

DOI: 10.3901/JME.2015.12.146

多次分级中心给粉旋流煤粉高效低氮氧化物 燃烧技术*

遆曙光 陈智超 蒋炳坤 曾令艳 宗秋冬 李 松 李争起 朱群益
(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现煤粉高效燃烧和低 NO_x 排放, 将中心给粉旋流燃烧器与燃烬风技术相结合, 形成多次分级中心给粉旋流燃烧技术。阐述多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术原理和特点, 并指出该技术不仅可以大幅降低 NO_x 排放, 同时还具有燃烧效率高、防止结渣和高温腐蚀的优点, 并通过实验室试验和工业试验验证该技术的原理。在实验室和实际锅炉上, 采用飘带示踪法对不同燃烬风率和外二次风叶片角度下的空气动力场进行测量。试验表明, 该燃烧器可以在燃烬风率为 25% 时可以形成稳定的中心回流区, 回流区随着外二次风叶片角度减小而增大。采用三维激光多普勒动态粒子分析仪对采用多次分级技术条件下中心给粉旋流燃烧器出口气流流动特性进行测量。试验表明, 颗粒相对数密度峰值出现位置靠近燃烧器中心位置。在一台 600 MW 机组锅炉上进行热态试验。试验表明, 煤粉在距离喷口约为 0.1 m 位置着火, 具有较强的稳燃能力。同时, 介绍该技术的应用情况。

关键词: 煤粉锅炉; 中心给粉燃烧器; 多次分级; 低 NO_x 排放

中图分类号: TK224

High Efficient and Low NO_x Centrally Fuel Rich Swirl Burner with Multi-stage Combustion Technology

TI Shuguang CHEN Zhichao JIANG Bingkun ZENG Lingyan ZONG Qidong LI Song
LI Zhengqi ZHU Qunyi

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The combination of centrally fuel rich swirl burners with over fire air technology formed a centrally fuel rich swirl burner with multi-stage combustion technology for getting higher efficiency and controlling NO_x emission. The theory and characteristics of this technology is introduced and analyzed. This technology owns the following characters: Low NO_x emission, high combustion efficiency, slagging resistance and high temperature corrosion resistance. Laboratory and Industrial experiments and tested the theory. Single-phase cold flow air experiments on a centrally fuel-rich swirl burner are carried out to investigate the influence of the over fire air ratios and the outer secondary air angle on the flow characteristics in the laboratory and real boiler. The results show that a stable central recirculation zone is formed when an over fire air ratio of 25% and the size of the zone increase with the angle decreasing. A three-component particle-dynamics anemometer is used to measure flow characteristics in the near-burner region in the laboratory. The result show that the peak value of the relative particle number locates the burner centerline. Measurements are taken for a 600 MW wall-fired pulverized-coal utility boiler that is retrofitted with centrally fuel rich swirl coal combustion burners and multi-stage combustion technology. The result show that the burner has good performance when a over fire ratio of 25%. Some applications are given.

Key words: boiler; centrally fuel rich swirl burner; multi-stage; low NO_x emission

0 前言

燃煤锅炉机组占火电总装机容量 97%, 中国超

过 60% 的 NO_x 由煤燃烧产生的^[1], NO_x 所引起的环境污染问题一直被人们所关注, 因此研发低氮氧化物排放燃烧技术是解决目前环境污染的重要途径。

旋流煤粉燃烧技术在我国有着较广泛的应用, 尤其是近几年投产的大容量机组, 很多采用旋流煤粉燃烧技术。我国旋流煤粉燃烧技术多为引进国外技术或在国外技术基础上的改进技术。对于旋流煤

* 国家自然科学基金委创新研究群体(51421063)、国家自然科学基金青年科学基金(51406043)和哈尔滨工业大学杰出青年教师发展(HIT-NSRIF-2012073)资助项目。20140606 收到初稿, 20141202 收到修改稿

粉燃烧器, 国际或国内普遍采用中间淡、四周浓的煤粉浓缩方式。浓淡煤粉气流分别形成富燃料区和富氧区, 均偏离燃烧化学当量比, 从而降低 NO_x 。但由于我国动力用煤煤种多变、煤质偏差, 锅炉燃烧中普遍存在以下问题: 喷口结渣、 NO_x 排放量高、煤种适应性差等问题^[2-7]。

中国环保部最新颁布的《火电厂大气污染物排放标准》要求: 现有锅炉 2014 年 7 月 1 日起, 新建锅炉 2012 年 1 月 1 日起, 除 W 火焰锅炉和循环流化床锅炉外, NO_x 排放限值为 100 mg/m^3 (折 O_2 体积分数为 6%, 文中所提 NO_x 均指折 O_2 体积分数为 6%, 不再重复写出)。综合考虑运行及设备改造成本, 现有锅炉一般在采用烟气脱硝技术与低 NO_x 燃烧技术相结合的方案达到新的环保要求。因而在采用烟气脱硝技术之前通常采用低 NO_x 燃烧技术降低炉膛出口 NO_x 质量浓度。低 NO_x 燃烧器降低 NO_x 幅度有限, 所以越来越多的电站锅炉同时采用低 NO_x 燃烧器和燃尽风技术, 使炉内形成空气整体分级燃烧, 从而达到降低 NO_x 排放的目的。LI 等^[8]在一台采用切圆燃烧方式锅炉上研究了分级燃烧对 NO_x 生成的影响, 结果表明 NO_x 随着燃尽风挡板开度的增加而下降, 但过大开度会导致大量未燃尽焦炭在燃尽风区燃烧从而生成过多的 NO_x , 同时也导致了锅炉效率的降低。COSTA 等^[9]在采用旋流煤粉燃烧器前墙布置的 300 MW 燃煤锅炉上进行了工业试验研究, 把原燃烧器改造成低氮旋流燃烧器, 同时改进了原燃尽风喷口结构, 主燃区过量空气系数由改造前 1.0 降低到 0.85, NO_x 排放量由改造前 650 mg/m^3 降低到 500 mg/m^3 以下, 飞灰含碳量则有改前的 4% 增加到了 5.8%。JING 等^[10]对一台采用 IHI 旋流燃烧器的 200 MW 机组锅炉在不同燃尽风挡板开度进行了工业试验研究, 研究结果表明, 与燃尽风挡板开度为 0% 相比, 燃尽风挡板开度为 80% 时, 炉膛出口的平均 NO_x 排放量从 $1\ 203.6 \text{ mg/m}^3$ 减少到 511.7 mg/m^3 ; 排烟温度由 144.6°C 升高到 156.3°C 。LI 等^[11]在一台 W 火焰炉研究了不同燃尽风摆放角度对 NO_x 生成的影响, 结果表明燃尽风摆放角度由 20° 增加到 30° , 氮氧化物由 $1\ 123 \text{ mg/m}^3$ 增加到 $1\ 192 \text{ mg/m}^3$, 同时飞灰含碳量也增加了 0.5%。从以上研究表明, 无论哪种燃烧组织方式采用炉内空气分级技术后, NO_x 排放可以大幅降低, 飞灰含碳量或者排烟温度也随之增加, 直接影响锅炉效率, 尤其是对于采用旋流燃烧器的现役锅炉, 采用炉内空气分级技术, 二次风量减少, 燃烧器出口动力场发生很大变化直接导致燃烧恶化。

综上所述, 引进国外的锅炉燃烧技术难以适应

中国电站锅炉实际情况, 开发适合中国国情的低氮氧化物排放和高效燃烧技术迫在眉睫。

1 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术的提出

陈智超等^[12-13]提出了中心给粉旋流煤粉燃烧技术, 如图 1 所示。在一次风通道中布置煤粉浓缩环, 使煤粉气流被集中到燃烧器的中心, 经一次风喷口喷入炉膛。喷入位置正对燃烧器的中心回流区中心部分。二次风通过二次风道进入燃烧器后分成两部分, 由于二次风被分成了内、外两部分, 因而在燃烧器区域形成了分级燃烧; 煤粉被浓缩至燃烧器中心处, 形成燃料分级燃烧。中心给粉旋流燃烧器与燃尽风技术相结合, 实现了燃料及空气的多次分级燃烧, 形成了多次分级燃烧技术。

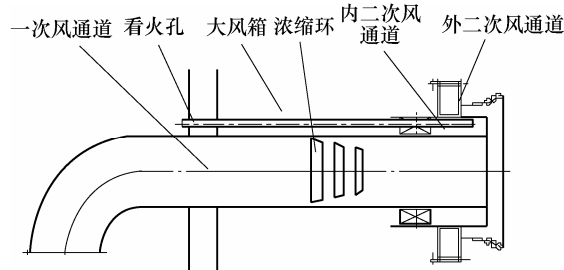


图 1 中心给粉旋流煤粉燃烧器结构简图

2 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术单相及气固两相流动特点

2.1 实验室单相冷态流动特性

根据某电厂 600 MW 机组锅炉实际运行资料及设计资料, 在采用炉内空气分级技术后, 通过冷态试验对中心给粉旋流燃烧器结构进行了优化。

为了了解不同燃尽风率(Over fire air, OFA)中心给粉旋流燃烧器出口射流结构的影响, 进行了不同燃尽风率试验。图 2 为不同燃尽风率条件下燃烧器出口空气动力场, 图 2 中 x 为沿射流主流流动方向距燃烧器最外层扩口的距离, r 为沿射流径向方向距燃烧器中心线的距离, 燃尽风率为 0% 表示燃尽风率为 0%。从图 2 可以看出, 随着燃尽风率的增加, 燃烧器二次风量减小, 回流区在轴线的起始点后移, 回流区长度变短, 回流区和扩展角最大直径变小。这是由于燃烧器二次风量随着燃尽风率增加而减小, 旋流强度降低导致的。当燃尽风率为 35% 时, 回流区明显变小且不稳定, 可能会导致燃烧不完全, 飞灰可燃物含量增加, 过热器减温水量

增大; 燃烬风率在 0%~25% 范围, 均能形成稳定的回流区, 能够满足燃烧的需要。因此本文研究对象某电厂 600 MW 机组锅炉设计燃烬风率为 25%。

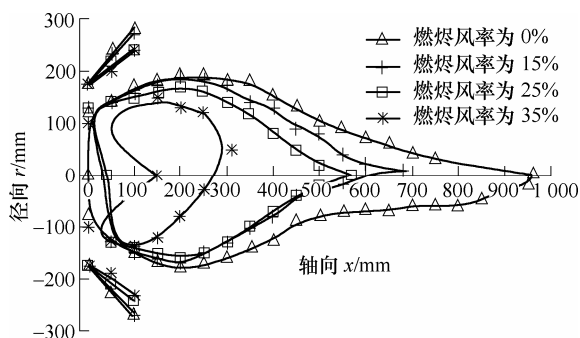


图 2 不同燃烬风率下中心给粉燃烧器的空气动力场

2.2 现场冷态空气流动特性

图 3 给出了某电厂 600 MW 机组锅炉设计燃烬风率为 25%, 外二次风叶片角度为 25° 时 1 号和 2 号两只中心给粉燃烧器流场结构, 其中 1 号燃烧器靠近炉膛中心位置, 2 号燃烧器靠近侧墙位置。从图 3 中可知, 靠近侧墙的 2 号燃烧器各工况下中心回流区较 1 号燃烧器大。两只燃烧器都能形成稳定的中心回流区, 可以满足煤粉燃烧需要。从现场观察发现, 相邻 2 只燃烧器未出现相互干扰的现象。

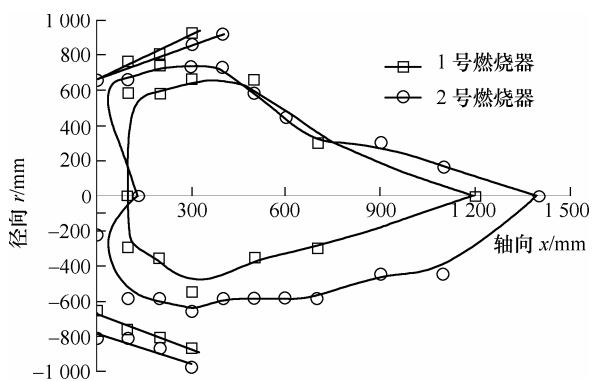


图 3 外二次风叶片角度为 25° 时的空气动力场

2.3 实验室中心给粉旋流燃烧器气固流动特点

在一气固两相试验台上, 采用三维激光多普勒动态粒子分析仪对采用多次分级技术时中心给粉旋流燃烧器出口气固流动特性进行了测量。图 4 为采用多次分级技术时中心给粉燃烧器出口颗粒体积流量分布, 图 4 中 d 为燃烧器最外层扩口直径, C_n 为测点处颗粒数密度, C_{nmax} 为该截面最大颗粒数密度。由图 4 可知, 在 $x/d=0.1\sim0.7$ 的截面, 在中心线附近存在一个颗粒相对数密度的峰值区。在 $x/d=1.0$ 之后的截面, 颗粒相对数密度峰值出现在壁面处。蜗壳旋流燃烧器和径向浓淡燃烧器颗粒数密度则分别出现在靠近壁面的位置和回流区边界位置^[14]。与前二者相比, 中心给粉旋流燃烧器出现位

置更靠近中心线附近, 煤粉颗粒穿越回流区路程长, 停留时间长, 在回流区内高温还原性气氛下更有利于抑制氮氧化物的生成。

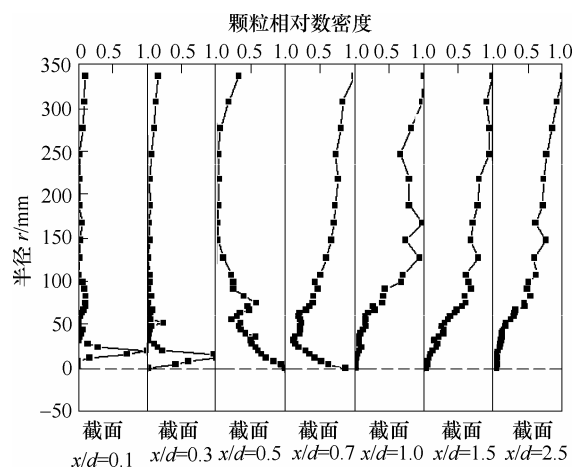


图 4 采用多次分级技术时中心给粉燃烧器出口颗粒体积流量分布

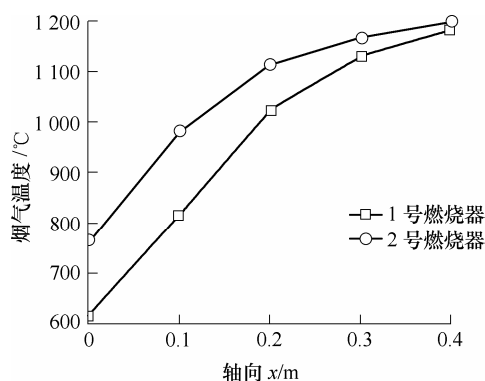
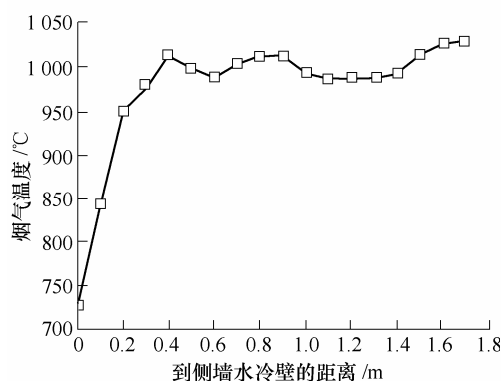
3 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术对燃烧的影响

3.1 对煤粉着火的影响

中心给粉旋流燃烧器在出口形成合适的中心回流区, 使大量煤粉颗粒穿越高温烟气回流区内, 穿越时间长, 有利于煤粉的稳定着火燃烧。在一台采用多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术 600 MW 机组锅炉上进行了热态试验研究, 试验结果如图 5、6 所示。由图 5a 和图 6a 可知, 2 号燃烧器出口烟气温度一直高于 1 号燃烧器, 特别是在出口附近, 温度高约 150 °C。由工业冷态试验可知, 靠近侧墙的 2 号燃烧器的中心回流区较靠近炉膛中心 1 号燃烧器大, 从而可以卷吸更多的高温烟气, 因此 2 号燃烧器温度相对比较高。在 $x=0.1\text{m}$ 时, 两只燃烧器烟气温度均高于 700 °C, O_2 所占体积分数迅速下降, 说明在 $x=0.1\text{m}$ 时已经开始着火。采用炉内空气分级技术后, 燃烧器稳燃能力依然较强。

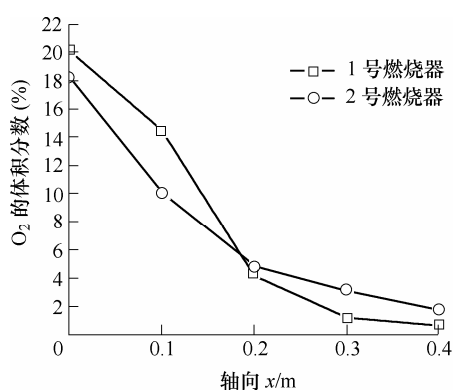
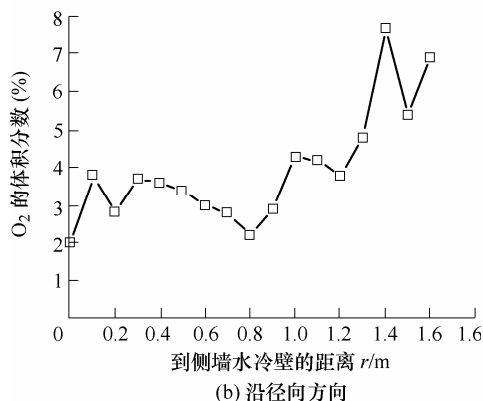
3.2 对侧墙高温腐蚀及结渣的影响

由图 5b、6a 可知, 烟气温度随着测点向侧墙方向移动而降低, 靠近侧墙区域烟气温度均在 750 °C 以下, 远低于灰熔点温度, O_2 所占体积分数约为 2%, 具有较强的氧化性气氛, 有利于防止结渣和高温腐蚀, 现场锅炉两侧墙未发现结渣现象。运行一年多, 小修时未发现高温腐蚀的现象。由两相试验结果和 CHEN 等^[15]对煤粉浓缩器的研究结果可以解释说明, 采用煤粉浓缩的燃烧器, 在燃烧器出口,

(a) 沿 x 方向

(b) 沿径向方向

图 5 1 号和 2 号燃烧器温度分布

(a) 沿 x 方向

(b) 沿径向方向

图 6 1 号和 2 号燃烧器 O_2 分布

中心线附近区域的颗粒体积流量始终为最高值, 颗粒体积流量和颗粒相对数密度在中心线附近区域衰

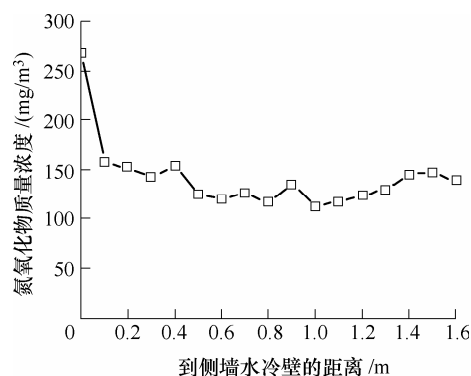
减慢, 靠近中心线的峰值位置没有向外侧移动。煤粉集中在燃烧器的中心区域, 有效地防止煤粉被甩到两侧墙上。

3.3 对飞灰含碳量及温水的影响

由第 3.1 节分析可知, 中心给粉旋流燃烧器具有较好的稳燃性能, 可以维持火焰中心在炉膛中下部的主燃区, 从而降低飞灰含碳量, 同时对主蒸汽超温现象也起到一定缓解作用。

3.4 对 NO_x 生成的影响

中心给粉旋流燃烧器煤粉喷入位置正对中心回流区的中心部分, 增加了穿过中心回流区的煤粉量, 并延长了煤粉在回流区的停留时间。使煤粉在还原性气氛中燃烧, 延长在还原性气氛中的停留时间, 有利于抑制燃料型 NO_x 的形成。图 7 为一台原采用北京巴威公司双调风旋流燃烧器的 600 MW 锅炉, 通过采用多次分级中心给粉旋流燃烧技术改造后靠近侧墙区域 NO_x 质量浓度分布, 各个点都在 300 mg/m^3 以下。炉膛出口 NO_x 质量浓度由较改造前 610 mg/m^3 降低 237 mg/m^3 。采用 PDA 对中心给粉旋流燃烧器和巴威双调风 EI-DRB 燃烧器出口气固两相流动特性测量结果说明了这一点^[16], 同时在一台 300 MW 机组锅炉工业试验结果也表明^[17-18], 中心给粉旋流燃烧器在燃烧器区域 NO_x 质量浓度低于 EI-DRB 双调风燃烧器, 仅单独把下层 8 只 EI-DRB 双调风燃烧器改造为中心给粉燃烧器燃烧时, 锅炉 NO_x 质量浓度降低 93 mg/m^3 。在一台 0.5 MW 热态试验结果表明^[19], 中心给粉旋流燃烧器结合炉内空气分级技术, NO_x 质量浓度排放低于 300 mg/m^3 。

图 7 靠近侧墙区域 NO_x 质量浓度分布

3.5 煤种适应性

由实验室单相及两相结果分析可知, 中心给粉旋流煤粉燃烧器出口可以形成稳定心形回流区, 煤粉颗粒在回流区内停留时间长, 在回流区内部形成高煤粉质量浓度和高温烟气, 所以煤种适应性较强。燃用贫煤或者无烟煤的 300 MW 机组锅炉采用该技术后, 飞灰含碳质量分数均低于 6%, 锅炉效率稍

微提高;由前面分析的 600 MW 机组为例,排烟温度、飞灰及大渣可燃物质量分数与改造前基本相同。说明中心给粉旋流燃烧具有很强的煤种适应性。

4 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术的工业应用

多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术自从提出以来,在工程实践中已完成了较多的应用实例,采用该技术对国外技术制造的或引进国外技术制造的 32 台 600 MW、500 MW 及 300 MW 等级机组锅炉上实施全面改造,其中 21 台为 600 MW 机组锅炉(12 台为超临界机组),已经完成改造的共计 28 台;其中燃用包括无烟煤与晋中地区贫煤或赤峰褐煤的混煤、神华烟煤、烟煤与印尼褐煤的混煤等多种煤种;改造的锅炉原来采用的技术如下:① 哈尔滨锅炉厂引进英国三井巴布科克能源公司技术;② 北京巴威公司引进美国巴威公司技术;③ 东方锅炉厂引进英国三井巴布科克能源公司技术;④ 日本 IHI 公司利用美国 FW 公司许可证制造;⑤ 武汉锅炉厂引进英国三井巴布科克能源公司技术;⑥ 日本

日立公司制造的原装锅炉;⑦ 斯洛伐克吐耳玛齐锅炉厂制造。

采用此技术对锅炉进行改造后,在高、低负荷下均可稳定运行,炉膛负压稳定,主蒸汽压力、主蒸汽温度达到了设计要求,锅炉低负荷稳燃能力不变;过热蒸汽减温水量和再热蒸汽减温水量、排烟温度与改造前基本相同,锅炉效率与改造之前基本持平或者略有提高;没有发现高温腐蚀问题,没有发现因结渣而影响锅炉运行的现象。与改前采用国外技术相比,燃用烟煤或烟煤与褐煤的混煤时,锅炉 NO_x 排放量降低 50%~65%。燃用无烟煤与贫煤的混煤(无烟煤比例在 60%以上)及无烟煤为主的混煤时(无烟煤比例达到 70%),锅炉 NO_x 排放量降低 42%~50%,锅炉最低不投油负荷为 45%。减缓了锅炉的结渣和高温腐蚀问题,提高了锅炉效率和机组的可利用时数,既提高了锅炉运行的安全性,又提高了锅炉的运行经济性。

表 1 和表 2 分别是采用多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术燃用烟煤、无烟煤及贫煤改造前后性能的比较。表 1、2 中氮氧化物值来源于电科院额定负荷下性能考核试验。

表 1 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术燃用烟煤应用情况

电厂	机组	制造商	主要改造范围	改前 氮氧化物排放 量/(mg/m ³)	改后 氮氧化物排放 量/(mg/m ³)
乌沙山 #1、2、3、 4 炉	600 MW 超临界	北京巴威	将除下层 5 只等离子燃烧器外的 25 只英巴燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器。在原燃烬风上部增加一层燃烬风装置(10 只)及附属系统	400.48	199.94
托克托 #3、4 炉	600 MW 亚临界	北京巴威	将除中层 6 只等离子燃烧器外的 30 只双调风燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器。等离子燃烧器内外二次风部分更换为中心给粉燃烧器结构。在燃烧器上部增加二层燃烬风装置(26 只)及附属系统	610.00	237.00
托克托 #5、6、7、 8 炉	600 MW 亚临界	东锅引进 英巴技术	将除下层 5 只等离子燃烧器外的 25 只英巴燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器。等离子燃烧器内外二次风部分更换为中心给粉燃烧器结构。在原燃烬风上部增加一层燃烬风装置(10 只)及附属系统	870.00	279.00
宁德 #3、4 炉	600 MW 超临界	哈锅引进 英巴技术	将除下层 5 只等离子燃烧器外的 25 只英巴燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器。在原燃烬风上部增加一层燃烬风装置(10 只)及附属系统	780.00	263.72
北仑 #3、4、5 炉	600 MW 亚临界	日本 IHI 公司	将原 24 只燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器(原下层 4 只微油点火燃烧器更换为采用微油点火的中心给粉燃烧器)。将上层燃烧器移至最下层燃烧器下部。在原上层燃烧器处增加一层燃烬风装置(8 只)及附属系统	663.00	282.00
马莲台 #1、2 炉	300 MW 超临界	武锅引进 英巴技术	将 25 只英巴燃烧器更换为中心给粉旋流煤粉燃烧器(D 层磨煤机采用的微油点火燃烧器更换为采用微油点火的中心给粉燃烧器)。将后墙上层燃烧器向下移动 4 m,调整位置后的燃烧器与前墙中层燃烧器标高相同。取消原有的燃烬风装置和燃烬风风箱,在前后墙原燃烬风位置分别重新开设 5 个燃烬风喷口,新开设的燃烬风喷口尺寸大于原燃烬风喷口尺寸	602.00	290.00
陡河 #3、4 炉	250 MW 亚临界	日本日立	将原 32 只日立燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器。在最上层燃烧器上部增加一层燃烬风装置(20 只)及附属系统	645.50	355.00

表 2 多次分级中心给粉旋流煤粉燃烧技术燃用贫煤、无烟煤应用情况

电厂	机组	制造商	主要改造范围	实际燃用煤质	改前 氮氧化物排 放量/(mg/m ³)	改后 氮氧化物排放量/ (mg/m ³)
邢台 #11 炉	300 MW 亚临界	北京巴威	将原 24 只双调风燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器; 在原燃烬风上部增加一层燃烬风装置(8 只)及附属系统	无烟煤与贫煤混煤	1 346	681
衡水 #1、3、 4 炉	300 MW 亚临界	北京巴威	将原 24 只双调风燃烧器完全更换为中心给粉燃烧器; 在原燃烬风上部增加一层燃烬风装置(8 只)及附属系统	无烟煤与贫煤或 褐煤的混煤	1 272	702

5 结论

将中心给粉旋流燃烧器与燃烬风技术相结合, 形成了多次分级中心给粉旋流燃烧技术。

(1) 实验室试验表明, 在设计燃烬风率为 25% 左右时, 燃烧器可以形成合适的中心回流区; 颗粒相对数密度峰值出现位置靠近燃烧器中心位置。

(2) 现场工业试验表明, 煤粉在距离喷口约为 0.1 m 位置着火, 具有较强的稳燃能力; 可以有效地防止侧墙高温腐蚀和结渣; 燃用烟煤、无烟煤、贫煤及褐煤煤种时, 锅炉效率与改前相比基本不变或者稍微提高, 具有很强的煤种适应性。与改前采用国外技术相比, 燃用烟煤或烟煤与褐煤的混煤时, 锅炉 NO_x 排放量降低 50%~65%。燃用无烟煤与贫煤的混煤(无烟煤比例在 60%以上)及无烟煤为主的混煤时(无烟煤比例达到 70%), 锅炉 NO_x 排放量降低 42%~50%。

参 考 文 献

- [1] LIANG Zengying, MA Xiaoqian, TANG Yuting, et al. The energy consumption and environmental impacts of SCR technology in China[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1120-1129.
- [2] 李德波, 沈跃良, 徐齐胜, 等. 运用燃烧数值模拟分析某台 660MW 超临界锅炉旋流燃烧器喷口烧损事故[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 121-130.
LI Debo, SHEN Yueliang, XU Qisheng, et al. Numerical investigations on the key mechanisms of burnout of swirling combustors for 660 MW supercritical unit swirl coal-fired combustion boiler[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(16): 121-130.
- [3] GAO Xiaotao, ZHANG Mingyao. NO_x emissions of an opposed wall-fired pulverized coal utility boiler[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2010, 5(3): 447-453.
- [4] 刘建全, 孙保民, 白涛, 等. 稳燃特性对 1000MW 超

超临界锅炉 NO_x 排放特性影响的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 132-139.

LIU Jianquan, SUN Baomin, BAI Tao, et al. Numerical simulation of NO_x emission of 1000 MW ultra-supercritical swirl combustion boiler on different combustion stability conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 132-139.

- [5] 王磊, 李争起, 郝金波, 等. 中心风对旋流煤粉燃烧器性能的影响[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 63-67.

WANG Lei, LI Zhengqi, HAO Jinbo, et al. The impact of wind on center performance swirl burner[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(6): 63-67.

- [6] 曾令艳, 李争起, 赵广播, 等. 预混段长度对旋流燃烧器气固两相流动特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2011(11): 1953-1956.

ZENG Lingyan, LI Zhengqi, ZHAO Guangbo, et al. The influence of different premixing length on gas/particle flow characteristics of swirl burner[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011(11): 1953-1956.

- [7] 金燕, 张海霞, 郑洽余, 等. 秦皇岛热电厂 670 吨/时锅炉旋流燃烧器改造探讨[J]. 热能动力工程, 2000(6): 604-606, 704.

JIN Yan, ZHANG Haixia, ZHENG Qiayu, et al. The discussion of Qinghuangdao power plant 670 t/h boiler swirl burner alteration[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000(6): 604-606, 704.

- [8] LI S, XU T, HUI S, WEI X. NO_x emission and thermal efficiency of a 300MWe utility boiler retrofitted by air staging[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1797-1803.

- [9] COSTA M, AZEVEDO J. Experimental Characterization of an industrial pulverized coal-fired furnace under deep staging conditions[J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(9): 1923-1935.

- [10] JING J, LI Z, LIU G, et al. Measurement of gas species, temperatures, coal burnout, and wall heat fluxes in a 200 MWe lignite-fired boiler with different overfire air damper openings[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(7): 3573-3585.

- [11] LI Z, LIU G, CHEN Z, et al. Effect of angle of arch-supplied over fire air on flow, combustion characteristics and NO_x emissions of a down-fired utility boiler[J]. *Energy*, 2013, 59: 377-386.
- [12] 陈智超, 李争起, 靖剑平, 等. 中心给粉旋流燃烧器气固两相流动的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(12): 305-310.
- CHEN Zhichao, LI Zhengqi, JING Jianping, et al. Numerical simulation of gas-particle two phase flow field for swirl burner[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(12): 305-310.
- [13] 李争起, 陈智超, 孙锐, 等. 适用于燃用贫煤 1025 t/h 锅炉的中心给粉旋流燃烧器[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 221-226.
- LI Zhengqi, CHEN Zhichao, SUN Rui, et al. Suitable for Burning Lean Coal 1025 t/h Boiler for Swirl Burner[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 221-226.
- [14] 秦裕琨, 李争起, 孙锐, 等. 风包粉煤粉燃烧原理及实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2000(5): 60-63, 67.
- QIN Yukun, LI Zhengqi, SUN Rui, et al. Study on experiment and the principle of air-surrounding-fuel (ASF) pulverized coal combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000(5): 60-63, 67.
- [15] CHEN Z, LI Z, ZHU Q, et al. Concentrator performance within a centrally fuel-rich primary air burner: Influence of multiple levels[J]. *Energy*, 2011, 36(7): 4041-4047.
- [16] CHEN Z, LI Z, JING J, et al. Gas/particle flow characteristics of two swirl burners[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(5): 1180-1191.
- [17] LI Z, CHEN Z, SUN R, et al. New low NO_x , low grade coal fired swirl stabilised technology[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2007, 80(3): 123-130.
- [18] LI Z, JING J, CHEN Z, et al. Combustion characteristics and NO_x emissions of two kinds of swirl burners in a 300-MWe wall-fired pulverized-coal utility boiler[J]. *Combustion Science and Technology*, 2008, 180(7): 1370-1394.
- [19] LI Z, LIU Y, CHEN Z, et al. Effect of the air temperature on combustion characteristics and NO_x emissions from a 0.5 MW pulverized coal-fired furnace with deep air staging[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(4): 2068-2074.
-
- 作者简介: 逄曙光, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为低 NO_x 煤粉燃烧技术及烟气污染控制。
E-mail: tishuguang@163.com
- 陈智超(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为浓淡煤粉燃烧技术的机理及工程应用。
E-mail: chenzc@hit.edu.cn
- 蒋炳坤, 男, 1992 年出生。主要研究方向为低 NO_x 煤粉燃烧技术及烟气污染控制。
E-mail: 1316271537@qq.com
- 曾令艳, 女, 1981 年出生, 讲师。主要研究方向为低 NO_x 煤粉燃烧技术及烟气污染控制。
E-mail: zenglingyanhit@126.com
- 宗秋冬, 女, 1989 年出生。主要研究方向为低 NO_x 煤粉燃烧技术及烟气污染控制。
E-mail: qiudong891206@163.com
- 李松, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为低 NO_x 煤粉燃烧技术及烟气污染控制。
E-mail: 89984716@qq.com
- 李争起, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为浓淡煤粉燃烧技术的机理及工程应用。
E-mail: green@hit.edu.cn
- 朱群益, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为浓淡煤粉燃烧技术的机理及工程应用。
E-mail: zhuqy@hit.edu.cn