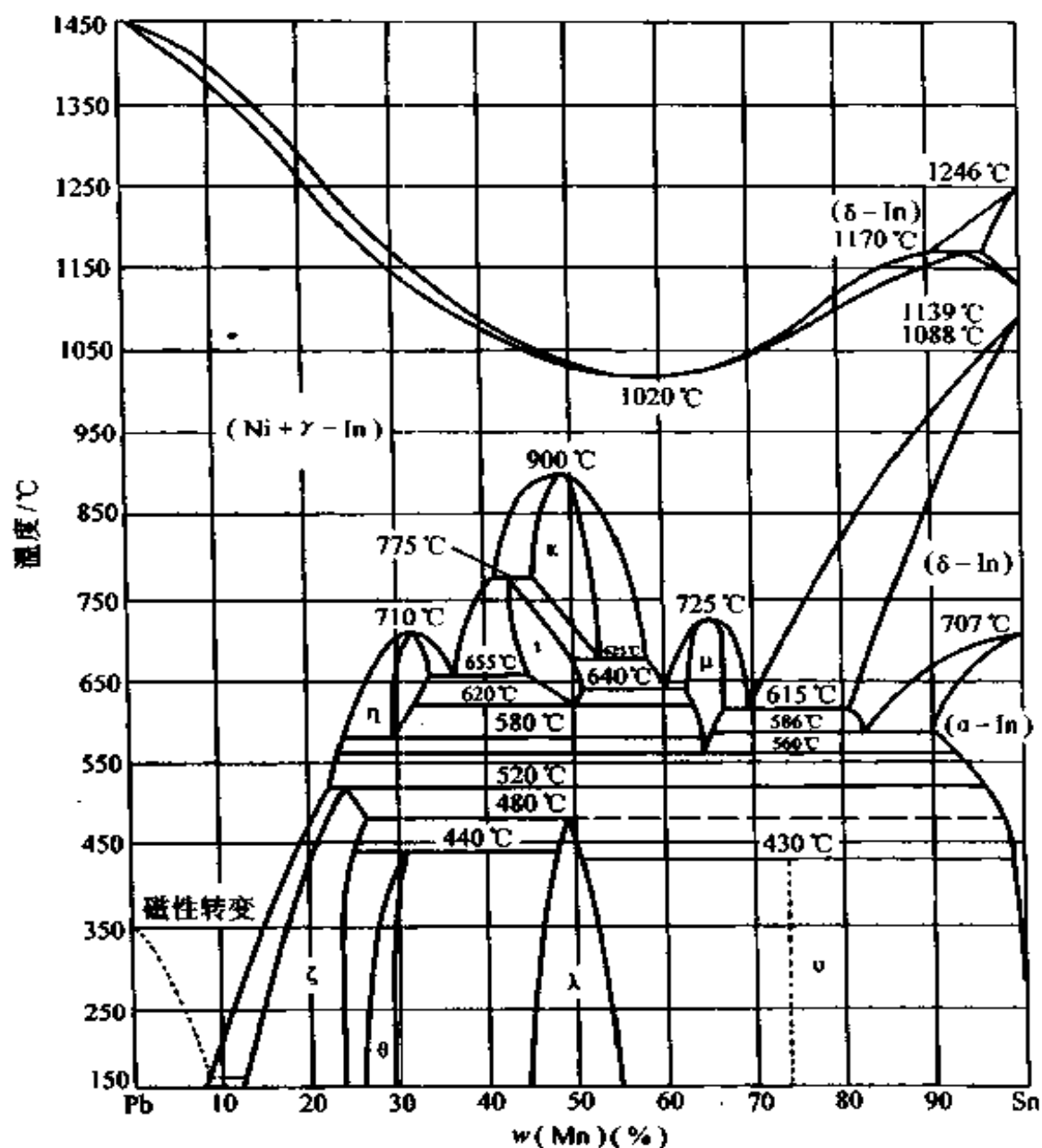


图 3-18 锰镍二元合金相图

B-Mn68NiCo 和 B-Mn67NiCo 钎料的高温性能优良,钎焊温度却较低。广泛用于钎焊沉淀硬化类不锈钢。

表 3-19 锰基钎料的成分及熔化温度

分 类	钎 料 牌 号	化 学 成 分 ^①	熔化温度 ℃	钎焊温度 ℃	备 注
锰 镍	B-Mn70Ni	Mn-Ni30-C0.1	1135	1150~1200	
	B-Mn68Ni	Mn-Ni31-C0.1	1010	1020~1200	
	B-Mn60Ni	Mn-Ni40-C0.1	1005	1015~1200	
锰 镍 铬	B-Mn70NiCr	Mn-Ni25-Cr5	1035~1080	1140~1180	QMn-1
	B-Mn55NiCr	Mn-Ni36-Cr9	1060	1080~1150	
	B-Mn54NiCr	Mn-Ni36-Cr10	1086~1170	1170~1200	
锰 镍 钴	B-Mn68NiCo	Mn-Ni22-Co10	1050~1070	1100~1200	QMn-3
	B-Mn67NiCo	Mn-Ni16-Co16-B0.9	1030~1050	1080~1150	
锰 镍 磷	B-Mn54NiP	Mn-Ni36-P9	1170	1170~1200	
锰 镍 铜 铬	B-Mn52NiCuCr	Mn-Ni28.5-Cu14.5-Cr5	1000~1010	1050~1200	QMn-5
锰 镍 铜 铬 钴	B-Mn50NiCuCrCo	Mn-Ni27.5-Cu13.5-Cr4.5-Co4.5	1010~1035	1065~1160	QMn-4
锰 镍 铜	B-Mn50NiCu	Mn-Ni30-Cu20	1000	1040~1130	QMn-6
	B-Mn45NiCu	Mn-Ni20-Cu35	920~950	950~1060	QMn-7
锰 镍 钴 铁	B-Mn65NiCoFeB	Mn-Ni16-Co16-Fe3-B0.6	1010~1035	1060~1100	
锰 镍 铬 钴	B-Mn40NiCrCoFe	Mn-Ni41-Cr12-Co3-Fe4	1065~1135	1160~1200	QMn-2

① 表中成分均指质量分数(%)。

B-Mn45NiCu 钎料的熔化温度较低, 可用于钎焊沉淀硬化不锈钢、合金结构钢和高温合金, 并可将钎焊规范与母材固溶处理规范相结合。这种钎料的成本低, 钎焊工艺性能良好。添加铬、钴提高热强性, 并改善工艺性能。添加铁可以提高钎料强度和高温性能, 但会使熔点升高。

3.3.6 金基钎料

金基钎料的应用具有悠久的历史。与银基钎料相比, 金基钎料的抗腐蚀性好, 蒸气压低, 流动性和润湿性优越。可用于钎焊铜、镍、可伐合金和不锈钢等。特别适用于钎焊高真空系统使用的零件。只是由于其成本太高而限制了它的应用。表 3-20 列出了一些金基钎料的成分与性能。

表 3-20 金基钎料的化学成分及熔化温度

分类	钎料牌号	化学成分 (质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	备 注
金铜	B-Au80Cu	Au-Cu20	910	890~1010	美 BAu-2
	B-Au72Cu	Au-Cu28	930~940	940~1060	
	B-Au63Cu	Au-Cu37	930~980	980~1080	
	B-Au60Cu	Au-Cu40	950~975	975~1050	
	B-Au50Cu	Au-Cu50	930~975	975~1050	
	B-Au37Cu	Au-Cu63	991~1016	1020~1120	美 BAu-1
金铜铁	B-Au80CuFe	Au-Cu19-Fe1	905~910	950~1060	
金铜镍	B-Au82CuNi	Au-Cu16-Ni2	910~925	950~1060	美 BAu-3
	B-Au35CuNi	Au-Cu64.5-Ni3	974~1029	1030~1130	
金铜银	B-Au75CuAg	Au-Cu23-Ag2	885~895	895~950	
	B-Au60CuAg	Au-Cu20-Ag20	835~845	850~950	
金铜锡	B-Au70CuIn	Au-Cu25-In5	820~850		
	B-Au60CuIn	Au-Cu35-In5	810~830		
	B-Au50CuIn	Au-Cu45-In5	830~850		
	B-Au35CuIn	Au-Cu60-In5	850~880		
	B-Au35CuIn	Au-Cu57.5-In7.5	830~860		
	B-Au20CuIn	Au-Cu75-In5	950~1005		
金镍	B-Au82Ni	Au-Ni18	950	950~1005	美 BAu-4
	B-Au75Ni	Au-Ni25	959~990	1020~1080	
	B-Au65Ni	Au-Ni35	977~1075	1075~1150	
金钯	B-Au92Pd	Au-Pd8	1200~1240	1240~1280	美 BAu-5
	B-Au50PdNi	Au-Pd25-Ni25	—		
	B-Au30PdNi	Au-Pd35-Ni35	1135~1166		

金与铜可以形成无限互溶的固溶体，最低熔化温度为 911°C （见图 3-19），具有优良的塑性，可以制成各种形状。

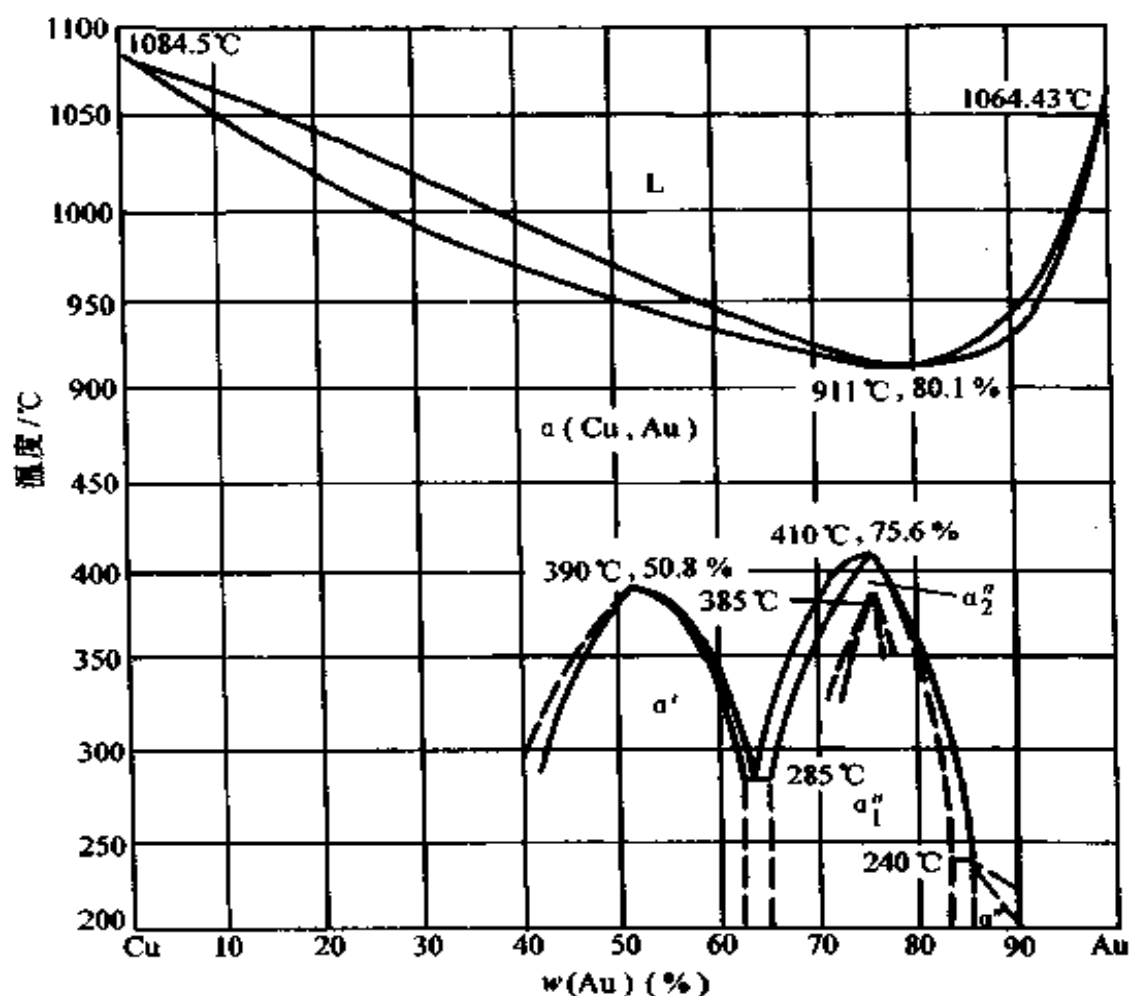


图 3-19 金铜二元合金相图

B-Au80Cu 钎料为金铜的低熔固溶体，熔点为 911°C 。该钎料的熔化温度较低，工艺性能好，但接头的高温性能较差，多用于电子工业和低温零部件的钎焊。B-Au72Cu、B-Au63Cu 和 B-Au50Cu 钎料是不同比例的金基固溶体组织，塑性好，强度高，电性能优异，特别适合于真空器件的钎焊。其钎焊温度与不锈钢、钛及钛合金的热处理制度一致，通常用作电真空器件的第一级钎焊。在 B-Au80Cu 的基础上添加少量的铁 (B-Au80CuFe)，可以使钎料的力学性能有所改善，但流动性变差，可用于填充较大的间隙；添加少量的镍 (B-Au82CuNi)，可改善热强性，降低蒸气压，提高对高温合金的润湿

性；添加银（B-Au75CuAg、B-Au60CuAg）可使钎料的熔化温度降低，改善工艺性能，并可有效地降低钎料成本。含银的金基钎料特别适合于钎焊 α -钛合金。添加铟（如B-Au70In等）可以使钎料的熔点进一步降低，这类钎料的塑性更为优异，蒸气压低，并且也可以使钎料成本降低。

与金铜二元系相类似，金镍二元系也可以形成无限互溶的固溶体，最低熔化温度为950℃（见图3-20）。金镍合金塑性优良，易于加工，高温强度和抗氧化性优异。

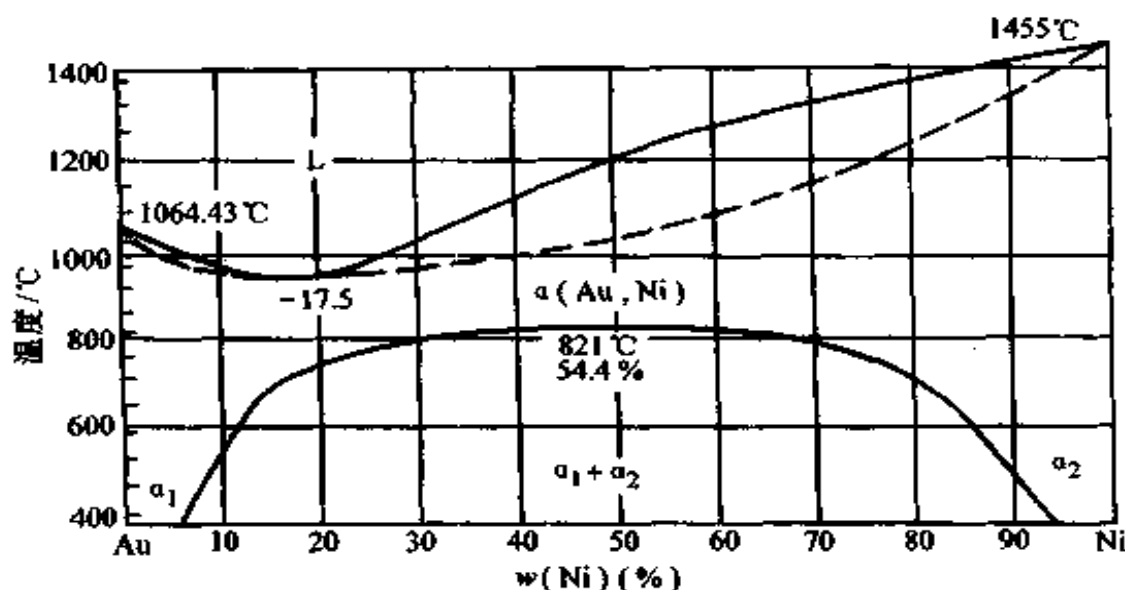


图 3-20 金镍二元合金相图

与金铜钎料相比，金镍钎料（B-Au82Ni）具有更高的强度和抗腐蚀性，蒸气压更低，尤其是高温强度更为优异。金镍钎料常用于航空发动机的整流器、燃油导管等重要部件的钎焊，也用于铜、可伐、镍、钼、钨、不锈钢等要求高的钎焊接头。在保证钎料性能变化不大的前提下，增加镍含量（B-Au75Ni、B-Au65Ni）可降低成本，使用范围更广，在关键部件中代替B-Au82Ni钎料来钎焊不锈钢、精密合金和钛合金等。

B-Au92Pd钎料除具有金镍钎料的优点外，高温强度进一步提高，润湿性改善，接头塑性上升，可钎焊间隙较宽的组件，特别适合于钎焊钛、铝含量较高的高温合金及钨、钼等难熔金属。这种钎料由于熔

化温度高，价格昂贵，一般只在重要场合使用。

B-Au50PdNi 钎料的综合性能极好，兼具金镍和金钯钎料的优点，含金量较低，可用于关键零件和高应力部件的钎焊，能获得性能非常优异的钎焊接头。

3.3.7 钯基钎料

钯是贵金属，熔点为 1550℃，蒸气压极低。钯与银、铜、镍等完全互溶，形成固溶体，但是这些固溶体的熔化温度都比较高。钯通常作为钎料的合金元素来使用，以钯作为基体金属的钎料并不多，重要的有表 3-21 中所列的几种。

表 3-21 钯基钎料的成分及性能

钎料牌号	化 学 成 分 ^①	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	抗拉强度 /MPa
B-Pd65Co	Pd-Co35	1230~1235	1235~1250	
B-Pd60Ni	Pd-40Ni	1238	1240~1250	
B-Pd34NiAu	Pd-Ni36-Au30	1135~1166	1166~1200	
B-Pd55NiSiBe	Pd-Ni44.2-Si0.5-Be0.3	1150~1160	1160~1200	
B-Pd81AgSi	Pd-Ag14.5-Si4.5	705~760	760~790	

① 表中成分均指质量分数 (%)。

B-Pd65Co 钎料的润湿性能及在高温合金上的流动性好，高温强度优良。这种钎料主要用于发动机、燃气轮机热端部件的钎焊，还可用于钎焊铌、钽、钨、钼及陶瓷等。B-Pd60Ni 钎料的用途与 B-Pd65Co 相近，钎焊工艺性能有所改善，成本也较低。

B-Pd34NiAu 钎料的熔化温度较低，抗腐蚀性优异，电性能好。主要用于钎焊陶瓷和难熔金属。蒸气压低，使其适用于电真空器件。B-Pd55NiSiBe 钎料的高温强度和钎焊工艺性能要比 B-Pd34NiAu 钎料好，主要用于钎焊不锈钢、高温合金、陶瓷及钨、钼等难熔金属。

B-Pd81AgSi 钎料的熔点很低，可以代替银钎料钎焊钛及钛合金、钛与不锈钢，具有接头强度高，抗腐蚀性好的特点。用于钎焊可伐合金可以降低钎料沿晶界的渗入，但价格昂贵，使用受到限制。

3.3.8 钛基钎料

钛的熔点为 1690℃，比强度高，抗腐蚀性好，是航空航天工业

中非常重要的金属材料。钛为活性金属，对陶瓷、石墨等非金属材料有极强的活化作用。钛与铜、镍可以形成多种共晶合金，具有熔点低，流动性好的特点，但塑性差。添加锆、铍等合金元素可以提高强度，改善钎料工艺性能。这类钎料的抗氧化性、耐腐蚀性及润湿性都很好，广泛用于钛及钛合金、钨、钼、钽、铌、石墨、陶瓷、宝石等材料的真空钎焊、扩散钎焊和封接。

钛基钎料的成分及性能见表 3-22。

表 3-22 钛基钎料的成分及熔化温度

分类	钎料牌号	化学成分 (质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	备注
钛铜	B-Ti92Cu	Ti-Cu8	790	790~850	
	B-Ti75Cu	Ti-Cu25	870	870~920	
	B-Ti50Cu	Ti-Cu50	955	955~1020	
钛镍	B-Ti72Ni	Ti-Ni28	955	965~1020	
钛钯	B-Ti53Pd	Ti-Pd47	1080	1090~1150	
钛铜镍	B-Ti70CuNi	Ti-Cu15-Ni15	910~940	950~980	
	B-Ti60CuNi	Ti-Cu25-Ni15-Be0.5	890~910	920~980	
钛锆镍	B-Ti43ZrNi	Ti-Zr43-Ni14	853~862	870~920	
钛锆铍	B-Ti48ZrBe	Ti-Zr48-Be4	890~900	940~1050	
	B-Ti49ZrBe	Ti-Zr49-Be2	900~955	970~1070	
钛铜铍	B-Ti49CuBe	Ti-Cu49-Be2	900~955	997~1020	
钛钒铬	B-Ti80VCr	Ti-V15-Cr5	1400~1450	1470~1600	
钛锆镍铜	B-Ti35ZrNiCu	Ti-Zr35-Ni15-Cu15	830~850	860~950	
钛锆镍铍	B-Ti43ZrNiBe	Ti-Zr43-Ni12-Be2	800~815	850~1050	

B-Ti50Cu、B-Ti75Cu 和 B-Ti92Cu 是三种共晶钎料，其熔点随着钛含量的增加而降低，对陶瓷的润湿性则随着钛含量的增加而提高。这类钎料广泛用于钎焊铜与铜合金、铜与镍合金、镍与钢、钢与钢等。钎料较高的蒸气压使其不适合于在超高真空器件中使用。

B-Ti72Ni 也是共晶钎料，用途与钛铜钎料相同，但性能更为优异。并且由于蒸气压较低，还可用于钎焊超高真空器件和 600℃ 以下使用的部件。

B-Ti70CuNi 钎料高温强度高，常用于钎焊钛及钛合金及氧化铝

陶瓷与难熔金属的连接。B-Ti48ZrBe 和 B-Ti49CuBe 钎料也可用于氧化铝陶瓷及难熔金属的钎焊，但由于铍是有毒元素，因此在使用时应予以注意。

B-Ti53Pd 钎料的综合力学性能好，蒸气压低，润湿性优良，可用于可伐合金、陶瓷、石墨、金刚石聚晶、及钼、钨等难熔金属的钎焊。但由于钎料熔化温度较高，价格昂贵，因此，除受力的高真空器件外，一般不推荐使用。

3.4 膏状钎料

膏状钎料（或称钎料膏）是由钎料合金粉末、钎剂及粘接剂所构成的膏体。其优点在于容易实现钎料量的控制，便于复杂结构的装配和易于实现钎焊过程的自动化。在实际生产过程中，经常会遇到需要将粉状钎料与钎剂混合并用溶剂调成糊状来使用，从原则上来说，这也可以称之为膏状钎料。但目前已成形产品出售的还只有用于电子产品钎焊的膏状钎料。随着微电子组装技术的发展和表面组装技术的推广应用，对膏状钎料的需求量也越来越大。在此，仅以电子组装用膏状钎料为例加以简单介绍。

1. 钎料膏的组成

电子级钎料膏通常是由钎料粉和钎料载体（软钎剂、溶剂、活化剂和调节流变特性的介质等）组成的。

（1）钎料粉 钎料粉是钎缝金属的主要来源。通常对锡铅系软钎料粉的合金成分及颗粒度的允差很小。一般允许的杂质范围（质量分数）是：氧化物 $< 0.50\%$ ；锑 $< 0.50\%$ ；锌 $< 0.0050\%$ ；铁 $< 0.02\%$ ；铜 $< 0.08\%$ ；砷 $< 0.03\%$ ；磷 $< 0.01\%$ ；硫 $< 0.0050\%$ ；镉 $< 0.0020\%$ ；铝 $< 0.0010\%$ 。钎料粉的形状以球形为主，颗粒度一般取 $149\mu\text{m}$ （100 目）、 $74\mu\text{m}$ （200 目）、 $63\mu\text{m}$ （250 目）、 $46\mu\text{m}$ （300 目）和 $45\mu\text{m}$ （325 目）等几级，以适应不同的涂复方式。丝网印刷一般用粒度 $74\mu\text{m}$ 的粉，模板印刷时，粉的颗粒度可以稍大一些，并且粉的颗粒度要均匀一致。钎料膏中的钎料粉的质量分数通常在 $75\% \sim 90\%$ 左右，为获得钎后较高的金属沉积量，常取质量分数为

85%~90%。

(2) 钎料载体 载体控制干燥速度并与钎料粉一起控制流变行为，并且净化钎料粉表面和促进润湿。载体在室温下应是液体或凝胶体，在 85℃ 下迅速干燥，并在钎焊温度下维持其活性。载体主要由松香或树脂、溶剂、活化剂和流变改性剂组成。松香是钎剂的主体，常用水白松香。活化剂可以是有机胺、有机酸或氨基盐酸盐等，根据其活性程度，可分为“R”级（无活性）、“RMA”级（中度活性）、“RA”级（完全活性）和“OA”级（较高活性）等几个级别。“RA”和“OA”级因其具有较高的腐蚀性而很少用于微电子领域。溶剂主要用于调节液体的流动性和粘度，为保证钎料膏长期使用，溶剂可选用单种或多种有机物系统。

2. 钎料膏的分类

钎料膏的种类即可以按照钎剂的种类划分，也可以按照钎料粉的种类划分。

按钎剂划分，可分为 AA 级、A 级、B 级、RA 级、RMA 级等，或分为免清洗钎料膏和水清洗钎料膏。免清洗钎料膏中所用的钎剂为各种免清洗钎剂，而水清洗钎料膏所用的钎剂则具有一定活性，存在腐蚀危险，因而需要清洗。这类钎料膏的清洗剂当然并不局限于水，也可以是醇或其它有机溶剂。

按照钎料合金的这类划分，可分为：

(1) 锡铅系钎料膏 这类钎料膏是应用最广泛的。尤其以 60Sn/40Pb 和 63Sn/37Pb 的应用最多。5Sn/95Pb 及 10Sn/90Pb 用于较高温度的钎焊，因为其富含铅而比较便宜。

(2) 锡铅银系钎料膏 这类钎料膏主要用于镀银材料的钎焊，钎料中添加银是为了减小厚膜中银的溶解。常用的有 62Sn/36Pb/2Ag 和 5Sn/93.5Pb/1.50Ag。

(3) 锡银系钎料膏 典型的为 95Sn/5Ag 和 96.5Sn/3.50Ag，其优点在于接头强度高，抗热疲劳性能好。

此外，还有锡铋系、银铋系、铅铋系和锡铋系等。其特点与相应的钎料合金相同。

表 3-23 给出了日本田村钎料膏的合金成分及用途, 在表 3-24 中则给出了英国 Mutlicore 钎料膏的种类及用途。表 3-25 给出了国内生产的钎料膏种类。

表 3-23 日本田村钎料膏的合金成分及用途

品 名	合金成分 ^①	熔点/℃	用 途
SS-3201	63Sn/37Pb	183	用于一般电子机器、用于印刷电路板
SS-3220	63Sn/34.5Pb/2.5Ag	189	用于混合波导联结集成电路、用于银电极
SS-3221	59.5Sn/34.5Pb/6Ag	177	用于混合波导联结集成电路、用于银电极
SS-3222	45Sn/40Pb/15Bi	162	用于低温软钎焊
SS-3230	96.5Sn/3.5Ag	221	用于高温软钎焊

① 表中成分均指质量分数 (%)。

表 3-24 英国 Mutlicore 公司钎料膏的种类及用途

代号	种 类	用 途	稀释剂
X32	不含卤化物	无渣	
304	不含卤化物的松香	航天及军用电子设备	SOL109
T-RMA	轻度活化松香	军用及专业用电子设备	SOL109
T-RA	活化松香	消费品用电子设备	SOL109
366	活化松香	软钎焊性不良的表面	XM27324
XER	Xersin 合成钎剂	极高可靠性	XM27540
SA	合成活化钎剂	专业及消费品用电子设备, 使用溶剂清洗系统	XM27650
HX	Xydro-X 水溶性有机物	专业及消费品用电子设备, 使用水相清洗系统	XM27565
ALU	Alusol	铝, 水溶性残渣	XM27600

表 3-25 国内市场销售的钎料膏品种

名 称	使用方式	活度等级	适 应 范 围
无卤素钎料膏	印刷用		航天及军用电子设备
轻度活化钎料膏	印刷用	RMA	军用及专业电子设备
活化松香钎料膏	印刷用	RA	消费品电子设备
常温保存钎料膏	印刷用	RMA	专业电子设备
定量分配器用钎料膏	定量分配器	RMA	适合定量分配器使用

3. 钎料膏的特性及要求

(1) 粘度 钎料膏的粘度是受钎料粉颗粒度及形状、钎剂成分及含量、温度等因素影响的主要性能之一。粘度的确定要考虑使用方式、印刷量的大小以及印刷图形的形状等。为获得良好的印刷性能,就要选择粘度适当的钎料膏,从而保证在印刷过程中不粘网、不糊网。表 3-26 给出了不同使用方式所对应的钎料膏粘度参考值。

表 3-26 钎料膏使用的参考值

使用方式	钎料粉颗粒度/ μm	钎剂的质量分数(%)	钎料粉形状	钎料膏粘度 10000 CPS	参考适应范围
定量分配器	45~25	12~15	球形	10~13	高精度电路用
	63~25		不定形与球形		一般电路用
孔径 0.180 ~ 0.125mm 丝网	63~45	10~13	球形与不定形混合	40~60	一般电路用
孔径 0.10 ~ 0.07mm 丝网	45~25				
孔径 0.07mm 丝网	63~25		球形		高精度电路用
厚度 0.3mm 以下的金属模板	74~45	8~11	球形与不定形混合	60~90	一般电路用
厚度 0.3mm 以上的金属模板	105~45		不定形		高精度电路用

(2) 软钎焊性能 钎料膏的软钎焊性能一般按照普通软钎料的方法检验。

(3) 坍塌性 钎料膏的坍塌性与其粘度、钎料粉形状、颗粒度分布、钎剂含量及印刷厚度等因素有关。细密的印刷图形容易形成塌边,造成器件引脚间桥接。

(4) 残留颗粒 钎料膏经长时间放置后粘度变化大,焊后容易产生残留颗粒。这主要是由于钎料粉的含氧量过高所造成的。

(5) 焊锡球 用钎料膏钎焊后,常常在焊点附近发现一些钎料小球。产生的原因一是印刷时图形边缘的钎料粉脱落,二是由于钎料粉的含氧量过高所致。

(6) 残渣清洗性 通常在民用产品上可不清洗,在要求高可靠的

军用产品上，由于残渣中有钎料球存在，受热时可能滚动，因而需要清洗。

基于钎料膏的上述特点，除了要保证正确的成分外，钎料膏还需满足以下要求：

- 1) 制成的钎料膏在放置期间应具有良好的化学稳定性，钎料粉与液态钎剂之间在常温下的化学反应必须很小；
- 2) 印刷性、挤出性良好，印刷图形清晰，不易堵塞网眼或针孔；
- 3) 钎料膏涂布后可在较长时间内保持粘性，有利于器件的定位与钎焊；
- 4) 钎剂与钎料粉不易分离，分离小的钎料膏经搅拌后即可恢复悬浮状态；
- 5) 钎料膏的表皮不固化，以防止网眼及针孔堵塞；
- 6) 触变性好，涂布后塌边、渗润小，以保证印刷图形的清晰以及钎焊后不产生不必要的焊珠及桥接现象；
- 7) 钎焊时润湿性良好；
- 8) 毒性小。

3.5 非晶态钎料

非晶态钎料是从 70 年代发展起来的一种新型钎料。所谓“非晶态”是相对于晶态而言的，它是物质的另一种结构形态，其特征是保留了液态金属的原子无序排列的结构和各向异性，但原子之间仍以金属键结合。获取非晶态金属的最常用的方法是快速急冷技术，对于硬而脆，无法用压延方式成形的金属或合金（如：铜-磷、铜-钛、铜-硅-镍、铜-镍-锡-磷等系钎料合金），可将其加热熔化，然后浇到高速旋转的铜质水冷飞轮上，使其以极高的速度冷却，即可得到非晶态合金箔。

目前，国内已经进入标准的非晶态钎料有 7K301（镍基钎料）、7K701（Cu-Si-Ni 系钎料）、7K702（Cu-Ni-Sn-P）和 7K703（Cu-Ag-Sn-P）四个系列，其它一些非晶态钎料合金也时常见诸报道。国外已经开发出铜基、铜磷基、钼基、锡基、铅基、铝基、钛基、钴基等九大系列几百种牌号的非晶态钎料。从理论上来说，只要冷却速度足够

快，各种合金都可以制成非晶态。

非晶态钎料具有以下几方面的特点：

1) 化学成分均匀，杂质含量少，纯度高，钎料各组分不分离，能显著改善钎焊接头的强度。

2) 不含粘结剂，加热速率不受限制，钎缝无非金属夹渣，钎焊接头质量高。

3) 钎料可按工件结构需要冲剪成各种精确的形状，从而能严格控制钎料的用量和抑制液态钎料的溢流。

4) 由于非晶态钎料箔通常是预置在钎焊间隙内的，因此对其填充间隙的能力要求不高，为较大面积平面接头的钎焊提供了较高的可靠性。

5) 与粘带钎料相比，不受存储时间和存储条件的限制。

表 3-27 和表 3-28 给出了上海钢铁研究所研制的镍基和铜基非晶态钎料的化学成分和熔化温度。

表 3-27 非晶态镍基钎料

钎料编号	化学成分 (质量分数, %)								固相	液相
	Ni	C	B	Cr	Fe	Si	Co	其它	线/℃	线/℃
QGNi-1001	余	0.03	2.0~3.5			4.2~4.6			980	1050
-1002	余	0.02	2.3~2.6			5.4~7.6			980	1010
-1003	余	0.02	1.3~1.7	18~19.5		6.0~8.0			1020	1075
-1004	余	0.02	2.4~3.0			3.8~4.5	18.5~20.0		970	1087
-1005	余	0.01	3.3~4.2	14.5~16					1025	1080
-1006	余	0.04	2.7~3.5	13.0~15.0	4.0~5.0	4.0~5.0			1010	1100
-1007	余	0.04	2.5~3.2	12.0~14.0	3.5~5.0	0~5	<1.0		1005	1100
-1008	余	0.02	2.7~3.5	6.5~7.5	2.5~3	3.0~5.0			972	1000
-1009	余	0.02	3.5~4.0	9.7~10.7	5.3~5.7		22.5~23.5	Mo6.7~7.3	1015	1075

(续)

钎料编号	化学成分 (质量分数, %)								固相	液相
	Ni	C	B	Cr	Fe	Si	Co	其它	线/℃	线/℃
-1010	余	0.02	2.0~ 2.5	11.0~ 12.2	3.9~ 4.9	1.2~ 1.7		W7.5~ 8.5	1060	1110
-1011	余	0.02	1.5~ 2.0	4.5~ 5.5	2.0~ 2.5	5.6~ 6.0	3.0	Cu5.0~ 6.0 Mn4.5~ 5.5	948	976
-1012	余	0.02	1.5~ 2.0			5.0~ 6.0		Cu5.0~ 6.0 Mn19~ 21	980	960

表 3-28 非晶态铜基钎料

钎料编号	化学成分 (质量分数, %)					固相	液相
	Cu	Ni	Sn	P	In	线/℃	线/℃
QGCu-200B	余		19~21			730	925
-200C	余	1.5~2.5	19~21		1.5~2.5	775	880
QGCu-2001	余	9.0~10.0	9.5~10.5	6.5~7.1		585	660
-2002	余	9.0~10.0	4.0~5.0	7.2~7.8		601	630
-2003	余	13.0~15.0	9.0~10.0	6.5~7.1		533	640
-2005	余	4.8~5.8	9.0~10.0	6.5~7.0		553	630

第4章 钎焊接头的设计

钎焊是一种广泛用于各种金属加工部门的简单的金属连接方法。以往由于可用钎料的种类有限并且其强度较低，因而在许多情况下，钎焊接头只是以纯连接为目的的联系接头，而不被用作为承载接头。随着科学技术的发展和钎焊材料（特别是高强度钎料）的开发，钎焊接头作为承力接头（达到与母材等强度）从原则上讲已无困难，只要采取适当的措施就可达到这一要求。因此，为保证产品质量和提高钎焊结构的安全可靠性，研究了解钎焊接头的设计原则，提高接头和结构的性能就具有重要的意义。

4.1 钎焊接头的形式

由于钎焊结构的千变万化，实际钎焊接头可能有各种形式。但就其两被连接工件之间的相对位置来看，不外乎为对接、搭接、角接和T形接头几种基本形式（见图4-1）。而这几种基本形式的变化和组合

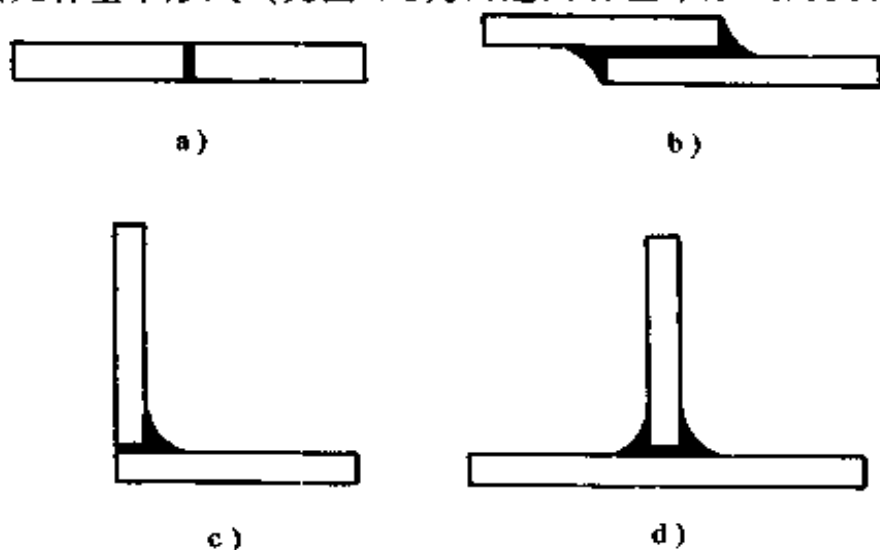


图4-1 钎焊接头的几种基本形式

a) 对接接头 b) 搭接接头 c) 角接接头 d) T形接头

就产生了各种各样的接头形式 (见图 4-2)。

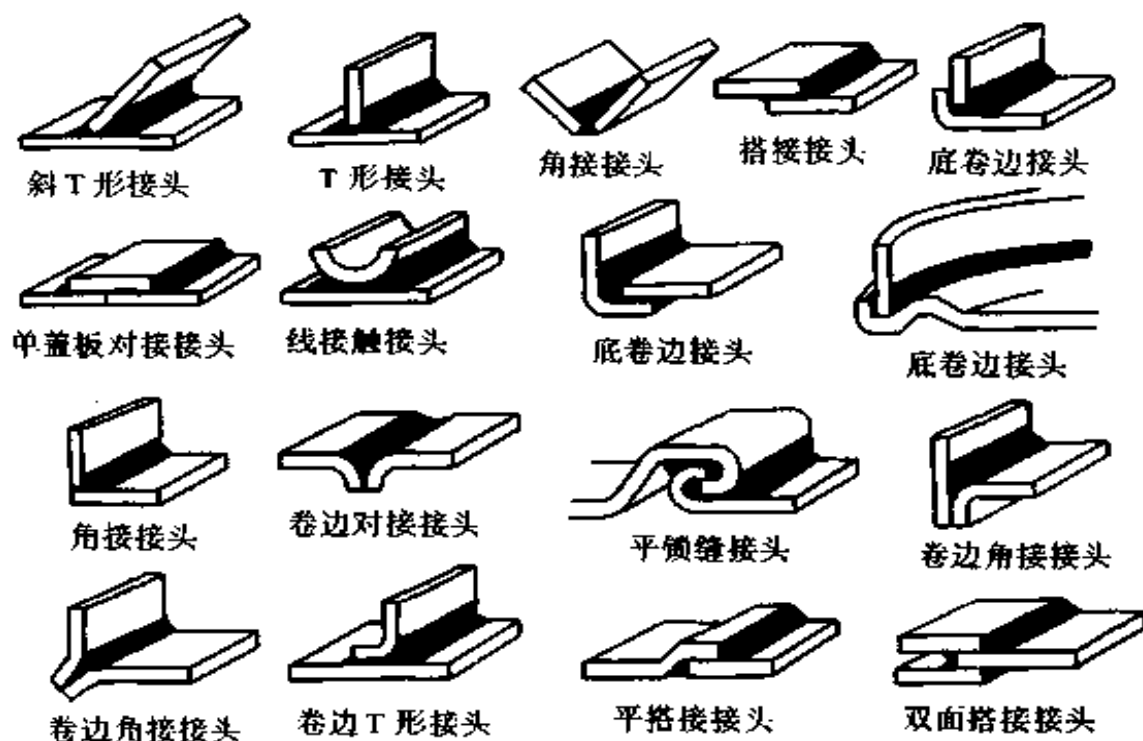


图 4-2 各种形式的钎焊接头

在上述几种基本形式的接头中,除等厚度板的对接接头(图 4-1a)外,其它几种形式的接头处都会形成一定尺寸的钎缝圆角。钎缝圆角的存在,在一定程度上可以减小应力集中,增大接头承载面积,从而提高接头的承载能力。但是,由于钎缝圆角的大小和形状受到钎料的用量、钎料对母材的润湿性能、环境及钎剂对润湿的影响等众多因素的制约,较难加以严格的控制,所以,在接头设计过程中,通常是按照无钎缝圆角时的情况进行,而将钎缝圆角只作为保证安全的一个潜在因素。

对接接头具有均匀的受力状态,并且节省材料,减轻结构重量,因此成为熔焊的基本接头形式。而在钎焊连接中,由于钎料的强度大多低于母材,因而钎缝的强度也常常低于母材,这就使得普通对接接头难以充分发挥母材的承载能力,并且对接接头要保证两被连接件对中和严格控制间隙的大小都比较困难,特别是当工件的厚度比较小时,将使其难度明显增加。因此,在钎焊结构中对接接头的使用比较少。T 形

接头和角接接头的情况与对接接头相似,也存在上述问题。解决这一问题的方法之一是增大对接部分的截面积或采用局部搭接化的对接接头。此外也可以用增设肋板补强的方法来解决(如图 4-3)。对于角接和 T 形接头也可采用同样的处理方法(见图 4-4)。

搭接接头可以通过增大搭接面积的方式来保证在接头强度低与母材的情况下使接头具有与母材相同甚至更高的承载能力,并且搭接接头的装配要求也比较简单,因此,搭接接头成为钎焊连接的最基本的形式。然而,搭接接头也存在其固有的缺点,一是增加了母材的用量和结构的重量,而是接头的截面发生突然变化并因而导致应力集中。因此,

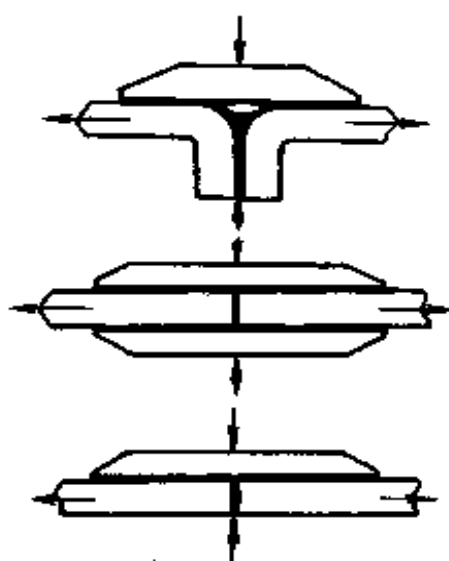


图 4-3 肋板补强的对接接头

在接头设计中,如果不采用搭接方式也能满足产品的使用要求时,则应尽可能不用搭接接头。而在使用搭接接头作为承载连接时,则要采取一定的措施来减缓应力集中的影响,如使接头处的截面圆滑过渡(如图 4-5)。

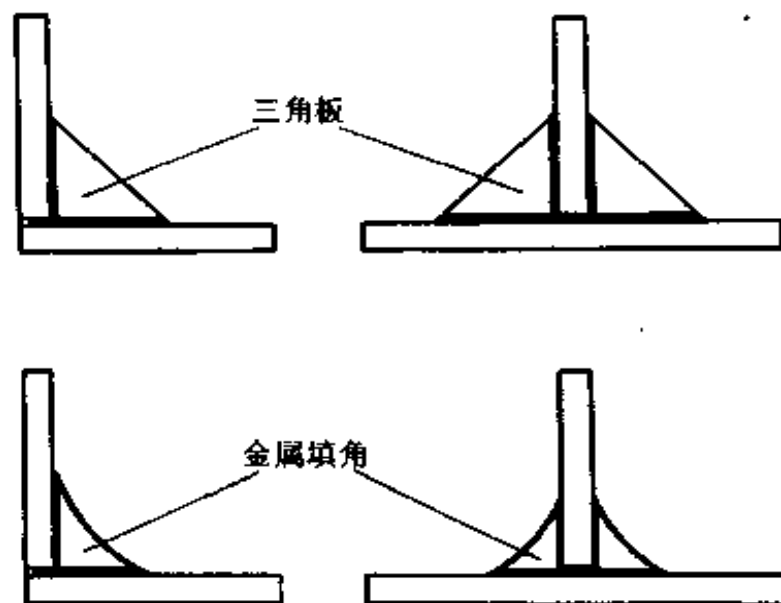


图 4-4 肋板补强的角接和 T 形接头

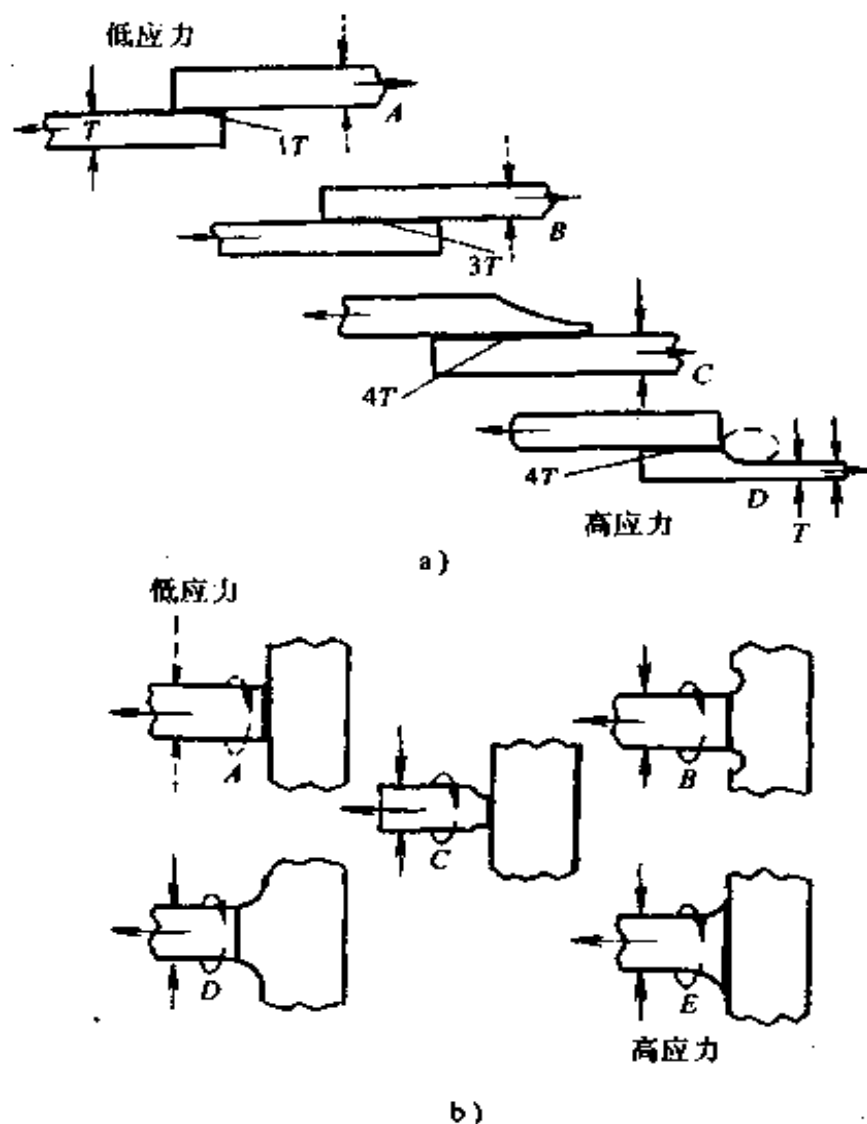
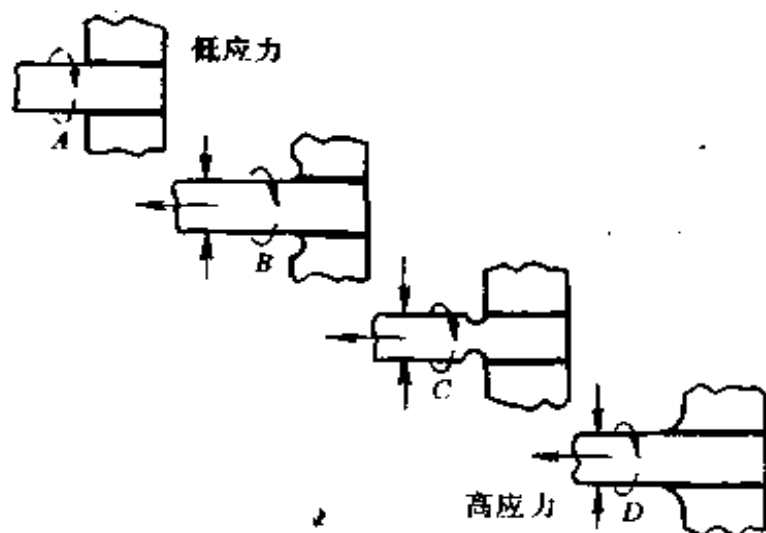


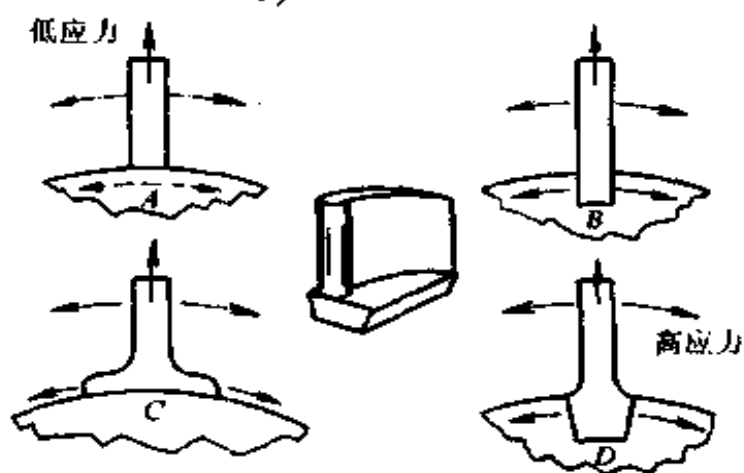
图 4-5 减缓接头处
a) 单板搭接 b) 轮毂与轴

4.2 钎焊接头搭接长度的确定

搭接接头主要承载剪切载荷。对于单搭接接头的切应力分布如图 4-6 所示。当在试件两端施加拉伸载荷时，钎缝承受切应力。并且由于拉伸载荷的偏心，使接头还承受一定的弯矩作用。钎缝中沿长度方向上切应力的分布特征为，钎缝中心区域的切应力值比较低，而钎缝两端处则比较高。尤其是在内侧端，其切应力值最大。由于接头在承



c)



d)

应力集中的措施

c) 轴与衬套 d) 涡轮叶片

受拉伸时的偏心矩产生力偶，使两端产生力矩，在钎缝两端加上切应力的作用，就会首先在根部产生裂纹。采用楔形接头或斜接头可以避开这种不利的应力分布，但随之而来的是接头的正应力值增加。

增加接头承载能力的另一条途径是增加搭接长度。但由于钎缝中段的应力值较低，危险点是在钎缝两端，所以过分增加搭接长度并不能成比例地增加接头的承载能力。实践表明，接头的搭接长度取板厚的 3~4 倍为宜。

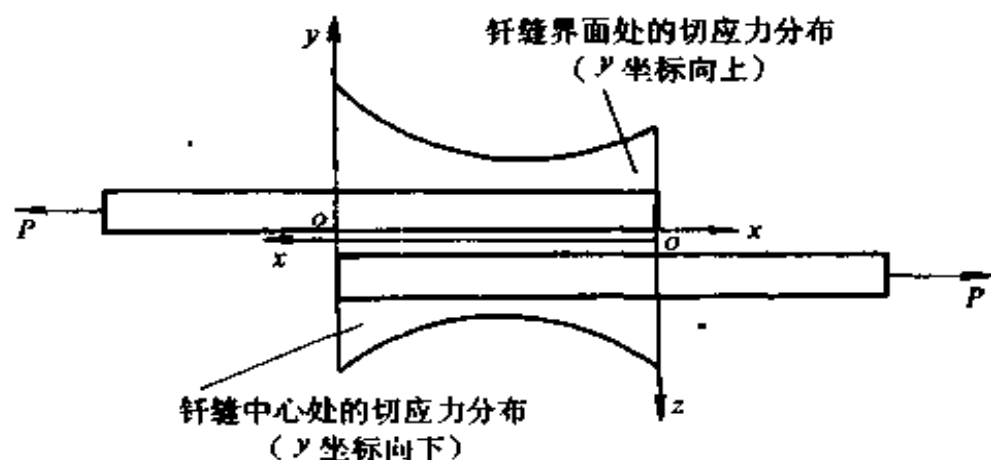


图 4-6 单搭接接头中的应力分布

对于图 4-7a 所示的单板搭接接头，其搭接长度可按下式进行计算：

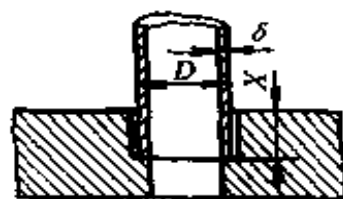
$$X = Y\sigma_b\delta/\tau \quad (4-1)$$

式中 X ——搭接长度 (mm)；
 Y ——安全系数 (一般情况下为 4~5)；
 σ_b ——母材的抗拉强度；
 τ ——钎料的抗剪强度；
 δ ——板厚。

对于异种材料的钎焊连接，且板厚不同时，应取 $\sigma_b \cdot \tau$ 的乘积较大的那种材料的相应参数。



a)



b)

图 4-7 钎焊接头搭接长度计算示意图

a) 单板搭接接头 b) 圆管套接接头

对于图 4-7b 所示的圆管套接接头，其搭接长度可按下式计算：

$$X = \delta(D - \delta)Y\sigma_b/\tau D \quad (4-2)$$

式中 D ——管的外径 (mm)。

对于异种材料的圆管接头，有关 $\sigma_b \cdot \tau$ 的选择可做相应的处理。

4.3 钎焊接头间隙的选定

由于钎焊间隙的大小对接头有着明显的影响，并且对于不同形式的接头和不同类型的载荷，以及不同的母材和钎料组合，对间隙都有着不同的要求，因此，钎焊接头间隙的确定是一个非常复杂的问题。通常在确定接头间隙时要考虑以下几方面的因素：

- 1) 母材与钎料的匹配及其力学性能，如：抗拉强度、抗剪强度、弹性模量、剪切弹性模量等；
- 2) 钎焊接头的形式，如：对接、搭接、角接等；
- 3) 钎料与母材间的相互作用，如：溶解、扩散、偏析、晶粒长大等；
- 4) 钎焊缺陷及钎着率等。

钎焊间隙是指在实施钎焊的条件下母材结合面之间的距离，这与室温下的装配间隙是不完全相同的。对采用压配合或紧配合来进行装配的同种材料的零件来说，比较容易保持钎焊间隙的稳定，而在有些零件中，需要采用间隔金属丝、薄垫片、冲孔凸点或喷砂等措施来保证适当的钎焊间隙，从而使钎料顺利流入间隙并使钎焊接头达到最佳强度。

在钎焊截面尺寸大致相当的同种金属工件时，只需考虑室温下的间隙就能取得另人满意的结果。因为相同的热膨胀系数使它们在钎焊温度下仍可保持与在室温下基本相同的间隙值。而在钎焊截面尺寸相差较大的同种金属或热膨胀系数相差较大的异种金属时，就必须考虑钎焊温度下间隙的变化情况。要通过调整室温下的间隙，使其在钎焊温度下达到所需要的间隙值。对于异种材料的钎焊来说，影响钎焊间隙变化的主要原因是母材的热膨胀系数和加热方法。特别是套接形式的接头，母材热膨胀系数差异的影响最大。如果套接时内部零件的热膨胀系数比外部零件的热膨胀系数大，则在加热过程中间隙将变小；反之，加热时会使间隙增大。对工件加热温度的不均匀也会引起钎焊间隙值的变化。

不同材料在钎焊温度下间隙变化的关系可用诺漠图来表示。图

4-8 即为各种钎焊条件下确定异种金属接头间隙变化量的诺谟图。异种金属轴类零件的装配间隙在钎焊温度下的变化量可以直接通过此图查得。如在室温 (20℃) 下装配直径为 50mm 的套接接头, 当钎焊温度为 700℃, 并且外部的管形零件与内部的杆形零件的热膨胀系数差为 $-5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 时, 可由图中所确定间隙的变化量为 -0.18mm 。对

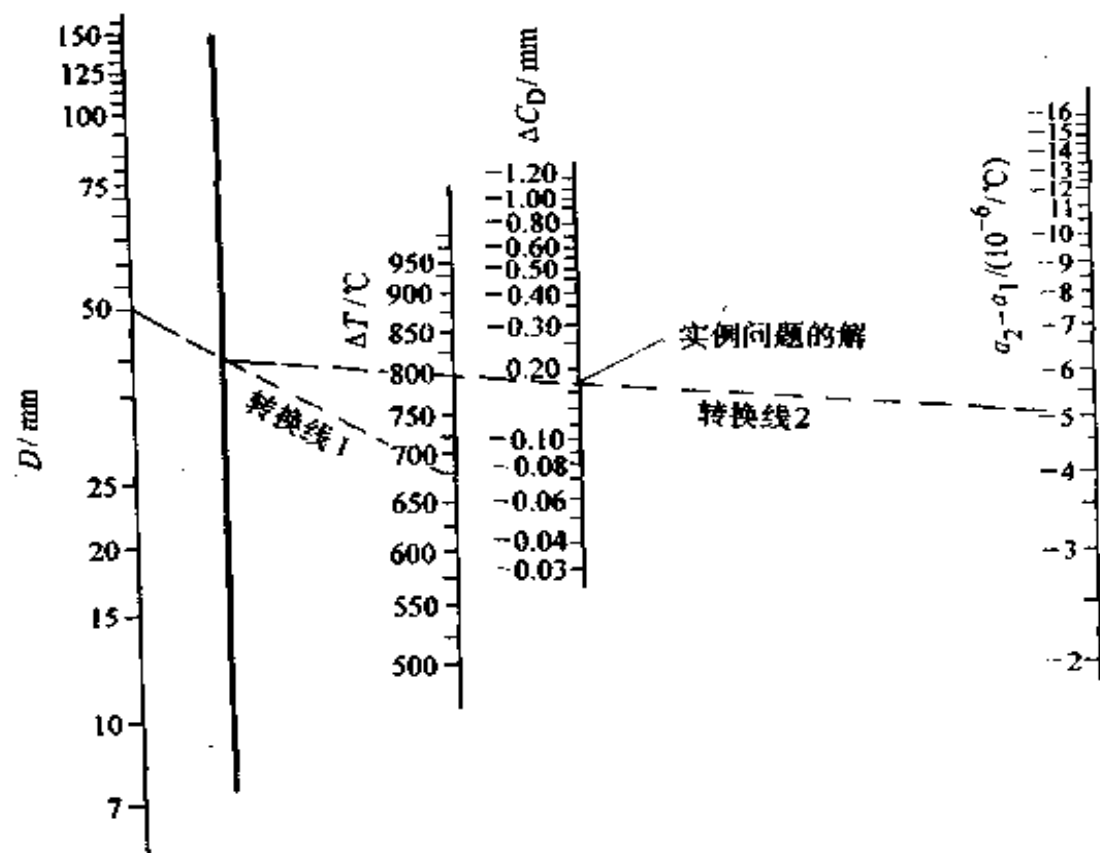


图 4-8 确定异种金属接头直径间隙变化量的诺谟图

于这类问题的求解, 也可用式(4-3)进行计算:

$$\Delta C_D = D \cdot \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4-3)$$

式中 ΔC_D ——间隙的变化量 (mm);

D ——接头的正常直径 (mm);

ΔT ——钎焊温度与室温之差 (℃);

α_2 ——外部零件的热膨胀系数 (℃);

α_1 ——内部零件的热膨胀系数 (℃)。

如果计算结果为正值, 则表示钎焊间隙大于装配间隙; 若结果为

负值，则表示钎焊间隙小于装配间隙。这样，当间隙增大时，可选用推荐钎焊温度的下限进行钎焊；反之，当间隙减小时，可选用推荐钎焊温度的上限进行钎焊。

图 4-9 给出了钎焊间隙与接头抗剪强度的关系。表 4-1 给出了几类钎料在钎焊温度下可获得最大接头强度的接头间隙的推荐值。表 4-1 中所给出的间隙值一般适合于预先放置钎料的情况。在这种情况下，接头要施加一定的压力使间隙

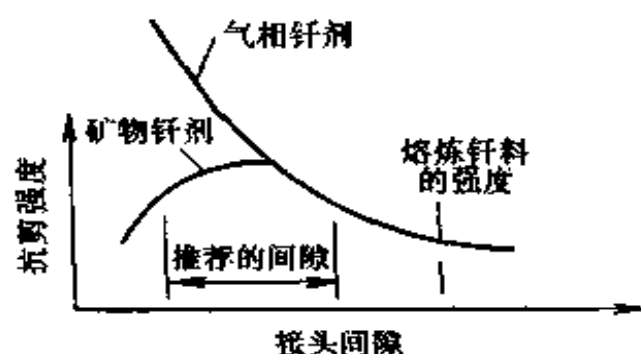


图 4-9 用银钎料钎焊低碳钢时抗剪强度与接头间隙的关系

在钎焊过程中有所减小。表 4-2 给出了不同钎料与母材组配时，钎焊温度下接头间隙的推荐值。

表 4-1 不同类别钎料在钎焊温度下接头间隙的推荐值

钎料类别	接头间隙/mm	备 注
AlSi 类	0.05~0.20	搭接长度小于 0.63mm
	0.20~0.25	搭接长度大于 0.63mm
CuP 类	0.025~0.13	无钎剂钎焊和无机钎剂钎焊
Ag 类	0.05~0.13	钎剂钎焊
	0.00~0.05	气相钎剂（气体保护钎焊）
Au 类	0.05~0.13	钎剂钎焊
	0.00~0.05	气相钎剂（气体保护钎焊）
Cu 类	0.00~0.05	气相钎剂（气体保护钎焊）
CuZn 类	0.05~0.13	钎剂钎焊
Mg 类	0.10~0.25	钎剂钎焊
Ni 类	0.05~0.13	一般应用（钎剂/气体保护钎焊）
	0.00~0.05	自由流动型，气体保护钎焊

图 4-10 给出了用纯银钎料钎焊直径为 12.7mm 圆钻杆所获得的抗剪强度与间隙的关系，其接头形式为对接，钎焊方法为感应钎焊，保护气体的体积分数为 $H_2 10\% - N_2 90\%$ 。图 4-11 给出了该钻杆对接接头抗拉强度的实验数据。由图可见，在实际制造的接头间隙条件

表 4-2 钎焊温度下不同母材与钎料组合的接头间隙推荐值

母材种类	钎料系统	钎焊间隙/mm	母材种类	钎料系统	钎焊间隙/mm
铜及铜合金	Cu-P 钎料	0.04~0.20	铝及铝合金	铝基钎料	0.15~0.25
	Ag-Cu 钎料	0.02~0.15		不锈钢	铜基钎料
	Cu-Si 钎料	0.01~0.20	锰基钎料		0.05~0.20
	Cu-Ge 钎料	0.01~0.20	金基钎料		0.03~0.25
钛及钛合金	铝基钎料	0.05~0.25	钼基钎料		0.05~0.20
	Cu-P 钎料	0.03~0.05	钴基钎料		0.02~0.15
	铜系钎料	0.03~0.05	镍基钎料		0.01~0.08
	Ag-Cu	0.02~0.10	高温合金	锰基钎料	0.03~0.2
	银系钎料	0.03~0.08		金基钎料	0.05~0.25
碳钢及低合金钢	铜基钎料	0.01~0.05		钼基钎料	0.03~0.20
	银基钎料	0.02~0.15		钴基钎料	0.02~0.15
	锰基钎料	0.05~0.20		镍基钎料	0.00~0.08
	镍基钎料	0.00~0.04			

下, 随着间隙的减小, 接头强度逐渐增大。但当间隙极小时, 接头强度立即下降。应当指出, 每一个个别设计的试样都会得到不同的“接头强度”值, 因此, 实验工作必须在最后的钎焊件上进行, 以便获得某一特定结构的承载能力。

在确定钎焊间隙时除了要考虑材料热膨胀系数差异的影响之外, 还要考虑母材与钎料之间的相互作用程度、钎剂、工件表面粗糙度和接头长度等因

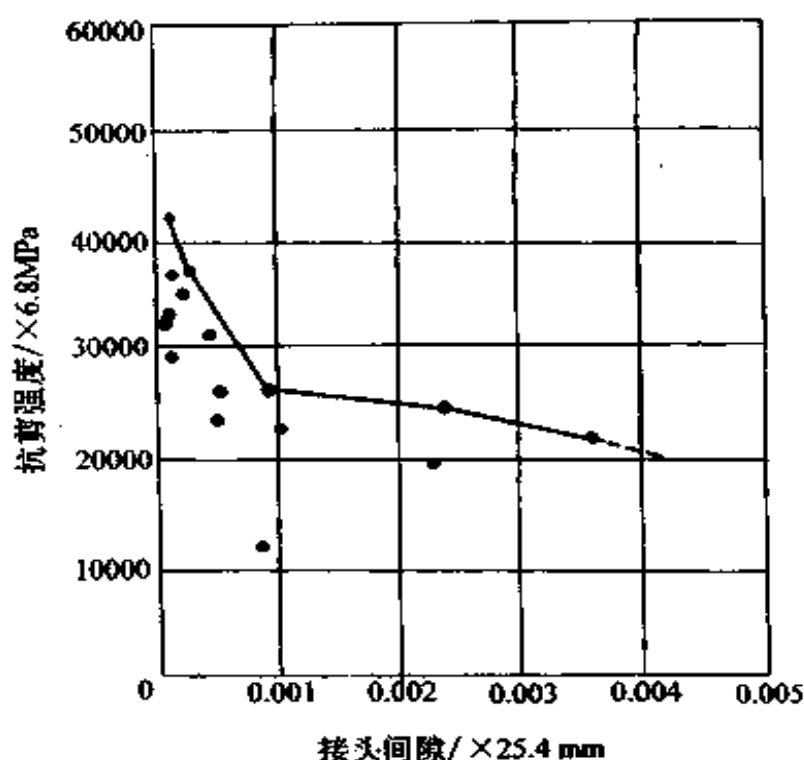


图 4-10 纯银钎焊钻杆对接接头的抗剪强度与接头间隙的关系

与钎料之间的相互作用程度、钎剂、工件表面粗糙度和接头长度等因

素的影响。

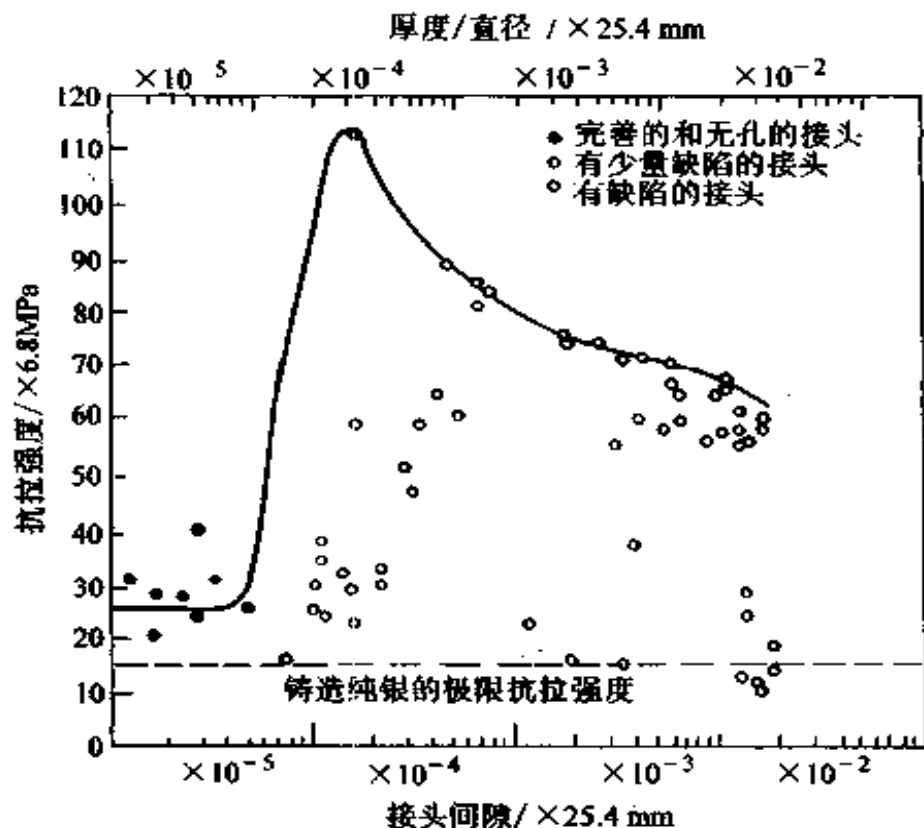


图 4-11 纯银钎焊钻杆对接接头的抗拉强度与接头间隙的关系

1. 母材与钎料之间相互作用对间隙确定的影响

一般来说，如果母材与钎料之间的相互作用程度较弱，钎焊间隙可以取得较小；而当相互作用较强时，间隙应取得较大。这是因为，当母材与钎料之间发生强烈的相互作用时，由于母材组分大量向液态钎料中溶解将造成钎料的熔点升高和流动性下降。此时钎料难以迅速填满间隙，易产生未钎透等缺陷。而增大间隙有助于改善这种不利的情况。例如：当采用铝基钎料钎焊铝合金时，由于钎料的液相线与母材的熔点比较接近，并且是与母材为同基的材料，因此其间的相互作用很强，因此，常常需要采用相对较大的间隙值。

2. 钎剂的影响

采用无机钎剂时，由于钎剂要先于钎料熔化并流入间隙完成去膜，而后钎料熔化并依靠毛细作用将钎剂排出间隙，因此，如果间隙

太小,会使钎剂牢固地夹持在间隙中,使液态钎料难以流入间隙;而间隙太大时,有可能使液态钎料沿钎缝边缘优先流动,造成明显的“大包围”现象,从而产生大量的夹渣缺陷并影响接头的承载能力。

使用气相钎剂时,一般要求间隙相对较小。如果间隙处于垂直位置,当间隙超过 0.08mm 时,钎料就可能从接头中流出。当不得不采用较大的间隙时,可以采用固-液相温度区间较宽的钎料并在低于其液相线的温度下进行钎焊,这样可以有效地避免钎料流失现象的发生。但在生产上不推荐使用这种方法,因为这种方法难以控制,容易造成接头承载能力下降。

3. 表面粗糙度对间隙确定的影响

对于毛细钎焊来说,如果母材表面非常光滑,将会使液态钎料的铺展填缝能力减弱,钎料可能难以在整个接头中流布,因此可能增加不致密性缺陷的比例,并因而影响接头的承载能力。为保证钎料流满接头间隙,特别是当间隙为零或紧配合时,接头的结合面应预先打磨,最好用与母材相匹配的清洁金属颗粒进行打磨,尽量不用非金属类物质以避免污染钎焊表面,造成接头强度下降。

4. 接头长度对间隙确定的影响

接头长度对确定间隙的大小也有比较大的影响,特别是当母材与钎料之间存在有明显的相互作用时更要注意这一点。当钎料进入间隙中时,在长钎缝中钎料可能会有足够的时间与母材发生相互作用,使钎料的熔点升高和流动性下降,造成未钎透缺陷。因此,在给定的钎焊条件下,接头越长,钎料填满间隙所需的时间越长,母材与钎料间的相互作用程度越大,间隙也就必须选得越大。这也是为什么要尽可能缩短接头长度的重要理由。这与取得接头最佳强度是一致的。

4.4 钎缝强度实验方法

4.4.1 钎缝的拉伸试验方法

1. 平板对接接头

按图 4-12 制备试样,钎焊前用氩弧点焊定位。钎料直接放在钎缝上;按要求钎焊。钎焊后将试样按图 4-12b) 进行加工,然后进行

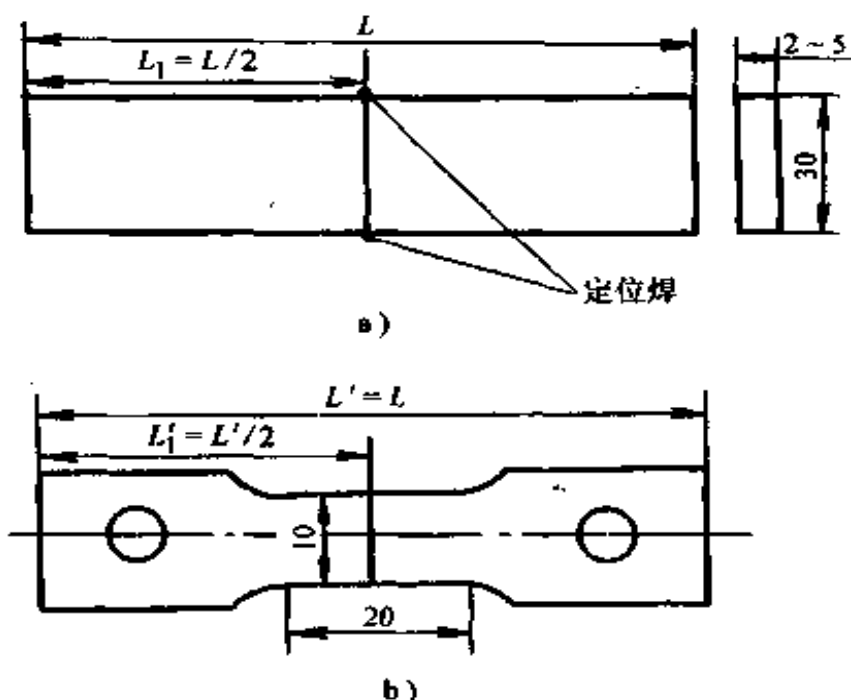


图 4-12 平板对接钎焊接头拉伸试样

a) 钎焊前 b) 钎焊后经加工的试样

拉伸试验。接头的抗拉强度按式(4-4)计算：

$$\sigma_b = F/\delta b = F/S \quad (4-4)$$

式中 F ——总拉断力 (kN)；

δ ——试样厚度 (mm)；

b ——试样宽度 (mm)；

S ——钎焊面积 (mm^2)。

2. 杆件对接接头

按图 4-13 制备试样，用箔状、粘带或膏状钎料直接夹在对接缝中。如果用丝状钎料，则可以在工件 1 的端孔内壁加工钎料放置槽，然后将工件 2 插入工件 1 的端孔并用氩弧焊定位，要确保工件 1 的端面与工件 2 的端面平行。钎焊后按图 4-13b) 加工成拉伸试件，进行拉伸试验。接头的抗拉强度按式(4-5)计算：

$$\sigma_b = F/\pi(r')^2 = F/S \quad (4-5)$$

式中 F ——总拉断力 (kN)；

r' ——实测的钎焊圆杆半径 (mm)；

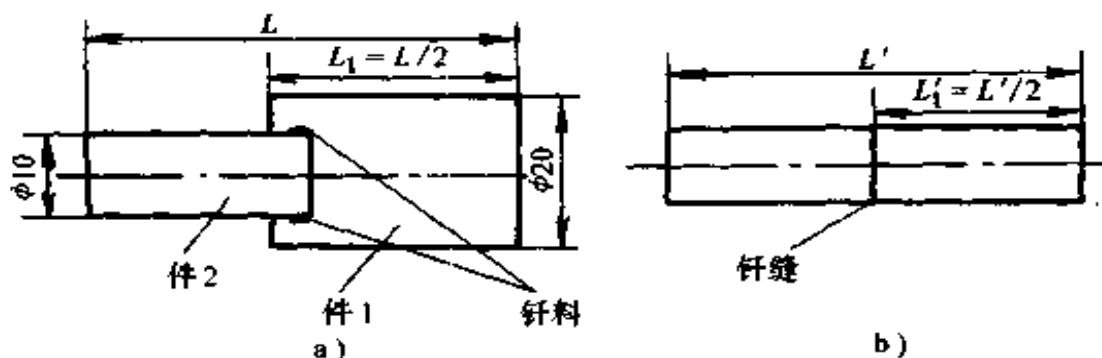


图 4-13 杆件对接钎焊接头拉伸试样

a) 钎焊前 b) 钎焊后经加工的试样

S——钎焊面积 (mm^2)。

4.4.2 钎缝的剪切实验方法

1. 平板搭接接头

常用的接头形式有单板搭接、双搭接和中心搭接 (见图 4-14a、b、c)。钎焊前定位或用夹具定位。钎料选用箔、带时直接夹在搭接缝中, 用丝、粉或膏时, 要紧贴接缝放置。钎焊后将定位焊点铣掉。板宽 W 可根据板厚选定, 当板厚为 $2 \sim 5\text{mm}$, 搭接长度 X 为 $2 \sim 5\text{mm}$ 时, W 取 $25 \sim 30\text{mm}$ 为宜。接头的抗剪强度可按式(4-6)计算:

$$\tau = F/XW = F/S \quad (4-6)$$

式中 F ——总拉断力 (kN); X ——搭接长度 (mm); W ——试样宽度 (mm); S ——钎焊面积 (mm^2)。

应当指出, 单板搭接试件在拉剪试验时, 由于载荷偏心, 因而存在一附加弯矩, 而非纯剪切。此时的强度值并不是理想状态下的抗剪强度。但这种形式的试件与实际情况最为接近, 故被经常采用并将其结果近似看成接头的抗剪强度。双搭接和中心搭接可以排除附加弯矩的影响, 但试件的制作加工复杂, 并与实际接头的差距较大。

2. 管件搭接接头

按图 4-15 制备试样。搭接长度选取与管壁厚一致。钎料根据形状按要求放置, 钎焊前用毛刺定位, 在炉中水平放置并将试件垫平。

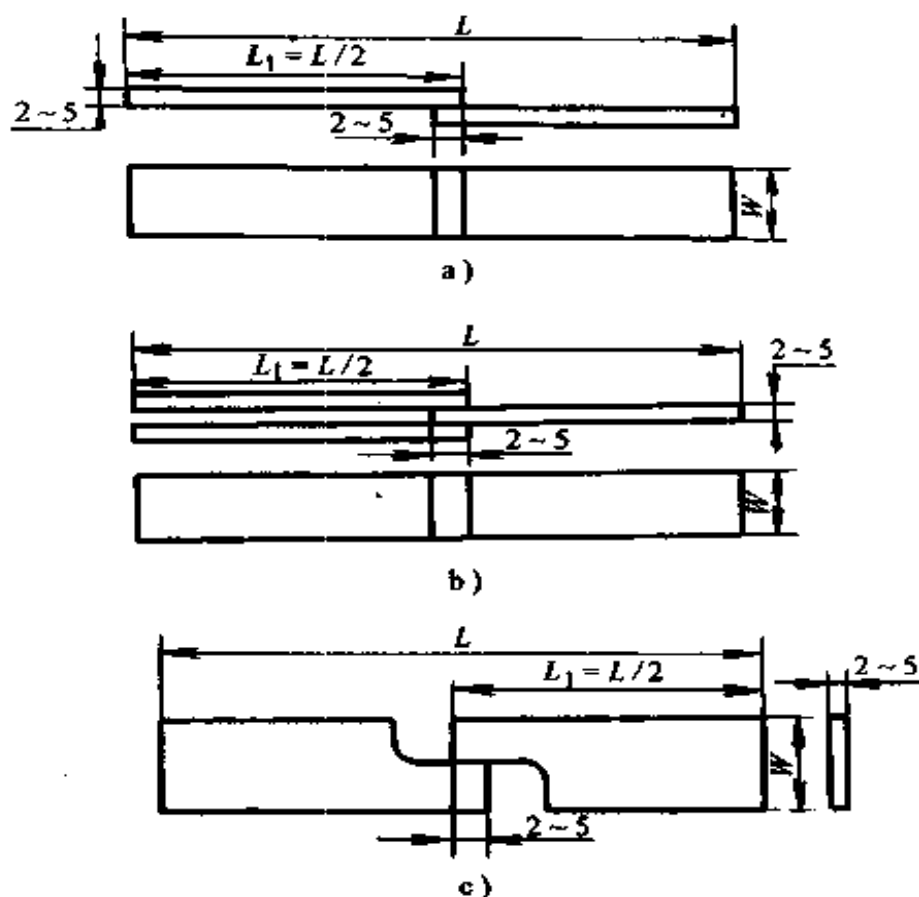


图 4-14 平板搭接钎焊接头剪切试样

a) 单搭接 b) 双搭接 c) 中心搭接

钎焊后直接进行拉伸。

接头抗剪强度按式 (4-7) 计算:

$$\tau = P/D_1\pi X = P/S \quad (4-7)$$

式中 P ——总拉断力

(kN);

X ——搭接长度

(mm);

D_1 ——内管外径 (mm);

S ——钎焊面积 (mm^2)。

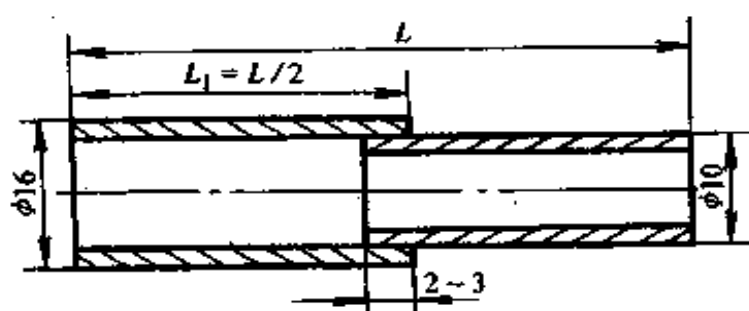


图 4-15 管件搭接钎焊接头剪切试样

第5章 钎焊工艺

为顺利完成钎焊过程并获得优质的钎焊接头，必须根据母材的性质和接头的设计要求，选择合适的钎焊方法、钎料和钎剂，并制定合适的钎焊工艺。从广义上讲，钎焊工艺是钎焊生产中各道工序的统称及其技术规定，主要涉及钎焊前零件表面的制备、零件的装配和定位、钎料的放置、钎焊工艺参数的确定和钎焊后的处理等内容。

5.1 钎焊前零件表面的制备

待焊零件的表面在钎焊前的加工和存放过程中，不可避免地覆盖着氧化物、油脂和灰尘等。由于这些表面覆盖物会妨碍液态钎料在母材上的铺展和填缝，因而在钎焊前必须将它们彻底清除。此外，在某些情况下还要对零件的待焊表面镀覆金属或对零件的非焊表面涂覆阻流剂，以确保获得优质的钎焊接头。

应当指出，零件经过脱脂、去除表面氧化物及其它处理等表面制备后，在运送、装配和定位等过程中必须谨慎操作，防止再次弄脏，并尽量缩短存放时间，从速完成钎焊。

5.1.1 清除油脂

清除零件表面油脂的方法主要包括有机溶剂脱脂、碱液脱脂、电解除脂和超声波脱脂等。零件经过脱脂后，应再用清水洗净，然后予以干燥。

1. 有机溶剂脱脂

常用的有机溶剂有乙醇、丙酮、汽油、四氯化碳、三氯乙烯、二氯乙烷和三氯乙烷等。具体脱脂时，可将零件直接放入液态的有机溶剂中进行浸洗，也可置于有机溶剂的蒸气中进行清洗。一般来讲，液态浸洗常以汽油为溶剂，用于小件和油污严重的情况，适合于单件和小批生产；蒸气清洗常以三氯乙烯为溶剂，用于大件和油污较轻的情

况，适合于大批生产。当然，将浸洗与蒸气清洗结合起来使用，效果会更好。

2. 碱液脱脂

常用的碱液列于表 5-1 中。在碱液中清洗脱脂，具有过程简单、成本低及效果好的优点。其缺点是溶液要求加热、用后难以再生以及对某些金属具有腐蚀作用。

表 5-1 碱液脱脂常用的碱液成分及用途

碱液成分 / (g/L)	工艺参数	适用母材
(1)氢氧化钠 30~50 (2)碳酸钠 20~30 (3)磷酸钠 50~70 (4)硅酸钠 10~15	溶液温度 80~100℃ 浸洗时间 20~40min	钢
(1)氢氧化钠 10~15 (2)碳酸钠 20~50 (3)磷酸钠 50~70 (4)硅酸钠 5~10	溶液温度 70~90℃ 浸洗时间 1~30min	铜及铜合金
(1)碳酸钠 40~70 (2)磷酸钠 10~20 (3)硅酸钠 20~30	溶液温度 60~70℃ 浸洗时间 3~5min	铝及铝合金
(1)氢氧化钠 10~20 (2)碳酸钠 25~30 (3)硅酸钠 3~5	溶液温度 60~70℃ 浸洗时间 3~5min	镍及镍合金

3. 电解脱脂

常用的电解液列于表 5-2 中。与碱液脱脂相比，电解脱脂加速了脱脂过程并减少了溶液的消耗。但对结构复杂的零件，电解脱脂不够有效。电解脱脂采用直流电，零件作为电源的一极放入电解槽中。按零件所连极性的不同，电解脱脂可分为阴极脱脂、阳极脱脂和混合脱脂。与阳极脱脂相比，阴极脱脂的速度要快得多。但对碳钢零件不宜采用阴极脱脂，以防止渗氢而降低塑性。

表 5-2 电解脱脂常用的电解液的成分及用途

电解液成分 / (g/L)	工艺参数	适用母材
(1)氢氧化钠 70~80 (2)碳酸钠 20~25 (3)磷酸钠 15~20 (4)硅酸钠 3~5	60 ~ 90℃, 2 ~ 10min, 20 ~ 100mA/cm ² , 6~12V	钢
(1)氢氧化钠 35~40 (2)碳酸钠 20~25 (3)磷酸钠 20~25 (4)硅酸钠 3~5		铜及铜合金
1)碳酸钠 20 (2)磷酸钠 20		铝及铝合金

4. 超声波脱脂

超声波脱脂是在专用的槽子里进行的,槽液成分可以是加有活性剂的水,也可以是碱液(如磷酸钠、氢氧化钠和碳酸钠等溶液)或有机溶剂。相应的脱脂温度分别为 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$,不高于 60°C 并低于其沸点。超声波脱脂特别适合于形状复杂而数量很大的小零件,也是清除落入零件表面狭小缝隙中不能溶解的污物的唯一可行的方法,具有操作简便、过程迅速和脱脂效率高的特点。

5.1.2 去除氧化膜

去除零件表面氧化膜的方法主要包括机械去膜、化学去膜、超声波去膜和电化学去膜等。其中每种方法都有自身的特点,选择时应综合考虑。同时,对于用化学去膜、电化学去膜及超声波去膜的某些零件,在去膜后还必须对零件表面进行光泽处理或对零件表面上的去膜液进行中和处理,随后在冷水或热水中洗净并加以干燥。

1. 机械去膜

机械去膜是去除表面氧化物和锈蚀的最简单的方法。其中,用锉刀、刮刀和砂布打磨,生产效率低,只适于单件生产;用金属丝刷、金属丝轮和砂轮去膜,效率较高,适于小批生产;用喷砂或喷丸去膜,效率最高,适于形状复杂或表面大的零件。喷砂后的零件,还应作去除砂粒的补充处理。用砂布打磨后的零件表面,也须用浸有有机溶剂的布块擦净砂粒。

机械去膜主要用于钢、铜及铜合金、镍及镍合金等材料。在机械清除氧化物的同时,宜使零件表面适当粗糙化,以促进钎料的铺展,但也要防止表面过于粗糙。

2. 化学去膜

化学去膜是以酸和碱能够溶解某些氧化物为基础的。生产中常用的有硫酸、盐酸、硝酸、氢氟酸及其它们的混合物的水溶液和氢氧化钠的水溶液等,适于不同材料的化学去膜液列于表 5-3 中。化学去膜是批量生产中主要采用的方法,不但生产效率高,去除效果好,而且质量易于控制。但其工艺过程较复杂,去膜时间较长,操作不当时可能造成过浸蚀。

表 5-3 常用化学去膜液的成分及用途

溶 液 成 分	工 艺 参 数	适用母材
φ (硫酸)10%, 缓蚀剂微量, 水余量	40~60℃, 10~20min	碳钢及低合金钢
φ (盐酸)10%, 缓蚀剂微量, 水余量	40~60℃, 10~20min	碳钢及低合金钢
φ (硫酸)10%, φ (盐酸)10%, 缓蚀剂微量, 水余量	室温, 2~10min	碳钢及低合金钢
φ (硫酸)(硫酸的质量分数 94%~96%)16%, φ (盐酸)(盐酸的质量分数 35%~38%)15%, φ (硝酸)(硝酸的质量分数 65%~68%)5%, 水余量	100℃, 30s	不锈钢 (厚件) ^①
φ (硫酸)6%, φ (硝酸)10%, 氢氟酸 50g/L, 水余量	室温, 10min	不锈钢(薄件)
φ (硝酸)15%, 氟化钠 50g/L, 水余量	室温, 5~10min	不锈钢(薄件)
氢氧化钠 100g/L, 水余量	20~40℃, 2~4min	铝及铝合金 ^②
氢氧化钠 20~35g/L, 碳酸钠 20~30g/L, 水余量	40~60℃, 2min	铝及铝合金 ^②
硫酸 30g/L, 氧化铬 150g/L, 水余量	50~60℃, 5~20min	铝及铝合金 ^②
φ (硫酸)5~10%, 水余量	50~80℃	铜及铜合金
φ (硫酸)10%, 硫酸亚铁 10%, 水余量	50~80℃	铜及铜合金
φ (硫酸)12.5%, 硫酸钠 1~3%, 水余量	20~77℃	铜及铜合金
硫酸(密度 1.87)1500mL, 硝酸(密度 1.36)2250mL, 氯化钠 30g, 水 1000mL	21~38℃, 5~20s	镍及镍合金(薄层氧化膜) ^③
盐酸(密度 1.16)500mL, 氯化铜 30g, 水 1000mL	82℃, 60~120min	镍及镍合金(厚层氧化膜) ^③
硝酸(密度 1.36)330mL, 氢氟酸(氢氟酸的质量分数 49%) 52mL, 水 1000mL	49~60℃, 15~90min	镍及镍合金(厚层氧化膜) ^③
硝酸 20~30mL, 盐酸 30~40mL, 水 1000mL	室温, 5~10min	钛及钛合金
φ (硝酸)80%, φ (氢氟酸)20%	室温, 30s	钛及钛合金
φ (盐酸)15%, φ (氢氟酸)5%, 水余量	室温, 3~5min	钛及钛合金

① 去膜后用体积分数为 15% 的硝酸水溶液在 100℃ 作 10s 左右的光泽处理。

② 去膜后用体积分数为 15% 的硝酸水溶液作 2~5min 的光泽处理。

③ 去膜后用体积分数为 1~2% 的氨水作中和处理。

3. 超声波去膜

超声波去膜是利用超声波在液体介质中传播时产生的空化作用来实现的。进行去膜时，零件要全部浸渍在液体介质中，而且不要重叠放置。所采用的液体介质可以是有机溶剂（如丙酮、酒精、三氯乙烷和汽油等），也可以是化学去膜液。显然，与单纯的化学去膜相比，采用化学去膜液的超声波去膜更为迅速而有效。

4. 电化学去膜

电化学去膜一般在室温下进行，零件在电解槽中接阴极或阳极，去膜的速度由电流密度和去膜时间来控制。电化学去膜采用的电解液常为酸和盐的混合液（见表 5-4），本身兼有化学去膜的作用。与单纯的化学去膜相比，电化学去膜具有去膜效果好和所需时间短的特点，适合于批量生产。

表 5-4 某些电化学去膜液的成分及用途

溶 液 成 分	工 艺 参 数	适用母材
$\varphi(\text{水})3\%$, $\varphi(\text{正磷酸})65\%$, $\varphi(\text{硫酸})15\%$, $\varphi(\text{铬酐})5\%$, $\varphi(\text{甘油})12\%$	室温, 15~30min, 60~70mA/cm ² , 4~6V	不锈钢
水 1L, 硫酸 15g, 硫酸铁 250g, 氯化钠 40g	室温, 15~30min, 50~100mA/cm ²	有氧化皮的碳钢 (零件接阳极)
水 1L, 盐酸 10g, 氯化钠 50g, 氯化铁 150g	20~50℃, 10~15min, 50~100mA/cm ²	有薄氧化皮的碳钢 (零件接阳极)
水 1L, 硫酸 120g		碳钢 (零件接阴极)

5.1.3 镀覆金属

钎焊前对零件表面镀覆金属是一项特殊的工艺措施，一般是为了简化钎焊工艺或改善钎焊质量的要求，但在某些情况下却是实现零件钎焊连接的根本途径。在零件表面镀覆金属可用电镀、化学镀、热浸和压敷等方法，一些零件表面的镀覆金属列于表 5-5 中。从零件表面的镀覆金属层的用途来看，镀覆层可分三类，即工艺镀层、防护镀层和钎料镀层。

1. 工艺镀层

工艺镀层主要用以改善或简化钎焊工艺条件，可用于较易氧化的

母材（见表 5-5 中的 1~2 项），保护它不被氧化，使之能在较低的工艺条件下获得质量良好的接头；也可用于较难或不能为钎料润湿的母材，如异种金属钎焊中润湿性差的一方以及非金属材料等（见表 5-5 中的 3~4 项），以改善钎料对它们的润湿，保证钎焊过程的顺利进行。零件上的工艺镀层在钎焊过程中应能全部为钎料溶解，以获得良好的接头强度。

表 5-5 表面镀覆的金属及其用途

序号	镀覆金属	适用母材	镀覆方法	用 途
1	铜、镍	不锈钢	电镀、化学镀	防止母材氧化,改善钎料润湿性,铜可用作钎料
2	铜、银	铍	电镀、化学镀	防止母材氧化,改善钎料润湿性
3	铜、镍	钼	电镀、化学镀	改善钎料润湿性,提高结合强度
4	铜	石墨	电 镀	使钎料易于润湿
5	镍	可伐合金	电镀、化学镀	防止母材开裂
6	铜	黄 铜	电镀、化学镀	防止锌挥发
7	钼、铌	钛	电 镀	防止生成脆性层
8	银	铜	电镀、化学镀	用作钎料
9	铝硅合金	铝及铝合金	压 敷	用作钎料

2. 防护镀层

防护镀层的作用在于抑制钎焊过程中可能发生的某些有害反应，例如在钎料作用下母材的自裂、钎料与母材反应生成脆性相以及母材成分和性能的变化等（见表 5-5 中的 5~7 项）。为了起到防护作用，要求镀层能为液态钎料很好润湿而不被溶解。

3. 钎料镀层

钎料镀层的直接用途是作钎料（见表 5-5 中 8~9 项），但其更重要的功能是减少钎缝缺陷和提高致密性，以保证高度的气密；或在大面积、多钎缝结构的生产中简化工艺，保证钎焊质量并提高生产率。钎料镀层一般是全成分的钎料，有时也可能是钎料的一个组元，靠加热过程中与母材反应形成钎料。

5.1.4 涂覆阻流剂

在零件的非焊表面上涂覆阻流剂的目的是限制液态钎料的随意流

动，防止钎料的流失和形成无益的连接。这种方法是控制钎料流动区域的直接而有效的方法，广泛地应用在真空或气体保护的钎焊中。几种常用的阻流剂列于表 5-6 中，它们具有热稳定性好、化学稳定性优良、涂覆性能也好和对零件无腐蚀作用的特点。

阻流剂的基本成分可以是一些对钎焊无害的非常稳定的氧化物，诸如氧化钛、氧化镁和某些稀土金属的氧化物等，也可以是不能为钎料所润湿的非金属物质，如石墨和白土等。一般通过溶剂和粘结剂调成糊状或液体，在钎焊前预先涂在零件待焊表面附近的非焊表面上，依靠不被钎料润湿来阻止钎料的流动。值得注意的是，取得良好的阻流效果并不需要使用大量的阻流剂，少量使用还会减轻焊后清洗的困难。

表 5-6 几种常用阻流剂的成分和使用温度

序号	基本成分	粘结剂	溶剂	使用温度/℃
1	氧化钛、氧化硅	有机硅树脂	甲苯	600~1200
2	氧化铝	水玻璃	酒精	300~1100
3	陶土、膨润土	醇溶性树脂	酒精	300~1000
4	氧化铬、石墨	—	水	800~1200

5.2 零件的装配和定位

正确而可靠的装配和定位，是顺利实现钎焊并获得符合技术要求的接头和焊件的重要保证。经过表面制备的零件，在实施钎焊前必须先按图样进行装配，即将分散的零件组成一个整体，使各零件彼此间保持正确的相互位置，获得设计所要求的钎缝间隙和位置，并保证焊件的总体尺寸。为了防止在钎焊施工中零件的错动，装配时还要对零件进行定位，即采取适当的方法把零件固定在装配好的位置上。一般而言，定位方法可分为自身定位和夹具定位两大类。至于选用何种定位方法，则主要取决于焊件的结构、技术要求、钎焊方法及生产类型等。

5.2.1 自身定位

自身定位是一种较简易的定位方法，适合于尺寸小、结构简单、

技术要求较低及生产量小的焊件。自身定位还可细分为重力定位、紧配合定位、突起部定位、点固焊定位、销钉定位和弹簧夹定位等多种方法，如图 5-1 所示。

重力定位是利用零件本身的重力来实现定位的方法，简单易行，适合于平面接头的零件。紧配合定位是利用零件间的尺寸公差来实现的，简单可靠，但不能保证钎缝间隙，只适用于铜钎料钎焊钢件，一般不宜采用。突起部定位是靠零件上制出的毛刺、滚花、翻边、扩口、旋压、墩粗、收口和咬边等来定位的，简便但不可靠，有时难以保证均匀的间隙，只适用于一般的焊件。定位焊定位是利用点焊机或氩弧焊机以间断式焊点来定位的，既简单迅速，又牢固可靠，适合于小批量生产，但不宜用于要求气密的焊件。销钉定位是利用销子、螺钉或铆钉进行定位的，定位稳定可靠，但定位过程麻烦。弹簧夹定位是利用弹簧的夹紧作用实现的，定位简便迅速，但因夹紧力或工件变形的限制而使定位不够可靠。

5.2.2 夹具定位

对于结构复杂、生产量大的焊件，一般采用专用的夹具来定位。夹具定位具有定位精确可靠、生产效率高的优点，但夹具本身成本较高。与其它夹具相比，钎焊夹具的使用条件更为恶劣，不但工作温度高，而且有时还处在强腐蚀性气体或液体介质中。因此，在设计、选择和使用钎焊夹具时，应满足如下几个方面的要求：

- 1) 夹具材料应有良好的高温强度、热疲劳强度、抗氧化性和抗腐蚀性；
- 2) 夹具材料的导热性要好、热容量要小，并与零件材料有相近的热膨胀系数；
- 3) 夹具材料在高温下不应与零件材料发生反应，也不为钎料所润湿；
- 4) 感应钎焊用的夹具材料应是非磁性的；
- 5) 夹具应具有足够的刚度，且结构应尽量简单；
- 6) 夹具中应避免使用螺栓或螺钉；
- 7) 夹具在投入使用前要经受模拟的钎焊热循环。

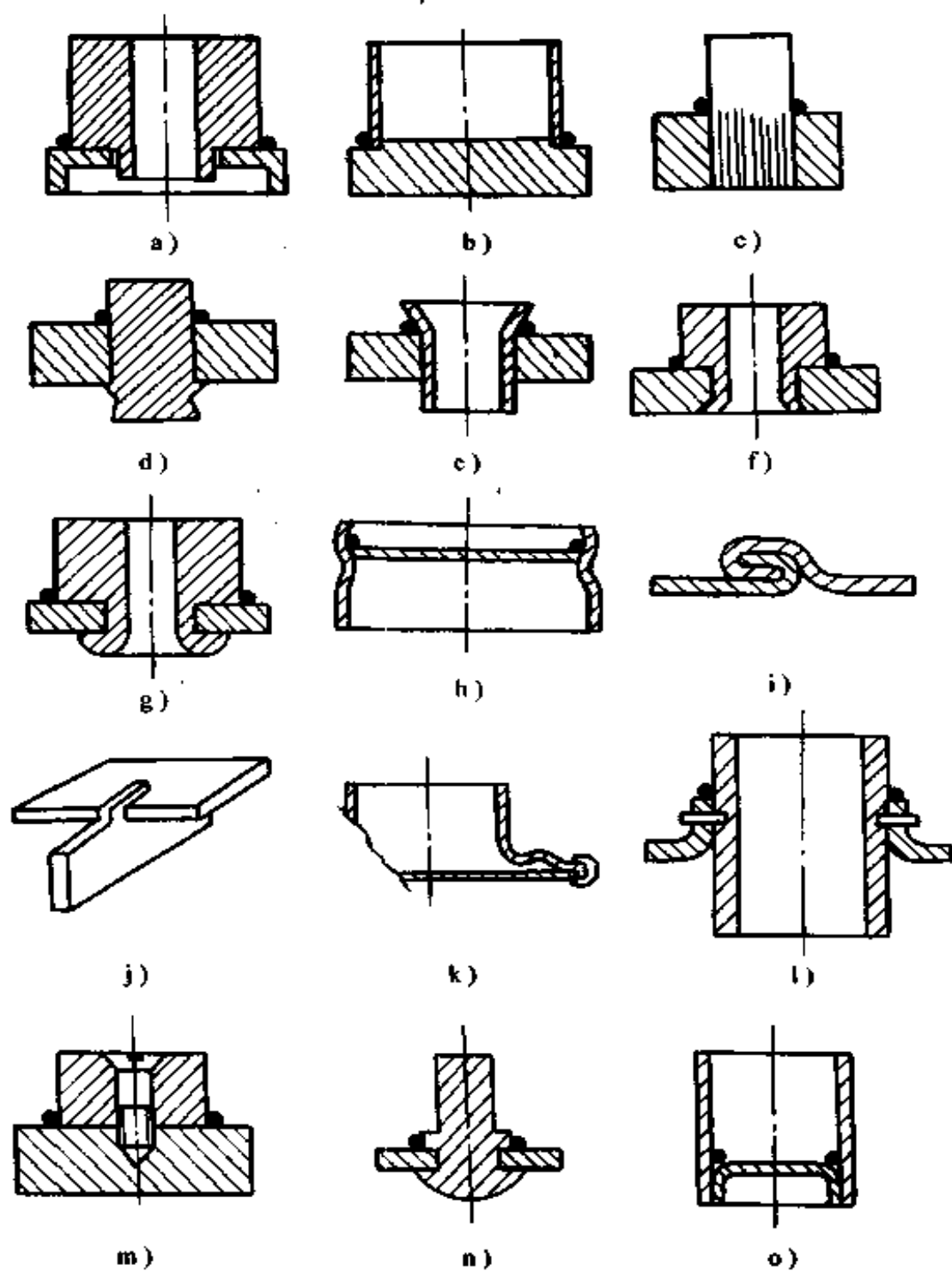


图 5-1 典型零件的自身定位方法

a)重力 b)紧配合 c)滚花 d)翻边 e)扩口 f)旋压 g)模锻 h)收口
i)咬边 j)开槽弯边 k)夹紧 l)销子 m)螺钉 n)铆接 o)定位焊

5.3 钎料的放置

用于填缝的钎料，既可以在钎焊过程中送给，也可以在钎焊前预先放置。对于低生产率的钎焊方法，如烙铁钎焊和火焰钎焊，一般采用手工送给方式，使用棒状、条状和管状的钎料。对于高生产率的钎焊方法，如炉中钎焊方法等，广泛采用的是预先放置方式，使用丝状、条状、箔片状、粉末状及膏状等形态的钎料。

5.3.1 钎料的放置原则

钎料的放置方式，主要取决于所采用的钎焊方法、焊件的结构、生产类型及钎料的形态等。各种放置方式都有自身的特点和使用范围，选择时应根据具体情况而定。无论采用何种方式放置钎料，都应遵循下述各项原则：

- 1) 尽可能利用钎料的重力作用和钎缝间隙的毛细作用来促进钎料的填缝；
- 2) 保证钎料填缝时间隙内的钎剂和气体有排出的通路；
- 3) 钎料要放在不易润湿或加热中温度较低的零件上；
- 4) 钎料安放要牢靠，以防钎焊过程中因意外干扰而错位；
- 5) 应尽量使钎料的填缝路程最短；
- 6) 防止对母材形成明显的溶蚀或钎料的局部堆积，尤其对薄件应特别注意。

5.3.2 钎料的放置方式

钎料在焊件上预先放置的方式有明置和暗置两种。明置方式是将钎料安放在钎缝间隙的外缘，因而简便易行，但钎料易向间隙外的零件表面流失，填缝路程较长，易受外界干扰而错位，不利于保证稳定的钎焊质量。暗置方式是将钎料安放在间隙内特制的钎料槽中，因而需要对零件作预先加工，切出钎料槽，这不仅增加了工作量，而且降低了零件的承载能力。一般而言，对于薄件或简单的钎焊面积不大的接头，宜采用明置方式；对于钎焊面积大或结构复杂的接头，宜采用暗置方式，并将钎料槽开在较厚的零件上。

图 5-2 是丝状钎料放置的实例，其中图 a—f 是先将零件装配好，

然后把预成形的钎料环安放在零件的台阶上，属于钎料的明置方式；而图 g 和图 h 是先将钎料环放入钎料槽中后，再将零件组装起来，属于钎料的暗置方式。箔片状钎料，应以与钎缝相同的形状，直接放置在两被钎焊的零件之间，并对零件施加一定的压力，以保证填满间隙。粉末状钎料，由于放置时容易散落，应以适当的粘结剂调成膏状使用。膏状钎料可直接涂在零件的钎焊位置，也可用注射器施加到接头上。

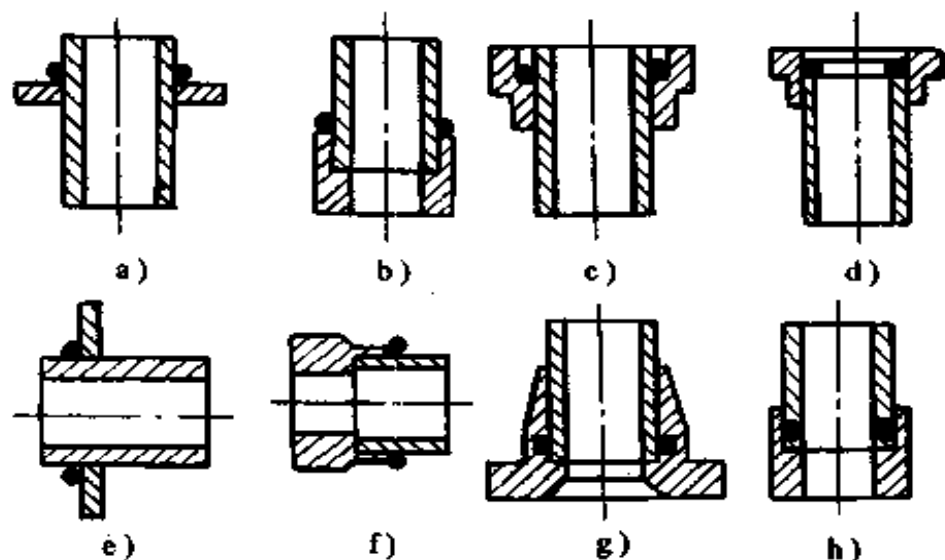


图 5-2 丝状钎料的放置形式

5.4 钎焊工艺参数的确定

钎焊操作过程是指从加热开始，到某一温度并停留，最后冷却形成接头的整个过程。在这个过程中，所涉及到的最主要的工艺参数就是钎焊温度和保温时间，它们直接影响钎料填缝和钎料与母材的相互作用，从而决定了接头质量的高低。此外，加热速度和冷却速度也是较重要的工艺参数，它们对接头的质量也有不可忽视的影响。

5.4.1 钎焊温度

钎焊温度是钎焊过程最主要的工艺参数之一。在钎焊温度下，除了钎料熔化、填缝并与母材相互作用形成接头外，对某些钎焊方法（如炉中钎焊等），还可完成钎焊后的热处理工序（如固溶处理等），

以提高钎焊接头的性能。

确定钎焊温度的主要依据是所选用钎料的熔点。一般而言,钎焊温度应适当地高于钎料的熔点,通常定为比钎料的液相线温度高 $25\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。这种确定方法,一方面利用了较高的温度来减小液态钎料的表面张力,改善润湿和填缝,并使钎料与母材能充分相互作用,从而提高接头的强度;另一方面避免了过高的温度可能引起钎料中低沸点组元的蒸发、母材晶粒的长大及母材与钎料相互作用过分而导致的溶蚀、脆性化合物生成和晶间渗入等,从而避免了接头强度的下降。

但应指出,不同的钎料,需要高出钎料本身熔点的温度范围是不同的,有时甚至低于钎料本身的熔点。对于与母材相互作用强的钎料,由于填缝过程中其成分会发生很大变化而形成了新的合金,这时钎焊温度的确定应以钎缝中形成的新合金的熔点为依据;对于结晶温度区间宽的钎料,由于在固相线温度以上已有液相存在并具有一定的流动性,因而选定的钎焊温度可以等于或低于钎料本身的液相线温度;对于接触反应钎焊所用的纯金属钎料,由于其熔点远远高于反应生成物的熔点,因而选用的钎焊温度只要稍高于钎料-母材二元系的共晶温度即可。

此外,对于某些钎焊方法(如炉中钎焊等),确定钎焊温度时还应考虑到材料热处理规范的要求,以使钎焊和热处理工序能在同一加热冷却循环中完成。这样不但节省了工时,而且还可避免焊后热处理可能引起的不良后果。

5.4.2 保温时间

保温时间与钎焊温度一样,也是钎焊过程的最主要参数之一。一定的保温时间是钎料同母材相互扩散、形成牢固结合所必需的,但过长的保温时间同样会导致某些过程的过分发展而走向反面。

确定保温时间的主要依据是钎料与母材相互作用的特性。当钎料与母材的相互作用具有强烈溶解、生成脆性相及引起晶间渗入等不利倾向时,应尽量缩短钎焊的保温时间;相反,如果通过二者的相互作用能消除钎缝中脆性相或低熔组织时,则应适当延长钎焊的保温时间。

确定保温时间还应考虑到焊件尺寸和钎缝间隙等因素。大而厚的

焊件比小而薄的焊件的保温时间要长，以保证焊件受热均匀；大间隙的钎缝比小间隙的钎缝的保温时间要长，以保证钎料与母材能充分地相互作用。

应当指出，对钎焊温度和保温时间不能孤立地进行确定。钎焊温度和保温时间之间存在着一定的互补关系，可以在一定的范围内按相反的方向变化。具体选择时，还应通过试验确定。

5.4.3 加热速度和冷却速度

加热速度对钎焊接头的质量也有一定的影响。加热速度过快会使焊件温度分布不均而产生内应力和变形，加热速度过慢又会促进诸如母材晶粒的长大、钎料中低沸点组元的蒸发以及钎剂的分解等有害过程的发生。因此，在保证均匀加热的前提下，应尽量缩短加热时间亦即提高加热速度。具体确定加热速度时，必须结合焊件尺寸、所焊母材和所用钎料的特性等因素加以综合考虑。对于厚大及导热性差的焊件，加热速度不宜太快；在母材活性较强、钎料含有易挥发组元以及母材与钎料、钎剂之间存在有害作用时，应尽量提高加热速度。

焊件的冷却虽是在钎焊保温结束后进行的，但冷却的速度对接头的质量也有影响。冷却速度过慢，可能引起母材的晶粒长大、强化相析出或残余奥氏体出现；加快冷却速度，有利于细化钎缝组织并减小枝晶偏析，从而提高接头的强度；但冷却速度过高，可能使焊件因形成过大的内应力而产生裂纹，也可能因钎缝迅速凝固使气体来不及逸出而形成气孔。因此，具体确定冷却速度时，必须结合焊件尺寸、母材种类和钎料特性等因素加以综合考虑。

5.5 钎焊后的处理

经过钎焊后的零件，在投入使用之前还必须根据设计指标及其它要求再作相应的处理。这些处理主要包括钎剂残渣的清除、阻流剂的清除及钎焊后的热处理等。

5.5.1 钎剂残渣的清除

对使用钎剂的钎焊方法来说，除使用气体钎剂外，大多数钎剂残渣对钎接头都有腐蚀作用，也会妨碍对钎缝质量的检查，钎焊后必

须将其清除干净。清除的原理应当是，将易溶于水的残渣使其溶于水中而去除；不易溶于水的残渣应通过机械破碎或化学溶解的方法加以去除。由于不同种类的钎剂具有不同的组成和性质，因而残渣清除的方法也不相同。

1. 软钎剂残渣的清除

在有机软钎剂中，水溶性有机软钎剂能溶于水，可用热水洗涤去除，但若由凡士林调制而成的膏状钎剂，则可用有机溶剂去除；活性松香钎剂的残渣不溶于水，可用异丙醇、酒精、汽油和三氯乙烯等有机溶剂去除。

在无机软钎剂中，无机酸类软钎剂能溶于水，可用热水洗涤去除；无机盐类软钎剂（含有氯化锌）的作用产物不溶于水，可先用体积分数为 2% 的盐酸溶液洗涤，再用体积分数为 10% 的氢氧化钠水溶液中和处理，最后用热水和冷水洗净。若由凡士林调制的含氯化锌的膏状钎剂，应先用有机溶剂清除残留的油脂，再用上述方法洗涤。

2. 硬钎剂残渣的清除

硼砂-硼酸钎剂的残渣呈玻璃状粘在接头表面，很难去除，一般采用机械方法（如喷砂等）击去。较好的方法是将钎焊完的工件在热态下放入水中，使钎剂残渣开裂而去除，但这种方法不适用于对热冲击敏感的钎焊接头。此外，还可将工件放在温度为 70~90℃、质量分数为 2%~3% 的重铬酸钾溶液中长时间浸洗。

含氟化物的硬钎剂的残渣也较难去除。钎剂中含氟化钙时，残渣可先在沸水中洗涤 10~15min，然后在温度为 120~140℃、成分为 300~500g/L 的氢氧化钠和 50~80g/L 的氟化钠的水溶液中长时间浸煮；钎剂中含较多氟硼酸钾或氟化钾时，不会形成玻璃状残渣，可用水煮或在体积分数为 10% 的柠檬酸热水中浸泡去除。

3. 铝用钎剂残渣的清除

铝用软钎剂（包括铝用有机钎剂和铝用反应钎剂）的残渣可用有机溶剂（如甲醇等）加以清除。

铝用硬钎剂尤其是氟化物钎剂，其残渣对接头具有很强的腐蚀作用，钎焊后必须清除干净。如有可能，可将热态工件放入冷水中，借

助残渣急冷收缩和水分子气化喷爆作用，使钎剂残渣开裂并脱落。但对热冲击敏感而易产生变形或裂纹的工件，应慎重使用。

对于氟化物基铝用硬钎剂，其残渣的清除可按下述方法进行：先在 60~80℃ 的热水中浸泡 10min，用毛刷仔细清洗钎缝上的残渣，而后用冷水清洗；再在体积分数为 15% 的硝酸水溶液中浸泡约 30min，最后用冷水冲洗干净。

对于由氟化物组成的无腐蚀性铝用硬钎剂，其残渣的清除可按下述方法进行：将工件放在由体积分数为 7% 的草酸和体积分数为 7% 的硝酸组成的水溶液中，先用毛刷仔细刷洗钎缝，再浸泡 90min，最后用冷水冲洗干净。

5.5.2 阻流剂的清除

在某些钎焊场合中采用的阻流剂，如有必要，在钎焊后也是清除的对象。对于只与母材机械粘附的阻流剂，可用空气吹、水冲洗或金属丝刷等机械方法清除；若阻流剂与母材表面存在相互作用时，可用热硝酸-氢氟酸浸洗去除。但若钎料中含有铜或银时，就应避免采用硝酸，这时可用浓的氢氧化钠热溶液清洗去除。

应当指出，采用化学清洗液去除阻流剂后，必须再用清水将留存在工件上的酸或碱液彻底冲洗掉。

5.5.3 钎焊后的热处理

钎焊后热处理的根本目的是提高钎焊产品的整体性能，包括提高母材本身性能和提高钎焊接头性能两个方面。在安排为强化母材本身而进行的热处理时，应尽量考虑选择一种具有合适钎焊温度范围的钎料，使所要求的热处理能结合钎焊过程或焊后冷却过程同时完成，以减少钎焊生产时间而提高生产率。在提高接头性能方面，或者是为改善接头组织而进行扩散热处理，或者是为消除接头内应力而进行去应力退火处理。进行扩散热处理时，接头应在低于钎料固相线温度的条件下长时间保温；而进行去应力退火处理时，接头应在较低的温度下保持所需的时间。

顺便指出，如果焊件是在夹具中被钎焊的，则其钎焊后的热处理也应在夹具中进行，以免发生变形。

5.6 钎焊工艺规程

钎焊工艺规程是完成钎焊工艺过程的技术规定,其具体表现形式是钎焊工艺卡。钎焊工艺卡是一种把设计者的意图传达给生产部门的有效工具,也是实施钎焊过程和产品质量检验的技术依据。由美国焊接学会推荐的钎焊工艺卡的格式如表5-7所示,主要涉及接头、母

表 5-7 钎焊工艺卡的格式

钎焊工艺卡编号: _____
接头: _____
(此处贴草图, 示明零件的形状及厚度、接头间隙、钎料的放置部位、接头的装配尺寸和夹具。)
母材: _____
(注明牌号或其它代号。)
钎焊前清理: _____
(注明清理用品, 如金属丝刷、金刚砂、清洗液的名称及成分等。注明清理工艺, 包括时间、温度和冲洗方法等。如采用镀层, 还应注明镀覆工艺。)
钎料: _____
(注明牌号或其它代号以及尺寸和形状。)
钎剂或气体介质: _____
(注明有关标准规定的型号或其它代号以及应用的位置和方法。)
钎焊方法: _____
(注明钎焊方法和规范, 如钎焊温度和时间、预热温度 (如有需要)、火焰钎焊时的焊嘴尺寸和燃气、电阻钎焊时的电流和压力、感应钎焊时的频率和线圈类型及数量等。)
钎焊后清理: _____
(注明清理用品和冲洗方法。)
钎焊后热处理: _____
(指不与钎焊过程重复的热处理, 并注明加热速度、处理温度和冷却速度等。)
检验要求: _____
(注明检验的要求、取样频率、种类和规范, 如压力试验的压力、射线检验所允许的缺陷程度及角焊缝的尺寸等。)
附注①: _____
(此处填特别注意事项以及在卡片中未提及的有关事项。)

① 此项内容记在卡片的背面。

材、钎焊前清理、钎料、钎剂或气体介质、钎焊方法、钎焊后清理、钎焊后热处理和检验要求等内容。其中，不需要填写的项目可以空着，需要填写的项目应尽量详细填写，以保证达到预期的效果。

1. 接头

接头应以图样形式画出，并示明几何形状和尺寸，必要时还应包括公差，图样上可以画出整个焊件，也可以只画出接头区域。

2. 母材

采用国家标准、部颁标准或行业标准代号来标注母材。若不能使用标准代号，则应注明化学成分、商品名称或其它有效标志。对于异种材料的钎焊，每种材料都应加以标注。此外，母材的特殊状况（如回火热处理、表面粗糙度等）也应注明。

3. 钎焊前清理

注明完整的清理工艺。如果是重要工件，要说明清理和钎焊之间的时间间隔及防止污染的特殊处理要求。只有在钎焊需要时，才注明采用表面镀覆措施。

4. 钎料

最好采用国家标准、部颁标准或行业标准规定的钎料牌号，并给出钎料的形状和尺寸。此外，还要注明钎料的添加方式，即手工送进或预先放置等，必要时可参照接头的图样。

5. 钎剂或气体介质

按有关标准规定的代号加以标注，并指出具体的添加方式及其它特殊要求。如果同时使用钎剂和气体介质，两者都要注明。

6. 钎焊方法

首先应注明采用何种钎焊方法，如火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊或浸渍钎焊等。其次应注明控制钎焊过程所需的钎焊工艺参数及其它内容，包括火焰钎焊时的焊嘴型式和尺寸、炉中钎焊时的炉子类型等。如果需在特殊部位加热或在某些部位避免加热，均应详细注明。

7. 钎焊后清理

通常必须去除所有的钎剂残渣，特别是使用腐蚀性钎剂时更应这样。在使用阻流剂时，如有必要，也应清除。在某些情况下，为了外

观漂亮或精加工，钎焊后也进行必要的清理。

8. 钎焊后热处理

如果热处理与钎焊过程同时完成，则在“钎焊方法”一项中应注明必要的参数。对于其它热处理，也应在本项中加以注明。

9. 检验要求

应注明检验的全部细节，如采用的检验方法、检验规范和检验结果等。检验的取样次数也应予以规定，并给出缺陷接头的修补或报废的范围。

第6章 钎焊方法

钎焊过程可作如下描述：即先对焊件、钎剂及钎料加热，待钎剂熔化后，钎料熔化并靠毛细作用填入待焊工件的间隙中，保温一定时间后钎料冷却凝固，从而获得牢固的钎焊接头。由此可见，钎焊方法的主要作用在于创造必要的温度条件，确保匹配适当的母材、钎料、钎剂或气体介质之间进行必要的物理化学过程，从而获得优质的钎焊接头。钎焊方法种类很多，随着新热源的发现和使用，又陆续出现了不少新的钎焊方法，本章主要介绍几种常见的钎焊方法。根据加热方法的不同，钎焊方法也不同。图 6-1 列出了不同的加热方式与不同的

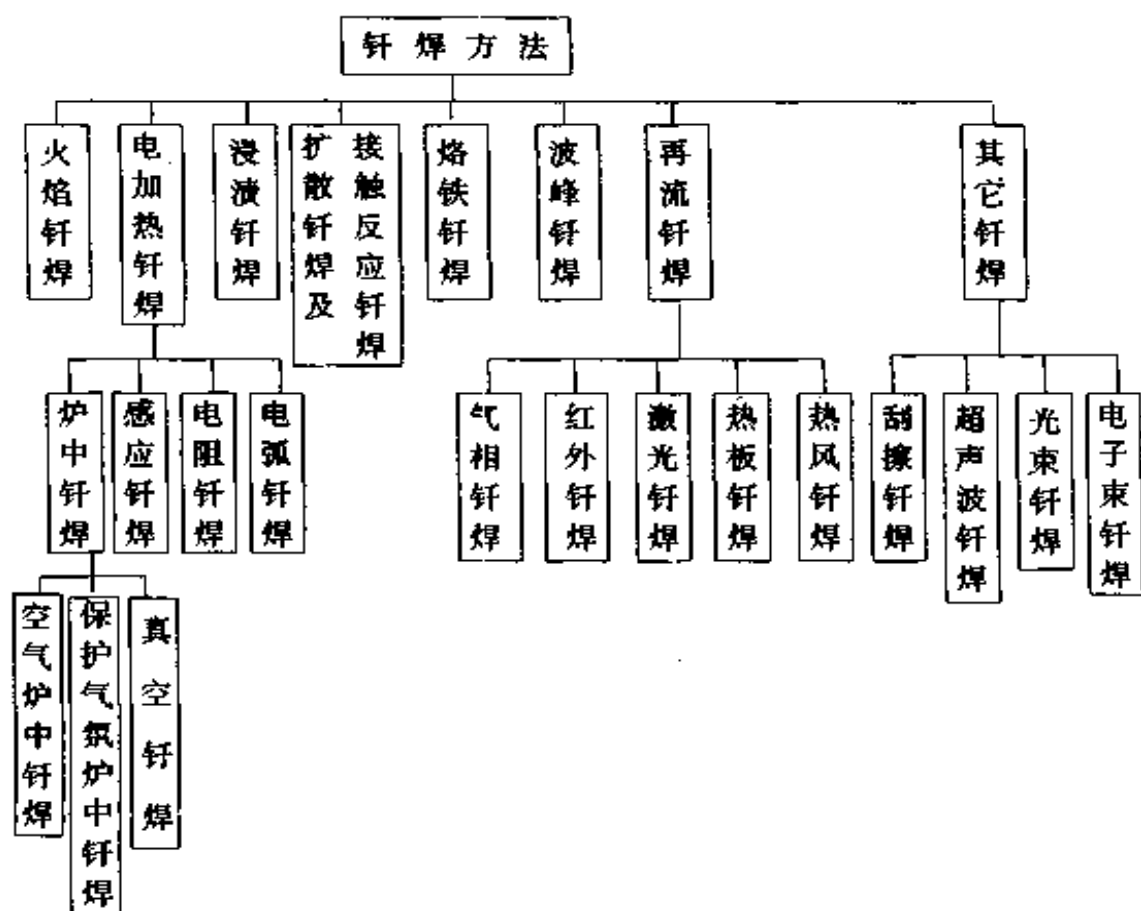


图 6-1 常见钎焊方法

钎焊过程实质所示常见的钎焊方法。

6.1 火焰钎焊

火焰钎焊是一种简单而实用的钎焊方法，它的通用性很大。火焰钎焊的操作方便，所需的设备简单轻便，燃气来源广。此方法主要用于以铜基钎料、银基钎料钎焊碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及其合金、硬质合金刀具等，特别适用于截面质量不等的组件。还可用作钎焊铝及其合金等小型和薄壁焊件。它也可以用作软钎焊。

用于火焰钎焊的燃气主要有乙炔、丙烷、汽油、城市煤气等，可以采用的一些燃气的基本特性示于表 6-1。它们借以与氧气或压缩空气混合燃烧的火焰对焊件进行加热钎焊（图 6-2）。

表 6-1 可供火焰钎焊使用的各种可燃气体和蒸气的特性

燃 气	火焰温度 t / $^{\circ}\text{C}$	1m^3 燃气的需氧量 m^3
乙炔	3150	2.5
甲烷	2000	2.0
丙烷	2050	5.0
丁烷	2050	6.5
氢	2100	0.5
天然气	2100	2.0
石油气	2400	3.5
汽油蒸气	2550	2.6
煤油蒸气	2400	2.55

火焰钎焊的焊炬可以装上一个单孔或多孔的焊嘴。在生产率高时，可以使用装有单孔或多孔焊嘴的单焊炬或多焊炬进行机械化火焰钎焊。

氧乙炔焰的温度最高可达 3100°C ，而一般金属的钎焊温度只需加热到比钎料熔点略高的温度即可，很少超过 1200°C 。因此常以中性焰或氧乙炔焰的外焰区来加热，以防止工件的过热和它与钎料的过分氧化。一般情况下，可用普通的气焊炬进行钎焊，但钎焊熔点比较

低的工件时，最好采用特种的多孔喷嘴，此时得到的火焰比较分散，温度比较适当，有利于保证均匀的加热。由于氧乙炔焰温度高，在钎焊熔点较低的工件（如铝及其合金）时，可以采用压缩空气代替纯氧，用其它燃气代替乙炔，如压缩空气雾化汽油火焰，空气液化石油气火焰等。

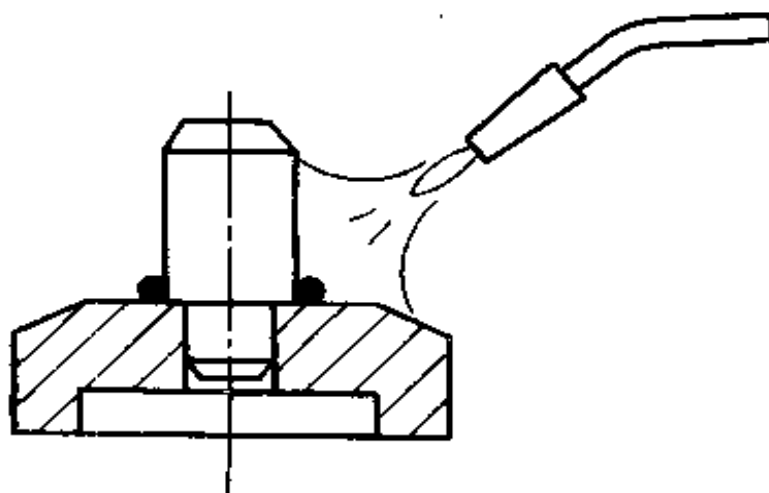


图 6-2 火焰钎焊

火焰钎焊时，钎料通常可以以环状、

片状、条状和粉状等形式预先安置，在需用钎剂时，用粉状或糊状钎剂将其覆盖。须用手工馈送钎料时，则预先用火焰加热手持丝状或棒状钎料的待用端，并粘附粉状钎剂，然后一齐送到加热了的钎焊件表面。火焰钎焊时，为了保证加热均匀，首先应使火焰来回移动，把整个待焊处加热到钎焊温度，使钎剂、钎料熔化并填满整个钎缝间隙。

火焰钎焊时，为了补偿良导热体接头零件的热量散失和减少由于热冲击引起的应力开裂，除了正确的加热外，还要使接头均匀地达到钎焊温度范围，使钎料能自由流动和填满间隙。为避免工件过热，最好的方法是采用一种熔化温度比钎料熔点低不太多的活性钎剂，此钎剂的熔化可以用来作为表明已达到正确钎焊温度的指示剂。如果钎料采用手工送给，则对钎剂的外表状态应予以特别注意，一旦钎剂完全成为流体，钎料就立刻接触钎焊工件，施加钎料一直到钎料完全流动和填满间隙，然后稍经几秒钟继续加热保温后停止加热。这种办法可以让熔融钎剂起温度指示作用，同时，使零件本身供应热量使钎料熔化和流动。值得注意的是，在钎焊过程中特别要避免火焰直接加热钎剂和钎料。

火焰钎焊的缺点是：手工操作时加热温度难掌握，因此要求工人有较高的操作技术。另外，火焰钎焊是一个局部加热过程，可能会引

起焊件的应力或变形。

6.2 电加热钎焊

顾名思义,电加热钎焊的热源是由电通过发热元件产生热量,以进行钎焊的一种钎焊方法。通常可将其分为炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊及电弧钎焊等。

6.2.1 炉中钎焊

钎焊所用加热炉的种类很多,有金属电阻丝(块、板)加热炉、石墨加热炉、火焰加热炉、软钎焊用的红外加热炉等,用得最广泛的是电阻炉。电阻炉炉中钎焊是利用电阻炉的热源来加热焊件实现钎焊的一种方法。按钎焊过程中焊件所处的气氛不同,可分成空气炉中钎焊、保护气氛炉中钎焊(又可分为中性气氛及活性气氛两种)及真空钎焊。

1. 空气炉中钎焊

炉中钎焊广泛用于钎焊已装配好的零件。此时钎料预先放置在接头附近或放入接头内,预先放置的钎料可以是丝、箔、钎屑、棒、粉末、膏和带状等形式,并将所选适量的粉状或糊状钎剂覆盖于接头上,一起置于一般的工业电炉中,加热至钎焊温度。依靠钎剂去除钎焊处的表面氧化膜,熔化的钎料流入钎缝间隙,冷凝后形成接头(图6-3)。

炉中钎焊方法的加热均匀,焊件变形小,所用的设备简单,成本较低。虽然加热速度较慢,但由于一炉可同时钎焊多件,生产率仍很

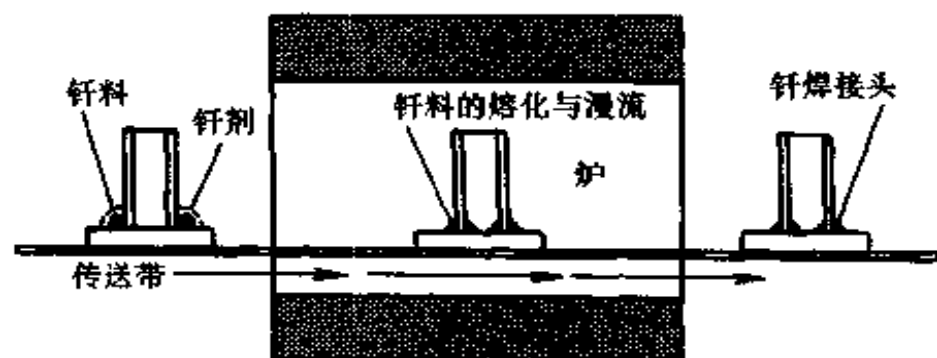


图 6-3 炉中钎焊工作示意图

高。它的严重缺点是：由于加热速度较慢，又是对焊件整体加热，因此钎焊过程中焊件会遭到严重氧化，钎料熔点高时就更为严重。因此，它的应用受到限制。运用此法可钎焊碳钢、合金钢、铜及其合金、铝及其合金等。

钎剂可以粉状使用，也可以水溶液或调成糊状使用，一般是先涂在间隙内及钎料上，再放入炉中钎焊。为了缩短焊件在高温停留的时间，钎焊时，可先把炉温升到稍高于钎焊温度，再放入焊件进行钎焊。

严格控制焊件加热的均匀性是保证钎焊质量的重要环节。对于体积较大且比较复杂，组合件各处的截面相差大的焊件钎焊时，可采取如下措施：保证炉内温度的均匀；焊件钎焊前先在低于钎焊温度下保温一段时间，力求整个焊件加热温度的一致；对于截面差异大的焊件，在薄截面一侧与加热体之间放置隔热屏（金属块或板）。钎焊铝合金时，应控制炉温和钎焊温度波动不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。同时必须保证炉膛的温度均匀。

2. 保护气氛炉中钎焊

保护气氛炉中钎焊的特点是：加有钎料的焊件是在保护气氛下的电炉中加热钎焊，它可有效地阻止空气的不利影响。按使用气氛的不同，可分别称之为活性气氛（如氢气）炉中钎焊和惰性气氛（如氮、氩、氦气等）炉中钎焊。

保护气氛炉中钎焊的供气系统包括气源、净气装置及管道、阀门等。气源常直接采用瓶装气体供给。考虑到安全因素，以氢作为活性气体时，它可采用专门的分解器分解氨的办法获得。分解器是通过加热至 650°C 左右的铁屑或磁铁矿，把氨分解为氮和氢。

净气装置用来清除所用气体中的水和氧等杂质，降低气体的露点和分压，提高它们的保护和去膜能力。装置包括除水和除氧两部分。对于氢气，通常的净化过程是将它顺序通过下列物质：硅胶-分子筛-105 催化剂-分子筛。硅胶和分子筛起脱水作用；105 催化剂起触媒作用，使氢和所含的氧化合成水，因此需要通过分子筛脱水。这样净化过的氢露点可降至 -60°C 。氩可以同样方式脱水，但不能使用 105 催

化剂去氧，而是把氢通过温度为 $850\sim 920^{\circ}\text{C}$ 的海绵钛来解决。

较简单的保护气氛钎焊是将工件放置于用耐热钢或不锈钢制成的密封容器中，然后将容器放入电炉中加热钎焊（可用普通的电炉）。钎焊后将容器取出，钎焊件随容器一起冷却。钎焊容器的盖子常用胶圈密封，用螺栓夹紧。为防止胶圈受热失效，容器盖的部位应远离热源，并通水冷却。当焊件对容器的密封要求不特别严格时，使用前可借助在砂封槽中填砂来保证。容器上焊有保护气体的进气管和出气管，它们的位置安排对保护气体能否驱尽容器内的空气有较大影响。保护气体比空气轻（例如氢）时，出气管应安置在容器的底部；反之，若重于空气（例如氮），出气管应安放在容器上部。这种装置的生产效率低，只能进行小批量生产。为了提高生产率，一般可设有钎焊室和冷却室。较先进的为三室或多室结构，除钎焊室、冷却室外，还有预热室（图 6-4）。炉内通保护气体，其压力高于大气压力，以防止外界空气渗入。焊件送入和取出可以是人工的也可以是自动的。这类炉子主要用于钎焊碳钢，因为炉门经常开启和炉内炉衬大量吸收空气和水气，钎焊室很难保持纯净的气氛。如果在出入炉门及各室之间配有保护气帘，这样可以有效地净化钎焊室的保护环境。如目前所见的用高纯氮作保护，只要涂以极少量的氟化物钎剂就可成功地钎焊铝焊件，大批量连续钎焊汽车铝散热器即为一例。

活性气氛钎焊时，为了防止氢混有空气而引起爆炸，炉子或容器加热前应先通 $10\sim 15\text{min}$ 氢气，以充分排除其中的空气，直到出气口

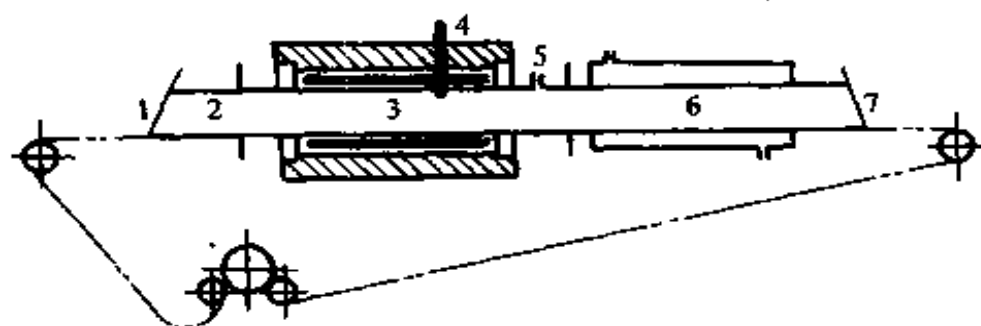


图 6-4 气体保护钎焊炉示意图

1—入口炉门 2—预热室 3—钎焊室

4—热电偶 5—气体入口 6—冷却室 7—出口炉门

的火焰燃烧正常后再开始加热。使用中性气体的炉子和容器时，加热前也应先用气体吹净其中空气。如按抽真空-充氩-抽真空-充氩的程序重复数次，容器中残余空气可降至很低。然后加热钎焊，能获得满意的结果。

在钎焊加热中，外界空气的渗入，器壁和零件表面吸附气体的释放、氧化物分解或还原等，将导致保护气氛中氧、水气等杂质增多。应指出，若保护气氛处于静止状态，气体介质与零件表面氧化膜反应的结果，使有害杂质可能在焊件表面形成局部聚积，使去膜过程中止，甚至逆转为氧化。因此，在钎焊加热的全过程中，应连续地向炉中或容器中送入新鲜的保护气体，排出已混杂了的气体，使焊件在流动的保护气氛中完成钎焊。这是保持钎焊区保护气体高纯度的需要，也是使炉内气氛对炉外大气保持的剩余压力，阻止空气渗入所必须的。对于排出的氢，应点火使之在出气口烧掉，以消除它在炉旁集聚的危险。

保护气氛炉中钎焊时，不能满足检验炉温来控制加热，必须直接检测焊件的温度，对于大件或复杂结构，还必须监测其多点温度。

钎焊结束断电后，应等炉中或容器的温度降至 150℃ 以下，再停止输送气体。这是为了保护加热元件和焊件不被氧化。对于氢气来说也是为了防止爆炸。

3. 真空炉中钎焊

真空钎焊是在真空条件下，不施加钎剂的一种比较新的钎焊方法（图 6-5）。由于钎焊件处在真空环境下，可以有效地排除空气对工件的有害影响，因此可以成功地不施加钎剂，用于钎焊那些难钎焊的金属和合金，如铝合金、钛合金、高温合金、难熔金属及陶瓷等。所钎焊的接头光亮致密，具有良好的力学性能和抗腐蚀性能。

真空炉中钎焊的设备主要由真空钎焊炉和真空系统两部分组成。真空钎焊炉大致有两种类型：一种是真空室与加热器分开的型式，俗称热壁炉（见图 6-5）。它的特点是在室温时先将装有钎焊件的容器中的空气抽出，然后将容器推进炉内，在炉中加热钎焊（此时继续抽真空）。钎焊后从炉中取出容器，在空气中快速冷却；另一种是真空室

建立在加热室内，即加热炉与真空钎焊室为一体，俗称冷壁炉。用这种类型的钎焊炉，钎焊件钎焊后必须随炉冷却，限制了生产率。

热壁真空钎焊炉实质是一个由不锈钢或耐热钢制成的密封真空钎焊容器。焊件放在容器内，容器抽真空后送入炉中加热钎焊。工作时，抽真空与加热升温同时进行；钎焊后，容器可退出炉外冷却，缩短了生产周期，并可防止母材晶粒长大。加热炉可采用通用的工业电炉。这种真空容器内部没有加热元件和隔热材料，不但结构简单，容易操作，而且加热中释放的气体少，有利于保持真空。为提高生产率，同时备有几个钎焊容器，交替进入、退出炉膛进行钎焊和冷却。因此，设备投资少，生产率高。但容器在高温、真空条件下受到外界大气压力的作用，易变形，故适用于小件小量生产。大型热壁炉则常采用双容器结构，即加热炉的外壳也设计成低真空容器，但结构的复杂化使其应用受到限制。

冷壁炉的炉壁为双层水冷结构。内置热反射屏，它由多层表面光洁的薄金属板组成。视炉子使用温度不同，材料选用钼片或不锈钢片。其作用是防止热量向外辐射，减轻炉壳受热且提高加热效率。在反射屏内侧分布着加热元件，依照炉子的额定温度不同而选用不同的发热体：中温炉一般使用镍-铬或铁-钼合金；高温炉使用钼（1800℃）、钨（2500℃）、钽（2200℃）、石墨（2000℃）。冷壁炉工作时，炉壳由于水冷和受到反射屏屏蔽，温度不高，能很好地承受外界的大气压，故适于大型焊件的高温钎焊。它的加热效率也较高，但使用时需先抽真空再加热，钎焊后焊件只能随炉冷却，且低温阶段炉

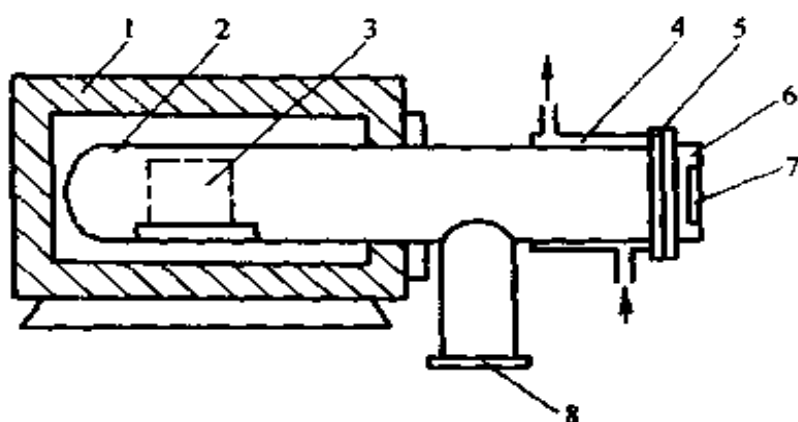


图 6-5 真空钎焊炉简图

- 1—电炉 2—真空容器 3—工件
4—冷却水套 5—密封环 6—容器盖
7—窥视孔 8—接真空系统

温下降缓慢，因此生产率低。但如采用双室或多室连续冷壁炉，不破坏加热室真空状况，焊件的装炉、钎焊、冷却及出炉可连续操作，生产率可以提高。

真空系统主要包括真空机组、真空管道、真空阀门等。真空机组通常由旋片式机械泵和油扩散泵组成。单用机械泵只能得到低于133mPa的真空度。要获得高真空必须同时使用油扩散泵，此时能达到 133×10^{-3} mPa级的真空度。系统内的气体压力用真空计测量。通常，低于133mPa真空度的多使用热偶真空计； $133 \sim 133 \times 10^{-3}$ mPa真空度范围用电离真空计测定。

真空炉中钎焊操作时，将加有钎料的焊件装入炉膛（或装入钎焊容器），关闭炉门（或封闭钎焊容器盖）。加热前预抽真空，先启动机械泵，待真空度达到1.33Pa后转动转向阀，关断机械泵与钎焊炉的直接通路，使机械泵通过扩散泵与钎焊炉相通，依靠机械泵与扩散泵同时工作，将钎焊炉抽至要求的真空度，然后开始通电加热。在升温加热的全过程中真空机组应持续工作，以维持炉内的真空度，抵消真空系统和钎焊炉各接口处的空气渗漏，炉壁、夹具和焊件等吸附的气体和水气的释放，金属与氧化物的挥发等使真空度降低。即使是这样，钎焊炉在升温后能维持的真空度比常温时要低半个至一个数量级。加热保温结束后，焊件应继续在真空或保护气氛中冷却至150℃以下以防氧化，因此，仍须继续抽真空或向炉内通入保护气体。

真空炉中钎焊的优点是焊件不受钎剂残渣的有害影响，钎焊质量高，可以方便地钎焊那些用其它方法难以钎焊的金属和合金。但由于在钎焊前预抽真空及在冷却时须花费大量时间，在真空中的热量传递比较困难，故钎焊生产周期长。此外，真空钎焊设备比较复杂，要求较多的投资；对工作环境和工人技术水平也要求较高。

由于在真空中金属的挥发，将污染真空室和抽真空系统，因此真空炉中钎焊不宜使用含蒸气压高的元素，如锌、镉、锂、锰、镁和磷等较多的钎料（特殊情况例外），也不适于钎焊含这些元素多的合金。

6.2.2 感应钎焊

感应钎焊是将焊件的待焊部分置于交变磁场中，通过它在交变磁场中产生的感应电流来实现加热钎焊的一种钎焊方法。由于热量由工件本身产生，因此加热迅速。

感应钎焊所用的设备主要由两部分组成，即交流电源和感应圈。此外还有夹持和定位零件所需用辅助夹具。图 6-6 和图 6-7 分别表示感应钎焊装置的原理和感应圈型式。

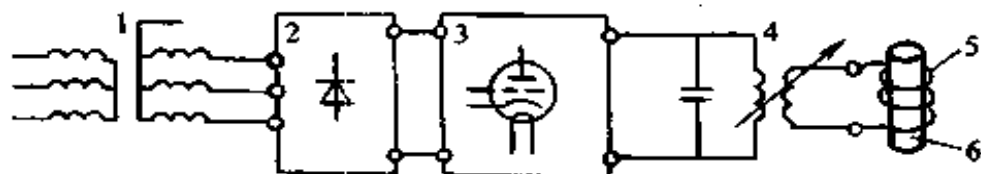


图 6-6 感应钎焊装置原理图

1—变压器 2—整流器 3—振荡器 4—高频变压器 5—感应器 6—焊件

用于钎焊的交流电源主要是中频和高频，工频很少直接用于钎焊。中频电源可以是电动机-发电机组，也可以是固体变频设备，它们适用于钎焊大厚件。常用的高频电源是真空管振荡器。真空管振荡器能产生的频率范围 200kHz—8MHz，一般最常用的设备频率为 150 ~ 600kHz。频率越高，

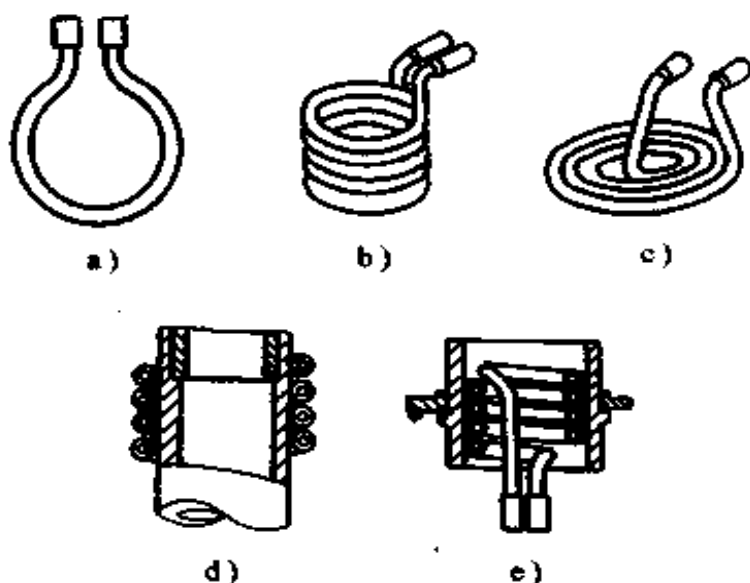


图 6-7 感应圈型式

a) 单匝感应圈 b) 多匝螺管形感应圈
c) 扁平式感应圈 d) 外热式 e) 内热式

加热越迅速，特别适用于钎焊薄件。如果采取灵活的操作手段，也可钎焊较厚的工件，因此得到广泛采用。

感应圈是感应钎焊设备的重要器件，交流电源的能量是通过它传

给焊件而实现加热的。因此，感应圈的结构是否合理，对于钎焊质量和提高生产率有重大影响。正确设计和选用感应器的基本原则是保证焊件加热迅速、均匀及效率高。通常感应圈均用纯铜管（圆管或扁管）制作，工作时管内通水冷却；管壁厚度应不小于电流渗透深度，一般为 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 。感应圈与焊件之间应保持间隙以避免短路。为了提高加热效率，应尽量减少圈匝间及与焊件的无用间隙。为此，圈应制成与所钎焊接头相似的形状，并与焊件保持不大于 3mm 的均匀间隙。但对于壁厚不均的焊件或非圆形焊件，有时也可借调节感应圈与焊件的间隙来保证较均匀的加热。感应圈的匝间距离一般取为管径的 $0.5 \sim 1$ 倍。应尽可能采用外热式感应圈，这是由于电流的环向效应，使外热式感应圈比内热式感应圈的加热效率高。

感应钎焊时，为保证装配准确性及与感应圈相对的位置，往往需要一些辅助夹具来夹持和定位焊件。它们对于提高生产率和保证钎焊质量有重要作用。特别是在自动和半自动感应钎焊设备中已经发展为一套复杂装置。在设计夹具时应注意的是，与感应圈临近的夹具零件不应使用金属，以免被感应加热。

导体内的感应电流强度与交流电的频率成正比。随着所用的交流电频率的提高，感应电流增大，焊件加热速度变快。基于这一点，感应加热大多数使用高频交流电。但应注意频率对交流电集肤效应的影响。通常取 85% 的电流所分布的导体表面层厚度称为电流渗透深度，用以表征集肤效应的强弱。电流渗透深度与电流的频率有关。频率越高，电流渗透深度越小。虽然使表面层迅速加热，但加热的厚度却越薄。零件的内部只能靠表面层向内部的导热来加热。由此可见，选用过高的交流频率并不是有利的。对于一般钎焊工作来说， 500kHz 左右的频率是比较适宜的。

电流渗透深度也与材料的电阻系数和磁导率有关。电阻系数越大，磁导率越小，则电流渗透深度就越深。例如，钢在温度低于 768°C 时，磁导率很大，集肤效应显著；温度高于 768°C 后，磁导率急剧减小，集肤效应也随即减弱，有利于均匀加热。非磁金属如铜、铝等，磁导率较小，集肤效应都较小。表 6-2 列举了电源频率与电流

渗透深度的关系。在确定钎焊工艺参数时必须考虑材料的有关物理性能对电流渗透深度的影响。

表 6-2 电源频率对各种材料的电流渗透深度的关系

频率 f/Hz	电 流 渗 透 深 度 δ /mm			
	钢 (<768℃)	钢 (>768℃)	铜	铝
50	2.4	92	9.5	11
2×10^3	0.5	14	1.5	1.8
10^4	0.2	6	0.67	0.8
10^5	0.07	2	0.21	0.25
10^6	0.02	0.6	0.07	0.08
10^8	0.002	0.06	0.007	0.008

感应钎焊可分为手工的、半自动的和自动的三种方式。手工感应钎焊时，焊件的装卸、钎焊过程的实施和调节都靠手工操作。这种方式只适用于简单焊件的小批量生产，其生产效率低，对工人的技术水平要求高，但它具有较大的灵活性。例如，当钎焊设备技术规格不合适而又需钎焊厚件时，有时可借断续通电加热来解决。半自动感应钎焊，焊件的装卸和通电加热仍靠人来操作，但钎焊过程的断电结束是借助于时间继电器或光电控制器自动控制。自动感应钎焊使用的感应圈是盘式或隧道式。工作时感应圈一直通电，利用传送带或转盘把焊件连续送入感应圈中。焊件所需的加热是靠调整传送机构的运动速度、控制焊件在感应圈中的时间来保证。这种方式的生产率高，主要用于小件的大批量生产。

钎焊件的装配间隙大小对钎缝的力学性能有很大的影响。推荐的装配间隙值见表 6-3。

感应钎焊时，焊件置于感应圈中或近旁，难以送进钎料。因此宜在装配时预先把钎料和钎剂放好。可使用箔状、丝状、粉状和膏状的钎料。安置的钎料不宜形成封闭环，以免因自身的感应电流加热而过早熔化。由于加热迅速，应注意选用毛细性好的钎料。

表 6-3 感应钎焊推荐的装配间隙值 (mm)

被钎焊金属	钎 料			
	纯 铜	铜 锌	铜 磷	银 基
铜	—	0.08~0.3	0.08~0.3	0.04~0.25
黄铜和青铜	—	0.08~0.3	0.08~0.3	0.04~0.25
钢和铸铁	0.04~0.1	0.05~0.25	—	0.03~0.15

注：1. 表内数值系径向间隙值；

2. 零件的尺寸减小，则间隙可选择下限间隙值，反之亦然；

3. 采用与被钎焊金属物理化学性质相差较大的钎料时，可选择上限间隙值；

4. 异种材料钎焊时，考虑到膨胀系数的差异，表值应视为在钎焊加热状态下的实际间隙。

感应钎焊可在空气中、保护气氛中和真空中进行。采用钎剂介质去膜时，可使用液态和膏状的钎剂。采用气体介质去膜时，焊件需置于容器中，感应圈的安放方式有两种：一种是置于容器外，靠感应器来加热焊件。此时，容器材料应是导体。另一方式是感应圈置于容器内，焊件靠感应圈直接加热。这时，往往可以使用玻璃容器，以利于观察钎焊过程的进行。

感应钎焊广泛用于钎焊钢、铜及其合金、不锈钢、高温合金、硬质合金等，特别适用于管件套接、管和法兰、轴和轴套之类的接头。对于铝合金的硬钎焊，由于温度不易控制，不宜使用这种方法。

6.2.3 电阻钎焊

电阻钎焊的基本原理与电阻焊相同。它是利用电流通过焊件或与焊件接触块所产生的电阻热加热焊件和熔化钎料的一种钎焊方法。钎焊时对钎焊处应施加一定的压力。这种方法加热快，生产效率高，但也受钎焊接头的形状及大小所限制。

电阻钎焊有两种基本方式，即直接加热法和间接加热法（图 6-8）。直接加热的电阻钎焊时，电极压紧两个零件的钎焊处，电流通过钎焊面而形成回路，靠钎焊面及毗邻的部分母材中产生的电阻热加热

到钎焊温度。其特点是仅焊件的钎焊处被加热，具有直接的局部的性

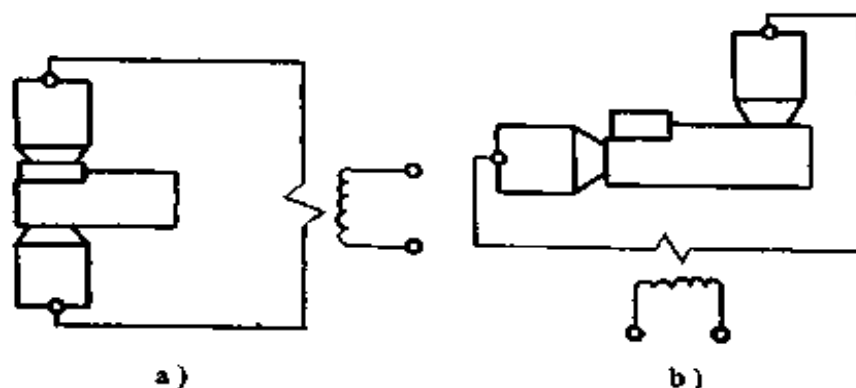


图 6-8 电阻钎焊示意图

a) 直接加热 b) 间接加热

质，因此加热速度快。在这种钎焊过程中，要求零件钎焊面彼此保持紧密贴合。否则，将因接触不良而造成母材局部过热或接头的严重未钎透等缺陷。当必须采用钎剂时，应与水或酒精调成溶液形式使用，尽量避免用固态钎剂，否则因其不导电而影响钎焊的加热。在间接加热的电阻钎焊方法中，电流或只通过一个零件，或根本不通过焊件。对于前者，钎料的熔化和另一零件的加热均靠通电加热的零件向它们导热来实现的；至于后者，电流是通过加热一个较大的石墨板或耐热合金板，焊件置于此板上，全部依靠导热来实现钎焊。由于电流不通过钎焊面，因此可以使用固态钎剂，对焊件钎焊面的配合要求也可以稍宽些。但为了保证装配准确度和加快导热过程，对焊件仍需压紧。这种方法的优点是便于钎焊物理性能差别大的材料或厚度相差悬殊的焊件，不会出现加热中心偏离钎焊面的情况。这种方法的加热速度慢，适用于小件的钎焊。

在微电子产品中，往印刷电路上装联元器件引线时，由于结构原因，也多采用两个电极在同一侧的所谓平行间隙钎焊法（图 6-9）。

电阻钎焊可采用粉状、膏状及箔状钎料，而箔状钎料最为理想，它可以方便地直接放在零件的钎焊面之间。另外，在钎焊面预先涂复钎料层也是最常用的工艺措施，这在电子工业中应用很广。若使用钎料丝，应待钎焊面加热到钎焊温度后，将钎料丝末端靠近钎缝间隙，

直至钎料熔化，填满间隙，并使全部边缘呈现平缓的钎角为止。

电阻钎焊与电阻焊一样，适宜使用低电压大电流，通常可在普通的电阻焊机上进行，也可使用专门的电阻焊设备（电阻钎焊钳或电阻钎焊机）。电极可以采用碳、石墨、铜合金、不锈钢、耐热钢、高温合金或难熔合金等制造，根据工件的材料性质、形状、厚度等选择相应的电极。一般电阻钎焊用的电极应有较高的电导率，

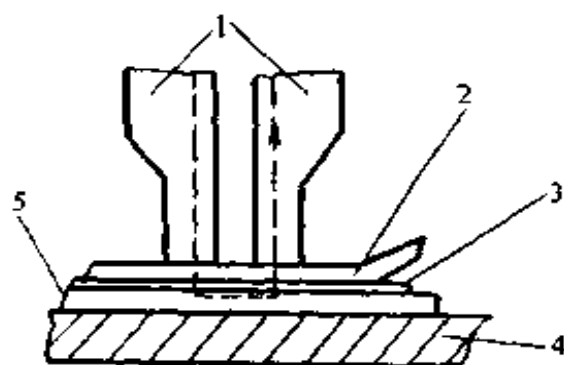


图 6-9 平行间隙钎焊法

1—电极 2—引线

3—钎料 4—底座 5—金属箔

而用作加热块的电极则采用高电阻材料。在所有情况下，制作电极的材料应不为钎料所润湿。为了保证加热均匀，通常电极的端面应制成与钎接头相应的形状和大小。电阻钎焊使用的压力比电阻焊时使用的低，目的仅在于保证零件钎焊面良好的电接触和从缝中排除多余的熔化钎料和钎剂残渣。

电阻钎焊具有加热迅速、生产率高；加热十分集中，对周围的热影响小；工艺较简单、劳动条件好，而且过程容易实现自动化等优点。但适于钎焊的接头尺寸不能太大，形状也不能很复杂，这是电阻钎焊应用的局限性。

6.2.4 电弧钎焊

电弧钎焊是借助于电弧热传给焊件和钎料进行钎焊的一种方法。尽管这种方法还没有广泛地运用，但它提供了快速地加热的热源（图 6-10）。

电弧钎焊的电极可以采用石墨、碳棒或耐高温的金属棒。选用普通交流或直流电焊机供给能量，以保持电弧的稳定燃烧。可以采用直接电弧或间接电弧法进

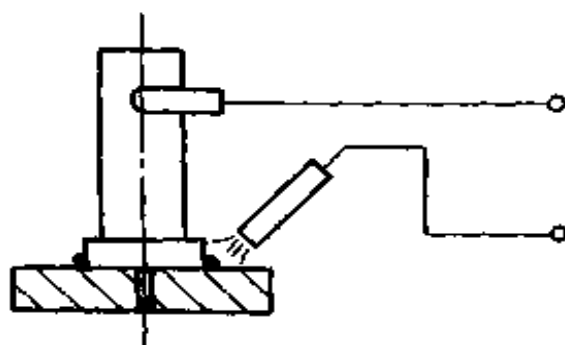


图 6-10 电弧钎焊示意图

行操作。直接电弧是电极与焊件各为一个极，间接电弧是采用双电极（碳棒或石墨棒），在两极之间产生电弧，由电弧加热焊件，此时焊件并不通电。双电极由焊钳夹持，它可使两电极保持一定的角度，并可调节它们的距离，可随意调节电弧形状。钎焊时，钎料由手工或自动送给。

运用普通或特殊的氩弧焊电源，电极采用钨丝或既作为电极又作为填充钎料的钎料丝，可以进行类似于手工钨极氩弧焊或熔化极氩弧焊的钎焊操作。前者由手工馈送钎料。

电弧钎焊操作时，一般先用电弧热加热焊件的钎焊处，待加热到接近钎焊温度时，再添加钎料。由于电弧具有很高的温度和热量，在作业时应注意防止焊件的过热甚至局部熔化，并应尽量避免电弧直接加热钎料。

6.3 浸渍钎焊

浸渍钎焊是把焊件局部或整体地浸入盐混合物或液态钎料中，依靠这些液体介质的热量来实现钎焊过程。这种钎焊方法的钎焊温度易控制、加热均匀且速度快，一般比炉中加热快 3~6 倍，具有很高的生产率。

浸渍钎焊按使用液体介质的不同，可分为盐浴钎焊和熔化钎料中浸渍钎焊。图 6-11 是盐浴钎焊和熔化钎料中浸渍钎焊的示意图。

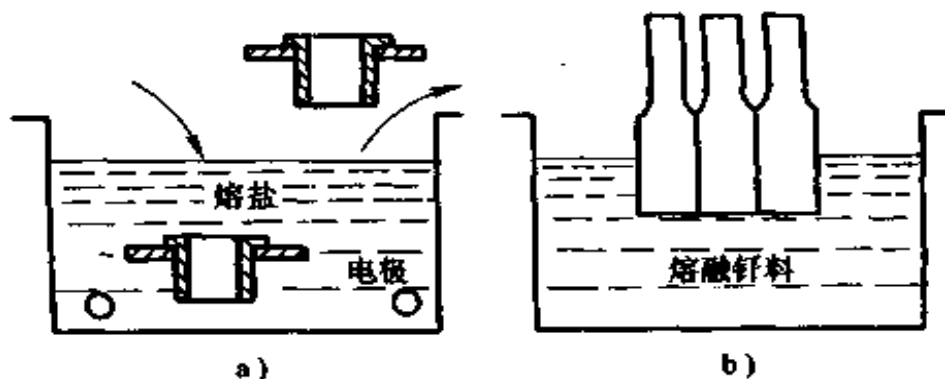


图 6-11 浸渍钎焊示意图

a) 盐浴钎焊 b) 熔化钎料中浸渍钎焊

6.3.1 盐浴钎焊

盐浴钎焊时，焊件的加热和保护都是靠盐浴来实现的。因此，盐混合物的成分选择对其影响很大。对它们的基本要求是：要有合适的熔点；对焊件能起保护作用而无不良影响；使用中能保持成分和性能稳定。一般多使用氯盐为基的混合物。表 6-4 列举了一些用得较广的盐混合物成分。在这些熔盐中浸渍钎焊时，需要施用钎剂去除氧化膜。当浸渍钎焊铝及铝合金时，可直接使用钎剂作为盐混合物。为了保证钎焊质量，在使用中必须定期检查盐溶液的组成及杂质含量并加以调整。

表 6-4 盐浴钎焊用熔盐

成 分 ^①						熔点	钎焊温度	适用范围
NaCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KCl	LiCl	KF·AlF ₃	/℃	/℃	
30	—	65	5	—	—	510	570~900	铜基和银基
22	48	30	—	—	—	435	485~900	钎料钎焊钢
22	—	48	30	—	—	550	605~900	、合金钢、
—	50	50	—	—	—	595	655~900	铜及铜合金
22.5	77.5	—	—	—	—	635	665~1300	和高温合金
—	—	100	—	—	—	962	1000~1300	
—	—	—	51	41	8	—	500~560	铝钎焊
12	—	—	44	34	10	—	550~620	

① 表中成分均指质量分数 (%)。

盐浴钎焊需要一个合适的容器，在小件钎焊时可选用陶瓷或石墨坩埚，在工业大批量生产中则用由金属、陶瓷或耐火砖制成的盐浴槽。将熔盐装入槽内，并选用一种加热方式，使熔盐保持一定的温度。加热的方式可以用火焰或电阻加热，现在工业上用的盐浴槽大多是电热的。其加热方式有两种：一种是外热式，即由槽外电阻丝加热，它的加热速度慢。且槽子必须用导热好的金属制作，由于不耐腐蚀，因此应用不广；得到广泛采用的是内热式盐浴槽，它靠电流通过熔盐时产生的电阻热来加热自身并进行钎焊。

内热式盐浴槽的内壁采用耐熔盐腐蚀的材料制成，一般用高铝砖或不锈钢。铝用盐浴槽使用石墨或镍板。加热电流通过插入盐浴槽中的电极导入。电极材料也视盐熔液成分而定，一般可用碳钢、纯铜。对铝钎焊盐浴槽应采用石墨、不锈钢等。为了保证安全，常使用低电压大电流的交流电工作。

盐浴钎焊时，由于盐熔液的粘滞作用和电磁循环，焊件浸入时零件和钎料可能发生错位，因此必须进行可靠的定位。在这种情况下，使用敷钎料板是最方便的；其次是使用钎料箔，将其预置于钎缝间隙内。将钎料丝置于间隙外的方式应慎重采用，因除有错位危险外，还可能有钎料过早熔化的问题。

在盐浴钎焊中，由于熔盐的保护作用，对去膜的要求降低。但仅在用铜基钎料钎焊结构钢时可以用钎剂去膜。其它仍需使用钎剂。加钎剂的方法，是把焊件浸入熔化的钎剂中或钎剂水溶液中，取出后加热到 120~150℃ 除去水分。

为了减小焊件浸入时盐熔液温度的下降，以缩短钎焊时间，最好采用两段加热钎焊的方式：即先将焊件置于电炉内预热到 200~300℃（铝件的浸渍钎焊前常须 550℃ 的预热），再将焊件进行盐浴钎焊。

对钎缝沿细长孔道分布的焊件，不应使孔道水平地浸入熔盐中，这样会使空气被堵塞在孔道中而阻碍盐液流入，造成漏钎。必须以一定的倾角浸入。钎焊结束后，焊件也应以一定的倾角取出，以便盐液流出孔道，不致冷凝在里面。但倾角不能过大，以免尚未凝固的钎料流积在接头一端或流失。

钎焊前，一切要接触盐液的器皿均应预热除水，防止接触熔盐时引起猛烈喷溅。

盐浴钎焊有如下缺点：需要大量的盐类特别是钎焊铝时要大量使用含氯化锂的钎剂，成本很高；熔盐大量散热和放出腐蚀性蒸气，同时遇水有爆炸危险，劳动条件较差；不适宜钎焊有深孔、盲孔和封闭型的焊件，因此时盐液很难流入和排出；用电量较大。

6.3.2 熔化钎料中浸渍钎焊

这种钎焊方法的过程，是将经过表面清理并装配好的焊件进行钎剂清理，然后浸入熔化的钎料中。熔化的钎料把零件钎焊处加热到钎焊温度，同时渗入钎缝间隙中，并在焊件提起时保持在间隙内，凝固形成接头。

焊件的钎剂处理有两种方式：一种是将焊件先浸在熔化的钎剂中，然后再浸入熔化钎料中；另一种方式是熔化的钎料表面覆盖有一层钎剂，焊件浸入时先接触钎剂再接触熔化的钎料。前种方式适用于在熔化状态下不显著氧化的钎料。如果钎料在熔化状态下氧化严重，则必须采用后一种方式。

这种钎焊方法具有工艺简单、生产率高的优点。其主要缺点是，在焊件浸入部分的全部表面上都涂复上钎料，这不但大大增加了钎料的消耗，而且钎焊后往往还需花大量劳动去清除这些钎料。另外，由于表面氧化，浸渍时混入污物以及焊件母材的溶解，槽中钎料很快变脏，需要经常更换。

目前，这种方法用于以软钎料钎焊钢、铜及铜合金。特别是对那些钎缝多而密集的产品，诸如蜂窝式换热器、电机电枢、汽车水箱等，用这种方法钎焊比其它方法优越。

6.4 扩散钎焊

扩散钎焊是在钎料加热熔化保温过程中，随着母材的溶入和钎料中的低熔点组元或起降低钎料熔点作用的组元的散失，间隙中液态合金的固相线温度逐渐升高，当这种过程持续进行而使合金的固相线温度升高到超过加热温度后，合金即发生等温凝固。它不像一般钎焊方法那样因随后降温凝固而形成钎缝，而是在高于钎料的固相线温度的条件下长时间保温，使之等温凝固而形成钎缝的。

应该指出，在扩散钎焊的等温凝固钎缝中，母材的溶入不起主要作用，因为在恒温条件下，母材的溶解是有限度的。因此，钎料的低熔点组元或起降低熔点作用的组元的散失对等温凝固有决定性的意义。这些组元从钎缝中散失可依靠下列不同过程实现：向母材中扩散；往周围介质中蒸发；与母材形成高熔点金属间化合物。依据不同

的条件，这些过程可能单独进行，也可能共同起作用。

实现这类扩散钎焊过程的基本条件是在钎焊温度下，母材对于钎料中的低熔点组元或起降低熔点的组元具有足够宽的固溶体区域。其钎焊过程一般可分三个阶段：第一阶段发生的过程与一般钎焊过程相同，即固相与液相之间有限的相互扩散；第二阶段，液相逐渐凝固；第三阶段是在固态下发生均匀扩散过程。

扩散钎焊使用的钎料成分一般不同于常规钎料，并且其获得方式除常规钎料靠熔炼制备外，在不少场合是通过夹在母材表面的金属镀层或夹在间隙中的金属箔，加热中与母材接触反应来形成。扩散钎焊的主要过程参数是钎缝间隙大小、过程的温度和时间；而过程的温度和时间又取决于间隙大小和间隙中液态合金的低熔点组元或起降低熔点的组元的相对含量。因此，应尽可能保持最小的钎缝间隙。为此经常施加适当的压紧力。扩散钎焊需要长时间加热保温，故最适宜于采用保护气氛炉中加热和真空中加热的方法。

扩散钎焊过程中的液相来源可以由钎料的熔化或由间隙中金属夹层与母材的共晶反应所获得。这种由于共晶反应熔化、形成共晶体接头的钎焊方法称为接触反应钎焊。

接触反应钎焊的原理是：如金属 A 和金属 B 能形成共晶，则在 A 与 B 接触良好的情况下加热到高于共晶温度，依靠 A 和 B 的相互扩散，在界面处形成液相共晶体，随着反应液相量的逐步增多，填满钎缝间隙，冷却凝固形成接头，把 A 和 B 连接一起。由此可见，接触反应钎焊过程由以下三个阶段组成：① 准备阶段，在界面上发生固态扩散；② 形成共晶液相，固态接触金属向已形成的液相中溶解；③ 液相凝固而成接头。

接触反应钎焊不仅在可以形成共晶体的纯金属之间进行，还可以在能形成共晶体的纯金属与合金、合金与合金之间进行，但是从它们之间的接触加热到开始形成液相的时间要加长。成分越复杂，此时间越长。

原则上凡是能形成共晶的金属，均适用于接触反应钎焊。表 6-5 列出了一些在加热时发生接触反应熔化的金属对。如果被钎焊的两个

金属难以形成共晶液相，则可选用能分别与它们进行共晶反应的中间夹层来实现接触反应钎焊，其形式可见图 6-12。

表 6-5 一些适用于接触反应熔化的金属对

A	B	共晶成分	共晶温度 /℃	A	B	共晶成分	共晶温度 /℃
Ag	Al	$w(\text{Ag}) = 29.5\%$	556	Cu	Zr	$w(\text{Zr}) = \sim 46\%$	885
Ag	Be	$w(\text{Be}) = 0.97\%$	881	Fe	Ti	$w(\text{Ti}) = 68\%$	1085
Ag	Cu	$w(\text{Cu}) = 71.9\%$	779	Ge	Ni	$w(\text{Ni}) = 33.2\%$	775
Ag	Ge	$w(\text{Ge}) = 19\%$	651	Mn	Ti	$w(\text{Mn}) = 43.5\%$	1175
Ag	Si	$w(\text{Si}) = 4.5\%$	830	Nb	Ti	$w(\text{Nb}) = 51.6\%$	1175
Al	La	$w(\text{La}) = 76\%$	518	Ni	Pd	$w(\text{Pd}) = 60\%$	1237
Al	Cu	$w(\text{Cu}) = 33\%$	548	Ni	Si	$w(\text{Si}) = 29\%$	964
Al	Ge	$w(\text{Ge}) = 53.5\%$	424	Ni	Zr	$w(\text{Ni}) = 17\%$	961
Al	Mg	$w(\text{Mg}) = 67.7\%$	437	Ni	Ti	$w(\text{Ni}) = 13\%$	955
Al	Si	$w(\text{Si}) = 11.7\%$	577	Au	Si	$w(\text{Si}) = \sim 6\%$	370
Al	Zn	$w(\text{Zn}) = 95\%$	382	Au	Ni	$w(\text{Ni}) = \sim 25\%$	950
Au	Ge	$w(\text{Ge}) = 12\%$	357	Au	Cu	$w(\text{Au}) = 56.5\%$	889
Au	Sb	$w(\text{Sb}) = \sim 25\%$	360	Co	Ti	$w(\text{Ti}) = 72\%$	1025
Cu	Ti	$w(\text{Ti}) = 28\%$	880	Co	Zr	$w(\text{Zr}) = 12\%$	1460
Cu	Zr	$w(\text{Zr}) = \sim 46\%$	885	Cu	Ge	$w(\text{Ge}) = 40\%$	640

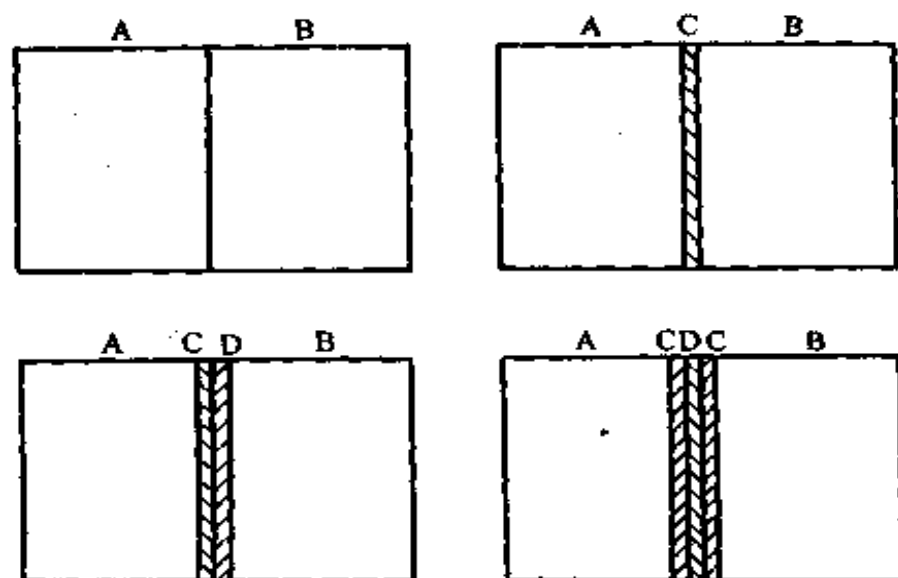


图 6-12 接触反应钎焊的连接形式

A、B 待焊金属 C、D 过渡金属

接触反应钎焊时，对被连接金属加以一定的压力往往是很重要的。加压的目的是使母材界面形成良好的接触，以利于接触反应熔化的进行。压得紧，母材之间的接触点越多，液相形成的速度越快，接触面上形成液相的区域越大。加压又可使形成的液相从间隙中挤出，以免母材溶解过多，在液相挤出的同时，破碎的氧化物也被挤出间隙，有利于提高接头的质量。如果所形成的低熔共晶体比较脆的话，则把这层液体金属从接头间隙中挤出去有利于提高接头强度。

6.5 烙铁钎焊

烙铁钎焊是依靠烙铁工作部（烙铁头）积聚的热量来熔化钎料，并加热钎焊处的母材而完成钎焊的方法。由于烙铁头积聚的热量和温度有限，因此这种方法只适用于软钎焊。

烙铁头的加热方式基本分两类。一类是本身不具备热源，需靠外部热源（如煤火，气体火焰等）加热，因此只能断续地工作。它是由一个作为工作部的金属块通过金属杆与手柄相连而成的最简单的烙铁。另一类是本身具备恒定作用的热源，使烙铁头的温度保持在一定的温度范围内，可以连续地工作。所装备的热源，除少数（特大型烙铁）为气体火焰外，一般均为电加热元件，这就是当前广泛应用的电烙铁。电烙铁所用的加热元件有两种：一种是绕在云母或其它绝缘材料上的镍铬丝；另一种是陶瓷加热器，是把特殊金属化合物印刷在耐热陶瓷上经烧结而成，分别称作外热式和内热式。内热式电烙铁加热器寿命长，热效率和绝缘电阻高，静电容量小，因此在相同功率下内热式电烙铁外形比外热式小巧，特别适用于钎焊电子器件。烙铁的工作部为烙铁头，是一金属杆或金属块，它的顶端常成楔形等形状，便于钎焊时进给钎料及加热母材。通常，烙铁头采用纯铜制作，它具有导热好、易为钎料润湿的优点，但也易被钎料溶蚀，也不耐高温氧化和钎料腐蚀。为了克服这些缺点现在已较多使用镀铁的烙铁头。这种烙铁头仍用铜制作，但表面均匀地镀有一层铁，厚度为 0.2 ~ 0.6mm，由于铁不易溶于锡，因而与一般铜烙铁头相比，这种烙铁头的寿命可延长 20 ~ 50 倍。为了改善对钎料的粘附能力，镀铁烙铁头

的工作面常镀银或镀锡。为了保证钎焊质量，恒温式的电烙铁已广泛得到应用。

选用烙铁的大小（电功率）应与焊件的质量相适应，才能保证必要的加热速度和钎焊质量。烙铁钎焊多采用手工作业，因此烙铁的重量不宜过大，通常不超过 1kg，这就使烙铁积聚的热量受到限制。据此，烙铁钎焊多适用于以软钎料钎焊薄件和小件，常应用于电子、仪表等工业部门。

烙铁钎焊作业时，首先在烙铁头上沾上熔融的钎料（或在焊件待焊处添加少量钎料），然后使烙铁头与焊件紧密接触，保持最大的接触面积，以加速加热过程。待母材加热到钎焊温度，熔化钎料填满间隙。当所焊的钎缝较大时，还需手工送进丝状或棒状钎料到接头上，直至钎料完全填满间隙并沿钎缝另一侧形成圆滑的钎角为止。

烙铁钎焊一般采用钎剂去膜。钎剂可以单独施用，也可以夹钎剂芯的钎料丝形式使用。对于某些金属，烙铁钎焊时可采用刮擦和超声波的去膜方法。超声波烙铁头应由蒙乃尔合金或镍铬钢等制造。与纯铜相比，它们在液态钎料中因空化作用产生的破坏较小。

6.6 波峰钎焊

波峰钎焊的原理如同熔化钎料中浸渍钎焊，但波峰钎焊过程的特点是用泵将液态钎料通过喷嘴向上喷起，形成 20~40mm 的波峰，以波峰去接触沿传送带前进的焊件，实现钎焊连接。这种钎焊方法在电子工业中用得最广，主要适应印刷电路板制作的需要而发展起来的一种机械化钎焊方法。它是将印刷电路板的底面与波峰液态钎料相接触，实现元器件的引线 and 铜箔电路的连接。由于波峰的柔性，即使印刷电路板不够平整，只要翘曲度在 3% 以下，仍可得到良好的钎焊质量。波峰钎焊的原理见图 6-13。

波峰钎焊使用的设备是波峰钎焊机。它是一个能完成印刷板电路钎剂处理、预热、钎焊、冷却等工序的自动系统。其核心部件为一内部装备着泵和喷管的，能加热和控制温度的熔化钎料槽。

波峰钎焊的特点是：钎料液面上没有氧化膜和污垢，可经常保持

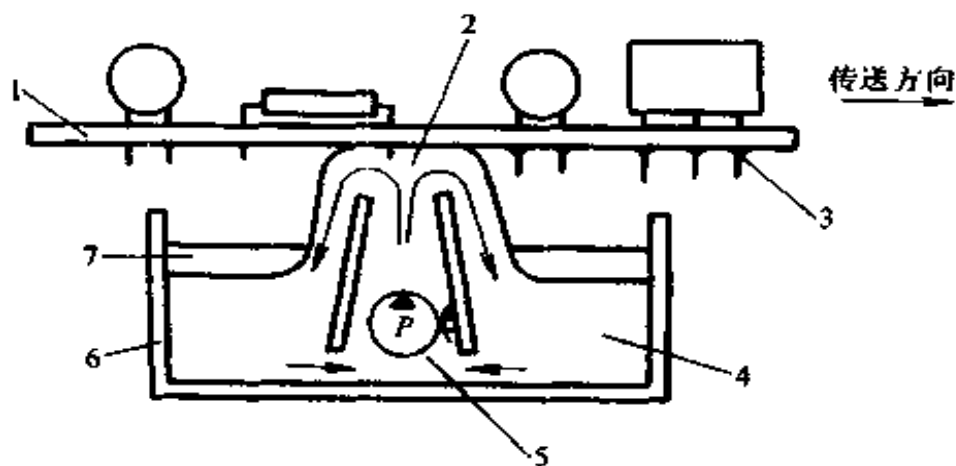


图 6-13 波峰钎焊示意图

- 1—印刷电路板 2—波峰 3—钎焊后的接头
4—熔融钎料 5—钎料泵 6—钎料槽 7—防氧化油层

清洁状态；能使印刷线路板与大量流动的钎料接触，保持良好的导热，因而可大大缩短印刷电路板与钎料的接触加热时间，提高生产率；只要求印刷电路板作直线等速运动，故使用的传送带系统简单易行。目前它们广泛用于印刷电路板的钎焊流水线上。但设备投资大、维修费用高是其缺点。

6.7 再流钎焊

再流钎焊是将预先涂以钎料（常用膏状钎料）的焊件置于加热的环境中，待钎料熔化流入间隙，形成钎焊接头的一种钎焊方法。这种方法主要用于电子元器件的表面组装（SMT），还可用于印刷电路板或集成电路的元器件与铜箔电路的连接。视加热方式的不同，有其相应的名称。如气相钎焊、红外钎焊、激光钎焊、热板钎焊、热风钎焊等。

6.7.1 气相钎焊

气相钎焊又称蒸气浴钎焊。它的原理是利用液体的饱和蒸气凝结时释放出来的蒸气潜热加热焊件并熔化钎料来实现钎焊的。它的钎焊过程是借加热器将工作液体加热至沸点温度，容器内液体上方的空间

随即充满工作液体的饱和蒸气（蒸气温度与液体的沸点一致）。通过升降机构将焊件送入此蒸气区时，由于焊件温度低，蒸气就会在焊件的表面凝结成液滴而释放出蒸发潜热，将焊件迅速而均匀地加热至与蒸气相同的温度，钎料得以熔化填缝。随后，将焊件提起退出蒸气区冷却，间隙中的液态合金逐渐凝固形成接头。

钎焊装置的主体为一容器（图 6-14），其底部置有加热器，并添注有专用的工作液体。要求这种液体的沸点温度足以使钎料熔化并与母材形成良好的结合，却不致使元件受到热损伤；热稳定性和化学稳定性高，能承受长时间的沸腾和与各种材料接触；对焊件是惰性的，不溶解和腐蚀焊件；蒸气密度大于空气，毒性小，不可燃。目前，用作工作液体的主要有氟化五聚氧丙烯和高氟三戊胺 $(C_3F_{11})_3N$ ，它们的沸点温度分别为 224°C 和 215°C ，均高于常用的锡铅钎料的熔化温度。为了防止蒸气逸入大气，

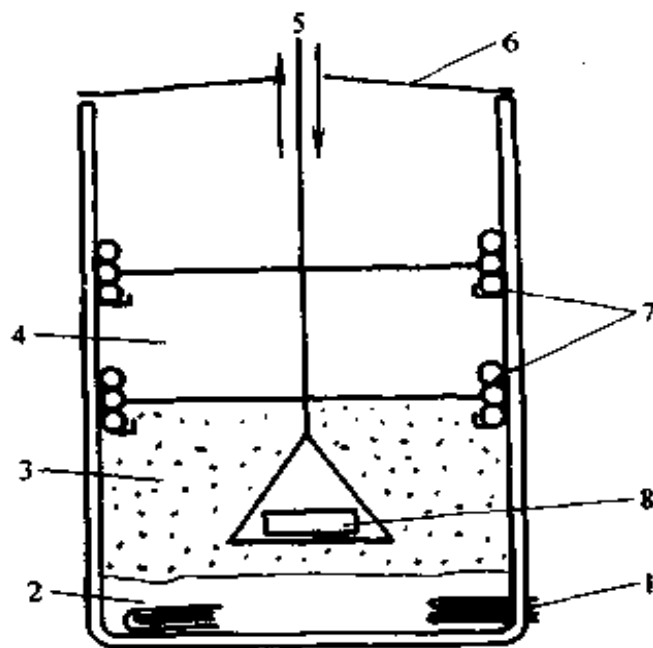


图 6-14 气相钎焊原理图

- 1—加热器 2—工作液体 3—工作蒸气
4—辅助蒸气 5—升降机构 6—顶盖
7—冷却螺旋管 8—焊件

在容器内的适当高度处置有水冷螺旋管，使之形成一定范围的工作蒸气区。此外，为此目的还经常在工作蒸气区上方覆盖另一辅助蒸气区。辅助蒸气区的工作蒸气的密度介于空气和工作蒸气之间，凝结温度低于工作蒸气，具有热稳定性和化学稳定性，并对工作蒸气和焊件具有惰性，因此成为工作蒸气与外界大气之间的稳定阻挡层。同时，此蒸气区还能减轻焊件送入时受到的热冲击。当前广泛使用的辅助蒸气是三氟二氟乙烷，它的冷凝温度为 47.5°C 。同样，为了防止辅助蒸气逸入大气，在容器内辅助蒸气区上方也安置有冷却螺旋管。

气相钎焊的主要优点是整体加热，工作液蒸气可到达每一个角落，不管焊件的形状和尺寸如何，都能保证加热均匀；能够自然地精确控制加热温度，不会出现过热；加热迅速、效率高，对于一般的印刷电路板钎焊时间为 $10 \sim 15\text{s}$ ，即使大件也只需 $30 \sim 90\text{s}$ ；饱和蒸气排除了空气，焊件氧化不明显，不需使用活性强的钎剂，甚至不用钎剂。因此钎焊质量好、可靠性大、生产率高，已应用于电子器件的钎焊。其缺点是所用的加热液体介质为含氟物质，如操作不当，液体介质经热分解会产生有毒的氟化氢和异丁烯气体，对环境有破坏作用。此外，其价格昂贵，也不便于流水生产，且可选的介质品种不多，钎焊温度受限制，目前只适用于锡铅钎料的软钎焊。

6.7.2 红外钎焊

红外线的波长介于红光和微波之间，是肉眼不能见的一种电磁波，它有显著的热效应。红外钎焊就是利用红外线辐射能来加热和熔化钎料的钎焊方法。红外线很容易被物体吸收，在通过有悬浮粒子的物质时不容易发生散射，具有较强的穿透能力。因此，在工业上被广泛用作热源。

用作钎焊热源的红外线辐射器有多种形式，其中常用的红外线辐射器是大功率石英白炽灯（图 6-15）。钎焊时，应根据焊件的外形与结构合理地布置石英灯组，使之组成朝向焊件面的辐射束，为了充分利用它们的功率，石英灯常配备适当的反射器。它们的工作面镀银或镀铝以提高反射能力。这类装置的主要优点是能够获得很高的能量照度（可达 $60 \sim 100\text{kW/m}^2$ ），若在脉冲条件下可达 1600kW/m^2 。因此适用于形状较简单的薄壁结构的高温钎焊，如采用两排相当放置的石英灯组装置，成功地钎焊了蜂窝壁板。

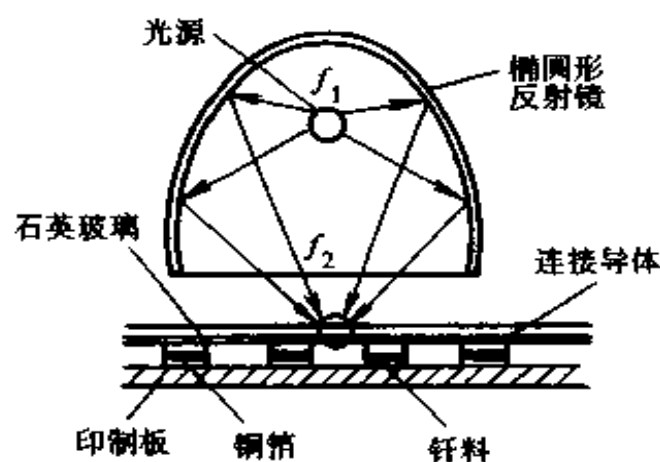


图 6-15 红外线钎焊原理图

红外线隧道加热炉广泛应用于印刷电路板和微电子器件的再流钎焊。整个加热炉分成几段温区（预热区、再流钎焊区、冷却区），分别进行温度控制，适用于流水线大批量生产。再流区温度一般在 $230\sim 240^{\circ}\text{C}$ ，时间为 $5\sim 10\text{s}$ 。红外线辐射加热法的缺点是随表面组装元件的表面颜色的深浅、材料的差异与距离热源的远近，所吸收的热量有所不同；体积大的元件会对体积小的元件造成阴影，使之受热不足而影响钎焊质量。因此，温度的设定应注意兼顾周到。

6.7.3 激光钎焊

激光束是用激光器发射的高相干性的、几乎是单色的、高强度的细电磁辐射波束，它能聚集在直径仅为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 的小面积中，从而得到很高的能量密度（最小加热面积为 10^{-7}cm^2 ，最大热流密度为 $1\times 10^9\text{W}/\text{cm}^2$ ）。激光钎焊是利用激光束优良的方向性和高功率密度的特点，通过光学系统将激光束聚集在很小的区域和很短的时间内使钎焊处形成一个能量高度集中的局部加热区，实现钎焊的一种方法（图 6-16）。

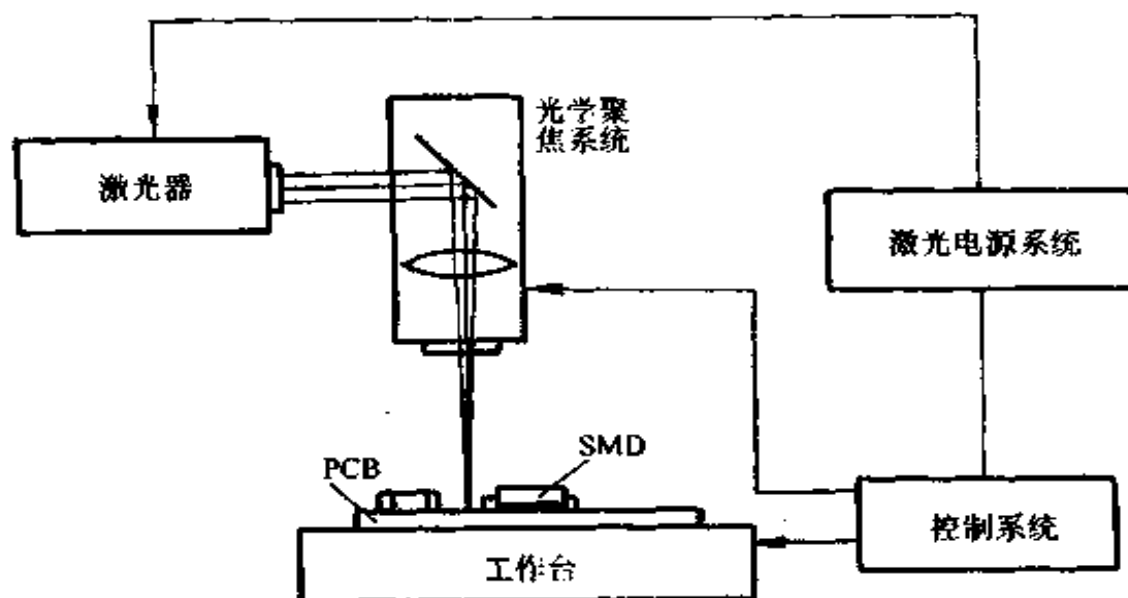


图 6-16 激光束加热再流软钎焊示意图

常用的激光器有 CO_2 和 YAG 两种， CO_2 激光器发射 $10.6\mu\text{m}$ 波长的光束。YAG 激光系统工作波长则为 $1.06\mu\text{m}$ ，仅为 CO_2 激光的 $1/10$ 。在吸收特性上也有一些差异，YAG 激光能量可被软钎料膏迅

速吸收，不易被电路板的陶瓷基板等绝缘材料吸收。激光束可在 $\phi 0.3 \sim 1.5\text{mm}$ 范围内调节。

激光束可用来实现对微小面积的高速加热，并保证毗邻的母材性能不产生明显的影响。它的这种加热特性适宜于钎焊连接对加热敏感微电子器件。激光钎焊所用的激光辐射可以用简单的光学系统来实现聚焦，可在任何气氛中使用。尽管激光的能量集中，单点加热迅速，它的缺点是只能进行逐点扫描，不能使电路板整体一次完成钎焊，且它的设备投资高。

6.7.4 热板钎焊

热板传导加热法是应用最早的再流软钎焊方法，其工作原理如图6-17。发热器件为块形板，放置在传送带下，传送带由导热性良好的材料制成。待钎焊的电路板放在传送带上，热量先传至电路板，再传至软钎料膏与元器件，软钎膏受热熔化进行再流钎焊。

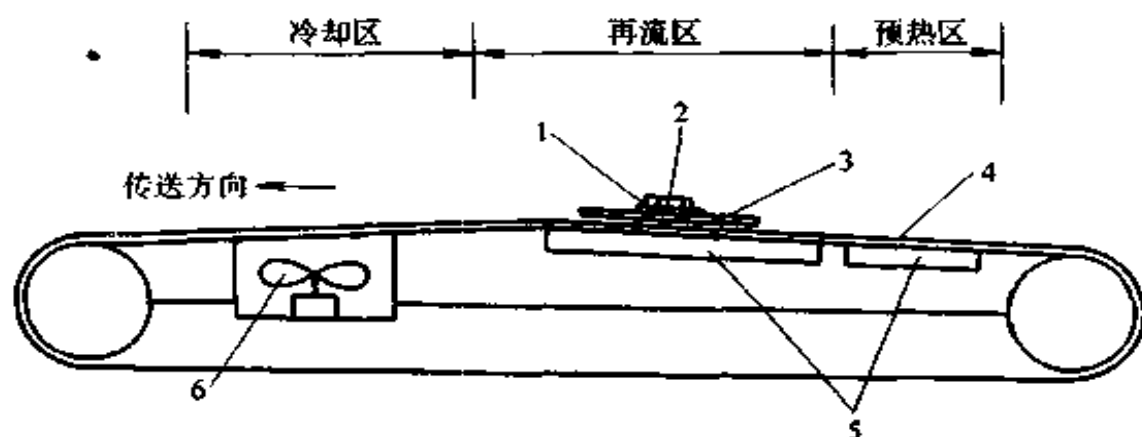


图 6-17 热板传导再流软钎焊示意图

1—软钎料膏 2—SMD 3—电路板 4—传送带 5—加热板 6—风扇

热板传导加热法一般都有预热、再流、冷却三个温区的作业顺序。适于高纯度氧化铝基板、陶瓷基板等导热性良好的电路板的单面贴装形式。普通覆铜箔层的压制板类电路板由于其导热性能较差，钎焊效果不佳。

目前，热板钎焊大量应用在混合集成电路和厚膜电路的生产中。

6.7.5 热风钎焊

热风对流法是利用加热器与风扇，使炉膛内空气不断加热并进行对流循环。虽然有部分热量的辐射和传导，但主要的传热方法是对流。热风钎焊的示意图见图 6-18。在再流区内可以分成若干个温区，分别进行温度控制，以获得合适的温度曲线，必要时可向炉中充氮气，以减少钎焊过程中的氧化作用。

热风钎焊的加热均匀、温度稳定，但设备投资较高。此法的生产容量大，适合于大批量生产。

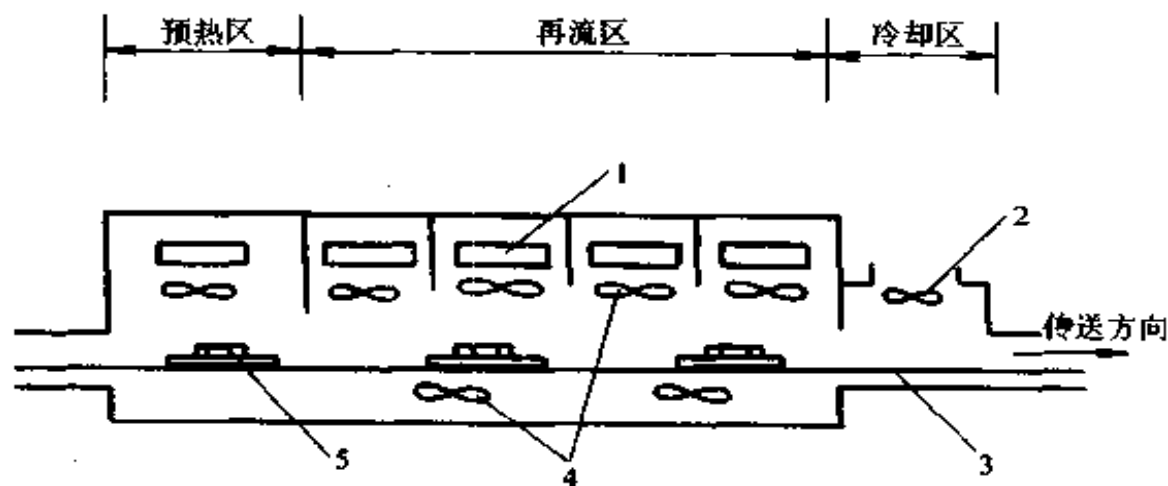


图 6-18 热风对流再流软钎焊示意图

1—加热器 2—冷却风扇 3—传送带 4—对流风扇 5—PCB 组件

6.8 其它钎焊方法

6.8.1 刮擦钎焊

在钎焊某些金属及合金时，可利用机械刮擦作用破除母材表面的氧化膜，促使液态钎料与母材的直接接触条件。采用机械刮擦去膜过程的钎焊方法称为刮擦钎焊。机械去膜过程有两种不同的形式：一种是借助于坚硬的物体，如刮刀、锉、钢刷、烙铁等，在液态钎料层下沿母材表面加一定的压力拖动来实现；另一种是直接利用钎料棒端头，施以压力沿加热到钎焊温度的母材表面拖动，在拖动过程中，即在破除氧化膜的同时钎料端头就地受热熔化。这种去膜过程的特点

是，只有去膜工具刮擦到的地方表面氧化膜才会被破除，刮不到的地方氧化膜依然存在，因此，不能实现液态钎料的毛细填缝。除可用于直接钎焊不要求填缝的角接接头外，一般只作钎焊接头的第一步，即在钎焊面上涂敷钎料层。显然，这种去膜过程并不先进，但低温钎焊某些金属时，例如铝及铝合金，由于缺少可用的钎剂和气体介质，这种去膜方法却是简单有效的。

6.8.2 超声波钎焊

超声波是频率高于 20kHz 的纵波。当超声波作用于液体中时液体内部将产生空化作用。超声波的传播使液体交替地受到压力和张力的作用，因而相应地发生压缩和膨胀。如果超声波作用于液体的力的变化值等于或大于大气压力，则在纵波的负波节处出现零压力或负压力，它可使液体因膨胀破裂，形成空穴。空穴最容易在液体内部脆弱的区域产生，例如在有杂质存在的部位。空穴一产生，溶解在液体中的气体或液体的蒸气即会向其中聚集。当超声波传播液体受压时，空穴闭合，产生极高的局部压力（可达数百大气压），这就是空化作用。如果这种作用发生在固体表面旁时，空穴闭合所产生的高压以及固体表面处液体的相当大的局部位移，对固体表面产生强大的机械冲击作用。液体越稠，这种冲击作用越强烈。超声波去除金属表面氧化膜的作用，就是依靠它在液态钎料中的空化作用对母材表面的机械冲击。因此，表面氧化膜也是在机械作用下破除的，只是导致它们机械破坏的力是由物理作用产生的。所以，它也有着和机械去膜过程相似的特点：难以直接用于钎焊接头，而大多用于钎焊接头前对钎焊面涂敷钎料层。

超声波去膜可以采取两种办法。一种是通过烙铁将超声波传入钎焊面上的液态钎料中。这种方式最为简单，但生产率低，只适用于小件；另一种是将超声波装置连接于熔化钎料槽。工作时通过槽子把超声波传入钎料。需要钎焊的零件浸入钎料槽内。这种方式的优点是一次能涂敷全部表面，生产效率高。但由于要振动整个钎料槽，要求大功率的超声设备。

目前，超声波去膜主要用于铝的软钎焊。这是因为对此缺少可用

的钎剂和气体介质来去膜，而超声波却能较好地满足此要求。钎焊温度高于 400°C 时，超声波的空化作用将对铝合金本身起破坏作用，因而不宜采用。此外，超声波去膜也可用于诸如硅、玻璃和陶瓷等难钎焊的材料。

6.8.3 光束钎焊

光束钎焊是利用氙灯的光辐射能进行钎焊加热的方法，其加热原理见图 6-19。在椭圆反射器的第一焦点位置放置氙弧灯作光源，它发出的强光经椭圆反射镜聚光，在其第二焦点处形成高能量密度的光束。将待焊零件放置在第二焦点处，照射到焊件表面的光辐射能转变为热，即可进行钎焊。此时接头单位面积上接收的热量同光束的能量密度和照射时间成正比。光束的强度与照射时间的乘积就是供给焊件的能量。调节此能量即可控制加热温度。另外，调整零件与第二焦点的相对位置，可以改变零件表面的加热斑点面积和光束能量密度，以适应不同的钎焊需要。这种钎焊方法既可用于低温钎焊，也可用于高温钎焊。

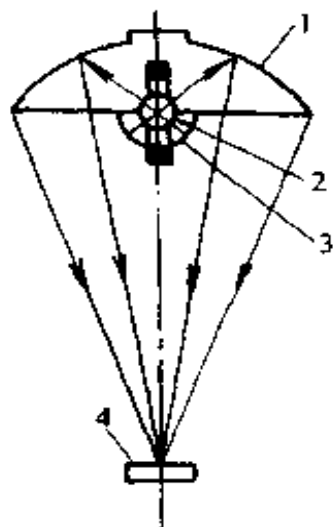


图 6-19 光束钎焊原理图

- 1—反射屏
- 2—氙弧灯
- 3—逆向反射器
- 4—焊件

此钎焊方法具有下列优点：能量可无接触地传递给焊件，具有较大的灵活性；可以有效地加热钎焊各种材料而不受它们的热物理性能和电磁性能的限制；在空气、保护气氛和真空中均可进行钎焊。但是，由于受能量的限制，这种钎焊方法所能连接的焊件大小受到限制。

6.8.4 电子束钎焊

电子束具有很高的能量密度（最小加热面积为 10^{-7}cm^2 ，最大热流密度可达 $5 \times 10^8 \text{W}/\text{cm}^2$ ），在它的聚焦点能使金属迅速地加热。电子束钎焊的加热原理与电子束焊相同，是利用在真空下，被磁的或静电的聚焦棱镜聚焦的电子流在强电场中高速地由阴极向阳极运动中，

电子与零件的钎焊面（阳极）碰撞的动能转变为热能来实现钎焊加热。与电子束焊不同的是，钎焊要求的加热温度要低得多，因此通常采用扫描的或散焦的电子束。

电子束钎焊与其它钎焊方法相比有重大的缺点，它要求使用高真空和高精度的操纵装置，设备复杂、钎焊过程生产率低、成本高。

6.9 各种钎焊方法的比较

为了获得优质的钎焊接头，应根据所钎焊的材料、形状结构及尺寸、接头的使用性能、生产效率及所具备的条件等因素，正确地选择相应的钎焊方法。表 6-6 列出了各种钎焊方法的比较，备选择时作参考。

表 6-6 各种钎焊方法的比较及应用范围

钎焊方法	优 点	缺 点	应用范围
火焰钎焊	(1) 设备简单，价格低 (2) 热源可以移动，操作灵活 (3) 过程可以实现自动化	(1) 钎焊零件发生氧化 (2) 局部加热，工件易变形 (3) 需熟练的技术	钢、合金钢、硬质合金、铜、铝、铸铁的钎焊
空气炉中钎焊	(1) 设备投资少 (2) 加热均匀，零件变形小 (3) 生产效率高，可实现自动化	(1) 钎焊零件发生氧化 (2) 钎料需预置	适用多种金属的钎焊，如各种钢种、铜、铝、铸铁等
保护气氛炉中钎焊	(1) 温度可正确控制 (2) 均匀加热，工件变形小 (3) 钎焊时得到保护，不被氧化 (4) 易实现机械化，适于大量生产	(1) 设备投资大 (2) 大多数情况下须用夹具 (3) 钎焊过程不易观察	适用于多种黑色金属及铜、铝的钎焊

(续)

钎焊方法	优点	缺点	应用范围
真空炉中钎焊	(1) 可不加钎剂进行钎焊 (2) 钎焊后零件表面光洁 (3) 钎焊接头抗腐蚀性好 (4) 可钎焊难钎焊的金属及陶瓷等	(1) 设备投资大 (2) 生产效率低	用于铝合金、钛合金、高温合金、耐熔合金以及陶瓷的钎焊
感应钎焊	(1) 加热速度快, 成本低 (2) 可观察钎焊过程 (3) 适用单件和大量生产	(1) 设备投资大 (2) 钎焊温度不易控制 (3) 局部加热引起工件变形 (4) 空气中加热易使工件氧化	多适用于导磁性好的金属, 如各种钢、铸铁及硬质合金的钎焊
电阻钎焊	(1) 加热迅速, 生产率高 (2) 热量集中, 对周围的热影响小 (3) 可以观察钎焊过程 (4) 易实现自动化	(1) 调节温度困难 (2) 零件尺寸和形状受限制 (3) 金属发生氧化	刀具、带锯、电机绕组、电触点及电子元器件的钎焊
电弧钎焊	(1) 加热快 (2) 操作灵活、方便	(1) 焊件易氧化 (2) 需使用电弧面罩观察	电机绕组、汽车蒙皮等钎焊
盐浴钎焊	(1) 零件加热均匀 (2) 加热迅速, 生产效率高 (3) 钎焊温度容易控制 (4) 作业人员的技术要求不高	(1) 熔盐对环境有污染 (2) 用电量大 (3) 钎焊后必须严格清除残渣 (4) 设备价格高	各类钢、高温合金、铜及铜合金、铝及铝合金的盐浴钎焊
浸渍钎焊	(1) 迅速而均匀地加热零件 (2) 精确控制温度 (3) 操作技术要求不高 (4) 生产效率高	(1) 设备价格高 (2) 钎料消耗量大 (3) 钎料须经常更换	钢、铜及其合金、印刷电路板的软钎焊

(续)

钎焊方法		优 点	缺 点	应用范围
扩散钎焊及接触反应钎焊		(1) 钎焊接头质量高 (2) 钎缝金属量少, 并易控制 (3) 易实现精密连接	(1) 钎焊金属常需涂以过渡金属 (2) 常需在气体保护或真空下进行 (3) 钎焊时间长	同种或异种金属的精密连接
烙铁钎焊		(1) 设备简单 (2) 操作方便、灵活	(1) 只应用于易熔钎料 (2) 钎焊接头强度不高	适用于软钎焊
波峰钎焊		生产效率高	设备投资大	印刷电路板的引线及铜箔电路的软钎焊
再流钎焊	气相钎焊	焊件受热均匀	工作液价格贵, 所选温度受限	印刷电路板、集成电路板的软钎焊
	红外钎焊	可连续生产	需专用设备	
	激光钎焊	热量集中, 焊点周围不受热影响	只能单点扫描, 设备昂贵	
	热板钎焊	可连续生产	需专用设备	
	热风钎焊	受热均匀, 生产率高	需专用设备	

第7章 钎焊缺陷及质量检验

钎焊生产过程中,由于钎焊材料,结合工艺及钎剂种类等因素,接头中常常会产生一些缺陷,缺陷的产生和存在给钎焊质量和使用寿命带来不利的影响。产生缺陷的原因很多,影响因素也比较复杂。本章仅就缺陷种类,产生原因及质量检验方法进行讨论。

7.1 钎焊缺陷的种类及产生原因

7.1.1 钎焊缺陷的种类

在钎焊过程中,为了使母材和钎料能很好地润湿和防止结合部的再氧化,常常使用各类钎剂或者在保护气氛中进行。如果焊前工件表面处理不充分,钎料和钎剂的种类及数量搭配不当,接头形式或接头间隙不合适,加热温度或保温时间不合理,钎焊操作不当等,均会使接头中产生各类缺陷。缺陷的种类,形态及分布状况随钎焊方法和工艺条件的不同而有很大差别。缺陷的分类方法多种多样,可分为外观性缺陷(夹气、夹渣),溶蚀性缺陷和产生在母材本身及焊缝金属内部的裂纹。另外,从发生部位和发生时间上可把钎焊接头中的缺陷分类如表7-1所示。

表 7-1 钎焊接头的缺陷

发生部位	缺陷种类	发生时间	备 注
钎焊层内	空隙或未填满	钎焊中	钎剂过多
	微小缺陷(针状气孔)	钎焊中	钎剂过多
	裂纹	钎焊中	界面腐蚀时焊后产生
母材内	母材开裂	钎焊中或焊后	应力或应力腐蚀裂纹
	母材晶粒脆化	钎焊中	因过热产生晶粒粗大
	母材腐蚀	焊后	腐蚀或孔蚀
外观	钎料从接头中流出	钎焊中	过热

(续)

发生部位	缺陷种类	发生时间	备 注
金属组织	焊角未形成	钎焊中	钎料不足或过热
	钎料氧化	钎焊中	钎剂不足, 保护不好
	腐蚀	焊后	环境潮湿, 腐蚀或绝缘不良
	氢脆	钎焊中	精炼或导线用铜
	碳化物析出	钎焊中	奥氏体不锈钢
	应力腐蚀	钎焊中	钎料脆性大, 不锈钢, 镍合金
	硫脆	焊后	镍或镍基合金, 生成低熔点 Ni-Si 化合物, 产生晶界裂纹
	磷脆	钎焊中	铁, 镍和磷反应生产脆性化 合物, 但使用 Ni-P 钎料时不 产生
	界面腐蚀	焊后	奥氏体不锈钢
	应力腐蚀	焊后	奥氏体不锈钢
	形成化合物	钎焊中或焊后	Cu-Sn 化合物等

7.1.2 缺陷的发生原因及改进措施

7.1.2.1 钎缝的不致密性缺陷

钎缝的不致密性缺陷是指钎缝中的气孔、夹渣、未钎透和部分间隙未填满等缺陷。它们虽然存在于接头内部, 但经机械加工后会暴露在表面。这些缺陷会降低焊件的气密性、水密性和导电能力, 使接头的实际承载面积减少、接头强度下降。对于采用钎剂钎焊的铝件, 表面的不致密性缺陷往往导致接头的腐蚀破坏。

钎缝的不致密性缺陷是实际生产中经常出现的问题, 如表 7-2 所示, 其产生的主要原因有: 焊前清洗不干净, 接头间隙不合适, 选用的钎料和钎剂的成分或数量不当, 钎焊加热不均匀等。

在实际钎焊过程中, 不致密性缺陷的产生与钎焊过程中钎料熔化及钎剂的填缝过程有很大关系, 其根本原因是钎料和钎剂熔化后不是均匀整齐地流入间隙, 而是以不同速度和不规则的路线流入间隙。要完全消灭这缺陷是很困难的, 但采取相应的措施可以减少缺陷的产生, 主要方法如下:

表 7-2 不致密性缺陷的产生原因

缺陷形式	主要产生原因
部分间隙未填满	焊件表面清理不彻底 装配时零件歪斜；接头间隙过大或过小 钎剂选择不合适，如活性差或熔点不当
气孔	钎焊工艺（主要是温度）不当 钎焊前零件表面清洗不当 钎剂选择不当 母材和钎料中析出气体
夹渣	钎剂选择不合适（粘度或密度过大） 钎剂使用量过多或过少 间隙选择不合适 钎料与钎剂的熔化温度不匹配 加热不均匀

(1) 适当增大钎缝间隙 可增强液态钎料的填缝能力，有助于钎料均匀填缝，减少夹气夹渣缺陷的产生。从图 7-1 可知，间隙增大

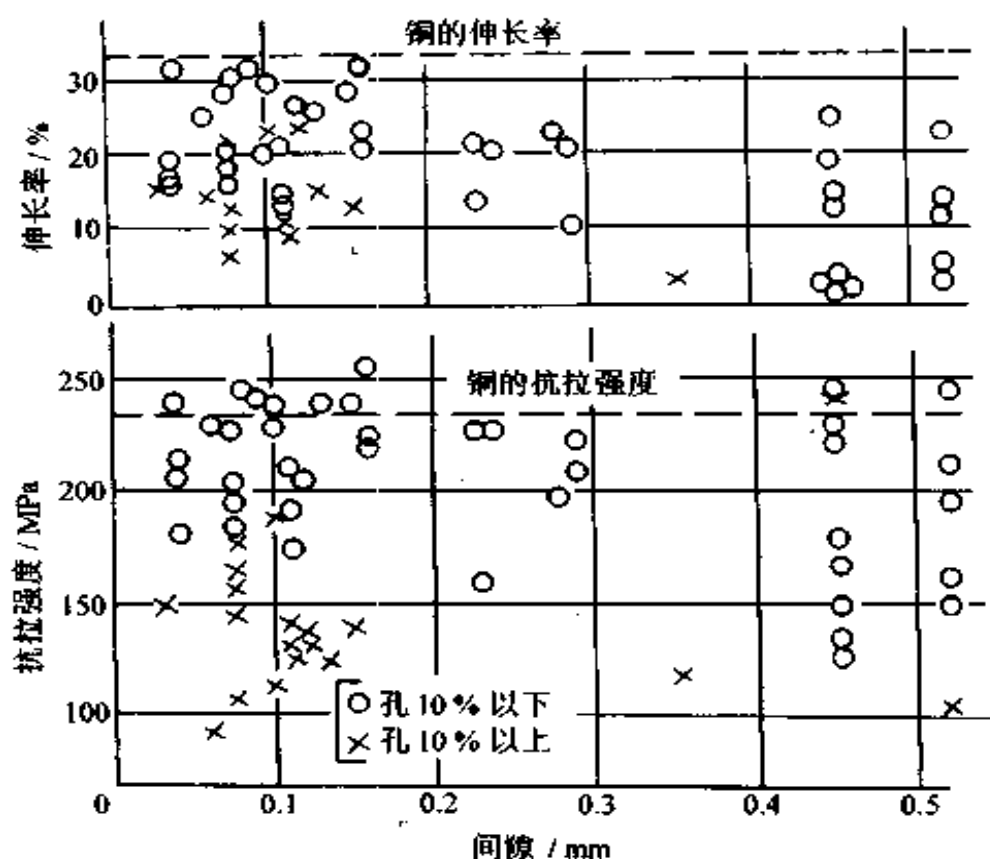


图 7-1 钎缝间隙和强度、伸长率的关系
(母材：铜，钎料：Bcnp-5)

到 0.4mm 以上，气孔率均下降到 10% 以下。

(2) 采用不等间隙（不平行间隙） 采用不等间隙钎焊的致密性比平行间隙好，原因是钎料在不等间隙中能自行控制流动路线和调整填缝前沿；夹气夹渣具有定向运动的能力，可以自动地由大间隙端向外排除。不等间隙接头的示意图如图 7-2 所示，其夹角 α 以 $3^\circ \sim 6^\circ$ 为宜。当完全采用不等间隙时，难以保证焊件的装配精度，因此可以采用部分不等间隙，这样即可以获得一定宽度的致密接头，又可以保证焊件的装配精度。

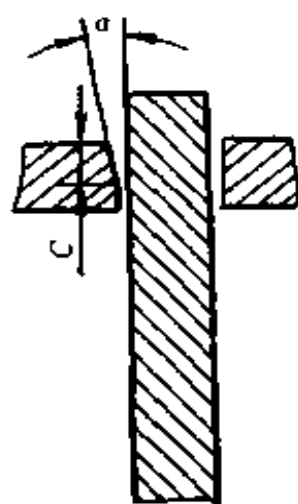


图 7-2 不等间隙接头示意图

7.1.2.2 母材的自裂及钎焊接头的裂纹

钎焊时，除钎缝金属容易产生裂纹外，许多高强度材料如不锈钢、镍基合金、铜镍合金等更容易产生自裂。例如用 H62 黄铜钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和钎焊某种铜合金时，这种母材自裂现象相当普遍。这种自裂现象常出现在焊件受到锤击或有划痕的地方以及存在冷作硬化的焊件上。

产生裂纹及母材自裂的原因很多（见表 7-3），主要是焊件刚性大，钎焊过程中又产生了较大的拉应力，当应力值超过材料的强度极限时，就会在钎缝中产生裂纹或在母材上产生自裂。

表 7-3 母材自裂及接头裂纹产生的原因

裂纹形式	主要产生原因
钎焊接头的裂纹	钎料的固相线与液相线相差过大 钎焊过程中产生过大的热应力 钎料凝固过程中工件振动
母材的自裂裂纹	钎焊金属过热或过烧 母材的导热性不好或加热不均匀 液态钎料向母材晶间渗入 钎料与母材热膨胀系数差别过大产生热应力 母材中的氧化物与氢反应生成水（水蒸气）

为了消除钎焊接头的裂纹和母材的自裂，应从减小内应力出发，

可以采取以下措施：

- 1) 采用退火材料代替淬火材料。
- 2) 有冷作硬化的焊件预先进行退火。
- 3) 减小接头的刚性，使接头加热时尽量能自由膨胀和收缩。

4) 降低加热速度，尽量减少产生热应力的可能性；或采用均匀加热的钎焊方法，如炉中钎焊等，这不仅可以减少热应力，而且冷作硬化等造成的内应力也可以在加热过程中消除。

5) 在满足钎焊接头性能的前提下尽量选用低熔点的钎料，如用银基钎料代替黄铜钎料。由于钎焊温度较低，造成的热应力较小，并且银基钎料对不锈钢的强度和塑性降低的影响比黄铜钎料小。

6) 用气体火焰将装配好的焊件加热到足够高的温度以消除内应力，然后将焊件冷却到钎焊温度进行钎焊。

7.1.2.3 外观缺陷

外观缺陷是指存在于钎缝和母材表面的缺陷，主要有母材溶蚀和钎缝表面成形不好。溶蚀是一种特殊缺陷，一般发生在钎料安置处，其形式如图7-3所示，它是母材向钎料过度溶解所造成的。钎缝表面成形不好主要是指钎料流失，钎缝表面不光滑或没形成圆角（见图7-4），各类缺陷的形成

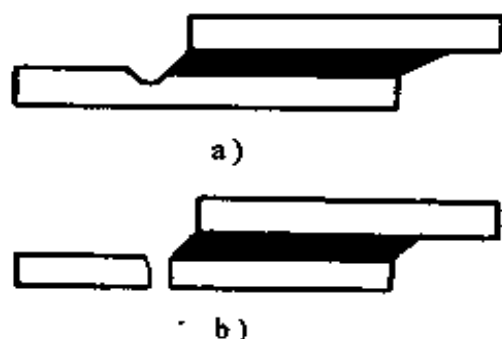


图 7-3 溶蚀缺陷

a) 溶蚀 b) 溶穿

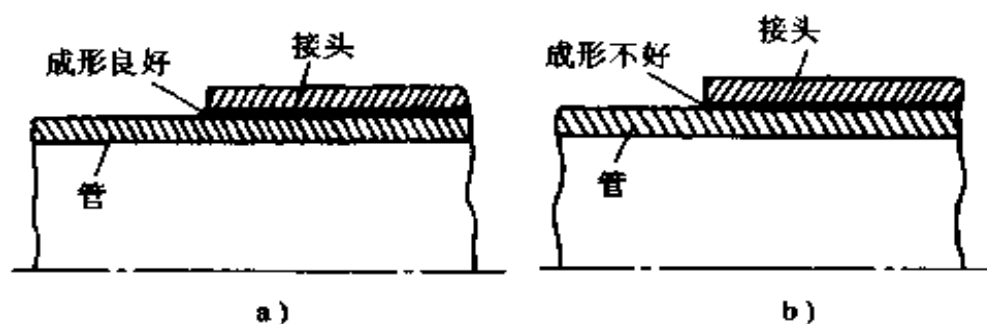


图 7-4 钎缝成形示意图

a) 成形良好 b) 成形不好

原因见表 7-4。

表 7-4 外观缺陷产生的主要原因

缺陷形式	主要产生原因
钎料流失	钎焊温度过高 钎焊时间过长 钎料与母材发生化学反应 钎剂，钎料量过大
钎缝表面不光滑或没形成圆角	钎剂用量不足 钎焊工艺选择不当 温度过高或时间过长 钎料金属晶粒过大 钎料过热（共晶钎料）
母材发生溶蚀	加热温度过高 加热时间过长 钎料过多

正确地选择钎料和钎焊工艺是避免产生外观缺陷特别是避免产生溶蚀的重要措施。钎焊温度越高，母材元素溶解到液相钎料中的数量越多，溶解速度也越大；保温时间过长，将为母材与钎料相互作用创造更多的机会，也容易产生溶蚀。此外，钎料成分对溶蚀也有很大影响，除参考有关文献进行选择钎料外，钎料用量等也应严格控制。

7.2 钎焊的质量检验方法

钎焊组件或部件的检验是钎焊过程的最后一道工序，对于保证钎焊构件的质量及使用性能至关重要。表 7-5 示出钎焊接头检验方法可分为非破坏性检验和破坏性检验。所选择的方法应根据使用要求而定，和用户协商后，可以用试验样件，也可以用完成的钎焊件来进行试验。

表 7-5 钎焊接头的检验方法分类

非破坏性检验	外观检验	
	致密性检验	气密性试验 水压试验 氨渗透试验 氨检漏试验
破坏性检验	无损检验	渗透探伤（荧光法，着色法） 磁粉检验 射线探伤（X线， γ 线，中性粒子） 超声波探伤 导热性测试
	金相检验	宏观组织分析 微观组织分析
	化学分析试验	化学分析 腐蚀试验
	力学性能试验	拉伸（或剪切）试验 撕裂试验 弯曲试验 冲击试验 硬度试验 疲劳试验 高温蠕变试验

7.2.1 非破坏性检验

7.2.1.1 外观检查

外观检验是一种最基本、最一般的检验方法，它不需要检验设备，具有简单、迅速、经济等特点。但由于该方法是凭检验者的经验进行感官检查，存在着因人而异和误判等缺点。

检验时，必须将钎缝区的钎剂残渣特别是腐蚀性强的铝钎剂残渣彻底清除，用肉眼观察钎缝外形是否光滑，钎角是否填满；用低倍放大镜观察是否存在裂纹、未焊透、表面气孔及母材溶蚀等缺陷。

7.2.1.2 致密性检验

当钎接头具有气体和液体密封要求时，应进行致密性检验。一般情况下承受低压的组件可以直接采用气压试验；承受高压的组件，

则应在气压试验之前先进行水压试验，采用的水压和气压的大小及保持时间应按产品技术条件确定。对于重要构件或性能要求很高的产品应采用氨渗漏试验或氨检漏试验。

(1) 水压试验 水压试验时，组件（或容器）内充满水并进行密封，然后用水泵将容器内的水压提高到试验压力，保持一定时间后，检查接头有无渗水或开钎的情况。水压试验的压力应为组件所承受的最大工作压力的 1.5 倍，在试验过程中水压试验的压力始终要高于工作压力。

(2) 气压试验 气压试验可以从以下三种方法中选择一种进行，气体采用空气。

封闭组件的所有开口，然后充气加压，将组件浸入水中，注意观察是否出现有泄漏的气泡上升。

封闭组件的所有开口，充气加压，达到一定压力后，封闭气体入口，把空气密封在组件内，注意观察组件内气体压力在一段时间内有无变化（应校正温度）。

封闭组件的所有开口，然后充气加压，在接头区域外表面上涂一层肥皂水或常用的指示剂，注意观察形成气泡的位置。

(3) 氨渗透试验 氨渗透属于比色检漏，以氨为示踪剂，试纸或涂料为显色剂。进行渗漏检查和确定贯穿性缺陷的位置时，应先在被检焊缝上贴上比焊缝宽的石蕊试纸或涂料显色剂，然后向容器内通入规定压力的含氮气的压缩空气，保压 5-30min，检查试纸或涂料，未发现色变为合格产品。该方法的检漏速率可发现 $31\text{cm}^3/\text{a}$ 的渗透量。

(4) 氨检漏试验 氨检漏试验通常用来检查制冷设备内的组件以及必须检出最微小泄漏的小型组件。该方法使用的设备是质谱仪，氮气为传感介质，可以发现千万分之一的氮气存在，相当于标准状态下氮气泄漏率为 $1\text{cm}^3/\text{a}$ 。实际检验时，把待检的组件放在装有氮气的容器内，或者把氮气吹向组件的表面。质谱仪与组件的真空部分接通，最好接在辅助的扩散泵和机械泵之间。在检验十分微小的泄漏时，如接头表面有液体存在，则有可能发生泄漏处被堵塞的潜在问题，应采取适当的干燥工艺，彻底消除组件内的所有液体和蒸气。例

如，可把组件加热到高于液体沸点的温度，同时吹以干燥空气。

在制冷工业中，为了测定微小泄漏，还可以采用氟利昂进行压力试验。检验时，可采用空气-乙炔气检漏仪或空气-液化石油气卤素检漏仪从检验区内抽取气体样品，如有泄漏迹象，即可由仪器火焰颜色的变化做出判定，精度更高的电子型检漏仪器，可检测十分微小的泄漏。

7.2.1.3 无损检验

(1) 渗透探伤 渗透探伤是利用荧光染料（荧光法）或红色染料（着色法）渗透剂的渗透作用来显示缺陷痕迹的一种无损检验方法。常用来检测磁性材料和非磁性材料钎焊接头的表面缺陷，可以检测出填角钎缝上存在的裂纹和气孔，但由于钎焊填角上存在着细小的不规则焊波，有时就很难做出准确判断。利用这种方法也可以观察到钎料的不完全流布和填角不完整缺陷。检验时，可在接头表面涂刷上带有红色染料或荧光染料的渗透剂，它们能够渗入到表面缺陷中，在用清洗液将存在于表面上的渗透剂清洗干净后，再喷上一层显示剂，使缺陷内残留的渗透剂渗出，便显示出缺陷的痕迹，基本操作步骤见表 7-6。应注意的是着色法所显示的缺陷在一般光线下能看到红色痕迹；荧光法所显示的缺陷痕迹，在紫外线照射下发生明显的黄绿色荧光。着色法的精度和灵敏度比荧光检验更高，且更实用于大型构件，如检验后要对缺陷进行修补，尽可能避免采用这类方法，因渗入缺陷中的渗透剂难以完全清除。

表 7-6 渗透探伤的基本操作步骤

工序名称	作	用
预清洗	清洗零件表面的铁屑、铁锈、毛刺、氧化皮，熔渣、油污等表面污染物	
渗透	涂上适当的渗透剂，通过毛细作用使表面开口的缺陷产生液体的渗透	
中间清洗	把零件表面多余的渗透剂从被测表面清除掉，但保留缺陷处的渗透液	

(续)

工序名称	作	用
干燥	在显像之前必须使被测表面干燥(溶剂挥发很快,水则要很常时间),否则剩余的溶剂和水将影响显像剂的效果	
显像	显像剂将缺陷处的渗透液吸附到零件表面,好似“流血”,显示的缺陷比真实的缺陷大	
观察	经过一段时间间隔再评判显示的缺陷。着色探伤用的照明光源为日光或白光;荧光探伤用的照明光源为黑光灯或紫外线灯	

(2) 磁粉检验 该方法一般不用于钎焊接头,因为大多数的钎料都是非磁性的,但是钎焊蜂窝状的金属构件,可以用此方法来检验。利用一种含有细磁粉的薄膜胶片,可以记录钎焊接头中的质量变化情况,在短短的几分钟内,胶片凝固,而把磁粉“凝结”在一定位置上。利用观察胶片上的磁粉分布图形,可以确定缺陷的形状。检验结束后,可以把胶片剥下来,作为一种永久性的记录加以保存。这种方法设备简单,仅用充磁与退磁设备,探伤速度很快,适用于批量产品的检验。

(3) 射线探伤 射线探伤中主要应用的射线是 X 射线, X 射线照相法是检查钎焊接头内部缺陷的常用方法之一。其原理是根据被检工件与内部缺陷介质对射线能量衰减程度不同,使透过工件后的射线强度分布产生差异,在感光胶片上获得缺陷投影所产生的潜影,经过暗室处理后获得缺陷影像,再对照有关标准进行接头质量评定。该方法能检查气孔等有厚度差的钎缝,还可以用来评定蜂窝结构钎件的钎料流布和填角情况。应注意,对于厚度大、间隙很小的接头,会使灵敏度下降或产生漏检。

钎缝射线照相法探伤的工作过程如下:

焊缝表面质量检查 探伤前,应将在底片上易形成与焊缝内部缺陷相混淆的表面缺陷(钎剂残渣等)予以清除。

核对实物及填写委托检验单 焊接检验员核对被检工件并填写射线探伤委托单,主要填写内容有工件编号、厚度、被检钎缝位置和数量、钎缝分段号等并画出相应的示意图。

开机使探伤设备预热。

贴片 将胶片暗盒固定在被检钎缝的相应位置上，并贴上定位标记（中心标记、搭接标记）、识别标记（工件编号、钎缝编号、部位编号）和象质计。

对位选焦距 将 X 射线光束对准待检部位，垂直照射时，应将射线束中心垂直穿过被检区段的正中心。

开机透照。

胶片处理（显影和定影）。

底片评定 底片评定工作由二级以上探伤人员在评片室内利用观片灯、黑度计等仪器和工具进行，主要评定底片的质量和确定缺陷的性质。评定时，必须考虑母材和钎料对 X 射线吸收特性的差别，特别是在评定穿过管接头的底片时必须特别小心，因底片上的影相可能包括接头的两个侧面。

签发检验报告并将底片及资料存档 射线照相检验报告由评片人填写，主要内容应包括产品名称、检验部位、检验方法、透照规范、缺陷名称、评片等级、透照日期等。射线底片和检验文字资料（委托单、检验记录、底片评定记录和检验报告）应存档备查，保存期为 5~8 年。

与 X 射线照相法相比，射线实时图像法是一种新型的射线探伤方法，它具有实时、高效、不用胶片等优点，易实现无损检测的自动化。该方法主要应用于微电子器件和集成电路钎焊接头的检查，其发展方向为 X 光图像增强电视成像法和射线计算机断层扫描技术（工业 CT 技术）。

（4）超声波探伤 超声波探伤是利用超声波在物体中的传播、反射和衰减等物理特性来发现缺陷的。当来自探头的超声波经工件表面向金属内部传播、遇到缺陷及工件底部时就分别发生反射现象，反射波在超声波探伤仪的荧光屏上形成脉冲波形，根据脉冲波形的某些特点（形状、位相、峰值）可以判断出缺陷的性质、位置和大小。超声波探伤的一般程序如图 7-5 所示，具体操作请参照有关标准进行。

超声波探伤用于钎焊接头的检验，虽然受接头形式和钎焊组件形

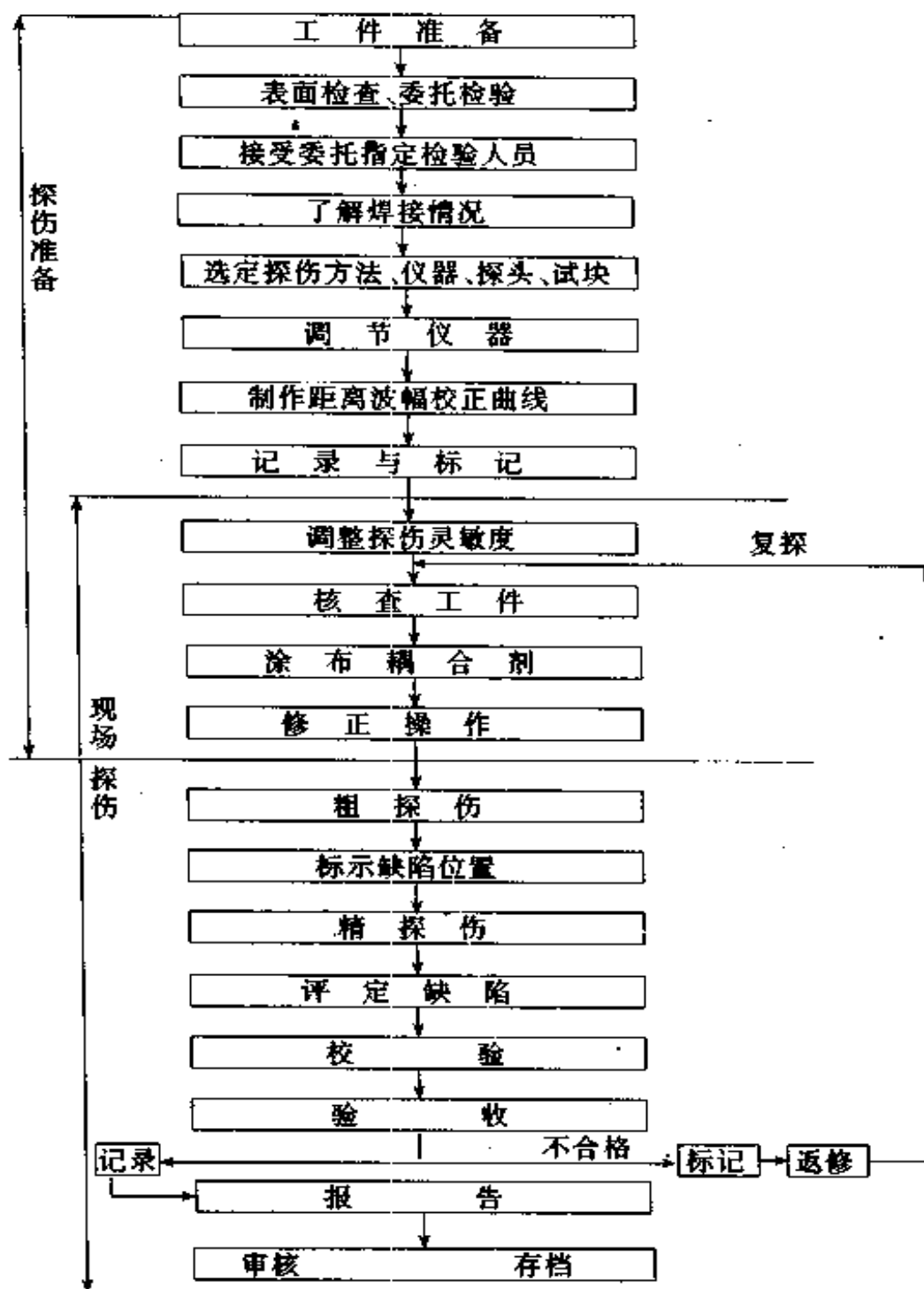


图 7-5 超声波探伤的一般程序

状的影响，但可以用于蜂窝钎焊结构的评定。该方法是使用一个单一的换能器，并接收从钎焊接头表面反射回来的脉冲波形，由于从良好的蜂窝壁反射回来的波形与未焊合蜂窝壁的反射波形有差别，通过对波形的形状和大小的分析来发现缺陷，使用扫描图形记录仪可以清楚地观测到扫描区域的变化。薄板件与厚件的钎焊质量也可以用与此类似的技术进行质量检测。为了增进探伤灵敏度及减少材料外表面反射波的谐振，应对超声波的频率加以选择。

对于管接头或管板接头（热交换器或潜艇的部分接头）钎焊质量的检验，必须采用专门的双晶体探头进行探伤，图 7-6 是该探头的示意图，它借助于对比穿透接头从管壁反射回来的声波的相对振幅，精确地测出接头结合面的百分率。检测时，为了提高精度，必须精确地调准超声波频率和入射角。

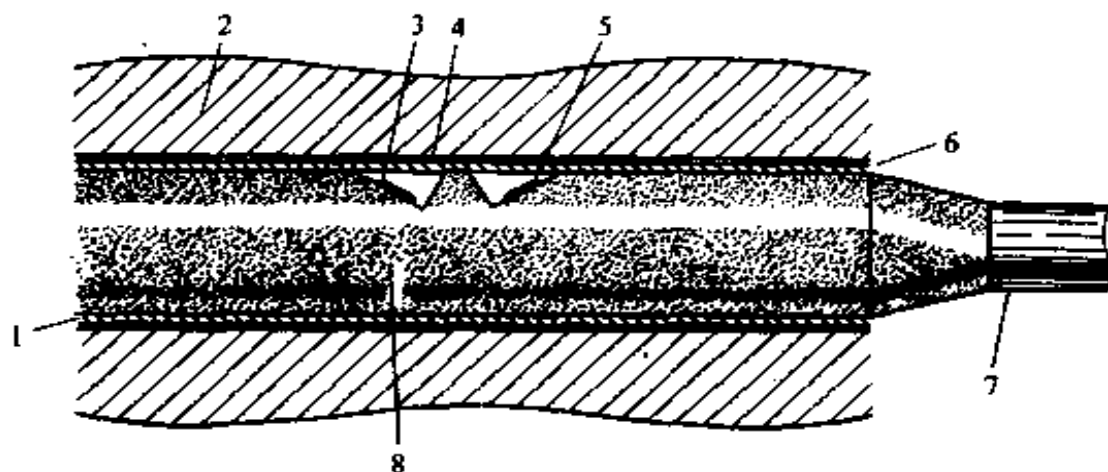


图 7-6 用于管与管板钎焊接头结合区检验的双晶体超声探头

1—管子 2—母材 3—接收器 4—未结合 5—传感器
6—钎焊区域 7—探头柄 8—探头本体（在未结合区域中的内探头）

(5) 导热性测试 导热性测试也称热传导检验或红外线探伤，它是建立在传热学理论上的一种无损探伤方法。探伤时，可将一恒定热流注入工件（或依靠钎件焊后本身的温度），如果钎件内部存在缺陷，由于缺陷区与无缺陷区的热传导系数不同，显示在工件表面的温度分布就会有差异，内部有缺陷与无缺陷区所产生的热辐射（红外光波）

也就不同。利用红外探测器将红外光波转换成相应大小的电信号，将该信号输入到红外线探伤仪，从而将工件表面的温度分布变成直观而形象的热图，并确定工件内部缺陷的部位。该方法在电子行业的应用比较普遍，可用来检测电子元器件和线路板的钎焊质量。对于蜂窝结构的钎焊接头，可在表面涂敷一层低熔点的粉末或液态物质来显示不同的导热特性，当将钎件用红外线加热灯加热时，温度的变化使液体从暖处排向冷处，并在较冷部位上聚集，无液体的高温区域，内部存在有钎接缺陷。

利用钎件本身温度来进行导热性测试的例子是飞机螺旋桨叶片的钎焊质量检验。在钎件出炉后几秒钟内，趁其温度还很高时就给予拍照，凡于加强肋钎焊得良好的区域，其外壳都呈光亮的红色；有钎焊缺陷的区域则呈暗红色或黑色。此外，利用霜冻试验也可以检测出薄板与厚基体金属钎缝上的未焊好区域，当钎件骤冷到形成一层霜冻薄膜时，吹一股微弱的暖气就可使覆盖在未钎焊好的区域上的霜冻膜首先熔化，其原因是未焊好的部位导热性差。

7.2.2 破坏性检验

破坏性检验方法多用于钎焊接头的抽查检验，可用来检测钎焊接头的强度、塑性、韧性等力学性能；验证所选用的钎焊工艺及钎焊材料是否正确；并由此来确定不同批号或炉号的产品是否合格。破坏性检验还可以用来校核某种无损检验方法，但应每隔一定时间抽出一个或若干个产品进行试验，以便对钎焊过程保持严格的控制。此外，用于检查钎焊质量的破坏性检验方法有许多种，在选用时应根据产品的使用要求和实际结构而定，尽可能采用两种以上的方法进行综合检验。

7.2.2.1 金相检验

金相检验常常用来确定钎焊接头的一般质量和气孔、流布不良、基体金属的过分溶蚀或装配不当等缺陷，可以更好地了解缺陷的产生原因。该方法一般先进行宏观组织观察，然后再有针对性地进行显微金相分析。

宏观组织分析包括断口观测和低倍分析，前者可了解钎焊缺陷的

形态、产生部位和扩展情况；后者可确定有没有空洞、夹杂物、裂纹及未钎透等缺陷。在进行低倍分析时，首先制备出钎焊接头的金相试样，经磨制和抛光后，在未浸蚀状态下观察。由于非金属夹杂物和孔洞的反射能力比金属弱，因此在显微镜观察时它们呈暗色（黑色或褐色），为了对两者进行区别，可旋转显微镜的微调螺母，稍微改变焦点的距离，这时空洞等缺陷的边缘呈现出时而聚合、时而散开，而非金属夹杂物观察不到这种现象。

微观组织分析主要是观察微小缺陷，研究钎缝、扩散区和钎焊金属的组织结构，从而找出产生缺陷的原因，并对钎焊工艺提出改进意见。在进行微观组织分析以前，应先对试样进行浸蚀，表 7-7 给出了一些钎焊接头的浸蚀液成分。

表 7-7 部分钎焊接头的浸蚀液成分

钎焊金属	钎料	浸蚀步骤及浸蚀液成分（体积分数，%）
低碳钢	铜和黄铜钎料	(1) 4% 硝酸酒精溶液显示钢的组织； (2) 浓氨水溶液显示钎料的组织
低碳钢	锡铅钎料	(1) 4% 硝酸酒精溶液显示钢的组织； (2) HNO_3 1%， CH_3COOH 1%，甘油 98% 显示钎料和过渡层组织
铜和黄铜	银钎料	(1) 过氧化氢水溶液； (2) 10% 过硫酸铵水溶液
铜和黄铜	锡钎钎料	(1) 在 H_3PO_4 （密度 1.54）中电解浸蚀，电流密度 $0.5\text{A}/\text{dm}^2$ 显示钎焊金属，钎料及过渡层组织； (2) 10% 过硫酸铵水溶液显示钎料过渡层组织

7.2.2.2 化学分析及腐蚀试验

(1) 化学分析 焊缝金属的化学分析就是检查钎缝金属的化学成分。一般用直径 5~6mm 左右的钻头，从钎缝中钻取 50~60g 试样。采用各种化学分析的方法确定接头中化学元素的含量，必要时可对钎缝中的氢、氧或氮的含量进行分析。

(2) 腐蚀试验 腐蚀试验的目的在于确定钎焊接头在给定条件下

(介质、浓度、湿度、腐蚀方法、应力状态等)抵抗腐蚀的能力,估计其使用寿命,分析腐蚀原因,找出防止或延缓腐蚀的方法。腐蚀试验的方法,可根据产品对耐腐蚀性能的要求而定,常用的方法有不锈钢晶间腐蚀试验、应力腐蚀试验、大气腐蚀试验、腐蚀疲劳试验和高温腐蚀试验等。

7.2.2.3 力学性能试验

钎焊接头的力学性能试验主要应用于试验研究工作,常用的方法有以下几种:

(1) 拉伸或剪切试验 由于拉伸和剪切试验不需要对试件进行特殊的机械加工,在试验室里常常用来测定钎焊接头的强度、断面收缩率和伸长率,判断接头设计和钎焊工艺的好坏,还可以用来检验钎料或母材的强度。对有耐热要求的钎焊接头,可以在高温条件下进行拉伸或剪切试验。

(2) 撕裂试验 撕裂试验常常用来进行搭接接头的质量评定。它不需要专门的试验设备,只需将一个部件刚性固定(如固定在台钳上),把另一个部件从接头处撕开,这种试验可用于控制产品质量的试验,定性地判定接头强度是否合格,检查接头中是否存在气孔和钎剂、夹渣等缺陷。在实际检验时,应根据有关标准进行质量评定。

(3) 弯曲试验 弯曲试验一般在材料试验机上进行,其目的是测定钎焊接头的塑性,以弯曲角的大小及产生裂纹的情况做为评定指标。弯曲试验方法有三点弯曲、四点弯曲和辊筒弯曲(缠绕式导向弯曲)。试验时,试样弯到规定角度后,测量沿试样拉伸部位出现的裂纹及焊接缺陷尺寸,并按相应标准或产品技术条件进行评定。

(4) 冲击试验 冲击试验在冲击试验机上进行,它是测定钎接接头塑性和韧性的一种试验方法,以接头的开裂功及止裂功来评价接头的好坏。对于重要的钎接接头,不仅要求做常温冲击,而且还要求做高温和低温冲击,以便进一步合理判断接头的塑性和韧性,为构件的安全使用提供依据。

(5) 硬度试验 硬度试验可以测定钎焊接头对弹性和塑性变形的抗力及材料破坏时的抗力。这种试验的测量点很小,可在接头每一小

区内进行测定，可以协助其它方法精确地判明整个结构或产品的性能。在实际测定时，对硬度不高的材料或接头，可选用布氏硬度；对硬度较高的材料或接头可选用洛氏硬度和维氏硬度。对于配合金相微观检查的试件还必须做显微硬度试验。

(6) 疲劳试验 疲劳试验仅用于有限的试验范围，而且在多数情况下，对钎焊接头和基本金属一起试验。一般地说，疲劳试验需要很长的时间才能完成，因而很少用于质量控制。

第 8 章 常用材料的钎焊

8.1 碳钢、低合金钢的钎焊

低碳钢和低合金钢钎焊的应用范围甚广，如汽车、自行车、摩托车等运输工具零部件的生产；建筑业中的门窗、框架、管道的连接；仪器仪表工业中的机架和支座的组装；家具制造。还有用于其它领域的各类容器、切削工具及工业刀具、手工工具、搪磨设备及各种板网、隔板、架子的制造，等等。

8.1.1 钎焊特点

钎焊的难易很大程度上取决于焊件表面所形成氧化物的组成和结构。碳钢钎焊时，表面上能形成四种类型的氧化物：即 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) 和 FeO 。碳钢在室温下可形成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的氧化层，其厚度可达 2~4 个原子层；加热到 200℃ 左右的温度时，生成 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 氧化物；加热到较高温度（不超过 570℃），会生成氧化物的混合膜：内层为 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，表面层为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ；当加热的温度超过 570℃ 时，则只生成 FeO 。但是，如果把碳钢从室温逐渐加热到高于 570℃，那么就会在碳钢的表面上依次生成三种氧化物： $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 FeO 。钢上的氧化物是由空气中的氧气穿过氧化物层渗到金属上而生成的。

所有的氧化铁均是多孔和不稳定的，容易被还原性气体还原，也容易被钎剂去除。所以低碳钢的钎焊是容易实现的。对于低合金钢来说，如合金元素含量相当低，则金属表面基本上是铁的氧化物，但随着合金元素含量的提高，则还可能生成其它的氧化物，这在选择钎剂时必须加以考虑。在低合金钢表面生成的氧化物影响最大的是铬和铝的氧化物，它们的稳定性较大，使钎焊过程较难进行。为了去除它们，就需要使用活性较大的钎剂或用露点较低的保护气氛。

此外，合金钢常在淬火和回火的状态下使用，所以还必须考虑钎焊时发生的退火软化等问题。

8.1.2 接头间隙设计

碳钢和低合金钢的接头应是紧配合的，设计要合理（见第4章）。对于使用无机钎剂时的大多数钎料来说，间隙取0.05~0.13mm可以保证钎焊质量，接头可获得良好的力学性能。铜基钎料可选择较小的装配间隙，一般采用0.01~0.05mm。保护气氛炉中钎焊时，大多数钎料所适合的间隙更可小些，甚至可以采用轻微的压配合。用锡铅钎料钎焊时，间隙可适当大些，一般选择0.05~0.20mm。为了确定适合已选定钎料的钎焊温度下的接头间隙大小，必须考虑钎焊零件的膨胀系数。对于紧配合的接头需要使用熔化范围相当窄的钎料；反之，间隙较大时，则采用熔化范围较宽的钎料，以获得良好的钎焊接头。

8.1.3 钎料、钎剂和保护气体

钎焊碳钢及低合金钢的软钎料包括锡铅钎料、锡锌基钎料等（表3-2和表3-7）。其中，锡铅钎料的熔点最低，对母材性能不产生有害影响，应用最多。但锡铅钎料与钢能形成FeSn金属间化合物，所以要适当控制钎焊温度和保温时间。用锡铅钎料钎焊低碳钢接头的抗拉强度和抗剪强度列于表8-1中。

表 8-1 锡铅钎料钎焊低碳钢接头的抗拉强度和抗剪强度（MPa）

钎料编号	接头抗剪强度	接头抗拉强度
S-Pb80Sn18Sb2	50	103
S-Pb68Sn30Sb2	40	112.7
S-Pb58Sn40Sb2	59.8	99
S-Sn90Pb10	37.2	93.1

碳钢及低合金钢硬钎焊时，主要采用铜基钎料和银基钎料。纯铜由于熔点高，主要用于保护气体钎焊和真空钎焊，也可在碳钢和低合金钢表面电镀铜层作为钎料，其钎焊温度约为1130℃。钎焊时，铁有溶于铜中的倾向，而铜又能向铁的晶间渗入，由于钎料和母材的合金化，钎缝强度大大提高。例如铸造状态铜的强度为186~196MPa，

而在保护气体中用铜钎焊的低碳钢接头的强度达到 294 ~ 343MPa。用铜钎焊钢时，接头间隙应小于 0.05mm，否则钎料难以填满全部间隙。

使用黄铜钎料时，为了防止锌的蒸发，必须采用快速加热方法，如火焰钎焊、感应钎焊、浸渍钎焊等；通常选用含有少量硅的钎料，可有效地减小锌的蒸发。黄铜钎料的钎焊温度比较低，钢不会发生晶粒长大，钎焊接头的强度和塑性均比较好。例如，用 B-Cu62Zn 钎料钎焊的低碳钢接头强度达 421MPa，抗剪强度达 294MPa。

采用银基钎料时，主要采用 B-Ag45CuZn、B-Ag40CuZnCd、B-Ag50CuZnCd 和 B-Ag40CuZn 钎料。银基钎料的工艺性能好，钎焊温度比铜基钎料低，在钢表面具有良好的铺展性，钎焊接头的强度和塑性都是比较好的。例如，用 B-Ag50CuZnCd 钎料钎焊的低碳钢接头强度可达 294MPa。因此，银基钎料都用来钎焊重要的结构。

钎焊淬火的合金钢时，为了保证接头力学性能，防止钎焊过程中发生退火，钎焊温度应限制在高温回火温度以下。如钎焊 30CrMnSiA 时，使用熔点较低的 B-Ag50CuZnCd 钎料，它可以保证得到高质量的接头，使接头的抗剪强度可达 349 ~ 431MPa，抗拉强度达 476 ~ 651MPa。

钎焊碳钢或低合金钢一般均需要用钎剂或适当的保护气体。钎剂常按所选择的钎料而定。软钎焊时，与钎料匹配的钎剂主要为松香或氯化锌、氯化铵的混合物。硬钎焊时，钎剂常由硼砂、硼酸和某些氟化物等组成。如黄铜钎料则选硼砂或硼砂与硼酸的混合物作钎剂；银基钎料可选择硼砂、硼酸和某些氟化物的混合物作钎剂（见表 2-3）。钎剂和保护气氛可同时使用。钎剂可采用膏状、粉状和与钎料相结合等形式。在手工送钎料时，手持钎料丝，随时粘着适量的钎剂以备使用。在保护气氛中钎焊时，钎料需预先放置在接头内或安放在接头附近，然后把组件装入钎焊工作室中去，必须控制钎焊的最高温度和保温时间，以保证适当的熔化，使钎料完全渗入接头。

8.1.4 钎焊工艺

8.1.4.1 钎焊前清理及表面准备

为了取得最佳效果，钎焊接头接触表面采用机械或化学方法清理，确保氧化物或有机物彻底清除；接头端面不宜过于粗糙，不得粘附金属屑粒或其它污物。

8.1.4.2 钎焊技术

几乎所有常用的钎焊方法均可进行碳钢和低合金钢的钎焊。常用的钎焊方法有火焰钎焊、烙铁钎焊、浸渍钎焊、炉中钎焊、电阻钎焊、保护气氛及真空钎焊等。

火焰钎焊时，可采取预置钎料、钎剂或使用涂有钎剂的钎料馈送。通常宜用中性焰或稍带还原性的火焰，操作时应尽量避免火焰直接加热钎料和钎剂。除烙铁钎焊（用于软钎焊）外，其它方法都不得使母材过热，以免母材金属及钎料、钎剂产生不利的影响。

碳钢及表面不形成稳定氧化物的低合金钢是比较容易钎焊的。对于调质钢的钎焊，为了保持较高的力学性能，通常选择淬火温度或低于回火温度进行钎焊。但在淬火温度下钎焊时，由于钢和有色金属的钎料膨胀系数不同，刚性大的接头在钎焊后的淬火中容易引起钎缝的局部破坏。这类钢的淬火温度不高，回火温度低，通常选用熔点较低的银基钎料在 $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 下进行钎焊。为了减少焊件的退火软化，采用快速加热的感应钎焊、盐浴浸渍钎焊。

在保护气氛中钎焊低碳钢时，由于氧化铁容易还原，对气体的纯度要求不高。钎焊低合金钢如 30CrMnSiA 时，因金属表面尚有其它氧化物存在，对气体纯度要求高些。但是在低于 650°C 温度下钎焊时，即使纯度很高的气体，也不能使钎料铺展，必须配合使用气体钎剂，如 BCl_3 、 PCl_3 、 BBr_3 等，才能保证 B-Ag40CuZnCd 钎料在低合金钢表面上铺展。

8.1.4.3 钎焊后处理

倘若基体金属适合于淬火处理，则可趁焊件还处于高热状态时淬入水中进行处理。当采用钎剂进行钎焊时，因为钎剂的残渣多数都对母材有不良影响，必须彻底清除。但对于易产生裂纹或引起变形的焊件，此法应慎重考虑。残渣还可以采取机械的方法来清除，如用金属丝刷或在水中冲洗或刷洗。有条件的情况下，可进行喷砂处理。对有

机钎剂的残渣可用汽油、酒精、丙酮等有机溶剂擦拭或清洗；氯化锌和氯化铵等的残渣腐蚀性很强，应在体积分数为 10% 的 NaOH 的水溶液中清洗中和，然后用热水和冷水洗净；硼酸和硼酸盐钎剂的残渣呈玻璃状粘附在接头表面，不易清除。一般只能用机械方法或在沸水中长时间浸煮来解决。

钎焊后清除的对象有时还有阻流剂。对于只与母材机械粘附的阻流剂物质，可用空气吹、水冲洗或金属丝刷等机械方法清除。若阻流剂物质与母材表面存在相互作用时，用热硝酸-氢氟酸清洗，可取得良好效果。

8.2 不锈钢的钎焊

常见的不锈钢可分为四大类：即奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢及沉淀硬化不锈钢。

(1) 奥氏体不锈钢 这类钢都是铁、铬和镍（或锰）的合金。加入镍和锰可以使钢中的高温相奥氏体稳定到室温，并使这些合金成为非磁性和不能淬硬。这类钢强度不很高，但具有很高的耐热性和耐腐蚀性。典型的牌号有 1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 及 1Cr18Ni9Nb，其中后两种是稳定型不锈钢。

(2) 铁素体不锈钢 这类钢基本上是铁、铬低碳合金。在其中加入了足够量的铬，使钢中的低温相铁素体稳定在一个较宽的温度范围内。典型的牌号有 0Cr13、Cr17 等，其中 Cr17 是一种广泛应用的品种。

(3) 马氏体不锈钢 这是一些铁-碳-铬的合金。典型的牌号有 2Cr13、1Cr12Ni2W2MoV 等，另外还有 1Cr13、Cr17Ni2 等。后者除具有马氏体组织外，尚含有一定量的铁素体，但性能基本上是属于马氏体型不锈钢的。属于高铬高碳型的有 9Cr17MoVCo、9Cr18MoV 等。马氏体不锈钢与铁素体不锈钢很接近，但它们能够进行热处理强化，经淬火及回火后具有良好的强度、塑性、韧性、耐蚀性等综合性能。

(4) 沉淀硬化不锈钢 这类钢应用于具有高强度、耐热和耐腐蚀性能の場合。在这些合金中，加入了铝、钛、铜和钼等合金元素，可

通过特殊的热处理而使这些合金沉淀硬化。添加合金元素制成的这类不锈钢基本上都是铬-镍奥氏体不锈钢。然而，这类合金并不完全都是奥氏体组织，有时还会形成一些马氏体组织。

不锈钢钎焊广泛用于航空航天、核能装置、电子通信、仪器仪表等工业领域。如管子和接头、蜂窝结构、火箭发动机推力室、微波波导组件、热交换器及各种工具等。此外，在日常生活中遇到的诸如锅、杯等容器、器皿均由钎焊方法生产。

8.2.1 钎焊特点

(1) 表面氧化膜复杂 不锈钢除含铁外，还有铬、镍、锰、钛、钼、钨、钒等元素，所以在它们表面上能形成多种氧化物，甚至复合氧化物。其中 Cr_2O_3 是比较稳定的氧化物，较难去除，必须采用活性强的钎剂；在保护气氛中钎焊时，只有在低露点 (-52°C) 的氢气保护下，加热到 1000°C 以上，才能将其还原。不锈钢中含有钛元素时，氧化物更稳定，更难去除。

(2) 钎焊温度的选择 对非热处理强化的不锈钢，选择的钎焊温度应使晶粒不致严重长大。例如， $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢的晶粒长大温度为 1150°C ，故应低于此温度钎焊。奥氏体不锈钢在钎焊加热到 $427\sim 876^\circ\text{C}$ 范围时，由于碳化物的析出而引起晶间腐蚀，为此应尽量避免在该温度范围内钎焊。必须在此温度区间进行钎焊时，应尽可能缩短加热时间。

对于马氏体不锈钢来说，只有经过适当的淬火和回火才能获得优良的性能，所以钎焊温度的选择更为严格。这类钢的钎焊温度，或选择与其淬火温度相适应，使钎焊过程和淬火加热结合起来；或者选择不高于它们的回火温度。通常选择的钎焊温度为 1000°C 左右，对于 $\text{Cr}17\text{Ni}2$ 和 $1\text{Cr}12\text{Ni}2\text{W}2\text{MoV}$ 不锈钢也可以选择低于 650°C 的温度下钎焊。

沉淀硬化不锈钢的钎焊与马氏体不锈钢的钎焊相似，钎焊这类钢所用的钎焊热循环也必须与它们的热处理相匹配。

(3) 其它问题 用黄铜钎料钎焊奥氏体不锈钢时会发生自裂现象；用镍基钎料钎焊时，接头间隙大小对接头性能有重要影响。

8.2.2 钎料、钎剂和保护气体

8.2.2.1 钎料

根据不锈钢焊件的用途、钎焊温度、接头性能及造价的不同，可用于不锈钢的钎料有锡铅钎料、银基钎料、铜基钎料、锰基钎料、镍基钎料及贵金属钎料等。

(1) 锡铅钎料 不锈钢软钎焊主要采用锡铅钎料（见表 3-2）。以锡铅钎料钎焊的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头的抗剪强度列于表 8-2。由于接头强度低，一般钎焊承载不大的零件。

表 8-2 1Cr18Ni9Ti 软钎焊接头的抗剪强度 (MPa)

钎料型号	抗剪强度	钎料型号	抗剪强度
Sn	30.3	S-Pb58Sn40Sb2	31.3
S-Pb80Sn18Sb2	21.5	S-Sn90Pb10	32.3
S-Pb68Sn30Sb2	32.3	S-Pb97Ag3	20.5

(2) 银基钎料 银基钎料是钎焊不锈钢最常用的钎料，其中银铜锌及银铜锌镉钎料应用最广。钎焊不锈钢采用的银基钎料见表 3-13。其中，银铜锌和银铜锌镉由于钎焊温度不太高，因而对母材的性能影响不大。这些钎料在钎焊温度下容易引起晶界析出碳化物，但由于 1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Nb 不锈钢含有钛、铌稳定剂，则可避免出现晶间腐蚀。银基钎料钎焊的接头强度见表 8-3。

表 8-3 含银钎料及钎焊 1Cr18Ni9Ti 接头的强度 (MPa)

型 号	钎料强度	接头抗拉强度	接头抗剪强度
B-Cu53ZnAg	451	386	198
B-Cu40ZnAg	353	343	190
B-Ag45CuZn	386	394	198
B-Ag50CuZn	343	375	201
B-Ag40CdZnCu	392	375	205

钎焊不含镍的不锈钢时，接头在潮湿空气中会发生缝隙腐蚀。为了防止这种现象，应采用含镍较多的钎料。如 B-Ag50CuZnCdNi。这时钎缝与母材间形成明显的过渡层，钎缝和钢之间结合良好，电极电位过渡比较平缓，因而提高了抗腐蚀性能。

钎焊马氏体不锈钢时，为了保证母材不发生退火软化现象，须在

不高于 650℃ 的温度下进行钎焊, 此时可选用 B-Ag40CuZnCd 钎料。银铜锌钎料的高温性能较差, 一般用来钎焊 300℃ 以下工作的焊件; 银铜锌镉钎料的高温性能比银铜锌钎料还要差些。

在保护气氛中钎焊不锈钢时, 可以采用含锂的自钎剂钎料, 如 B-Ag92Cu (Li)、B-Ag72Cu (Li) 和 B-Ag62CuNi (Li) 等。

真空钎焊不锈钢时, 要求钎料不含易蒸发的锌、镉等元素。但银铜共晶钎料 (B-Ag72Cu) 的润湿性不好, 这时可选用含锰、镍、钯等元素的银钎料。

一般银基钎料钎焊的不锈钢接头, 其使用温度不宜超过 300℃, 因为超过 300℃ 以后, 钎焊接头强度急剧下降。若要求提高工作温度, 可选用 B-Ag49CuZnMnNi 钎料, 但此钎料在高于 480℃ 后抗氧化性能急剧下降。

银基钎料常以棒状、丝状、片状及箔状供货选用。

(3) 铜基钎料 用于不锈钢钎焊的铜基钎料主要有纯铜、铜镍及铜锰钴钎料等 (表 3-15)。

纯铜钎料主要用于气体保护下钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。当用于真空钎焊时, 钎焊时间要短, 或充以部分氩气, 以防止铜的蒸发。另外, 纯铜钎料用于保护气氛或真空钎焊的接头抗氧化性不好, 所以钎焊接头的工作温度不宜超过 400℃。

用黄铜钎料 (如 B-Cu62Zn) 钎焊不锈钢时, 容易使不锈钢产生‘自裂’现象, 建议少用。铜磷钎料与不锈钢能产生脆性界面层, 所以不适于不锈钢的钎焊。

对于在较高温度下工作的焊件, 可以用高温铜基钎料。用两种高温铜基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 钢搭接接头的性能列于表 8-4。

表 8-4 高温铜基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 钢搭接接头的性能

钎料 型号	接头抗剪强度/MPa			
	20℃	400℃	500℃	600℃
B-Cu68NiSi (B)	324.4~339	186~216	—	154~182
B-Cu69NiMnCo Si (B)	241~298	—	139~153	139~152

铜镍钎料如 B-Cu68NiSi (B) 主要用于火焰钎焊、感应钎焊等方法。炉中钎焊时, 由于钎焊温度高 (约 1200℃), 会使不锈钢晶粒明显长大, 如晶粒由钎焊前的 7-8 级变成钎焊后的 3-4 级。为了避免近缝区晶粒的过度长大, 最好不进行重复补焊。

用 B-Cu69NiMnCoSi (B) 钎料钎焊的不锈钢接头的室温和高温强度 (表 8-4) 及抗氧化性与用 B-Cu68NiSi 钎料钎焊的具有相近水平, 但钎焊温度比 B-Cu68NiSi (B) 钎料低 80℃ 左右, 不会使不锈钢发生晶粒长大现象。同时钎料向母材的晶间渗入层厚度小, 最大为 0.03mm, 而 B-Cu68NiSi (B) 钎料钎焊向母材的渗入最大可达 0.17mm, 故接头的疲劳强度较高。因此, 可用 B-Cu69NiMnCoSi (B) 钎料代替 B-Cu68NiSi (B) 钎料钎焊不锈钢导管。

铜锰钴钎料主要用于保护气氛中钎焊马氏体不锈钢。采用 B-Cu58MnCo 钎料钎焊马氏体不锈钢, 它的钎焊温度 996℃, 正好与大多数马氏体不锈钢的淬火温度相适应, 用这种钎料钎焊的 1Cr13 不锈钢的抗剪强度见表 8-5。为便于比较, 同时列出了用 B-Au82Ni 钎料和 B-Ag76CuPd 钎料钎焊的 1Cr13 不锈钢接头的抗剪强度。

表 8-5 钎焊 1Cr13 不锈钢的接头抗剪强度

钎料型号	接头抗剪强度/MPa			
	室温	427℃	538℃	649℃
B-Cu58MnCo	415	317	221	104
B-Au82Ni	441	276	217	149
B-Ag76CuPd	299	207	141	100

表 8-5 表明: 在 538℃ 温度下, 用 B-Cu58MnCo 钎料钎焊的 1Cr13 不锈钢接头的强度与用 B-Au82Ni 钎料钎焊的相近, 比用 B-Ag76CuPd 钎料钎焊的高。由钎焊接头在静止空气中的抗氧化试验结果表明: B-Cu58MnCo 钎料可以工作到 538℃; B-Au82Ni 钎料的工作温度超过 649℃; 而 B-Cu76CuPd 钎料的最高工作温度必须限制在 427℃。疲劳试验结果表明: B-Cu58MnCo、B-Au82Ni、B-Ag76CuPd 钎料的疲劳强度 (10 周的耐久) 分别为 172、206、172MPa。因此, B-Cu58MnCo 钎料钎焊马氏体不锈钢, 在 538℃ 以下工作的部件有可能代替 B-

Au82Ni 钎料钎焊压气机不锈钢静子等重要部件，使生产成本大大下降，B-Cu58MnCo 钎料主要用于气体保护炉中钎焊（因含锰量高）。因此，在 1000℃ 钎焊温度下要求保护气体的露点要低于 -52℃。钎料对母材的溶蚀小，可用来钎焊薄件。

铜基钎料通常制成棒状、丝状及片状供货。

(4) 锰基钎料 主要用于气体保护钎焊，要求气体的纯度较高。它们不适于火焰钎焊和真空钎焊。由于锰基钎料的熔点较高，为了避免母材的晶粒长大，应尽量选择钎焊温度低于 1150℃ 的相应钎料（见表 3-19）。

用锰基钎料钎焊不锈钢可以获得满意的钎焊效果，表 8-6 给出了部分锰基钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头的性能。

表 8-6 钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头的性能

钎料型号	接头抗剪强度/MPa					
	室 温	300℃	500℃	600℃	700℃	800℃
B-Mn70NiCr	323	—	—	152	—	86
B-Mn40NiCrCoFe	284	255	216	—	157	108
B-Mn68NiCo	325	—	253	160	—	103
B-Mn50NiCuCrCo	353	294	225	137	—	69
B-Mn52NiCuCr	366	270	—	127	—	67

Mn-Ni-Co-B 钎料中因含硼而降低了钎料熔点且改善了钎料的铺展性。钎焊温度在 1060℃ 左右，排除了晶粒长大的可能性。用这种钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管接头的抗拉强度与 B-Cu68NiSi (B) 钎料钎焊的相近，但晶间渗入深度小。

(5) 镍基钎料 镍基钎料可由表 3-17 选择。镍基钎料钎焊不锈钢，可以得到最好的高温性能，但用镍基钎料钎焊时，装配间隙的大小对接头的强度及塑性有极大的影响，间隙小则性能好。以镍基钎料 B-Ni74CrSiFeB (C)、B-Ni82CrSiBFe、B-Ni71CrSi 钎焊 1Cr13 和 1Cr18Ni11Nb 不锈钢为例，当接头间隙极小时，以这三种钎料钎焊的接头的抗拉强度基本相同，并与母材等强度，塑性也较好。当间隙增大至 0.05mm 时，接头的强度和塑性急剧下降，间隙达 0.1mm 时，

接头的塑性已趋于零。究其原因，镍基钎料由于熔点的要求，常含有较多的硼、硅或碳，使钎料由很多非金属脆性化合物组成。钎焊过程中，钎料中的硼、硅、碳等元素向不锈钢扩散形成复杂的带有脆性的化合物。当间隙极小时，钎缝中这些元素的含量少，扩散距离又短，因此在钎焊时间内得以全部扩散，使钎缝组织变为铬在镍中的固溶体；间隙大时，钎缝中的硼、硅或碳量增多，扩散距离也增大，这些元素来不及向母材全部扩散，因此钎缝中间留下连续的脆性层，接头的强度和塑性急剧下降。由于碳和硼的原子直径小，并且容易全部扩散掉；硅的原子直径大，主要向晶内扩散，扩散速度慢，所以用含硅量高的 B-Ni71CrSi 钎料钎焊的不锈钢接头更容易出现连续的脆性相层，以致 B-Ni71CrSi 钎料对间隙的影响更为明显。

国内研制的相当于美国 AWS 牌号 BNi-2 的 B-Ni82CrSiBFe 镍基高温钎料 [质量分数 (%) Cr6~8、B2.75~3.5、Si4~5、Fe2~4、C<0.10、余 Ni]，在真空或氩气保护下，对不锈钢有良好的润湿性和填充间隙的能力。据称，用此钎料钎焊的接头可获得较高的强度，具有耐高温、耐低温及高真空气密性等特点。此钎料可制成直径为 0.154~0.05mm (100~300 目) 粉末和箔带 (0.03~0.05mm) 供应。

用 B-Ni77CrP 钎料钎焊不锈钢时，由于磷向母材的扩散速度很慢，而且磷在不锈钢中的溶解度又很小，要求不出现脆性化合物相的钎缝最大间隙是很小的，在正常钎焊范围内不大于 10 μ m。因此，用此钎料钎焊时装配间隙要小。

(6) 贵金属钎料 钎焊不锈钢的贵金属钎料可由表 3-18 选择。在金镍钎料中，典型的是 B-Au82Ni。在银铜钯钎料中，以 B-Ag54CuPd 钎料钎焊的接头性能最好，应用较广。

B-Au82Ni 钎料的钎焊温度合适，用以钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢，不会发生晶粒长大现象；钎焊马氏体不锈钢，可使淬火和钎焊过程结合起来。同时此钎料对间隙大小不敏感。用它钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢，在 0~0.15mm 间隙范围内，接头强度基本不变，钎缝组织由镍在金中的固溶体组成。从室温到 649℃ 温度范围内，接头抗拉强度

基本上与母材相等，接头的抗氧化能力在 817℃ 以下都很好。另外，钎料没有向不锈钢晶间渗入的现象，对母材的溶蚀也不大，可以钎焊薄件。但它的价格昂贵，现已被其它钎料，如 B-Ag54CuPd、B-Cu58MnCo 等钎料逐步取代。

8.2.2.2 钎剂和保护气体

使用钎剂钎焊不锈钢时，为了除去焊件表面的氧化铬，必须采用活性强的钎剂。用锡铅钎料钎焊不锈钢时应采用氯化锌盐酸溶液和磷酸溶液（见表 2-1）。不锈钢硬钎焊使用的钎剂可查表 2-3。用铜基钎料钎焊不锈钢时，应采用 YJ-6 钎剂，以银铜锌钎料钎焊不锈钢时可采用 QJ101 和 QJ102，其中 QJ102 钎剂的效果较好。使用银铜锌镉钎料时，以用 QJ103 和 284 号钎剂为宜。

许多不锈钢组件可在干燥的氢、氩、氮和离解氨的气氛中，在不添加钎剂的情况下进行炉中钎焊。但有些构件在钎焊中还必须使用钎剂。由于不锈钢表面含有象氧化铬等比较稳定的氧化膜，它在钎焊时的清除比碳钢更困难。因此，要求保护气体具有 -40°C 或更低的露点，即必须采用高纯度的保护气体，否则，应采用高活性的专用钎剂。

使用离解氨气氛时必须注意，某些不锈钢在某些钎焊温度下可能发生偶然的渗氮现象，使表面硬化。表面的硬化可能是有益的，也可能是有害的，这取决于焊件的使用要求。

在保护气体炉中钎焊时，在正常的钎焊温度下，不能使氧化铝和氧化钛还原。如果这些元素含量很少，则采用高纯度的保护气体和气化钎剂可以获得良好的钎焊接头。如果这些元素的质量分数超过 1% 或 2%，可通过表面镀镍来代替钎料进行钎焊。电解镍镀层厚度应保持在 0.005~0.05mm 范围内。镀镍层过厚，会降低接头的强度，还可能在镀层上发生断裂。

8.2.3 钎焊工艺

8.2.3.1 钎焊前清理和表面准备

不锈钢钎焊前的清理要求比碳钢更为严格。这是因为不锈钢表面

的氧化物在钎焊时更难以用钎剂或还原性气氛加以清除。

不锈钢钎焊前的清理应包括清除任何油脂和油膜的脱脂工作。待焊的接头表面还要进行机械清理或酸液清洗。但是,要避免用金属丝刷子擦刷,尤其要避免使用碳钢丝刷子擦刷。清理以后必须注意防止灰尘、油脂或指痕重新沾污已清理过的表面。最好的办法是:零件一经清洗之后立即进行钎焊。如果做不到这一点,就应把清洗过的零件装入密封的塑料袋中,一直封存到钎焊前为止。

8.2.3.2 钎焊技术

不锈钢可以用多种钎焊方法进行钎焊,如常见的烙铁、火焰、感应、炉中等钎焊方法。炉中钎焊用的炉子必须具有良好的温度控制(钎焊温度的偏差要求 $\pm 6^{\circ}\text{C}$)系统,并能快速冷却。

硬钎焊时,广泛使用保护气体钎焊。用氢气作为保护气体时,对氢气的要求视钎焊温度和母材成分而定:对于 1Cr13 和 Cr17Ni2 等马氏体不锈钢,在 1000°C 温度下钎焊时要求氢气的露点低于 -40°C ;对于不含稳定剂的 18-8 型铬镍不锈钢,在 1150°C 钎焊时,要求氢气的露点低于 -25°C ;但对含钛稳定剂的 1Cr18Ni9Ti, 1150°C 钎焊时的氢气露点必须低于 -40°C 。钎焊温度越低,要求的氢气露点越低。

国内广泛使用氩气保护钎焊。由于氩气无还原作用,故要求高纯度的氩气。采用氩气保护高频钎焊,可取得良好的效果。氩气保护钎焊时,为了保证去除不锈钢表面的氧化膜,可以采用气体钎剂,常用的有加 BF_3 气体的氩气保护钎焊。采用含锂或硼等自钎剂钎料时,即使不锈钢表面有轻微的氧化,也能保证钎料铺展,从而提高钎焊质量。

真空钎焊不锈钢时,真空度要视钎焊温度而定。表 8-7 是 18-8 型不锈钢在不同温度下的试验结果。可以看出,随着钎焊温度的提高要求的真空度可以低些。

为了使钎料容易润湿,可以在不锈钢表面镀铜或镀镍,这时对保护气体的纯度要求可降低。

应该指出:用镍基钎料钎焊不锈钢时,常出现脆性化合物,使接头性能变坏。因此,要求有较小的装配间隙,一般均在 0.04mm 以下,有的甚至为零间隙,这就为零件的装配和制造带来困难,不注意

这一点就不能保证钎焊接头的质量。若提高钎焊温度或延长钎焊保温时间,则可适当增加装配间隙。

表 8-7 18-8 型不锈钢真空钎焊结果

温 度 /℃	真 空 度 /Pa	润 湿 性	外 表
1150	1.33×10^{-2}	很好	光亮
1150	1.33	好	淡绿
1150	133	无	厚氧化膜
900	1.33×10^{-2}	尚好	光亮
900	1.33×10^{-1}	无	—
850	1.33×10^{-2}	差	淡黄

8.2.3.3 钎焊后处理

不锈钢钎焊后的主要工序是清理残余钎剂、残余阻流剂和进行热处理。非硬化不锈钢零件在还原性或惰性气氛炉中进行钎焊时,如果没有使用钎剂和没有必要清除阻流剂的话,则不必清理表面。

根据所采用的钎剂和钎焊方法,残余钎剂的清除可以用水冲洗、机械清理或化学清理、如果采用研磨剂来清洗钎剂或钎焊接头附近加热区域的氧化膜时,应使用砂子或其它非金属细颗粒。不能使用不锈钢以外的其它金属细粒,以免会引起锈斑或点状腐蚀。

马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢制造的零件,钎焊后需要按材料的特殊要求进行热处理。

用镍铬硼和镍铬硅钎料钎焊不锈钢时,钎后扩散处理常常是不可缺少的工序。扩散处理不但能增大最大钎缝间隙,而且能改善钎焊接头组织。如用 B-Ni82CrSiBFe 钎料钎焊不锈钢接头经 1000℃ 扩散处理后,钎缝虽仍有脆性相存在,但只有硼化铬相,其它脆性相均已消失。而且硼化铬相呈断续状态分布,这对改善接头的塑性是有利的。

8.3 工具钢和硬质合金的钎焊

工具钢通常可分为三类:碳素工具钢、合金工具钢及高速钢。碳素工具钢系高碳钢 ($w_C = 0.6\% \sim 1.40\%$),其硬度主要取决于它们的含碳量。除了薄的截面外,这类钢为了达到最佳性能,在热处理时

必须快速淬火。合金工具钢通常含质量分数为百分之几的合金元素，某些钢中合金元素的质量分数可达12%~14%。主要合金元素有Cr、Mn、Si等。高速钢是含W、Mo、Cr、V等元素的高合金钢，其中的W18Cr4V应用最广。高速钢刀片在淬火、回火后具有最大的硬度和耐磨性。高速钢在逻辑上属于合金钢种，但却独自形成一类。这是因为它们的性能取决于含有相当高的合金元素，其含碳量通常比碳素工具钢的含碳量低得多。

硬质合金是碳化钨粉末与钴及碳化钛粉末与钴的混合物，经压制成形后烧结而成。我国部分硬质合金牌号及性能见表8-8。

YG类合金为钨钴类硬质合金，其主要成分为WC和Co。YT类合金为钛钨钴类硬质合金，其主要成分为WC、TiC和Co。YW合金为含TaC的为钛钨钴类硬质合金。YT类合金与YG类合金相比有更高的硬度、热硬性、抗氧化性、抗腐蚀性，但在抗弯强度、抗压强度、热导率方面，YG类则更好些。在硬质合金中加入TaC，对强度影响不太显著，但它明显提高了合金的热硬性，在900~1000℃时超过YT类合金。

表 8-8 我国部分硬质合金牌号和性能

合金牌号	化学成分 (质量分数, %)				力 学 性 能	
	TiC	WC	Co	TaC	硬 度 (HRA)	抗弯强度 /MPa
YG3		97	3		>91.0	>1026.9
YG3X		97	3		>93.0	>880.2
YG6		94	6		>89.5	>1369.2
YG6C		94	6		>88.5	>1467.0
YG6X		94	6		>91.0	>1320.3
YG15		85	15		>87.0	>1358.2
YG30		70	30		—	—
YT5	6	85	9		>89.5	>1271.4
YT14	14	73	8		>90.5	>1173.6
YT15	15	79	6		>91.0	>1124.7
YT30	30	66	4		>92.8	>880.2
YT60	60	34	6		>91.5	>733.5
YW1	6	84	6	4	>92.0	>1320.3
YW2	6	82	8	4	>91.0	>1564.8

工具钢、硬质合金的钎焊主要用于金属和木材的切削刀具、量具和锯片，钻探工具等制造业。

8.3.1 钎焊特点

工具钢和硬质合金的钎焊主要用于刀具、量具、模具、采掘工具以及整体刀具的连接。刀具的刀把一般用碳的质量分数为 0.4% ~ 0.6% 的中碳钢或低合金钢（如 40Cr）等制造。

这类工件在工作时受到相当大的应力，特别是压缩弯曲、冲击或交变载荷，因此要求接头强度高、质量可靠。其次，对于工具钢来说，必须使其组织及性能不受钎焊过程的影响，特别是受热退火、高温氧化及脱碳等，以保证切削性能和工作可靠性。如高速钢 W18Cr4V 的淬火温度为 1260 ~ 1280℃，W9Cr4MoV2 的淬火温度为 1240 ~ 1260℃。要求钎焊温度和淬火温度相适应，以便得到切削时最大的硬度和耐磨性。对于硬质合金，它的线膨胀系数与普通钢相比差别很大，硬质合金约为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，钢材为 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。线膨胀系数的不同，使钎焊后冷却产生很大的应力，成为硬质合金产生裂纹的重要原因。这是硬质合金钎焊的主要问题之一，所以必须采取措施减少钎焊应力。为此，应采取降低钎焊温度、钎焊前预热及钎焊后缓冷、选用塑性好的钎料、加补偿垫片、改进钎焊接头的结构等措施。

8.3.2 钎料、钎剂和保护气体

工具钢和硬质合金的钎焊通常用铜基及银基钎料，钎料及相配用的钎剂见表 8-9。

表 8-9 钎焊硬质合金时钎料、钎剂的选用

钎 料		钎剂及其配方（质量分数，%）
型 号	熔化温度/℃	
B-Cu62Zn	900 ~ 905	200（苏） 硼酐 66，硼砂 19， 氟化钙 15 YJ-6 硼酸 80，硼砂 14.5， 氟化钙 5.5
B-Cu60ZnMn	890 ~ 905	
801	890 ~ 911	
B-Cu47ZnMnNiCo（841）	860 ± 5	
B-Ag45CuZn（HL303）	660 ~ 725	QJ102 脱水氟化钾 42，氟硼 酸钾 23，硼酐 35
B-Ag50ZnCuCdNi（HL315）	632 ~ 688	

铜基钎料中应用最多的是黄铜，为了提高强度及润湿性常加入锰、镍、铁等元素。在黄铜中加入锰，可提高钎料的强度，改善钎料对硬质合金的润湿性，钎焊接头强度也有很大的提高。近年来，国内有关单位研制的 801 号、841 号铜基钎料以及 B-Cu60ZnMn 钎料的应用比较广泛。B-Cu60Zn 钎料适用于钎焊承受中、小冲击吸收功的硬质合金工具。801 号是在 B-Cu60ZnMn 的基础上发展起来的一种新型的含钴铜基钎料，其强度高、韧性好，对硬质合金及钢有良好的润湿性和流动性，适用于钎焊承受大冲击吸收功的硬质合金刀具。841 号钎料是国内有关单位针对解决钎焊低钴与高钛硬质合金切削工具易产生裂纹问题而新研制的铜基钎料，其化学成分（质量分数）是：Cu41%~52%、Mn2%~4.5%、(Ni+Co) 0.5%~2%、Sn0.5%~1%、其余为 Zn。该钎料熔点适当（ $860^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ），钎焊温度较低（ $870\sim 900^{\circ}\text{C}$ ），在固相线以下 $\sim 270^{\circ}\text{C}$ 温度范围内有较好的塑性，室温的塑性也较好，能松弛硬质合金与钢之间的热应力，在接头冷却时能减少由于热应力产生裂纹的危险性。因而使钎焊低钴与高钛硬质合金切削工具的裂片与碎片率显著下降，使钎焊的硬质合金工具在使用过程中脱片率低，使用寿命大大提高。铜锰锌硅钎料具有吸收冲击的能力，故用铜锰锌硅钎料钎焊的硬质合金刀具的寿命比用黄铜钎料钎焊的要高好几倍。如新研制的钎料化学成分（质量分数）为：Mn2.4%~3.2%，Zn14%~20%，Si0.2%~0.6%，其余为 Cu，熔点为 825.5°C 。该钎料的特点是：钎缝强度高，室温抗剪强度为 402.8MPa，钎料的耐高温性能和抗裂性好，可用作承受冲击载荷工件的钎焊。此外，工艺性能和加工性能良好，可轧制成片状。该钎料在硬质合金工具制造及电弧钎焊等方面将有很大的发展前途。用铜基钎料钎焊时主要用脱水硼砂、硼砂和硼酸的混合物作钎剂。钎焊含碳化钛高的刀片时，可用含氟化钙的 200 号和 YJ6 钎剂，以增强去氧化膜的能力。铜基钎料的特点是价格便宜，但钎焊温度高。

银基钎料具有良好的强度和塑性，熔点较低，钎焊接头产生的热应力较小，硬质合金不易开裂。其中 B-Ag50CuZnCdNi 钎料对硬质合金有着优良的润湿性，强度及耐热性也高，钎焊接头具有良好的综合

性能。但应指出，银基钎料的价格昂贵；此外，由于钎焊温度较低，对于某些硬质合金工具需要空冷硬化的钢体则难以达到要求。因而，当前国内外都在寻求与银基钎料性能一样好、价廉易得的铜基钎料来代替银基钎料。用银基钎料时可配用 QJ102 钎剂。

为了防止工具钢在钎焊加热过程中的氧化和免除钎焊后的清理，可以采用保护气氛中的钎焊。保护气氛可以是惰性气体，也可以是还原性气体。还原性气体的露点常在 -40°C 。硬质合金可在氢气保护下进行钎焊，所需氢气的露点应低于 -59°C 。

由于一般铜基钎料的熔化温度均低于高速钢的淬火温度，它们不适合于高速钢的钎焊。为此，钎焊高速钢都用专门的钎料，其成分列于表 8-10。表中钎料分为两大类：一类为锰铁型钎料，其主要组成为锰铁及硼砂，有时还加入少量铜屑及玻璃等，其中硼砂起钎剂作用。该类钎料的熔化温度为 1250°C 左右，同高速钢的热处理相匹配，钎焊接头的抗剪强度为 100MPa 左右。但由于它的收缩大，容易出现裂纹。另一类为含镍、铁、锰和硅的特殊铜合金，其熔点与锰铁大致相同，约为 $1220\sim 1280^{\circ}\text{C}$ ，由于这类合金的收缩量比锰铁减小了 $2/3$ 左右，钎焊后不易产生裂纹，接头的抗剪强度也提高到 300MPa 以上。用这一类钎料钎焊时，必须采用硼砂作钎剂。

表 8-10 钎焊高速钢用钎焊材料

序号	组成成分 (质量分数, %)									钎焊温度 $^{\circ}\text{C}$
	锰铁	硼砂	玻璃	硼酸	Ni	Fe	Mn	Si	Cu	
1	60	30	10	—	—					1250
2	80	15	—	5	—					1250
3	60	20	15	—	—				5	1230
4	—	—	—	—	30				70	1220
5	—	—	—	—	12	13	4.5	1.5	余量	1280
6	—	—	—	—	9	17	2.5	1	余量	1250

8.3.3 钎焊工艺

8.3.3.1 钎焊前准备

工具钢的钎焊通常采用搭接或套筒型接头。使用银基钎料或黄铜

钎料时，最好在钎焊温度下，使间隙为 $0.05 \sim 0.13\text{mm}$ 。预先放置钎料的安放位置最好不直接与热源接触。在钎焊与淬火工序合并的场合中，接头形式设计成可使钎料在淬火时处于受压状态，因为在接近钎料熔点的温度下，接头如果处于拉伸应力作用下就可能会把接头拉开。

硬质合金的热膨胀系数只有与它相钎焊的钢或其它基体金属的 $1/3$ 或 $1/2$ 左右，这就可能造成硬质合金钎焊后的开裂。因此，这个因素在硬质合金接头的设计中必须加以考虑。

小块的硬质合金通常是直接钎焊到零件的外表面上或它的机械加工的凹槽内，这就可能有几个面受到钎焊。当硬质合金的长度超过 12.7mm 时，可使用复合垫片来吸收收缩应力。如用银基钎料钎焊时可采取铜或镍作为垫片，两侧分别夹有银钎料片（见图 8-1）。确定合适的垫片的厚度无硬性规定，通常由经验取两片钎料的总厚度为原则，一般在 $0.25 \sim 0.64\text{mm}$ 范围内选择。垫片的厚度应随着接头面积的增大而增加。在采用铜基钎料钎焊时则可用镍铁合金（其膨胀系数介于钢和硬质合金之间）作为补偿垫片。

为了确保钎料的流布，工具钢在钎焊前必须进行清理，即清除表面的油污、氧化物或其它外来杂质。机械



加工的表面不必太光滑，这图 8-1 采用补偿垫片的切削工具钎焊结构有利于钎料和钎剂的润湿和铺展。

硬质合金表面在钎焊前应经喷砂处理，或用碳化硅或金刚砂轮打磨，以清除表面过多的碳，有利于钎焊时被钎料所润湿。钎焊前还应 对工件表面进行脱脂处理。有一些比较难以润湿的硬质合金，如碳化钛，有时还需电镀，或涂一层氧化铜或氧化镍配制的膏状物，然后放置在还原性气氛中烘烤，使铜和镍熔化到表面上去，这种表面很容易被钎料所润湿。

8.3.3.2 钎焊技术

工具钢及硬质合金常用火焰、感应、炉中（大气或保护气氛）、

电阻、浸渍等方法钎焊。火焰钎焊设备简单，适用于小批生产。感应钎焊、炉中钎焊及电阻钎焊生产率高，质量稳定。采用保护气氛炉中钎焊，还可以避免钎焊时发生氧化。浸渍钎焊用于硬质合金钻探工具的生产，也是一种效率高，易于掌握的方法。

碳素工具钢的钎焊最好在淬火工序前进行或者同时进行。碳素工具钢的淬火温度范围通常为 $760 \sim 816^{\circ}\text{C}$ 。如果在淬火工序前进行钎焊，所用钎料的固相线温度通常应高于淬火温度范围，使在重新加热到钎焊温度时组件应具有足够的强度而不致失效。为此，通常可使用铜基钎料。然而，必须注意的是，有时铜钎焊所需的高温会对钢结构产生不利的影响。当钎焊和淬火合并进行时，通常选用那些固相线温度接近淬火温度的钎料。由于在淬火温度下接头的强度非常低，所以在这种方法中，必须特别注意接头的设计形式和处理。在淬火过程中产生的任何应力都应使接头处于受压而非受拉状态。

合金工具钢的成分范围很宽，因此它们的热处理和钎焊加热行为也有很大不同。应根据使用的钢种确定适当的热处理循环、所需淬火的方式（水、油或空气）、最适宜的钎料以及把热处理与钎焊工序合并进行的技术，从而获得最好的综合性能。

高速钢要求进行的淬火处理温度高于常规银基钎料的钎焊温度。因此，通常的做法是，在钎焊前进行淬火，并在二次回火的处理中或处理后进行钎焊。如果必须在钎焊后进行淬火，就不能选用铜基或银基钎料。因此，必须选用如表 8-10 所示的钎焊材料进行钎焊。

钎焊高速钢刀具时用焦炭炉比较合适。当钎料熔化后，取出刀具，立即加压，以挤出多余钎料，再进行油淬，然后在 $550 \sim 570^{\circ}\text{C}$ 回火。

为了减少硬质合金刀片的钎焊应力和防止产生裂纹，可采取下列工艺措施：在钎缝中加塑性好的补偿垫片；加大钎缝间隙；用 30CrMnSiA 钢作刀体，因奥氏体变为马氏体时体积膨胀，可抵消部分收缩应力。当硬质合金块的长度超过 76mm 时，有必要把硬质合金切成几段来钎焊，防止硬质合金的应力开裂（图 8-2）。在尺寸比例不协调的装配件（图 8-3 和图 8-4）中，只钎焊一面往往可以消除或减少

它的应变。使用止钎剂涂层或加大一面的间隙都可以防止钎料流布到



图 8-2 硬质合金较长时，
采用多块钎焊结构

不需钎焊的地方。钎焊较长的硬质合金片的另一种可取方法是，在支座的另一侧同时钎焊一块对称的硬质合金片，使应力平衡。这种克服工件弯曲的方法，不仅提供

了抗应变的钎焊组件，而且使它具有两个耐磨面，使该组件的使用寿命增长一倍。

8.3.3.3 钎焊后处理

必须在钎焊后进行热处理的工具钢构件，则应严格按该类钢的热处理规范进行处理。

硬质合金钎焊后必须使焊件在空气中缓慢冷却，如将焊件焊后立即放到 200℃ 左右的炉中，或插入如草木灰等保温介质中，让其缓慢冷却至接近室温后取出。这样可消除接头中的应力，减少硬质合金或接头开裂的危险。此外，也可以锤击钎焊接头的反面，使应力得到一定程度的释放。

组件上的残余钎剂残渣可用热水冲洗，或用一般清除残渣的混合液清洗，随后用合适的酸洗液酸洗，清除基体金属刀杆上的氧化膜。注意不要使用硝酸溶液，因为硝酸溶液容易腐蚀钎料金属。

8.4 高温合金的钎焊

高温合金可分为以下几类：

1) 铁基高温合金，如 GH132，它属于时效硬化奥氏体合金，可制造 700℃ 以下工作的工件；

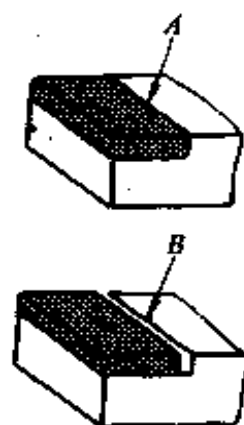


图 8-3 为减小钎焊应力，A 面涂白垩粉阻止钎料润湿，或留有间隙槽 B

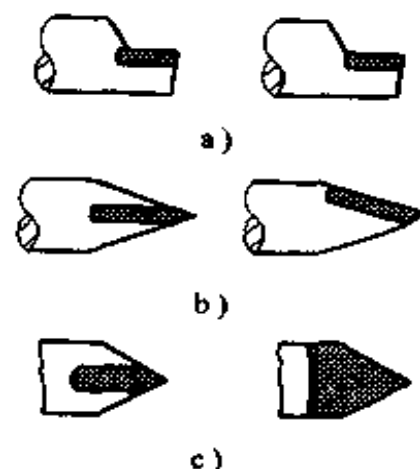


图 8-4 尽量避免槽内钎焊，多采用单一的钎焊面（图右）

2) 铁镍基高温合金, 如 K14, 用于 900℃ 以下燃气涡轮导向叶片或工作叶片;

3) 镍基高温合金, 绝大部分高温合金属于镍基合金, 它们用来制造火焰筒、燃烧室、涡轮工作叶片和导向叶片等。

钴基合金在我国应用较少。

用于钎焊结构的一些高温合金的牌号、成分和热处理规范列于表 8-11 中。

高温合金的钎焊主要用于高温工作的构件, 如燃气涡轮导向叶片或工作叶片、火焰筒、燃烧室和加力燃烧室等。

8.4.1 钎焊特点

高温合金含有较多的铬, 表面的 Cr_2O_3 比较难以去除。钎焊高温合金时, 很少采用钎剂, 因为钎剂中的硼酸和硼砂同母材作用后产生硼向母材渗入, 造成各种缺陷。所以高温合金绝大多数都用气体保护钎焊和真空钎焊。同时, 对保护气体的纯度要求高。

对于一些含铝、钛量高的高温合金来说, 如 GH33、GH37、GH132、K3、K14、K17 等, 它们的表面除了形成 Cr_2O_3 外, 还有 Al_2O_3 和 TiO_2 等氧化物, 这两种氧化物无论是在氢气或氩气保护下钎焊均不能除去, 必须采用一些其它措施。含铝、钛高的合金最适于真空钎焊, 此时可得到光洁的表面, 确保钎料很好铺展。

高温合金都在淬火状态下使用, 有的还要经过时效处理, 以保证获得最佳性能。因此, 对这些合金的钎焊温度应选择尽量与它们的淬火温度一致。钎焊温度过高, 会影响其性能, 例如, 与 GH33 成分接近的 Inconel702 合金, 经 1220℃ 钎焊后, 其抗拉强度比正常热处理后的抗拉强度低很多, 这是由于钎焊温度比正常淬火温度高得多的缘故。

对于 GH37、K3 等固溶处理温度较高 (1200℃ 左右) 的合金来说, 经 1200℃ 钎焊加热后, 对合金性能没有影响。而对时效硬化合金来说, 钎焊后还应按照规定的规范进行时效处理。

8.4.2 钎料、钎剂和保护气体

8.4.2.1 钎料

表 8-11 高溫合金成分、熱處理及機械性能

牌 号	化学成分(质量分数, %)													热处理规范
	Ni	Cr	C	Mo	Mn	Si	W	V	Al	Ti	Fe	Nb	Co	
GH30	≥75	19~22	≤0.12	—	≤0.7	≤0.8	—	—	≤0.15	0.15~0.38	≤1	—	Cu<0.2	淬火: 980~1020℃, 空冷
GH33	基	19~22	≤0.06	—	≤0.35	≤0.65	—	—	0.55~0.95	2.3~2.7	≤1	—	—	淬火: 1080℃, 空冷 时效: 700℃, 16h 空冷
GH37	基	13~16	≤0.10	2~4	≤0.50	≤0.60	5~7	0.10~0.50	1.7~2.3	1.8~2.3	≤0.5	—	—	一次淬火: 1190℃, 空冷 二次淬火: 1050℃, 空冷 时效: 800℃, 16h 空冷
GH39	基	19~22	≤0.08	1.8~2.3	≤0.4	≤0.8	—	—	0.35~0.75	0.35~0.75	≤3	0.9~1.3	Cu<0.2	淬火: 1050~1080℃, 空冷
GH44	基	23.5~26.5	≤1.0	—	≤0.5	≤0.8	13~16	—	≤0.5	0.30~0.70	≤4	—	—	淬火: 1120~1160℃, 空冷
GH132	24~27	13.5~16	≤0.08	1.0~1.5	1~2	0.4~1.0	—	0.10~0.50	≤0.40	1.77~2.30	基	—	—	淬火: 980℃, 油冷 时效: 720℃, 16h 空冷
K3	基	10~12	0.11~0.18	3.8~4.5	<0.5	<0.5	13~16	—	5.3~5.9	2.3~2.9	<2	—	4.5~6.5	淬火: 1210~1220℃, 空冷
K14	40~50	11~13	<0.1	—	≤0.5	≤0.5	6.5~8.0	—	1.8~2.4	4.2~5.0	余量	—	—	淬火: 1100℃, 空冷
K17	基	8.5~9.5	0.13~0.22	2.5~3.5	≤0.5	≤0.5	—	0.6~0.9	4.8~5.7	4.7~5.3	≤1	—	14~16	铸态

高温合金多在高温下工作，所以选用的钎料应满足高温工作的要求，可由表 8-12 查找。

表 8-12 高温合金钎焊主要用钎料

类 别	牌 号	钎料主要成分(质量分数, %)	熔化温度/℃
镍 基	BNi-1	Cr14.0, Si4.0, B3.3, Fe4.5, Ni 余	970~1036
	BNi-2	Cr7.0, Si4.5, B3.1, Fe3.0, Ni 余	970~999
	BNi-5	Cr19.0, Si10.2, Ni 余	1075~1135
含 钼 钎 料	Ag-20Pd-5Mn		1000~1120
	Ag-33Pd-3Mn		1180~1200
	Cu-20Pd-10Mn-15Ni		1060~1100
	Ni-31Mn-21Pd		1120

钎焊高温合金时最常用的钎料是镍基钎料，用镍基钎料钎焊的一些高温合金的性能列于表 8-13 和表 8-14 中。从表中数据可以看出，用镍基钎料钎焊的高温合金的接头强度性能是相当好的。

表 8-13 用 B-Ni73CrFeSiB 钎料钎焊的 GH30 合金的接头强度

接头强度/MPa		600℃	700℃	800℃	850℃	900℃
抗剪强度	钎焊后未处理	277~296	273~283	219~223	—	—
	钎焊后氧化处理 ^①	—	313~325	126~128	111~129	—
抗拉强度		—	—	254~271	191~194	144~145

① 氧化处理，系在静止空气下，在一定温度下，每次加热 24h，累计 100h。

表 8-14 用 B-Ni82CrSiBFe 钎料钎焊的一些高温合金的性能

母 材	试验温度/℃	接头抗拉强度/MPa	接头抗剪强度/MPa
K3 + GH30	20	229	163
	900	182	—
K14 + GH30	20	310	229
	800	292	—
K14 + GH132	800	185	—

用镍基钎料钎焊高温合金时，接头强度随间隙大小而变。当间隙

很小时，可以得到均一的固溶体组织的钎焊接头，这种接头的强度和塑性都比较好。如果接头的间隙增大，接头强度下降，所以必须保持较小的间隙。

用含硼、碳的钎料钎焊高温合金时，也会发生晶间渗入现象。晶间渗入的深度，除了同钎料含硼和含碳量有关外，还与母材的成分有关。对于一些除含铬外，尚含有钼、钨、钴等元素的高温合金来说，由于这四种元素均能同钎料中的硼形成稳定的硼化物，铬、钼和钨又能同碳形成稳定的碳化物，晶间渗入的深度可能增大，特别是钎焊薄件时对性能影响较大。含硅、锰等元素的镍基钎料，主要是向晶粒内部体积扩散，对母材性能影响较小。

含钯钎料也用来钎焊高温合金，用银锰钯和镍锰钯钎料钎焊 GH33 合金的一些性能列于表 8-15。含钯钎料的高温性能虽然没有镍基钎料高，但是银锰钯钎料塑性好，可以制成各种形状，钎料对间隙的敏感性小，对母材的扩散和溶蚀小，适于钎焊薄件。镍锰钯钎料同样对母材的溶蚀小，工艺性能好，可以用来钎焊 850℃ 以下工作的焊件。

表 8-15 银锰钯和镍锰钯钎料钎焊 GH33 合金的接头抗剪强度 (MPa)

钎 料	20℃	600℃	700℃	750℃	800℃	850℃
Ag-20Pd-5Mn	—	154	122.5	122.5	108	76
Ag-33Pd-3Mn	—	—	—	170	138	—
Ag-31Mn-21Pd	338	276	257	216	154	122.5

8.4.2.2 钎剂及保护气体

镍基高温合金的钎焊，一般采用保护气体炉中钎焊及真空钎焊。高温合金在干燥、无氧的保护气体中钎焊时可以防止大多数氧化物的生成，而且在大多数情况下可减少原来存在的氧化物。但是，含有钛或铝的高温合金，它们的氧化物难以去除。对于这类合金应该在 133mPa 或更高的真空中进行钎焊。如果在氢气中钎焊，则要求氢气的露点比较低。在惰性气体中钎焊时，为了获得更好的效果，可通入活性气体 (BF₃) 或用硼砂类钎剂。

8.4.3 钎焊工艺

8.4.3.1 钎前准备

镍基高温合金钎焊前的清理是保证钎焊质量和接头在高温使用性能的重要环节。清理的目的在于清除表面的氧化物、油脂、污物或其它外来杂质，防止焊件在高温时受低熔点元素，尤其是铅和硫的影响。

清除镍基高温合金的油污用温热的肥皂水，溶性油、动物油、润滑油或脂肪酸混合物可用温热的（82~93℃）、质量分数为10%~20%的等量碳酸钠和磷酸三钠溶液清洗，其中碳酸钠可由氢氧化钠代替。零件在这种溶液中浸泡0.5h，然后在水中漂洗。矿物油和润滑脂容易溶解于三氯乙烯和其它有机溶液中，但清洗必须彻底。

高温合金表面的氧化膜是比较坚韧的，用钢丝刷很难清除它们，可用金钢砂布或研磨加以去除。酸洗是一种比较彻底清除氧化物的措施，表8-16给出了推荐用于镍基高温合金的酸洗配方及工艺。

表 8-16 镍基高温合金的酸洗配方及工艺

酸 洗 液 配 方			温度 ℃	时间 /min	容 器 材 料
水/L	硝酸波美度 38 ^① /L	氢氟酸 (49%) /L			
12	4	5/8	49~60	15~90	石墨，砖

① 波美度 (Be') 系非法定计量单位，它与密度的关系如下：密度 $\rho =$

$$\frac{144.3}{144.3 - \text{Be}'} \text{ (g/cm}^3\text{)}。$$

用镍基钎料钎焊高温合金时，间隙的大小直接影响到接头的强度和塑性。间隙很小时，可以得到均一的固溶体组织，接头强度和塑性都比较好。因此，焊件的装配间隙应在0.05mm以下。

8.4.3.2 钎焊技术

高温合金广泛使用气体保护钎焊。对GH30合金来说，主要是去除合金表面的 Cr_2O_3 ，表8-17是用B-Ni82CrSiBFe钎料在氢气保护下钎焊GH30合金的结果。可见钎焊GH30合金时，要求采用高纯度的氢气。钎焊含Al、Ti量高的高温合金时，氢气不能还原合金表面的

氧化膜，钎料铺展性很差，此时需采用少量的钎剂，或在工件表面预先镀镍。一般来说，在钎焊加热较快的情况下，0.025~0.05mm厚的镀镍层是有效的。

表 8-17 在氢气保护下 B-Ni82CrSiBFe 钎料钎焊 GH30 的试验结果

氢气露点 /℃	钎焊温度 /℃	加热速度 / (℃/min)	保温时间 /min	表面情况
-45	1060	73	6	稍发黑，钎料基本铺展
-52	1070	73	6	基本光亮，钎料铺展均匀
-55	1060	73	6	光亮，钎料铺展均匀
-60	1090	73	6	很光亮，钎料铺展均匀

用氢气保护钎焊高温合金时，同样应采用高纯度的气体。对于含 Al、Ti 量高的高温合金，很难除去工件表面的氧化膜，此时可用 Ar + BF₃ 的混合气体。

高温合金的真空钎焊可获得最好的质量，特别是钎焊含 Al、Ti 量高的高温合金，当真空度为 65mPa~13mPa 时，可以得到光亮的表面，钎料铺展性很好。如用 B-Ni71CrSi 钎料真空钎焊得到的 GH167 合金接头，其致密性好，强度也很高；使用钎剂的接头因在钎焊接头内有钎剂夹杂物而强度较低；镀镍工件的氢气保护钎焊接头的强度最低，接头总是在镀镍的分界面上破坏。因此，对于含 Al、Ti 高的合金来说最好用真空钎焊。

使用粉末状镍基钎料时，可用聚苯乙烯的二甲苯溶液、聚甲基丙烯酸酯的三氯乙烯溶液、光学树脂溶液作为粘结剂，调成膏状使用，粘结剂在 550℃ 升华，不会在表面上留下残渣。

用镍基钎料钎焊高温合金时，会发生母材向钎料的溶解。溶解强弱视钎焊温度、钎料数量及钎焊时间而定。尤其是用含硼钎料钎焊时，母材的溶解更显著，必须控制钎焊温度、钎料数量及钎焊时间等，以免引起溶蚀、溶穿等缺陷。

利用钎料和母材的相互扩散可以提高钎焊接头的性能。例如，用 B-Ni73CrFeSiB 钎料在 1200℃ 下钎焊 GH33 合金时，将保温时间延长 7h，依靠钎料和母材之间的扩散，可以得到均一的固溶体组织，使钎

焊接头和母材基本上达到等强度。

8.4.3.3 钎焊后处理

在真空气氛及适宜的气保护气氛中钎焊出来的高温合金件，通常不必进行钎后处理。但如果发生了氧化，就要对组件作酸洗处理。对于工作在高温或腐蚀介质中的焊件，如果在钎焊时用了钎剂，则要清除钎剂的残渣。

钎焊能时效硬化的镍基合金，可于钎焊后进行时效处理，这种合金所需的钎料的熔化温度一定要高于基体金属时效处理的温度。

8.5 铸铁的钎焊

铸铁包括白口铸铁、灰铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁。在应用中，常要求将灰铸铁、可锻铸铁及球墨铸铁的本身或与异种金属（大多是铁基金属）相连接，而白口铸铁则很少使用钎焊。

铸铁的钎焊主要用于铸件之间或与其它金属件的连接，还用于铸铁损坏件的修补，如气缸体及缸盖、机床床身及机架等。

8.5.1 钎焊特点

在铸铁中存在的石墨状态的碳很难被钎料所润湿，妨碍优质的冶金结合。这就给灰铸铁的钎焊带来了困难，而对可锻铸铁和球墨铸铁影响比较小。凡遇到润湿困难的场合，在钎焊前就应该清理工件表面的石墨。

当灰铸铁、可锻铸铁或球墨铸铁被加热到它的临界（相变）温度以上时，正常存在的组织开始转变成奥氏体。若冷速过快，就要转变为马氏体，或者转变成含有网状渗碳体的细微珠光体组织，使热影响区性能变坏。因此，钎后应缓冷。它们的临界温度随成分而异，并且随硅含量的增加而逐步升高。

在球墨铸铁和可锻铸铁的钎焊中，若钎焊温度高于 760℃，金相组织可能受到损害，所以钎焊温度应尽量在该温度以下进行。

8.5.2 钎料和钎剂

任何适用于铁或钢的钎料均能用于铸铁的钎焊。然而，更宜采用的是熔点较低的银基钎料，含镍的银基钎料对铸铁具有较大的亲合

性，因而可获得强度较高的接头。铜和铜锌钎料也可以使用，但因它们的温度范围较大，使用时必须十分小心。含磷的铜基钎料不适于铸铁，这是因为会生成脆性的铁-磷化合物而使接头变得很脆。铸铁软钎焊时可采用锡铅钎料。

钎焊铸铁所用的钎剂基本上与碳钢及低合金钢相同。软钎焊时采用氯化锌型水溶液；硬钎焊时，铜基钎料可用硼砂，银基钎料可用 QJ101、QJ102 等钎剂。铸铁钎焊用的钎料和钎剂见表 8-18。

表 8-18 铸铁钎焊用钎料和钎剂

类别	牌 号	钎料组成(质量分数%)及使用温度	钎剂组成(质量分数%)
锡铅 钎料	S-Sn60Pb39Sb	Sn60, Sb0.8, 余 Pb, 183~185℃	氯化锌 19, 氯化氨 6, 盐 酸 3, 氢氟酸 1, 水 74
	S-Pb80Sn18Sb2	Sn18, Sb2.0~2.5, 余 Pb, 183~277℃	
	S-Pb68Sn30Sb2	Sn30, Sb1.5~2.0, 余 Pb, 183~256℃	
	S-Pb58Sn40Sb2	Sn40, Sb1.5~2.0, 余 Pb, 183~235℃	
	S-Sn90Pb10	Sn90, Sb0.15, 余 Pb, 183~222℃	
铜锌 钎料	B-Cu60ZnSn	Cu60, Sn1.0, Si0.3, 余 Zn, 900~905℃	硼 砂
	B-Cu58Zn(Sn)	Cu58, Sn0.9, Si0.1, Fe0.8, 余 Zn, 860~900℃	
	B-Cu62Zn(Si)	Cu62, Si0.5, 余 Zn, 905℃	
银基 钎料	B-Ag50ZnCdCuNi	Ag50, Cu15.5, Cd16, Ni3, 余 Zn, 630~690℃	QJ101 QJ102
	B-Ag54CuZnNi	Ag54, Cu40, Ni1, Zn5, 720~860℃	
	B-Ag58CuNi	Ag56, Cu42, Ni2, 770~895℃	

8.5.3 钎焊工艺

8.5.3.1 钎焊前准备

铸件的表皮常含有砂子、尘污、油垢和润滑脂等杂物，在钎焊前应将其清除。清除油污可采用有机溶剂擦洗的方法；而夹杂物的清除则可采用机械方法，如锉刀及钢丝刷清理等，也可对工件表面进行喷砂或喷丸。此外，可采取氧化火焰灼烧或用化学法清理。此后，还有必要把表面暴露出来的石墨除去。

为了保证获得均匀的接头间隙，通常要求用机器或锉刀来加工铸件表面。接头间隙应根据具体应用条件来确定，应考虑到待焊金属的热膨胀系数、加热方法和钎料的类型等。推荐的接头间隙为 0.05~

0.13mm, 最大的间隙为 0.25mm。

8.5.3.2 钎焊技术

所有常规的钎焊方法都适用于铸铁的钎焊, 具体方法的选择取决于工件的结构形状和尺寸。

由于铸铁表面有 SiO_2 , 在保护气氛中钎焊效果不好, 故一般都使用钎剂。铸铁的钎焊操作过程, 与钎焊碳钢无多大区别。对于较大的工件用铜基钎料钎焊时, 可采取如下的操作工序: 在清理好的钎焊表面上撒一层钎剂, 然后把工件放进炉中(可用焦炭炉)加热或用焊炬加热, 当工件加热到 800°C 左右时, 再加入补充钎剂, 并把它加热到钎焊温度, 再用钎料在接头边缘刮擦, 使钎料熔化填入间隙。为了提高钎缝强度, 铸铁工件钎焊后要在 $700\sim 750^\circ\text{C}$ 进行 20min 的退火处理。

8.5.3.3 钎焊后处理

铸铁件硬钎焊后应有一定时间的保温, 使接头质量得到提高。钎焊件快速冷却不仅会使母材得到不良的金相组织, 还会导致钎缝或母材的开裂。因此, 在钎焊后必须缓慢冷却。

钎后过剩的钎剂及残渣一般用温水冲洗即可清除。如果难以去除, 则可先用质量分数为 10% 的硫酸水溶液或质量分数为 5%~10% 的磷酸水溶液清洗, 而后再用清水洗净。

8.6 铝及其合金的钎焊

铝及其合金的钎焊得到广泛的应用, 如雷达波导元件、制冷机的蒸发器、汽车热交换器、空冷器、液压管配件及铝电缆接头等。此外, 日常用的壶、锅、及各种容器、器皿等。

8.6.1 钎焊特点

铝及其合金的钎焊性与其它金属相比是较差的, 其原因在于:

1) 铝对氧的亲合力很大, 表面很容易形成一层致密而稳定、且熔点很高 (2050°C) 的氧化膜, 很难去除。室温时的氧化膜厚度为 5nm 左右; 在 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 的钎焊温度下, 膜厚剧增至 $100\sim 200\text{nm}$, 阻碍钎料和母材的润湿和结合, 成为钎焊时的主要障碍之一。

2) 由于钎料和母材之间电极电位相差悬殊, 给钎焊接头的抗腐

蚀性能带来不利的影响，软钎焊接头抗腐蚀性的影响尤为明显。

3) 硬钎焊时，由于钎料的熔点同铝及铝合金的熔点相差不大，如钎焊温度控制不当，会造成过度溶蚀，甚至引起母材熔化。一些热处理强化的铝合金，还可能因钎焊加热引起时效或退火等软化现象，导致钎焊接头性能降低。火焰钎焊时，因铝合金在加热中颜色不改变，温度判断比较困难，故要求操作者技术水平高。

4) 大部分钎剂具有强烈的腐蚀性，如果钎焊后不立即清除干净，接头有很快被腐蚀破坏的危险。

常见的铝及铝合金的钎焊性见表 8-19。

表 8-19 常见铝及其合金的钎焊性

类 别			牌 号	主要组成 (质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎 焊 性	
						软钎焊	硬钎焊
工业纯铝			L2~L6	Al≥99.0	~660	优良	优良
变 形 铝 合 金	防锈铝 (非热处理强化)	铝	LF1	Al-1Mg	634~654	良好	优良
			LF2	Al-2.5Mg-0.3Mn	627~652	困难	良好
			LF3	Al-3.5Mg-0.45Mn-0.65Si	627~652	困难	很差
		镁	LF5	Al-4.5Mg-0.45Mn	568~638	困难	很差
			LF6	Al-6.3Mg-0.65Mn	550~620	很差	很差
		铝锰	LF21	Al-1.2Mn	643~654	优良	优良
	热处理强化铝合金	硬铝	LY11	Al-4.3Cu-0.6Mg-0.6Mn	613~641	很差	很差
			LY12	Al-4.3Cu-1.5Mg-0.5Mn	502~638	很差	很差
			LY16	Al-6.5Cu-0.6Mn	549~	困难	良好
		锻铝	LD2	Al-0.4Cu-0.7Mg-0.25Mn-0.8Si	593~652	良好	良好
			LD6	Al-2.4Cu-0.6Mg-0.9Si-0.15Ti	555~	困难	困难
			LD9	Al-4Cu-0.1Mn-0.75Fe-0.75Si-2Ni	509~633	很差	困难
			LD10	Al-4.4Cu-0.6Mg-0.7Mn-0.9Si	510~638	很差	困难
		超硬铝	LC4	Al-1.7Cu-2.4Mg-0.4Mn-6Zn-0.2Cr	477~638	很差	困难
			919	Al-1.6Mg-0.45Mn-5Zn-0.15Cr	600~650	良好	良好

(续)

类 别	牌 号	主要组成 (质量分数, %)	熔化温度 /℃	钎焊性	
				软钎焊	硬钎焊
铸造铝合金	ZL102	Al-12Si	577~582	很差	困难
	ZL202	Al-5Cu-0.8Mn-0.25Ti	549~584	困难	困难
	ZL301	Al-10.5Mg	525~615	很差	很差

注：表中优良表示容易进行钎焊；良好表示一般能够保证钎焊质量；困难表示除非采取特殊的措施，否则不易进行钎焊；很差表示难以进行钎焊。

8.6.1.1 铝及铝合金的软钎焊性

就软钎焊来说，纯铝和铝锰合金的钎焊性优良，容易进行钎焊。铝镁合金的钎焊性与合金的含镁量有关。当用有机软钎剂时，随着合金含镁量的增多，铅-锡-铋低温软钎料的铺展面积急剧减小。这是由于含镁量高的铝合金表面镁的氧化物增多，有机钎剂难以去除它们，致使钎料难以铺展。用锌铝钎料和反应钎剂钎焊铝镁合金时，钎料的铺展性基本不受含镁量的影响，因为反应钎剂是依靠与母材反应而破坏和清除母材表面氧化物，并在母材表面沉积纯金属层来保证锌铝钎料的铺展的。含镁量 $w_{Mg} > 0.5\%$ 的铝合金用含锡钎料钎焊时可能产生晶间渗人的倾向；对于锌基钎料也存在类似现象，但远不及前者明显。合金中如有冷加工引起的应力，会加剧晶间渗人的倾向。钎焊前采取加热到 370℃ 消除应力的处理，可以有效地减轻晶间渗人。

铝合金的含硅量对其钎焊性也有很大影响。随着铝合金中含硅量的增高，钎料的铺展性均下降，这是由于钎剂溶解氧化硅的量很小的缘故。因此，含硅量 $w_{Si} > 5\%$ 的铝合金，一般只宜采用超声波或机械刮擦方法来清除氧化膜，而后才能进行钎焊。

对于是热处理强化的铝合金（如 LY11、LY12 及 LD 等）而言，在钎焊加热时会发生过时效和退火现象。如 LY12 铝合金在空气炉中加热到 300~420℃ 温度范围内，由于析出的 $CuAl_2$ 集聚粗化，发生强度下降、塑性回升的软化现象。因此，这种铝合金适于 300℃ 以下钎焊。但用低温软钎料钎焊的接头强度低，不能发挥高强度铝合金的作

用。而且这些铝合金多数有晶间渗入倾向，故一般不宜软钎焊。

8.6.1.2 铝及铝合金的硬钎焊性

纯铝和铝锰合金的硬钎焊性最好，表面氧化物可以用钎剂清除。对于铝镁合金来讲，其钎焊性受到含镁量的影响。当含镁量 $w_{Mg} > 1.5\%$ 时，随着含镁量的增加，钎焊性变坏；当含镁量 $w_{Mg} > 2.5\%$ 时，钎焊困难，不推荐用钎焊方法来连接。

硬铝的钎焊性很差，主要问题是出现过烧。以 LY12 为例，加热温度超过 505°C 后，由于发生过烧，合金的强度和塑性均显著下降，因此钎焊温度必须控制在 505°C 以下。由于缺少合适的钎料，硬铝合金的硬钎焊是困难的。

LC4 超硬铝在温度超过 470°C 时就发生过烧，故除采用快速加热的钎焊方法（如浸渍钎焊）外，不宜进行硬钎焊。

锻铝合金中 LD2 的硬钎焊性比较好。它的固相线温度为 593°C ，故应在低于 590°C 的温度进行炉中钎焊为宜。LD6 合金的含镁量也不高，对钎焊性没有影响。但它的固相线温度在 555°C 左右，因此过烧的敏感性比 LD2 大得多。LD6 合金的硬钎焊温度以 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ 为宜，但在 600°C 以下进行的浸沾钎焊，对其力学性能无不良影响。这是因为浸渍钎焊加热过程迅速，过烧过程来不及发展。LD9、LD10 合金虽然含镁量并不高，但其固相线温度低而使钎焊困难。

ZL102 铸铝合金是非热处理强化合金，固相线温度 577°C ，故必须在低于 577°C 温度下钎焊。由于它的含硅量高，使钎料难以润湿。ZL202 铸铝合金含铜量较高，固相线温度低，钎焊温度高于 550°C 就容易出现过烧现象，因此难以钎焊。ZL301 铸铝合金由于含镁量高，不能钎焊。

8.6.1.3 铝钎焊接头的抗腐蚀性

铝钎焊接头的腐蚀是人们关注的问题。铝钎焊接头的腐蚀现象可以归纳为下列四种类型：

- (1) 表面局部腐蚀 它发生在钎缝的表面上或近缝区的母材表面上，腐蚀痕迹是白斑或疏松的腐蚀产物，腐蚀物下面是麻坑；
- (2) 皮下腐蚀 它发生在钎缝内部的夹渣处。夹渣通过钎缝处的

缺陷与大气串通，腐蚀形式表现为鼓包；

(3) 间隙腐蚀 发生在钎缝未填满或机械加工后暴露在外面的钎缝夹渣处，表现为白花状或敞口鼓包；

(4) 晶间腐蚀 发生在致密的钎缝上，特别是用 B-Al67CuSi 钎料钎焊的钎缝上。晶间腐蚀是由于大量的 CuAl_2 沿晶界析出，它的电极电位比铝的 α 固溶体高，在晶界处腐蚀的电动势比其它位置高，易产生晶间腐蚀。腐蚀现象表现为一块块烂掉的粉末。

铝合金钎焊接头的腐蚀主要是电化学腐蚀。钎料和母材的成分不同，其电极电位也不同。如有电解质存在，在钎料和母材界面处将形成微电池，使接头发生电化学腐蚀。两者的电极电位差越大，则腐蚀越严重，电极电位低的合金作为阳极将被腐蚀掉。表 8-20 列出了一些金属的电极电位。图 8-5 为不同钎料钎焊铝时接头电极电位的分布。

表 8-20 一些金属的电极电位

金 属	电极电位/V	金 属	电极电位/V
Zn	-1.10	Sn	-0.49
Al	-0.83	Cu	-0.20
Cd	-0.83	Bi	-0.18
Fe	-0.63	Ag	-0.08
Pb	-0.55	Ni	-0.07

由表 8-20 可见，锡和铅的电极电位比铝高。当用锡铅钎料钎焊铝合金时，形成以铝为阳极的微电池。按理被腐蚀的应是铝而不是锡铅钎料，但实际情况并非如此。由图 8-5a 可见，接头的电极电位分布出现了异常现象，即在铝和钎料的界面处形成了比铝更负的电极电位，致使界面处产生强烈腐蚀。形成这种电位分布的原因可能是锡铅钎料和铝的结合较差，界面往往存在空隙和微孔，促使缝隙腐蚀得到发展，接头很快从界面破坏。

低温软钎料中加入锌可以提高其抗腐蚀性。这是由于铝与锌能互溶，因而随着钎料含锌量的增加，钎料和母材之间的结合加强，界面

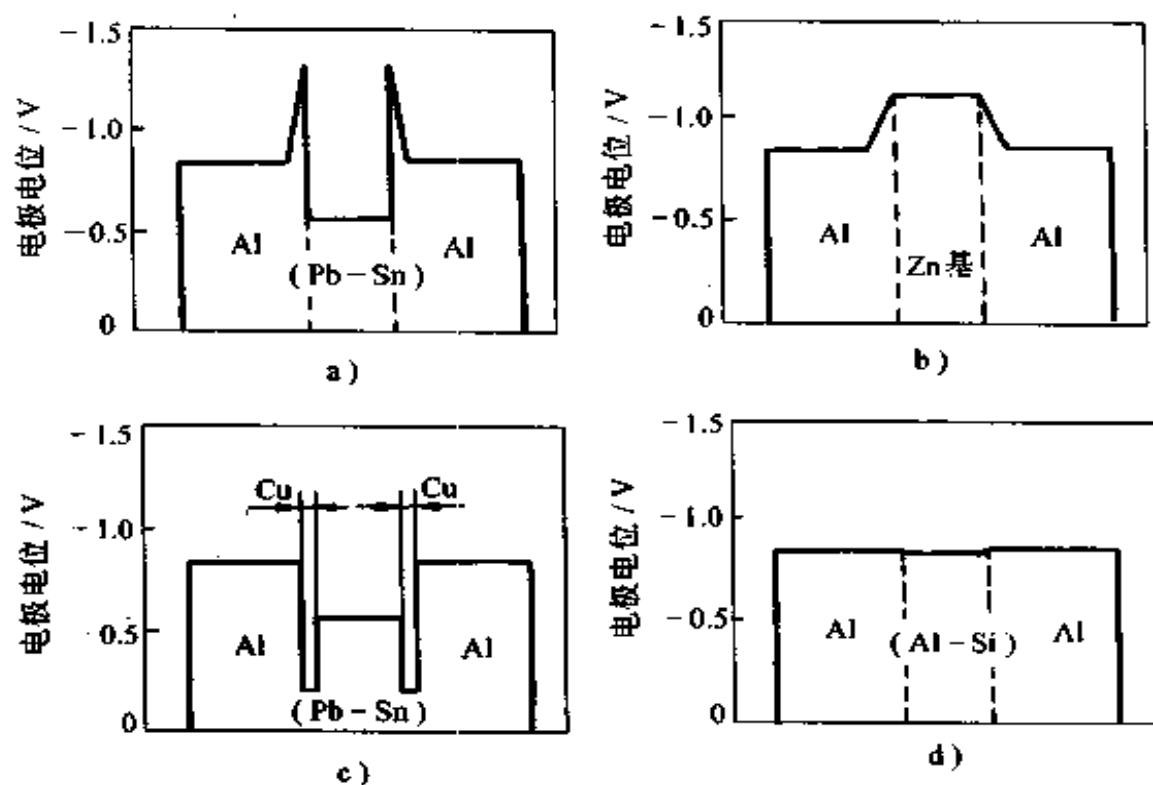


图 8-5 不同钎料钎焊铝时接头电极电位的分布

- a) 锡铅钎料 (未镀铜) b) 锌基钎料
c) 锡铅钎料 (镀铜) d) 铝硅钎料

处的电极电位得到提高, 接头的抗腐蚀性也因此获得改善。

用锌基钎料钎焊铝时, 接头的电极电位分布将发生根本的变化 (图 8-5b)。此时, 钎料的电极电位比铝低, 成为阳极。同时, 钎焊时界面处钎料与铝作用较充分, 形成一个较宽且致密的中间过渡层, 所以从铝到钎料电极电位的过渡比较平缓。在这种情况下, 钎料虽发生腐蚀, 但钎缝有一定的宽度, 且与铝的电极电位相差不多, 故抗腐蚀能力仍很好。

采用在铝表面预先镀铜或镍, 再用锡铅钎料钎焊工艺, 不但简化了去膜, 而且接头的电极电位分布也发生了有利的变化 (图 8-5c)。此时, 不会在界面上发生腐蚀, 所以生产上常采用这种工艺。

用铝硅钎料钎焊铝时, 钎料的电极电位与铝相近 (图 8-5d), 钎料与铝的结合良好。因此, 在硬钎焊铝时, 采用铝硅系钎料钎焊铝的

接头抗腐蚀性最好。

8.6.2 钎料、钎剂和保护气体

8.6.2.1 钎料

铝用钎料及其使用温度范围见图8-6,其中铝硅系及部分锌铝系用于硬钎焊,其余均用于软钎焊。

铝用软钎料的成分及其性能见表3-6,各类软钎料的钎焊特点如表3-4所示。根据具体要求分别选用低温、中温或高温软钎料。

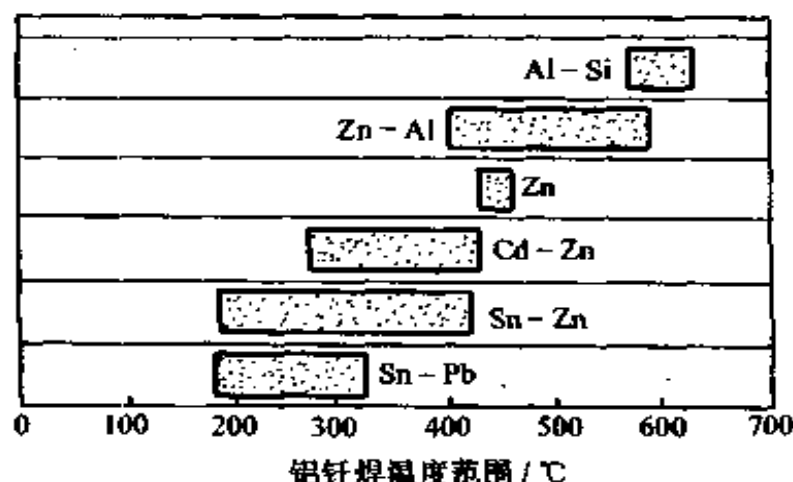


图 8-6 铝用钎料及其使用温度范围

应该指出,铝用软钎料在国内市场供

应较少,品种多为仿苏牌号,如 S-Zn58Sn40Cu2、S-Zn60Cu40、S-Zn72Al28、S-Pb51Sn1Cd9Zn9 等,实际上应用效果较差,因此有待于进一步开发研究。

铝和铝合金的硬钎焊只能使用铝基钎料,它们多为铝硅系钎料(见表3-12),各钎料的适用范围列于表8-21中。用这些钎料钎焊的某些铝合金接头的抗剪强度列于表8-22中。由于这些铝基钎料的熔点都接近于母材的熔点,因此与钎焊其它金属相比,铝和铝合金的硬钎焊时应更严格地控制加热温度。

表 8-21 铝和铝合金用硬钎料的适用范围 (℃)

牌 号	熔化温度	钎焊温度	可钎焊的铝合金
B-Al88Si	577~582	582~640	L2~L6, LF21, LF1, LF2, LD2
B-Al67CuSi	525~535	555~575	L2~L6, LF21, LF1, LF2, LD2, ZL102
B-Al83SiCu	521~585	585~604	L2~L6, LF21, LF1, LF2, LD2
B-Al76SiZnCu	516~560	562~582	L2~L6, LF21, LF1, LF2, LD2

表 8-22 铝硅系钎料钎焊铝和铝合金接头的抗剪强度

牌 号	接头抗剪强度/MPa		
	纯 铝	LF21	LY12
B-Al88Si	58.8~78.4	98~117.6	—
B-Al67CuSi	58.8~78.4	88.2~107.8	117.6~196
B-Al83SiCu	58.8~78.4	98~117.6	—
B-Al76SiZnCu	58.8~78.4	98~117.6	—

钎焊铝合金的钎料通常以粉末、膏状、丝材或薄片等形式供应。可以手工送进，也可以预先放置在接头区。在某些场合采用以铝作为芯体，以钎料作覆层所构成的钎料复合板。覆层是铝-硅钎料，可以采用单面复合，也可以采用双面复合。在制造时，用滚压使覆层与芯体结合在一起。铝敷钎料复合板的牌号及成分见表 8-23。复合板常常用来作为钎焊组件的一个部件，另一个部件可以是无包覆层的合金。钎焊时，复合板上的钎料熔化后，受毛细管作用和重力作用而流布，填满接头中的间隙。

表 8-23 铝敷钎料板的牌号及成分

牌 号	板芯金属	包覆层成分 (质量分数, %)			熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃
		Si	Cu + Zn	Al		
LT-63	铝	11~12.5	0.15	余量	577~600	600~610
LT-63-1	LF21	11~12.5	0.15	余量	577~600	600~610
LT-3	LF21	6.8~8.2		余量	577~612	593~615

8.6.2.2 钎剂和保护气体

铝及铝合金软钎焊时常采用钎剂去膜，所使用的钎剂组成见表 2-4 和表 2-5。配合钎焊温度低于 275℃ 的低温软钎料可使用有机软钎剂，这类钎剂作用时大量产生气体，影响钎料的润湿效果，且使钎料难以填充间隙。但钎剂的腐蚀性小，如钎焊 LF21 铝合金时，QJ204 的残渣在湿空气下保留 1000h 没有引起明显的腐蚀。钎焊温度高于 275℃ 时，即使用中温或高温软钎料，也必须使用反应钎剂。含氟化锡的反应钎剂一般约在 315~340℃ 温度区间起作用，主要配合有类似熔化特性的 Sn-Zn 钎料使用。此种钎剂不宜用于高温软钎料，因会使 Sn 进入钎

焊接头中,严重降低它的抗腐蚀性。氯化锌为基的钎剂反应温度约为 $340\sim 380^{\circ}\text{C}$,适用于高温软钎料。其中 $88\text{ZnCl}_2-10\text{NH}_4\text{Cl}-2\text{NaF}$ 钎剂性能最好。使用时为了防止钎剂失效,钎料应预先放在钎焊处。反应钎剂具有强烈的腐蚀性,其残渣必须仔细地清除干净。

铝及铝合金的硬钎焊目前仍主要使用钎剂去膜。一般使用氯化物为基的钎剂,具体组成见表 2-5。其中 QJ201 具有较好的活性,能充分去除氧化膜,保证钎料的铺展,特别适用于火焰钎焊。炉中钎焊常使用 QJ201、QJ207 及 $\Phi 124$,有时可使用不含氯化锌的钎剂 $\Phi 5$ 等。近年来,无腐蚀性氟化物钎剂(见表 2-5)已开始配合铝硅钎料用于炉中钎焊。它的去膜效果好,其残渣不吸潮,不与母材相互作用,则可增强接头的抗腐蚀性。但它的熔点高,因而限制了它的使用范围。

铝和铝合金在硬钎焊时,常采取中性气体保护,常用的氢气和氮气必须有较高的纯度,它们的露点温度必须低于 -40°C 。

8.6.3 钎焊工艺

8.6.3.1 接头形式和夹具

铝和铝合金的钎焊,宜采用搭接接头,推荐的接头形式见图 8-7。

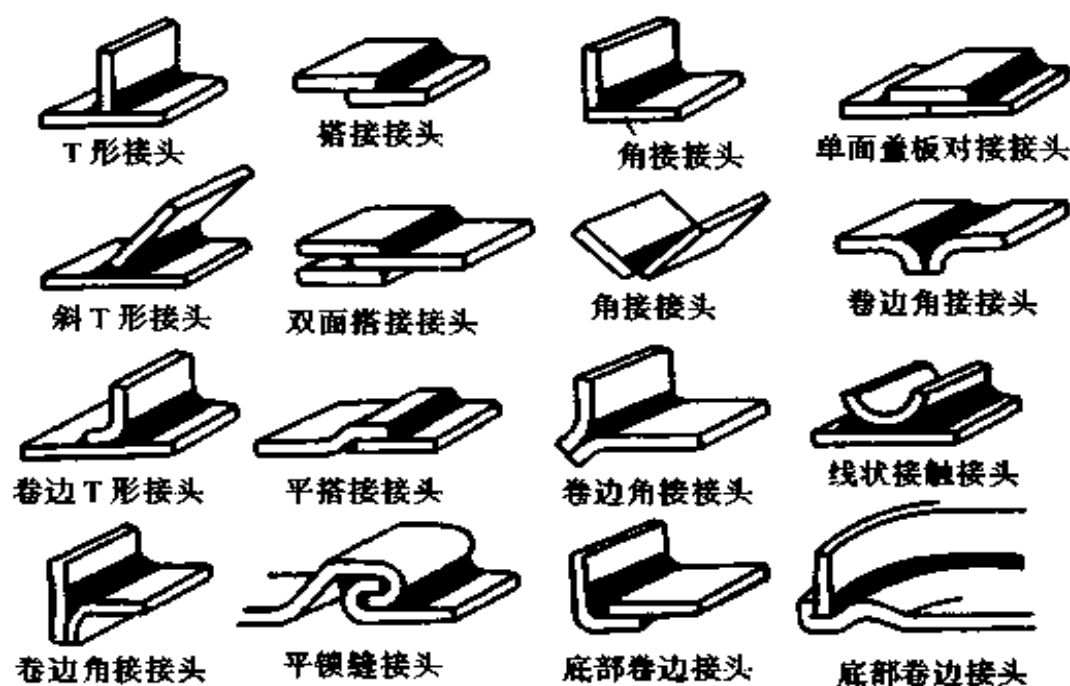


图 8-7 推荐的铝钎焊接头形式

在装配铝零件时，不使用压配合或紧配合，这样有利于钎料的铺展和减少钎缝中的夹渣。

根据经验，当浸渍钎焊时，搭接长度小于 6.4mm，适宜的接头间隙为 0.05~0.10mm；对于火焰钎焊、炉中钎焊、机械化火焰钎焊或感应钎焊来说，当搭接长度等于或小于 6.4mm 时，可以采用 0.10~0.25mm 的间隙。对于搭接长度更长的接头，间隙可增加到 0.4mm，通常可通过试验来确定正确的间隙。

接头设计应当使零件在钎焊前容易装配。设计密封的组件时，必须为钎焊期间留出气体逸出的孔道。铝合金钎焊零件最好设计成自夹紧形式，夹具和固定装置必须使零件不致因热膨胀的差异而发生错动。通常采用纯镍、因康镍、不锈钢、特种合金钢以及低碳钢来制造夹具和固定装置。低碳钢夹具的使用寿命较短，但在其表面上镀铝可延长使用寿命。

8.6.3.2 钎前清洗和表面处理

铝及铝合金的钎焊对零件表面的清洁度有较高的要求。要获得良好的质量，必须在钎焊前很好去除表面的油污、氧化膜。铝及铝合金除油可以在质量分数为 3%~5% 的 Na_2CO_3 、2%~4% 的 601 洗涤剂（烷基磺酸钠）水溶液中，温度 60~70℃，清洗 5~10min，然后用清水漂净。可采用下列方法浸蚀去膜：①质量浓度为 100g/L 的 NaOH 水溶液，溶液温度 20~40℃，浸蚀时间为 2~4min；②质量浓度为 20~35g/L 的 NaOH、20~30g/L 的 Na_2CO_3 ，其余为水，溶液温度 40~60℃，浸蚀时间为 2min；③质量浓度为 50~100g/L 的 NaOH、30~50g/L 的 NaF，其余为水，溶液温度 40℃。

浸蚀后，零件在热水中洗净，放在 HNO_3 水溶液中光泽处理 2~5min，再在流动的冷水中洗净，并在温度不低于 60℃ 的条件下干燥到完全没有水渍。

另一种浸蚀的方法是在零件脱脂后，浸在体积比为 10% 的硝酸加 0.25% 的氢氟酸水溶液中，室温下保持 5min，然后用热水或冷水洗净并干燥。

经清洗后的零件切忌用于摸或沾染其它污物，并应在 6~8h 内进

行钎焊。在可能的条件下，零件清洗干燥后应立即钎焊。

8.6.3.3 钎焊技术

(1) 软钎焊技术 铝及铝合金的软钎焊方法常见的有火焰钎焊、烙铁钎焊和炉中钎焊等，这些方法在钎焊时均应施加钎剂。在钎焊过程中应特别注意控制加热温度和保温时间。火焰钎焊和烙铁钎焊时，热源应避免直接加热钎剂以防止钎剂过热失效，尤其是有机钎剂的焦化失效使钎焊过程无法进行。由于铝能溶于大多数钎料（尤其高锌钎料）中，因而一旦接头已完成即应终止加热，以免发生溶蚀。

此外，机械去膜方法和物理去膜方法也应用于铝及铝合金的软钎焊，这就是刮擦钎焊和超声波钎焊。这些方法一般不便于用来直接钎焊接头，而是向零件的钎焊面上涂覆钎料。但对于有些接头形式，例如 T 形接头或角接，利用某些成分（如 Zn-5Al-4.5Ag-1.5Cu）的锌基钎料棒作刮擦工具，可以直接形成接头。此时，先把焊件加热到熔化钎料棒端头的温度，然后用钎料棒端头紧靠接头并沿之拖动，钎料端头在刮擦破除母材表面的氧化膜的同时熔化而与母材结合形成接头。不过，从本质上看，这属于一种非毛细钎焊工艺。

铝的低温软钎焊由于钎料和钎剂均不令人满意，生产中也常采用母材表面预镀金属层的工艺（一般镀铜或镍），经过这样处理的表面可以使用钎焊铜或镍的工艺来钎焊。

(2) 硬钎焊技术 铝及铝合金硬钎焊主要采用火焰钎焊、炉中钎焊、浸沾钎焊、真空钎焊及气体介质保护钎焊等方法进行。

1) 火焰钎焊。多用于钎焊小型焊件和单件生产。火焰的产生可采用多种可燃气体，如乙炔、煤气、雾化汽油、石油气等。一般应避免使用氧乙炔焰，因乙炔中的杂质同钎剂接触将使钎剂失效。目前较多使用汽油压缩空气火焰。不论使用何种火焰，应调节成轻微还原性火焰。这种火焰能防止母材氧化，又具有较软的加热特性。焊炬的喷嘴应设计成多孔型，使火焰分散，有利于均匀加热，这与普通的气焊炬是不同的。

火焰钎焊操作时，可预先将钎剂、钎料放置于被钎焊处，与工件同时加热；也可以采取先加热工件到接近钎焊温度，然后手工送进蘸

有钎剂的钎料棒到被钎焊处。火焰加热时，应用还原性火焰的外焰均匀地加热工件，切忌直接加热钎剂和钎料。待钎剂与钎料熔化后，视钎料均匀填满后，慢慢撤去加热火焰。

铝及铝合金的钎焊温度往往接近母材的熔点，因此在火焰加热时应严格掌握加热温度，以防止母材的熔化。

2) 空气炉中钎焊。空气炉中钎焊铝及铝合金时，一般应预置钎料，并将钎剂溶解在蒸馏水中，配成质量分数为 50%~75% 的稠溶液，并将它涂覆或喷射在钎焊面上，也可将适量的粉末钎剂覆盖于钎料及钎焊面处，然后把装配好的焊件放到炉中加热钎焊。为了严格控制加热温度，炉温波动应控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 范围内。

然而，这种普通的空气炉中钎焊方法对钎剂的效用有不利的影晌，即在钎料熔化前的加热过程中大部分钎剂因空气中的水分作用而失效，使在钎焊温度下真正起去膜作用的只是一小部分钎剂。如果在干燥空气炉中钎焊，可以节省钎剂的用量。

3) 浸渍钎焊。铝及铝合金的浸渍钎焊属于盐浴浸渍钎焊，是把焊件浸入熔化的钎剂中实现的。盐浴浸渍钎焊一般宜用膏状或箔状钎料，不宜使用粒状或丝状钎料。这是因为焊件浸入时，熔化钎剂的粘滞作用和浮力易使钎料错位或失落。膏状或箔状钎料可以方便地把它们敷在或夹在间隙中，这不但可防止钎料失落，而且可以避免钎料的过早熔化。最佳的方式是用复合钎料板，可简化装配工艺、减少氧化膜的生成，使钎料更易流动形成接头。

浸渍钎焊时，钎剂不但起去膜作用，而且是加热介质。由于焊件在钎焊时要与大量的熔化钎剂接触，因此其成分中应避免使用重金属氯化物，其组成见表 2-5。钎剂用量主要决定于焊件（连同使用的夹具）的最大尺寸、重量及所要求的生产率。首先，应保证在要求的生产率下最大的焊件浸入时，钎剂温度不致下降过多；其次，应保证焊件与盐槽壁之间的间隔。一般情况下，钎剂用量可取每小时（预热后）浸渍钎焊的焊件的 3~4 倍以上。另外，由于钎焊中焊件会带走部分钎剂，因此，必须经常补充钎剂并控制杂质含量。正常的钎剂溶液应呈微酸性，pH 值介于 5.3~6.9 之间，钎焊过程中钎剂一直处于

熔化状态。

钎焊工艺过程包括预热、钎焊及钎焊后处理。装配好的焊件应在钎焊前进行预热，使其温度接近钎焊温度，然后浸入钎剂中钎焊。预热是为了干燥零件，防止带水分的焊件进入盐池而发生爆溅，并避免盐浴温度降低过多，从而缩短钎焊时间。同时，为了避免钎剂在焊件上凝固阻塞焊件中的通道，预热温度一般在 $540\sim 560^{\circ}\text{C}$ 范围内。预热时间主要根据焊件大小确定，应保证焊件各个部位都达到规定的预热温度。预热时间过长，将使氧化膜厚度激增，钎料层中的硅向板芯金属中扩散，使钎料层成分变化，有效厚度减薄，熔点升高，影响钎焊质量。

预热后的焊件应立即浸入盐浴中钎焊。焊件应倾斜一小的角度，以适当的速度浸入钎剂溶液中，注意浸入时防止零件的错位和变形。同时要使钎剂容易进入焊件内部，使其中的空气容易排出。对于不同部位的质量相差较大的焊件，则应将质量大的部分首先浸入并保持一定时间，然后再将其余部分浸入，以求得加热均匀。对于大焊件，在浸入数分钟后，宜以一定的倾角吊出盐浴表面，排出焊件内部的钎剂溶液后再次浸入，即采用两次或多次浸渍工艺。当钎料已充分熔化填缝形成钎角后，即将焊件仍以微小倾角、缓慢平稳地吊离盐浴一小距离，保持到钎料凝固后再离开。钎焊时，应严格控制钎焊温度及钎焊时间。钎焊温度应根据焊件的材料、厚度、尺寸大小，钎料的成分和熔点，并根据具体情况来确定。一般介于钎料液相线温度和母材固相线温度之间。对于亚共晶钎料层，也可取介于钎料结晶区间的温度。钎焊温度过高或过低都不利于获得优良的接头。温度过高，母材易被溶蚀，钎料易于流失；温度过低，则会造成钎料熔化不够，可能产生大面积脱钎。同时盐浴温度的波动应控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内。焊件在盐池中的浸渍时间应保证钎料充分熔化和流动，但时间不宜过长。否则，钎料中的硅可能扩散进入板芯金属中去，使之变脆，且使钎缝钎角变小。

4) 真空钎焊。铝的氧化膜十分稳定，单靠真空条件下不能达到去膜的目的，必须同时借助于蒸气压较高、对氧的亲合力比铝大的某

些金属活化剂（或称吸气剂）的作用，如铈、钡、锶、铋及镁等。这是因为此类金属的蒸气压较高，它们在真空中容易挥发，有利于清除氧化膜，且价格较低，因此目前普遍采用。

活化剂镁可以以纯镁小粒直接放在接头旁使用，或以蒸气形式引入钎焊区，也可以将镁作为合金元素加入铝硅钎料中。第一种方式的主要缺点是镁的挥发将在远低于钎焊温度时发生，同时对结构复杂的焊件很难遍布；第二种方式的设备和工艺比较复杂；最后一种方式没有上述缺点，可保证镁的蒸发与钎料的熔化相互适应，而且镁蒸气是在接头处就地产生。此外，镁能降低铝硅钎料的熔点，故应用较多。综合考虑，含镁量 $w_{Mg} = 1\% \sim 1.5\%$ 为宜。如铝硅钎料中加镁的同时添加质量分数为 0.1% 左右的铋，可以减少钎料的加镁量，减小钎料的表面张力，改善润湿性，并可降低对真空度的要求。含镁的铝硅钎料可由表 3-12 查找。

真空钎焊适于采用对接、T 形及与之类似的接头形式，装配时宜采用较大的间隙。这些接头形式开敞性较好，间隙内的氧化膜容易排除。搭接接头间隙内的氧化膜较难排出，故不宜采用。

铝的真空钎焊工艺与其它金属的真空钎焊工艺基本相同，但铝的真空钎焊时常需 10mPa 以上的真空度。但由于其去膜依靠镁活化剂的作用，对于结构复杂的焊件，为了保证母材获得镁蒸气的充分作用，常采取局部屏蔽的补充工艺措施。最通用的方式是将焊件放入不锈钢盒内（通称工艺盒），然后置于真空炉中加热钎焊，这样可明显改善钎焊质量。必要时，盒内还可补充使用少量纯镁粒来加强作用。真空钎焊铝件表面光洁，钎缝致密，钎焊后不需进行清洗。

铝真空钎焊的主要缺点是：设备复杂、生产成本低、真空系统的维修技术难度较大；镁蒸气沉积在炉壁、隔热屏及真空系统中，影响设备的工作性能；依靠辐射加热，速度较慢、均匀性较差，尤其是对大型复杂的焊件这种现象更为显著。故较适合于尺寸较小、结构简单的焊件。

5) 气体保护钎焊。在中性气氛中钎焊铝，其表面氧化膜不能靠分解去除，仍然象真空钎焊一样，必须借助于镁的活化剂作用来去膜。不同的是取得好的钎焊效果所需的含镁量却远低于真空钎焊所需

数量，含镁量 w_{Mg} 在 0.2%~0.5% 左右即可，高含镁量反将导致不良的接头质量。这是因为在中性气氛中，钎料中蒸发出来的未与母材反应的剩余镁蒸气，由于气体分子的阻挡，被拘留于母材表面而与表面吸附的气体中的氧和水反应，生成氧化镁，妨害钎料的铺展和润湿。此外，钎料中添加少量的铋，有利于提高钎焊质量。作为中性气体可以使用氩或纯净的氮，其露点温度应低于 -40°C 。在中性气体保护下加上少量钎剂，或在充入保护气体前先预抽低真空（如 100mPa），则使钎焊质量可大大提高。

与真空钎焊相比，气体保护钎焊有下列优点：对系统渗漏率的要求可以降低，设备比较简单，而且减少了挥发性元素沉积引起的设备维修工作，因此生产成本较低；加热主要依靠对流，速度较快也比较均匀，既有利于保证质量又有较高的生产率。因此，用此方法钎焊铝及其合金是一个良好的途径。

8.6.3.4 钎后处理

使用钎剂钎焊的焊件，残留的残渣因对母材有极大的腐蚀性，钎后必须清除。

对于氯化物基铝钎剂的残渣，可先在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的水中仔细刷洗，然后在 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的质量分数为 2% 的铬酐溶液中作表面钝化处理。但此法效果不够满意，尤其对复杂结构也无法使用。较适当的方法是先将冷至钎料凝固温度以下的焊件投入热水中骤冷，使残渣急冷而开裂，再受到水分子气化的喷爆作用，它们可以大部分脱落下来，残渣中可溶部分也同时发生溶解。但投入热水时焊件温度不可太高，速度不宜太快，以避免焊件发生变形或裂纹。残留的不溶性残渣再借酸洗浸蚀使之松散剥落。此时采用下列酸洗液较好。质量浓度为 30g/L 的草酸、15g/L 的氟化钠、30g/L 的 601 洗涤剂的水溶液，温度 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ ；或体积分数为 5% 的磷酸、1% 的铬酐体积分数为水溶液，温度 82°C 。采用在热水浸泡以后，再在体积分数为 10% 的硝酸和体积分数为 0.25% 的氢氟酸浴槽中浸渍 2~3min，也能清除残渣。酸洗后的焊件用热水和冷水冲洗，最后进行表面钝化处理。

对于不溶于水的氯化物基铝钎剂残渣的清除，可将焊件冷到钎料

凝固温度以下直接投入热水中，使大部分残渣脱落，然后在体积分数为 10%~15% 的硝酸水溶液煮一定时间，达到清除残渣的目的。清除残渣后的焊件仍需用热水和冷水冲洗。

浸渍钎焊后的工件要进行清洗处理，以彻底清除残余的钎剂残渣。清洗工艺见第 5 章。对清洗质量应进行检查：将清洗过的焊件存放 12h，取水样化验氟离子的含量，不合格者要重新清洗。

8.6.4 铝与其它金属的钎焊

铝可以与多种金属进行钎焊，但所存在的主要困难是：需要选择能满足两种不同金属表面氧化物所要求的去膜措施；在钎缝中往往生成金属间化合物层而使接头变脆；铝同其它金属的热膨胀系数和电极电位差别甚大。对于前两个问题，依靠在铝或另一金属表面涂覆金属层可以较好解决。

铝与铜、钢等金属软钎焊时，可先在铝表面镀锌，再镀铜或镍，然后可按一般工艺用锡铅钎料钎焊。

在铝与铜的钎焊中，无论是采用一般的钎焊方法，还是采用 548℃ 温度下的接触反应钎焊，都会由于形成金属间化合物而使接头性能变差。但在一定工艺条件下，也可以得到较满意的钎焊结果。例如，快速进行钎焊加热和冷却，往往能使接头具有满足某些应用要求的韧性。钎焊时，可使用标准的钎料和钎剂。另一个更有效的解决办法是采用过渡接头形式，即将铝钎焊到一个镀铝的钢件上，然后把铜钎焊到钢的另一端。

铝与钢可使用铝基钎料进行硬钎焊，要注意防止钢在加热中的表面氧化，因为铝钎剂不能保护钢。为此，可采用保护气体钎焊，利用保护气体来保护钢，同时使用铝钎剂去除氧化膜。这样直接钎焊的接头，界面区往往生成脆性的 Fe_3Al 相，因而对加热和冲击具有敏感性。性能较好的接头可以通过两种方式制取：一种方式是钎焊前对钢表面镀覆适当的金属层，随后可以用常规工艺钎焊。可用的金属镀层有电镀铜或镍，热浸镀锌、铝或银，最常用的是锌和铝镀层，因为它们能改善钎料的润湿并使接头具有较好的韧性；另一方式是采用高速加热并加压的工艺，可把 Fe_3Al 相脆性层控制在极薄的范围，使接

头具有较好的性能。

铝与镍、因康镍、可伐、蒙乃尔等合金以及铍的钎焊，可以借助钎剂并采用铝基钎料直接进行。但可伐合金和蒙乃尔合金能与铝形成脆性金属间化合物，因此最好钎焊前表面镀覆铝。

要钎焊钛与铝，必须先钛表面热浸镀一层银铝合金（67Ag-33Al）或锌铝合金（50Zn-50Al），然后采用浸渍钎焊方法实现。两种镀层相比，前者所得到的接头性能较佳。

铝和镁不宜相互钎焊，因为二者彼此间溶解度很大，且形成极脆的铝镁化合物相。

铝和其它金属的钎焊，由于接头存在大的电极电位差，容易发生电化学腐蚀，通常必须涂覆油漆、密封剂或不透水的涂层，以提高其抗腐蚀性能。

8.7 铜及其合金的钎焊

通常，铜及铜合金可分为四大类，即纯铜（曾称紫铜）、黄铜、青铜及白铜。普通黄铜是铜和锌的合金，在其中添加某些合金元素后，则分别称为锡黄铜、铅黄铜、锰黄铜等。除铜和锌合金以外的铜合金（除铜镍合金外）一般称为青铜，按化学组成可将青铜分为锡青铜（普通青铜）、铝青铜、硅青铜、铍青铜等。以镍作为主要合金元素的铜合金称为白铜。

铜及铜合金的钎焊得到广泛的应用，如电子元器件、印刷电路板、表面组装元器件、微波等通信器件、真空器件、电线电缆、仪器仪表组件、热交换器以及各种容器、管道等。此外，铜及铜合金能与多种金属（合金）构成钎焊连接件。

8.7.1 钎焊特点

（1）纯铜的钎焊性 在纯铜表面可能形成氧化亚铜和氧化铜，这两种铜的氧化物容易被还原性气体还原，也容易被钎剂去除。因此，纯铜的钎焊性是很好的。

（2）黄铜的钎焊性 普通黄铜中锌的质量分数小于15%时，表面氧化物基本由氧化亚铜组成，仅有微量的氧化锌。当锌的质量分数

大于 20% 时, 其氧化膜主要由氧化锌组成。氧化锌虽然比较稳定, 但也不难除去。

锰黄铜表面形成一层氧化锰, 比较难以去除; 铝黄铜表面的氧化膜更难去除, 必须采用特殊的钎剂。铅黄铜中当铅的质量分数高达 3% 后, 在钎焊温度下铅会渗出表面而恶化钎料的润湿和铺展, 同时, 铅黄铜还有自裂倾向。

(3) 青铜的钎焊性 锡青铜、镉青铜表面的氧化膜均易清除; 硅青铜、铍青铜及铬青铜表面生成的氧化膜虽然较稳定, 但也不难去除; 铝青铜表面形成的氧化铝比较难去除。另外, 硅青铜具有热脆性及在熔化钎料下的自裂倾向。

(4) 白铜的钎焊性 铜镍合金的表面内层有氧化镍, 外层为铜的氧化物, 这些氧化物都易于去除。应注意的是, 如不采取正确的工艺措施, 这种合金在熔化钎料下有自裂的可能。

总之, 铜和绝大部分铜合金都是比较容易钎焊的。只有含铝的铜合金, 由于形成氧化铝的缘故, 比较难钎焊。

常用的铜及其合金的钎焊性列于表 8-24。

8.7.2 钎料、钎剂和保护气体

8.7.2.1 钎料

(1) 软钎料 在软钎料中应用最广的是锡铅钎料 (表 3-2)。用锡铅钎料钎焊铜时, 在钎料和母材界面上易形成金属间化合物 Cu_6Sn_5 , 所以必须注意钎焊温度和保温时间。一般烙铁钎焊时, 由于化合物层很薄, 对接头性能没有大的影响。用锡铅钎料钎焊的黄铜接头比用同样钎料钎焊的铜接头强度要高些, 这是因为黄铜在液态钎料中的溶解比铜要慢, 所以生成的脆性金属间化合物也较少所致。

工作温度高于 100°C 的接头可用 S-Sn96Ag4 和 S-Sn95Sb5 钎料钎焊, 它们具有优良的润湿性。S-Pb97Ag3 钎料的工作温度更高些, 但润湿性差, 接头抗腐蚀性也不高, 不如用 S-Sn85Ag8Sb7 钎料钎焊。

用镉基钎料 (S-Cd95Ag5、S-Cd96Ag3Zn1) 钎料钎焊的接头可以在高达 250°C 的温度下工作。但是镉和铜极易形成脆性大的金属间化合物, 所以必须控制加热温度和保温时间。

表 8-24 常用的铜和铜合金的钎焊性

名 称	牌 号	名义成分 (质量分数)	钎焊性
铜	T2	Cu>99.9%	优良
	T3	Cu>99.7%	优良
无氧铜	TU1	Cu>99.97%	优良
普通黄铜	H90	Cu-10Zn	优良
	H68	Cu-32Zn	优良
	H62	Cu-38Zn	优良
铅黄铜	HPb59-1	Cu-31Zn-1.5Pb	良好
锰黄铜	HMn58-2	Cu-40Zn-2Mn	良好
	HMn57-3-1	Cu-39Zn-3Mn-1Al	困难
铝黄铜	HA160-1-1	Cu-40Zn-1Al-1Fe-0.35Mn	困难
锡青铜	QSn4-3	Cu-4Sn-3Zn	优良
	QSn6.5-0.1	Cu-6.5Sn-0.1P	良好
铝青铜	QA19-2	Cu-9Al-2Mn	困难
	QA19-4	Cu-9Al-4Fe	困难
	QA110-3-1.5	Cu-10Al-3Fe-1.5Mn	困难
	QA110-4-4	Cu-10Al-4Fe-4Ni	困难
铬青铜	QCr0.5	Cu-0.75Cr	优良
镉青铜	QCd1.0	Cu-1Cd	优良
铍青铜	QBe2	Cu-2Be-0.35Ni	良好
	QBe1.9	Cu-1.9Be-0.3Ni	良好
硅青铜	QSi3-1	Cu-3Si-1Mn	良好
锰白铜	BMn40-1.5	Cu-40Ni-1.5Mn	优良
锌白铜	BZn15-20	Cu-15Ni-20Zn	优良

一些软钎料钎焊铜及黄铜接头的强度见表 8-25。

表 8-25 一些软钎料钎焊铜及黄铜接头的强度

钎 料 牌 号	抗 剪 强 度 /MPa		抗 拉 强 度 /MPa	
	铜	黄铜	铜	黄铜
S-Pb80Sn18Sb2	20.6	36.3	88.2	95.1
S-Pb68Sn30Sb2	26.5	27.4	89.2	86.2
S-Pb58Sn40Sb2	36.3	45.1	76.4	78.4
S-Sn90Pb10	45.1	44.1	63.7	68.6

(续)

钎料牌号	抗剪强度/MPa		抗拉强度/MPa	
	铜	黄铜	铜	黄铜
S-Pb97Ag3	—	29.4	—	49.0
S-Cd96Ag3Zn1	73.5	—	57.8	—
S-Sn95Sb5	37.2	—	—	—
S-Sn85Ag8Sb7	—	82.3	—	—
S-Sn92Ag5Cu2Sb1	35.3	—	—	—
S-Sn96Ag4	39.2~49.0	—	39.2~49.0	—

(2) 硬钎料 硬钎焊铜时, 可以采用黄铜钎料、铜磷钎料和银钎料 (可由表 3-15、表 3-13 查找)。钎焊含铜量大的黄铜时, 可用银基钎料、铜磷钎料和含锌量高的铜锌钎料。对含锌量大的黄铜, 如 H62 黄铜, 主要用铜磷钎料和银基钎料。铜基、银基钎料钎焊铜及黄铜接头的力学性能列于表 8-26。

表 8-26 铜基、银钎料钎焊铜及黄铜接头的力学性能

钎料牌号		抗剪强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	冷弯角 / (°)	冲击韧度 / (J/cm ²)	备注
铜 基 钎 料	B-Zn64Cu	—	147	30	17.6	母 材 为 铜
	B-Zn52Cu	—	167	60	21.6	
	B-Cu54Zn	—	172	90	24.5	
	B-Cu60ZnSn-R	—	181	120	36.8	
	B-Cu58ZnFe-R	—	186	120	31.4	
	B-Cu93P	132	186	25	6	
	B-Cu94P	127	191	—	—	
	B-Cu92PSb	138	233	90	7	
	B-Cu80AgP	154	255	120	23	
	B-Cu89PAg	140	242	120	21	
银 钎 料	B-Cu53ZnAg	161	314	—	22	母 材 为 黄 铜
	B-Cu40ZnAg	184	316	—	34	
	B-Ag45CuZn	216	325	—	74	
	B-Ag50CuZn	196	328	—	42	
	B-Ag40CdZnCu	194	339	—	25	

在铜锌钎料中, 以 B-Cu58ZnFe-R 和 B-Cu60ZnSn-R 钎料钎焊的接头力学性能最好。铜磷、铜银磷和铜磷锡钎料, 具有自钎剂作用,

不加钎剂在铜上就有良好的润湿性（钎焊黄铜时仍需添加钎剂）。其中铜银磷和铜磷锡钎料钎焊的接头塑性较好。

用银钎料钎焊铜和黄铜时，可以得到性能很好的接头。在这些银钎料中，B-Ag45CuZn 钎料是综合性能最好的一种。银铜锌锡钎料的熔点较低，其中 B-Ag40CdZnCu 的熔点最低，工艺性良好，接头强度高，只是接头的冲击韧度比不含锡的银钎料低些。

8.7.2.2 钎剂及保护气体 用锡铅钎料钎焊铜时，可采用松香酒精溶液，钎焊后不必清除钎剂残渣。也可以使用 $\text{ZnCl}_2\text{-NH}_4\text{Cl}$ 水溶液。钎焊黄铜、青铜和铍青铜时，应采用活性松香钎剂和 $\text{ZnCl}_2\text{-NH}_4\text{Cl}$ 水溶液。钎焊铝黄铜、铝青铜和硅青铜时，则需采用氯化锌盐酸溶液；对于锰白铜，应采用磷酸溶液。

用铅基钎料钎焊时，钎焊温度较高，则应采用氯化锌水溶液。

配合钎焊温度更高的锡基钎料，采用 QJ205 钎剂，它清除氧化物的能力很强，可以钎焊包括铝黄铜和铝青铜在内的所有铜合金。

用黄铜钎焊铜时，可采用硼砂或质量分数为 75% 的硼酸 + 质量分数为 25% 的硼砂作为钎剂。

用银基钎料钎焊铜和铜合金时，采用 QJ101 或 QJ102 可取得良好效果。钎焊铍青铜和硅青铜，最好采用 QJ102。用银铜锌锡钎料钎焊时，应采用 QJ103。

钎焊铝青铜时，可以在钎剂中加入质量分数为 10% ~ 20% 的硅氟酸钠，或者加入质量分数为 10% ~ 20% 的 YJ-6，这样就能很好地去除工件表面的氧化物。

各种燃料气体是钎焊大多数铜基合金的经济而又可用的保护气体。也可采用裂解氨或氢气。但必须注意，含氢的保护气体在钎焊含氧铜时会产生“氢病”脆化的危险，只有无氧铜才能在还原性气氛（如 H_2 ）中钎焊。惰性气体氩和氦以及氮可用于钎焊铜及铜合金。

当铜合金及钎料中不含或少含高蒸气压的元素（即加热时易于蒸发的元素如铅、锌、磷、锡等）时，可在真空中进行钎焊。

8.7.3 钎焊工艺

8.7.3.1 钎前准备

钎焊前，要清除工件表面的氧化物、油脂及其它污物。铜基金属的清理可以采取机械清理法、金属丝刷和砂纸打磨去除表面氧化物，用标准的溶剂或酒精等清洗剂去除油污。如果用化学方法清除氧化物则要求选择适当的清洗液。铜及其合金的化学清理的典型步骤如下：

纯铜可在体积分数为 5%~15% 的硫酸水溶液中浸泡；

黄铜可在体积分数为 5% 的硫酸水溶液中浸泡；

铝青铜需要交替地在两种溶液中浸泡：即先在室温下体积分数为 2% 的氢氟酸加体积分数为 3% 的硫酸水溶液中，然后在 27~49℃，体积分数为 5% 的硫酸水溶液中交替反复浸泡直至干净为止；

铬青铜和白铜可在体积分数为 5% 的硫酸热溶液中浸泡；

硅青铜合金首先在体积分数为 5% 的硫酸热水溶液中浸泡，然后在冷的体积分数为 2% 的氢氟酸加体积分数为 5% 的硫酸混合水溶液中浸泡。

为了便于钎焊，常宜在含有强氧化物形成元素的铜合金表面镀铜。例如在铬青铜上镀铜层约为 0.03mm，在铍青铜和硅铝青铜表面上镀铜层为 0.013mm。

8.7.3.2 钎焊技术

铜及铜合金可用多种方法进行钎焊，如烙铁钎焊、浸渍钎焊、火焰钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、炉中钎焊、接触反应钎焊等。但高频钎焊时，由于铜的电阻小，要求加热电流比较大。

含氧铜暴露在含氢的气氛下能使铜产生脆化。应避免使用火焰钎焊大型组件，炉中钎焊也应避免使用含氢气氛。温度高、时间长会加重发生氢脆的危险。

黄铜在炉中钎焊时，锌发生蒸发，使黄铜成分发生变化，故钎焊黄铜最好先镀铜。含锌的钎料在炉中钎焊时，为了防止锌的蒸发，最好加少量钎剂。

含铅的铜合金经长时间加热容易析出铅，因此，大型组件的火焰钎焊和炉中钎焊因其加热时间较长，会造成某些困难。如果从合金（特别是铅的质量分数高于 2.5% 的合金）中析出大量的铅，由于变

脆和钎焊不良，就能造成有缺陷的钎焊接头。

铝青铜钎焊时，为了防止铝向银钎料扩散，使接头质量变坏，钎焊加热时间必须尽可能短。在铝青铜表面上镀铜或镀镍也可以防止铝向钎料的扩散。

钎焊铍青铜时，钎焊加热温度应与热处理规范相配合。为此，软钎焊时，最好选择钎焊温度低于 300℃ 的钎料，以免发生时效软化。硬钎焊时，选择固相线温度高于淬火温度（780℃）的钎料，钎焊后再进行淬火-时效的处理。对于淬火状态的铍青铜，采用快速加热的方法（如感应钎焊）以 B-Ag40CdZnCu 银钎料在 650℃ 左右进行钎焊，随后在 300℃ 下进行时效处理，也可得到所需要的强度。

对于一些容易自裂的合金，如硅青铜、磷青铜、铜镍合金，一定要避免产生热应力，不宜采用快速加热方法。

应指出的是，黄铜零件银钎焊时的变形是黄铜钎焊的困难之一，往往由于变形无法修整而造成报废。例如 H62 黄铜钎焊的变形是十分复杂的，影响变形的最主要因素是，黄铜材料的原始状态（成形方法、金属组织结构等），以及热应力，组织应力引起的不可逆变形。然而，这些因素在黄铜银钎焊时，又往往是无法消除和避免的。要获得变形小的黄铜钎焊件，最佳方法是采用中温（<400℃）钎料进行钎焊。否则必须考虑最少的钎焊次数（包括退火等加热次数）以及合理利用各种因素之间的综合影响，从而制定最佳钎焊参数；采用大刚度的单相合金夹具等，也是减少黄铜银钎焊变形的办法。

8.7.3.3 钎焊后处理

除了把可时效硬化的铜合金（如铍青铜）再进行一次热处理外，钎焊后的唯一工序是清除钎剂的残渣和工件表面的清洗。清除残渣的主要目的是为了防止残渣对工件的腐蚀，有时是为了获得一个良好的外观或对钎焊后的工件作进一步加工。这些残渣很容易用热水浸泡而溶解掉。钎后工件表面氧化物的清除，可以用机械法（如用金属刷子刷），或者以 8.7.3.1 节中适当的清洗溶液和清洗工艺来清除。

8.7.4 铜与其它金属的钎焊

异种铜合金之间是很容易进行钎焊的。铜及铜合金可与多种金属

及其合金实现钎焊连接，如碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、铸铁、工具钢、镍及镍合金、钛及钛合金、活性金属、难熔金属等使用银基钎料均可进行钎焊连接。铜与铝也可以进行钎焊，而铜与镁及镁合金不能实现钎焊。

表 8-27 列举了铜与异种金属硬钎焊时所推荐的钎料。

表 8-27 铜与异种金属硬钎焊时钎料的选择表

铜属 与 异种 金属 钎焊	铜 与 铜 合金	铝 与 铝 合金	镁 与 镁 合金	碳低 合金 钢及 钢	铸 铁	不 锈 钢	镍 与 镍 合金	钛 与 钛 合金	活 性 金 属	难 熔 金 属	工 具 钢
所 钎 选 料	B-Ag	B-Al	—	B-Ag	B-Ag	B-Ag	B-Ag	B-Ag	B-Ag	B-Ag	B-Ag
	B-Cu	Si		B-Au	B-Au	B-Au	B-Au				B-Au
	B-CuP			B-CuZn	B-CuZn		B-CuZn				B- CuZn
	B-CuZn										B-Ni

8.8 钛及其合金的钎焊

钛及其合金由于重量轻、强度高、耐热性好和抗腐蚀性能高等优点，近年来在各工业部门的应用日益增多。

目前，工业上的钛合金有三种类型： α 钛合金、 β 钛合金及 $\alpha + \beta$ 钛合金。这种分类是按金相组织命名的。纯钛和少数几种合金属于 α 型合金。这些材料是不能热处理的，钎焊工序对它们的性能影响很小。 β 钛合金如在退火状态下使用时，它实际上不受钎焊热循环的影响。如果 β 钛合金以后要热处理，则钎焊温度可能对其性能产生重大影响。若把基体金属在固溶处理温度下钎焊，可获得最佳韧性，当钎焊温度超过基体金属的固溶处理温度，则基体金属的韧性会减小。 $\alpha + \beta$ 钛合金的力学性能可受到热处理的重大影响，显微组织也会有所变化。人们通常生产锻制的 $\alpha + \beta$ 钛合金，以获得等轴的细晶粒两相显微组织，这种组织具有最佳的韧性。钎焊 $\alpha + \beta$ 钛合金时，希望保

持这种两相显微组织，因而要求钎焊温度不超过 β 相的转变温度。 β 相转变温度随具体的基体金属成分而定。

钛及其合金由于其重量轻、强度高、耐热耐蚀性好等特点，广泛应用于航空航天、化工、冶金等工业领域，随之运用钎焊连接的场合也日趋增多。诸如喷气发动机入口叶片、导流叶轮、液压管或配件以及蜂窝状夹层壁板的钎焊。此外还能见到容器、反应器等组件的钎焊结构。

8.8.1 钎焊特点

(1) 表面氧化物稳定 钛对氧的亲合力很大，所以钛及其合金有强烈氧化的倾向。钎焊时必须防止钛的氧化，并充分去除这层氧化膜。

(2) 具有强烈的吸气倾向 钛和钛合金在加热过程中会吸收氢和氮。例如钛从 250℃ 开始强烈地吸氢；400℃ 时吸氧；600℃ 时吸氮。温度越高，吸气越猛烈。吸气的结果，使合金的塑性、韧性急剧下降。所以，钎焊时要防止加热区的氢化和氮化。

(3) 组织及性能变化 纯钛在 885℃ 时发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 的相变。加热温度超过该温度，晶粒开始长大，温度越高，晶粒越大。在冷却速度较快的情况下，在室温形成 α 相针状组织，这些组织使钛的塑性下降。

α 钛合金，如 TA7 (Ti-5Al-2.5Sn) 加热到 927℃ 时发生 $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$ 的相变，到 1038℃ 时全部转变为 β 相。 β 相在冷却速度较快情况下同样形成 α 针状组织。 α 钛合金过热的倾向比纯钛小。

$\alpha + \beta$ 钛合金，如 TC4 (Ti-6Al-4V)，它的淬火温度为 850 ~ 950℃，时效温度为 480 ~ 550℃。因此对这种钛合金，高温钎焊温度不宜比淬火温度高出很多；在较低温度下钎焊时，钎焊温度不宜超过 550℃，以免过时效而发生软化现象。

总之，钎焊钛及其合金时必须注意钎焊加热温度。一般说来，钎焊温度不宜超过 950 ~ 1000℃，钎焊温度越低，对母材性能的影响也越小。对淬火时效合金来说，也可以在不超其时效温度的条件下进行钎焊。

(4) 形成脆性化合物 钛与许多金属容易形成脆性化合物, 用来钎焊其它金属的钎料一般均能同钛形成化合物, 使接头变脆。因此基本上都不适用于钎焊钛及其合金, 使选择钎焊钛用的钎料存在一定的困难。

8.8.2 钎料

钎焊钛及其合金的软钎料有镉基与锌基钎料, 如 S-Zn58Sn40Cu2、S-Zn60Cd40、S-Cd95Ag5、S-Cd83Zn17 等它们钎焊接头的抗剪强度为 29.4~49MPa。由于接头强度低及抗腐蚀性差, 则很少进行钛及其合金的软钎焊。

钎焊钛及其合金的硬钎料主要有银基、钛基与钛锆基及铝基三类, 其中银基钎料使用历史最长, 可靠性较好。

(1) 银基钎料 包括纯银和添加锂、铜、铝、锡及锰等的银基钎料。银对钛的润湿性很好, 在钎缝的界面区形成金属间化合物 TiAg, 与钛及其它金属的金属间化合物相比它不算太脆。但是, 其线膨胀系数同钛的膨胀系数相比差别很大, 在应力作用下易产生裂纹, 故银钎焊的接头强度不是很高, 纯银钎焊的接头剪切强度仅 117.8~166.5MPa, 用其它银基钎料钎焊的接头也不超过 190MPa。且接头的抗腐蚀性及抗氧化性较差。

含锂的银钎料, 如 B-Ag71.5Cu (Li)、B-Ag92Cu (Li) 等适用于惰性气氛中钎焊。还有一种在 900~913℃ 流动性很好的 Ag-9Pd-9Ga 钎料, 可轧制成薄板和丝的形式使用。这种钎料钎焊成的接头在飞机的高压液压系统中显示出很高的持久强度、疲劳强度、抗氧化和耐蚀性能。

铝的加入可降低熔点, 且铝同钛形成的化合物不太脆, 所以银铝钎料是性能较好的一种。其典型牌号为 B-Ag95Al, 熔点为 780~825℃。在 900℃ 钎焊时, 具有良好的填充间隙能力, 对母材无不良影响。

为了提高 B-Ag95Al 钎料的抗腐蚀性, 可加入锰。抗腐蚀性试验表明, 在 B-Ag95Al 钎料中加入质量分数为 0.5% 左右的锰, 可显著提高其抗腐蚀性, 如表 8-28 所示。

表 8-28 锰对 Ag-5Al 钎料钎焊的钛合金接头抗腐蚀性的影响

钎 料	τ/MPa	盐雾试验后弯曲试验结果
Ag-5Al	230	暴露 314h 后破坏
Ag-5Al-0.2Mn	196	暴露 290h 后破坏
Ag-5Al-0.3Mn	197	暴露 466h 后破坏
Ag-5Al-0.5Mn	200	暴露 500h 后破坏
Ag-5Al-1Mn	197	暴露 500h 后破坏

(2) 钛基和钛锆基钎料 钛基钎料主要有 B-Ti70CuNi (见表 3-22), 钎焊温度为 970℃。钛锆基钎料主要有 B-Ti48ZrBe (见表 3-22), 钎焊温度为 940℃。前一种钎料钎焊纯钛和 TC2 时, 母材有晶粒长大倾向; 钎焊 TA7 和 TC4 时, 晶粒长大倾向不大。钎焊时, 铜和镍向母材扩散, 有生成化合物的倾向, 因此要求保温时间短。钎焊接头的塑性尚好, 且具有好的抗腐蚀性。钎接头最高工作温度可达 370℃。后一种钎料对钛的润湿性良好, 钎焊时母材无晶粒长大倾向。用该钎料钎焊 TA7 时, 生成金属间化合物的倾向较小, 接头抗剪强度好, 接头塑性及抗腐蚀性比用前一种钎料钎焊的好些。钎接头最高工作温度为 370℃。

钛基和钛锆基钎料很难加工成片 and 丝状, 一般以粉末使用。

(3) 铝基钎料 常见铝基钎料的组成有两种, 其成分 (质量分数) 分别为 Si4.8%、Cu3.8%、Fe0.2%、Ni0.2%, 余为 Al 及含 Mn1.2%, 其余为 Al。它们的特点是:

- 1) 钎焊温度低, 不会引起钛合金的 β 相转变, 且加热设备可简化。
- 2) 钎料和母材没有明显的溶解和扩散, 生成脆性化合物的倾向小, 接头塑性好。
- 3) 钎料塑性好, 容易加工, 也可将钎料和母材轧制在一起, 便于蜂窝结构等的装配。

铝基钎料主要用于钎焊钛和钛合金的蜂窝壁板。

钛及其合金钎焊用钎料可由表 8-29 选用。

表 8-29 一些钎焊钛及其合金的钎料

类 别	钎 料		钎焊方法
	成分 (质量分数)	钎焊温度/℃	
银 基	Ag100%	980~1000	真空钎 焊及惰性 气体保护 钎焊
	Ag72%、Cu28%	800~900	
	Ag71%、Cu27.5%、Ni1%、Li0.5%	800~880	
	Ag68%、Cu28%、Sn4%	800~870	
	Ag85%、Mn15%	950~1000	
钛基及 钛锆基	Ti70%、Ni15%、Cu15%	970	
	Ti48%、Zr48%、Be4%	940	
	Ti43%、Zr43%、Ni12%、Be2%	940	
铝 基	Al91%、Si4.8%、Cu3.8%、 Fe0.2%、Ni0.2%	610~688	
	Al98.8%、Mn1.2%	675	

8.8.3 钎剂和保护气氛

钛及其合金在真空和惰性气氛中钎焊可获得满意的结果。一般不采用火焰钎焊，在特殊情况下须采用时，它必须采用含有金属钠、钾、锂的氟化物和氯化物的特殊钎剂。

为了防止钎焊接头的氧化及吸氮、吸氢反应，钛及其合金最好是在真空和氢气中钎焊。真空钎焊时，虽然钛对氧的亲合力很大，但是试验结果表明，钛在 13.3Pa 真空度下就能得到光洁的表面，这是由于表面的氧化钛膜可向钛中溶解所致。为了保证得到高质量的钎焊接头，钎焊钛要求的真空度为 0.133Pa 或更高。

在氢气保护下钎焊，钎焊温度范围为 760~927℃ 时，为了防止钛变色，要求高纯的氢气，其露点必须是 -54℃ 或更低。一般使用制冷存储容器中的液态氢，因为它具有很高的纯度。

8.8.4 钎焊工艺

8.8.4.1 钎焊前清理

在钎焊前必须彻底清理表面，进行脱脂及去除氧化膜。加热到 538℃ 以上，钛表面生成大量的氧化皮，应用机械法、喷砂法或熔融盐浴清理去除。轻度的氧化膜可用酸洗除去，钛的酸洗液应采用体积

分数为 20%~45% 硝酸加体积分数为 2% 氢氟酸水溶液或在室温下每升水中加有 20~30mL 硝酸、30~40mL 盐酸的溶液，清洗 5~10min。硝酸浓度较低时，基体金属可能会吸氢。

当要求清除油脂时，应使用非氯化物的溶剂，例如丙酮、丁酮或酒精。

8.8.4.2 钎焊技术

在真空或氩气中钎焊时，可以采用高频加热、炉中加热等方法。加热速度快，保温时间短，界面区的化合物较薄，接头性能较好。因此，必须控制钎焊温度和保温时间，使钎料流满间隙即可。

钎焊钛及其合金时，经常在界面上或钎缝内形成脆性化合物相，降低钎焊接头的性能。为此，可用扩散钎焊方法来改善钎焊接头的性能。钎焊时，在钛合金之间分别放上 50 μ m 厚的铜箔、镍箔或银箔，依靠钛与这些金属的接触反应，分别形成 Cu-Ti、Ni-Ti 和 Ag-Ti 共晶。然后再把这些脆性金属间化合物扩散掉，在一定温度和一定时间下扩散钎焊的接头具有相当好的性能。

扩散钎焊只有在钎缝间隙很小（0.03~0.05mm）的情况下，才能保证钎焊接头强度。当间隙为 0.02mm 时，接头强度最高。间隙过大，钎缝中的脆性化合物相无法消除。

关于 $\alpha+\beta$ 钛合金，可以在退火，或固溶处理，或时效状态下使用。如果钎焊后要求退火，则有三种方案可供选择：即①退火后在退火温度或低于退火温度下钎焊；②在退火温度以上的温度钎焊，并在钎焊循环中采取分段冷却工序，从而获得退火组织；③在退火温度以上的温度钎焊，然后进行退火处理。

8.9 难熔金属的钎焊

钨、钼、钽、铌的熔点都在 2000℃ 以上，被称为难熔金属。它们都具有高温强度高、弹性模量高以及抗腐蚀性能优异等特点，本节将分别介绍这几种金属的钎焊问题。

8.9.1 钨的钎焊

钨的熔点比任何已知金属都高，可达 3410℃，能在 2700℃ 的高

温环境中可靠工作。钨在常温下具有很高的强度（490～882MPa）和硬度（320～415HBS），同时具有很大的脆性，只有在加热超过 300～350℃ 以上才具有一定的塑性。

8.9.1.1 钎焊特点

钨和其它金属钎焊时，由于其热膨胀系数相差很大，钎焊比较困难。为了防止降低钨的强度和塑性，应在结晶温度（1450℃）以下进行钎焊。钨可以在所有保护气体和还原气体中进行钎焊，但最好的方法是真空钎焊。

8.9.1.2 钎料选择

钎料的种类应根据使用要求进行选择，凡温度低于 3000℃ 的各种钎料均可用于钨的焊接，表 8-30 列举了它们的成分和性能。一般来讲，在 400℃ 以下使用的构件，可选用铜基和银基钎料；在 400～900℃ 之间使用的构件通常选用金基、锰基、镍基、钼基或钴基钎料；高于 1000℃ 使用的零件，多采用纯金属铌、钽、镍、铂、钯、钨等钎料。铂基钎料钎焊后的钎件曾使用到 2150℃，如果在钎焊后进行 1080℃ 的扩散处理，则最高使用温度可达 3038℃

表 8-30 钎焊钨用高温钎料

钎料	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃	钎料	熔化温度 /℃	钎焊温度 /℃
纯 Ag	960	980～1020	Ni-Cr-Mo-Mn-Si	1149	1150～1200
纯 Cu	1083	1150	Co-Cr-Si-Ni	1899	1900～2000
纯 Ni	1452	1500～1700	Co-Cr-W-Ni	1427	1427～1600
纯 Nb	2416	2450～2500	Pd-Ag-Mo	1306	1350
纯 Ta	2997	2997～3100	Pd-Al	1177	1215
纯 Ti	1816	1850～1950	Pd-Ni	1205	1250
纯 Pd	1550	1550～1600	Pd-Cu	1205	
Pd-Mo	1571	1600～1700	Pd-Ag	1306	1320～1350
Pt-Mo	1774	1800～1950	Pd-Fe	1306	1350～1450
Pt-30W	2299	2320～2400	82Au-18Ni	950	950～1080
Mn-Ni-Co	1021	1050～1200	Au-Ni-Cr	1038	1070～1150
Nb-Ni	1190	1190～1200	54Ti-25Cr-21V		1550～1650
85Ag-15Mn	970	1000～1080	67Ti-33Cr	1390～1420	1440～1480
			60Ti-30V-4Be	1055～1080	1270～1310
Ni-Cr-B	1066	1090～1150	47.5Ti-47.5Zr-5Ta		1600～1700
91.5Ti-8.5Si		1371			

8.9.1.3 钎焊工艺

钎焊前要求特别仔细地清除零件表面的 WO_2 (钨在 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 范围内会发生显著氧化), 可以采用机械打磨、喷砂、超声波清洗, 也可以按表 8-31 的方法进行化学清洗。为了改善钎料在钨表面的润湿性, 可在待焊表面预先镀金属镍或铜。

表 8-31 钨的化学清理方法

第一种方法	在质量分数为 20% 的氢氧化钾溶液 (沸腾) 中清洗
第二种方法	在质量分数为 20% 的氢氧化钾溶液中电解浸蚀
第三种方法	在体积分数为 50% HNO_3 + 体积分数为 50% HF 溶液中化学清洗
第四种方法	在熔融氢氧化钠中清洗
第五种方法	在熔融氯化钠中清洗

由于钨的固有脆性, 在构件组装操作中应小心处理钨零件以免碰断。为了防止形成脆性碳化钨, 应避免钨与石墨直接接触。焊前加工或焊接产生的预应力, 应在焊前予以消除。

钨在温度升高时极易氧化, 钎焊时要求真空度要足够高, 在 $1000 \sim 1400^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行钎焊时, 其真空度一般不能低于 $8 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。

为了提高接头的再熔化温度和使用温度, 可把钎焊过程和焊后的扩散处理结合起来。例如, 用 $Ni-20Cr-10Si-1Fe$ 钎料在 1180°C 下钎焊钨, 焊后经 1070°C (4h)、 1200°C (3.5h)、 1300°C (2h) 三次扩散处理后, 钎焊接头的使用温度可达 2200°C 以上。

8.9.1.4 典型应用

由于钨的熔点非常高, 蒸气压低, 在电弧和电火花情况下材料转变的倾向小, 因而常用于制造汽车电压控制触点, 通断型触点, 继电器和断路器。作为结构材料用于化工设备、航空航天发电机的火焰喷嘴、高速、高压和高温蒸气喷嘴等。此外, 还可以用作耐高温、耐腐蚀、耐磨损的各种零部件。

8.9.2 钼的钎焊

钼的熔点为 2622°C , 具有高的弹性模量, 其强度与钢的强度大致相等, 密度为钨的一半, 导热性能好。与钨相似, 钼具有极好的高温性能, 可制造在 2000°C 温度下工作的构件。但钼的高温抗氧化能力差, 400°C 开始氧化, 600°C 以上迅速形成 MoO_3 。钼在大气中较高

温度下工作时, 需要镀层保护。

8.9.2.1 钎焊特点

钎焊钼时应解决氧化和高温下的晶粒长大问题。因此, 应选用较高真空条件下或在仔细净化过的氩气保护下进行, 并采用快速加热的办法。由于钼再结晶后强度和塑性显著下降, 因此钎焊温度不应超过再结晶温度。钼与钴、铁、锰、钛、硅等元素易形成脆性化合物, 使用含有这些元素的钎料时, 为了防止金属间化合物的生成及改善钎料对钼的润湿性, 可在钼上镀金属铜或铬。

8.9.2.2 钎剂及钎料选择

钎焊钨的钎料大多数都可以用于钼的钎焊。400℃以下工作的钼构件可选用铜基或银基钎料; 400~650℃之间工作的电子元器件及非结构件, 可以使用 Cu-Ag、Au-Ni、Pb-Ni、Cu-Ni 等钎料。高温下工作的结构件可采用钛基或其它高熔点的纯金属钎料, 表 8-32 所列的高温钎料主要应用于钼的真空钎焊。应注意的是一般不推荐使用锰基、钴基和镍基钎料, 以避免在钎缝中形成脆性金属间化合物。

表 8-32 钼金属真空钎焊用高温钎料

钎料	钎焊温度/℃	用途及性能
62Ti-25Cr-13Nb	1260	用于 Mo-Mo、Mo-C、Mo-Nb (Ta)、Mo-金属的连接
54Ti-25Cr-21V	1550~1650	用于 Mo-Mo、Mo-C、Mo-Nb (Ta)、Mo-金属的连接
47.5Ti-47.5Zr-5Nb	1600~1700	用于钼与石墨、钼与陶瓷、钼与金属的钎焊
70Ti-30V	1675~1760	用于钼与钼、钼与金属、钼与陶瓷的钎焊
33Zr-34Ti-33V	1427	用于钼与石墨、钼与陶瓷、钼与金属的钎焊
91.5Ti-8.5Si	1330	用于钼与钼、钼与石墨、钼与陶瓷、钼与金属的钎焊
72Ti-28Ni	1140	用于钼与陶瓷、钼与石墨、钼与难熔金属
78.5Hf-19Ta-2.5Mo	1454~1482	钼与钼、钼与石墨、钼与钽
67Ti-33Cr		钼与陶瓷、钼与难熔金属、钼与石墨
66Ti-30V-4Be		钼与陶瓷、钼与难熔金属、钼与石墨
56Zr-28V-16Ti-0.1Be		钼与陶瓷、钼与难熔金属、钼与石墨

用氧已炔火焰钎焊时, 使用混合钎剂较理想, 即工业硼酸盐或银

钎剂加含有氟化钙的高温钎剂，可以获得良好的保护。其方法是首先在钼表面涂覆一层工业用银钎剂，然后涂覆高温钎剂，银钎剂在较低的温度范围内具有活性，而高温钎剂的活性温度可达到 1427℃。

8.9.2.3 钎焊工艺

由于钼与氧的亲合力大，钎焊前一定要清除表面氧化物。在完成清理工序之后要立即进行钎焊，防止污染。脱脂处理、机械清理和化学处理可以有效地消除指痕和油脂；喷砂、液体研磨剂清洗和研磨可以清除简单零件的氧化膜。对于较厚的氧化膜，可用氢氧化钠（质量分数为 70%）和亚硝酸钠熔盐，或硝酸钠和硝酸钾的混合溶液（质量分数为 30%），在 260~371℃ 清洗，可获得好的效果。但应严格控制清洗时间，以免造成钼的腐蚀。

在钎焊接头装配时，应考虑钼的热膨胀系数小这一特点，接头间隙选在 0.05~0.13mm 范围内为宜。如果使用夹具，要选择热膨胀系数小的材料。

火焰钎焊、受控气氛炉、真空炉、感应加热炉和电阻加热设备都可以用来钎焊钼。钎焊加热超过再结晶温度、或由于钎料元素的扩散使再结晶温度降低，都会使钼发生再结晶。因此，钎焊温度接近再结晶温度时，钎焊时间越短越好；在钼的再结晶温度以上钎焊时，一定要控制钎焊时间和冷却速率，避免冷却过快引起开裂。

8.9.2.4 典型应用

钼的钎焊在电气和电子工业中用于电子管、电器开关触点、换能器和电子管支座的制造；在航空工业中用于机翼前缘、辐射屏蔽部件的制造；在核工业中用于制造热交换器和支承格栅；此外，在化学、宇航等工业领域也得到了应用。

8.9.3 钽和铌的钎焊

钽的熔点是 2996℃，在常温下很容易加工。它的导热性是钼的 1/4，线膨胀系数则比钼大 1/3，高温强度低于钨和钼。除热硫酸溶液外，钽在大多数工业酸的混合介质中，耐腐蚀性非常好。纯钽的再结晶温度约为 1204℃，这取决于冷作硬化程度。加入合金元素所形成的钽合金（60Ta-30Nb-10W），可使再结晶温度上升到 1649℃；而

通过加钛 (75Ta-20Ti-5Al) 则使再结晶温度下降到 1010℃。

铌的熔点为 2468℃, 在上述四种难熔金属中熔点最低, 弹性模量、热导率、强度和密度也最低, 但热膨胀系数则最高。铌的塑性-脆性转变温度为 -102℃ ~ 157℃, 有极好的塑性和加工性。纯铌的再结晶温度范围为 982 ~ 1093℃, 此温度随着合金元素的加入而增高。

8.9.3.1 钎焊特点

钽和铌钎焊时, 最突出的问题是防止氧、氮、氢的污染。由于它们在空气中加热时, 从 200℃ 开始便发生强烈的氧化, 同时在加热时大量吸收氧、氮及氢气, 形成饱和气体层, 导致金属变硬变脆。

8.9.3.2 钎料选择

钽或铌构件在 1000℃ 以下使用时, 可以选用铜基、锰基、钴基、钛基、镍基、金基及钼基钎料, 其中 Cu-Au、Au-Ni、Pb-Ni、Au-Ti、Pt-Au-Ni 及 Cu-Sn 钎料对钽和铌的润湿性及钎缝成形好, 接头强度也比较高。由于银基钎料有使钎焊金属变脆的倾向, 应尽可能避免使用。在 1000 ~ 1300℃ 之间使用的构件, 钎料应选用与它们形成无限固溶体的纯金属 Ti、V、Zr 或以这些金属为基的合金。使用温度更高时, 可选用含 Hf 的钎料。钎焊钽和铌所用的钎料分别如表 8-33 和表 8-34 所示。

表 8-33 钽钎焊用钎料

钎 料	钎焊温度 /℃	重熔温度 /℃	用 途 及 性 能
50Ti-40V-10Ta	1760	2399	Ta-Ta、Ta-Nb Ta-石墨、Ta-陶瓷
30Ti-50V-20Ta	1760	2399	Ta-金属、Ta-石墨、Ta-陶瓷
25Ti-55V-25Ta	1843	2204	Ta-金属、Ta-石墨、Ta-陶瓷
5Ti-65V-30Ta	1843	2399	Ta-金属、Ta-石墨、Ta-陶瓷
5Ta-65V-30Nb	1816	2299	Ta-Ta、Ta-Nb、Ta-Mo、Ta-石墨
25Ta-50V-25Nb	1871	2499	Ta-Ta、Ta-Nb、Ta-Mo、Ta-石墨
30Ta-65V-5Nb	1871	2299	Ta-Ta、Ta-Nb、Ta-Mo、Ta-石墨
30Ta-40V-30Nb	1923	1999	Ta-Ta、Ta-Nb、Ta-Mo、Ta-石墨
93Hf-7Mo	2093	2238	2028℃ 扩散 0.5h, $\tau_{1927^{\circ}\text{C}} = 36.2\text{MPa}$
60Hf-40Ta	2193	2093	1316℃ 扩散 16h, $\tau_{1600^{\circ}\text{C}} = 7.6\text{MPa}$
66Ti-34Cr	1482	2082	1427℃ 扩散 16h, $\tau_{1371^{\circ}\text{C}} = 62.7\text{MPa}$
66Ti-30V-4Be	1316	2093	1316℃ 扩散 16h, $\tau_{1371^{\circ}\text{C}} = 40\text{MPa}$
56Hf-19Ta-25Mo	2180 ~ 2200	2300	Ta-Mo、Ta-石墨、Ta-陶瓷的直接钎焊
72Ti-28Ni	1140		Ta 与 Si, N ₄ 陶瓷的直接钎焊
54Ti-25Cr-21V	1550 ~ 1650		Ta-Ta、Ta-Nb、Ta-Mo、Ta-石墨、Ta-陶瓷的直接钎焊

表 8-34 铌钽焊用钎料

钎 料	钎焊温度 /℃	用 途 及 性 能
48Ti-48Zr-4Be	1049	Nb 与陶瓷 1049℃ 钎焊、扩散 100h、 $\tau = 169.2\text{MPa}$
75Zr-19Nb-6Be	1049	Nb 与 Ta 1049℃ 钎焊、扩散 100h、 $\tau = 170.2\text{MPa}$
67Ti-33Cr	1440~1480	$\tau_{1370^\circ\text{C}} = 30.3\text{MPa}$ (Nb-陶瓷)
60Ti-30V-4Be	1270~1310	扩散处理: 1120℃, 4h; 1300℃ 16h $\tau_{1370^\circ\text{C}} = 17.6\text{MPa}$ (Nb-陶瓷)
73Ti-13V-11Cr-3Al	1571~1590	$\tau_{1370^\circ\text{C}} = 10.8\text{MPa}$ (Nb-陶瓷)
91.5Ti-8.5Si	1371	Nb-Mo, Nb-Ta, Nb-石墨
54Ti-25Cr-21V		Nb-Nb, Nb-Ta, Nb-石墨 Nb-陶瓷、直接钎焊
43.7Co-21Cr-21Ni- 5.5W-8Si-0.8B	1177	Nb-Nb, Nb-不锈钢, Nb-高温合金 Nb-Ta

8.9.3.3 钎焊工艺

钽可以用机械或化学方法进行焊前清理。首先将钽进行喷砂处理, 然后浸入盐酸溶液中把铁粒溶解掉, 最后用热 Cr 酸清洗液进行清洗, 其效果十分良好。热苛性清洗液会腐蚀金属, 不宜使用。

铌的清洗方法和钽基本相同, 二者如与空气或水蒸气接触, 就会生成坚硬的氧化膜。防止方法是在酸洗过的金属表面电镀一层铜或镍, 然后再把工件放在 1204℃ 和 $1.33 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 压力下进行扩散处理, 使电镀表面作为钎焊面实现钽或铌的钎焊。

钽或铌构件最好在真空下进行钎焊, 且真空度不低于 $1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。如果在惰性气体保护下进行钎焊, 必须严格清除一氧化碳、氨、氮和二氧化碳等气体杂质。在空气中进行钎焊或电阻钎焊时, 应采用特种钎料, 配以合适的钎剂, 为防止高温下钽或铌与氧接触, 可在表面镀一层金属铜或镍, 并进行相应的扩散退火处理。

8.9.3.4 典型应用

钽和铌具有耐腐蚀、化学稳定、高温性能好的优点, 其钎焊构件在化学工业、化工设备以及耐高温结构中得到日益增多的应用。此外, 铌由于具有较低的热中子吸收面积, 在核能工业中也得到应用。

8.10 贵金属触点的钎焊

贵金属主要是指金、银、钯、铂等材料。

金的熔点为 1064°C ， 1190°C 时的蒸气压为 10^{-2}Pa 。银的熔点为 961°C ， 919°C 时的蒸气压为 0.1Pa 。钯的熔点为 1552°C ，蒸气压在 1744°C 时为 10^{-2}Pa ，具有抗氧化和耐腐蚀性能。铂的熔点为 1769°C ，在低于熔点的温度范围内，铂在大气中具有较好的抗氧化能力，密度高，线膨胀系数小，蒸气压在 1271°C 时为 10^{-2}Pa 。由于它们具有良好的导电性、导热性、抗腐蚀性和高的熔化温度，在电器设备中广泛用于制造开启与闭合电路的元件。

8.10.1 钎焊特点

大多数的加热方法都可以用来钎焊贵金属及其贵金属触点。火焰钎焊常用于较大的触点组件；感应钎焊适用于大批量生产；用普通的电阻焊机也可以进行电阻钎焊，但应选用较小的电流和较长的钎焊时间，可以使用碳块作电极。当同时需要钎焊大量的触点组件或者在一个组件上钎焊多个触点时，可采用炉中钎焊。贵金属在大气中用普通方法进行钎焊，接头质量较差，真空钎焊则能获得高质量的接头，而且材料本身性能不会受到任何影响。

贵金属作为触点材料，钎焊的共同特点是钎焊面积小，要求钎缝金属抗冲击性能好、强度高、具有一定的抗氧化性能、并能经受电弧侵袭，但又不改变触头材料的特性和元件的电性能。由于触点钎焊面积受限制，不允许钎料溢流，应严格控制钎焊工艺参数。

8.10.2 钎料选择

钎焊金及其合金触头主要使用银基和铜基钎料，既保证了钎缝的导电性能，又易于润湿。如能满足接头导电性要求，可以使用含 Ni、Pd、Pt 等元素的钎料；也可以使用钎焊镍、钴合金并有良好抗氧化性能的钎料。如选用 Ag-Cu-Ti 钎料，则钎焊温度不得高于 1000°C 。

银表面生成的氧化银不太稳定，很容易进行钎焊。银的软钎焊可采用锡铅钎料配以氯化锌水溶液或松香作钎剂。硬钎焊时，常采用银钎料，以硼砂、硼酸或它们的混合物作钎剂。真空钎焊银及其银合金

触头时，主要选用银基钎料如 B-Ag61CuIn、B-Ag59CuSn、B-Ag72Cu 等。

钎焊钨触头，可选用与之容易形成固溶体的金基、镍基钎料，也可以用银基、铜基或锰基钎料等。

钎焊铂及其铂合金触头，广泛使用银基、铜基、金基或钨基钎料。选用 B-Au70Pt 钎料，即不改变铂的颜色，又能有效地提高钎缝重熔温度，增加钎缝的强度和硬度。如果要钎焊铂触头在可伐合金上，可选用 B-49TiCuBe 钎料。在非腐蚀介质中、工作温度不超过 400℃ 的铂触头，应优先选用成本低、工艺性能好的无氧纯铜钎料。

8.10.3 钎焊工艺

钎焊前，应对焊件特别是触点组件进行检查，从薄板上冲出或从板条上剪下的触点，不得因冲、剪而变形；用顶锻、精压、锻造成形的触点的钎焊表面必须平直，以保证与支座的平直表面接触良好。待焊件的曲面或任意半径的表面，必须配合一致，以保证钎焊时有适当的毛细作用。

各种触头钎焊前都要采用化学或机械方法去除焊件表面的氧化膜，并用汽油或酒精仔细清洗焊件表面，以清除表面油污、油脂、灰尘以及妨碍润湿和流动的污物。

对于小型焊件，选用粘接剂预定位，保证在装炉、装钎料搬运过程中不移位，所使用的粘接剂不应给钎焊带来危害，在达到钎焊温度之前，要能自净且不污染待焊构件。对于大型焊件或专用触头，装配定位一定通过带有凸台或凹槽的夹具，使焊件处于稳定状态。

由于贵金属材料的导热性好，加热速率应根据材料类型而定；冷却时要适当控制速率，以使钎焊接头应力均匀；加热方法应能使受焊零件同时达到钎焊温度。对于较小的贵金属触点，应避免直接加热，可利用其它零件进行传导加热。触点上应施加一定的压力，使钎料在熔化和流动时触点固定不变。为了保持触点支座或支承件应有的刚性，应避免它们退火，可把加热局限在钎焊面区域内，例如调节火焰钎焊、感应钎焊或电阻钎焊时的位置。此外，为了避免钎料溶解贵金

属，可采取控制钎料的数量、避免过分加热、限制钎焊温度下的钎焊时间、以及使热量均匀分布等措施。

8.11 非金属材料的钎焊

随着现代科技与生产的迅速发展和航天航空、原子能等尖端工业的兴起，材料的使用环境也越来越苛刻，为了满足实际生产的需要，不断开发出具有各种特殊性能的非金属材料如陶瓷、复合材料等。这些新材料的钎焊状况将直接影响产品的可靠运行，其钎焊技术的研究受到世界各国的关注。

8.11.1 陶瓷材料的钎焊

陶瓷的种类非常多，目前常用的能与金属连接的陶瓷按其组成不同可分为氧化陶瓷和非氧化性陶瓷两大类。氧化陶瓷包括氧化铝 (Al_2O_3)、氧化锆 (ZrO_2)、氧化镁 (MgO)、镁橄榄石 (Mg_2SiO_4)、氧化铍 (BeO) 等，主要应用于电子器件、半导体器件、集成电路和各种传感器件如心脏起搏器、陶瓷探针、三轴电缆传感器等。非氧化性陶瓷包括碳化硅 (SiC)，氮化硅 (Si_3N_4)，氮化硼 (BN)，氮化钛 (TiN) 及氮化铝 (AlN) 等非氧化性陶瓷由于在高温环境下具有高强度、高硬度、耐磨损、耐腐蚀及耐高温蠕变等特性，已成为节能、宇航、冶金等高科技领域的关键材料，主要应用于耐高温的陶瓷发动机、陶瓷换热器、火箭尾喷管的喷嘴及核动力反应堆的发热元件等。

8.11.1.1 钎焊特点

陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属构件的连接比较困难，主要采用钎焊和扩散焊。传统的钎焊方法是先对陶瓷表面进行金属化预处理，使非金属陶瓷被连结部位变为金属表面，然后像金属钎焊一样进行连接。这种方法工艺复杂，费时耗资。近年来，陶瓷的直接钎焊技术发展很快，可使陶瓷构件的连接工艺变得比较简单，而且能够满足高温环境下的使用要求。和金属与金属间的钎焊相比，陶瓷的连接主要有三大问题需要解决。

(1) 润湿 大多数钎料在陶瓷接头上形成球状，很少或根本不产生润湿。其解决办法是在普通钎料的基础上添加活性金属元素制成活

性钎料。

(2) 界面脆性相 能够润湿陶瓷的钎料, 钎焊时结合界面易形成多种脆性化合物(如碳化物、硅化物及三元或多元化合物), 这些化合物的存在影响了接头的力学性能。

(3) 残余应力 由于陶瓷、金属与钎料三者之间的热膨胀系数差异大, 从钎焊温度冷却到室温后, 接头会存在残余应力并有可能引起接头开裂。此外, 陶瓷材料的塑性与断裂韧性一般都比金属低、导热性能差, 不能产生塑性变形, 在较小的应力下就会产生裂纹。

8.11.1.2 接头设计

在进行陶瓷接头的设计时, 必须考虑陶瓷材料的脆性及热膨胀系数小的特点, 使接头型式有利于缓和钎焊过程中产生的热应力。例如, 使用单层或多层金属作中间层, 这种过渡层能产生塑性变形, 吸收热膨胀力, 而不把这些力传递给陶瓷材料。图 8-8 是几种典型的接头形状。

8.11.1.3 钎料及保护气体

陶瓷与金属连接多在真空炉或氢、氢气炉中进行, 真空电子元件封装用钎料除具有一般特性外, 还应有一些特殊要求。钎料不宜含有产生高蒸气压的元素(如 Zn、Cd、Bi、Mg、Li 等), 以免引起器件电介质漏电和阴极中毒等现象发生。一般规定元器件工作时钎料的蒸气压不超过 10^{-3} Pa, 所含高蒸气压杂质不超过 0.002%~0.005%; 钎料氧的体积分数不超过 0.001%, 以免在氢气中钎焊时产生水气, 引起熔融钎料金属飞溅。此外, 还要求钎料必须清洁, 不得有表面氧化物。

陶瓷金属化后再进行钎焊时, 可使用铜系、银系及银-铜、金-铜钎料, 部分常用钎料的成分及熔点见表 8-35。

陶瓷直接钎焊, 钎料的选定非常重要。这类钎料都含有活性元素 Ti、Zr 或 Ti 及 Zr 的化合物(氧化物或碳化物), 对陶瓷有一定的活性, 在一定温度下, 能够发生反应。其中二元系钎料以 Ti-Cu、Ti-Ni 为主, 这类钎料蒸气压较低, 700℃时小于 1.33×10^{-5} Pa, 可在 1200~1800℃范围内使用。在三元系钎料中, 最常用的是 Ag-Cu-Ti 钎料, 可应用于各类陶瓷和金属的直接钎焊。B-Ti49CuBe(49Cu

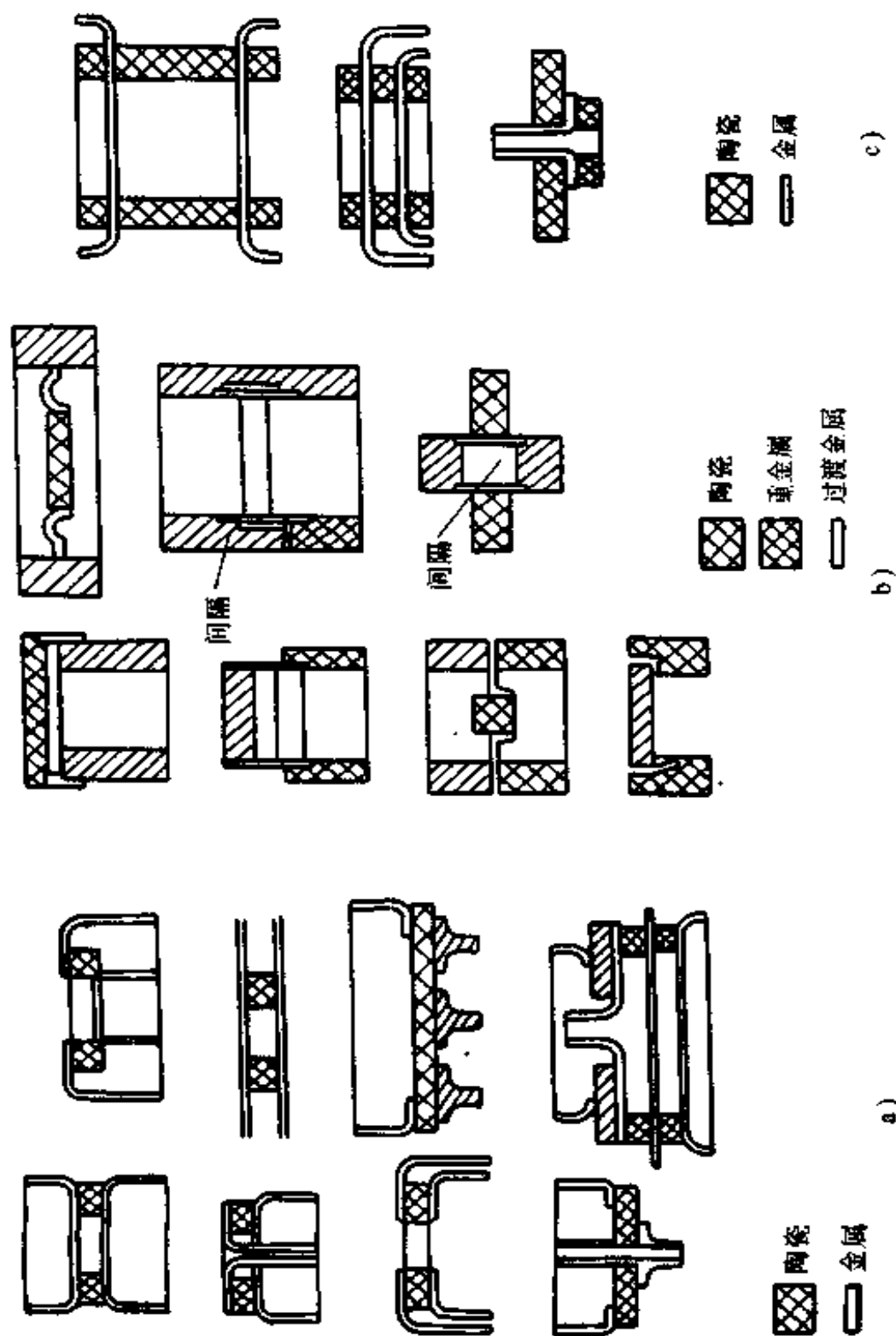


图 8-8 陶瓷-金属接头的形状
a) 对接和搭接密封接头 b) 与厚金属件相连的过渡接头 c) 用陶瓷环衬托延性金属密封圈

表 8-35 陶瓷与金属连接常用钎料

钎 料	成分 (质量分数, %)	熔点 /℃	流点 /℃
Cu	100	1083	1083
Ag	>99.99	960.5	960.5
Au-Ni	Au82.5, Ni17.5	950	950
Cu-Ge	Ge12, Ni0.25, Cu 余量	850	965
Ag-Cu-Pd	Ag65, Cu20, Pd15	852	898
Au-Cu	Au80, Cu20	889	889
Ag-Cu	Ag50, Cu50	779	850
Ag-Cu-Pd	Ag58, Cu32, Pd10	824	852
Au-Ag-Cu	Au60, Ag20, Cu20	835	845
Ag-Cu	Ag72, Cu28	779	779
Ag-Cu-In	Ag63, Cu27, In10	685	710

及 2Be) 钎料具有与不锈钢相近的耐腐蚀性, 并且蒸气压较低, 在防氧化、防泄漏的真空密封接头中被使用。在 Ti-V-Cr 系钎料中, 钒的质量分数为 30% 时熔化温度最低 (1620℃), Cr 的加入能有效缩小熔化温度范围, 在钎焊过程中低熔点组分不宜偏析。不含 Cr 的 Ti-Zr-Ta 系钎料, 也已用于氧化铝和氧化镁的直接钎焊, 其接头可在 1000℃ 的环境温度下工作。

经过预先金属化处理的陶瓷可以在高纯度的惰性气体、氢气或真空环境中进行钎焊; 不经过金属化的陶瓷直接钎焊时, 一般应选用真空钎焊。

8.11.1.4 钎焊工艺

用烧结金属粉末法连接陶瓷与金属, 其工艺流程见图 8-9。

(1) 零件的表面清洗和准备 清洗是为了除去母材表面的油污、汗迹和氧化膜等, 清洗后的零件不得再与有油污的物体或手接触, 应立即进入下道工序或放入干燥器内, 不能长时间暴露在空气中。陶瓷件多用丙酮加超声清洗, 再用流动水冲洗, 最后用去离子水煮沸两次, 每次煮沸 15min, 烘干后备用。金属零件和钎料先去油, 再酸洗或碱洗去氧化膜, 经流动水冲洗并烘干, 对要求高的零件再进行“热清洗”, 即在真空炉或氢炉中 (也可用离子轰击的方法) 用适当的温

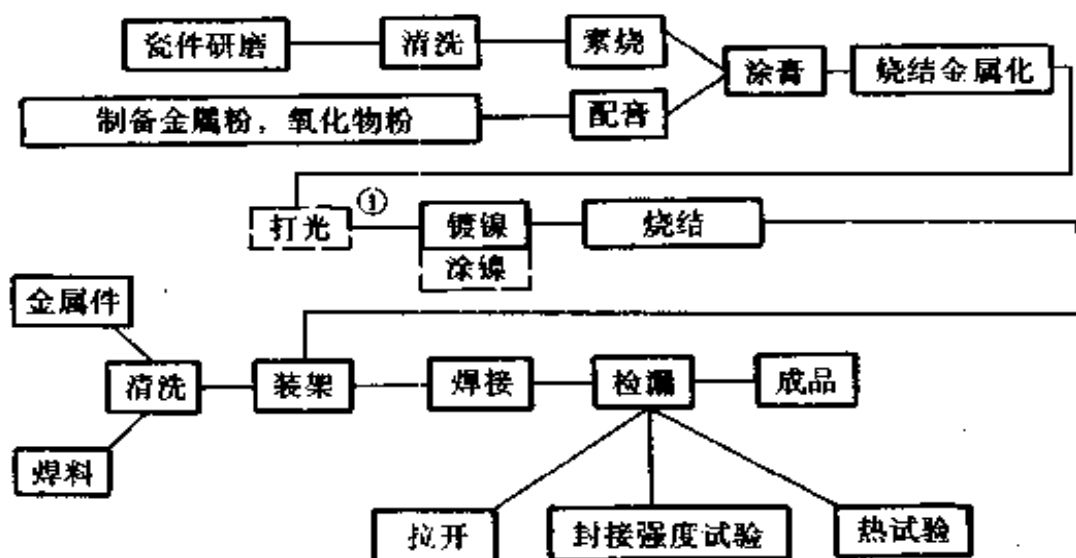


图 8-9 陶瓷与金属连接通用工艺流程

①虚线框内的不是必须的工序

度和时间进行热处理，以净化零件表面。

(2) 涂膏 这是陶瓷金属化的一个重要工序，膏剂多由纯金属粉末或添加适当的金属氧化物，这些粉末的粒度约 $1\sim 5\mu\text{m}$ ，用有机粘接剂调成一定粘度膏，涂敷时用毛笔或涂膏机等机械装置涂于需要金属化的陶瓷表面上，涂层厚度一般为 $30\sim 60\mu\text{m}$ 。金属化配方是陶瓷金属化的关键，对不同的陶瓷，金属化配方是不同的。其重要成分为难熔金属粉，用的最多的是钼粉，其次是钨粉。为了改善难熔金属粉末与陶瓷的结合，还添加原子序数在 $22\sim 28$ 之间的金属，最常用的是锰、铁、钛粉。此外，还可以使用氢化钛或氢化锆。

(3) 陶瓷件金属化 将涂好膏的陶瓷件送入氢气炉中，用湿氢或裂化氢在 $1300\sim 1500^\circ\text{C}$ 温度下烧结，并保温 $0.5\sim 1\text{h}$ 。对于涂氢化物的陶瓷件，应加热到 900°C 左右，使氢化物分解，使纯金属或残留在陶瓷表面的钛（或锆）在陶瓷表面发生反应，继而在陶瓷表面上获得金属涂层。

(4) 镀镍 对于 Mo-Mn 金属化层，为了使其与钎料润湿，还必须电镀上 $4\sim 5\mu\text{m}$ 的镍层或涂一层镍粉，如果钎焊温度低于 1000°C ，则镍层还需在氢气炉中进行预烧结，烧结温度为 1000°C ，烧结时间

为 15~20min。

(5) 装配 处理好的陶瓷及金属件,用不锈钢、石墨或陶瓷模具装配成整体,在接缝处装上钎料,并在整个操作过程中保持工件清洁,不得用手触摸。

(6) 钎焊 在通氩、氢气炉或真空炉中进行钎焊,钎焊温度依钎料而定,为防止陶瓷件炸裂,降温速度不得过快。此外,钎焊还可以施加一定的压力(约 0.49~0.98MPa)。

(7) 检验 对焊件除进行表面质量检验外,有特殊要求的产品应抽样进行热冲击及力学性能检验,真空器件用的封接件还必须按有关规定进行检漏试验。

直接(活性金属法)钎焊时,可省去上述工艺过程的(2)~(4)部分,陶瓷及金属被焊件经表面清洗后直接进行装配。为避免构件材料因热膨胀系数不同而产生裂纹,可在焊件之间放置缓冲层(一层或多层薄金属片)。应尽可能将钎料夹置在两个被焊件之间或放置在利用钎料填充间隙的位置,然后像普通真空钎焊一样进行钎焊。表 8-36 列出了直接钎焊法常用的各种钎料、熔化温度、钎焊温度、用途及接头性能。

表 8-36 陶瓷直接钎焊用钎料

钎料	熔化温度/℃	钎焊温度/℃	用 途 及 接 头
92Ti-8Cu	790	820~900	陶瓷-金属的连接
75Ti-25Cu	870	900~950	陶瓷-金属的连接
72Ti-28Ni	942	1140	陶瓷-陶瓷,陶瓷-石墨,陶瓷-金属
50Ti-50Cu	960	980~1050	陶瓷-金属的连接
B-Ag72CuTi	779	820~850	陶瓷-钛的连接
100Ge	937	1180	碳化硅-金属 ($\sigma_b=400\text{MPa}$)
49Ti-49Cu-2Be		980	陶瓷-金属的连接
48Ti-48Zr-4Be		1050	陶瓷-金属的连接
68Ti-28Ag-4Be		1040	陶瓷-金属的连接
85Nb-15Ni		1500~1675	陶瓷-铌 ($\sigma_b=145\text{MPa}$)
47.5Ti-47.5Zr-5Ta		1650~2100	陶瓷-钽
54Ti-25Cr-21V		1550~1650	陶瓷-陶瓷,陶瓷-石墨,陶瓷-金属
75Zr-19Nb-6Be		1050	陶瓷-金属的连接
56Zr-28V-16Ti		1250	陶瓷-金属的连接
83Ni-17Fe		1500~1675	陶瓷-钽 ($\sigma_b=140\text{MPa}$)

8.11.2 石墨和金刚石聚晶的钎焊

石墨的化学成分是纯净的碳元素，具有导热性高、热膨胀系数小、高温性能好及耐腐蚀等优点；广泛应用于原子能工业、空间技术、电力工业及化学工业。其缺点是抗热振性不好、强度低，特别是刚性极差。金刚石聚晶是采用高纯石墨在高温高压下以人工方法合成的工程材料，属于碳的同素异构物质，除天然金刚石外，它是目前人们使用的最硬的一种工程材料。硬度比碳化硅陶瓷高一倍，热导率是硬质合金的二倍以上，具有极低的热膨胀系数和较高的弹性模量，耐磨性比硬质合金高百倍以上。但强度不高，抗剪及抗冲击性能差。

石墨材料及其接头在原子能工业及空间技术上得到了广泛的应用，在化学工业中，可应用于电解槽电极及热交换器。金刚石聚晶材料及其钎焊接头，在工业中广泛用于制造地质勘探、石油钻井用钻头切削齿、模具及高耐磨部件等。

8.11.2.1 钎焊特点

石墨及金刚石聚晶钎焊所涉及的问题与陶瓷钎焊所碰到的问题十分相似。与金属相比，钎料对石墨及金刚石聚晶材料很难润湿，且与一般结构材料的热膨胀系数相差很大。二者直接在空气中加热，超过400℃会出现氧化或碳化，因此应采用真空钎焊，且要求真空度不应低于 10^{-1}Pa 。因二者的强度不高，钎焊时如热应力存在则有可能产生裂纹，要尽量选用热膨胀系数小的钎料和严格控制冷却速度。由于石墨及金刚石聚晶表面不易被普通钎料润湿，钎焊前可通过表面改性（真空镀膜、离子溅射及等离子喷镀等方法）在石墨及金刚石聚晶材料表面沉积一层厚2.5~12.5nm的钨、钼等元素并与之形成相应的碳化物，或者使用高活性钎料。石墨有多种品级，这些品级在颗粒度、密度、纯度和其它方面都有差别，不同品级的石墨具有不同的钎焊特性。此外，金刚石聚晶材料在真空环境下，如果温度超过1000℃，聚晶磨耗比开始下降，超过1200℃，磨耗比降低50%以上。因此，真空钎焊聚晶温度一定要控制在1200℃以下，真空度不低于 $5 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。

8.11.2.2 钎料选择

钎料的选择主要根据用途而定, 作为耐热材料使用时, 选择钎焊温度高、耐热性好的钎料; 而用于化工耐蚀材料则选择钎焊温度低、耐蚀性好的钎料。纯铜钎料具有延性高、抗腐蚀性好的特性, 可用于石墨和金刚石的钎焊。银基及铜基活性钎料对石墨和金刚石均有良好的润湿性和流动性, 但钎焊接头的使用温度难以超过 400°C 。对于 $400\sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间使用的石墨构件及金刚石工具, 通常选用金基、钼基、钽基或钛基钎料。 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间使用的接头则选用镍基或钴基钎料。石墨制件在 1000°C 以上使用时, 可选用纯金属钎料 (镍、钼、钛) 或能与碳形成碳化物的钼、钽等元素。表 8-37 列举的各类钎料, 可以直接钎焊石墨和金刚石聚晶材料。

表 8-37 真空钎焊石墨和金刚石聚晶用钎料

钎 料	钎焊温度/ $^{\circ}\text{C}$	用 途 及 性 能
54Ti-21V-25Cr	1550~1650	能润湿难熔金属和陶瓷, 在石墨上可流动 63.5mm
47.5Ti-47.5Zr-5Ta	1650~2100	适合高温工作的石墨构件和金刚石聚晶的连接
47.5Ti-47.5Zr-5Nb	1600~1700	用于石墨与钼, 聚晶与金属的钎焊
49Ti-49Cu-2Be	1900	石墨与石墨, 石墨与金属, 金刚石聚晶与金属的钎焊
43Ti-42Zr-15Ge	1300~1600	对低密度石墨易流入微孔, 钎缝强度高; 对高密度石墨或聚晶只在表面流动, 接头强度较低
35Au-35Ni-30Mo	1300	既能用于金刚石聚晶, 又能满足低、高密度石墨的钎焊
60Au-10Ni-30Ta	1200	在金刚石聚晶和石墨上有满意的流动性, 用于石墨与石墨, 石墨与钼钎焊效果最好
64Ni-20Cr-8Mo-8W	1250	主要用于石墨换热器的钎焊
72Ag-28Cu-Ti	950	对石墨具有良好的润湿性和流动性
71.5Ti-28.5Ni	955~1100	石墨与石墨, 石墨与金属, 金刚石聚晶与金属
91.5Ti-8.5Si	1330	石墨与钼, 石墨与金属, 石墨与石墨

8.11.2.3 钎焊工艺

焊件装配前, 应先对焊件进行预处理, 用酒精或丙酮将石墨及金刚石聚晶材料的表面污染物擦拭干净。使用银或铜基钎料时, 应先在

石墨表面电镀一层镍、铜或用等离子喷镀一层钛、锆或二硅化钼。直接钎焊时，可将钎料夹置在钎焊接头中间或靠近一头。当与热膨胀系数大的金属钎焊时，可利用一定厚度的钼或钛作中间缓冲层，该过渡层在钎焊加热时可发生塑性变形，吸收热应力膨胀，避免石墨开裂。

应尽可能利用焊件的自重进行装配定位，使金属件处于上部压住石墨或聚晶材料。使用夹具定位时，夹具材料应选用热膨胀系数与被焊件相近的材料。

加热时，应使钎焊接头温度基本均匀，合理的控制加热速度。冷却时，要使热应力能缓慢释放，如冷速过快将会导致石墨或聚晶材料开裂。

8.11.3 复合材料的钎焊

复合材料由于具有比强度高、刚性大、耐热性好、密度小等特点，在航天航空工业中作为新型高温热结构材料得到广泛的应用。

8.11.3.1 钎焊特点

复合材料是由两种或两种以上的材料按一定的要求，在一定的温度下复合而成，钎焊温度对复合材料的性能有很大影响。对硼铝复合材料来讲，硼纤维与铝之间的热膨胀系数相差很大，当钎焊温度高于 540°C 时，硼纤维与铝基体发生反应生成脆化层，复合界面也会产生热应力，这都将使界面强度降低。因此，钎焊时应选用合适的钎料，尽量减少界面反应物的生成；同时，应从工艺上设法选用保护层对硼丝进行保护，避免强度降低。此外，应尽可能采用真空钎焊。

8.11.3.2 钎料选择

硼铝复合材料真空钎焊最常用的钎料为 Al-Si-Mg 系或 Al-Si-Mg-Bi 系，使用比较成熟的是 B-Al64SiMgBi (11.6Si-15Mg-0.5Bi) 钎料，熔化温度为 $554\sim 572^{\circ}\text{C}$ ，钎焊温度为 $580\sim 590^{\circ}\text{C}$ ，钎焊时间为 5min，接头剪切强度大于 80MPa 。

8.11.3.3 钎焊工艺

硼铝复合材料与高温合金组成的钎焊焊件常用与航天飞机轨道器的隔热结构，其钎焊过程实际上是铝与高温合金的钎焊。钎焊前应在高温合金上用等离子喷枪喷上铝硅粉或铝硅镁钎料，把硼铝复合材料

在丙酮中清洗后，再进行超声波清洗，用夹具定位或点焊定位进行组装。

把组装的待焊部件装入钢质容器内真空清理，排除对钎焊过程可能产生不利影响的全部污染物。其过程为抽真空到 10^{-1}Pa 后开始加热，继续抽真空到 10^{-2}Pa 以下。加热到 527°C ，保温 30min 后冷却。

将待焊部件装入真空炉并抽真空到 10^{-2}Pa 后，加热到 400°C ，向炉内充入 $0.4\sim 0.5\text{MPa}$ 的高纯氩气。然后继续加热到 459°C ，保温 10min，并断电冷却到 400°C 以下，排除氩气压力，使构件冷却到室温。

第9章 钎焊操作中的安全保护

钎焊工作者经常与各种钎剂、浸渍液体和易爆易燃物质接触，钎焊过程中又会产生有害粉尘、高频磁场、有毒或腐蚀性蒸气等。这些都危害职工的健康，甚至产生职业病患。因此，钎接安全及劳动卫生应当引起人们的足够重视。本章仅就常用的钎焊方法所引起的不安全及不卫生因素进行简单介绍，并指出安全防护的必要措施。

9.1 不安全及不卫生因素

钎焊过程中的不安全及不卫生因素主要有以下几个方面：

(1) 有毒物质 钎焊中使用的各类钎剂，大多数都含有有毒物质。例如软钎剂中的无机酸、无机及有机盐类；硬钎剂中的氯化物和氟化物及硼酸、硼砂等；在气体钎剂中，所有钎剂及其化合物的产物均有毒，如氯化氢、氟化氢、氟硼酸钾等。长期接触有毒物质会引起慢性中毒；焊件清洗（焊前或焊后）或盐浴钎焊时，可能引起身体某部位的烧伤或烫伤；吸入较高浓度的氟化物气体或蒸气，可引起鼻腔溃疡和喉咙粘膜充血；严重者可发生支气管炎、肺炎等疾病。

(2) 金属烟尘 金属烟尘主要是在钎焊加热过程中由钎剂、钎料或母材金属元素的蒸发所形成，另外，电镀工件的镀层在高温下的分解及扩散也是烟尘的重要来源。烟尘的颗粒非常细小，在空气中能长期飘散，成分也比较复杂，主要含有镉、铍、锌、铅等元素。长期吸入这些金属烟尘，会使肺组织纤维化及肺功能下降，促使神经系统紊乱，产生金属热（发热寒战、恶心）等多种疾病。

(3) 易燃易爆物质 火焰钎焊时常采用可燃气体或液体燃料的气化产物与氧气或空气混合燃烧，这些燃料都是易燃易爆品；氧气瓶、液化石油气罐等都属于压力容器。在钎焊过程中，可燃气体与压力容器接触，同时又使用明火，如果焊接设备或安全装置有缺陷，或者违

反安全操作规程，就有可能造成爆炸和火灾事故。

(4) 高频磁场 感应钎焊时常采用高频感应的方法进行加热，这就在电源及传输线附近的空问形成高频电磁场，通过感应线圈和电缆软线对人体空间的电容耦合，使人体内有感应电流通过。长期接触场强较大的高频电磁场的工人或技术人员，会引起头痛、头晕、疲乏无力等症状。

9.2 钎焊操作的注意事项及安全防护

9.2.1 有毒物品的安全管理

对于含有有毒物质的钎剂和钎料，在保管和使用时要充分注意，应按有关规定采取特殊的防护措施，必须在其包封上、盒子上及其它包装箱上贴有明显、醒目的标志及注意事项，这些有毒物品主要包括以下几种：

(1) 氟化物 含氟化物的钎剂在存放时，不要让眼睛或皮肤接触钎剂，切勿入口，不要让小孩接近。这类钎剂在加热时会放出刺激眼睛、鼻子和喉咙的烟气，在室内或密封的空间施焊时，必须要有通风设备。在敞开空间施焊时，如果呼吸区域内氟化物的含量低于规定的极限值，可以不使用专门的通风设备。炉中钎焊或真空钎焊时，如使用含有氟化物的钎剂，则应注意防止炉内金属及内壁腐蚀，排气处理要符合环境保护标准。浸渍钎焊时，如果盐浴成分中含有氟化物，也应进行适当的通风。

(2) 清洗剂 钎焊过程中，构件的焊前及焊后清洗是非常重要的。有些清洗剂如四氯化碳，即使存在量很少，也会对操作者的健康产生严重的累积危害；三氯乙烯和四氯乙烯如果与高温工件接触或处于电弧附近，便分解成有毒的卤素和碳酰氯。在处理和保管清洗剂及酸和碱时，应严格按照要求谨慎操作，储藏容器应密闭并防止阳光直接照射。在使用化学清洗剂时，应预先确定它的成分是否容易燃烧或产生有毒气体，清洗场所必须安装排气系统并能有效地除去清洗槽和酸洗槽里产生的烟气。用有机溶剂脱脂的部件，在钎焊之前应完全弄干，因为这些溶剂的分解产物可能是有毒的。

(3) 镉 镉除了作为母材镀层外，还存在于某些钎料中。在室内或封闭的空间进行含镉材料的钎焊时，必须使用排气通风装置或供气防毒面具。室外操作时，需要使用防毒面具等呼吸防护设备。如果钎焊操作过程中出现了胸痛、咳嗽或钎焊操作后出现发烧等症状，应立即找医生诊治。

(4) 铍 铍作为降低熔点的添加剂应用于某些钎料中（例如 48Ti-48Zr-4Be），在镁或铝钎料中，也可能含有少量的铍。在室内或室外用含铍的基体金属或钎料进行钎焊时，应和使用含镉钎料一样进行通风和防护，接近钎焊工作区的其他人员也必须同样进行防护。此外，应避免铍吸入口内或通过皮肤进入体内。

(5) 锌 锌常常用作基体金属的涂层，也作为添加元素存在于钎料中。锌的熔点低，易氧化，产生难闻的氧化锌烟气，这种烟气渗入肺部后，能引起“锌寒战病”或“锌烟发烧”等症状。这种病开始于接触锌烟雾后几小时，经常在夜间发生。发病时，口中有甜味感，咽喉发干、咳嗽、疲劳、乏力、呕吐、头和周身感到疼痛，发冷或发热不超过 39 度。如果间隔若干天后再与锌的烟雾接触，还会再次发病。锌的烟气对人体的危害虽然小于镉或铍，但仍然需要提供适当的通风设备。此外，钎剂中的氯化锌如果长时间停留在皮肤上，会产生严重的烧伤和皮炎。

此外，某些钎剂、钎料或清洗剂含有不可吸入体内的材料，接触到这些产品的人员，在吃食物之前应彻底洗手。在工作区域内不应存放食品和饮料，被污染的衣服应及时更换。

9.2.2 通风

通风是保证钎焊操作者安全中最常用的方法，在钎焊区及清洗操作的场所，必须按规定安装通风系统或局部排气设备，使有毒的烟、气和粉尘及时排出，使各有毒元素的含量保持在职业安全和保健条例所规定的容许范围内。是否符合这个要求，必须由工作区域内的空气取样来确定。这些取样样品必须能够反映工作人员在有害气体中的暴露程度，如果空气鉴定结果证明没有超过规定的极限值，就可以认为通风条件是合格的。

选择通风设备和通风速率应考虑的因素主要有：工作空间的大小，特别是要考虑工作场地的高度和存在的障碍物；钎焊操作者的数目，该数目应包括附近所有的工作人员；有毒烟尘和气体散发源的强度及距离，并应把基体金属和钎料金属考虑进去；应考虑焊工的呼吸区域与有毒烟柱升起处的相对位置。此外，还应考虑大气状况、产生的热量和场地存在的某些挥发性溶剂等一般工况。

在限制的空间内进行钎焊时，必须提供足够的通风，以防止有毒物质的积聚，或防止钎焊工及其他操作者发生缺氧。如果通风条件难以保证，就必须使用国家职业安全部门规定的供气呼吸器或软管防毒面具，并在工作区外设置一个助手，以确保工作人员的安全。此外，绝对不能使用氧气进行通风。

在精密零件的氢气炉中钎焊时，应特别注意通风工作。氢气炉出口应有抽风罩，房间内应有通风设备，进房间后首先应抽风 10～15min。

使用通风设备可以把室内或钎焊工作区内的有爆炸性或有毒气体排到室外去，在把这类气体排出之前，应该考虑是否符合当地的生态环境保护条例。

9.2.3 其它应注意的事项

(1) 窒息 钎焊中为了防止构件的高温氧化，常常使用惰性气体如氮气和氩气，氩气虽然在所有温度下都是惰性的，但氮气在高温下则可能产生有毒的氧化物。当这些惰性气体的浓度很高时，工作人员会因缺氧而产生窒息。因此，要禁止任何人员进入曾通过或仍盛有惰性气体的容器或真空炉，确有必要进入这种区域时，应先用适宜于人呼吸的空气把惰性气体吹掉，否则应给进入的工作人员配戴供气防毒面具。

(2) 燃烧和爆炸 在浸渍钎焊中，如果部件上留有水分，浸入盐浴槽时就会瞬间产生蒸气，导致剧烈的爆炸，把盐浴槽内的溶液炸的到处飞溅，会造成严重的火灾和灼伤。其防止办法是把焊件在浸入盐浴槽之前先烘烤得十分干燥。如果在浸渍钎焊的过程中需要向盐浴槽内补充钎剂时，也必须预先把钎剂充分干燥，不仅要除去其中的潮

气，而且还要消除钎剂中的结合水，以避免爆炸的危险。

火焰钎焊时，常采用氧乙炔焰、压缩空气雾化火焰、空气液化石油气火焰等进行钎焊加热，这些气体都是易燃易爆气体，所用的容器均为压力容器，如果钎焊设备或安全装置有缺陷，或者违反操作规程，就有可能造成爆炸和火灾事故。用乙炔发生器制取乙炔时，应对设备进行全面检查，确认各部分正常后方可灌水加料；发生器启动前和工作过程中，应仔细检查压力表、温度计、安全阀及各接头处，如发现异常（如压力过大或温度过高），应采取措施或暂时停止工作。使用压力气瓶时，应首先进行外部检查，检查的重点是瓶阀、接管螺纹和减压器等。如发现漏气、滑扣和表针不正常等，应及时维修，切忌随便处理。压力气瓶严防直接受热，要远离高温、明火和易燃易爆物品。冬季使用气瓶时，对瓶阀、减压器的冻结处理要用热水或水蒸气解冻，不可用铁器猛击或明火烘烤。

在使用氢气炉进行钎焊时，应和使用乙炔发生器、氧气瓶一样注意安全工作。氢气炉的房间内不能同时存放氢气瓶，氢气瓶应远离明火源或氢气炉 15m 以上，更不得置于日光下暴晒。氢气管路应安装回火防止器，随时注意氢气有无泄漏。应经常检查氢气炉出气口的氢气纯度，并按照设备使用规程进行操作。与氢气接触的管道和设备要有接地装置，以防产生静电造成自燃。

第 10 章 钎焊应用实例

10.1 印制电路板的钎焊

10.1.1 元器件引线的成形

引线从两侧一字型伸出的元器件（即轴向引线元器件），为了插在印制电路板上，必须向同一方向垂直打弯。即使引线在同一侧的元器件（即径向元器件），也要成形，以缓和由于温度急剧变化引起的热膨胀、收缩的应力。同时，也为了增加热传导的距离，提高热阻，以防元器件损坏。为了防止根部的折断，应稍离根部一定的距离（常取 1.5mm 以上），取适当的圆角进行打弯，圆角半径应大于普通引线的两倍。

10.1.1.1 引线打弯的基本形状

1. 引线的基本成形

当折弯的引线间距与孔间距相适应时，采取如图 10-1 的形式。此时，要求打弯的两根引线应与元器件本身成直角，和元器件中心轴在同一平面上，相互平行，两边打弯的部位距元器件中心几乎相等。

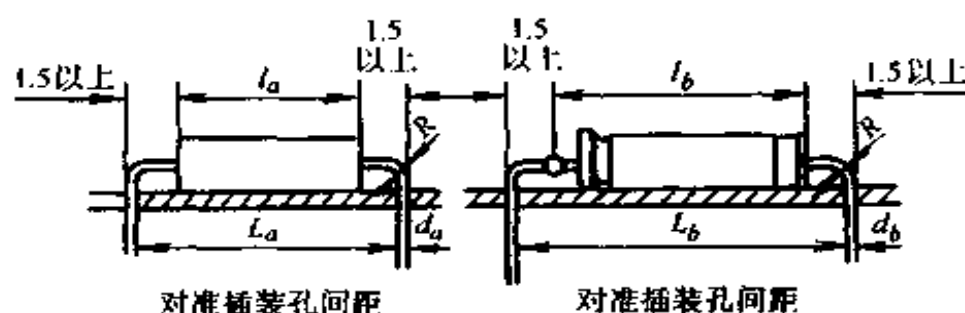


图 10-1 引线打弯的基本形状

2. 孔距不符合标准时

当印制电路板上安装孔的距离比标准的引线打弯尺寸小时，应按

图 10-2 所示的形状成形。

3. 垂直插装的元器件的引线成形

垂直插装轴向引出元器件和同向引出元器件时，其引线应按图 10-3 所示方法成形，不能勉强打弯，否则会引起封装树脂开裂或引线脱开。

4. 集成电路 (IC) 的引线成形

集成电路的引线很多，如用手工加工成均一的形状是比较困难的，而且工作效率也很低，因此须使用专用工具。图 10-4 为一集成电路引线成形的实例。

5. 特殊形状成形

对于非贴紧在印制电路板上插装的元器件或耐热性差的元器件，引线打弯的尺寸要长些，以增加热传导的距离。作为一种特例，有时需要加工成图 10-5 所示的特殊形状。但是在没有特殊要求时，不必采用这种成形方法。

6. 标记位置

印有特性、商品名称等文字标记的元器件，引线成形时，应保证插装在印制电路板上后，标记明显可见，以便于维修和检查。这时应按图 10-6 所示的方法打弯成形。

10.1.1.2 元器件插装操作

插装元器件时，首先将铜箔电路朝下并固定好电路板，随后把元器件引线从上面插入印刷板的插装孔内之后，用一手按住元器件，以

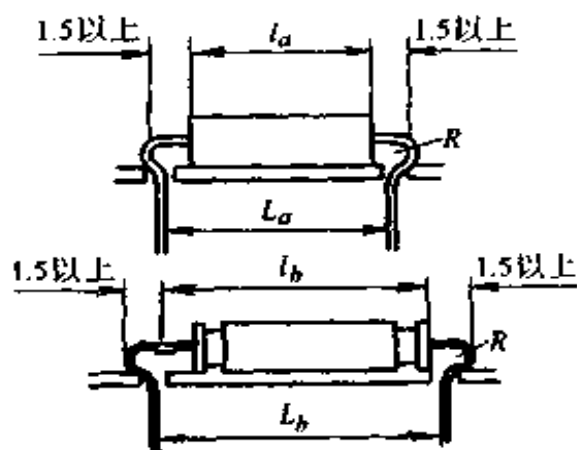


图 10-2 元器件安装孔的孔距不当时引线的成形方法

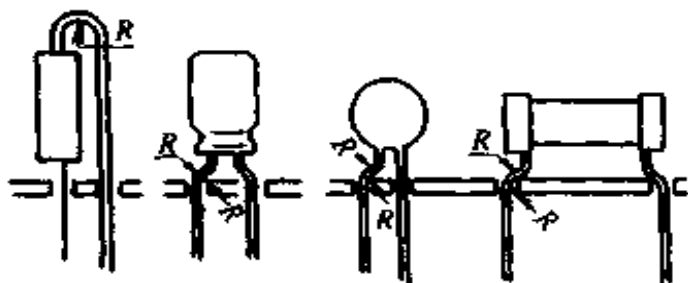


图 10-3 垂直插装时元器件引线的成形方法

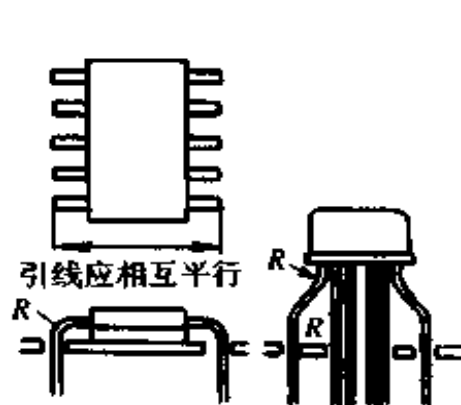


图 10-4 集成电路的引线的成形

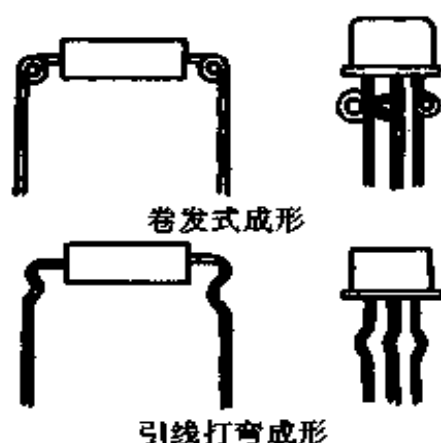


图 10-5 特殊形状成形

免脱落，将印制电路板翻过来，另一手拿扁嘴钳，夹住插装的引线打弯，使之与印制电路板成 20° 夹角，牢牢地固定在印制电路板的铜箔电路路上。

插装元器件时，必须注意不得用手直接接触元器件的引线和印制电路的铜箔，以防手汗中的油脂、盐分等污染金属表面，降低钎焊性。

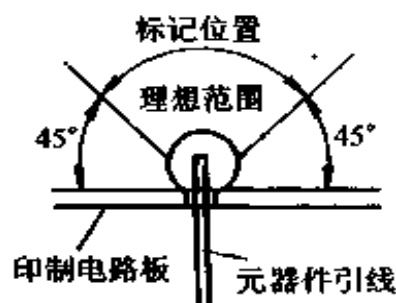


图 10-6 标记位置

1. 元器件的插装方向和元器件的标记

当图样上未标明时，必须按照某一标准

元器件插装。如图 10-7 所示，印制电路板插头侧朝向操作工人，沿 X-Y 轴方向插装元器件。元器件额定数值等标记都能按着自下而上（Y 轴）、从左向右的方向（X 轴）读出。但是有极型电容器、二极管等元器件，应按其所标记的极性插装，并在插装后应便于读出标记、数值等等。

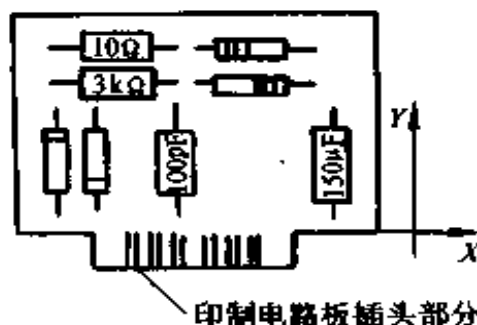


图 10-7 元器件插装方向的原则

2. 贴紧插装

因为印制电路板在设计时已充分考虑了各元器件的距离，所以其间距不会

小于 1mm。但是当一个元器件与另外一个元器件的引线间距取 2mm

以上仍有可能相互接触时，需在引线上加套管。不管印制电路板的种类如何，所有的元器件均应贴紧印制电路板插装，贴紧的允许范围一般控制在 0.5mm 以内。图 10-8 给出了贴紧插装的允许范围。

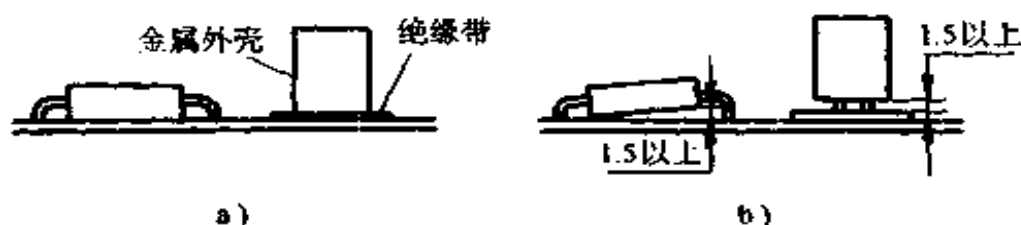


图 10-8 贴紧插装实例

a) 贴紧插装 b) 不合格的贴紧插装

3. 非贴紧插装

下列元器件不可贴紧插装：

- 1) 图样上标明非贴紧插装的元器件；
- 2) 发热量大的元器件（1W 以上的电阻、功率晶体管等）；
- 3) 垂直插装的电阻、二极管等轴向引线的元器件；
- 4) 当印制电路板的插孔间距与元器件引线的间距不一致时，如果贴紧插装可能会使引线根部受到应力而破坏（如陶瓷电容、半固定电阻、可变电阻等）；
- 5) 因钎焊的热冲击可能导致电性能损坏的元件（IC、晶体管等）；
- 6) 结构上不能贴紧插装的元器件（IC）。

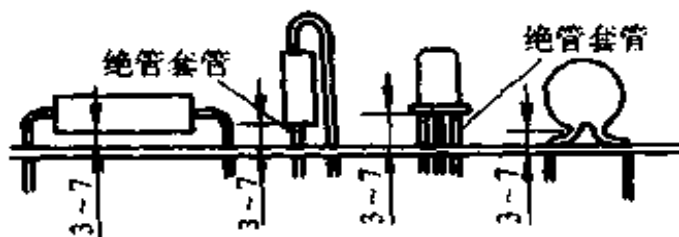


图 10-9 非贴紧插装实例

非贴紧插装时，元器件与印制板之间的尺寸一般为 3~7mm（图 10-9）。

10.1.1.3 元器件插装后的引线打弯方向和剪断

1. 引线打弯

安装座（焊盘）与铜箔电路是连通的，原则上沿电路的方向打弯固定。但是轴向引线的圆筒形元器件，若向同一方向与电路平行地将引线打弯，则元件安装状态不稳定，所以两根引线的打弯方向或者互

为相反,或者取一定角度,如图 10-10b) 所示。只有安装座(焊盘)而无铜箔电路,以及需要向电路以外的方向打弯时,应朝距其它电路空间大的方向打弯,如图 10-10c) 所示。总之,不管哪种情况,打弯都不能过度用力拉引线。切不可弯成图

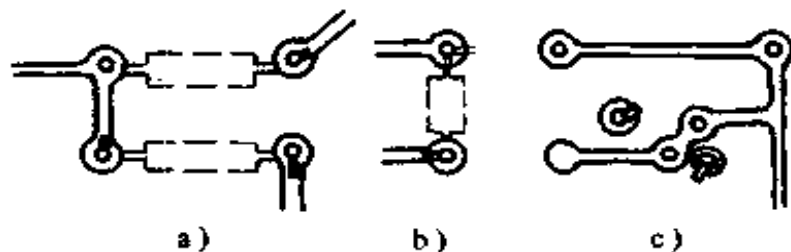


图 10-10 元器件插装后引线打弯方向的标准

a) 一般打弯方法 b) 同方向电路的打弯方法 c) 只有安装座时的打弯方法

10-11 的形状。这种装配形态,拉伸应力作用于元器件引线的根部和引线与印刷电路板相连之处,是元器件破坏的原因。



图 10-11 不正确的引线插装方法

2. 引线打弯后的剪断

引线剪断的方法是自元器件插装孔的中心起,一般留出 2~3mm 长,然后用扁口钳剪断。

当只有安装座(没有电路)时,或需向电路以外的



图 10-12 引线剪断长度和角度

方向打弯时,应在距安装座的外周 1mm 以内处剪断,这时的剪断角度如图 10-12 所示,取 45°角。如果直角剪断,则扁口钳的钳刃很容易划伤铜箔电路,而且在剪切角处容易残存空隙和钎剂气泡,不利于钎料的流动和润湿。

3. 孔金属化时引线的剪断

经金属化处理后的安装孔,有时不打弯而直接剪断引线。这种情况下,需要保证在钎焊结束之前,元器件不会脱落和浮起。另外,为了进行批量生产,还有使用自动切断机来剪断引线的。

10.1.2 电烙铁钎焊印制电路板

元器件插装工序完成之后,就可以进行钎焊工作。

由于电烙铁对印制电路板及元器件的质量影响很大,因此需要严格的管理:

1. 使用电烙铁的注意事项

(1) 温度 由于印制电路板的铜箔与绝缘板之间的结合强度、铜箔的厚度等原因,烙铁头的温度最好在 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 左右。此外,晶体管及其它装配件容易因高温而造成性能异常,所以操作时也应使烙铁头温度保持在这一温度范围内。

(2) 热容量 钎焊印制电路板要使用 $20\sim 40\text{W}$ 的电烙铁。如果电烙铁的瓦数过大或加热时间过长,则不仅会使元器件的性能受影响,还会使印制电路板“起泡”、“焦糊”,铜箔电路“起皮”,严重时锡与铜相互扩散加剧,致使铜箔电路溶解消失。

(3) 热平衡 从操作上看,希望烙铁能在短时间内使被钎焊面的温度达到要求,最长加热时间不得超过 $15\sim 20\text{s}$ 。

(4) 绝缘电阻 印制电路板上插装有许多晶体管、二极管、集成电路等元件,如果在部分电路处于接地的状态下进行钎焊时,无疑电烙铁的绝缘电阻是绝对不容忽视的。当然,其中也有因静电导致性能异常的元器件。即使是将印刷电路板从整机上取出后放在绝缘板上进行钎焊,这种标准钎焊作业时用的烙铁,也应能够保证在加热状态下直流电压为 100V 时具有 $10\text{M}\Omega$ 以上的绝缘电阻。

(5) 烙铁头的形状 烙铁头的形状应以不损伤电路为原则。铜箔电路的宽度一般小于 1mm ,元器件的线径大多也小于 0.8mm 。因此,顶端大或头部尖锐的烙铁头都容易损伤铜箔电路,所以最好使用改锥头形的圆形的小型烙铁头。

2. 加热方法(烙铁接触方式)

首先,用大拇指、食指和中指三个手指像拿铅笔一样,拿住电烙铁手柄,然后用烙铁头清洗器清除烙铁头上的氧化物。烙铁头清洗器为含适量水的海绵或人造海绵,加热时,应按图 10-13 所示的方法进行操作,烙铁头的接触位置应能同时加热引线和铜箔电路,小拇指垫在印制电路板上,支撑着烙铁,使之稳定,自由调整接触角度,接触

面积，接触压力等等，使两个金属件均匀加热。

3. 钎料的添加方法

当铜箔和引线都达到钎料熔化温度后，在烙铁头接触引线的部位先加少量钎料，再稍向引线的端面移动电烙铁，在引线的端面再一次添入钎料，接着就像画圆弧一样，一点一点地朝着引线打弯的相反方向移动烙铁和钎料，最后依次从印制电路板上撤掉钎料和电烙铁，完成钎焊操作（图10-14）。

4. 孔金属化后的钎焊

金属化孔如图10-15所示，不仅孔内，而且元器件的安装座都必须充分浸透钎料。用金属化的方法连接印制电路板两面均有电路的地方也应如此。所以，孔金属化所需的加热时间要长些。

钎料润湿不足时，如从相反方向添加钎料，容易将空气封在里面，产生气泡。因此，需要充分进行加热。

5. 其它注意事项

- 1) 不要使劲用烙铁擦焊盘；
- 2) 烙铁头不要在一个地方长时间加热不动，否则会造成铜箔脱落和形成“斑疹”；

- 3) 耐热性差的元器件应使用散热片或散热器（图10-16）。

10.1.3 手工浸焊印制电路板

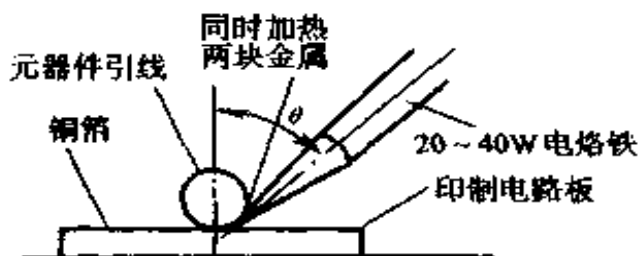


图 10-13 电烙铁钎焊印制电路板的接触方式

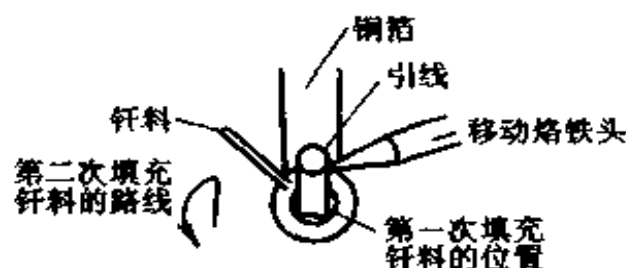


图 10-14 钎料的添加方法

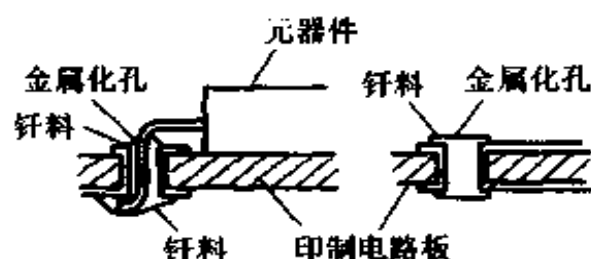


图 10-15 孔金属化后的钎焊

将元器件插装在印制板上,再把被钎部位浸入钎料槽中,使多个元器件一次钎完。这种方法比用电烙铁钎焊的效率,但是操作不慎,也会造成元器件严重损坏和钎焊缺陷,在作业时应加注意。

1. 涂敷钎剂

浸焊也用普通的树脂系列液态钎剂,有的在印制板上涂敷防氧化用钎剂来延长保存时间,但是最好使用与浸焊用钎剂相溶的涂敷剂。涂有清漆类保护涂层的印制板,先要用溶剂彻底地清洗掉清漆,然后再涂敷浸焊用钎剂。这时,需要注意防止钎

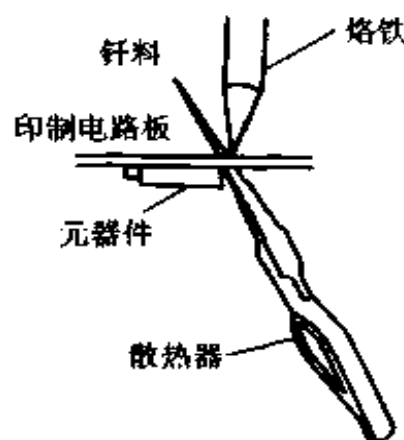


图 10-16 散热片的使用实例

剂从插件孔流到反面,弄脏插好的元器件。如果钎剂的浓度大,粘性强,浸焊时会影响热传导,阻碍钎料润湿。涂敷钎剂后,要用红外线加热器加热到 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$,以免钎焊时急剧温升引起印制电路板翘曲和铜箔结合强度下降。这种加热还可降低钎剂的粘性,提高钎料的润湿性。

2. 浸蘸钎料

浸焊用的钎料一般使用锡的质量分数为 60% 或 63%, 其余为铅的锡铅钎料。钎料槽的温度大多保持在 $240\sim 260^{\circ}\text{C}$, 超过这一温度就会使元器件的性能异常,使电容等元件的内部钎料熔化,造成开路和介质损耗增加等缺陷。

操作时,先清除悬浮在钎料槽表面的氧化物,这在浸焊前用刮板刮去即可。接着将装在支架上的印制电路板按图 10-17 所示的倾斜角(便于钎焊时气体的释放)浸入钎料中,稍加压力按刷墙要领左右摆动一次,最后再倾斜拉出液面。浸焊的时间根据插装在印制电路板上的元器件的热容量而异,一般为 $3\sim 5\text{s}$ 。

3. 冷却

印制电路板浸焊后,虽然已拉离钎料槽的液面,但仍有余热,温度会上升一些,可能使元器件和印制电路板发生过热损坏。因此,需要风机或其它方法冷却。

4. 特殊元器件的钎焊

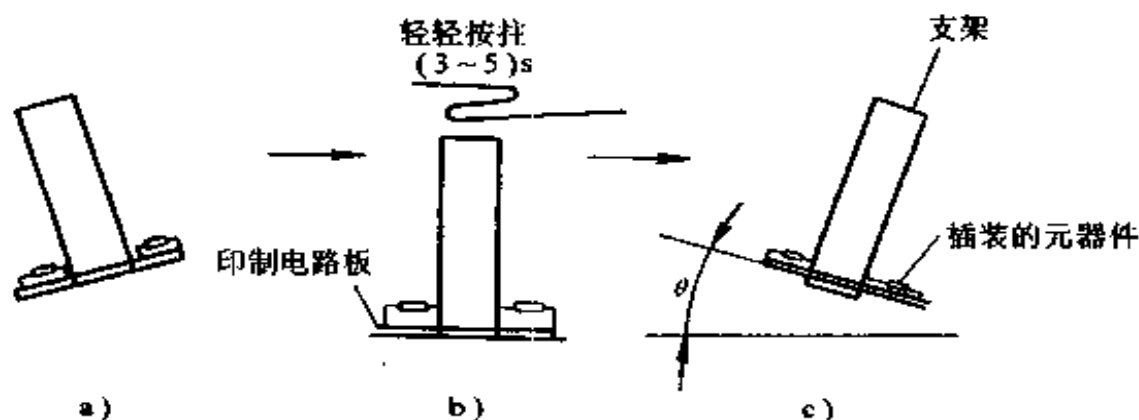


图 10-17 印制电路板的浸焊顺序

a) 开始浸焊 b) 浸焊中 c) 拉出液面

不能承受钎料槽内温度的元器件（如隧道二极管等）和不能清洗的元件（接插件），应在印制电路板浸焊完，冷却后，再行插装并用烙铁钎焊。

10.2 硬质合金车刀火焰钎焊

一般常用的金属切削车刀是合金工具钢或高速钢制成，这种刀具在切削硬韧的金属材料时，往往满足不了切削要求。硬质合金刀具具有很高的硬度和耐磨性能，它不但可切削多种金属材料，而且可大大提高切削速度。硬质合金车刀由刀杆与刀片两部分组成，刀杆为中碳钢或低合金钢，刀片为碳化物与钴的粉末冶金块，两者常用钎焊的方法连接在一起。

10.2.1 钎焊前准备

刀杆和硬质合金刀片在钎焊前必须严格清理：硬质合金刀片表面应在粗的金刚石砂轮上磨削，磨去表面的氧化物；放置刀片的刀杆凹槽及其附近区域表面用砂纸或用其它机械工具清理，除去表面的氧化层及其它污物。机械清理后的刀杆与刀片用去油的溶剂去除表面的油污。经这样的处理后，可使钎料在钎焊时能良好地润湿。

选用片状 B-Cu60ZnMn 钎料，预先按凹槽尺寸剪下，在钎焊前预置于凹槽内。火焰钎焊硬质合金车刀时应施用钎剂，钎剂常由粉状的硼酸、硼砂及少量氟化物配制而成（常用 $w(\text{硼酸}) 80\%$ 、 $w(\text{硼砂})$

砂) 14.5%、 w (氟化钙) 5.5%的 YJ-6 型钎剂)。将粉状钎剂用蒸馏水调成稀糊状, 钎焊前用毛刷将钎剂刷涂至刀杆的凹槽、钎料片及刀片的待焊表面。之后, 将钎料片及刀片放至凹槽内, 并用虎钳将刀杆非钎焊端夹住。

10.2.2 钎焊

火焰钎焊采用的气焊炬应选用较大的喷嘴, 可用单喷嘴或多喷嘴, 多喷嘴的焊炬可加速钎焊过程, 并可均匀加热。

燃气可选用乙炔或液化石油气, 加入氧气则使火焰温度提高。

钎焊火焰应调成还原性, 用内焰或外焰加热工件。开始加热时, 应先加热刀杆凹槽的底部和侧面, 并让火焰移动, 使刀杆的钎焊区域均匀加热至红色。加热刀杆时, 应注意防止刀杆加热温度过高, 并注意尽量避免火焰直接加热刀片。

在火焰加热时, 为了防止钎剂中由于水分的沸腾而引起的刀片的移动, 可用一金属杆 (也可用耐热的非金属杆) 轻微顶压刀片 (图 10-18)。随着温度的升高, 钎料在钎剂熔化后随之开始熔化。视钎料完全熔化后, 可借金属杆轻微移动刀片 (可有效地排除钎缝部分缺陷), 使钎料完全润湿刀杆和刀片, 最后, 将刀片移动到所需位置, 并用金属杆轻压固定刀片, 直至钎料完全冷却凝固之后, 焊炬火焰慢慢撤离钎焊区。

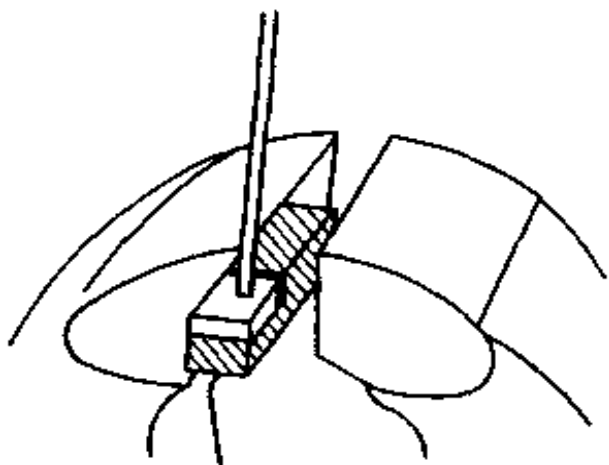


图 10-18 用金属杆顶压刀片进行钎焊

如果钎料在钎焊前不便预置, 也可在钎焊过程中手工馈送。此法是先將刀片放置于刀杆凹槽中进行火焰加热至接近钎焊温度, 并将蘸有糊状或粉状钎剂的钎料丝端馈送至刀杆凹槽与刀片间的缺口处, 待钎剂钎料熔化后完全填入间隙。之后也应用金属杆使刀片移动, 最后定位于所需位置。

10.2.3 钎焊后处理

硬质合金车刀钎焊后，为了防止硬质合金刀片的开裂，应在空气中缓慢冷却。最好埋于热砂、石棉粉中，或置于具有一百多度温度的炉中冷却。

车刀冷却后，钎剂残渣及其它表面污物可在热水中用钢丝刷刷去。然后，按要求磨削成所需车刀待用。

10.3 自行车车架的火焰钎焊

自行车车架前、中、后三个接头的钎焊，自 50 年代以来我国主要采用盐浴钎焊。此方法生产效率高，特别适用于大批量生产。因而，盐浴钎焊仍是我国目前自行车生产中的主要加工方法。但是，这种工艺存在着环境污染，劳动条件差，耗电量过大的缺点。此外，钎焊接头中残存的氟化物破坏了漆层的致密性，使之出现“起泡”、“脱落”等缺陷。这种有害作用在潮湿的空气条件下表现得尤为突出。

采用保护罩内液化石油气加空气的多嘴火焰钎焊，其特点是：第一，以液化石油气为燃料，空气助燃，经济方便；第二，钎焊过程在保护罩内进行，提高了热效率，降低了液化石油气的消耗；第三，采用六把焊炬分两道工序对车架的三个接头进行钎焊，生产效率高。

车架接头是在钎焊台上进行钎焊，一个进行后接头、前脸接头的钎焊；另一个进行五通接头的钎焊。钎焊台由车架移动送进机构、保护罩、焊炬及压力调节器组成。钎焊台的设计保证车架进入待焊位置时，接头相应进入保护罩内，经焊炬喷出的火焰加热一定时间后便完成了钎焊过程。

保护罩的形状和尺寸由接头形状确定。保护罩用钢板制成，内衬材料为石棉板。保护罩的作用：一是提高热效率，缩短钎焊时间。例如，在液化石油气压力相同时，五通接头在罩内钎焊时间为罩外的 35%（可缩短时间 65%）；二是降低罩内氧的分压，使接头表面的氧化程度减轻；三是改善劳动条件。

各保护罩的两侧分别装有一把焊炬。焊炬结构如图 10-19 所示。燃烧器上燃烧孔的数量及分布随车架接头形状、尺寸的不同而变化。

焊炬所用液化石油气的压力由调节器控制，以便稳定焊炬火焰的

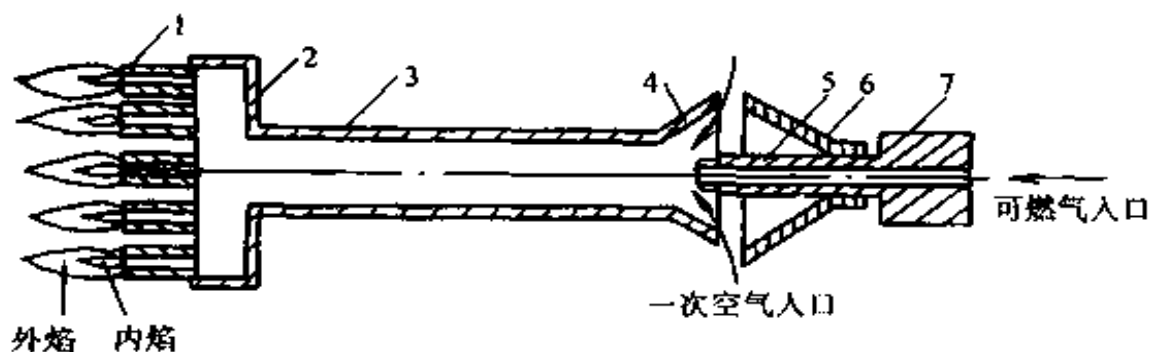


图 10-19 焊炬结构简图

- 1—燃烧孔 2—燃烧器 3—引射器的混合室 4—引射器的吸气室
5—喷嘴 6—风挡 7—进气管

热功率。对液化石油器采用强迫气化措施，若每把焊炬由一个 45kg 的气瓶供气时，强迫气化的温度为 40°C 即可。工作气压为 0.16MPa ，每把焊炬的耗气量为 0.99kg/h

例如，钎焊 45 型车架，共有三个接头八道套接钎缝，其结构如图 10-20 所示。各管件均为 16Mn 钢管，其规格有 $\phi 25\text{mm} \times 1\text{mm}$ 、 $\phi 18.5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 两种，各接头连接件均采用 JIS 标准的 SPCC 钢冲压

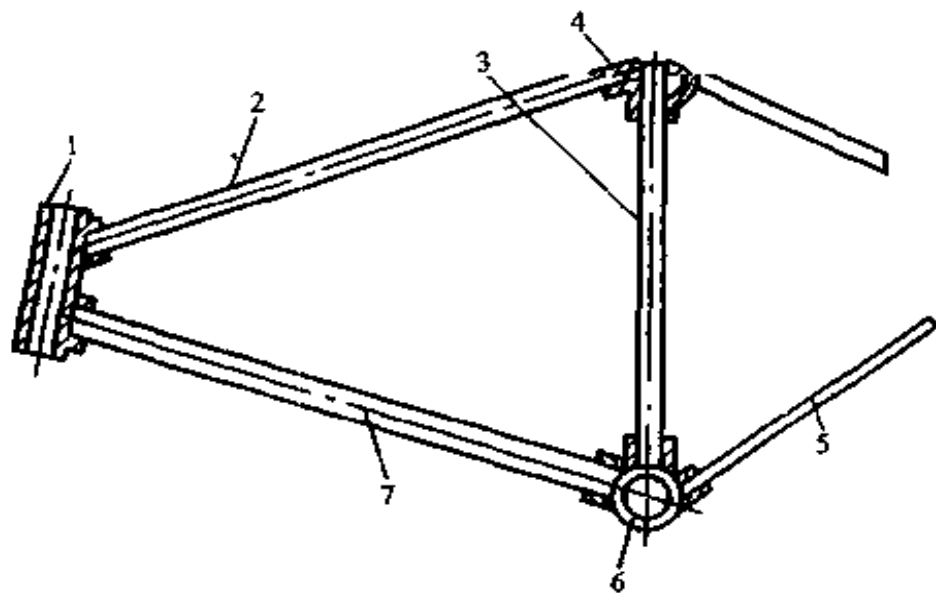


图 10-20 车架结构简图

- 1—前脸接头(SPCC) 2—上管(16Mn) 3—立管(16Mn) 4—后接头
(spcc) 5—平叉(两件,09Mn) 6—五通(SPCC) 7—下管(16Mn)

而成，与管子套筒部分的壁厚约为 1mm，钎料牌号为 B-Cu62Zn。钎料的设置以“窝铜”的形式为主，前脸接头的“窝铜”方法如图 10-21 所示。个别钎缝是以钎料环（块）安置在焊口上。车架组装后，各接头需在硼砂、硼酸的水溶液中煮沸 5~10s（水、硼砂与硼酸的质量比为 1:2.5:2.5）以备钎焊。

在保护罩尺寸和形状以及喷嘴孔径相应固定的条件下，火焰钎焊的主要工艺参数是液化石油气压力和钎焊时间。当液化石油气的压力为 0.12~0.22MPa 时，接头质量均能达到要求。前脸接头及后接头的钎焊参数：液化石油气压力为 0.14MPa，

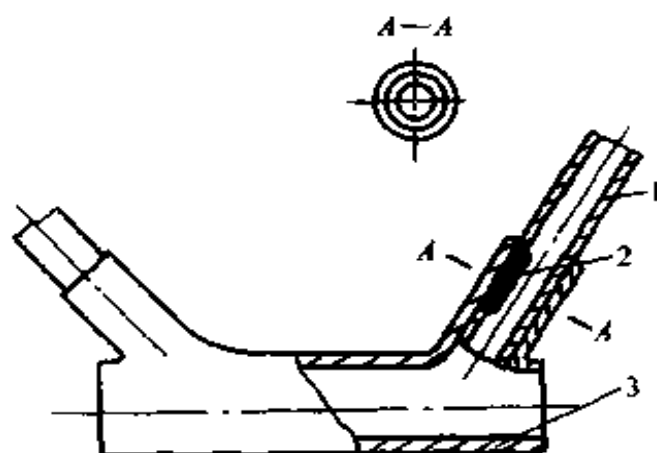


图 10-21 前脸接头窝铜示意图

1—管件 2—放入铜钎料 3—连接件

钎焊时间 80s；五通钎焊参数推荐值：液化石油气压力为 0.16MPa，钎焊时间为 80s。钎料被加热 65s 以后，温度达 907℃，钎料开始熔化；再继续加热 15s 后，其温度可达 985℃，这时钎料流满了套筒环缝的间隙，即完成了钎焊过程。

火焰钎焊的钎缝外形光洁，钎缝无裂纹及缩孔，合格率可达 100%；车架变形量比盐浴钎焊平均减少 60%。钎焊接头的钎缝金属的金相组织均为珠光体，没有淬硬及魏氏组织，连接件及管件的晶粒度比盐浴钎焊的分别高 1~2 级。火焰钎焊的 FG-45 型自行车车架的刚度及接头强度完全符合 ISO4210 自行车国际安全标准，达到 100%。另外，采用火焰钎焊，可以取消钎焊后除盐清洗、补焊及漆膜腐蚀试验等工序。

10.4 大型发电机转子线圈接头电阻钎焊

36MW 发电机的转子线圈铜带在安装下线时，经扁绕后，将其端部按 11°剖开，分别依次层层钎焊而形成完整线圈。图 10-22 为多层

叠合钎焊接头。

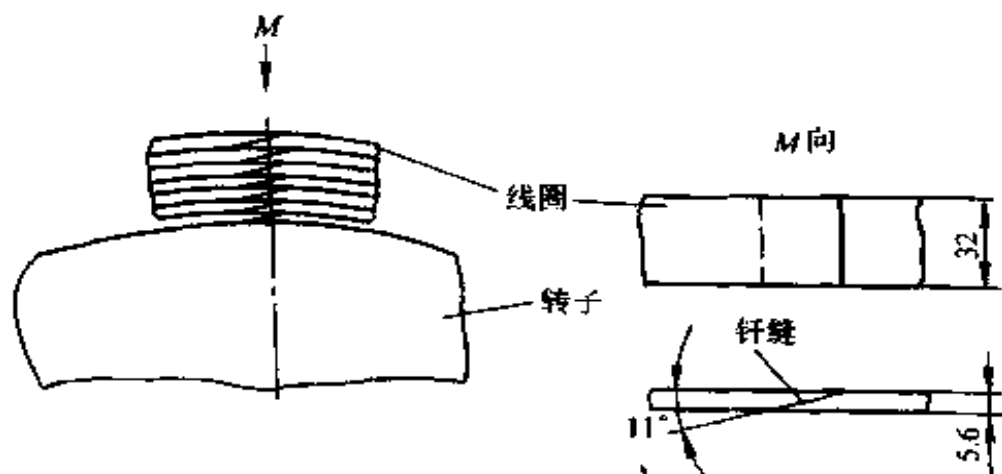


图 10-22 多层叠合钎焊结构

某厂鉴于这种线圈匝数多、截面尺寸大，叠合精度、搭接强度和导电性技术要求高等特点，专门设计和制造了炭精块电阻钎焊装置。用此装置成功地进行了转子线圈的电阻钎焊。

10.4.1 电阻钎焊装置

电阻钎焊装置类同普通的电阻点焊机，它包括电源电气系统、气路系统、水路系统、控制系统等组成。电源电气系统采用改变一次绕组匝数来获得不同二次电压的 25kVA 交流变压器，可依次调压为 4.2V、4.8V、5.6V 及 6.75V 的二次电压，相应获得 1240A、1400A、1600A、2000A 的钎焊电流。为了减小二次电缆的功率消耗，电缆线截面不能过小，长度尽量短些。本装置采用 TRJ 型直径为 13mm 的软纹线（截面积为 140mm^2 电缆）。经钎焊实践考验，电缆长度在 4m 以内，二次电压为 6.7V 时，45s 以内可完成接头钎焊。

电极采用高纯石墨，它具有高电阻率（ $10\sim 14\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ）、高耐热性（熔点 3700°C ），化学性稳定及具有一定的抗压强度。为使钎焊接头获得大面积热传导，电极截面尺寸要稍大于接头尺寸（各边大 3~5mm），厚度一般小于 25mm，过厚虽抗压能力提高，但热耗增加。电极与钎焊接头弧形接触面要吻合，以使接头受热均匀，热效率提高。

10.4.2 钎焊过程

为减少钎缝的夹渣等缺陷，本工艺采用不用钎剂的自钎剂钎料，即含磷的片状铜银磷钎料（B-Cu80AgP）。

钎焊过程中，电流、电压、温度、时间等各参数间的动态关系对保证钎焊质量是至关重要的。图10-23为钎焊过程的动态曲线。

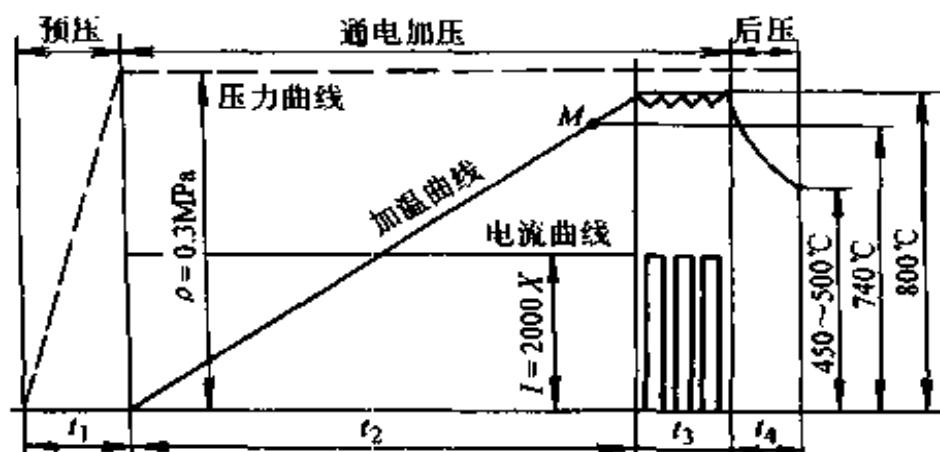


图 10-23 钎焊过程的动态曲线

t_1 —预压时间 t_2 —通电时间 t_3 —断续通电时间 t_4 —后压时间

预压阶段：此为钎焊准备阶段，定位好的接头，通过气缸活塞下移进行预压，使电极与接头接触，掌握好电极与接头的弧面密合度，以防止电极局部接触处电流密度过大烧损接头金属或接头受热不均使接头质量变坏。所以必要时需修磨电极弧面。

通电阶段：通电过程中，接头处温度逐渐升高，接头软化，在压力作用下（恒压）电极与接头的接触密合度提高，当温升到 M 点的钎料熔化温度时，要继续通电，使钎料完全熔化，当温度高于 M 点的 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ 时，采用断续通电，使液态钎料流布整个钎缝间隙。此阶段为钎焊阶段，时间仅为 $3 \sim 6\text{s}$ ，是保证钎缝质量的重要阶段。

后压阶段：此阶段已断电，但必须维持接头压力，以使液态钎料在凝固过程中的接头密合得牢固。一般接头温度下降到 450°C 以下即可卸压。

10.5 核工程用液位计电接点的真空钎焊

压力容器及其它设备的液位测量中，电接点液位计的使用不断增加，它可以较准确地测定容器内的液位。核工程用液位计的电接点要求钎料具有较高的强度、耐蚀性、优良的高温性能和抗辐射能力，要求钎缝致密、成形良好，且工件钎焊后不应有氧化物和其它杂质。运用真空钎焊法成功地钎焊出高质量的电接点产品。

10.5.1 电接点性能要求

核工程用电接点的结构见图 10-24。陶瓷管为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 99.9% 的陶瓷，两端封头为可伐合金，电缆外壳为耐热合金，电缆芯为纯镍，绝缘材料为高纯 Al_2O_3 。

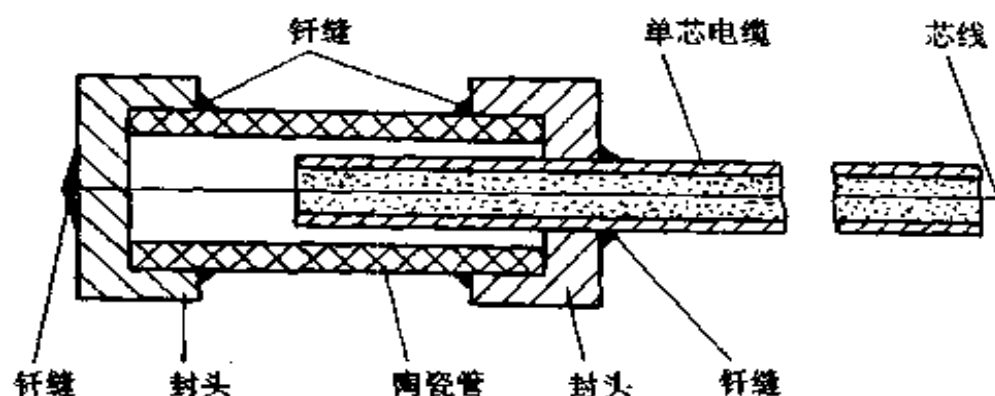


图 10-24 电接点的结构

电接点共有四个钎焊部位，考虑到其使用环境，要求钎焊温度应不超过 1050°C ，允许一次补焊；钎料应有较好的高温性能、耐蚀性和抗辐射能力；钎缝致密、成形良好，焊后电缆芯线与外壁的绝缘电阻应大于 $5.0 \times 10^8 \Omega$ ，电接点在 350°C 高温高压水中经 24h 试验后其绝缘电阻应在 $5.0 \times 10^8 \Omega$ 以上。

10.5.2 钎料的选择

由于这类电接点将用在核工业中，对于钎料选用必须加以特殊的限制，钎料中不应含有中子吸收截面大或者辐照后活化的元素，钎料应有优良的强度、耐蚀性、密封性。经试验筛选后认为，B-Au82.5Ni 钎料的钎焊接头综合性能良好，其钎缝强度、耐蚀性、密封性均满足

要求。

10.5.3 钎焊工艺

真空钎焊工艺参数主要包括钎料用量、钎焊温度、保温时间、真空度和加热、冷却速度等。钎焊工艺对钎缝成形和密封性影响较大,在钎焊操作时应严格掌握。

产品钎焊前先对陶瓷管、可伐合金、电缆表面进行清理,除掉其表面油污及氧化皮,并对各部件进行一次预先除气处理,以保证钎焊的质量。

每次装炉量视电缆长度而定,一般在 5~10m 范围内。

B-Au82.5Ni 钎料的熔点为 950℃,钎焊温度定为 980~990℃。钎料的用量以保证钎缝完全填满为宜。

电接点上的引出电缆在 1~3m 内,考虑到电缆在加热过程中放气对真空度的影响,加热过程中应保证炉内的真空度控制在 3.0×10^{-2} Pa 以内。

电接点上各钎焊部位均属异种材料的钎焊,钎焊各部位之间的热膨胀系数相差较大。钎焊后较快冷却会给钎缝造成较大的残余应力,这样可能会使钎缝开裂。钎焊过程中控制适当的加热和冷却速度,对降低钎缝应力,保证钎缝的密封性是有利的。为此,钎焊过程中加热和冷却速度控制在 200~300℃/h 内,使各部件能较均匀地膨胀和收缩。

在钎焊加热过程中,当炉温达到 600℃ 左右时保温 20~30min,900℃ 时保温 15min。到达钎焊温度时再保温 5min。然后,较慢冷却到 500℃,再随炉冷却。

经以上规范钎焊后的产品均达到技术要求。

10.6 汽车分电器主轴部件高频钎焊

汽车分电器主轴部件结构见图 10-25。主轴材质为 40Cr,底板为 20 钢。

由图可见,产品技术要求不仅对零件装配精度,而且对产品焊后变形均提出了严格的要求。因此,必须从装备和钎焊工艺两个方面采

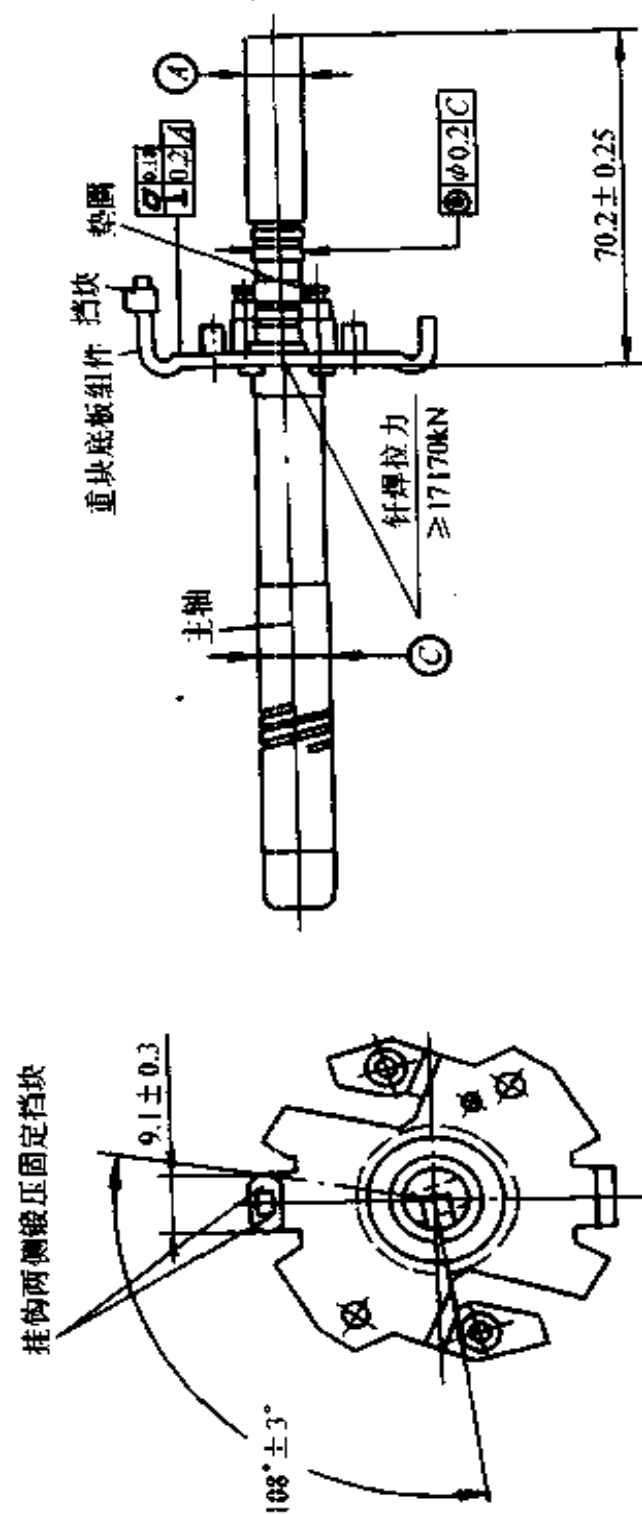


图 10-25 分电器主销轴板零件

取措施,才能保证产品几何尺寸精度。装配精度首先依赖于装夹具的合理设计以及加工精度。夹具装配孔与主轴选用动配合公差,孔深与主轴装配端长度基本相同,以保证工件相对稳定。夹具端面与装配孔同心度、垂直度通过控制加工工艺和加工精度保证。分电器主轴部件成轴状对称,材质为磁性材料,宜采用感应加热钎焊。因其加热速度快,工件高温停留时间短,可减小变形。为了防止工件表面氧化,钎焊时在氮气保护下加热。根据年产 25 万件的产品指标,决定选用双工位高频感应钎焊工艺,且每个工位又采用双感应圈并联结构形式。

10.6.1 高频钎焊装置

高频感应加热设备选用 GP-30CW7 型电源,配置两只高频焊接变压器,每只变压器上连接两只感应加热线圈。两只变压器的输入端通过自制的气动接续器在无负载条件下轮流接通高频电源的输出回路。按照焊接变压器负载回路,高频钎焊机分成左右两个工位,任一瞬时左右两个工位只能有一个接通高频电源输出回路,或两个都不通。四只装配夹具通过聚四氟乙烯绝缘座固定在工作台上。感应圈掩埋在绝缘座内固定在夹具上端。工作台上方固定一根水平横梁,横梁上安装四个气缸,用于拖动相应工位的保护气室作升降运动,保护气室内安装三个弹簧压紧机构,当气室下行到位时,弹簧压紧机构分别作用于主轴和底板,将工件紧紧压在夹具上,防止零件松动、位移。保护气室上下运动极限位置安装行程开关,下行程开关压合,接通保护气体;上行程开关压合,钎焊过程停止。

左右工位选择、保护室升降、保护气通断、工件喷水冷却受电磁阀控制。钎焊过程的程序控制以及电气参数的时间设定由一台 OMRON 程序控制器完成。

感应圈采用 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 纯铜管单圈绕制而成,内径 $\phi 16\text{mm}$,外径 $\phi 26\text{mm}$ 。由于变压器对负载回路阻抗十分敏感,因此四个感应圈及其连接导线的几何参数应尽量一致。

为了防止夹具长期受热发生变形而失去精度,夹具采用水冷。钎剂残渣对夹具有一定腐蚀作用,夹具应采用耐腐蚀材料。

10.6.2 钎焊工艺

分电器主轴和底板连接为套接接头, 主轴小端直径 $d = 10\text{mm}$, 搭接段有效长度 $L = 4.5\text{mm}$, 钎焊接头拉力要求大于 17kN , 则接头抗剪强度为 108N/mm^2 。

很显然, 选用银基钎料完全能达到设计技术要求。为了降低钎焊温度, 减小变形, 提高生产率, 改善钎缝成形, 选用 B-Ag40CdZnCuNi 钎料。接头装配间隙 $0.1 \sim 0.15\text{mm}$ 时钎料直径取 $\phi 0.8\text{mm}$ 。为了装配方便, 将钎料丝绕成环状 (环直径为 12mm)。装配时, 钎料环套在主轴上, 置于分电器上面, 而感应圈位于分电器底板的下方。钎剂采用 QJ102, 用水调制成乳状液涂覆到接缝上, 或使用酒精作溶剂, 将钎剂溶解成液体状钎剂喷射到接头处。酒精液态钎剂易产生沉淀, 必须即用即配。为了防止工件表面氧化, 钎焊时, 用氮气作保护。

高频钎焊时, 应选用如下参数: 气体流量 $20 \sim 30\text{L/min}$, 阳极电流 $I_a = 1.8 \sim 1.9\text{A}$, 栅流 $I_g = 0.4 \sim 0.45\text{A}$, 阳极电压 $U_a = 6.3 \sim 6.5\text{kV}$, 槽路电压 $U_c = 5.1 \sim 5.2\text{kV}$, 加热时间为 $60 \sim 65\text{s}$, 保温时间为 $5 \sim 10\text{s}$ 。为了防止工件退火软化, 在停止加热且保温一段时间后喷水冷却, 喷水时间为 1s 。

10.7 大型铝板式换热器的浸渍钎焊

目前, 传热效率高、结构轻巧紧凑的铝板式逐渐取代铜管式换热器, 广泛地应用于石油化工、冶金、交通运输、制冷等工业领域。大型铝板式换热器是通过钎焊方法制造的。

图 10-26 是典型的铝板式换热器的钎焊结构。它由隔板、封条及波纹板组成, 其全部材料均采用 LF21 铝合金。

本实例为钎焊外形尺寸为 $710\text{mm} \times 750\text{mm} \times 2100\text{mm}$ (66 层) 可逆式换热器。

10.7.1 钎料和盐浴成分的确定

钎料的成分为 B-Al92.5Si (熔点为 $577 \sim 612^\circ\text{C}$), 钎料可做成箔片状铺放在隔板上, 但更多采用的是用轧制方法复合于隔板上做成双金属板, 这样可简化装配工艺。盐浴槽内钎剂的成分 (质量分数) 为

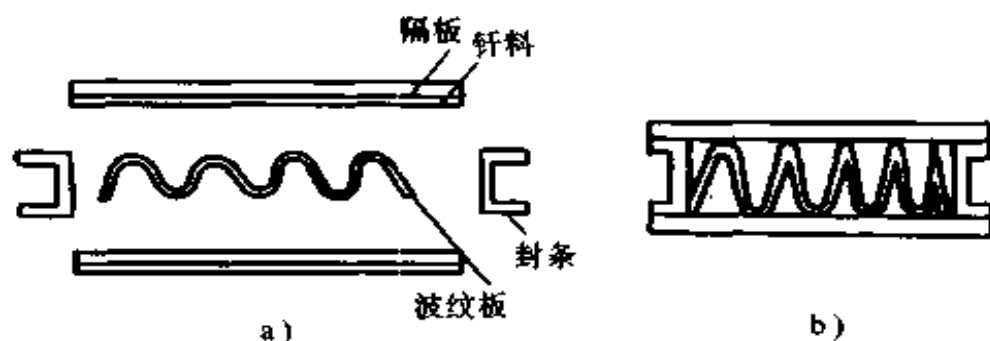


图 10-26 典型的铝板翅式换热器钎焊结构

a) 钎焊前 b) 钎焊后

KCl44%、NaCl12%、LiCl34%、KF·AlF₃10%，熔点为 480~520℃。

10.7.2 钎焊工艺

钎焊前，零件必须清理以去除油污和氧化膜。为此，零件先在 $w(\text{Na}_2\text{CO}_3)$ 3%~5% 和 201 洗涤剂 2%~6% 的混合液中去油，接着在 $w(\text{NaOH})$ 5%~10% 溶液中去氧化膜和 $w(\text{HNO}_3)$ 20%~40% 溶液中和处理，然后用流动清水洗净并烘干。清洗好的零件在夹具中装配成所要求的结构。

装配好的工件先在预热炉（功率为 150kW）中预热，预热目的是提高工件进入盐浴炉的温度，防止钎剂凝固阻塞工件通道和缩短钎焊时间。预热温度为 560℃，时间为 3h。

工件预热完毕，立即浸入温度保持在 615℃ 的盐浴槽中进行钎焊。这时，盐浴既是导热介质，把工件加热到钎焊温度，又是钎焊过程的钎剂。盐浴槽的尺寸为 3200mm×1300mm×1400mm，功率 250kW。钎焊时，采用三次浸渍工艺：第一次工件以 30° 左右倾斜浸入，浸入速度适当放慢，以利于空气泡排出，待工件全部浸入，再把工件放平，保持 4min 后。工件从另一端以 30° 吊起离开盐浴面，待钎剂大部分排出后再进行第二次、第三次浸入。第二次保持 2min，第三次保持 4min，工件在盐浴中的加热时间共 10min。最后一次倒盐，应尽量将工件内的钎剂排尽。

钎焊完毕，工件在空气中冷却 90min，待工件中心温度降到 200~300℃ 时，即可在沸水中速冷至室温。

钎焊后的产品要彻底清洗，去除任何钎剂痕迹，直到其倒出各通道中内存水的氯离子含量能通过“盐迹试验”（在 100mL 水中硝酸银消耗量不高于自来水的 1.5mL）。接着用加热的空气干燥，最后进行渗漏试验。这种换热器的设计压力为 $58.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 。钎后清洗过程如表 10-1 所示。

表 10-1 钎焊后的清洗过程

工序	清 洗 液（质量分数）	时间/min	温度/℃
1	浸入热水槽速冷	2~5	>80
2	循环水冲洗	4~8h	>60
3	草酸 2%~4%，氟化钠 1%~2%，601 洗涤剂（烷基磺酸钠）2%~4%	5~20	室温
4	循环水冲洗	10~30	>60
5	硝酸 10%~20%	5~10	室温
6	循环水冲洗	5~30	>60
7	铬酸 1.1%，硼酸 1.9%，氟硅酸钠 1.9%	1~5	室温
8	循环水冲洗	10~30	>60

10.8 铝合金翅式机箱气体保护钎焊

铝合金翅式机箱是机载电子设备的关键部件之一，机箱的优劣直接关系到电子设备的使用性能。因此要求机箱具有尽可能轻的重量和优良的散热效果。机箱由防锈铝合金板及散热翅片等十余件零件组成，其尺寸为 $400\text{mm} \times 200\text{mm} \times 220\text{mm}$ ，如图 10-27 所示。

由于钎缝多，要求高，因而钎焊有一定难度。本产品采取氮气保护，并涂以少量钎剂的炉中加热方法进行钎焊。

10.8.1 钎焊加热炉

钎焊加热炉采用一般的热处理电阻炉，通过改装，在炉内增加一密封的不锈钢罐体，如图 10-28 所示。

10.8.2 钎焊工艺

钎料采用 B-Al88.3Si 或 B-Al88.3SiSrLa；采用 KF-AlF₃ 共晶无腐蚀钎剂，并用蒸馏水调成糊状；选用氮气作保护气氛。

钎焊前的清理：所有的钎焊零件及钎料经化学去除油污及去除氧

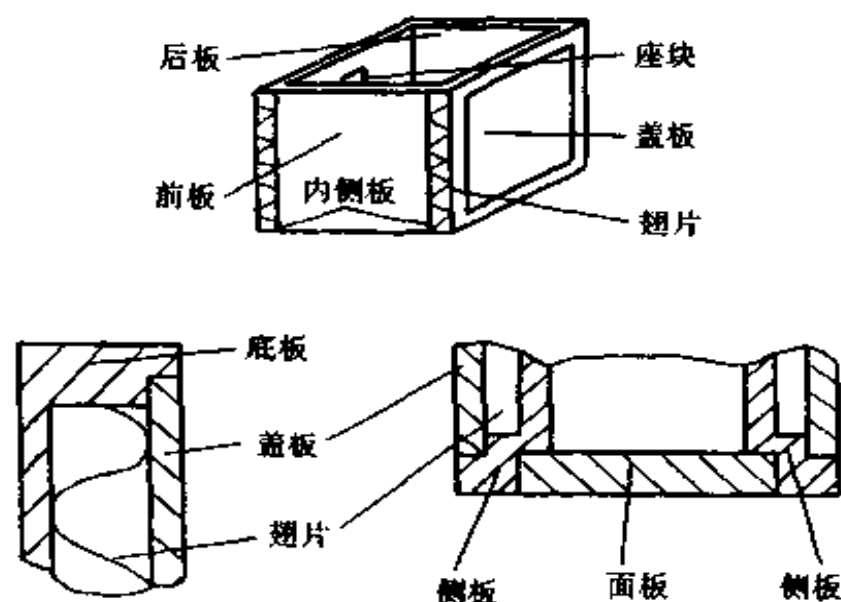


图 10-27 机箱结构及零部件装配示意图

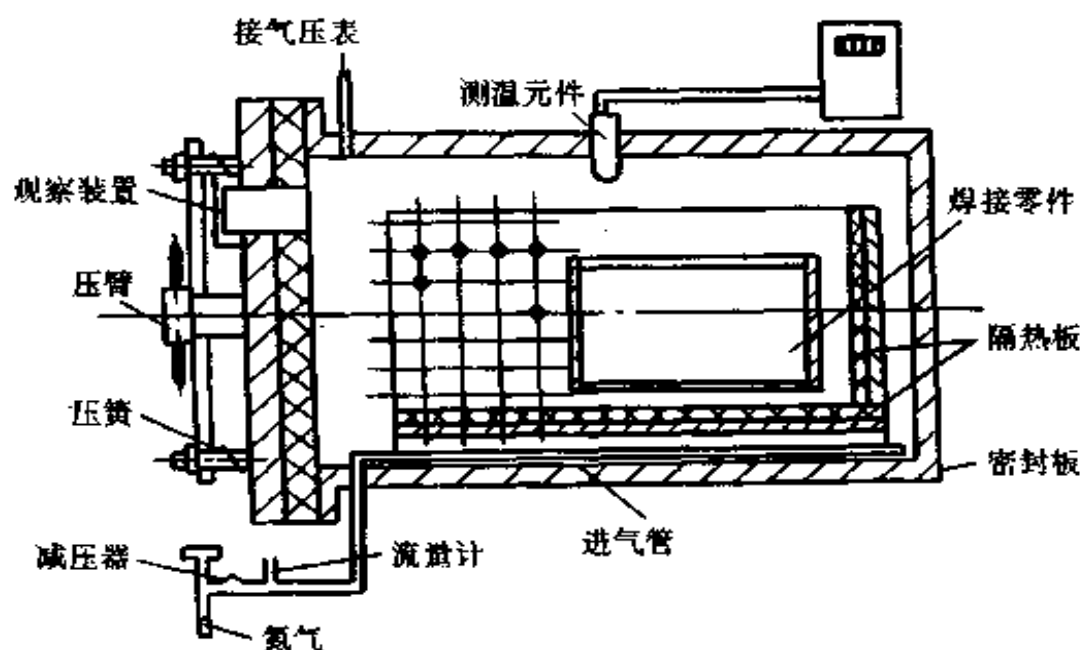


图 10-28 改进后的炉体结构示意图

化膜处理，并加以烘干。

装配工艺：戴上干净细纱手套，按图样要求先装配机箱侧面各零件，在侧板钎焊面均匀涂上钎剂→均匀铺上焊片（焊片与翅片垂直，焊片之间间距 30~40mm）→在焊片上均匀涂上钎剂→放上翅片→将

一面涂有钎剂的焊片放置于翅片上→在盖板与翅片钎焊面均匀涂上钎剂→将侧板、翅片、盖板装配在一起→用六根 U 形压条和 C 形夹将各件均匀压紧（压力保持一致）→将两侧面零件与前后面板用长 U 形压条和双头螺杆装配达到图样尺寸→氩弧定位焊 16 点（如图 10-29）→撤除长 U 形压条及双头螺杆→将各钎缝处涂上钎剂在各角缝处放上 $\phi 2\text{mm} \times (30 \sim 40)\text{mm}$ 长的钎料（用于增加钎缝强度）并在钎料上均匀涂上钎剂→放入 250°C 烘箱中烘干，除去水分。

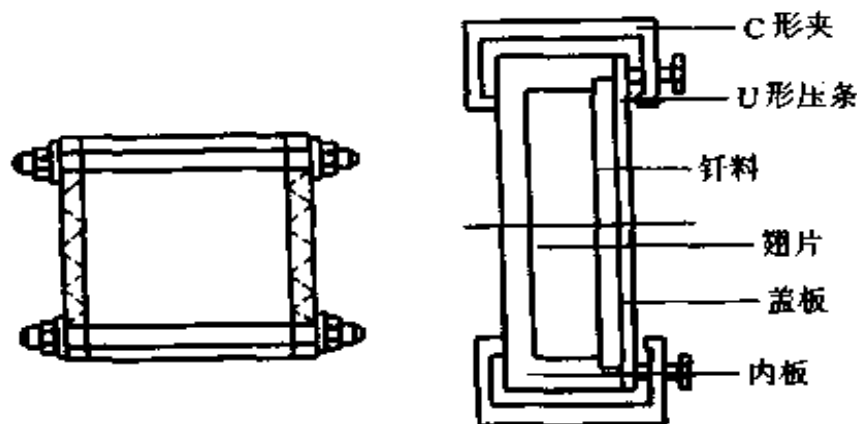


图 10-29 机箱钎前装配示意图

钎焊工艺：炉温控制仪预置到 700°C ，将被钎焊件放入保护罩内垫架上送入炉中靠里部位，关闭炉门，通以保护气 3min，流量为 $4 \sim 5\text{L/min}$ ，以减少空气成分。之后，停止供气，并将炉温调到 640°C 。3~4min 后，炉内气压调到 1kPa 。当钎剂开始熔化时将保护气调大到 $16 \sim 18\text{L/min}$ 。当钎料熔化并均匀填满钎缝后，再停留 20~30s 后打开炉门，等钎料凝固 4~5min 后关闭保护气，取出机箱。待机箱冷却到 200°C 以下时拆除两侧面夹具。

钎后处理：将冷却到室温的机箱放入硝酸、草酸溶液浸泡 3h。之后用超声波清洗 1.5~2h（温度为 $80 \sim 100^\circ\text{C}$ ）。然后用流水冲洗干净，并用压缩空气吹干（注意吹干两边翅片间水分）。

10.9 毫米波器件接触反应钎焊

由于毫米波较短的波长获得了较窄的波束宽度，导致在目标跟踪和鉴别方面有较高的分辨率和精度，在区域测绘和鉴别方面有较高的

角分辨率和低角跟踪能力。并且可以很好地分辨几个靠得很近的目标,能够用小尺寸的天线得到高的增益,有助于探测和定位小目标。毫米波有宽的带宽,因而具备高信息率能力,便于用窄脉冲或宽带调频雷达系统确定目标特征,宽带宽能提高距离分辨率,有利于精确跟踪。另外,宽带宽增加了抗干扰能力和动目标指示能力。毫米波在大气、尘埃、烟雾和战场污染条件下的衰减较低,而且选择合适的频率可使战术系统保密。由于有上述特点,毫米波器件已广泛应用于雷达通信领域。

但是,尽管有这么多的优势,毫米波技术的应用仍受到一些限制。这是因为,毫米波波长较短,器件尺寸较小,在制造时要求更高的精度,如三毫米波导内腔尺寸精度为 $(1.27 \pm 0.02)\text{mm} \times (2.54 \pm 0.02)\text{mm}$ 。钎焊后要求工件的尺寸精度 $\pm 0.02\text{mm}$;表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$;钎缝圆角半径 $r \leq 0.2\text{mm}$,且表面光滑、连续;钎焊接头抗剪强度 $\tau > 50\text{MPa}$ 。这种精密连接可用接触反应钎焊方法来解决。

10.9.1 毫米波器件钎前电刷镀

毫米波器件的材料多以 H62 及 HSn90, 它们均以铜为基, 因此, 可用银作为中间层, 以达到接触反应钎焊的目的。为此, 工件待焊表面在钎焊前须镀银。

镀银的方法很多, 但为了达到局部的镀银目的, 可借电刷镀工艺解决。本实例运用 DSD-75-S 型刷镀电源。

10.9.1.1 电刷镀溶液

电刷镀所需溶液分别见表 10-2、10-3、10-4。电刷镀银液可外购。

表 10-2 酸洗液配方

名 称	数 量 (体积分数)
硝 酸	80%
氯化钠	少许(室温)
水	余量

表 10-3 光化液配方

名 称	数 量
铬酐 (Cr_2O_3)	120g/L
硫酸 (H_2SO_4)	300mL/L (室温)
水	余量

表 10-4 电净液配方

成 分	NaOH	Na_2CO_3	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	NaCl	H_2O
含量 g/L	25.0	21.7	50.0	2.4	余 量

注: $\text{pH} > 11$ $U = 6 \sim 16\text{V}$ $v = 4 \sim 12\text{m/min}$

10.9.1.2 电刷镀工艺

(1) 镀前清洗

- 1) 镀表面先用砂纸打磨, 表面粗糙度 (R_a) 低于 $0.8\mu\text{m}$ 。
- 2) 汽油除油。擦布蘸上汽油, 将工件表面油污洗干净。油污多的工件在汽油中浸泡 $1\sim 2\text{h}$, 然后取出擦洗。
- 3) 冷水冲洗。
- 4) 酸洗。在酸洗液中酸洗 $10\sim 30\text{s}$ 。对精度高的零件注意不要减薄超差, 厚件可适当延长酸洗时间。
- 5) 冷水冲洗。
- 6) 光化处理。在光化液中光化 $10\sim 20\text{s}$ 。
- 7) 冷水冲洗。
- 8) 烘干。烘箱烘干或电风吹干。

清洗后的器件用干净纱布包好, 尽快进行刷镀。

(2) 镀前准备 用胶带保护工件不进行刷镀的表面, 内腔用橡胶或软木塞堵上, 防止镀液漫流污染。准备石墨和不锈钢镀笔两支, 用棉花包裹笔尖处 (厚度要适当), 分别用作电净笔和刷镀笔。

(3) 刷镀

- 1) 通电并检查电源, 电源正常方可操作。
- 2) 电净。工件接负极, 电净笔接正极, 即电源正接, 电压 $12\sim 15\text{V}$, 时间 $20\sim 30\text{s}$ 。蘸上电净液的电净笔要在工件表面匀速移动, 并顾及工件各个部位。
- 3) 冷水冲洗。
- 4) 刷镀。电源仍正接 (工件接负), 电压 $6\sim 10\text{V}$ 。镀层以 $5\sim 6\text{min}/\mu\text{m}$ 的时间估算, 控制镀层厚度至 $4\sim 6\mu\text{m}$ 。刷镀时, 蘸上饱和刷镀液的刷镀笔要在工件表面匀速移动, 并顾及工件各个欲镀部位, 使镀层厚度各处均匀。
- 5) 冷水冲洗。
- 6) 烘干。烘箱烘干或电风吹干。

注意: 如果一批工件要全部电净完后再刷镀, 应在每个工件电净完后进行无电擦拭处理一遍。这样做的好处是: ① 表面预置金属离

子；② 隔离空气防氧化；③ 使表面 pH 值一致，增强润湿性。

另外，可以同时从电源引出若干镀笔接线，供几个人同时操作。

(4) 镀后处理 去掉保护胶带，若有镀液污染处，则用砂纸打磨干净，后用蒸馏水冲洗，烘干，并用纱布包好待用。

10.9.2 接触反应钎焊工艺

钎焊使用的加热炉是 L7512 II 型氢气炉经改造的可充氩气的气体保护炉，功率为 20kW，最高加热温度为 1150℃。真空泵的极限真空度为 6×10^{-2} Pa。空气压缩机额定压力为 0.6MPa。

接触反应钎焊操作工序如下：

(1) 装配 工件先用酒精擦拭，然后按图样要求定位装配，工件表面待夹处垫以陶瓷片，用耐热弹簧夹夹紧，平板形工件可用重块压紧。夹(压)紧时，应注意使待焊面处处接触，然后小心放入钎焊炉内。放置时注意平稳(可用油石支撑)，以免钎焊过程中产生的液相向一个方向流淌，造成局部圆角过大。然后用不锈钢工艺罩罩住工件。

(2) 预抽真空并充氩气 开动空气压缩机，使气压升到 400kPa 时断开压缩机电源。打开气阀门，使炉子上罩放下到与下部分接触，推动锁紧杆锁紧。接通冷却水。开动机械泵，预抽真空 3~4min (真空度 10Pa 以下)，再次推动锁紧杆，加强密封。然后关掉机械泵，打开氩气阀，以最大的气流量尽快使炉膛充满氩气。充气时注意检查机械泵出口，如果往炉膛内吸气，就该采取措施把出气口密封起来。待炉膛内充满氩气后，打开出气口，使氩气流量保持在 2~4L/min。

(3) 升温 接通钎焊炉电源，确认调压器电源指零后，依次打开主电源。然后逐渐加大调压器电压(注意电压不得超过 280V)，使加热电流上升到 24~26A。炉温上升到钎焊温度时，相应降低电压，使炉温保持在钎焊温度。

(4) 保温 温度升到钎焊温度，即 800~810℃，保温 20min 左右。注意温度波动不超过 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。

(5) 降温 保温完毕后，把调压器电压降到零。然后依次关掉电炉电源，拉下电源总开关。降温至 100℃ 以下，关掉氩气和冷却水。

(6) 出炉 打开炉门，用镊子取出工件，卸下陶瓷片和弹簧夹。

10.10 计算机芯片载体电路板

10.10.1 电路板的组成

电路板由基板和导电层组成，基板是高纯度 Al_2O_3 陶瓷，导电层为 Cu 箔。采用扩散钎焊方法实现基板与导电层的连接。

10.10.2 钎焊前处理

1) 将 Al_2O_3 陶瓷首先浸入沸腾的丙酮中进行超声清洗，然后再浸入室温的异丙酮中继续进行超声清洗，而后在去离子水中用超声振动进行冲洗，最后在热氮中干燥。

2) 在真空室内，将 Al_2O_3 基板和一个护罩与装有金属 Cu 的电阻加热盘紧邻放置。抽真空后，将加热盘加热到足以使 Cu 气化的温度，随后铜蒸气通过护罩的开口冷凝到基板上，这样就形成了厚度约为 50nm 的铜层。

3) 将已沉积铜的基板放置在管式炉中，并在氧分压约为 100Pa 气压的氮气流中加热到约 900℃ 的温度，保温 5~10min，使基板上沉积的铜充分氧化生成氧化亚铜层，而后在无氧的氮气中冷却。

10.10.3 钎焊过程

将厚度约为 0.5mm 的电解 Cu 箔直接放到基板的氧化亚铜层上（见图 10-30），并用一个重板压住，以利于界面的接触。在商用高纯

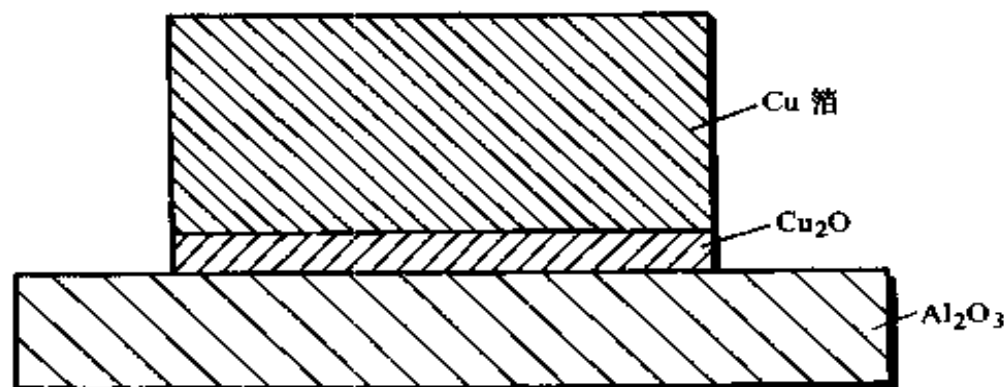


图 10-30 电路板钎焊前的组装示意图

氮气中，将组件在 1060℃ 加热约 30min，使 Cu 箔软化变形，并与仍然处于固态的氧化亚铜层达到紧密接触。而后，温度升到 1070℃，保

温约 30min。在这个高温下，在 Cu 箔和氧化亚铜层之间的界面处形成了液相，并继续生长，使氧化亚铜层消耗，直至液相达到并润湿基板表面，再经等温扩散实现凝固。冷却后，Cu 箔通过一个接近 Cu_2O 共晶成分的过渡层紧密地连接到基板上，而且保证了原始 Cu 箔的厚度基本不变。

10.11 轿车发动机用陶瓷面钢制挺杆

10.11.1 挺杆的组成

挺杆由钢制基体和陶瓷面组成（见图 10-31），基体是成分（质量分数）为 $\text{FeC0.3\%-(Cr+Mo) 3\%}$ 的 AFNOR30CD12 空淬氮化钢，陶瓷面是直径 23mm、厚 4mm 的 Syalon101 陶瓷镶块。

10.11.2 钎焊材料

钎料厚为 25 μm 的 Incusil-10BAB 箔状钎料。为降低残余应力，采用厚 0.25mm、纯度 99.99% 的铁箔为中间层。

10.11.3 钎焊前处理

将陶瓷镶块、钢杆基体、钎料箔及中间层分别在丙酮、异丙醇中进行超声清洗，而后热风吹干，并按设计要求入炉。

在对陶瓷镶块清理前，将其在空气中加热到 1200℃，保温 2h，以使其表面氧化形成 SiO_2 ，提高界面反应能力。

10.11.4 钎焊过程

在 Ar 气中，快速加热组件到 750℃ 左右，保温时间 15min；再缓慢加热到 850℃，保温 10min；而后缓冷至 750℃，再通入高压 Ar 气（300kPa）快冷，直至室温

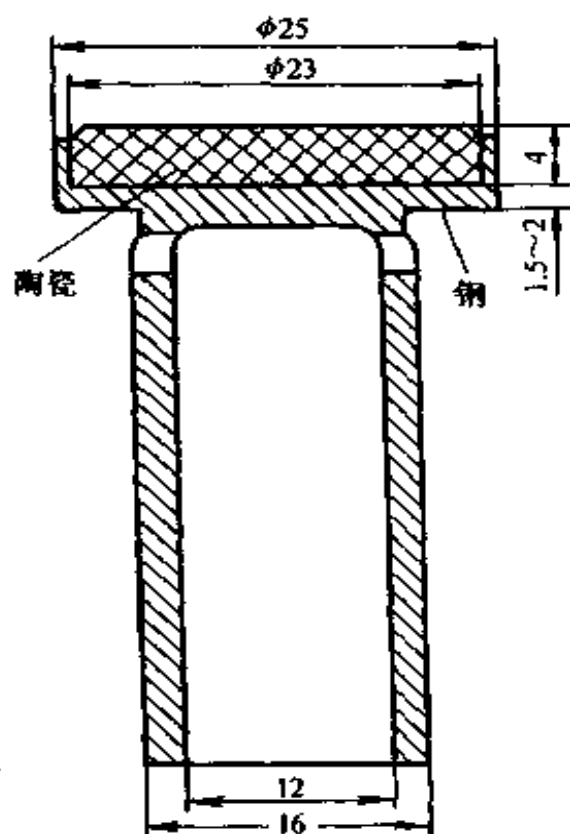


图 10-31 挺杆的组成

出炉为止。

10.12 不锈钢锅的复合底

10.12.1 复合底的组成

不锈钢锅所用材料为 0Cr18Ni9, 厚度为 0.6~1.2mm。覆铝材质为 L3 纯铝, 厚度为 3~6mm。采用高频感应钎焊方法实现钢锅底与覆铝板的连接。

10.12.2 钎料和钎剂

钎料为 Al-Si 合金粉, 粒度为 (0.18~0.030) mm (80~400 目)。钎剂为氯化物的粉状混合物, 粉末在 0.071mm (200 目) 以上, 混合越匀、研磨越细, 使用效果越好。

10.12.3 钎焊前处理

将待焊的不锈钢锅底和铝板表面用乙醇擦洗干净。用体积分数为 10% 的乙醇将钎剂调成糊状, 并用清洁的毛刷将糊状钎剂涂敷在锅底和铝板上, 然后将钎料粉末均匀地撒在糊状钎剂上 (使用钎剂和钎料的量按每平方分米的锅底面积铺撒 0.8~1.0g 钎剂和 1.2~1.5g 钎料计算), 最后将铝板盖在不锈钢锅底上 (见图 10-32)。

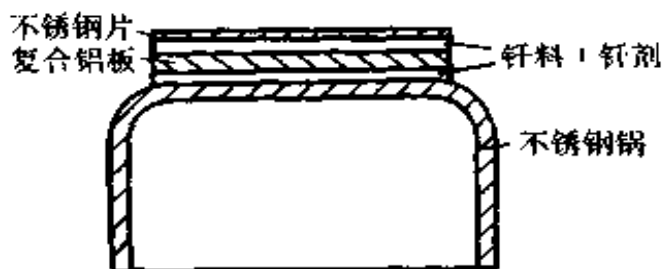


图 10-32 不锈钢锅复合底钎焊前的
组装示意图

10.12.4 钎焊过程

将待焊的组件置于高频感应钎焊装置的石棉胎上, 并使高频感应压头压在锅底上。此后, 同时对锅底进行加热和加压, 所用压力为 50~60MPa。在 15~30s 的保温后, 完成钎焊过程。

10.13 单层钎焊管的制造

单层钎焊管的制造工艺流程为: 钢带→镀铜→纵剪→开卷→润滑→边部处理→管成形→剪断→涂漆→钎焊→矫直→探伤→盘卷→包

装。其中，钎焊是重要的环节之一。

10.13.1 钎焊管的组成

单层钎焊管所用材料为碳的质量分数不超过 0.15% 的低碳钢，管的内外壁上覆有按钎焊要求和防腐需要的铜层，采用气体保护炉中钎焊方法完成管的制造。

10.13.2 钎焊材料

两个表面已经镀铜的钢带在特定的成形机上经成形工艺制成边缘紧密搭接的成形管，其内外壁上的铜层就是钎焊所需的钎料。

钎焊所需的保护气体是液化石油气不完全燃烧后的产物，属还原性气氛，经干燥处理后的露点降至 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 。

为保证钎焊管的表面质量和钎焊质量，成形管在进入钎焊炉之前，在表面要涂覆一种黑漆（钎焊漆）。其作用是，保证各部分铜层均匀熔化，并有效防止熔化的铜层在管运动中流失和被刮伤。

10.13.3 钎焊工艺

按规定尺寸将成形管剪断后，送入钎焊炉。钎焊炉用硅碳棒做电热元件，炉内并排分布耐热合金钢导管，钎焊就是在管内还原性气氛下进行的。钎焊炉分 5 个工作温度区，每个温区的加热温度各不相同，以保证钢管在加热到生成铁铜合金温度时铜才均匀熔化。钢管通过第五区后进入冷却区，这时钢管表面铜层开始凝固。钢管在冷却区出口处表面温度要降到 100°C 左右出炉，以避免铜层接触空气而发生氧化变色（铜的氧化温度约 350°C ）。

10.13.4 钎焊后处理

用钢丝刷去掉钎焊后钢管表面上残留的粉状物，再经台架将管子送入矫直机进行校直。

10.14 柴油机用电热塞

10.14.1 电热塞的组成

电热塞主要由发热体和外套组成（详见图 10-33），发热体为 Si_3N_4 陶瓷，外套为 Q235 钢。以 Ag-30Cu-1.5Ti 为钎料，采用真空钎焊方法实现二者的连接。

10.14.2 钎焊前准备

1) 用砂纸打磨使钎料和 Si_3N_4 上两裸露的金属电极光亮, 然后用丙酮或四氯化碳清洗。对于 Q235 钢外套件则用常规的金属除锈去油工艺清洗。

2) 将厚度为 $0.05 \sim 0.15\text{mm}$ 的钎料片材, 插在 Si_3N_4 发热体与钢外套之间, 然后在钢外套上方绕上直径为 1.5mm 的钎料丝材。钢帽中放入钎料片材, 然后扣到 Si_3N_4 发热体上, 并按图装配在底托上。

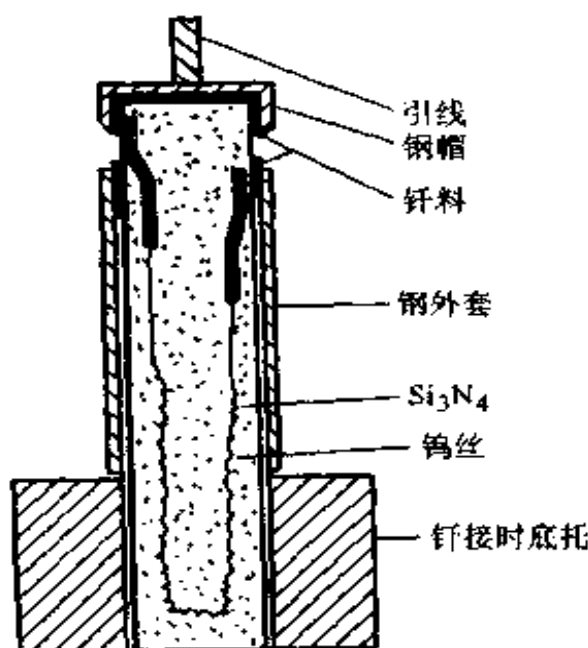


图 10-33 Si_3N_4 发热体与钢外套

连接装配示意图

将装配好的组件连同底托一起放入炉中进行钎焊。采用的钎焊参数为: 真空度 6.7mPa , 钎焊温度比钎料熔点高 $30 \sim 100^\circ\text{C}$, 保温时间 $5 \sim 10\text{min}$, 升温速度以保证真空度为限, 降温速度小于 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。冷却后取出, 并进行整体装配和检测。

10.15 接触器的银钨触头

10.15.1 触头的组成

图 10-34 所示为强电流接触器的银钨触头, 由触头体和触点组成。触点材料为 Ag65-W35 合金, 触头体为 H62 黄铜。

10.15.2 钎焊要求

要求钎缝致密, 电阻小, 触电瞬间产生的

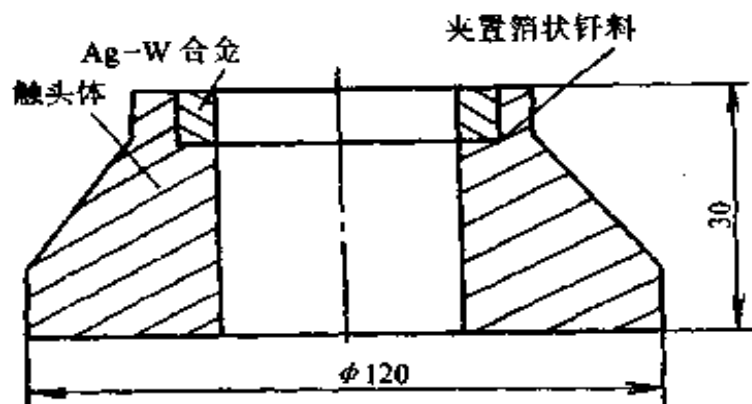


图 10-34 接触器的银钨触头

热量不至于将钎缝熔化。

10.15.3 钎焊工艺

钎焊前应预先在黄铜上镀一厚度为 $10\mu\text{m}$ 的镍层, 选用箔状 B-Ag65CuMnNi 钎料并夹在银钨合金与触头体之间。采用的钎焊参数为: 真空度 0.5Pa , 钎焊温度 $(780 \pm 5)^\circ\text{C}$, 保温时间 15min 。

10.16 发动机的整流器

10.16.1 钎焊要求

某航空发动机的 5~8 级整流器材料为 Ti-6Al-4V 钛合金。要求一次把 60~80 个叶片同时钎焊到内外环上, 对整体要求变形量越小越好。

10.16.2 钎焊前准备

钎焊前装配时, 把叶片逐件整体由外环插入, 使叶片内端头插入内环的槽内。由于叶片有一定扭度, 这样装配很难保证钎焊间隙, 为

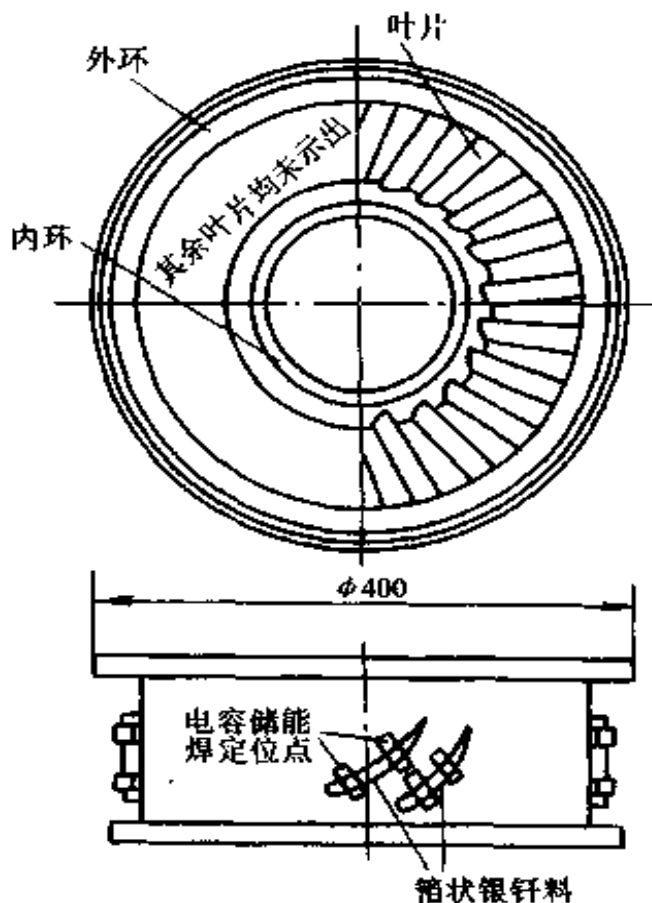


图 10-35 整流器叶片钎焊前的装配示意图

此用钛合金箔填充大间隙, 把直径为 1mm 的丝状 B-Ag72CuNi 钎料备成 U 形放在叶片与外环的结合处。图 10-35 所示为用厚 0.1mm 的钛箔条压在叶片与外环上, 采用手枪式电容储能点焊机点焊, 使叶片、外环与钎料三者保持相对位置, 而后在内环外端叶片上放置钎料。

10.16.3 钎焊参数

采用真空钎焊方法进行连接。选择冷态真空度为 5mPa , 加热时应保持炉内真空度不低于 10mPa 。钎焊温度为 850°C , 保温时间为 $10 \pm 2\text{min}$ 。

10.17 燃油喷嘴组件

10.17.1 喷嘴组件的组成

图10-36所示为某航天飞机的燃油喷嘴组件，喷嘴体材料为2Cr13，帽罩材料为GH3030，锥销材料为1Cr18Ni9Ti。

10.17.2 钎焊要求

喷嘴组件的工作温度为400~600℃，要求钎缝在工作温度下具有良好的力学性能，抗氧化和耐燃油腐蚀的性能。

10.17.3 钎焊前准备

选用B-Cu97NiB钎料预制成钎料环（见图10-36），预先放置在喷嘴体的钎料槽中，然后装上帽罩，用4个锥销固定，在锥销上设计钎料能够流出来的小槽。

10.17.4 钎焊工艺

采用真空钎焊方法进行连接。因为喷嘴体材料为马氏体不锈钢，因此选择钎焊温度与淬火温度相一致。具体的钎焊参数为：冷态真空度10mPa，钎焊温度1120℃，保温时间20min。

10.17.5 钎焊后处理

钎焊后，对组件要进行高温回火处理，处理参数为：750℃，保温1h。应当指出的是，帽罩材料为镍基变形高温合金，固溶处理温度为1020℃，因此钎焊温度已满足了GH3030的热处理要求。

10.18 自行车车架接头

10.18.1 车架接头的组成

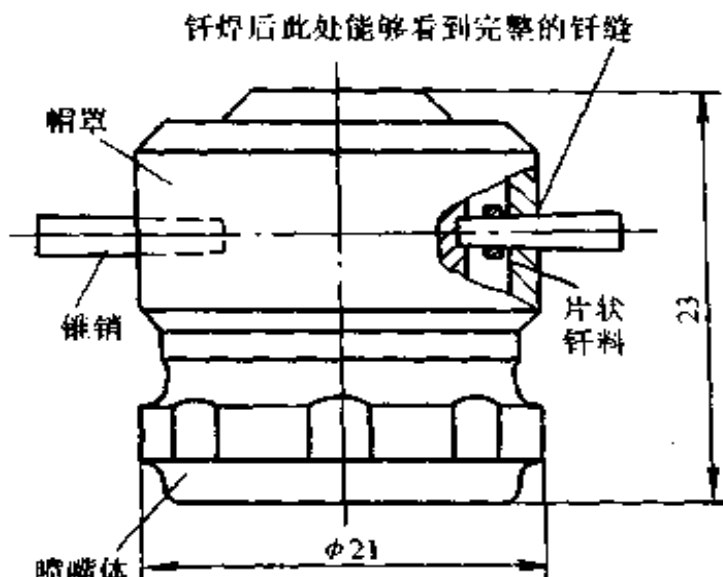


图 10-36 某航天飞机的燃油喷嘴组件

图 10-37 所示为钢铝混装赛跑用自行车车架接头，它由一个前叉接头和两个缩颈管接头组成。前叉接头材料为 ZG65Mn 铸钢，缩颈管接头材料为 45 钢。

10.18.2 钎焊前准备

自行车车架是动载受力件，为确保强度，搭接长度定为 35mm。选用高强度铜基钎料 B-Cu97Ni3 进行真空钎焊，将丝状钎料在芯棒上预弯成环，套在接头处（见图 10-37）。

10.18.3 钎焊过程

按图示位置装入真空炉中，冷态真空度为 100mPa。加热到 950℃，填充高纯氮气，使炉内压力上升到 2~3Pa，稳定 10~15min。继续加热到 1100℃，保温 5min。随炉内压力冷却到 950℃，并快速冷却到 65℃ 以下出炉。

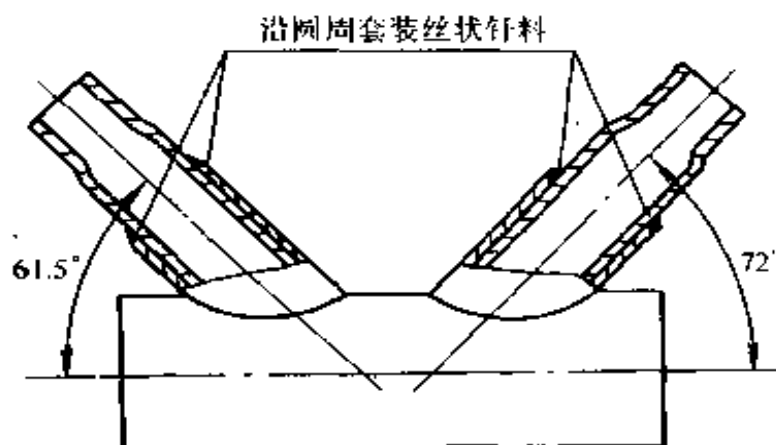


图 10-37 自行车车架接头

附录 A 我国钎焊材料主要生产和 研制单位及主要产品

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
1	冶金部钢铁研究总院	北京市学院南路 76 号	100081	62182838	镍基钎料 (粉、箔); 低银的铜磷钎料; 气体钎剂; 软钎剂
2	北京有色金属研究总院	北京市新街口外大街 2 号	100088	62014488	银基、铝基钎料; 银铜钛钎料
3	北京航空材料研究院	北京市 81 号信箱	100095	62456622	铜基、铝基、银基钎料; 镍基粘带钎料; 钛锆基非晶态钎料
4	北京有色金属与稀土应用研究所	北京市安定门外大羊坊	100012	64232220	金基、银基、铜基、铝基、铅基、锡基、钢锡钎料; 导电胶; 钎料膏; 水洗及免洗钎剂
5	北京市怀柔县焊接材料厂	北京怀柔县雁栖工业区	101407	69625962	低银及无银铜磷钎料; 铝钎料; 银钎料; 银钎剂
6	北京冶炼厂钎料分厂	北京市丰台区宋家庄	100075	67622220	各种软钎料; 钎料膏
7	北京航空航天大学焊接教研室	北京市学院路 37 号	100083	82317702	研制银基及铝基钎料
8	北京大学钎焊技术研究所	北京市北大化学楼 S453 号	100871	62501496	高、中、低温铝钎焊用钎剂、钎料; 电子工业用软钎料

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
9	航天工业总公司二院 699 厂	北京市 132 信箱	100039	68385935	铝基钎料及钎剂; 抗氧化锡铅钎料及钎剂
10	上海斯米克焊材公司	上海市浦东上南路 3757 号	200124	58421188	铜基、银基、铝基、锌基、锡基钎料; 银钎剂、铜钎剂、铝钎剂
11	上海钢铁研究所	上海市吴淞泰和路 1001 号	200940	56840123	锰基、镍基、铜基、锡基、铅基钎料; 镍基、铜基非晶态钎料
12	上海沪光焊接研究所	上海市湖北路 147 号	200001	63222398	银基、铜磷、铝基钎料; 银钎剂
13	上海大华新型钎焊材料厂	上海市华山路 1520 弄 56 号	200052	62830061	银基钎料及膏状银钎剂
14	上海宝山罗店焊接材料厂	上海宝山罗店镇苗圃路 16 号	201908	56862054	银基、铜基、镍基、铝基钎料; 银焊膏; 银、铜、铝钎剂
15	上海有色合金线材厂	上海市中山西路 2027 号	200233	64396621	无镉、节银低熔点银钎料
16	上海胶带总厂信一分厂	上海市南翔镇古漪园	201802	59122162	有机硼气体钎剂
17	上海金钟焊接器材公司	上海徐家汇天玥路 380 弄 6 号	200030	64877170	销售所有银基、铜基、铝基、锡铅等钎料; 银、铝钎剂
18	上海有色金属研究所	上海市松江县长石路 245 号	201600	57822880	银基、铜基钎料; 钛基粉末钎料

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
19	上海锡铅材料厂	上海市安远路727号	200042	62565883	各种锡铅钎料
20	上海斯米克焊材公司有色焊材厂	上海市崇明岛三星镇	202155	9331716	铜基、银基、铝基、锌基、锡基钎料；银钎剂、铜钎剂、铝钎剂
21	财政部上海造币厂(614厂)	上海市光复西路17号	200061	62536200	银基、银铜磷钎料；银粉
22	津北红星钎焊材料厂	天津市北辰区霍庄乡辛候庄	300402	6391259 转	铝基钎料
23	金华市焊接材料厂	浙江省金华市双溪西路西关	321016	2372271	铜磷、铜锌、铜锰、银基、铝基、锡铅钎料；银、铜、铝钎剂
24	仙居县贵金属实业公司	浙江省仙居县城关镇管山	317300	7772910	银基、铜磷钎料；银钎剂
25	杭州高联特种焊接器材厂	浙江杭州留下镇古另慈桥2号	310023	5229044	铜磷、银基、锡基钎料
26	杭州环球钎焊材料厂	浙江杭州市康桥义桥街	310015	841536	铜磷、银基、锡基钎料
27	浙江省冶金研究所	浙江省杭州市天目山路	310007	247060	镍磷钎料
28	湖州织里焊接材料厂	浙江省湖州市织里镇	310008		铜钎剂
29	镇江星辰焊料有限公司	江苏省扬中市联合栏杆桥	212212	8421156	铜基、银基、锡铅、黄铜钎料；银钎剂、铜钎剂

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
30	扬中联合特种钎料厂	江苏省扬中市 天后宫镇	212212	8421353	铜基、银基、锡铅、黄铜钎料；银钎剂
31	扬中市飞利达实业公司焊料厂	江苏省扬中市 公信桥 76 号	212212	8421671	铜磷、黄铜、银基、锡铅钎料；银钎剂
32	镇江永固焊接材料厂	江苏省镇江市 五峰口	212011	4511486	铜磷、黄铜、银基、铝基钎料；银钎剂
33	镇江长江焊接材料厂	江苏省镇江市 乔家门	212011	5722176	铜磷、黄铜、银基钎料；银钎剂、铜钎剂
34	镇江新型钎料厂	江苏省镇江市 林隐路 66 号	212001	4425250	铜锌、铜磷、铜锰、银基、铝基钎料；银、铜、铝钎剂
35	常熟市华银焊料公司	江苏省常熟市 碧溪镇碧溪中路 76 号	215513	2691045	银基、铜磷钎剂；银钎剂；无腐蚀铝钎剂
36	无锡群立有色金属材料厂	江苏省无锡市 惠钱路 202 号	214035	3700951	各种锡铅钎料，焊锡丝，无铅锡基钎料；软钎剂
37	无锡大桥港荣焊接公司	江苏省锡山市 东峰镇金南路 12 号	214121	7711984	铜磷、铜锌、银基、锡铅钎料；银钎剂、铝钎剂
38	金城金属焊接材料厂	江苏省锡山市 金城湾南桥	214123	5062646	铜磷钎料；银钎剂、铝钎剂
39	雪浪五金电化厂	江苏省锡山市 南门外雪浪镇	214125		银钎剂、铜钎剂

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
40	周铁有色金属 属焊接材料厂	宜兴市周铁镇 工会大楼 201 室	214261	7501940	银钎剂、铜钎剂
41	南京铜加工 厂	江苏省南京市 城左营 9 号	210002	6643815	铜基非晶态钎料
42	无锡市化工 研究设计院	江苏省无锡市 人民西路 109 号	214031	2706126	软钎剂、铝钎剂
43	永兴化工厂	山东省临沂市 河东区桃园	276034	8383237	RA969 型钎剂, RB 稀释剂, RA 清洗剂
44	日照市桑托 尔钎焊材料厂	山东省日照市 黄海一路 44 号	276834	8339325	铜磷、铜锌、银 基钎料
45	日照科信焊 接材料厂	山东省日照市	276826		银基、铜锌、锌 基、铝基、铜磷钎 料; 铸铁补焊钎 料; 银钎剂
46	三明市焊接 材料厂	福建省三明市 台江路 57 号	365001	236558	银基、铜磷钎料
47	东光县金属 焊接材料厂	河北省东光县 城东李树	061600	7727093	铜磷、银基、铝 基钎料; 银、铜、 铝钎剂
48	成煜电子材 料厂	河北省安国市 同庆路同福胡同 13 号	071200	3556139	铝基钎料; 铝钎 剂
49	郑州机械研 究所	河南省郑州市 中原路 101 号	450052	7931613	银基、铜基、铜 磷钎料, 硬质合金 刀具用钎料

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
50	许昌市中州焊料厂	河南省长葛县增付庙	461503		铜基、铝基、银基、铜磷钎料
51	哈尔滨焊接研究所	哈尔滨市和兴路 111 号	150080	6336693	铜磷、银基、铝基钎料；银基、铜基膏状钎剂
52	吉林大通焊接技术开发公司	吉林长春市南岭大街 236 号	130022	5689394	低锡锡铅钎料及钎剂
53	吉林工业大学科教开发总公司	吉林长春市斯大林大街 114 号	130025	5682351	铸铁钎料；锡铅钎料及钎剂
54	辽源美华焊材科技有限公司	吉林省辽源市福镇大街 27 号	136200	3224889	银基钎料、锡铅钎料
55	辽源市银龙焊接材料厂	吉林省辽源市安平路 84 号	136200	3610362	铝钎料；铝钎剂
56	中科院沈阳金属研究所	沈阳市文化路 72 号	110015	3843531	银基、铜基钎料，镍基粉末及非晶态钎料
57	财政部沈阳造币厂	沈阳市大东路 138 号	110040	4313906	银基、金基钎料及银粉
58	沈阳有色金属加工厂	沈阳市苏家屯	110102	9812521	铜基、金基、银基、镍基、锰基、锡铅钎料
59	西北有色金属研究院	西安市龙首北路西段	710016	6263076	银基、镍基、钛基钎料
60	西安市邦林实业有限公司	西安市育才路 2 号	710061	5347079	镍基粉末钎料

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
61	西北特种材料实业有限公司	甘肃省柳园镇南大街 77 号	736000	柳园 2195	银基、铜磷、铜锌钎料，银粉及其浆料
62	湖南三一集团有限公司	湖南省涟源市人民东路	417100	422151	银基、铜磷钎料，铜锰锌（钴）硬质合金用钎料
63	湖南大学	湖南省长沙市岳麓山	410082	2223784	锌基、铝基钎料及钎剂；铝非晶态钎料
64	湖南省冶金材料研究所	湖南省长沙市奎塘	410014	5578119	镍基粉末钎料
65	株洲电焊条总厂	湖南省株洲市华南路	412008	8412413	银基、铜磷钎料
66	宜昌猴王集团公司	湖北省宜昌市夷陵路 344 号	443003	6351420	银基、铜磷钎料；银钎剂
67	四川省冶金研究所	成都市人民北路一段 12 号	610081	332086	银基、铜基钎料
68	成都市焊接材料研究所	成都市外南永丰路 4 号	610041	5187294	铜磷、银基、铝基钎剂；银钎剂、铝钎剂
69	昆明贵金属研究所	云南省昆明市 85 号信箱	650221	5155368	金基、银基、钛基、含钼钎料，锡铅、铝基、锡基、银基膏状钎料，焊锡浆料

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
70	云南爱法焊料有限公司	云南省昆明市 市茈萝村	650224	5154206	锡铅、锡铋、 无铅锡基钎料； 松香、树脂、水 溶、免洗钎剂
71	广州有色金属 属研究院	广州市五山	510651	7705629	无铅锡基、抗 氧化锡钎钎料， 铅硅、银基、铜 基钎料粉，锡铅 膏状钎料，气体 钎剂
72	唯尔登焊接 工程技术公司	广州市天河 东路 240 号 805	510651	7502932	银基、铜基钎 料；锡铅膏状钎 料
73	顺德市马岗 银焊料厂	广州顺德市 桂洲镇马岗新 工业区	528305	8885071	银基（包括含 铜）、铜磷（包括 低银）钎料
74	深圳宝安安 华焊接材料厂	深圳宝安区 新城 26 区裕安 路	518101	7809704	银基、铜磷钎 料
75	深圳宝安联 华实业公司	深圳宝安县 公明镇公平街 11 号	518106	7736828	液态钎剂
76	深圳亚金特 种焊材公司	深圳福星南 路福星花园大 厦裙楼 4 楼 16 室	518003	3606643	银基、铜基、 铝基、镍基、锡 铅钎料；银钎剂

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
77	广东五华县 焊接材料厂	广东省五华县 郭田镇	514429	4251381	铜锌、铜磷、银基、铝基、锌基、锡铅钎料；银、铜、铝、锡等类焊膏、硬质合金用焊膏、金刚石、钛合金焊膏，银、铝钎剂
78	广东中山市 华乐焊接材料厂	广东省中山市 东风镇	528425	6211112	银基、铜磷钎料
79	广州亨龙焊接设备有限公司	广东省从化市 经济开发区丰盈塔路9号	510900	87813325	银钎料及其钎剂
80	广州珠海日新钎焊材料厂	广州市怡乐路 266号	510000		铝—硅粉末钎料
81	广州凯龙贸易有限公司	广州天河北路 82号光华大厦	510620	87573635	经营代销各种钎料
82	核工业总公司一院二所	四川成都市 291信箱209分箱	610005		镍基粉末钎料
83	天津大桥集团公司上饶电焊条厂	江西上饶市抗建南路191号	334000	222003	银钎料、铜磷钎料
84	铜陵市金属焊接材料厂	安徽省铜陵市 石城路68号	244000	62606	银钎剂、铝钎剂
85	广州市雷格蒙有限公司	广州市解放北路960号612室	510000	1665666	银基、铜锌、铜磷钎料；银钎剂

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
86	迪高沙中国有限公司	香港邮政总局信箱 10005 号		5-445123	销售德国 Degussa 公司各种钎料及钎焊设备
87	英高克和富金属有限公司	深圳湖南路国贸商住大厦 D 座 20 楼	518100		销售新加坡生产的美国焊膏
88	德金电子集团	香港干诺道中 111 号 (永安中心 2309 室)			镓基、锡铅基、铝基、银基、金基、钼基、铂基钎料, 膏状钎料, 粉末钎料
89	北京挪斯恩焊接技术公司	北京市 8004 信箱	100088	62389289	锡基、铜基、铝基、银基钎料和各种钎剂, 焊条、焊丝等
90	珠海金宝机电实业公司	广东珠海市九州大道中特区报社科兴大厦四楼	519015	3365166	铜、黄铜、铝、镍、不锈钢钎焊用钎料和钎剂
91	天津市焊接研究所	天津市南开区红旗路 196 号	300110	27365173	
92	云南锡业公司研究设计院	云南个旧市五一路	661400	2447760	
93	云南个旧云锡冶炼厂	云南个旧市	661400	2447145	
94	云南个旧云锡制品厂	云南个旧市	661400	2124084	
95	个旧市焊料厂	云南个旧市	661400	2122223	

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
96	财政部 503 厂	广元市			
97	本溪市金属材料厂	辽宁省本溪市			
98	东北轻合金加工厂 (101 厂)	哈尔滨市平房区			铝覆钎料板
99	天津有色金属研究所	天津市			
100	沈阳市黄金专科学校	辽宁省沈阳市			
101	江苏海门顺德焊条厂				
102	福建省建阳焊条厂	建阳市水吉镇水瓯路 37 号			
103	株洲市有色金属焊接材料厂				
104	山东淄博焊接材料厂				
105	广东韶关焊接材料厂				
106	朝阳助焊剂厂	北京市朝阳区酒仙桥			电子产品钎焊用钎剂
107	北京晶英免清洗助焊剂厂				电子产品钎焊用钎剂
108	上海无线电 18 厂				电子产品钎焊用钎剂

(续)

序号	单位名称	通信地址	邮编	电话	主要产品
109	广东化学试剂厂				电子产品钎焊用钎剂
110	浙江黄岩化工厂				电子产品钎焊用钎剂
111	四川内江市沱江化工厂				电子产品钎焊用钎剂
112	长春人防金属材料焊剂厂				铝用软钎剂
113	吉林汪清县特种焊条厂				无腐蚀铝钎剂

附录 B 我国与其它国家近似钎料型号对照表

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3261-85	QQ-B-654A-91	A5.8-92	1845-84	8513T3-86	16882.X-71	10046-88
钎料类别	银基钎料						
型	BAg-1	Grade VII	BAg-1	AG2	L-Ag45Cd		BAg45CuZnCd
	BAG-1A	Grade IV	BAg-1a	AG1	L-Ag50Cd	ПСП50-КД	BAg50CuZnCd
	BAG-2	Grade VIII	BAg-2	AG11			BAg35CuZnCd
						ПСП40	BAg40CuZnCdNi
	BAG-3	Grade V	BAg-3	AG9	L-Ag50CdNi		BAg50CuZnCdNi
	BAG-4	BAg-4	BAg-4				
号						ПСП10	BAg10CuZn
						ПСП25	BAg25CuZn
	BAG-5	BAg-5	BAg-5		L-Ag44	ПСП45	BAg45CuZn
	BAG-6		BAg-6				BAg50CuZn
				AG6		ПСП62	BAg60CuSn

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3261-85	QQ-B-654A-91	A5.8-92	1845-84	8513T3-86	16882.X-71	10046-88
钎料类别	银基钎料						
型	BAg-7	BAG-7	BAG-7		L-Ag55Sn		BAG56CuZnSn
	BAG-7A		BAG-36		L-Ag45Sn		
	BAG-7B				L-Ag34Sn		
	BAG-8		BAG-8a	AG7	L-Ag72	ITCP72	BAG72Cu
	BAG-8A	BAG-8a	BAG-8a				BAG72CuLi
	BAG-18	BAG-18	BAG-18				BAG60CuZn
号	BAG-20	BAG-20	BAG-20		L-Ag30		
	BAG-20A				L-Ag25		
	BAG-21		BAG-21				
			BAG-22	AG18	L-Ag49		BAG49CuMnNi
	BAG-24		BAG-24				

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3262-86	-	A5.8-92	1845-84	8513T1-79		6418-93
钎料类别	铜及黄铜						
型 号	BCu-1		BCu-1	CU2	L-Cu		BCu
	BCu-1A		BCu-1A	CU5			
	BCu-2		BCu-2				
					L-MS-54	J1M1154	BCu54Zn
	BCuZn-1			CZ6	L-CuZn40		
	BCuZn-2		RBCuZn-A	CZ5			BCu60ZnSn-R
	BCuZn-3		RBCuZn-C	CZ7A	L-CuZn39Sn		BCu58ZnFe-R
	BCuZn-6		RBCuZn-D	CZ8	L-CuNi10Zn42		BCu48ZnNi-R

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3262-86	-	A5.8-92	1845-84	8513T1.2-79		6418-93
钎料类别	铜磷钎料						铜基钎料
型 号	BCuP-1		BCuP-1				
	BCuP-2		BCuP-2	CP3	L-CuP7		BCu93P
	BCuP-3		BCuP-3	CP4	L-Ag5P		BCu89PAg
	BCuP-4		BCuP-4				
	BCuP-5	BCuP-5	BCuP-5	CP1	L-Ag15P		BCu80AgP
	BCuP-6		BCuP-6		L-Ag2P		BCu91PAg
国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3253-92	-	A5.8-92	1845-84	8513-81		13815-92
钎料类别	铝基钎料						
型 号	BA4343		BAiSi-2	4343	L-AiSi7.5		BAi92Si
	BA4045		BAiSi-5	4045	L-AiSi10		BAi90Si

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3253-92	-	A5.8-92	1845-84	8513-81		13815-92
铝基钎料							
钎料类别	4004(片)		BA1Si-7	4004			BA188SiMg
	4005(片)						BA189SiMg
	4N04(片)		(BA1Si-9)				
	4104(片)		BA1Si-11	4104			
	BA4145		BA1Si-3	4145A			BA186SiCu
	BA4047		BA1Si-4	4047A	L-A1Si12		BA188Si
国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3265-86	-	A5.8-92	1845-84	8513T5-83		10859-89
镍基钎料							
钎料类别	BNi-1		BNi-1	HTNi	L-Ni1		BN74CrSiB
	BNi-1A		BNi-1a	HTNiA	L-Ni1a		BN75CrSiB

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3265-86	-	A5.8-92	1845-84	8513TS-83		10859-89
钎料类别	镍基钎料						
型 号	BNi-2		BNi-2	HTN2	L-Ni2		BNi82CrSiB
	BNi-3		BNi-3	HTN3	L-Ni3		BNi92SiB
	BNi-4		BNi-4	HTN4	L-Ni4		BNi93SiB
	BNi-5		BNi-5	HTN5	L-Ni5		BNi71CrSi
	BNi-6		BNi-6	HTN6	L-Ni6		BNi89P
	BNi-7		BNi-7	HTN7	L-Ni7		BNi76CrP
国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
钎料类别	金基钎料						
型 号	BAu-1		BAu-1				BAu37Cu
	BAu-2		BAu-2	AU1			BAu80Cu
	BAu-3		BAu-3				BAu35CuNi

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
钎料类别	金基钎料						
型 号	BAu-4		BAu-4	AU5			BAu82Ni
	BAu-5		BAu-5				BAu30PdNi
	BAu-11		BAu-11				BAu50Cu
钎料类别	钎基钎料						
型 号	BPd-1			PD1			BAg69CuPd
	BPd-2			PD2			BAg58CuPd
	BPd-4			PD4			BAg65CuPd
	BPd-5			PD5			BAg52CuPd
	BPd-6			PD6			BAg54CuPd
	BPd-9			PD9			BAg75PdMn
	BPd-10			PD10			BAg64PdMn

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 AWS	英国 BS	德国 DIN	前苏联 ГОСТ	中国 GB
钎料类别							
钎基钎料							
型号	BPd-11			Pd11			B3Ni48MnPd
国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 ASTM	国际标准 ISO	德国 DIN	英国 BS	中国 GB
标准号	Z3282-86	QQ-S-571F-94-	B32-95	9453-90	EN29453-94		3131-88
锡铅钎料							
型号	H95A,B						HL-Sn95PbA,B
						ПОС90	HL-Sn90PbA
	H65S						HL-Sn65PbA,B
	H63S,A,B	Sn63Pb37	Sn63	S-Sn63Pb37			HL-Sn63PbA,B
	H60S,A,B	Sn60Pb40	Sn60	S-Sn60Pb40	ПОС61		HL-Sn60PbA,B
	H55S,A,B						HL-Sn55PbA,B
	H50S,A,B	Sn50Pb50	Sn50	S-Sn50Pb50	ПОС50		HL-Sn50PbA,B
	H45S,A,B		Sn45	S-Pb55Sn45			HL-Sn45PbA,B

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 ASTM	国际标准 ISO	德国 DIN	英国 BS	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3282-86	QQ-S-571F-94-	B32-95	9453-90	EN29453-94			3131-88
钎料类别	锡铅钎料							
型	H40S, A, B	Sn40Pb60	Sn40A	S-Pb60Sn40			ПОС40	HL Sn40PbA, B
	H35A, B	Sn35Pb65	Sn35A	S-Pb65Sn35				HL Sn35PbA, B
	H30A, B	Sn30Pb70	Sn30A	S-Pb70Sn30			ПОС30	HL Sn30PbA, B
	H20A, B	Sn20Pb80	Sn20A, B					HL Sn20PbA, B
							ПОС18	HL Sn18PbSbA
	H10A, B		Sn10A	S-Pb90Sn10				HL Sn10PbA, B
	H5A, B		Sn5	(S-Pb92Sn8)				HL Sn5PbA, B
							ПОС4-6	HL Sn4PbSbA
	H2A		Sn2	S-Pb98Sn2				HL Sn2PbA, B
	H43Bi14A	Sn43Pb43Bi14						
号	H42Bi58A	Sn42, Bi58						
	H62Ag2A	Sn62Pb36Ag2	Sn62	S-Sn62Pb36Ag2				HL Sn63PbAgA, B

(续)

国别 标准	日本 JIS	美国 FS	美国 ASTM	国际标准 ISO	德国 DIN	英国 BS	前苏联 ГОСТ	中国 GB
标准号	Z3282-86	QQ-S-571F-94	B32-95	9453-90	EN29453-94			3131-88
钎料类别	锡铅钎料							
型 号	H96Ag3.5		Sn96	S-Sn96Ag4				
	H95Sb5A	Sn95Sb05	Sb5	S-Sn95Sb5				
	HAg2.5A		Ag2.5	S-Pb98Ag2				
	HI Ag1.5A	Sn01Pb97Ag02	Ag1.5	(S-Pb93Sn5Ag2)				

附录 C 我国钎焊标准目录

C.1 国家标准

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1. 金属焊接及钎焊方法在图上的表示方法 | GB/T5185—95 (等同 ISO4063-78) |
| 2. 钎料牌号表示方法 | GB/T6208—95 (参照 ISO3677-76) |
| 3. 钎缝强度试验方法 | GB8619—88 (参照 ISO3688-73) |
| 4. 钎焊接头强度试验方法 | GB11363—89 (参照 JISZ3191-77) |
| 5. 钎料铺层性及填缝性能试验方法 | GB11364—89 (参照 JISZ3191-63) |
| 6. 铜基钎料 | GB/T6418—93 (参照 JISZ3264-77) |
| 7. 铝基钎料 | GB/T13815—92 (参照 JISZ3263-80) |
| 8. 银基钎料 | GB10046—88 (参照 JISZ3261-85) |
| 9. 镍基钎料 | GB10859—89 (参照 JISZ3265-86) |
| 10. 锰基钎料 | GB/T13679—92 |
| 11. 锡铅焊料 | GB3131—88 |
| 12. 铸造锡铅钎料 | GB8012—87 |
| 13. 锡焊用液态钎剂 (松香基) | GB9491—88 |
| 14. 电子器件用金、银及其合金钎焊料 | GB4906—85 |
| 15. 电子器件用纯银焊料的分析方法 | GB9619.1~9—88 |
| 16. 电子器件用银铜钎料化学分析方法 | GB9620.1~8—88 |
| 17. 电子器件用金银及其合金钎焊料检验方法清洁 | GB4907.1—85 |

性试验方法

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 18. 电子器件用金、银及其合金焊料检测方法溅散性检验方法 | GB4907.2—85 |
| 19. 电子器件用金铜及金镍钎焊料的分析方法 | GB9621.1~5—88 |
| 20. 锡铅钎料化学分析方法 | GB10574.1~14—89 |
| 21. 软钎焊用钎剂 | GB/T15829.1~4—1995 (参照 ISO9454.1-90) |
| 软钎焊用钎剂的分类、与包装 | GB/T15829.1—1995 |
| 树脂类钎剂 | GB/T15829.2—1995 |
| 有机物类钎剂 | GB/T15829.3—1995 |
| 无机物类钎剂 | GB/T15829.4—1995 |
| 22. 焊接与切割安全 | GB9448—88 |

C.2 国家军用标准

- | | |
|-------------------|------------|
| 1. 航天用锰基钎料规范 | GJB2450—95 |
| 2. 真空器件用含钽贵金属钎料规范 | GJB2509—95 |

C.3 航空工业总公司标准

- | | |
|---------|-----------|
| 1. 银基钎料 | HB6771—93 |
| 2. 镍基钎料 | HB6772—93 |
| 3. 铝基钎料 | HB7052—94 |
| 4. 铜基钎料 | HB7053—94 |

C.4 航天工业总公司标准

- | | |
|----------------|------------|
| 1. 钢件硬钎焊技术条件 | QJ1156A—96 |
| 2. 铝及铝合金硬钎焊技术条 | QJ2844—96 |

件

- | | |
|-----------------------|------------|
| 3. 波峰焊接技术条件 | QJ1745—89 |
| 4. 波峰焊接工艺技术条件 | QJ2600—94 |
| 5. 电子元器件搪锡工艺细则 | QJ/2147—85 |
| 6. 汽相清洗工艺细则 | QJ/2158—85 |
| 7. 印制电路板组装件装联工
艺细则 | QJ/2154—85 |
| 8. 手工锡焊工艺细则 | QJ/2160—85 |
| 9. 铝波导真空钎焊技术条件 | QJ1581—88 |
| 10. 铝波导真空钎焊工艺 | QJ1582—88 |

C.5 机械工业部标准

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1. 硬钎焊用钎剂 | JB/T6045—92 |
| 2. 水溶性有机助焊剂 | JB/T6173—92 |
| 3. 钎缝外观质量评定方法 | JB/T6966—93 |
| 4. 铜磷钎料化学成份分析方法 | JB/T7520.1~6—94 |
| 5. 铜基钎料产品质量分等 | JB/T56050.1—93 |
| 6. 银基钎料产品质量分等 | JB/T56050.2—93 |
| 7. 锡铅钎料产品质量分等 | JB/T56050.3—93 |

C.6 电子工业部标准

- | | |
|-----------------------|-----------|
| 1. 电子工业用树脂芯焊锡丝 | JS2659—86 |
| 2. 软钎焊用树脂系焊剂的试
验方法 | JS2660—86 |

C.7 冶金工业部标准

- | | |
|---------|------------|
| 真空器件用焊料 | YS/T380—94 |
|---------|------------|

C.8 电子行业标准

1. 电子工业典型焊接工艺-铜波导手工火焰钎焊
SJ/Z3200—89
2. 电子工业典型焊接工艺-铝波导手工火焰钎焊
SJ/T3201—89

C.9 拟制定的国家或行业标准（已经全国焊接标准化技术委员会讨论通过批准列入我国“焊接标准体系表”中，待条件成熟时制定）；

- 1) 钎焊工艺评定方法（拟参照 JIS Z 3891—90）
- 2) 钎焊接头的基本形式及尺寸（拟参照 TOCT 19249—73）
- 3) 锌基钎料
- 4) 金基钎料（拟参照 JIS Z 3266—85）
- 5) 电真空钎料（拟参照 JIS Z 3268—88）
- 6) 钼基钎料（拟参照 JIS Z 3267—86）
- 7) 钎焊通用技术条件（拟参照 AWS C3.4—90）
- 8) 黄铜钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3902—84）
- 9) 电真空钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3901, 3904, 3906）
- 10) 金基钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3904—79）
- 11) 钼基钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3906—88）
- 12) 银基钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3901—88）
- 13) 镍基钎料化学分析方法（拟参照 JIS Z 3905—74）
- 14) 锰基钎料化学分析方法
- 15) 锌基钎料化学分析方法
- 16) 铝基钎料化学分析方法

附录 D 国外有关钎焊和钎料标准目录

D.1 国际标委会颁布的标准目录

D.1.1 国际标准化组织第 44 技术委员会 (ISO/TC44) “焊接及其相关工艺” 技术委员会标准目次 (SC₁₂ 软钎焊及硬钎焊材料)

- 1) ISO698—75 钎焊填充丝在钎焊钢、铸铁和其它金属常规结合强度测定
- 2) ISO3677—92 硬钎焊及软钎焊填充金属符号规定
- 3) ISO5179—83 使用变间隙试件的可钎焊性研究
- 4) ISO5187—85 焊接及相关工艺-软钎焊及硬钎焊接头力学性能实验方法
- 5) ISO9453—90 软钎焊钎料化学成分和供货形式
- 6) ISO9454.1—90 软钎焊钎剂-技术要求和分类: (1) 分类标记和包装
- 7) ISO 9455—1:1990 软钎焊用钎剂试验方法: (1) 不挥发物质的测定——重量分析法
- 8) ISO 9455—2:1993 软钎焊用钎剂试验方法: (2) 不挥发物质的测定——沸点测量法
- 9) ISO 9455—3:1992 软钎焊用钎剂试验方法: (3) 酸值测定——电位滴定法和目视滴定法
- 10) ISO 9455—5:1992 软钎焊用钎剂试验方法: (5) 铜镜试验
- 11) ISO 9455—6:1995 软钎焊用钎剂试验方法: (6) 卤化物含量的测定
- 12) ISO 9455—8:1991 软钎焊用钎剂试验方法: (8) 锌含量的测定
- 13) ISO 9455—9:1993 软钎焊用钎剂试验方法: (9) 氮含量的测定
- 14) ISO 9455—11:1991 软钎焊用钎剂试验方法: (1) 钎剂残渣溶解性的评定

- 15) ISO 9455—12:1992 软钎焊用钎剂试验方法: (12) 钢管腐蚀试验
- 16) ISO 9455—13:1996 软钎焊用钎剂试验方法: (13) 钎剂飞溅的测定
- 17) ISO 9455—14:1991 软钎焊用钎剂试验方法: (14) 钎剂残渣干燥度的评定
- 18) ISO 9455—15:1996 软钎焊用钎剂试验方法: (15) 铜腐蚀试验
- 19) ISO 10564:1993 软钎料及硬钎料——钎料分析试样的取样方法
- 20) ISO 857:1990 焊接, 硬钎焊和软钎焊方法——术语
- 21) ISO 2553:1992 焊接, 硬钎焊和软钎焊接头在图样上的表示方法
- 22) ISO 4063:1990 金属的焊接、硬钎焊、软钎焊及钎接焊——用于图样上符号表示的工艺术语及参照代号
- 23) ISO 14117:1996 气焊设备——气体钎焊和焊接用小型附件

D.1.2 国际焊接标准中的部分钎焊标准

- 1. ISO 688—75 钎焊填充丝熔敷金属特性的测定;
- 2. ISO 698—75 钎焊填充丝在钎焊钢、铸铁和其它金属时结合强度的测定;
- 3. ISO 3677—76 硬钎焊及软钎焊填充金属代号的规定;
- 4. ISO 3683—78 软钎料接头剪切强度的测定;
- 5. ISO 4063—78 金属焊接及钎焊方法在图纸上的表示代号。
- 6. ISO 10564—93 软钎焊材料与硬钎焊材料, 软钎料分析取样方法。

D.2 美国钎焊标准

D.2.1 美国试验和材料协会标准 (ASTM)

- 1) ASTM B32—95 金属软钎料规程

- 2) ASTM B284—84 松香钎剂芯钎料规程
- 3) ASTM B486—85 膏状钎料规程
- 4) ASTM E46—87 锡铅钎料的化学分析方法
- 5) ASTM E56—90 银钎焊合金的化学分析方法
- 6) ASTM E106—91 电子器件用金属钎料
- 7) ASTM E315—89 航空流体中钎料与钎剂杂质的鉴别方法
- 8) ASTM F357—91 厚膜导体的钎焊性测定方法
- 9) ASTM B579—73 锡铅合金电解沉积镀层(钎料板)规范

D.2.2 美国汽车工程协会标准(AMS)

- 1) AMS 4750 锡铅 45Sn-55Pb 钎料
- 2) AMS 4755 铅银 94Pb-5.5Ag 钎料
- 3) AMS 4756 镍银锡 97.5Pb-1.5Ag-1Sn 钎料
- 4) AMS 3410 银钎剂
- 5) AMS 3411 高温银钎剂
- 6) AMS 3412 铝钎剂
- 7) AMS 3415 浸渍钎焊用铝钎剂
- 8) AMS 3416 浸渍钎焊用铝钎剂
- 9) AMS 4184 钎焊丝
- 10) AMS 4185 钎焊丝
- 11) AMS 4764 铜基钎焊合金
- 12) AMS 4766 至 4774 银基钎焊合金
- 13) AMS 4775 至 4779 镍基钎焊合金
- 14) AMS 4780 锰基钎焊合金
- 15) AMS 4769C—84 硬钎料, 银基, 45Ag-24Cd-16Zn-15cm
- 16) AMS 3430A—83 硬钎料, 膏状, 铜基, 水溶性
- 17) AMS 3412B—74 钎剂, 铝硬钎焊
- 18) AMS 3416A—74 钎剂, 铝浸渍钎焊

D.2.3 美国机械工程师学会标准(ASME)

- 1) ASME SEC9—91 锅炉压力容器规范焊接与钎焊评定
- 2) ASME SI SEC9—91 焊接与钎焊评定方法

D.2.4 美国焊接学会标准 (AWS)

- 1) AWS-A5.8—62T 钎焊填充金属 (即钎料)
- 2) AWS A5.8—89 硬钎料规程
- 3) AWS A2.4—86 焊接, 钎焊及无损检测用符号
- 4) AWS C3.2—89 钎焊接头剪切强度评定方法
- 5) AWS C3.3—87 钎焊件设计、制造及检查
- 6) AWS C3.4—90 气炬钎焊规范
- 7) AWS C3.5—90 感应钎焊规范
- 8) AWS C3.6—90 炉中钎焊规范
- 9) AWS-4740—66 最小含铜量 99.0 铜粉
- 10) AWS-4764—66 39Mn-9.5Ni 铜基钎焊合金
- 11) AWS-4765—68 56Ag-42Cu-2.0Ni 银基钎料
- 12) AWS-4667—63 92.5Ag-7.2Cu-0.22Li 银基钎料
- 13) AWS-4772A—5.2 54Ag-40Cu-5.2Zn-1.0Ni 银合金钎料
- 14) AWS-4773—59 50Ag-40Cu-10Sn 银合金钎料
- 15) AWS-4774—59 63Ag-28.5Cu-6.0Sn-2.5Ni 银合金钎料
- 16) AWS-4776—56 4Si-16.5Cr-4Fe-3.8B 镍基低碳钎焊合金
- 17) AWS-4777—55 4Si-7Cr-3Fe-3B 镍基低碳钎焊合金
- 18) AWS-4778—60 4.5Si-2.9B 镍基低碳钎焊合金
- 19) AWS-4780—62 16Ni-16Co-0.8B 锰基钎焊合金

D.2.5 美国军用标准 (MIL)

- 1) MIL-1—6870 飞机材料和零件的无损检验要求;
- 2) MIL-S—12204 铝合金钎焊
- 3) MIL-F—12784 钎剂 (硬脂化合物 1C-3)
- 4) MIL-F—14256C 液态钎剂 (松香剂)
- 5) MIL-STD—105 计数检验的抽样程序和表格
- 6) MIL-STD—454 对电子仪器的标准通用要求
- 7) MIL-W-8611A—57 钢和耐热合金的电弧焊和气焊镍合金钎焊通用技术条件
- 8) MIL-B—7883B 钢、铜、铜合金、镍合金、铝和铝合金的钎焊

- 9) MIL-1—6866 渗透检验方法
- 10) MIL-P—8853 用水稀释的铜钎焊膏
- 11) MIL-R—9631 铜和铜焊丝(棒)
- 12) MIL-B—20148 铝钎焊合金和包复的铝钎焊合金
- 13) MIL-STD—453 射线照相检验
- 14) MIL F—12784B 钎剂(甘油硬脂酸复合物 K-3)
- 15) MIL F—14256D 钎剂, 液体, 松香基
- 16) MIL FEDO-F—496C 低熔点银基合金钎料
- 17) MIL STD—1130 无钎剂卷绕钎料

D.2.6 美国联邦标准

- 1) QQ-S-571F—1994 软钎料, 电子级
- 2) QQ-S—571 锡合金、铅锡合金和铅合金钎料
- 3) GGG-S—595 非电钎焊烙铁(铜器)
- 4) GGG-T—570 钎焊(丙烷气体)喷枪工具
- 5) QQ-B—655 铝和镁钎焊合金
- 6) QQ-R—566 铝和铝合金焊丝(棒)
- 7) QQ-S—561 银焊料
- 8) O-F—506 膏状和液态钎剂
- 9) W-S—564 钎焊枪
- 10) W-S—570 钎焊电烙铁
- 11) O-F—499 低熔点银合金钎剂

D.2.7 美国道格拉斯公司标准

- 1) DPS 3.232—2 导管的焊接和钎焊
- 2) DPS 9.14 铝在焊接和钎焊前的准备
- 3) DPS 10.250 熔焊和钎焊
- 4) DPS 10.901 铝的硬钎焊
- 5) DPS 10.914 钢、镍和铜合金的钎焊
- 6) DPS 10.914 导管接头的自动钎焊
- 7) DPS 10.914—2 钛软管接头的自动钎焊
- 8) DPS 10.914—1 高强度导管接头的自动钎焊

D.3 俄罗斯（前苏联）钎焊标准

- ГОСТ 17325—79 钎焊；基本术语及定义
- ГОСТ 17349—79 钎焊；方法分类
- ГОСТ 19249—73 钎焊接头；基本型式和参数
- ГОСТ 1077—79E 氧乙炔焊、钎焊和预热用单焰万能炬。型式、基本参数、尺寸及一般技术要求
- ГОСТ 1429.0—77 锡铅钎料；对分析方法的一般要求
- ГОСТ 1429.1~15—77 锡铅钎料分析方法
- ГОСТ 11930.0—79 硬钎料；对分析方法的一般要求
- ГОСТ 2313—82 钎焊不可拆卸接头的图示
- ГОСТ 4515—81 铜磷钎料技术条件
- ГОСТ 14205—83 钎焊产品结构工艺性、术语及定义
- ГОСТ 11930.1~12—79 硬钎料分析方法
- ГОСТ 16882.1—71 银铜磷钎料；银含量测定方法
- ГОСТ 16882.2—71 银铜磷钎料；磷含量测定方法
- ГОСТ 16883.1—71 银铜锌钎料；银含量测定方法
- ГОСТ 16883.2—71 银铜锌钎料；铜含量测定方法
- ГОСТ 16883.3—71 银铜锌钎料；铅、铁、铋含量测定方法
- ГОСТ 19248—90 钎料；分类和符号
- ГОСТ 19250—73 钎剂；分类
- ГОСТ 19738—74 银钎料；牌号
- ГОСТ 20485—75 钎料；填缝性测定方法
- ГОСТ 20487—75 钎料；判断液体钎料影响被焊材料力学性能的试验方法
- ГОСТ 21547—76 钎焊；测定脱焊温度的方法
- ГОСТ 21548—76 钎焊；检查和测定化合物中间层厚度的方法
- ГОСТ 21549—76 钎焊；测定钎焊材料漫蚀的方法
- ГОСТ 23904—79 钎焊；测定材料被钎料润湿的方法
- ГОСТ 21930—76 锡铅钎料块；技术条件

- ГОСТ 21931—76 锡铅钎料；技术条件
 ГОСТ 23178—78 高温氟硼酸盐及硼卤化物钎剂；技术条件
 ГОСТ 23046—78 钎焊连接；冲击试验方法
 ГОСТ 23047—78 钎焊连接；拉伸试验方法
 ГОСТ 24167—80 钎焊；弯曲试验方法
 ГОСТ 24715—81 钎焊；质量检验方法
 ГОСТ 25200—82 钎焊接头；低温拉伸试验方法
 ГОСТ 26102—84 钎焊接头；高温拉伸试验方法
 ГОСТ 26126—84 钎焊接头；非破坏性检验；超声波检验方法
 ГОСТ 26446—85 钎焊；疲劳试验方法
 ГОСТ 28830—90 钎焊接头；拉伸与持久性试验方法

D.4 日本钎焊标准

- 1) JIS Z 3191—87 硬钎料铺展性试验方法
- 2) JIS Z 3197—86 松香型钎剂试验方法
- 3) JIS Z 3261—90 银基钎料
- 4) JIS Z 3262—86 黄铜钎料
- 5) JIS Z 3263—92 铝合金硬钎料及焊片
- 6) JIS Z 3264—90 磷铜钎料
- 7) JIS Z 3265—86 镍基钎料
- 8) JIS Z 3266—90 金基钎料
- 9) JIS Z 3267—86 钼基钎料
- 10) JIS Z 3268—88 真空钎焊用贵金属钎料
- 11) JIS Z 3281—88 铝及铝合金用软钎料
- 12) JIS Z 3282—86 软钎料
- 13) JIS Z 3283—86 松香钎料芯软钎料
- 14) JIS Z 3284—94 软钎料焊膏
- 15) JIS Z 3900—87 贵金属钎料取样方法
- 16) JIS Z 3901—88 银基钎料分析方法
- 17) JIS Z 3902—89 黄铜钎料分析方法

- 18) JIS Z 3903—88 磷铜钎料分析方法
- 19) JIS Z 3904—87 金基钎料分析方法
- 20) JIS Z 3905—87 镍基钎料分析方法
- 21) JIS Z 3906—90 钼基钎料分析方法
- 22) JIS Z 3910—90 锡铅钎料分析方法
- 23) JIS Z 3621—90 钎焊操作规程
- 24) JIS Z 3891—90 钎焊技术的检定方法及判定标准
- 25) JIS Z 3192—88 硬钎焊接头的拉伸和剪切试验方法
- 26) JIS Z 3194—84 钎焊接头的拉伸和剪切试样
- 27) JIS Z 3195—87 钎焊接头的湿式腐蚀试验方法
- 28) JIS Z 3196—90 钎焊接头的气体腐蚀试验方法

D.5 德国钎焊标准

- DIN 1912T1—76 熔焊、钎焊的图示法；焊接接头、焊接坡口
和焊缝的概念和名称
- DIN 1912T2—77 熔焊、钎焊的图示法；焊接位置、焊缝倾角、
焊缝转角
- DIN 1912T4—81 熔焊、钎焊的图示法；软钎焊及硬钎焊；软
钎焊及硬钎焊的概念和名称
- DIN 1913T5—87 熔焊、钎焊的图示法；符号、尺寸
- DIN 8505T1—79 钎焊；概况、概念
- DIN 8505T2—79 钎焊；钎焊方法的分类、概念
- DIN 8505T3—83 钎焊；按照能源方法分类、方法说明
- DIN 8514T1—78 钎焊性；概念
- DIN 8515T1—79 金属硬钎焊和高温钎焊接头缺陷；分类、名
称、定义
- DIN 8593T7—85 接合制造方法；钎焊；分类、细分类
- DIN 32527—84 熔焊、钎焊、切割及类似工艺用加热；定义及
方法
- DIN 8501—72 电烙铁

- DIN 32508—84 自身生成氧、氢的微型钎焊机；机械和气体工程要求；试验；标志
- DIN 32512—89 带气体容器的小型钎焊机；型式，安全技术要求，检验
- DIN 65228—86 航空和航天；钎焊机检验；金属构件硬钎焊
- DIN 1707—81 软钎料；成分，用途；交货技术条件
- DIN 8511T1—85 金属材料钎焊用钎剂；硬钎焊用钎剂
- DIN 8511T2—88 金属材料钎焊用钎剂；软钎焊用钎剂
- DIN 8513T1—79 硬钎料；铜基钎料；成分，应用；交货技术条件
- DIN 8513T2—79 硬钎料；含银量少于 20% 的钎料；成分，应用；交货技术条件
- DIN 8513T3—86 硬钎料；含银量最低为 20% 的钎料；成分，应用；交货技术条件
- DIN 8513T4—81 硬钎料；铝基钎料；成分，应用；交货技术条件
- DIN 8513T5—83 硬钎料；高温镍基钎料；成分，应用；交货技术条件；
- DIN 8516—67 松香基钎剂芯软钎料；成分，交货技术条件；检验
- DIN 8527T1—70 重金属软钎焊钎剂；检验
- DIN 8527T2—74 重金属软钎焊钎剂；要求
- DIN 65169—86 航空和航天；硬钎焊和高温钎焊件；设计准则
- DIN 65170—83 航空和航天；硬钎焊和高温钎焊件；交货技术条件
- DIN 8525T1—77 硬钎焊接头检验；拉伸试验
- DIN 8525T2—77 硬钎焊接头检验；剪切试验
- DIN 8525T3—86 高温钎焊接头试验；拉伸试验
- DIN 8526—77 软钎焊接头检验；剪切试验；持久剪切试验
- DIN 32506T1—81 软钎焊性试验；润湿试验
- DIN 32506T2—81 软钎焊性试验；铜合金试样的垂直浸渍试

验；检验；评定

DIN 32506T3—81 软钎焊性试验；镀锡试样的垂直浸渍试验；
检验；评定

DIN 32506T4—81 软钎焊性试验；润湿力测定；检验；评定

DIN 2856—86 毛细管钎焊管配件、连接尺寸和检验

DIN 3677—80 硬钎焊和软钎焊符号代号

DIN 4000T1—88 焊接填充金属、软钎料、硬钎料、钎剂和胶
粘剂的特性表

DIN 32513—90 软钎料膏成份、交货技术条件

DIN 32515—91 钎缝连接质量评定分级，硬钎焊和高温钎焊结
构件

D.6 欧洲标准 (EN)

EN24063—92 金属焊接、硬钎焊、软钎焊工艺名称和图纸上以
符号表示的参考数字。

Pv EN29455.5—92 软钎剂试验方法第五部分；铜镜试验。

D.7 英国钎焊标准

BS 499Pt.1—83 焊接、钎焊和热切割术语

BS 219—89 软钎料规程

BS 441—87 钎剂芯及实芯软钎料丝的订货要求

BS 1845—84 硬钎焊用填充金属规范

BS 5245—90 不锈钢软钎焊接头用磷酸基钎剂

BS 1723—86 硬钎焊

BS 1723Pt.1—86 硬钎焊规范

BS 1723Pt.2—86 硬钎焊指南

BS 1723Pt.4—86 特定硬钎焊工艺评定试验与焊工考核方法

BS 1724—90 青铜气焊

BS 1723Pt.3—86 硬钎焊 无损检测及破坏性试验方法

BS 5625—80 软钎焊钎剂的选购要求与试验方法

BS 2011Pt.2.1Ta—89 环境试验第 2.1 部分：钎焊性试验（显平衡法）

BS 3338—83 锡及锡合金取样及分析

D.8 法国钎焊标准

- NF A81-000—81 焊接、钎接、硬钎焊、定义、对成批供应的产品评价及验收条件的分级
- NF A89-410—77 钎焊性；带可变间隙试样的定义和应用
- NF E04-021—78 图样上焊接与钎焊的表示方法
- NF A81-003—81 软钎焊和硬钎焊用品；验收条件
- NF A81-004—81 钎焊用粉状或气态钎剂；验收条件
- NF A81-360—82 硬钎焊用钎剂；符号代码
- NF A81-361—77 钎焊用填充金属符号代码
- NF A81-362—79 钎焊用填充金属；分类；编码；规格
- NF A81-410—84 铝及铝合金；钎料的基料及选择
- NF A89-421—79 钎料；钢、铸铁和其它金属常用连接强度的测定
- NF A89-420—77 硬钎焊和软钎焊钎缝的试验方法

附录 E 我国部分钎料及钎焊专利

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
1	铝-铜金属管接头高温钎焊及钎料、钎剂	GK85102980	航天部首都机械厂奚品球等
2	钎焊复合压块工具	GK85104732	通用电气公司(美国)奈迈耶
3	难熔金属的预刷镀钎焊法	GK85105468	交通部公路科学研究所王豫等
4	铜-磷-锡-稀土焊丝	GK85109459	沈阳有色金属压延厂石善龙等
5	半导体致冷器焊料	ZL85108316	西北大学钟广学
6	稀土锡铝合金焊料及制作方法	GK85108518	郴州电光源焊料厂谢郴民等
7	超导带(线)材的扩散焊接方法及其装置	GK85109182	中科院物理所李世恕等
8	软钎焊焊剂及其配方	GK86104668	华北计算技术研究所江锡全等
9	钛-铜-镍钎焊填充金属	GK87100797	联合工艺公司(美国)
10	添加表面活性剂改进低熔点焊料的润湿性	GK87102907	联合有限公司(美国)
11	共晶钎料和钎接方法	GK87103134	施卢默电子有限公司(英国)
12	金刚石复合片钻头的焊接方法	GK86103437	地矿部探矿工程研究所叶玉屏等
13	铅基合金焊料	GK87105076	沈阳黄金专科学校李安国等
14	液化钎焊方法	GK87106580	柳州自行车厂杨瑞全

(续)

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
15	空气热交换器用钎焊材料及钎剂	GK87102086	上海材料研究所唐仁辉等
16	一种稀土锡铅焊料	GK87100127	天台县焊接材料厂陈达光等
17	用于光导纤维焊接的合金焊料	GK87100342	王其彪
18	铝铜导管套接钎焊方法	GK88105479	上海新华无线电厂王锡盛
19	单层钎焊管及其制造方法	CN1033449A	冶金部钢铁研究总院刘怀文等
20	多功能电烙铁	ZL87206992	孙万增
21	氩气保护钎焊钳	GK87207500·1	上钢三厂孙振华
22	钎焊金刚石钻头用模具	GK87213614	地矿部探矿工程研究所罗伟堂等
23	诱锡烙铁头	CN2030522U	张远民
24	火焰钎焊机配气装置	CN2037284U	陈德正
25	含有稀土元素的抗氧化铅锡焊料	GK85100578	东南大学吴庆申
26	铜-磷-锡-稀土焊丝及其加工方法	CN1004057B	国营惠丰机械厂杜绍基
29	无银焊料封接陶瓷和柯伐、陶瓷和铜的固态压力扩散焊	GK85107155	航天部 510 所(兰州)王新魂
30	一种无银低熔点铜基钎料合金配方	GK87100098	四川省冶金研究所梅鸿志等
31	钎焊复合制品工具及其制造方法	GK86104661	通用电气公司(美国)

(续)

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
32	铝件的钎焊方法	GK86100958	关东冶金工业株式会社 (日本) 高桥进
33	纯铁与黄铜的氢气保护 镀层扩散精密焊接	GK87105422	西安石油勘探仪器总厂 肖平
34	钎焊沉淀钎剂和沉淀钎 料的方法	CN1044420A	古河电气工业株式会社 (日本) 福永隆男等
35	低熔点铝钎焊料	CN1046110A	冯国安
36	自行车架高频内热式钎 焊法及装置	CN1046302A	上海市通用高频设备厂 周军琪
37	离子轰击钎焊	CN1046692A	太原工业大学韩廷华等
38	一种印刷线路板锡焊用 助焊剂	CN1047238A	晨光化工研究院一分院 杨燕等
39	适用元件组装和返修用 掺铜低熔点焊料	CN1047639A	美国国际商用机器公司 丹尼尔等
40	钎料、钎剂及其用途	CN1049624A	国家建筑工业局晶体研 究所常忠敏等
41	锌锡合金焊料	CN1050150	海玉涛
42	改进的含氟化氢锡的钎 料膏组合物	CN1050151A	美国纳慕杜邦公司特克 尔
43	一种铜基多元合金钎料	CN1010754B	浙江大学材料制造厂朱 和瑞等
44	超塑成形/扩散焊曲面 夹层复合结构	CN1011129B	马克顿耐尔道格拉斯公 司(美国)
45	启动机电枢的喷涂重熔 电阻钎焊工艺	GK86102511	上海汽车电机厂秦宗彦
46	树脂型软钎焊助焊剂	GK85102604	福建师范大学丁友真等
47	物品的钎焊装置	GK86104969	近藤权士(日本)

(续)

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
48	铜-磷-锡-稀土焊丝及其加工方法	GK85109459	沈阳有色金属压延厂石善龙
49	一种氟化物钎剂与一种铝硅型钎料	GK87101020	轻工业部上海焊接技术研究所陈根宝等
50	铝及铝合金软钎料助焊剂	CN1035073A	福建师范大学丁友真等
51	硬质合金和金刚石复合片用钎剂	GK89100555	西安石油学院 张超
52	钎焊薄板用部分凝固焊料及制作方法	CN1038611A	东南大学王楠等
53	发动机散热器用低锡铅基钎焊料和焊条材料	CN1039751A	上海材料研究所唐仁辉等
54	铝及铝合金软钎焊助焊剂及其用途	CN1016049B	福建师范大学
55	一种印刷线路板软钎焊用钎剂	CN1017324B	晨光化工研究院一分院
56	一种低锡高效焊料	CN104950A	成都市焊料厂刘国芳
57	热交换器管芯孔板与芯管钎焊机	CN2104722U	吴秉行
58	新型吸锡器	CN2107343U	渠敬真
59	多工位钎焊机	CN2107966U	上海工程技术大学
60	自动控温烙铁	CN2115853U	罗刚
61	纯金饰品用金焊膏	GK90108072.1	昆明贵金属研究所刘泽光等
62	纯金饰品用金基钎焊料	GK90108072.1	刘泽光等
63	一种印刷线路软钎焊用钎剂	ZL89105911.3	化学工业部晨光化工研究院

(续)

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
64	焊铝薄板用部分凝固焊料及制作方法	ZL89102401.8	东南大学
65	一种用于钎焊部件的钎剂涂敷方法	GK88103674.9	关东冶金工业株式会社 (日本)
66	铜基焊膏及铜制品的钎焊方法	ZL91101648.1	刘泽光等
67	银基焊膏及银饰品的钎焊方法	ZL91101649.X	刘泽光等
68	连续加压升温无保护气钎扩散焊工艺	CN1065616A	浙江大学
69	钎焊金属表面的方法	CN1066014A	艾尔坎国际有限公司 (加拿大)
70	一种无银铜基钎料	CN1066999A	江苏工学院
71	在空气中钎焊铝热交换器的方法	CN1067199A	张宗江
72	铝硅钎料真空钎焊异种材料的工艺方法	ZL9100629.4	北京核仪器厂
73	可焊陶瓷的 Sn 基活性软钎料	ZL92106127.7	中科院金属研究所沈爱平等
74	可焊接陶瓷的耐氧化型活性金属钎料	ZL92106103.X	中科院金属研究所沈爱平等
75	电磁感应加热真空除气钎焊设备	ZL93228273.3	田峰
76	电热钎焊枪	ZL93234622.7	国营 710 厂肖尚俊
77	聚晶金刚石复合片专用真空钎焊机	ZL93230860.6	石油大学(华东)
78	金锡钎料的制造方法	ZL92102647.1	昆明贵金属所

(续)

序号	专利名称	专利号(或公开号)	申请人或单位
79	动态的钎料膏成分	CN1098346A	纳幕尔杜邦公司(美国)
80	锡焊锅	CN1102147A	千住金属工业株式会社(日本)
81	一种 Ni-P-Cu 系镍基焊料	CN1102150A	浙江省冶金所
82	一种低熔点稀土软钎焊料	CN1102797A	浦瑞廷
83	一种多用途铸件补焊用软钎焊料	CN1102798A	浦瑞廷
84	一种低锡高效焊料	CN1104950A	株式会社三社电机制作所(日本)
85	银钎焊膏	CN1105616A	广东五华县焊接材料厂 江立新
86	钎焊机电源充电电流监视器	ZL94200221.0	李杰
87	钎焊机电源电压监视机	ZL94200267.9	李杰
88	散热器主片火焰钎焊装置	ZL94203272.1	陈德正
89	金刚石刀锯电阻钎焊机	ZL94211894.4	熊家寅

附录 F 中国焊接学会钎焊专业委员会 团体会员单位及联系人名单

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
1	航天工业总公司 703 所	毛建英	北京市 9200 信箱 73 分箱第四事业部	100076	68380363
2	北京航空材料研究院	李晓红	北京市 81 信箱 20 分箱	100095	62546714
3	北京航空工艺研究所	张奕琦	北京市 340 信箱 102 室	100024	65761731- 2267
4	北京航空航天大学	康 慧	北京市学院路 37 号北航焊接教研室	100083	62017251- 7702(7712)
5	冶金部钢铁研究 总院	何志勇	北京市学院南路 76 号钢铁研究总 院焊接室	100081	62182838
6	北京有色金属研 究总院	楚建新	北京新街口外大 街 2 号有色总院 201 室	100088	62014488- 2128
7	北京大学	高 苏	北京市北京大学 化学楼 S453 号	100871	62751496
8	清华大学	吴爱萍	北京市清华大学 焊接教研室	100084	62784578
9	北京有色金属与 稀土应用所	马英麟	北京市安定门外 大羊坊	100012	64232220-25
10	北京华翔机电技 术联合公司	刘家仁	北京市丰台区南 三环路草桥	100054	63015187
11	航天工业总公司 二院 23 所	张泽平	北京市 142 信箱 203 分箱 30 号	100854	68387764

(续)

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
12	北京广播器材厂	王占梅	北京市黄寺大街 23号工艺处	100011	62018844
13	北京市怀柔县焊接材料厂	卢通成	北京市怀柔县雁 栖工业区(乐园 庄)	101407	69625962 69667618
14	北京首都航天机械公司	佟琦	北京市34信箱 12分箱	100076	68750236
15	北京航石科技公司	江海	北京市丰台区南 苑东高地三角地 40栋67号	100076	68381284
16	航天工业总公司 二院699厂	奚瑾	北京市132信箱 68分箱	100039	68385935
17	北京雪花集团公司 压缩机分厂	王增宏	北京永外贾家花 园15号冲压车间	100075	67612244-209
18	天津大学	候文考	天津市卫津路 92号天津大学焊 接教研室	300072	3359116-2844
19	上海交通大学	姚舜	上海市华山路 1954号上海交大 焊接教研室	200030	4310310-2661 62812426
20	上海钢铁研究所	王哨东	上海市泰和路 1001号上钢研所 快淬分所	200940	56840123 2663
21	上海中英合资斯 米克焊材有限公司	徐琦	上海市浦东上南 路3737号	200124	58424017
22	上海斯米克焊材 有限公司有色焊材 厂	高兴龙	上海崇明岛下三 星镇	202155	59331092

(续)

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
23	上海沪光焊接研究所	金美华	上海市湖北路147号	200001	63222398
24	上海大华新型钎焊材料厂	张长华	上海市华山路1389弄31号	200052	62830061
25	上海金实汽车热交换器厂	沈家龙	上海市金山卫纬五路石化汽车运输公司纬五路车场	200540	57931133-31
26	上海金钟焊接器材有限公司	张翰钦	上海市徐汇区天钥桥路380弄6号	200030	64877170 64284986
27	上海宝山罗店焊接材料厂	罗成林	上海市宝山区罗店镇苗圃路16号	201908	56862054
28	上海客运轮船公司	晏国良	上海市吴淞淞浦路100号机务科	200940	53209550
29	上海胶带总厂南翔经营服务部	徐锡琪	上海市南翔镇真南路3525号	201802	59122750
30	上海有色合金线材厂	梅品修	上海市中山西路2027号	200233	64396621
31	杭州制氧机集团公司	翟宗仁	杭州市东新路90号制氧集团公司工艺所	310004	5372001-2369
32	杭州高联特种焊接器材厂	蒋晓莉	杭州市留下镇古灵慈桥2号	310023	5129152
33	杭州环球钎焊材料厂	莫金标	浙江杭州市电厂路康桥	310015	8041536
34	金华市焊接材料厂	许桂法	浙江省金华市双溪西路西关	321016	2372271

(续)

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
35	浙江省仙居贵金属实业公司	李 宜	浙江省仙居县城 关镇管山	317300	7772910
36	电子部十四研究所	崔殿亨	南京市 1316 信 箱 41 分箱	210013	3344000-2590
37	镇江星辰焊料有限公司	郭道林	江苏扬中市联合 镇栏杆桥	212212	8426588
38	扬中联合特种钎料厂	陈学智	江苏扬中市天后 宫镇	212212	8421353
39	扬中飞达实业公司焊料厂	陈定国	江苏扬中市公信 桥 76 号	212212	8421671
40	常熟市华银焊料有限责任公司	顾文华	江苏常熟市碧溪 镇碧溪中路 76 号	215513	2691045
41	无锡市群力有色金属材料公司	丁克俭	江苏无锡市惠钱 路 202 号	214035	3700951
42	无锡大桥港荣焊接有限公司	王莉君	江苏锡山市东峰 镇金南路 12 号	214121	7711984 7711982-27
43	镇江长江焊接材料厂	汪先华	江苏镇江市乔家 门 (省煤田五队)	212111	5722176
44	镇江新型钎料厂	李开轩	江苏镇江市林隐 路 50 号	212001	4425250
45	华东船舶工业学院	邹家生	江苏镇江市华东 船舶工业学院焊接 及材料工程系	212003	4422290
46	宜兴市周铁有色金属焊接材料厂	陈铁松	江苏宜兴市周铁 镇工会大楼 201 室	214261	7501940
47	东光县焊接材料厂	李嘉珍	河北省东光县城 东工业区	061600	7727093

(续)

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
48	郑州机械研究所	乔培新	郑州市中原路 101号	450052	7931613
49	许昌市中州焊料 厂	董永福	河南省许昌市长 葛县增付庙	461501	6651998
50	郑州市金银漆器 工艺厂	焦铁聚	河南省郑州市颖 河路47号	450000	
51	西安航空发动机 公司	任耀文	西安市13号信 箱87分箱	710021	661388-52382
52	西北工业大学	邹一心	西安市西北工业 大学焊接教研室	710072	8493497
53	西安交通大学	张新平	西安市咸宁路 28号西安交大焊 接所	710049	3235011 3268608
54	西北有色金属研 究院	毛忠汉	西安市龙首北路 西段	710016	6263076
55	西安市邦林实业 有限公司	夏渤海	西安市育才路二 号	710061	5247079
56	航天工业总公司 五院504所	韩廷华	西安市165信箱	710000	5290500-3409
57	航空工业总公司 618所	梁俊民	西安市41号信 箱工艺室	710061	5262864-3074
58	电子部39所	郑建生	西安市84信箱 37分箱	710065	8220630
59	宜昌猴王集团公 司	薛峰	宜昌市夷陵路 344号猴王集团公 司焊接材料所	443003	6351420

(续)

序号	单位名称	联系人	通讯地址	邮编	电话
60	哈尔滨工业大学	方洪渊	哈尔滨市哈尔滨工业大学九系焊接教研室	150001	3621000-3951
61	哈尔滨焊接研究所	薛松柏	哈尔滨市和兴路110号	150080	6336694-248
62	中科院金属研究所	何治经	沈阳市文化路72号金属研究所焊接室	110015	3843531-245
63	沈阳造币厂	郝和铭	沈阳市大东路138号沈阳造币厂	110042	4313906-6414
64	吉林省大通焊接技术开发公司	郗景华	吉林长春市南岭大街236号	130022	5689394
65	吉林工业大学	万传庚	长春市斯大林大街114号吉林工大焊接教研室	130025	5690875
66	湖南大学	虞觉奇	长沙市岳麓山湖南大学机械系	410082	2223784
67	湖南省三一集团有限公司	肖建华	湖南省涟源市人民东路三一集团焊材总厂	417100	422151 424763
68	四川省冶金研究所	张振福	成都市人民北路一段12号	610081	3332086
69	成都市焊接材料研究所	胥德光	成都市外南永丰路4号	610041	5187294-3639
70	甘肃工业大学	陈学定	兰州市甘肃工业大学焊接所	730050	2337919
71	昆明贵金属研究所	刘泽光	昆明市85号信箱	650221	5155368-3029

(续)

序号	单位名称	联系人	通 讯 地 址	邮 编	电 话
72	广州有色金属研究院	卫国强	广州市五山广州有色院焊接中心	510651	7705629-6131
73	阳江市华阳汽车空调设备有限公司	顾阅春	广东阳江市沿江路61号	529500	3221361
74	顺德市马岗银焊料厂	罗宇恒	广东顺德市桂洲镇马岗新工业区	528305	8885071
75	深圳恒基焊料厂	刘庆捷	广东深圳市田背三路田苑新村47号101	518020	5619959
76	深圳宝安安华焊接材料厂	李华韩	广东深圳市宝安区新城26区裕安路	518101	7809704
77	深圳亚金特种焊接材料有限公司	王漪南	广东深圳市福星南路福星花园大厦裙楼4楼16室	518033	3606643
78	广东五华县焊接材料厂	江竞操	广东五华县郭田镇	514429	4251381
79	北京市通县康华热交换器厂	朱俊杰	北京市通县探矿路	101100	69544117
80	上海工程技术大学	顾曾迪	上海市仙霞路350号	200335	62597051
81	日照市桑托尔钎焊材料有限公司	王立文	山东日照市黄海一路44号	276826	8339325
82	青岛海尔集团	赵 越	山东青岛市小白干路165号海尔冰箱事业部质管处	266032	5618888-383

参 考 文 献

- 1 邹僖. 钎焊 (第二版) 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 任耀文. 真空钎焊工艺. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 3 张启运, 庄鸿寿主编. 钎焊手册. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 4 美国焊接学会钎焊委员会编. 钎焊手册 (修订第三版). 曹雄夫译. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 5 印有胜. 钎焊手册. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1989
- 6 虞觉奇, 易文质, 陈邦迪. 二元合金状态图. 陈宏鉴编译. 上海科学技术出版社, 1987
- 7 Melvin M, Schwartz Ed. Source book on brazing and brazing technology. American Society for Metals. Metals Park, Ohio 44073, ISBN 0-87170-099-9
- 8 R. P. 普拉萨德著. 表面安装技术—原理和实践. 丁明清, 张伦译. 北京: 科学出版社, 1994
- 9 (美) 美国金属学会编. 金属手册第六卷 (第九版). 黄静文等译. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 10 (美) 美国焊接学会编. 焊接手册: 第七版第二卷 (焊接方法). 黄静文等译. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 11 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册第一卷 (焊接方法及设备). 北京: 机械工业出版社, 1993
- 12 俞尚知主编. 焊接工艺人员手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1991
- 13 傅积和, 孙玉林主编. 焊接数据资料手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 14 北京市技术协作委员会编. 实用焊接手册. 北京: 水利电力出版社, 1993
- 15 中国焊接协会编. 焊接标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 1997
- 16 曾乐. 精密焊接. 上海: 上海科学技术出版社, 1996
- 17 黄文哲主编. 焊工手册第二版. 北京: 机械工业出版社, 1991

- 18 机械工业部编. 焊接材料产品样本. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 19 金德宣. 微电子焊接技术. 北京: 电子工业出版社, 1990
- 20 加藤丈夫. 溶接技术の展望-ろう付. 轻金属溶接, 1992, 10
- 21 BRAINB. BONNER, DIWAKAR GARG AND PAUL T. KILHEFNER. Brazing in a Nitrogen-based Atmosphere Offers Advantages. *Welding Journal*, 1993, 10
- 22 J. E. RAMIREZ AND S. LIU. Diffusion Brazing in the Nickel-Boron System. *Welding Journal*, 1992, 10
- 23 H. KAWASE, T. TAKEMOTO, M. ASANO, I. KAWAKATSU AND K. LIU. Study of a Method for Evaluating the Brazability of Aluminum Sheet. *Welding Journal*, 1989, 10
- 24 丁克俭. 国外软钎料、钎剂产品概况. 见锡铅焊料技术研讨会论文集, 1994
- 25 马鑫等. Sn-Zn-In 软钎料合金初步研究. 见锡铅焊料技术研讨会论文集, 1994
- 26 宣大荣. 超精细电路组装 SMD 对膏状钎料的要求. 见第二届表面安装技术与片式元器件学术会议论文集, 1993. 10, 西安
- 27 刘国芳等. 焊锡膏的性能与应用. 见第三届表面安装技术与片式元器件学术会议论文集, 1995. 9, 太原
- 28 方洪渊, 范富华. 单板搭接钎焊接头的应力分析. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1996. 10,
- 29 华自圭等. 中国古代天然焊药初探. 见第五届全国焊接学术会议论文集, 1986, 9
- 30 张新平等. 非晶态钎料研究及应用进展. 见第八届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1995. 5, 大庸
- 31 方洪渊. 国外软钎焊技术发展动态. 见第八届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1995. 5, 大庸
- 32 马鑫等. 90 年代国外钎焊技术发展动态. 见第八届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1995. 5, 大庸

- 33 Manko. H. H. Solder and Soldering. 2nd ed.. New York: McGraw-Hill, 1984
- 34 P. J. Kay and C. A. Makay. 阻碍扩散的阻挡层. 方洪渊译. 电子工艺技术, 1985, 3
- 35 乔芝郁等. 无铅钎料研究的进展. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1996, 10
- 36 薛松柏. 高强度锡基软钎料的研究. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1996, 10
- 37 张超. 电子工业用锡铅基软钎料. 电子元器件引线可焊性资料汇编, 江苏省电子工业综合研究所, 1982
- 38 田中吉和. 钎焊材料. 电子技术, 1980, 22 (7): 12
- 39 田中吉和. 钎焊理论与机理. 电子技术, 1980, 22 (7): 2
- 40 陈定华等. 水溶性有机软钎剂的初步实验研究. 见第五届全国焊接学术会议论文集, 1986, 9
- 41 易蕴琛等. 活化物质对松香钎剂水溶性电阻率的影响规律. 见第六届全国焊接学术会议论文集, 1990, 5
- 42 丁克俭等. 含 Bi 的低熔点钎料的试验研究. 见第七届全国焊接学术会议论文集, 1993, 6
- 43 D. C. BEFFERMAN. Soldering Creams for Electronic Surface Mounted Devices. Welding Journal, 1986, 1
- 44 Q YIYU, F. HONGYUAN, C. DINFHUA, F. FUHUA. A Study of the Growth of Copper Intermetallic Compounds and Solderability of Lead Wires. Brazing & Soldering, No. 13, 1987. 8
- 45 S. F. DIRNFELD AND J. J. RAMON. Microstructure Investigation of Copper-Tin Intermetallics and the Influence of Layer Thickness on Shear Strength. Welding Journal, 1985. 1
- 46 肖淦凡等. 铝软钎焊接头抗腐蚀性的研究. 焊接, 1985. 9
- 47 钱乙余等. 铝软钎焊时钎料元素的化学选择吸附作用. 见第五届全国焊接学术会议论文集, 1986. 9
- 48 张启运等. 铝的软钎焊. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会

论文集, 1996, 10

- 49 W. L. FALKE, L. A. NEUMEIER AND A. Y. LEE. A Soldering System for Aluminum. *Welding Journal*, 1985. 1
- 50 张启运. 铝钎焊时钎剂中活性元素在铝母材表面的还原析出. 见第七届全国焊接学术会议论文集, 1993. 6
- 51 韩丽霞等. 铝软钎剂组元作用的试验研究. 见第六届全国焊接学术会议论文集, 1990. 5
- 52 钱乙余等. 国内外钎焊与扩散焊的现状与发展. 见第八届全国焊接学术会议论文集, 1997. 11
- 53 张启运等. 软钎焊材料工业的现状与进展. 见第八届全国焊接学术会议论文集, 1997. 11
- 54 陈定华等. 铝波导钎前氩弧点焊点固工艺及设备研制. *电子工艺技术*, 1983. 9
- 55 庄鸿寿等. 无银铜磷锡钎料的研究. 见第六届全国焊接学术会议论文集, 1990. 5
- 56 黄维德等. 新型 801 号铜基钎料的研究. 见第六届全国焊接学术会议论文集, 1990. 5
- 57 何志勇等. 合金元素对 Ag-Cu-Sn 钎料性能的影响. 见第七届全国焊接学术会议论文集, 1993. 6
- 58 龙伟民等. Cu-P-Sn 钎料的研究. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1996. 10
- 59 虞觉奇等. Y-2 中温锌基钎料的研究. 见第八届全国焊接学术会议论文集, 1997. 11
- 60 乔培新等. 不锈钢组合件钎焊用铜基钎料研究. 见第八届全国焊接学术会议论文集, 1997. 11
- 61 高湘芝等. 自行车车架的火焰钎焊. *焊接*, 1984. 3
- 62 白向钰等. 硬质合金钎焊接头的强化途径探讨. 见第七届全国焊接学术会议论文集, 1993. 6
- 63 王红海等. 不锈钢的黄铜钎-熔焊及在深冷设备上的应用. *焊接*, 1986. 11

- 64 乔培新等. 不锈钢组合件钎焊用无银钎料及其钎焊工艺研究. 见第九届全国钎焊与扩散焊技术交流会论文集, 1996. 10
- 65 E. LUGSCHEIDER AND T. COSDCK. High Temperature Brazing of Stainless Steel with Low-Phosphorus Nickel-based Filler Metal. Welding Journal, 1988. 10
- 66 王涛等译. 采用铜-磷-锡焊膏进行铜与低碳钢或不锈钢的硬钎焊. 国外焊接, 1987. 4
- 67 杨生昌. 大型发电机转子线圈接头电阻钎焊. 见第七届全国焊接学术会议论文集, 1993. 6
- 68 范富华等. 精密波导件接触反应钎焊试验研究. 材料科学与工艺, 1996. 9
- 69 刁明富. 精密零件氢气保护扩散钎焊工艺研究. 见第六届全国焊接学术会议论文集, 1990. 5
- 70 刁明富. 大型复杂微波器件的精密钎焊工艺. 见第八届全国焊接学术会议论文集, 1997. 11
- 71 桑洪. 在氮气保护炉中使用无腐蚀钎剂的铝钎焊. 焊接, 1984. 3
- 72 李国柱. 氟化物钎剂在铝波导大面积拼焊的应用. 焊接, 1985. 8
- 73 高念宗等. 铝钎焊接头的腐蚀问题. 焊接, 1986. 4
- 74 稻林芳人等. アルミニウム制熱交換器の真空ろう付技術. 轻金属溶接, 1993. 7
- 75 川 濂寛. アルミニウムのろう付用材料について. 轻金属溶接, 1985. 9
- 76 岩崎省介等. アルミニウムの盐浴浸漬ろう付. 轻金属溶接, 1985. 12
- 77 重 隆司等. アルミニウム合金の真空ろう付. 轻金属溶接, 1985. 10
- 78 杉原 淳等. NOCOLOK ろう付プロセスについて. 轻金属溶接, 1985. 11