

# The Principle and Performance Analysis of Oxygen-enriched Oil-saving Combustion Technology for Pulverized Coal Firing

Jitang Liu<sup>1,2</sup>, Hai Zhang<sup>2</sup>, Junfu Lu<sup>2</sup>, Qing Liu<sup>2</sup>

1. Department of Power Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 1101364, China

2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

1. liujt-sy@163.com, 2. haizhang@mail.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** Pulverized coal-fired boilers consume a large amount of oil for ignition or flame stability during the start-up and low turn-down ratio operation. Reducing the oil consumption is very important and urgent. Based on the analyses on two important factors on the stability of pulverized coal combustion, namely the rate of primary air heating, the oxygen concentration in primary air, a new burner has been designed to increase the local oxygen concentration and the temperature of the primary air. The burner combines the merits of traditional high temperature air combustion (HTAC) and oxygen enriched combustion (OEC) technology. Moreover, it has excellent fuel flexibility. It is expected the new burner can be alternative technology other than the existing oil-saving gun and plasma gun technologies.

**Keywords:** pulverized coal boilers; burners; high temperature air combustion; oxygen-enriched combustion

## 富氧节油煤粉燃烧技术原理与性能分析

刘吉堂<sup>1,2</sup>, 张海<sup>2</sup>, 吕俊复<sup>2</sup>, 刘青<sup>2</sup>

1. 沈阳工程学院动力系, 沈阳, 110136

2. 清华大学热能工程系, 北京 100084

1. liujt-sy@163.com, 2. haizhang@mail.tsinghua.edu.cn

**摘要:** 电站煤粉锅炉在启动点火、低负荷时需要消耗大量燃油, 节约这部分用油有重要意义。本文分析了影响煤粉着火稳定性的两个重要因素: 一次风升温速率、一次风中氧的浓度。提出了提高助燃一次风局部氧浓度、快速预热的新型燃烧器。该燃烧器综合了高温燃烧和富氧燃烧技术, 大大提高了煤粉的反应指数, 解决了点火和低负荷稳燃问题, 并且不受煤种限制, 是现有的小油枪和等离子点火等技术的一个补充和新选择, 具有很好的应用前景。

**关键词:** 煤粉锅炉; 燃烧器; 高温空气燃烧; 富氧燃烧

### 1 引言

我国电站以燃煤锅炉为主, 在启动点火、低负荷运行时, 为稳定燃烧需要大量燃油。据估计, 我国每台 300MWe 机组的年均耗油量在 500 吨以上, 而全国每年用于点火、稳燃和新机组调试的助燃用油高达 800 万吨, 耗资上百亿元<sup>[1]</sup>。目前国际原油价格居高不下, 而我国的油资源相对贫乏, 在很大程度上依赖石油进口<sup>[2]</sup>。如何节约电站助燃用油成为煤粉炉电站一个非常重要和紧迫的任务。

基金项目: 国家 863 项目 (2007AA05Z303)

燃煤锅炉节油的关键在于煤粉燃烧器, 为此我国近年内开发和研制了多种少油量甚至无油煤粉燃烧器, 配备小(微)油量油枪<sup>[1]</sup>或等离子点火器<sup>[3]</sup>, 这些燃烧器及点火装置的广泛应用, 节约了大量的点火用油。表 1 给出了一些典型的节油燃烧器和它们各自的特点。可以看出, 各种燃烧器都有自己的特点、应用的局限性和不足, 都有一定的适用范围, 发电部门需要根据锅炉的特点和自身的需要进行选择。同时, 也可以看到, 节油燃烧器的发展还在一个方兴未艾的阶段。

表 1 几种节油型煤粉燃烧器的比较

Tab.1 Performance comparison between two types of fuel-saving burner of pulverized coal

燃烧器	优点	缺点
小油 点火	投资少, 运行维护费用低, 系统简单, 运行稳定, 节油率高。	在点贫煤以及无烟煤时, 油量消耗大; 油量偏大或过小都不易操着; 点火初期需专门保护除尘器。
等离子 点火	节约燃油, 启动时间短, 系统简单, 易于全自动控制维护, 运行安全可靠。	煤质要求严; 阴极和阳极寿命较短; 初投资高; 对主燃烧的影响明显

一次风煤粉着火或稳燃的本质是提高煤粉在进入炉膛的过程中的反应速度。传统的煤粉着火均为利用油枪加热炉膛形成相对高温的烟气, 卷吸炉膛中的高温烟气加热煤粉着火。该点火过程中, 加热炉膛达到较高温度需要消耗的油量比较大。目前节油煤粉燃烧器多基于煤粉直接加热而不依赖于炉膛中的高温烟气, 甚至将点火热源由燃油改为电力。从着火和稳燃的机理上, 这些节油煤粉燃烧器均是对热源的改进。

从燃烧的机理上分析, 影响煤粉着火或稳燃的本质因素包括: 一次风中粉的浓度、一次风中氧的浓度、一次风粉混合物的温度。富氧节油燃烧器利用浓缩的一次风粉混合物, 通过偏心喷口特殊结构使一次风粉迅速升温, 在一次风中, 根据煤质变化, 补充不同数量的氧气, 提高一次风中氧的浓度。因此该技术是在常规浓淡燃烧器的基础上综合高温燃烧和富氧燃烧技术提出的富氧节油的技术路线, 形成了富氧燃烧的节油煤粉燃烧器技术[4]。其基本原理就是利用提高一次风中的氧气浓度来提高煤粉气流的着火特性。从技术上看就是将煤粉高温空气燃烧技术和富氧燃烧技术有机结合的一种集稳燃、低 NO<sub>x</sub> 和节油于一体的先进煤粉燃烧器。

## 2 煤粉高温空气燃烧和富氧燃烧

### 2.1 高温空气燃烧技术

煤粉高温空气燃烧技术是传统高温空气燃烧 (High Temperature Air Combustion, HTAC) 技术在煤粉锅炉上的发展。HTAC 为一种先进的清洁燃烧技术, 它的原理是通过蓄热换热的方式将空气温度预热到 1000℃ 以上, 然后与燃料分别供入燃烧空间。由于空气经过高温预热, 整个燃烧空间都处在很高的温度水平, 因此燃烧稳定性强, 使得与燃料发生氧化放热反应的氧气浓度远远低于通常的 21%, 甚至可以低于

5%, 实现了超低氮氧化物的燃烧[5,8]。由于 HTAC 技术显著的稳燃和低 NO<sub>x</sub> 燃烧性能, 早在上个世纪 90 年代在日本得以发展, 随后在欧美都得到很大的重视, 此类技术还被称为无焰氧化 (Flameless Oxidation, FLOX) 技术, 低 NO<sub>x</sub> 喷射 (Low NO<sub>x</sub> Injection, LNI) 技术, 或者 Mild Combustion (MILD)[6]。这种燃烧方式被广泛地应用于冶金钢铁等行业, 作为燃烧低热值燃料、回收高温烟气带走的热能和减低 NO<sub>x</sub> 排放的手段 [5-11]。实验室研究和理论分析表明, HTAC 用于煤粉燃烧时, 也可以显著地促使煤粉气流的着火提前, 提高了煤粉气流的着火性能, 而且由于颗粒升温迅速, NO<sub>x</sub> 生成大幅度下降[12]。

然而, 传统的 HTAC 使用上存在局限, 即只能适合于气体燃料, 不能在工程上应用于煤粉锅炉。主要的原因是传统的 HTAC 技术使用的是多孔介质换热器, 加热二次风空气。对于燃煤锅炉, 烟气中含有大量的粉尘, 使用传统高温换热器将造成严重积灰和结渣。另外受材料限制, 换热器的入口烟温不能过高, 将二次风加热到 1000℃ 所需的换热器设备庞大, 布置复杂, 在工程上非常困难[5-8,11]。近期研究表明, 利用燃烧器的特殊结构可以实现高温烟气回流, 将部分高浓度煤粉气流快速升温, 在入炉前达到一次风气流着火点的高温, 同时保证燃烧前期的还原性气氛, 也可以达到传统 HTAC 的效果, 实现煤粉的高温空气燃烧 [7,13]。

### 2.2 富氧燃烧

富氧燃烧 (Oxygen Enriched Combustion) 则是另一种增强燃烧强度的燃烧方法, 它是将反应气流中的 O<sub>2</sub> 浓度增加到大于空气中相应的 21% 浓度。与 HATC 类似, 富氧燃烧最早应用在气体燃烧。由于燃烧强度的增强, 对于燃气轮机而言, 燃烧可以在贫燃区内进行, 燃烧温度减低, NO<sub>x</sub> 生成量减少[14-15]。而近几年来, 由于人们对温室气体 CO<sub>2</sub> 排放的重视, 富氧燃烧在煤粉锅炉应用的研究方兴未艾, 许多研究使用较高浓度的 O<sub>2</sub> 甚至纯氧作为氧化剂, 并建立了工业示范[16], 这种情况下的富氧燃烧技术也被称为全氧燃烧, 即 Oxyfuel Combustion Technology, 是国际上煤粉燃烧研究的一个热点[17-21]。目前制约该技术发展的最大问题是: 氧气的制备能耗过大, 往往需要牺牲整个发电机组 10% 左右的效率[19], 在经济上可行性差。就目前的资料显示: 在富氧助燃方面的应用, 都以膜法富

氧助燃为最多。在以气、油、煤为燃料的不同场合进行了富氧应用试验,发现用 23 % 的富氧助燃可节能 10 %~25 %; 用 25 % 的富氧助燃可节能 20 %~40 %; 用 27% 的富氧助燃则节能高 30 %~50 % 等。因此,日本早在十几年前就规定[18]: 工业用大型锅炉的 26.6 %、工业用中型锅炉的 31.7 %、取暖用锅炉的 15 %、船舶动力装置的 33.3 % , 不得用普通空气,而要使用富氧空气助燃。此外,美、德、英、法、捷克和前苏联等均有膜法富氧用于助燃的报导。

需要特别指出是,国外绝大部分用的是整体增氧,即所需空气全用富氧来代替,所以投资非常大,只有当氧/燃料价格比小于某值时,富氧助燃才有实际意义。

另外,现有的研究和示范都表明,增大 O<sub>2</sub> 浓度不仅可增大煤粉反应活性,可以减低煤粉燃烧的 NO<sub>x</sub>[14,20]。

因此,利用燃烧需氧的一部分适当增加局部(一次风喷口处)氧气浓度,增强煤粉气流中煤粉颗粒的反应活性和与氧化剂反应的强度,促使煤粉快速热解和挥发分的快速释放,与 HTAC 技术相结合,将煤粉颗粒的挥发分集中释放与煤粉碳粒共同形成一个强还原区,使煤粉中的 N 尽可能地转化为挥发分 N,并在这一还原区内还原为 N<sub>2</sub>,减少 NO<sub>x</sub> 的生成,同时,煤粉颗粒自身得到快速的升温,在进入炉膛时达到着火温度,即煤粉在进入主燃区前已实现无焰氧化[6-7],达到既促进煤粉着火火焰稳定的目的,节约了燃油又考虑了制氧的成本。

### 3 富氧节油煤粉燃烧器

#### 3.1 富氧节油煤粉燃烧器的工作原理

在 HTAC 中,煤粉高温预热十分重要,使用烟气回流加热是一种有效和经济的方法。图 1 所示为富氧节油煤粉燃烧器结构示意图,图 2 为富氧调节控制原理图。

富氧节油煤粉燃烧器中,煤粉气流(浓粉)从偏心的喷口进入预热室,在空腔内形成比炉膛压力更低的负压区,炉膛中的高温烟气被卷吸回流至预热室中,而流经预热室的煤粉气流则与高温烟气强烈混合迅速升温。在预热室的尾部设有一补气门,供入富氧气流,与自动装置系统连接。补气风的大小和富氧程度可以调节预热室的负压、热烟气的回流量和煤粉气流的预热程度,而且还可以调节入炉时煤粉气流的风煤比,

改变煤粉气流的着火特性。预热室出口处设有热电偶。把煤粉气流着火位置处于距燃烧器喷口约 300mm 时测得的温度值设定为所燃煤种的参考温度,在运行时,用自动控制系统调节补气门开度,保持该热电偶测得的温度值与参考温度相同,使得着火位置控制在喷口外设定的位置,并防止在预热室内出现过早燃烧,避免结渣烧损燃烧器。

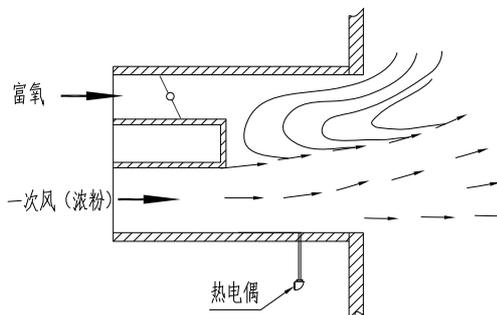


图 1 富氧节油煤粉燃烧器示意图

Fig.1 Schematic structure of oxygen-enriched fuel-oil saving burner of pulverized coal



图 2 富氧调节工作原理图

Fig.2 Schematic of oxygen enrichment adjustment

#### 3.2 氧浓度与煤粉升温速度对着火稳定性的影响

煤粉的着火稳定性可以从 TG 曲线和着火稳定性指数 RW 以及着火温度来定量判断。RW 是煤粉着火稳定燃烧的综合判别指标,其计算式如下[22]:

$$Rw = \frac{560}{t_i} + \frac{650}{t_{imax}} + 0.27W_{imax}$$

式中,  $t_i$  为着火温度/°C;  $t_{imax}$  为易燃峰最大反应速率对应的温度/°C;  $W_{imax}$  为易燃峰最大反应速率/mg/min。

RW 越大表明煤粉的反应性好,着火温度低,反应速率高,判别界限如表 2 所示[22]。

表 2 着火稳定性判别指数

Tab. 2 Index of pulverized coal ignition

$Rw$	<4.0	4.0—4.6	4.65—5.0	5.0—5.7	>5.7
等级	极难	难	中等	易	极易

图 3~5 为神木烟煤在热重分析仪上试验的结果。实验采用的热重分析仪为德国 Netzsch 公司生产, 型号为 STA 409C。图 3 表明, 当氧的浓度从 20% 增大到 100% 的过程中, TG 曲线变陡, 煤粉反应速度加快, 着火提前。

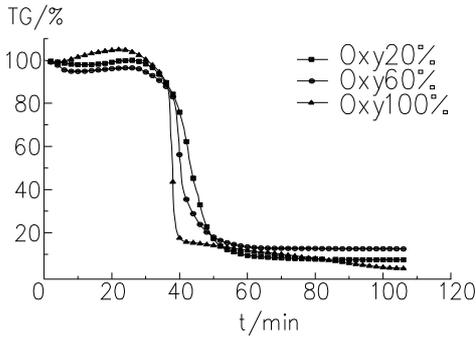


图 3 氧气浓度对 SM 煤 TG 曲线的影响  
Fig.3 The effect of O<sub>2</sub> concentration on TG curve for SM coal

图 4 是在氧浓度为 30% 的条件下, 三种不同的升温速率神木烟煤的 TG 曲线。可以看出, 随着升温速率的增加, TG 曲线向左移动, 着火提前。图 4 表明: 燃烧器的预热升温速度对煤粉点火稳燃影响重大, 因此保持燃烧器出口的高温是稳定燃烧的关键。图 5 是某烟煤在三个升温速率下, 氧浓度与 RW 的关系, 从中可以看出: 氧浓度和升温速率的提高都提高了煤粉的反应性, 增加了着火稳定性。

响煤粉气流着火的重要因素之一。

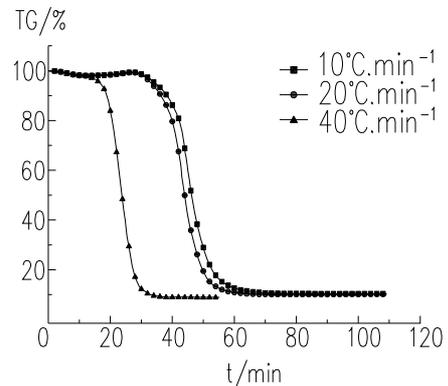


图 4 升温速率对 SM 煤 TG 曲线的影响  
Fig.4 The effect of different temperature rising rate on TG curves for SM coal

图 6 所示是在沉降炉中, 纯空气和富氧 (40%) 两种条件下神木煤煤粉气流着火温度随煤粉浓度变化的规律。对比两条曲线可以看出: 在任何煤粉浓度条件下, 富氧条件下着火温度都比纯空气低约几十度到一百多度。在富氧条件下, 煤粉气流着火温度随着煤粉浓度的增加而降低, 在纯空气时, 着火温度先升高后降低。在煤粉浓度大于 0.4kg/kg 时, 着火温度下降幅度较大。神木煤在氧气浓度为 40%, 煤粉浓度 0.57kg/kg 时, 着火温度为 428°C, 神木煤在此时足以替代油作为电站锅炉点火启动和低负荷稳燃的燃料。

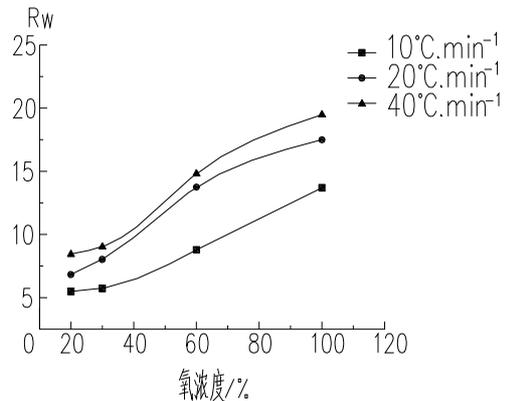


图 5 氧气浓度和升温速率对 RW 的影响  
Fig.5 The effect of O<sub>2</sub> concentration on RW at three kinds of the temperature rising rate

图 7 为神木煤在煤粉浓度为 0.4kg/kg 时, 氧气浓度对神木煤煤粉气流着火温度的影响。着火温度随着氧气浓度的升高而降低, 当氧气浓度大于 40% 时, 下降趋势变小; 当氧气浓度大于 80% 时, 着火温度曲线趋于平缓, 这是因为煤粉表面在高氧浓度下有烧结现象。氧气浓度从 20% 升高到 100%, 神木煤煤粉气流着火温度从 768°C 下降到了 398°C, 所以氧气浓度是影

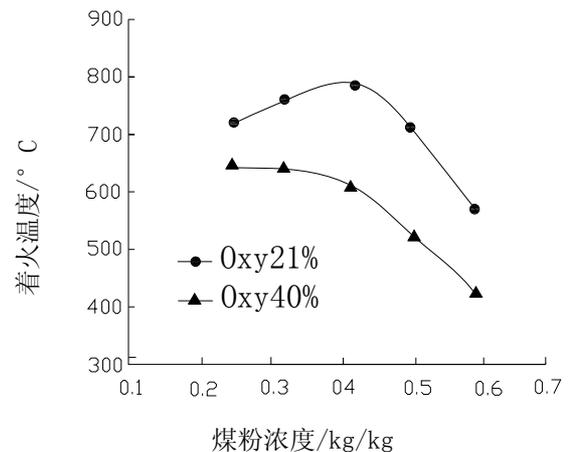


图 6 煤粉浓度对 SM 着火温度的影响  
Fig.6 The effect of fuel equivalence ratio on the ignition temperature of SM coal

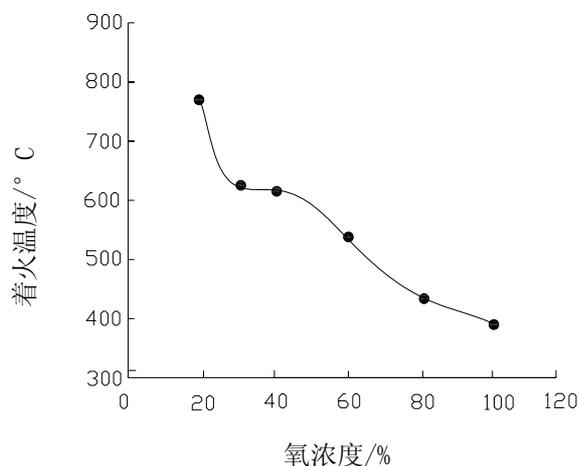


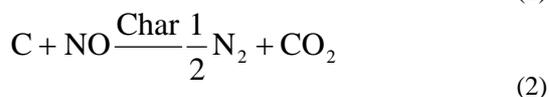
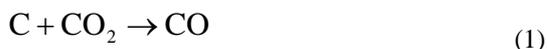
图7 氧气浓度对 SM 煤着火温度的影响

Fig.7 The effect of O<sub>2</sub> concentration on the ignition temperature of SM coal

### 3.3 氧浓度对 NO<sub>x</sub> 的生成的影响

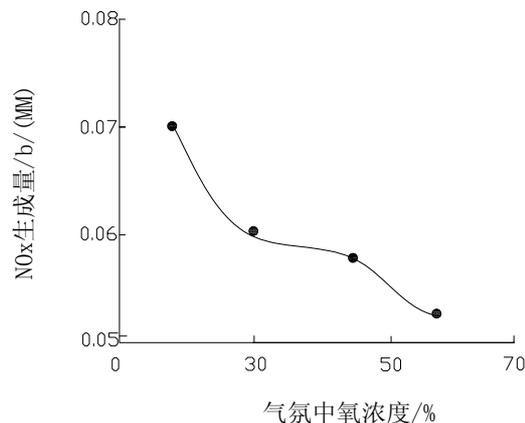
众所周知，燃煤时所形成的 NO<sub>x</sub> 可分为 3 种：热力型（又称温度型）NO<sub>x</sub>、快速型 NO<sub>x</sub> 和燃料型 NO<sub>x</sub>。热力型 NO<sub>x</sub> 为燃烧用气氛中的 N<sub>2</sub> 分子在高温下氧化而生成的氮氧化物；快速型 NO<sub>x</sub> 为煤燃烧时产生的烃（CH<sub>i</sub>，如 CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub> 和 C<sub>2</sub> 等基团）等物质撞击燃烧气氛中的 N<sub>2</sub> 分子而生成 CN、HCN 等产物，这些产物再被氧化生成氮氧化物；燃料型 NO<sub>x</sub> 为煤中的有机氮化合物在燃烧过程中氧化生成的氮氧化物。前两种 NO<sub>x</sub> 的生成均与燃烧气氛中的 N<sub>2</sub> 有关，而煤粉在富氧气氛下燃烧时，气氛中 N<sub>2</sub> 浓度很低，这就大大减少了热力型 NO<sub>x</sub> 和快速型 NO<sub>x</sub> 的生成。

富氧条件下 NO<sub>x</sub> 排放降低的另一个原因是由于在未燃烧碳表面发生 NO/CO/Char 的反应，促进 NO 还原为 N<sub>2</sub>，即：



在富氧条件下，N<sub>2</sub> 的浓度大大下降，使得烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度显著增加，会在燃烧开始时使碳发生还原反应，生成较高含量的 CO（见式（1））。富氧条件下燃烧时，CO 体积浓度始终比在空气气氛下高得多。这就导致了 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下 NO<sub>x</sub> 质量浓度的进一步降低。

富氧对燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 排放量的抑止作用不仅为实验室的实验所证实[22]，而且得到了工业试验的验证。图 8 为 Alstom 在低温燃烧下的工业试验结果[24]。

图8 氧含量对 NO<sub>x</sub> 排放的影响Fig.8 The effect of O<sub>2</sub> concentration on NO<sub>x</sub> emission

研究和理论分析表明，HTAC 用于煤粉燃烧时，也可以显著地促使煤粉气流的着火提前，提高了煤粉气流的着火性能；富氧燃烧不但可以增加煤粉反应活性，降低煤粉着火温度，而且还不同程度的降低 NO<sub>x</sub> 的排放量。

## 4 富氧节油燃烧器应用前景分析

富氧节油煤粉燃烧器具有良好的自动调节性能，可根据煤种变化，自动调节富氧浓度和煤粉预热温度，保证燃烧器稳定安全运行。

富氧节油燃烧器兼稳燃、低 NO<sub>x</sub> 燃烧和节油点火于一体。可以直接在现有锅炉上改造，也可以使用于新建锅炉。

与传统燃烧器相比，富氧节油燃烧器需要额外的氧气制造、储存装置和供给系统。其经济性取决于氧消耗/节省油量的比值。对于许多电厂而言，由于汽轮机冷却时需要使用氢气，而氢气通过电解水获取，在此过程中会有氧气产生，这部分氧气就可作为富氧节油煤粉燃烧器中的氧气。

对于一个 600MWe 的燃煤锅炉，假定燃煤发热量为 5000kcal/kg（~21MJ/kg）左右，满负荷下耗煤量为 230t/h。假定一次风率为 15%，则一次风的总量为 253t/h。假设有 36 只燃烧器，分三层布置，如果只对两层燃烧器改造，而将该层一次风中的 O<sub>2</sub> 浓度由 21

%提高到30%，则需补充的氧气量为： $\sim 9\% \times 253 \times 2/3 = 22\text{t/h}$ ，若改造一层则减半为11t/h。即便是增加一个空分设备，初投资和运行费用也是可以接受的。如果只加给少部分浓缩后的一次风粉气流，使用的氧气量更小。

从燃烧器的结构上看，氧气的加入非常方便，对现有锅炉的改造和新建锅炉都适用。在锅炉正常运行时，切断氧气供给即可，燃烧器仍可作为主燃烧器使用。

## 5 结束语

本文介绍了一种新型的锅炉节油方法和燃烧装置，即富氧节油煤粉燃烧器。这种煤粉燃烧器可以在煤粉锅炉上作为主燃烧器使用，在常规运行中，可以降低NO<sub>x</sub>的排放，在低负荷状态下，可以有稳燃作用；在锅炉点火时，可以作为点火燃烧器，以氧代油；在煤种变化时，可以根据煤质的不同，调节补充O<sub>2</sub>流量和高温空气预热的程度，使锅炉具有较宽的煤种适应性。这种燃烧器也极有可能进一步发展为富集CO<sub>2</sub>的煤粉燃烧器。

本燃烧器产品在市场尚未出现，具有独创性。又由于使用的O<sub>2</sub>量较小，具有良好的煤种适应性。该新型燃烧器的应用前景广阔，范围包括我国众多的燃煤电站、尤其是燃用低挥发分煤和低热值煤的电站，也可为烟煤电厂的节油点火提供一条新的解决途径。

## References (参考文献)

- [1] ZHANG Chun-ju. Application and test about the ignition technology using small oil guns of gasification[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2008(39): 171-174(in Chinese).  
张春菊. 气化小油枪点火技术的研究[J]. 太原理工大学学报, 2008(39): 171-174.
- [2] YAN Xian-pu. The growing Chinese economy could be dragged down by high oil price. China financial, 2008(3): 34-35(in Chinese).
- [3] ZHANG Hai, LV Jun-fu, YUE Guang-xi, et al. Thermal pyrolysis plasma ignition technology[J]. Boiler Technology, 2006(4): 13-18. (in Chinese).  
张海, 吕俊复, 岳光溪, 等. 热裂解等离子点火技术[J]. 锅炉技术, 2006(4): 13-18.
- [4] ZHANG Hai, LV Jun-fu, LIU Qing, et al. A kind of ignition method and apparatus for fossil fuel [P]. 200610088862.X. China Patent, 2006.10. (in Chinese).
- [5] Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Study on the NO<sub>x</sub> release rule along boiler during pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (1) : 35-39 (in Chinese) . .  
金晶, 张忠孝, 李瑞阳. 煤粉燃烧炉膛沿程NO释放规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 35-39.
- [6] Weber R, Start J P, Kamp W. On the (MILD) Combustion of Gaseous, Liquid, and Solid Fuels in High Temperature Preheated Air [C]. Proceedings of the Combustion Institute 30, 2005: 2623-2629.
- [7] JIANG Xiu-min, YANG Hai-ping, LIU Hui, et al. Analysis of the effect of coal power granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12) :142-160 (in Chinese) .  
姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142-160 (in Chinese)
- [8] QI Hai-ying, LI Yu-hong, YOU Chang-fu, et al. Recent development of high temperature air combustion technology in the world[J]. Industrial Heating, , 2003, 32(1): 1-7.  
祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温空气燃烧技术的国际发展动态[J]. 工业加热, 2003, 32(1): 1-7.
- [9] Zhou Yonggang, Zou Pingguo, Zhao Hong. Experimental study of effects of pulverized coal characteristics on the conversion of fuel nitrogen to NO<sub>x</sub> [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 63-67(in Chinese).  
周永刚, 邹平国, 赵虹. 燃煤特性影响燃料N转化率试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 63-67.
- [10] LIU Zhao-miao, WANG Xiu-li, YU Hai-yuan, et al. The status and development of high temperature air combustion technology in China[J]. Journal of Beijing university of technology, 2006, 32(7): 618-621(in Chinese).  
刘赵淼, 王秀丽, 于海源, 等. 国内高温空气燃烧技术发展现状和趋势[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(7): 618-621.
- [11] JIANG Shao-jian, PENG Hao-yi, AI Yuan-fang, et al. A new type of high temperature air fired boiler and an analysis of its specific features [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15: 348-351, (in Chinese) .  
蒋绍坚, 彭好义, 艾元方, 等. 高温空气燃烧新型锅炉及特性分析[J]. 热能动力工程, 2000, 15: 348-351.
- [12] LÜ Qing-gang, NIU Tian-yu, ZHU Jian-guo, et al. Experimental study on combustion and NO<sub>x</sub> emissions of high temperature preheated coal-based fuel [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (23) : 81-86 (in Chinese) .  
吕清刚, 牛天钰, 朱建国, 等. 高温煤基燃料的燃烧特性及NO<sub>x</sub>排放试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 81-86.
- [13] Mao JX, Jia Z, Zhang H, et al. Reduction NO<sub>x</sub> with PRP burner for anthracite fired boilers [A]. Proceedings of the 31st International Conference on Coal Utilization and Fuel System [C]. Clearwater, Florida, USA, 2006: No. 21.
- [14] Qin WJ, Ren JY, Egolfopoulos FN, et al. Oxygen composition modulation effects on flame propagation and NO<sub>x</sub> formation in methane/air premixed flames[C]. Proceedings of the Combustion Institute 28, 2000: 1825-1831.
- [15] Horbaniuc B, Marin O, Dumitrascu G et al. Oxygen-enriched combustion in supercritical steam boilers[J]. Energy, 2004, 29(3): 427-448.
- [16] NU Tian-kuang. Preliminary study of boiler with oxygen-enriched combustion [J]. Boiler Technology, 2008, 39(1): 25-31(in Chinese).  
牛天况. 富氧燃烧锅炉初探[J]. 锅炉技术, 2008, 39(1): 25-31.
- [17] FAN Yue-sheng, ZOU Zheng, GAO Ju-bao, et al. Study of oxygen content on combustion characteristics of pulverized coal [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24) 81-86 (in Chinese) .  
樊越胜, 邹峥, 高巨宝, 等. 煤粉在富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 81-86.
- [18] XU Ying-chao, MAO Tian, MA HONG-tao, et al. Experimental study of the flow of pulverized coal ignition specialty on oxygen-enriched [J]. Boiler Technology, 2008, 39(1): 42-46(in Chinese).  
徐迎超, 毛天, 马洪涛, 等. 富氧气氛煤粉气流着火特性的实验研究. 锅炉技术, 2008, 39(1): 42-46.
- [19] Santos S, Haines M, Davison J, et al. Challenges in the development of oxy-combustion technology for coal fired power plant[C]. Proceedings of the 31st International Conference on Coal Utilization and Fuel System, Clearwater, Florida, USA, 2006:

- No. 1.
- [20] FANG Li-jun , GAO Zheng-yang , YAN Wei-ping , et al. Experimental study on performance of NO<sub>x</sub> emission for low volatilization coals [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8) 211-214 (in Chinese) .  
方立军, 高正阳, 阎维平, 等. 低挥发分煤燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 211-214.
- [21] Maier J, Dhungel B J, Mönckert P, et al. Coal combustion and emission behaviour under oxy-fuel condition[C]. Proceedings of the 31st International Conference on Coal Utilization and Fuel System, Clearwater, Florida, USA, 2006: No. 7.
- [22] SUN Xue-xin, Coal-fired boiler technology and methods of combustion test [M]. China Electric Power Press, 2002, 75-78.
- [23] ZOU Chun, HUANG Zhi-jun, CHU Kun, et al. A pilot scale study on SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emission control in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycled coal combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 29 (2) 20-24 (in Chinese) .  
邹春, 黄志军, 初琨, 等. 燃煤 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 循环燃烧过程中 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 协同脱除的中试研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 29(2): 20-24.
- [24] Nsakala ya Nsakala, Gregory N, David G Turek. Greenhouse gas emissions control by oxygen firing in circulating fluidized bed boilers[R]. ALSTOM POWER NC, 2004.