

内燃机基础零部件性能提高研究与开发

上海高斯通 何才田

摘要：本文介绍了三种滚压硬化技术在内燃机关键零部件制造中的应用与试验。采用该技术制造的内燃机气阀，一次性通过 MAN Diesel & Turbo 公司的产品质量认证。在缸套、活塞头、曲轴、连杆制造中采用滚压硬化技术并进行试验，都取得了很好的效果，能有效减少燃烧室零部件积碳，提高了零部件可靠性，延长使用寿命，为进一步提高内燃机性能打下基础。

关键词：滚压；硬化；可靠性

0 前言

随着能源日趋紧张和大气污染的日益加剧，内燃机制造行业正面临着新一轮的创新和变革。一方面，最高爆发压力 200bar、平均有效压力 25bar 的柴油机已成为当前市场上的主流产品。另一方面，替代燃料（如天然气、页岩气、瓦斯气、沼气、秸秆气、可燃工业尾气及植物燃料等）的开发与应用也正成为全球各大内燃机制造企业、研发机构投入大量人力物力进行研发的主要课题。这些都对内燃机关键零部件的性能和制造提出更高要求，上海高斯通船舶配件有限公司（下称高斯通公司）在近十年的生产实践中研发出三种滚压硬化专利技术：常温表面滚压、常温深度滚压、高温深度滚压，在内燃机关键零部件制造中应用，不同的滚压硬化工艺并进行实机试验验证，获得了显著效果，各项性能指标得到了大幅度提高。

1 滚压技术现状

与常规机械加工（车、铣、刨、磨）不同，滚压是一种无切削加工技术。常规机械加工是以切削为主要手段、达到我们想要的几何形状为目的，而滚压技术则主要是以硬化工艺、提高零件各项

性能为目的。滚压技术不是一种最新发明的机械加工技术，在冶金行业轧辊表面堆焊后进行滚压，提高堆焊表面硬度，取得了非常好效果，使用寿命提高了三倍以上，得到了广泛应用。近几年，国内外有很多企业在研究开发能适应各种产品的滚压设备和滚压工具，取得了一定的成绩，特别在中小件产品内孔滚压和轴类产品外表面滚压已有专业制造设备和工具可以选用。据了解，由于目前市场上滚压设备和工具，只能适应简单工件表面应用。而对一些相对复杂的工件表面，还没有合适的设备和工具。为此，高斯通公司针对这些特殊需求，进行了研究和开发。

2 滚压硬化技术在气阀制造中的应用

气阀是内燃机关键零件之一，运行环境极为恶劣，长期承受高温、高压、废气腐蚀、交变应力和频繁冲击等各种负荷，其质量可靠性直接影响内燃机运行，随着内燃机各项性能指标提高及石油资源紧张，低价重油和各种可燃气体应用，燃烧排气温度进一步提高，这对排气阀质量和可靠性提出更高的要求。高斯通公司自行研发成功三种滚压技术，在气阀制造过程中得到有机的结合

和广泛的应用，取得了很好的效果。

2.1 气阀堆焊合金层常温深度滚压

2004 年 12 月 18 日，高斯通公司与上海沪东重机签订二冲程柴油机排气阀国产化合作开发协议，沪东重机提供一套 MAN 公司新一代 Duraspindle 排气阀生产技术文件，文件要求对气阀密封面堆焊合金层进行常温深度滚压。高斯通公司承担滚压设备研发、设计、制造。2006 年 10 月，首台阀面滚压设备通过专家评审。根据首台设备实际使用情况，对设备进行了改进设计和定型生产。2008 年 9 月，MAN 公司对高斯通公司进行排气阀制造工艺过程审查认可时，认可专家给予高度赞扬，并一次性通过堆

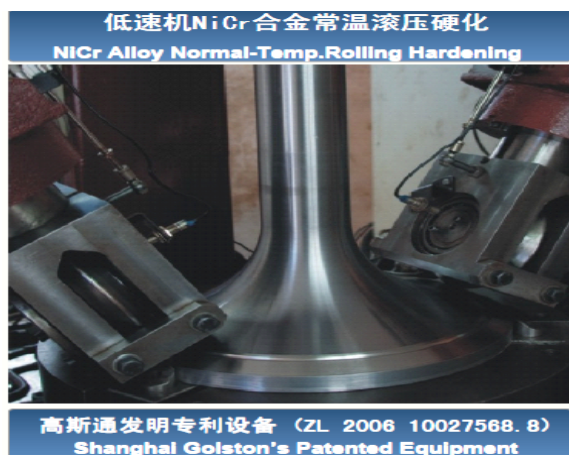


图1 阀面滚压设备

经阀面滚压设备制造的 S50MC 柴油机排气阀，基材是 SNCrW，密封面堆焊材料是美国国际超合金公司生产的 Inconel 718 镍铬铁高温合金。此材料在堆焊后未经过滚压硬化处理时的硬度在 HV260~280 之间，比较软。而经过多道深度滚压和时效热处理，改变了原有金相组织，其表面硬度可超过 HV700 以上。

随机选送样件给 MAN 公司检测，送检实物表面硬度大大超过 MAN 公司 HV540~580 的技术要求。表面硬度超过 HV720，距表面 1.5mm 处为 HV480（见图 2），一次性通过 MAN 公司新一代 Duraspindle 排气阀合格制造供应商认可。

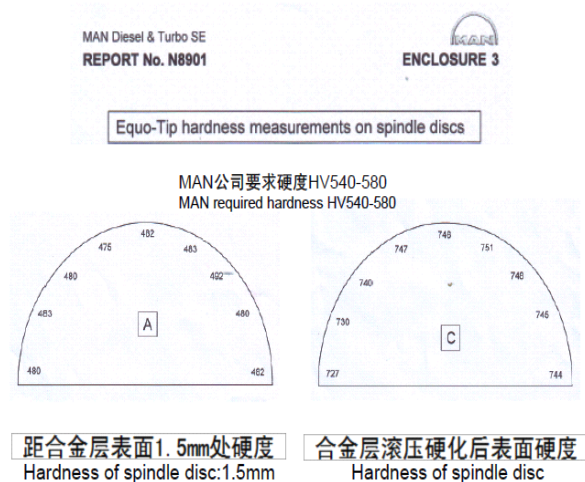


图2 堆焊层硬度监测

采用滚压硬化技术生产的排气阀可完全替代整体 Nimonic80 高温合金气阀，不但产品制造成本下降 2/3 以上，还提高了耐高温、耐腐蚀、耐磨性能。据 MAN 公司介绍，新一代 Duraspindle 气阀在日本某航运公司的一台 S46MC 柴油机上装机运行，实际使用寿命超过 50000 小时。还要说明一下，常温深度滚压技术不是高斯通公司发明的，它本是 MAN 公司的技术要求。高斯通公司不过是为满足这一要求做了一些工作而已。

2.2 Stellite 硬质合金高温深度滚压

美国人在 1900 年发明 Stellite 合金，它是一种能耐各种类型磨损和腐蚀的抗高温氧化硬质合金，在航空、航海、汽车、高温化工等工业得到了广泛应用。随着内燃机性能指标提高，特别是船用柴油机燃烧劣质重油及气体发动机研发

成功，常规堆焊 Stellite 合金排气阀已经无法满足使用要求。上世纪八十至九十年代，世界大部分企业都采用镍铬高温合金材料来生产排气阀，虽然质量上取得了很好的效果，但产品制造成本提高了 3~4 倍。众所周知，气阀损坏主要是发生在密封面，如果能提高密封面质量，就不需要使用这么昂贵的材料。高斯通公司从 2001 年开始研究进一步提高 Stellite 合金的耐高温、耐磨、耐腐蚀、抗氧化性能，投入了大量的人力物力，经过反复试验和从失败中吸取经验，2004 年底设计制造出第一台阀面高温滚压设备（图 3）。

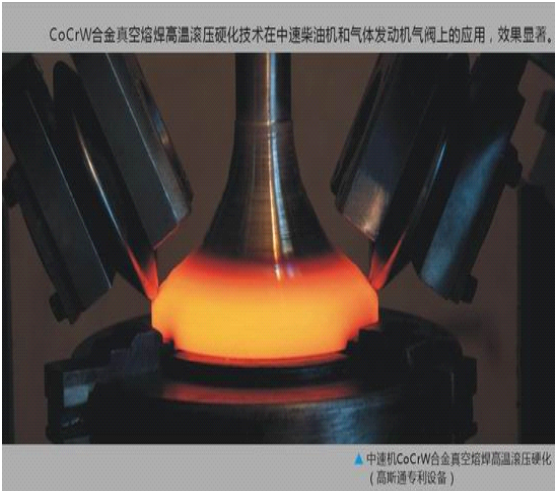
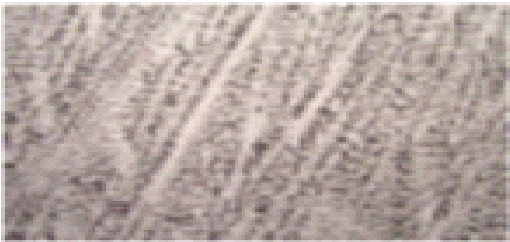


图 3 第一台阀面高温滚压设备

高温滚压后，堆焊合金层的金相组织发生显著改变。滚压前，金相组织为长树枝状分布的碳化物、晶粒度 9 级，滚压后，金相组织改变为均匀网状分布碳化物、晶粒度 12 级（图 4）。



晶粒度 9 级



晶粒度 12 级

图 4 金相组织改变对比图

高温滚压后，堆焊合金层硬度显著提高。表 1 为焊层硬度梯度值，说明硬度提高不只是合金层表面，而是整体合金层。

表 1 堆焊阀面的硬度梯度（Stellite12#）

离表面 距离 mm	滚压处理		未滚压处理	
	HV	HRC	HV	HRC
0.1	653	57.9	443	44.7
0.3	598	55.1	447	45.1
0.5	623	56.5	428	43.4
0.7	623	56.5	413	42.1
0.9	623	56.5	398	40.6
1.1	598	55.1	385	39.3
1.3	655	58.1	381	38.8
1.5	664	58.5	370	37.7
1.7	629	56.8	370	37.7
1.9	620	56.2	346	35.5
2.1	559	53.0	326	32.8
2.3	344	34.9	325	32.8

根据气阀高温使用特性，我们进行了高温硬度变化测试，选用了气阀堆焊最普遍使用的 Stellite 合金 6 号和 12 号做试验，然后分别在 500，600，700，800，900 度保温 0.4 小时，测取高温硬度。结果表明经过高温深度滚压后，材料金相组织更加致密，晶粒细化。根据表 2 可以看出高温硬度提高 300 度以上。

这样通过滚压硬化后 Stellite 合金高温性能得到大幅度提高，耐腐蚀性能是否也有提高还需要进一步研究和试验。

表 2 Stellite 合金堆焊层滚压硬化与未滚压高温硬度测试对比

单位： HRC

合金材料	编号	堆焊后	滚压回火	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃
6	6-0	38-41		23	19	15-16	12	
6 硬	6-1	38-41	53-55	37	35	33	24	18
12	12-0	42-43		26	22	18	15	10
12 硬	12-1	42-43	55-56	38	36	33	25	20

高温滚压后，堆焊合金层韧性大大提高。根据 MAN 公司技术规范进行热冲击对比试验，并进一步提高温度继续试验，结果见表 3。可以明显看出通过滚压后，高温热冲击性能提高了 200℃ 以上。

表 3 气阀 Stellite 合金硬化层热冲击试验

CW200 气阀 2012 年 2 月 29 日 常温水冷

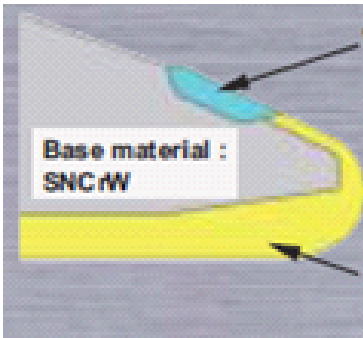
焊材	硬度 HRC	数量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
			3	4	5	6	7	8
			2	5	5	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
			℃	℃	℃	℃	℃	℃
6#	40	3	1	2				
6#滚压	53	3	0	0	0	0		
12#	47	3	3					
12#滚压	56	3	0	0	0	1		
21#滚压	51	3	0	0	0	0	0	0
22#滚压	40	3	0	0	0	0	0	0

注：表中温度栏里数字是开裂，0 表示未开裂

2011 年某捕渔船柴油机进气阀合金层普遍发生开裂，采用高斯通公司经滚压硬化的气阀，彻底解决开裂问题。采用普通奥氏体气体钢制造的气阀，经滚压硬化后用于气体发动机，经过多家企业装机试验，产品质量明显优于价格昂贵的高温合金材料。

2.3 常温表面滚压硬化技术

为提高气阀的耐腐蚀能力，MAN 公司在 60 缸径以上柴油机气阀底平面堆焊一层



Inconel625 镍基合金（图 5）。由于堆焊面积很大，厚度也较厚，很难做到堆焊无缺陷，制造成本成倍增加。

高斯通公司在突破新一代气阀生产关键技术的同时，还独创了气阀颈部与底平面滚压等多项专利技术。图 6 显示高斯通生产经颈部滚压处理的气阀在运行 18 个月后表面积碳明显优于未经滚压处理的进口气阀，图 7 显示气阀底部滚压处理后，运行 18 月无积碳。颈部与底平面经过滚压的气阀表层更致密更光滑，像镜面一样，提高了耐高温腐蚀和抗积碳能力，同时也大大增强了高温疲劳强度。但能否达到堆焊高温合金效果，需作进一步长时间的验证。



图 6 滚压处理气阀使用对比图

气阀是上海高斯通公司主打产品，它聚集了高斯通公司自行研发的三种不同滚压技术和相关专利技术。南京油运公司在 ZJMD-MAN 8L23/30 烧重油柴油机上装机运行时间达 13000 小时，气阀密封面磨损不超过 0.3mm，阀底平面和颈部几乎无积碳，经过手工研磨后，仍继续装机使用，质量明显优于国外同类产品。

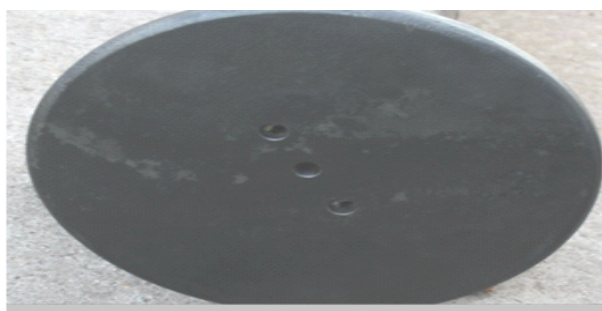


图 7 底部滚压处理积炭效果图

3 滚压硬化技术在其它零件制造中的应用

3.1 活塞头

利用滚压技术提高活塞抗积碳性能，延长使用寿命。

活塞是柴油机核心运动件之一，活塞顶部积碳使活塞冷却效果下降，直接

影响柴油机性能和零部件使用寿命。德国 MAN 公司在二冲程 60 以上缸径柴油机活塞顶部堆焊一层镍铬高温合金，效果比较明显，但制造成本增加一倍。高斯通公司将表面滚压技术与计算机技术集成为一体，把活塞大小、材料性能、表面几何形状等数据，输入机床滚压程序，对活塞外圆表面及顶部表面进行滚压，使工件表面金相组织细化致密，填堵了表层相间组织小孔，提高表面粗糙度和硬度，使表面积碳不能生根，达到减少积碳、活塞冷却效果保持长期不下降、延长活塞和活塞环使用寿命的目的。图 8 是经过滚压的小活塞模型图。

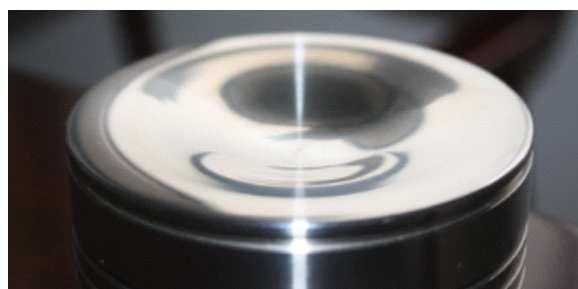


图 8 滚压小活塞模型图

3.2 缸套

缸套滚压硬化技术包括内表面滚压和外表面冷却部位滚压。

二冲程柴油机缸套内表面通常采用波纹切削加珩磨来完成最后工序加工，由于波纹切削刀面积较大，加工时机床线速度较低，产品粗糙度无法提高。据 MAN 公司有关人员介绍，日本一家公司研发出一种新的加工技术，采用高速小磨头进行波纹磨削，来提高表面粗糙度以减小润滑油损耗，效果不是非常明显，没有得到推广。缸套材料以球墨铸铁为主，金相组织比较疏松，硬度不高。根据缸套实际工作特性，针对燃烧室上部

活塞环运行不到部位进行表面平面滚压，使其表面金相组织更加致密，填堵了金相间小孔，粗糙度提高、硬度提高，减少积碳形成。图 9 是一件小缸套模拟实验件。活塞环运动部位采用波纹滚压，可根据图纸技术要求，利用机床功能，调整到相应波距进行滚压，粗糙度可达镜面，能及时发现表面以下铸造缺陷，可提高表面润滑效果，减少润滑油损耗。同时，由于表面金相组织改变、硬度提高，提高了缸套耐磨性，达到延长使用寿命的目的。



图 9 小缸套模拟实验件图

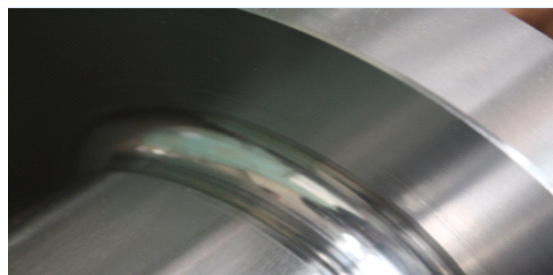
缸套外表面冷却部位滚压。由于冷却水存在各种杂质，长期使用就会逐渐生锈、结垢妨碍热传导。根据传热学计算，1.5mm 厚的积垢可使导热率下降 40%。对缸套外表面冷却部位进行滚压，能延缓和减少污垢形成，使冷却效果长期处于最佳状态，进而延长缸套使用寿命。

中高速内燃机缸套内表面以珩磨加工为主，利用珩磨网纹达到储油润滑油的目的。是否可采用小波纹滚压来取代珩磨，须作进一步研究和试验。高斯通公司已与无锡开普公司合作对 $\Phi 171$ 缸套内，外圆及法兰 R 圆角处滚压试验，并装机试验中。

3.3 曲轴

随着内燃机强化指标的进一步提高，对曲轴机械性能、抗疲劳强度提出了更高要求。发达国家在高速车用内燃机球墨铸铁曲轴 R 圆角处，采用滚压技术来提高疲劳强度，据国外有关资料介绍，球墨铸铁曲轴 R 圆角滚压后疲劳强度提高 300%。我国船用柴油机行业也有很多企业很早就开始立项，对曲轴 R 圆角滚压来提高疲劳强度，但都没有达到理想效果。最近看到一篇文章，玉柴对车用内燃机球铁曲轴 R 圆角滚压取得了成功，据介绍，球铁曲轴 R 圆角滚压后疲劳强度与锻钢曲轴相等。但目前还没有哪家企业能对大型中低速柴油机曲轴 R 圆角进行滚压硬化。

为什么小型曲轴 R 圆角滚压设备不能用在大型曲轴上呢？因为小型曲轴材料以球墨铸铁为主，组织相对比较疏松，R 圆角比较小，滚压轮子可以根据 R 圆角大小直接加压滚压。但对大型锻钢曲轴来说，由于 R 圆角大，材料致密度较高，



选用相同 R 直接滚压效果就不明显。高斯通公司研发出一种专用 R 圆角滚压装置，可对大 R 圆角及多个 R 连接的圆角进行滚压。图 10 为一件 $\Phi 150$ 、圆角 R10mm 曲轴试样件，进行滚压硬化后表面变化明显。

图 10 曲轴滚压件

3.4 连杆及连杆螺栓

连杆大、小头孔点状滚压。MAN 公司和瓦锡兰公司对连杆大、小头孔精加后都有表面喷丸强化处理要求，高斯通公司利用滚轮表面凸出点状球面，对大、小头孔加压震动滚压，取得非常理想的效果。

连杆螺栓杆身滚压。通常，连杆螺栓的螺纹部分都是采用滚压加工而成，但螺栓杆身是车床加工，有时刀痕比较明显，很容易造成应力集中，连杆齿面根部 R 滚压，都可以利用滚压来提高螺栓杆身的粗糙度，增加压应力，提高疲劳强度。

4 滚压硬化技术经济高效、应用范围广

在不改变原材料的情况下，利用滚压硬化技术来改变零件表层金相组织，提高产品机械性能是最经济、最有效的方法之一，能大大延长产品使用寿命。如能在内燃机零部件生产过程中进一步推广应用，可为更高性能内燃机基础零部件生产提供有力的保障。

滚压硬化技术的应用范围还可以推广到高温化工、电工、冶金等行业，如应用于高温、高压等场合的高性能阀门运用滚压硬化技术后，可大幅度提高其防腐、抗疲劳等性能。