煤粉热解气化耦合燃烧超低氮燃烧技术进展

刘 兴[1],和 宇[2],卢旭超[1],熊小鹤[1],谭厚章[1],惠世恩[1]
(1.西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室,陕西 西安 710049;2.西安特种设备检验检测院,陕西 西安 710065)

摘 要: 随着环保政策趋严,常规火电机组经超低氮排放改造对炉膛内部燃烧过程及尾部烟道燃烧后烟气进行氮氧化物协同脱除后,NO_x 已达到低于 50 mg/m^3 的水平。随着低 NO_x 燃烧技术的发展,煤粉热解气化耦合燃烧超低氮燃烧技术已引起重视,其主要思路是在预燃室内引入高温热源,对远低于化学当量比的浓煤粉气流进行加热,煤粉在预燃室内先快速释放挥发分并发生部分燃烧,其气相产物及高温半焦离开预燃室经燃烧器组织送入炉膛后进行低氮燃烧处理。与传统的选择性催化/非催化还原法(SCR/SNCR)等燃烧后降氮策略相比,该技术通过燃烧高温半焦直接在炉内燃烧过程中降氮,技术优势和经济潜力显著。预燃源是产生气相产物、高温半焦的关键环节,笔者根据预燃源方式的不同,介绍了天然气供热煤粉预燃、循环流化床供热煤粉预燃、等离子点火预燃室、感应加热点火预燃室、传统预燃室燃烧器等煤粉预燃技术的发展现状及应用情况,为相关技术人员提供参考。

关键词: 煤粉预热; 热解; 气化; 预燃室; 点火; 低 NO_x 燃烧
中图分类号: TQ53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2019)02-0032-06

Review of ultra-low NO_x combustion technology of pulverized coal pyrolysis and gasfication coupled with combustion

LIU Xing[1],HE Yu[2],LU Xuchao[1],XIONG Xiaohe[1],TAN Houzhang[1],HUI Shien[1]
(1.*MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering*,*Xi'an Jiaotong University*,*Xi'an* 710049,*China*;
2.*Xi'an Special Equipment Inspection Institute*,*Xi'an* 710065,*China*)

Abstract: With the environmental policies being strict,the NO_x of conventional thermal power units can reach the level of less than 50 mg/m^3 after combustion denitrification in furnace and post-combustion denitrification in flue through the transformation of ultra-low nitrogen emission.With the continuous development of low NO_x combustion technology,the ultra-low NO_x combustion technology of pulverized coal pyrolysis and gasification coupled with combustion has attracted more attention in the industry.The main idea of this technology is to introduce hot thermal source to heat up the pulverized coal air/fuel stream with ultra-low stoichiometric ratio in the pre-combustion chamber.The pulverized coal first fast releases volatile matter and partly combusts in the pre-combustion chamber.The gas phase products and high temperature semi-coke leave pre-combustion chamber and are transferred to the furnace through the burner for low NO_x combustion. Compared with traditional post-combustion denitrification method such as SCR and SNCR,this technology directly reduces nitrogen in the furnace combustion process by burning high-temperature semi-coke,which has greater technical advantages and economic potential.The pre-combustion source is the key step to produce gas phase products and high temperature semi-coke.According to different pre-combustion sources,this paper introduced these pulverized coal pre-combustion technologies,the natural gas heating pulverized coal pre-combustion,circulating fluidized bed heating pulverized coal pre-combustion,plasma ignition pre-combustion chamber,induction-heating ignition pre-combustion chamber and traditional pre-combustion chamber burners,etc.The progress and application of those technologies were analyzed to provide references for relevant technical staff.

Key words: coal preheating; pyrolysis; gasification; pre-combustion chamber; ignition; low NO_x combustion

收稿日期: 2018-12-24; **责任编辑:** 张晓宁 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.18122412
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604203)
作者简介: 刘 兴(1991—),男,陕西榆林人,博士研究生,主要研究方向为煤粉高效清洁利用。E-mail: liuxingcn@163.com。
通讯作者: 谭厚章(1965—),男,教授,主要从事煤的高效清洁燃烧与污染物脱除方面研究。E-mail: tanhz@xjtu.edu.cn
引用格式: 刘兴,和宇,卢旭超,等.煤粉热解气化耦合燃烧超低氮燃烧技术进展[J].洁净煤技术,2019,25(2):32-37.
LIU Xing,HE Yu,LU Xuchao,et al.Review of ultra-low NO_x combustion technology of pulverized coal pyrolysis and gasfication coupled with combustion[J].Clean Coal Technology,2019,25(2):32-37.
移动阅读

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0　前　　言

随着各地环保政策趋严,电力行业的环保工作面临严峻压力。2014 年 9 月国家三部委下发文件《煤炭节能减排升级与改造计划(2016—2020 年)》,要求相关火电机组在 2020 年之前排放满足烟尘 ≤ 10 mg/Nm^3、SO_2 ≤ 35 mg/Nm^3、NO_x ≤ 50 mg/Nm^3,各发电企业开始了新一轮超低氮排放改造。研究表明,NO_x 来源主要有 3 种类型: 快速型、热力型和燃料型[1]。对于煤粉炉而言,快速型 NO_x 生成量小,主要是热力型和燃料型 NO_x。目前热力型 NO_x 的控制策略主要是温度; 燃料型 NO_x 的控制策略主要是过量空气系数,保持主燃区欠氧,处于还原性气氛燃烧,这是目前降低 NO_x 排放的核心思想。根据具体实现方式,可分为炉内燃烧过程中的氮氧化物控制(如空气分级、低 NO_x 燃烧器、再燃、共燃、烟气再循环等)和燃烧后的氮氧化物控制(如 SCR、SNCR 等[2]),这些技术在氮氧化物脱除方面取得了较大成效,但面对 NO_x ≤ 50 mg/Nm^3 环保压力,亟待开发新型的氮氧化物脱除技术。

煤粉预热技术早期开发的重点是实现快速点火、强化低负荷稳燃,随环保政策趋严,将煤粉先预热再燃烧成为降低 NO_x 的一种重要手段。煤粉热解气化耦合燃烧超低氮燃烧技术的具体实现方式为: 煤粉进入炉膛燃烧前先通过预燃室对煤粉进行预燃,使煤粉快速释放挥发分并部分燃烧,生成大量高温半焦,对高温半焦和热解气混合物重新燃烧实现低 NO_x 排放。该技术主要是为了解决两方面问题: ① 通过煤粉预燃,使挥发分及时参与点火过程,提高燃烧的稳定性,有助于锅炉启动及低负荷稳燃时的锅炉性能; ② 煤粉在低过量空气系数(α<0.2)和较低温度(<1 000 ℃)下热解并部分燃烧,再合理组织预燃后的气粉混合物在炉膛内燃烧,从而获得低 NO_x 排放。预燃室产生的混合物通过常规方式燃烧,因此预燃室是关键环节。从预燃室热源的来源看,预燃室热源可分为燃气或燃油加热、循环流化床加热、等离子加热、烟气回流等类型。

1　煤粉预热低 NO_x 燃烧技术

1.1　天然气供热煤粉预热燃烧技术

20 世纪 80 年代,全俄热工研究院 VTI 提出"基于天然气燃烧供热的煤粉预热燃烧"技术[3-4](图 1)。其主要思路是将煤粉燃烧过程分为 3 个区: 热解区、还原区、燃尽区,其中热解区发生在燃烧器之前的炉外预燃室中,煤粉沿烟气沿程流动过程中,依次经历富燃料还原区和贫燃料燃尽区。主要过程为: 天然气首先与空气混合燃烧,煤粉气流经旋风分离器后高浓度煤粉与热烟气混合,煤粉被加热至 815 ℃以下发生部分热解,得到含氮中间产物(如 HCN、NH_3)丰富的热解气和煤焦混合物,经燃烧器送入炉膛燃烧。预热用天然气放热量占锅炉总放热量的 3%~5%。

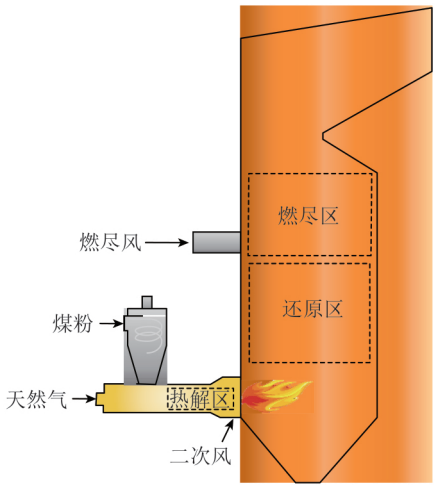

图 1　全俄热工院天然气预热燃烧示意

Fig. 1　Schematic of VTI's gas preheating combustion system

全俄热工研究院在 1.12 MW 试验台进行煤粉预燃试验,不同预热温度下的试验结果表明,预燃室温度高于煤种脱挥发分温度后,NO_x 排放值开始降低,降低幅度随温度升高而增大。对于 V_{daf} = 45% 的高挥发分烟煤,预热温度为 585 ℃时,与不预热相比,NO_x 排放浓度减少 60%,降至 283 mg/Nm^3(折算至 6% O_2); 预热温度达 727 ℃时,NO_x 排放浓度减少 80%,降至 138 mg/Nm^3; 低挥发分煤要达到相同的排放浓度需更高的预热温度。预热后,燃烧火焰温度有一定幅度的升高,与预热温度在 274 ℃以下时相比,预热温度为 424~585 ℃时燃烧火焰温度提高约 40 ℃,温度峰值位置提前。

该技术在 420 t/h 液态排渣煤粉锅炉上应用取得良好的降氮效果。预热温度 650 ℃,耗用天然气热量占输入使用总热量的 2.5%~3%。与不预热相比,火焰温度提高 80~120 ℃,NO_x 降低 56%~67%,使用炉膛空气分级技术后 NO_x 进一步降低 50%~60%。

2001—2003 年,美国燃气研究所 GTI 在 VTI 试验基础上搭建 0.88 MW 试验台进行试验,燃用煤种为 V_{ar} = 32% 的 PRB 烟煤。预燃室温度区间为 593~760 ℃,燃气输入热量占据总输入热量的 7%~12%。当煤粉在预燃室停留时间由 21 ms 增至 42 ms 后,NO_x 排放量降低 45%。无空气分级燃烧试验结果表

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

明，炉膛出口氧气体积分数由 2.2%降至 0.8%，NO_x 排放量由 196 mg/Nm^{3}降至 109 mg/Nm^3。

该技术由于只需在原有燃烧器基础上增加预燃室及燃气管路系统，系统布置紧凑，易于工程应用。试验发现，维持较高的预燃室温度所需天然气耗量比锅炉输入热量多 3%～5%，最高达 12%。GTI 试验表明，燃用易结块煤时燃气预燃室中易产生煤粉团聚堵塞现象，影响预燃室安全稳定运行。

1.2　循化流化床煤粉预热燃烧技术

中国科学院提出一种基于循环流化床预热低 NO_x 燃烧新工艺[5]，如图 2 所示。循环流化床主要由提升管、蓄热床料和旋风分离器组成，流化床无须额外热源加热，借助煤粉自身部分燃烧气化及床料蓄热即可实现自维持，旋风分离器出口高温热解气和细粉半焦混合物送入下行沉降炉，进行空气分级燃烧。与图 1 技术路线类似，煤粉燃烧过程可分为热解区、还原区、燃尽区，不同的是热解区在炉外的提升管中单独进行，热解室和燃烧器的布置与全俄热工院的技术有较大差异。

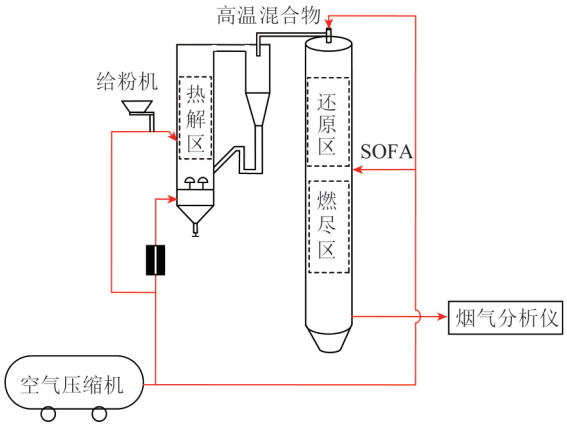

图 2　循环流化床预热低 NO_x 燃烧系统示意

Fig. 2　Diagram of CFB preheating low NO_x combustion system

朱建国等[5]在 30 kW 试验台上进行试验，煤种包括烟煤、无烟煤和半焦，V_{daf} 分别为 38.1%、7.6%及 9.8%，试验用原煤平均粒径 d_{50} = 80 μm，预燃室出口半焦平均粒径约 20 μm，结果表明，预热温度为 900 ℃，热解区、还原区、燃尽区过量空气分别为 0.25、0.7、1.3 时，无烟煤、烟煤、半焦的 NO_x 排放值分别为 256、368、458 mg/Nm^3。无烟煤的影响因素试验结果表明，热解室出口焦炭比表面积对最终 NO_x 排放影响较大。预燃室温度从 800 ℃升至 950 ℃时，焦炭比表面积先增大后减小，在 900 ℃时达到峰值，此时 NO_x 排放值最低。预燃室过量空气系数从 0.2 增至 0.3 时，预燃室出口 CH_4、CO 浓度及颗粒比表面积逐步增大，NO_x 排放值逐渐降低。煤粉在还原区的停留时间[6]从 0.4 s 增至 2.4 s 时，NO_x 排放值由 274 mg/Nm^{3}降至 103 mg/Nm^3，燃烧效率由 97.5%降至 93.5%。YAO 等[7]在此试验台上研究了 V_{daf} = 7.31 的半焦预热燃烧特性，半焦平均粒径为 103 μm。预热后预燃室出口半焦 V_{daf} = 2.1%～4.3%。热解区、还原区、燃尽区过量空气分别为 0.55、0.74、1.13 时，NO_x 排放值最低为 60 mg/Nm^3，燃烧效率为 97.74%。Ouyang 等[8]在 200 kW 循环流化床预热燃烧试验台上研究了挥发分 V_{daf} = 43.8%的超细煤粉 NO_x 排放特性。煤粉平均粒径为 18.38 μm，预热温度为 901 ℃，热解区、还原区、燃尽区过量空气分别为 0.14、0.48、1.26 时，NO_x 排放值最低为 92 mg/Nm^3，燃烧效率为 97.12%。不同燃尽风位置试验结果表明，NO_x 排放值随着燃尽风到燃烧器的距离增大而降低。

采用循环流化床对煤粉进行预热，系统仅需依靠原煤输入即可实现自维持。循环流化床煤种适应性较强，也适用于常规的四角切圆、墙式旋流煤粉锅炉中无法应用的无烟煤。试验结果表明，循环流化床预热燃烧系统 NO_x 排放值随燃用煤种挥发分的降低而降低，因此与常规煤粉锅炉、天然气预热燃烧锅炉相比，该方案在低挥发分煤氮氧化物控制方面具有优势。与天然气预热燃烧系统相比，煤粉在循环流化床预燃室停留时间远大于天然气预燃室。但单台循环流化床预燃室连接多只燃烧器，预燃室出口高温混合物需通过较长管路与各燃烧器连接，工程实现难度大。若预燃室与燃烧器一一对应，系统复杂度、设备成本将大幅提升。

2　煤粉预热点火技术

2.1　等离子点火煤粉燃烧器

等离子体是部分或完全电离的离子化气态物质，由大量带电粒子（离子、电子）和中性粒子（原子、分子）组成，电子所带的负电荷数和离子所带的正电荷数相等。配备阴阳极和线圈的等离子点火煤粉燃烧器利用直流电将压缩气流电离，形成温度为 3 000～6 000 K 的等离子电弧，煤粉气流经该高温区域与等离子流接触后，迅速释放大量挥发分燃烧，起到引燃整股煤粉气流的作用[9]。图 3 为等离子点火器示意，早期的点火燃烧器仅能形成断续的高温等离子电弧，煤种适应窗口窄，改进后为可连续引弧的等离子点火器，煤种适应性扩宽。

1978 年，美国的 CE 公司研制出世界上第 1 台高能电弧点火煤粉燃烧器，并在 900 MW 锅炉上成功应用[10]。俄罗斯、澳大利亚、哈萨克斯坦等

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

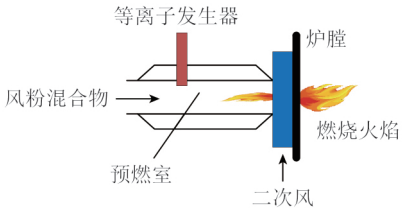

图 3　等离子点火器示意

Fig. 3　Schematic of plasma ignitor

国[11-12]均有等离子体技术在电站锅炉开展试验研究并工业应用。我国烟台龙源公司于 2000 年研制出 DLZ-200 型等离子点火器,在国内各类锅炉进行了大量应用[13]。该技术初投资高于传统油枪点火方式,但是单次点火成本较低,作为预燃室频繁应用时具有成本优势。但其阴极寿命较短,阳极易受污染,对压缩空气、冷却水品质以及风粉供应要求较高,限制了该技术在低负荷稳燃方面的应用。

2.2　感应加热点火煤粉燃烧器

感应加热点火煤粉燃烧器是一种通过电磁感应加热金属管壁,利用空气/煤粉气流与金属管壁的对流换热来提高气体温度,进而实现点火的装置。

早期的电加热点火技术[14]采用电阻丝加热一次风管,管壁通过对流换热直接加热煤粉气流点燃高挥发分煤粉。但电阻丝多次加热后易断裂,煤粉与热壁面接触易结焦。浙江大学在此基础上研制了感应加热式多级点火煤粉燃烧器(图 4),包括高温空气加热器、一级预燃室、二级预燃室和三级预燃室。高温空气加热器通过电磁感应加热管壁金属,通过金属与空气的对流换热加热空气,产生 700~900 ℃的高温空气送至下级预燃室[15-16]。高温热空气送入一级预燃室后点燃高浓度煤粉气流,出口高温烟气先后进入二、三级预燃室点燃煤粉气流。与电热腔点火技术相比,该技术将电阻丝替换为寿命较长的电磁感应加热装置,电加热装置改为加热空气而不是直接加热煤粉气流,避免了热壁面结焦。由于该技术采用金属壁面加热方法,因此对空气加热器的金属要求较高,试验中选用耐热温度达 1 200 ℃的 $Cr_{25}Ni_{20}Si_2$ 抗氧化钢。为避免预燃室结焦,预燃室近壁区送入低温环形调节风,控制预燃室内燃烧温度。

3　传统预燃室结构煤粉燃烧器

预燃室燃烧器指煤粉在送入炉膛前经未布置水冷壁的保温预燃室(稳燃腔),煤粉在预燃室内完成部分热解、燃烧,高温混合物送入炉膛完成燃烧。该技术目的在于减少点火过程中油耗量、强化锅炉低

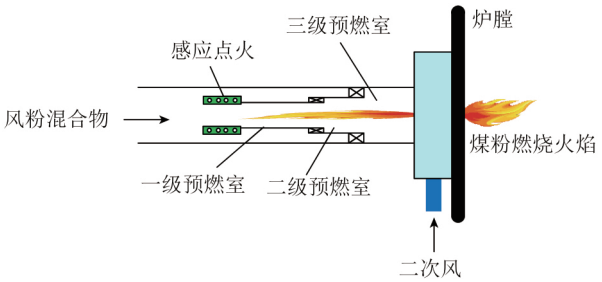

图 4　感应加热多级点火煤粉燃烧器示意

Fig. 4　Schematic of induction-heating multi-stage ignition pulverized coal burner

负荷稳燃能力、拓宽锅炉煤种适应性,近年来学者们也在探索该技术在低 NO_x 燃烧方面的应用。

20 世纪 70 年代,清华大学与北京锅炉厂合作对预燃室旋流燃烧器进行了一系列冷热态试验[17],图 5(a)为燃烧器装置示意。煤粉气流经由旋流叶片形成旋转射流进入预燃室,卷吸的高温烟气加热煤粉在预燃室内着火,在预燃室出口布置有一定旋转角度的二次风孔,与预燃室出口挥发分、焦炭及燃烧产物混合后送入炉膛完成燃烧。研究结果表明,预燃室内燃尽度达 40%~50%,有助于增加锅炉稳燃性能。然而,热量集中在预燃室的狭小空间释放,导致预燃室存在结焦问题。旋流叶片角度为 50°时发生严重结焦,降低至 35°后结焦问题得到明显改善。采用该预燃室燃烧器的电厂可节省点火用油 70%~95%[17]。

华中工学院认为,预燃室燃烧器结焦是由于预燃份额过多导致,遂提出将预燃室结构尺寸缩短变为预热室,预热室内置钝体结构以强化高温烟气卷吸加热煤粉,煤粉在预热室内被加热释放挥发分,离开预热室进入炉膛后才开始燃烧[18]。图 5(b)为燃烧器结构示意。该技术避免了狭小受限空间燃烧与结焦之间的矛盾,与传统燃烧器相比,强化了点火及低负荷稳燃能力。

清华大学还提出一种煤粉浓缩预热低 NO_x 燃烧器(PRP 燃烧器),其利用高速射流引射作用卷吸高温烟气,同时引入浓淡燃烧技术,如图 5(c)所示。煤粉气流经过浓淡分离器后,浓煤粉进入预热室,受到浓煤粉气流在预燃室中的偏置引射作用,预燃室压力低于炉膛压力,炉膛中的高温烟气被卷吸回预热室中加热煤粉[19]。高浓度煤粉气流在着火初期易形成还原性气氛区域,在预燃室中释放形成高温低氧局部环境,有利于脱挥发分过程中释放的烃类物质(C_xH_y)与含氮中间产物(HCN、NH_3、$HNCO$ 等)发生还原反应生成 N_2,从而抑制 NO 生成。该燃烧器在 65~200 MW 切圆锅炉改造中得到应用,

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

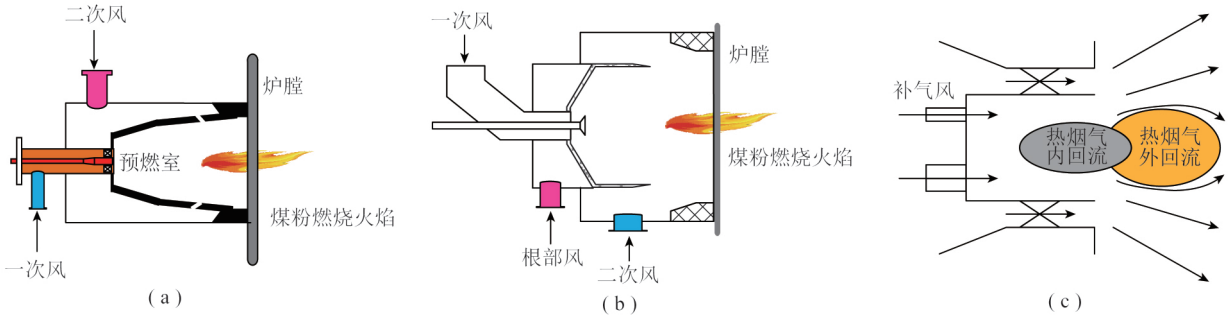

图 5　预燃室燃烧器结构示意

Fig. 5　Schematic of burners of pre-combustion chambers

燃用煤质 V_{daf} = 13%，改造后飞灰可燃物含量由 15.2%降至 7.5%，不采用燃尽风的情况下，NO_x 排放值为 500~550 mg/Nm^3。

2004 年，德国 Schoppe 公司提出中心内喷强制回流预燃室燃烧器[20]（图 6）。采用渐扩渐缩双锥形预燃室，煤粉经中心煤粉喷管到达位于前后锥接口面的回流帽后 180°转向回流，在旋流二次风的作用下再次转向向前流动，在扩散锥预燃室内开始热解燃烧，之后进入渐缩锥预燃室加速进入锅炉炉膛。专利对部分参数进行了限定：至少 30%的煤粉需要在预燃室以外布置换热管的炉膛中进行燃烧，预燃室出口烟气流速至少达 80 m/s。2012 年起，煤炭科学研究总院借鉴德国技术，并在国内煤粉工业锅炉进行了应用，在原技术基础上对预燃室燃烧份额、烟气流速、钝体结构等进行了优化，炉膛出口 NO_x 排放值为 175~350 mg/Nm^3，飞灰可燃物含量约 11%，炉渣可燃物含量约 58%[21-22]。煤粉工业锅炉一般燃用高挥发分、高热值的优质Ⅲ类烟煤，煤粉细度 R_{74} <5%[23]，因此该燃烧器对煤种、煤粉细度、煤粉含水量要求显著高于常规煤粉锅炉燃烧器，煤粉制备成本高。特殊设计的一次风回流帽结构有助于在一、二次风接触前充分预热一次风煤粉气流，延长煤粉在预燃室内的停留时间，是该技术的设计特点。

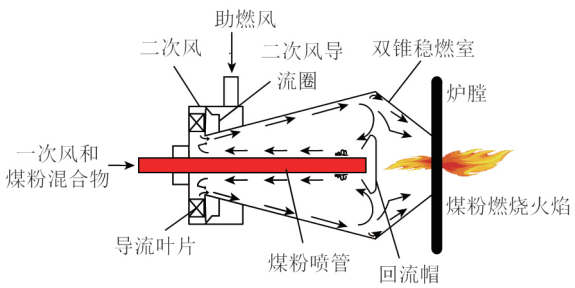

图 6　中心内喷强制回流预燃室燃烧器

Fig. 6　Pre-combustion chamber burner with central forced reflux

4　结论与展望

1) 天然气供热的煤粉预热燃烧技术采用天然气作为预燃室热源，该技术系统布置简单，易于工程实现，但需消耗锅炉输入热量的 3%~12%的天然气，因此进行大规模应用时需进一步控制天然气耗量。

2) 对于循环流化床供热的煤粉预热燃烧技术，主要优点在于该技术燃用低挥发分煤种时在稳燃性能及低 NO_x 排放方面具有优势；主要缺点是该系统布置较为复杂，如何实现循环流化床系统与锅炉燃烧器的连接，仍是未来需要解决的技术问题。

3) 等离子点火预燃室技术应用于烟煤时点火效果较好，但是对于贫煤、无烟煤的效果较差。该设备的阴极寿命较短，对压缩空气、冷却水品质以及风粉供应要求较高，限制了该技术在低负荷稳燃方面的应用。

4) 感应加热点火多级预燃室技术采用电磁感应技术，与采用电阻丝加热相比，系统可靠性增强，其采用多级预燃室来精细化控制点火过程的思路值得借鉴。然而，该技术需要将金属壁面加热到 900~1 200 ℃的高温，对金属高温耐氧化性能提出了很高的要求。

5) 传统预燃室燃烧器通过卷吸炉内高温烟气回流来提供预燃室加热煤粉所需热量，优势在于系统复杂度最低，与常规燃烧系统相比，仅增加一段能够卷吸下游高温烟气的绝热预燃室即可，但采用高温烟气回流加热的可控性、稳定性难以保证。

6) 传统低 NO_x 燃烧技术在空气分级、燃料分级、SNCR 等技术手段配合下，已能将炉膛出口的 NO_x 降至 200 mg/m^3，随着煤粉热解气化耦合燃烧技术的不断发展，有望将燃烧后的 NO_x 指标直接降低至 100 mg/m^{3}甚至更低水平，届时会极大地促进环保行业发展。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献(References) :

[1] 周新雅.大型燃煤电站锅炉低氮燃烧技术分析及应用策略 [J] .华东电力,2003,31(10) : 6-12.
ZHOU Xinya. Analysis of low NO_x combustion technique for large coal-fired boiler and its application strategy [J] .East China Electric Power,2003,31(10) : 6-12.

[2] SKALSKA K, MILLER J S, LEDAKOWICZ S. Trends in NO_x abatement: A review [J] .Science of the Total Environment,2010, 408(19) : 3976-3989.

[3] BRYAN B, NESTER S, RABOVITSER J, et al. Methane de-NO_x for utility PC boilers [R] .Des Plaines: Institute of Gas Technology, 2005.

[4] RABOVITSER J, BRYAN B, KNIGHT R, et al. Development and testing of a novel coal preheating technology for NO_x reduction from pulverized coal-fired boilers [J] .Gas,2003,1(2) : 4-8.

[5] ZHU J, OUYANG Z, LU Q. An experimental study on NO_x emissions in combustion of pulverized coal preheated in a circulating fluidized bed [J] .Energy & fuels,2013,27(12) : 7724-7729.

[6] OUYANG Z, ZHU J, LU Q. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal [J] . Fuel,2013,113: 122-127.

[7] YAO Y, ZHU J G, Lu Q G. Experimental study on nitrogen transformation in combustion of pulverized semi-coke preheated in a circulating fluidized bed [J] . Energy & fuels,2015,29(6) : 3985-3991.

[8] OUYANG Z, LIU W, MAN C, et al. Experimental study on combustion, flame and NO_x emission of pulverized coal preheated by a preheating burner [J] . Fuel Processing Technology,2018,179: 197-202.

[9] MESSERLE V, KARPENKO E, USTIMENKO A. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: Numerical modeling and full-scale test [J] .Fuel,2014,126: 294-300.

[10] 聂欣,周俊虎,汪洋,等.我国电站锅炉煤粉直接点火技术的发展以及现状 [J] .热能动力工程,2008,23(4) : 333-337.
NIE Xin, ZHOU Junhu, WANG Yang, et al. Development and status quo of utility-boiler pulverized-coal direct-ignition technologies in China [J] .Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2008,23(4) : 333-337.

[11] 吴曙笛.煤粉锅炉无油直接点火和稳燃技术述评 [J] .西北电力技术,2001(2) : 20-26,2.
WU Shudi. A review of oilless direct ignition and stable combustion technology for pulverized-coal fired boilers [J] . Northwest China Electric Power,2001(2) : 20-26,2.

[12] 刘影,宋资勤,包克福.煤粉锅炉点火技术及其发展 [J] .发电设备,2001(4) : 13-16.
LIU Ying, SONG Ziqin, BAO Kefu. Ignition techniques of pulverized coal boiler and its development [J] .Power Equipment,2001 (4) : 13-16.

[13] 张孝勇,陈学渊,罗泽斌,等.等离子点火技术在烟煤锅炉上的应用 [J] .中国电力,2002,35(12) : 15-18.
ZHANG Xiaoyong, CHEN Xueyuan, LUO Zebin, et al. Application of plasma igniting technology in the bituminous coal-fired boilers [J] .Electric Power,2002,35(12) : 15-18.

[14] 涂建华,姚强,岑可法.电热腔点火稳燃技术的研究 [J] .发电设备,1997(4) : 17-19.
TU Jianhua, YAO Qiang, CEN Kefa. Studies of ignition and steady burning in electric heating chamber [J] . Power Equipment,1997 (4) 17-19.

[15] 聂欣,吕明,周志军,等.高温空气多级点火燃烧器的试验研究 [J] .中国电机工程学报,2010,30(20) : 7-14.
NIE Xin, LYU Ming, ZHOU Zhijun, et al. Experimental study on high temperature air multistage ignition combustor [J] . Proceedings of the CSEE,2010,30(20) : 7-14.

[16] 李文蛟.感应式加热煤粉锅炉无油直接点火燃烧器的基础与试验研究 [D] .杭州: 浙江大学,2000.

[17] 徐旭常,张以仁.煤粉预燃室燃烧器的试验研究 [J] .动力工程学报,1983(1) : 19-25,80.

[18] 韩才元,袁建伟,徐明厚.火焰稳定和有限空间内煤粉预热 [J] .燃烧科学与技术,1995(1) : 27-33.
HAN Caiyuan, YUAN Weijian, XU Minghou. The flame stabilization and pulverized coal preheating in finite space [J] .Journal of Combustion Science and Technology,1995(1) : 27-33.

[19] 张海,贾臻,毛健雄,等.通过煤粉浓缩预热低 NO_x 燃烧器实现高温空气燃烧技术的研究 [J] .动力工程学报,2008,28(1) : 36-39.
ZHANG Hai, JIA Zhen, MAO Jianxiong, et al. Research on temperature air combustion technology via primary air enrichment and preheating burner [J] . Journal of Power Engineering, 2008, 28 (1) : 36-39.

[20] SCHOPPE F. Pulverized fuel fired flame-tube boiler: European, EP1447622B1 [P] .2010-04-28.

[21] 王金华,王乃继.散煤资源清洁利用工程示范--现代煤粉工业锅炉 [J] .煤炭工程,2016,48(9) : 1-5.
WANG Jinhua, WANG Naiji. Demostration project of high efficiency pulverized coal fired industrial boiler for bulk coal clean utilization [J] .Coal Engineering,2016,48(9) : 1-5.

[22] 程晓磊.低氮燃烧技术在煤粉工业锅炉上的应用 [J] .洁净煤技术,2018,24(4) : 109-113.
CHENG Xiaolei. Application of low-NO_x combustion technology on pulverized coal industrial boiler [J] .Clean Coal Technology, 2018,24(4) : 109-113.

[23] 房靖华,雷小云,李鹏.小煤粉锅炉不是工业锅炉发展新方向 [J] .工业锅炉,2013(1) : 42-44.
FANG Jinghua, LEI Xiaoyun, LI Peng. Small - size pulverized coal-fired boiler not a new development direction in the field of industrial boiler [J] .Industrial Boiler,2013(1) : 42-44.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net