

回流区分级着火燃烧技术

钱壬章

(华中科技大学)

1 概述

回流区分级着火燃烧技术由一项发明专利(一种带钝体的煤粉燃烧器 ZL 90 10 8583.9)和六项实用新型专利(旋流式燃烧器 ZL 95 2 00375.9;一种新型燃烧器 ZL 97 2 251554.3;带有整流板的钝体燃烧器 ZL 00 2 29292.0;附整流孔的钝体燃烧器, ZL 00 2 29670.5;燃烧煤气的锅炉, ZL 00 2 66159.4;和一种气体燃烧装置, ZL 97 2 01556.6)所体现。本项发明获得 2004 年度国家技术发明二等奖,并由中央电视台 12 频道“科技之光”制作 20 分钟节目播放。

这一组发明及实用新型专利的实质是提出了一种新型的强化燃烧和传热的基本原理与方法,是在钝体稳焰技术基础上形成的重大突破;这一原理与方法又不同于钝体技术上采用,对各类燃烧器的强化有普遍意义。

这一技术已在三十余台锅炉燃烧器上成功的应用。所改造的燃烧器有的是直流燃烧,有的是旋流燃烧;从燃用燃料上分,有的是烟煤、贫煤、无烟煤,煤泥和煤矸石,以及对煤气、油的燃烧器的改造上应用;从解决的技术问题上看,有的是解决低负荷稳焰,有的是防止结焦或燃烧器的烧损,有的是降低灰与渣的含碳量,有的是节约锅炉起动用油量,有的加大高炉煤气掺烧量,有的改善蒸汽参数防止过热器等设备爆管事故。上述各类技术问题在本专利技术的基础上都得到成功的解决。

2 系列专利简要说明

2.1 发明专利“一种带钝体的煤粉燃烧器”, ZL 90 1 08583.9, 发明人:钱壬章、陈维汉、郑远平。

发明专利的要点是在钝体中间开有一长条形缝隙,将来自钝体前方的部分一次风粉气流直接进入钝体后方的回流区。由于小股煤粉极易得到足够的热量,同时由于回流区的高温、低速环境而立即着火燃烧,从而使钝体后方在高温回流烟气的基础上又获得一个稳定热源,提高回流区的火焰稳定能力。

2.2 实用新型专利“一种新型燃烧器”, ZL 97 2 251554.3, 设计人钱壬章。

在开缝钝体的基础上,以小股粉气与燃油通过缝隙一并进入回流区形成燃油火焰点燃小股煤粉后,再点燃煤粉主流,实现油对煤粉的逐级点燃过程。高负荷时为防止结焦和燃烧器烧毁,又将一股冷风引入回流区,使回流区降温,推迟着火。

2.3 实用新型专利“带有整流板的钝体燃烧器 ZL 00 2 29292.0, 设计人钱壬章。

在开缝钝体的两侧各增加一块水平整流板,将经钝体斜表面而浓缩的煤粉整流为水平方向,流向钝体回流区的边界,从而强化了高温烟气回流加热等效果。

2.4 实用新型专利“附整流孔的钝体燃烧器” ZL 00 2 29670.5, 设计人钱壬章。

在开缝钝体的基础上，在钝体的斜表面开孔，将 1% 的一次风粉先于钝体缝隙一次风在回流区着火，再点燃缝隙一次风粉，再点燃一次风主流，实现三级分级着火过程。

2.5 实用新型专利“旋流式燃烧器” ZL 95 2 00375.9，设计人钱壬章、靳世平。

将少量一次风粉，通过中心管和蘑菇头内孔，送入旋流燃烧器中心回流区，形成旋流燃烧回流区分级着火过程。

2.6 实用新型“燃烧煤气的锅炉”，ZL 00 2 66159.4，设计人钱壬章。

专利要点是加大四角燃烧锅炉的切园和烧嘴出口的速度，增大煤气锅炉火焰对水冷壁的对流换热，弥补炉内辐射换热的不足，不增大炉膛容积，将高炉煤气与煤粉的混烧炉改为全烧高煤气锅炉。

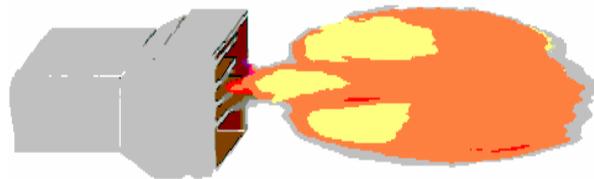
2.7 实用新型“一种气体燃烧装置”，ZL 97 2 01556.6，设计人钱壬章、靳世平、顾镇钧、魏国瑞。

将底部垂直向上火焰转向，成为麻花形切向旋流火焰，且因中心设置的辐射筒的贴壁效应，防止了火焰直射炉壁管，加强了底部炉壁的对流和辐射换热，克服了后部对流设备的超温，还将炉效提高 5-10%。

3 本专利思想的发展过程和学术意义

自钝体燃烧技术问世以来，作为强化燃烧稳定火焰的基本手段，首先广泛应用在气体燃烧上；第二次世界大战末，又为喷气发动机加力燃烧室的火焰稳定器；近年来又成为我国劣质煤燃烧的一项重要技术措施，使我国在劣质煤的燃用达到世界一流水平。

自本发明提出以前，对钝体技术强化燃烧的原理认识一直停留在高温烟气的回流对初始燃料流的加热作用；这固然正确，但回流区更为重要的特性并没有揭示出来：钝体后方的回流区，由于其高温、低速和反向流，以及高湍流度的固有属性，是燃烧过程中最为有利的着火源点区域，一旦着火就能将火焰扩展到主流，对整体燃烧过程起到控制作用。本发明的学术意义即在于发掘这一特征并利用之，在回流区中引入少量燃料与气，在最有利的着火区域内首先着火，形成着火源点，再点燃主流的回流区分级着火燃烧机制的确立（着火原理见下图）。从而形成在钝体燃烧技术的基础上一个突破性的发展，将一个回流加热主流的被动热源变为直接燃烧的主动热源，以明火点燃主流，从而有着比无缝钝体燃烧技术更为强大的燃烧性能和火焰稳定性能。同时以不同方式来控制回流区，也就产生了一系列的为解决不同问题的专利技术。



本系列专利是在漫长的对煤粉燃烧过程研究中逐步发展的。首先是在自然科学基金“粉煤燃烧回流热质传递研究”（1983~1986）中，提出了煤粉燃烧钝体稳焰的新观点[1]：即尾流恢复区与回流区相比，对煤粉稳焰有着更为重要的作用，指出尾流恢复区存在一个良好的着火环境，即低速、高温、高湍流度区域；并以确切的实验结果证明，钝体对煤粉火焰的稳定作用是由于少量细小煤粉颗粒经钝体绕流进入尾流恢复区，形成一个稳定的着火源点，从而使钝体能有效稳定煤粉火焰。这一观点更正了煤粉气流中钝体稳焰单纯的归结为高温烟气的回流加热效果，也有效的解释了当时国内发展的不同类型稳焰装置，具有不同特征的回流区所具有的稳焰作用，同时也萌发了本发明的初步思想。

随后，在自然科学基金重大基金子项课题“钝体回流煤粉混合和燃烧机理的研究”（1987~1991）中，

将少数煤粉经钝体绕流进入尾流恢复区形成着火源点的现象, 发展为更直接的在钝体中心开缝, 将部分一次风粉引入回流区, 在最易着火的回流区或其后的尾流恢复区形成着火源点, 再点燃主流的分级着火过程; 并进行了一系列的实验, 验证了这一回流区分级着火燃烧机制的存在, 从而确立了本项发明专利的基本思想。

在研究中, 还说明将均匀混合的一次风粉进行煤粉富集的目的, 是在于着火的初期, 加大煤粉中挥发份析出的份额, 以便于与当地的空气迅速达到合适浓度配比而立即着火; 但是这种煤粉的富集只是为了形成提前着火, 从整体上看, 要使煤粉燃尽, 粉、气必须混合均匀, 因此为提前着火, 只能短时煤粉局部浓缩富集, 而不是粉、气的整体分离, 否则就会增大飞灰含碳量, 影响燃烧效率。

这些研究结果, 最后归结为“粉、气分离, 局部富集, 回流加热, 分级点燃”, 这些原则指导本项发明以及后续六项实用新型专利的发展基础。

这一技术的基本原理和方法是将少量粉、气送入钝体后方的回流区, 在最有利的着火环境中首先形成着火源点, 再迅速点燃煤粉主流, 实现回流区分级着火燃烧机制。少量燃料、气流进入回流区是否会造成回流区的破坏, 反而损坏了钝体高温烟气回流加热作用? 常为国内外研究者所关心的问题。这在攀登计划子课题“煤的结构特性对燃烧过程的影响及火焰稳定理论的研究”(1992~1996)中进行了系统工作, 实验和分析表明随着进入回流区流量的增加, 存在着不同的回流区流态结构, 但只要控制在一定流量下钝体后方的流区不会破坏, 反而增长了。因为绕过钝体的两股主流是因回流区内的负压的吸引而汇合, 形成尾流恢复区域, 当少量气流进入回流区后, 负压减小, 就减弱对两股主流的吸引力, 使两主流汇合后移, 增大了回流区长度而有利于燃烧; 实验还证明在每一断面上的回流量, 与钝体相比完全相当; 但当过大的气流进入回流区, 则将成为三股强劲的射流, 而使回流区消失, 但这恰恰可成为高负荷时推迟着火, 抑制结焦、防止高温腐蚀和燃烧器烧损的另一种有力的手段。

在攀登计划子项课题的研究中, 还将回流区分级着火燃烧技术由直流燃烧发展到旋流燃烧, 由煤粉燃烧发展到煤气和油的燃烧, 以及对基本原理应用的不断完善, 由回流区二级分级着火燃烧机制演变为三级分级着火燃烧机制, 和相应的技术改进, 这些就成为后续实用新型专利的内容。

4 专利应用的实际效果

自一九九四年本专利技术江西乐平电厂第一台锅炉上应用以来, 已进行了三十余台锅炉和二十余台工业炉燃烧器的改造, 从小型锅炉的容量为 65t/h, 发展到 35 万千瓦的大型锅炉 1160t/h。所有燃烧器的改造, 都毫无例外的取得了成功。

下面对解决不同技术问题的实际效果分别说明:

4.1 低负荷稳焰技术

回流区分级着火燃烧技术的实施是在钝体中心开缝, 将一小部分的一次风粉送入回流区, 受高温烟气回流加热迅速升温, 同时受到钝体两侧主流的一侧的吸引, 使细小的钝体中心缝隙流弯曲靠向主流, 而煤粉颗粒由于惯性与气流分离, 并在回流区高温、低速和返混的气流中增长了停留时间, 从而使所含的挥发充分析出着火, 也点燃了煤粒本身, 形成初始着火源点。也由于在回流区高温低速返混气流中, 所建立了值班火源十分稳定, 从而稳定了主流火焰。

在乐平电厂当两层火嘴中底层火嘴因磨煤机事故而停运, 上层火嘴依然能长时间稳定运行, 按常规炉膛将立即熄火。淮北电厂四台锅炉改造, 燃烧贫煤每晚日常运行负荷都降到 50%以下。

为进一步提高低负荷稳焰能力, 对淮北电厂 4#炉燃烧器改造中增设了整流板, 一次风粉经钝体浓缩后立即与整流板相撞, 将浓的煤粉流的流向由斜流改为水平, 增大了一次风的刚性, 又起到再次增浓了煤粉的效果, 还使浓的一次风处于高温烟气回流区边界处, 强化了传热; 更为重要的设置

整流板后,三股浓煤粉流均为一次风所包纳,经过尾流区汇合,浓、稀煤粉流再次混合均匀,实现了煤粉局部短时富集,后期粉、气又混合均匀,从而有效的控制了灰、渣的含碳量。如在洛阳热电厂[2]改造后,使俄罗斯制造的锅炉灰渣含碳量由14%以上降为4%以下,提高了燃烧效率。

视煤质的不同,本项技术的采用,可使不投油的最低负荷在35~50%内变化。

4.2 炉膛结焦的治理

炉膛结焦是造成锅炉效率下降和事故停炉的一大问题。前已说明,适当量的气流进入回流区,不仅不会破坏回流区,相反的还增长了回流区,但当大量气流进入回流区,将使回流区消失,出现三股射流,而这一点恰好作为推迟着火防止结焦的一种有力手段。

洛阳首阳山电厂[3]燃用强结焦性煤——河南义马煤,该厂的3#、4#炉,由东锅制造,燃烧器内设置了稳焰体。强化燃烧与结焦防治是相互矛盾的,低负荷强化燃烧,必然带来高负荷结焦趋势增强。3#、4#炉由于燃用了义马煤,高负荷时出现严重结焦,造成多次事故停运,不得不拆除稳焰体改为直流喷口,但又损害了低负荷火焰的稳定性,不能适应当前对低负荷调峰的要求。当采用本项专利技术后,高负荷时大量周界风进入回流区,推迟了火焰的位置,防止炉墙结焦;低负荷关闭周界风门,少量一次风进入回流区,强化燃烧稳定火焰,很好的解决了结焦防治和低负荷稳焰一对矛盾;由于水冷壁面洁净无焦使锅炉效率提高1%。

在福建邵武电厂两台125MW和攀枝花发电厂两台125MW都起到了防止严重结焦的极好效果。

4.3 煤泥、煤矸石的燃用

改善环境是十五科技规划的中心,其中在能源利用特别指出对煤的废弃物,即洗煤厂的下脚料煤泥和采煤过程中的煤矸石的有效利用,因为这些废弃物已大量堆积,占用农田,并造成二次污染。本系列专利技术在有效燃用煤泥和煤矸石上已取得很好的结果。

平顶山坑口电厂由俄罗斯协货贸易引进的一台220t/h旋流燃烧煤粉炉,投运不到三年,就面临小机组退役,厂方为了电厂生存,改烧煤泥,但难以稳定燃烧,需投油助燃,这就使得改烧煤泥得不偿失。

为了能有效燃用低品位的煤泥,将回流区二级分级着火过程发展为回流区的三级分级着火过程,即以1%一次风由旋流燃烧器的蘑菇头表面开孔进入回流区首先着火,点燃进入回流区内二级风粉,再点燃主流风粉的三级分级着火技术。这一技术实后,当全烧煤泥,最低不投油负荷可降为35~40%,锅炉的各参数都处于正常范围,使该厂得到巨大的社会效益和经济效益,由河南电力局命名为“综合利用发电厂”,每年保证85%平均负荷;燃用废弃物煤泥,每年由此带来的经济效益为1400万,加上环保项目免税200万,累计年效益1700万。一项新技术的采用,使一个面临关闭的厂完全改观。

4.4 锅炉冷态启动的节油技术

一台30万千瓦锅炉,一年的起动用油在1000~1500吨,因此节约起动用油有很好的经济效益。回流区分级着火技术与小油枪的结合,对于烟煤和贫煤,以300~500kg/h的小油枪替代1200~1500kg/h的大油枪,启动节油可高达80%以上。由于小油枪插入一次风钝体的中心缝隙,油雾火焰首先点燃的是进入回流区与其同向结伴而行的少量一次风粉,再由少量油和点燃的少量粉在回流区内释放的热量的和,再去点燃主流一次风粉,实现在回流区由油对粉的分级点燃,就能产生最大的节油效果。

小油枪无须对锅炉的预热,冷态启动投油即投粉的煤粉的直接点燃技术,在1998年首先在黄石电厂220t/h和2001年在山东运河电厂(420t/h)都取得一次投运成功,在福建邵武电厂420t/h炉,近期燃用的煤的灰份高达50~66%的煤矸石,热值为7000~11000KJ/kg,当四支小油枪对锅炉预热1.5小时后,投粉即能点燃煤粉,节油40%,可见回流区分级着火燃烧技术与小油枪的结合,能产生显著的节油效果。

4.5 高炉煤气的增烧技术

高炉煤气为一种低热值煤气,一般常在煤粉炉内少量渗烧,余下的大部分对空排放,污染空气。

高炉煤气内含有大量的 CO_2 和 N_2 ，热值极低，一般为 $700\text{--}800\text{kcal/Nm}^3$ ，燃烧火焰很弱。如宝钢自备电厂，煤气在烧嘴出口不能形成火焰，遇高温煤粉火焰后才能有效燃烧，造成炉膛后部设备的超温、爆管。采用回流区分级着火燃烧技术，烧嘴出口即形成强烈的火焰，炉膛上部烟气温度平均下降 50°C ，有效的克服了后部设备的超温问题。

目前钢铁公司的自备电厂的煤粉煤气混烧炉都面临增烧高炉煤气紧迫要求，用以净化周边的环境，减少环保罚款。对混烧改为全烧高炉煤气的锅炉改造，除了采用回流区分级着火燃烧技术，提高低热值煤气燃烧强度外，还必须强化炉膛内的换热。低热值煤气理论燃烧温度低，约为 $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ 左右，加上煤气火焰为透明火焰，炉内辐射力弱，按常规换热方式，炉膛容积必须增大 40% ，才能满足全烧高炉煤气的要求。一般的改造方案，需拆除冷灰斗，将炉膛下沉增大容积，改造工程量极大。

本专利技术提出加大炉内烟气切向速度，增强水冷壁的对流换热[4]，来弥补辐射换热的不足，为此使烧嘴出口气流的假想切园增大，接近与炉墙相切，并使烧嘴出口冷态速度增大为 50m/s 。整个改造只需以回流区分级着火燃烧技术来改造原燃烧器，并加大安装切园，而炉膛原封不改。如攀钢自备电厂常规方案改造费用为 400 万，而采用本专利技术仅为 60 万。

本专利技术在马钢自备电厂应用，使一台锅炉增烧高炉煤气 $15000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，另一台增烧 $25000\text{Nm}^3/\text{h}$ 。在湘钢和攀钢自备电厂将煤粉、煤气混烧炉改造为全烧高炉煤气，取得很大的经济效益和环保效益。

4.6 回流区分级着火燃烧技术在旋流燃烧器上的应用。

前已说明回流区分级着火燃烧技术对两大类燃烧器，即直流燃烧和旋流燃烧都一样适用。在已改造煤粉炉中已有四台锅炉旋流燃烧器进行了成功的改造。其中特别是平顶山坑口电厂 220t/h 锅炉旋流燃烧器的改造，由回流区二级分级着火发展为三级分级着火，成功的燃用洗煤厂的下脚料煤泥，并能在 $35\text{--}40\%$ 负荷不需投油稳焰。

旋流燃烧器广泛的应用在油雾的燃烧上。本项专利技术已对宝钢热轧厂的三座加热炉的油、气两用燃烧器进行改造。原燃烧器为法国引进，运行中出现重油燃烧冒黑烟，且有一些油雾被吸入煤气管内形成结焦堵塞管道。该油气两用燃烧器为旋流结构，空气外旋，煤气内旋，油枪插入中心。油雾喷出后受旋流负压吸引，部分油雾进入煤气旋流的内核形成结焦，堵塞管道；其次油雾喷入旋流形成的中心回流区，由于不能及时获得空气的补充，生成大量黑烟。本项专利的应用，即在紧挨油枪的外围送入少量空气，一方面防止油雾被吸入煤气管；另一面形成回流区分级着火燃烧机制，使少量空气与油雾在回流区首先着火，强化燃烧，消除黑油黑烟。经半年的对比试验后，将三座加热炉的 75 台两用燃烧器全部改型，解决了该厂的一大攻关难题。

油雾燃烧大量应用在航空工业喷气发动机主燃烧室和加力燃烧室。在主燃烧室为旋流燃烧，在加力燃烧室为 V 形体（即钝体）稳焰燃烧，因此本专利技术在原则上都同样适用，只是民用的低速燃烧变为高速燃烧，其火焰稳定问题更为突出。

5 本项专利已形成的业绩

94年以来，随着本项技术不断发展，业绩逐步扩大，到目前为止，已有三十余台锅炉（或加热炉）的燃烧器进行了成功的改造，其中属于火电厂煤粉炉的有二十余台（四台为旋流燃烧器，其余为直流燃烧器），属钢铁企业的高炉煤气煤粉混烧锅炉改造的有六台，还对冶金和化工企业的各类窑炉和加热炉燃烧器进行改造。所改造的锅炉总容量为 8210t/h ，配发电设备 213.7 万千瓦。

回流区分级着火燃烧技术的应用，使燃烧器的性能得到全面提高，所达到的技术指标为：

- 1) 脱油最低负荷 $35\text{--}50\%$ ；

- 2) 灰渣含碳量 1~4%内波动;
 - 3) 锅炉冷态启动节油 80%以上;
 - 4) 有效防止了炉膛的结焦和高温腐蚀;
 - 5) 适用不同煤种,特别是能燃用煤泥和煤矸石,对同一燃烧器允许宽范围的煤质变化;
 - 6) 煤粉煤气混烧炉,可增烧或全烧高炉煤气,改造工作量仅限燃烧器的更换;
 - 7) 化工系统的管式加热炉改造可提高效能 5-10%,并可防止对流换热器的超温爆管事故;
- 三十余台锅炉和十四台工业炉加热炉燃烧器改造具体情况如下表:

回流区分级着火技术电厂锅炉应用业绩表

序号	年份	用户名	锅炉容量 (t/h)	燃烧器类型	燃料品质	改造后效果
1	1994	江西乐平电厂	2#, 70	四角切园直流燃烧	$V^r=25\%$ $Q_d^y=15000\sim 16000\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 50%
2	1995	江西乐平电厂	1#, 70	侧墙对冲旋流燃烧	$V^r=25\%$ $Q_d^y=15000\sim 16000\text{KJ/kg}$	解决燃烧掉粉问题
3	1996	宝钢自备电厂	1#, 1160	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y=3000\text{KJ/m}^3$	上部平均烟温降低 50℃, 排烟温度降低 2℃
4	1997	宝钢自备电厂	2#, 1160	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y=3000\text{KJ/m}^3$	同上
5		湖北黄石电厂	5#, 220	侧墙对冲旋流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=18000\sim 19000\text{KJ/kg}$	不切燃烧器的条件下, 不投油稳焰负荷 65%
6	1998	湖北黄石电厂	6#, 220	侧墙对冲旋流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=18000\sim 19000\text{KJ/kg}$	冷态启动直接点燃煤粉, 节油 80%
7		安徽淮北电厂	2#, 220	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=19000\sim 21000\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 56%
8		安徽淮北电厂	6#, 670	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=19000\sim 21000\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 50%
9	1999	安徽淮北电厂	4#, 460	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=19000\sim 21000\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 47%
10		河南省首阳山电厂	3#, 1025	四角切园直流燃烧	义马强结焦性煤 $V^r=25\%$ $Q_d^y=18000\sim 20000\text{KJ/kg}$	高负荷不结焦不投油稳焰负荷 45%
11		平顶山坑口电厂	1#, 220	侧墙对冲旋流燃烧	煤泥 $V^r=35\%$ $Q_d^y=12980\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 40%
12		湖北黄石电厂	8#, 300	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=10\sim 12\%$ $Q_d^y=18000\sim 19000\text{KJ/kg}$	不投油稳焰负荷 50%
13		马钢自备电厂	3#, 220	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y=3000\text{KJ/m}^3$	增烧高炉煤气 25000m ³ /h
14		马钢自备电厂	2#, 220	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y=3000\text{KJ/m}^3$	增烧高炉煤气 15000m ³ /h
15	2000	洛阳热电厂	1#, 420	四角切园直流燃烧	劣质烟煤 $V^r=26\%$ $Q_d^y=21991\text{KJ/kg}$	灰渣含碳量由 14%下降为 3~4%, 不投油稳焰负荷 45%

16		湘钢自备电厂	6#, 75	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y = 3000 \text{KJ/m}^3$	煤粉煤气混烧必为全烧高炉煤气, 高负荷不结焦, 不投油负荷为45%
17	2001	首阳山电厂	4#, 1025	四角切园直流燃烧	劣质烟煤 $V^r=25\%$ $Q_d^y = 18000 \sim 20000 \text{KJ/kg}$	燃用 90% 义马煤, 高负荷不结焦, 不投油低负荷 45%, 在实际运行出现一层烧嘴投运短时不熄火
18		邵武电厂	2#, 420	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=12\%$ $Q_d^y = 15000 \text{KJ/kg}$	当煤粉的灰份在 50~65%, 热值为 6600~14000 KJ/kg 条件下能稳定燃烧, 并用 200 kg/h 小油枪投油一小时后对煤粉直接点火
19		攀钢自备电厂	8#, 75	四角切园直流燃烧	高炉煤气 $Q_d^y = 3000 \text{KJ/m}^3$	增烧高炉煤气 15000Nm ³ /h
20		山东运河电厂	1#, 420	四角切园直流燃烧	烟煤 $V^r \geq 25\%$ $Q_d^y \geq 20000 \text{KJ/kg}$	以 250kg/h 小油枪对冷态煤粉直接点火, 节油 80% 以上
21	2002	邵武电厂	1#, 420	四角切园直流燃烧	贫煤 $V^r=12\%$ $Q_d^y = 15000 \text{KJ/kg}$	当煤粉的灰份在 50~67%, 热值为 6600~14000 KJ/kg 条件下能稳定燃烧, 并用 200 kg/h 小油枪投油 1.5 小时后对煤粉直接点火
22		攀钢发电厂	1#, 420	四角切园直流燃烧	$V^r=29\%$ $Q_d^y = 15743 \text{KJ/kg}$	提高蒸汽参数 20℃, 小油枪直接点火
23		洛阳热电厂	2#, 420	四角切园直流燃烧	劣质烟煤 $V^r=26\%$ $Q_d^y = 21991 \text{KJ/kg}$	灰渣含碳量由 12% 下降为 3~4%, 不投油稳焰负荷 45%
24		包头热电厂	7#, 420	四角切园直流燃烧	$V^r=30\%$ $Q_d^y = 15633 \text{KJ/kg}$	高负荷不结焦, 低负荷 43% 不投油
25		山东邹县电厂	3#, 1025	四角切园直流燃烧	烟煤 $V^r \geq 25\%$ $Q_d^y \geq 20000 \text{KJ/kg}$	以 250kg/h 小油枪对冷态煤粉直接点火, 节油 80% 以上
26	2003	攀钢发电厂	2#, 420	四角切园直流燃烧	劣质烟煤 $V=30\%$ $Q_d^y = 15743 \text{KJ/kg}$	提高蒸汽温度 20C, 小油枪点火
27		包头热电厂	6-#, 420	四角切园直流燃烧	$V^r=30\%$ $Q_d^y = 15633 \text{KJ/kg}$	高负荷不结焦, 低负荷 43% 不投油
28		淮北发电厂	7#, 640	四角切园直流燃烧	贫煤 $V=10-12\%$ $Q \leq 20000 \text{KJ/kg}$	不投油负荷 40%, 大灰含碳量由 12% 下降为 3-4%, 小油枪点火
29	2004	鲤鱼江电厂	2#, .220	四角切园直流燃烧	无烟煤	不投油最负荷 50%
30	2004	中山电厂	3#, 60	四角切园直流燃烧	改烧越南无烟煤	不投油最低负可达 60%

31	2004	淮北发电厂	3#, 460	四角切园直流燃烧	贫煤 V=10-12、% Q ₂₀₀₀₀ KJ/Kg	消除再热器超温 大灰含碳量由 18%下 降为 8-10%
32	2005	武钢自备电厂	2#, 640	四角切园直流燃烧	高炉煤气烧嘴改造	改善炉膛出口烟温差, 以高炉煤气点燃煤粉 实现锅炉无油启动

回流区分级着火燃烧技术工业炉应用业绩表

序号	应用年份	应用单位	炉窑类型	燃烧器形式	应用效果
1	1995	宝钢热轧厂	旋流燃烧	重油煤气 两用燃烧器	根除油雾倒灌结焦, 火焰稳定性增强
2	1996	宝钢化工厂	苯加氢改质加热炉	焦炉煤气	防止对流段爆管事故, 炉效提高 10%
3	1997 ~1999	上海宝钢热轧厂	热轧板坯加热炉 1#、2#、3#	油气两用燃烧器	燃烧充分, 燃油 不结焦、不冒黑烟, 取代进口产品
4	2000	天津冷轧厂	钢卷罩式退火炉	天然气 旋流燃烧器	火焰稳定、规则, 小火 不易熄灭, 喷射速度高, 升温速度快
5	2000	无锡长江薄板厂	钢卷罩式退火炉	石油液化 旋流燃烧器	火焰稳定、规则, 小火 不易熄灭, 喷射速度高, 升温速度快
6	2000	攀枝花钢铁公司	钢卷罩式退火炉	混合煤气 旋流燃烧器	火焰稳定、规则, 小火不易熄灭, 喷射 速度高, 升温速度快
7	2000	山西海鑫钢铁公司	10t/h 卧式锅炉	全自动高炉煤气 旋流燃烧器	高炉煤气燃烧稳定, 火焰 点火升温自动调节, 保护
8	2001	湘潭钢铁公司	煤粉喷吹烟气炉	高炉煤气旋流燃烧器	提高效率 50%
9	2001	武钢冷轧厂	钢卷罩式退火炉	混合煤气 旋流燃烧器	火焰稳定、规则, 小火 不易熄灭, 喷射速度高, 升温速度快
10	2001	宝钢炼钢厂	电炉中间包烘烤器	焦炉煤气高速烧嘴	火焰稳定、规则, 小火 不易熄灭, 喷射速度高, 升温速度快
11	2001	山西海鑫钢铁公司	煤粉喷吹烟气炉	高炉煤气旋流燃烧器	燃烧稳定, 效率高
12	2002	鄂钢集团公司	煤粉喷吹烟气炉	高炉煤气旋流燃烧器	燃烧稳定, 效率高
13	2002	攀钢钛业公司	回转窑	全自动发生炉煤气 旋流燃烧器	全自动控制燃烧 稳定安全可靠
14	2002	攀钢钛业公司	矿粉干燥烟气炉	混合煤气旋流燃烧器	燃烧稳定, 效率高

6 本项专利技术已形成的经济效益、生态效益和社会效益

回流区分级着火燃烧技术, 推广应用仅三十余台锅炉的改造, 但已带来了可观的经济效益、生态效益及社会效益。主要体现在:

- 1) 由于燃烧器低负荷稳焰能力的增强, 在目前电力行业规定的最低调峰负荷为 50%时无需投油

助燃，使每晚的低负荷运行减少一支油枪用油量 800~1500kg/h，常年累计，节油效果巨大。

2) 小油枪对煤粉直接点燃技术，使冷态启动节油 80%以上，对于一些调峰厂，锅炉频繁启动，节油意义更大。本项节油技术处于推广初期，但其潜在市场价值已显著。

3) 本项专利技术成功使用在低品位的燃料的有效利用上，即洗煤厂的煤泥和高炉煤气。这些低品位燃料是废弃物，不需花钱购买，有的还减少了环保罚款，经济效益特别显著。

4) 经济效益还体现在燃烧器的改造使锅炉热力性能得到改善，如宝钢自备电厂防止过热蒸汽管的爆管，使过热蒸汽温度提高 5℃达到原设计值，且排烟温度下降 2℃；首阳山电厂有效防止了结焦，炉效提高 1%；洛阳热电厂灰渣含碳量由原来的 14%以上，下降为 4%，这些都是可以定量计算的效益。

对三十余台锅炉的改造，可以进行计算的经济效益为 1.5 亿/年，具体计算见下表。

厂名	锅炉总容量 (t/h)	计算依据	年效益 (万元)
淮北电厂	1320 (三台炉)	由厂方计算 (见附件)	1050
平顶山坑口电厂	220	由厂方计算 (见附件)	1600
马鞍山热电厂	440 (二台炉)	增烧高炉煤气 35000m ³ /h (见附件)	1100
湘钢热电厂	75	全烧高炉煤气 50000m ³ /h (见附件)	1580
攀钢热电厂	75	增烧高炉煤气 15000 m ³ /h	475
黄石电厂	740 (三台炉)	每晚不投油节约一支油枪 (750kg/h)	594
洛阳热电厂	460	每晚不投油节约一支油枪 (1000kg/h)，灰渣含碳量 14%下降为 4%	901
宝钢自备电厂	2320 (二台炉)	过热蒸汽提高 5℃，排烟下降 2℃	2772
首阳山电厂	2120 (二台炉)	每晚不投油节约一支油枪 (1500kg/h)，炉效提高 1% (见附件)	4488
运河电厂	460	调峰厂，每年启停 20 次	100
合计			14662

回流区分级着火燃烧技术使燃烧的稳定性大大增强，减少锅炉的事故停炉，增强了电厂运行的安全性；首阳山电厂 4[#]炉 (1064t/h) 因给水泵事故，四层烧嘴仅能保证一层火嘴运行，这种极端工况下，未造成熄火停炉事故，关键在于回流区分级着火技术使单层燃烧器具有自稳能力；宝钢化工厂苯加氢加热炉的改造，防止了该厂的一大隐患。管式加热炉曾发生一次爆管事故，使全厂停止生产，还冒着大爆炸的危险。安全运行是更大的经济效益，但难以定量计算。

对低品位燃料的有效利用，不仅有很好的经济效益，还有很好生态效益和社会效益。平顶山坑口电厂一台 220t/h 煤粉炉改烧煤泥，将平顶山的三个洗煤厂的下脚吃光，使大片农田得到利用，也防止堆积如山的煤泥受雨水的冲刷形成再次污染；这个厂也因有利于生态环境允许继续投运，还得到免税的奖励。这一技术的利用为小电厂的继续生存开辟了一条生路。钢铁公司的高炉煤气，不利用就得对空排放，严重污染了城市上空的大气，招来大量的环保罚款，利用了就减少钢吨能源的消耗。本项技术对三个钢铁公司煤粉煤气混烧炉的改造，减少了每年 8 亿立方高炉煤气的对空排放，总投资很小，仅为 200 余万元。

参考文献：

- [1] 钱壬章等，粉煤燃烧的新概念---粉气分离，工程热物理学报，1991，Vol.12，No.3。
- [2] 陈熔，钱壬章等，开缝钝体燃烧技术在洛阳热电厂的应用，华中电力，2002，Vol.15，No.5。
- [3] 张新科，钱壬章等，开缝钝体燃烧器在首阳山电厂的应用，华中电力，2000，Vol.13，No.4。
- [4] 靳世平，钱壬章，高炉煤气锅炉水冷壁传热强化研究，工程热物理学报，2002，Vol.23，增刊。