双锥燃烧室燃用半焦的试验研究

王永英[1,2,3],杨　石[1,2,3],梁　兴[1,2,3]
(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院,北京　100013;2. 煤炭资源高效开采与清洁利用国家重点实验室,北京　100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京　100013)

摘　要:为实现半焦在煤粉工业锅炉中的高效燃烧利用,根据半焦燃烧特性分析和 CFD(计算流体动力学)数值模拟结果,提出针对高效煤粉工业锅炉常规双锥燃烧室的燃用半焦技术改造措施,分别采用常规和半焦燃烧室进行半焦粉燃烧试验。结果表明:半焦相比神府煤着火温度高、燃烬温度高,燃烧特性指数值均偏低;与常规燃烧室相比,半焦在半焦燃烧室燃烧时,着火更迅速,预热时间和伴燃时间均缩短 1 min。起始着火位置前移,空气过量系数范围拓宽,炉膛轴向最高温度下降、温度分布更均匀,残炭率由 57.54% 降低为 6.89%,实现了半焦在高效煤粉工业锅炉中的高效稳定燃烧。

关键词:双锥燃烧室;半焦;着火热;燃烬率
中图分类号:TK16　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-6772(2016)03-0093-05

Experiment study of double-cone pulverized coal combustion chamber burning char

WANG Yongying[1,2,3], YANG Shi[1,2,3], LIANG Xing[1,2,3]
(1. *Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, Coal Science and Technology Research Institute, Beijing*　100013, *China*;
2. *State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing*　100013, *China*;
3. *National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing*　100013, *China*)

Abstract: In order to improve char combustion efficiently in industrial pulverized coal fired boiler, technology improvements of double-cone chamber, which was widely used in pulverized coal fired industrial boilers, were conducted according to the results of combustion characteristics and numerical simulation. Char combustion experiments in both kinds of chambers were conducted. The results showed that, compared with common chamber, the char burned more rapidly in chamber designed for char. The firing position moved forward, the temperature axial distribution through the furnace was more uniform. The range of excess air coefficient was extended. After transformation, the burn-out rate of char is significantly increased from 57.54% to 6.89%. The stability and efficiency of char combustion was obviously improved.

Key words: combustion chamber; char; ignition heat; burn-out rate

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0　引　　言

半焦是侏罗纪不黏煤和弱黏煤中低温热解所得的可燃固体产物,目前主要作为炼钢、电石生产中的还原剂,也是化肥造气的原料[1-3]。近几年受经济形势影响,传统半焦利用萎缩,如何拓展半焦利用领域已成为半焦生产企业必须面对的问题。国内外学者对半焦的研究集中在清洁高效生产[4-6]、作为还原剂、活性半焦[7-9]以及作为高炉喷吹原料[10-11]等内容,鲜有半焦在锅炉尤其是煤粉锅炉中燃烧利用的报道。与动力煤相比,半焦价格优势显著,硫、氮元素和灰分较低,发热量相当。若能将半焦作为燃料,不但能降低锅炉运行成本和环保投入,也可以为半焦生产企业创造可观的经济效益。与此同时,半焦大规模燃烧利用可以实现煤炭分质利用技术路线的闭合,建立煤炭清洁高效利用模式。然而半焦作

收稿日期:2016-02-03;**责任编辑**:孙淑君　　**DOI**:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.020
基金项目:中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2013QN035)
作者简介:王永英(1986—),女,河北石家庄人,助理研究员,硕士,从事煤炭清洁高效燃烧研究工作。E-mail:yongying2006@163.com
引用格式:王永英,杨　石,梁　兴. 双锥燃烧室燃用半焦的试验研究[J]. 洁净煤技术,2016,22(3):93-97.
WANG Yongying, YANG Shi, LIANG Xing. Experiment study of double-cone pulverized coal combustion chamber burning char[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3):93-97.

为煤部分气化后的固体残留物,具有低挥发分、高着火温度、难以燃烬等特点,在传统煤粉燃烧设备中燃烧具有一定困难。

煤炭科学技术研究院有限公司自主研发的煤粉工业锅炉是以“煤粉浓相室燃技术”为核心,以清洁煤粉燃烧集中制备配送为显著特点的新型燃煤工业锅炉系统。双锥燃烧室是煤粉工业锅炉的核心设备,通过在燃烧室中部的独特回流帽实现回燃逆喷,增加了燃料在燃烧室中的运动距离,燃料充分预热。同时通过二三次风的回流扰动,加强了燃料与空气的传质传热,有利于燃料的高效稳定燃烧[12-13]。在给定燃料的条件下,双锥燃烧室所需着火热约为常规燃烧室的 1/10 ~ 1/6,适合燃用低挥发分燃料。笔者通过数值模拟、试验研究等手段,探讨了采用双锥燃烧室燃烧半焦的可行性,为拓宽半焦利用领域和煤粉工业锅炉的燃料范围提供依据。

1　半焦的燃烧特性

研究采用陕西煤业化工集团生产的半焦,该半焦与煤粉工业锅炉常用煤种(以神府煤为例)的工业分析、元素分析见表 1。半焦与神府煤相比,具有挥发分低、固定碳高、硫元素含量低、发热量相当等特性,热值能满足煤粉工业锅炉用煤要求,是高热量的环保燃料。

表 1　半焦与神府煤煤质分析

Table 1　Coal quality analysis of char and Shenfu coal

项目	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,ad}$/(MJ·kg^{-1})
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_d	$w(S_{t,ad})$	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(O_{ad})$	
半焦	6.58	8.78	8.29	76.35	0.24	77.66	1.20	0.79	4.75	27.51
神府煤	8.96	7.38	31.29	57.52	0.37	67.51	3.74	0.76	11.28	27.07

在空气气氛下,升温速率 20 ℃/min 条件下,利用热重分析方法进一步考察半焦和神府煤的燃烧特性相关参数,煤样的 TG-DTG 曲线如图 1 所示。由图 1 可知,半焦的失重曲线和燃烧速率曲线相比神府煤向高温区移动。通过失重曲线和燃烧速率曲线可以直观得出多种燃烧特性参数,如着火温度 T_i、最大燃烧速率 $(dw/dt)_{max}$ 以及对应的温度值 T_{max}、平均燃烧速率 $(dw/dt)_{mean}$、燃烬温度 T_h 等,具体见表 2。

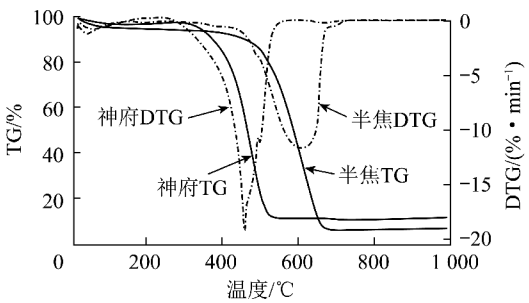


图 1　半焦与神府煤的热重曲线

Fig. 1　Thermogravimetric curve of char and Shenfu coal

不同学者提出燃烧特性指数方法[14-15]来较全面的评价煤粉的着火、燃烧、燃烬的特性,主要有 3 种燃烧特性指数计算方法,即

$$K_r = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_i^2} \tag{1}$$

$$S = \frac{(dw/dt)_{max} \times (dw/dt)_{mean}}{T_i^2 T_h} \tag{2}$$

$$C_b = \frac{f_1 f_2}{\tau_0} \tag{3}$$

表 2　半焦与神府煤热重测试数据

Table 2　Thermogravimetric data of char and Shenfu coal

项目	T_i/℃	$(dw/dt)_{max}$/(%·min^{-1})	T_{max}/℃	$(dw/dt)_{mean}$/(%·min^{-1})	T_h/℃
半焦	526	11.73	607	9.62	666
神府煤	416	19.19	467	11.81	522

可燃性指数 K_r 反映了反应前期到着火温度后的反应能力,表征了热重曲线从燃点到最大失重速率点这一区间的变化趋势,可燃性指数越大,说明可燃性越好。综合燃烧特性指数 S[16] 可以全面反映煤的着火与燃烬特性,综合反映煤粉的燃烧特性,S 越大说明煤的燃烧特性越好。燃烬特性指数 C_b 综合考虑了煤着火和燃烧稳定性等因素对燃烬的影响,其中 f_1、f_2 分别为初期燃烬率、后期燃烬率,τ_0 为燃烬时间,C_b 值越大,煤的燃烬特性就越好。计算得到半焦和神府煤的 3 种燃烧特性指数见表 3。由表 3 可知,相比神府煤,半焦着火温度高、燃烬温度高、可燃性指数、燃烧综合指数和燃烬特性指数数值小。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 3　半焦与神府煤燃烧特性指数

Table 3　Combustibility indices of char and Shenfu coal

项目	K_r/(10^6% · min^{-1} · K^{-2})	综合燃烧特性指数 K_r/(10^9%^{2} · min^2 · K^{-3})	燃烬特性指数 C_b/10^5
半焦	18.37	1.88	8.22
神府煤	40.42	6.01	10.34

为进一步分析 2 种煤粉在煤粉工业锅炉中的着火热,即将煤粉气流加热到着火温度所需要的热量。根据煤质分析、热重数据以及在实际运行中的配风参数计算得到半焦气流在双锥燃烧室中着火所需要的着火热[17]为 428 kJ/s,是神府煤所需着火热的 2.18 倍。较高着火热使半焦必须在更严格的着火环境中才能高效着火燃烧。

2　双锥燃烧室改造

利用 Fluent 软件分别模拟常规双锥燃烧室燃用神府煤和半焦的燃烧情况。模拟采用总包反应机理对煤燃烧过程进行简化,一次风和二次风均为速度入口,分别为 20、10 m/s;出口为压力出口,为 0;煤粉以颗粒相的形式注入,流量为 0.31 kg/s。

图 2 为燃用半焦和神府煤条件下,燃烧室温度场的数值模拟结果。

因燃料特性差异,半焦粉与神府煤燃烧温度场相比存在以下特点:①半焦挥发分低、着火热高,导致火焰内部存在明显低温区;②半焦着火位置靠近燃烧室后侧,火焰长度短,导致燃烧室内存在大量低温区。模拟结果表明采用常规双锥燃烧室燃烧半焦的效果不佳,同时也验证了半焦必须在比动力煤粉更严格的燃烧环境中才能高效燃烧。

为高效利用半焦,需对常规双锥燃烧室进行升级改造,通过增加燃烧室高温烟气回流量、延长煤粉预热时间等手段,营造出更适合半焦燃烧的环境,改善半焦在双锥燃烧室中的燃烧情况,改造后的双锥燃烧室如图 3 所示。相比改造前的常规燃烧室,改造后的燃烧室称之为半焦燃烧室。

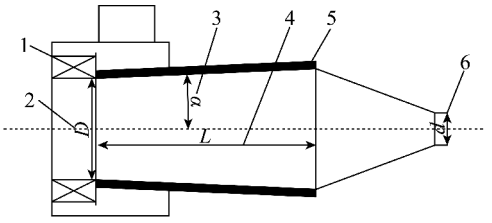
图 4 为改造后半焦燃烧室的数值模拟结果。改造后双锥燃烧室内部燃烧区域扩大,着火位置由原来燃烧室后部增加至整个燃烧室双锥区域;燃烧区域的平均温度明显提高,温度的分布也更为均匀。

3　半焦燃烧试验

为验证半焦在工业煤粉锅炉中高效燃烧的可行

图 2　燃烧室切面(y=0)温度场分布

Fig. 2　Temperature distribution of combustion chamber



1—叶片调节增大旋流强度;2—增加燃烧室进口直径;3—增加燃烧室前锥角;4—增加燃烧室内一次风管长度;5—在燃烧室壁面合适位置增加蓄热面;6—缩小燃烧室后锥出口

图 3　双锥燃烧室改造示意

Fig. 3　Technology improvements of double-cone pulverized coal combustion chamber

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

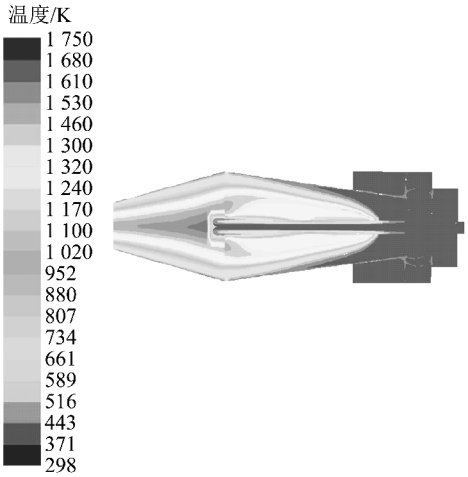
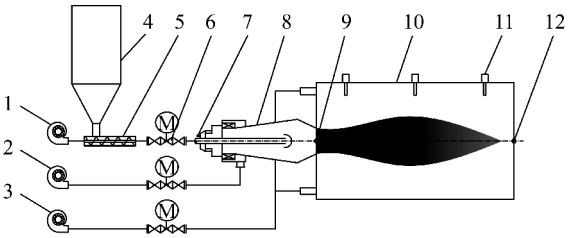


图 4　改造后燃烧室燃用半焦温度场分布

Fig. 4　Temperature distribution of combustion chamber improved burning char

性,本文搭建 10 MW 锅炉系统等比例热态实验台,如图 5 所示。在热态台架的相应位置设置温度测量点和烟气、灰采样点,分析半焦粉在工业煤粉锅炉中燃烧的相关参数。

试验中分别采用常规燃烧室和半焦燃烧室对半焦进行燃烧试验。燃烧过程分成燃油预热、油煤伴烧、煤粉燃烧 3 个阶段,通过调节过量空气系数、一



1—一次风机;2—二次风机;3—三次风机;4—煤粉塔;5—供料螺旋;6—调节阀;7—点火系统;8—燃烧器;9—燃烧器出口烟气及灰取样点;10—炉膛;11—温度测点;12—炉膛出口烟气及灰取样点

图 5　双锥燃烧器热态燃烧试验台示意

Fig. 5　Device of double-cone pulverized coal combustion chamber

二三次风配比、燃料浓度等操作条件最终实现燃料的稳定燃烧。表 4 为采用不同燃烧室稳定燃烧半焦的结果。由表 4 可知,采用改造后半焦燃烧室燃烧半焦时,过量空气系数调节范围更大,预热和伴烧时间更短,而炉膛尾部残炭率也显著降低。采用常规燃烧室条件下,半焦着火位置位于燃烧室前部,燃烧室内部燃烧温度偏低,这也是导致燃烧残炭率高达 57.54% 的主要原因。采用半焦燃烧室时,燃烧室内充满明亮火焰,起火点位于燃烧室前部。

表 4　常规和改造燃烧室燃烧半焦结果

Table 4　Combustion condition of two kinds of chambers

项目	过量空气系数	预热时长/min	伴烧时长/min	着火位置	煤粉燃烧时间/min	残炭率/%
常规燃烧室	1.2	3	4	前锥	10 ~ 30	57.54
半焦燃烧室	1.1 ~ 1.3	2	3	叶片下方	长时间	6.89

根据半焦在试验过程中是否能着火和稳燃,得到半焦燃烧室在高效煤粉工业锅炉中高效稳定燃烧半焦的配风参数,可以为半焦的燃烧提供合适的配风依据。一次风的作用是流畅、高浓度输送煤粉,一次风风量只占理论空气量的 5%。二次风作用为提供半焦着火阶段所需空气,过少二次风无法提供稳定着火所需氧气,过多二次风升温速率慢,使风粉混合物未达着火温度即离开燃烧室,均可能导致半焦火焰熄火,二次风占理论空气量的 30% ~55%。三次风提供半焦燃烬所需空气,合适的三次风量有利于实现半焦的充分燃烬,三次风约占理论空气量的 50% ~70%。

图 6 为不同燃烧室稳定燃烧半焦时,炉膛轴向壁面温度分布。

由图 6 可知,采用半焦燃烧室,半焦火焰在炉膛

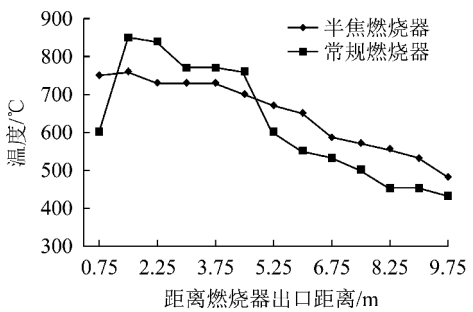


图 6　2 种燃烧室燃用半焦炉膛内温度分布

Fig. 6　The temperature distribution of two kinds of chambers

中高温区域前移,起始位置从距离燃烧室出口 1.5 ~2.0 m 前移至距离出口 0 ~1.5 m,炉膛最高温度下降,炉膛尾部无明显火焰喷出,炉膛整体温度轴向分布更均匀,半焦自维持燃烧期间燃烧室和炉膛

中国煤炭期刊网 www.chinacnki.net

温度不下降,炉膛尾部灰样中残炭率显著低,为 6.89%,燃烧效率高于 99%,燃烬情况良好。

4 结　　论

1)半焦与神府煤相比,挥发分低、固定碳高、硫元素含量低、发热量高,是高热量的环保燃料,同时着火温度高 110 ℃、燃烬温度高 144 ℃、平均燃烧速率低、可燃性指标、燃烬性能指标、燃烧综合指标数值低,着火和燃烬相对困难。

2)采用数值模拟手段发现,由于半焦挥发分低、着火热高,采用常规双锥燃烧室燃烧时,着火位置偏后,火焰长度短,导致燃烧室内存在大量低温区,燃烧效果差,对常规燃烧室进行局部改造形成半焦燃烧室,增加回流量及延长半焦预热时间,营造出更适合半焦的燃烧环境。

3)通过热态台架试验发现,与常规双锥燃烧室相比,在半焦燃烧室中半焦着火迅速,预热时间和伴燃时间均缩短 1 min,起始着火位置前移,总空气过量系数范围扩宽,炉膛最高温度下降、整体温度轴向分布更均匀,炉膛尾部灰样中残炭率显著降低,由 57.54% 降低为 6.89%,燃烧更充分,实现了半焦的长时间高效稳定燃烧。

参考文献(References):

[1] 艾保全.榆林市兰炭产业发展调研报告[J].中国经贸导刊,2010(18):20-23.
Ai Baoquan. The investigation report on the development of char industry in Yulin[J]. China Economic & Trade Herald, 2010(18):20-23.

[2] 马启翔,卢立栋,杨建军.陕西省兰炭行业 SO_2、NO_x 产排污系数核算研究[J].环境保护科学,2014(6):2-3.
Ma Qixiang, Lu Lidong, Yang Jianjun. Shaanxi provincial academy of environmental science[J]. Environmental Protection Science, 2014(6):2-3.

[3] 李　娟.半焦(兰炭)产业清洁生产技术方案研究[D].西安:长安大学,2012:1-4.

[4] 王　蕊,莫志安,刘玉龙.兰炭(半焦)生产中硫元素的迁移去向分析[J].工业安全与环保,2014,40(7):61-63,85.
Wang Rui, Mo Zhian, Liu Yulong. Analysis on migration of sulfur in semi-coke production[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40(7):61-63, 85.

[5] 吴大志.基于循环经济理念的兰炭企业技术改造研究[D].西安:西北大学,2012:14-56.

[6] Liming Lu, Chunhua Kong, Veena Sahajwalla. Char structural ordering during hydrolysis and combustion and its influence on char reactivity[J]. Fuel, 2002, 81(6):1215-1225.

[7] 李玉洁.半焦催化甲烷转化过程中的主要反应的热力学和动力学分析[D].太原:太原理工大学,2007:3-8.

[8] 郭瑞莉.活性半焦用于烟气脱硫脱硝的研究[D].青岛:中国海洋大学,2009:16-24.

[9] Kim M H, Lee E K, Juh J H, *et al*. Hydrogen production by catalytia decomposition of methane over activated carbons: kinetic study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, 29(2):187-193.

[10] 何选明,付鹏睿,王春霞,等.用于高炉喷吹的低阶煤梯级转化半焦的燃烧性能[J].钢铁,2014,49(9):92-96.
He Xuanming, Fu Pengrui, Wang Chunxia, *et al*. Combustion behavior of low rank coal char application in blast furnace injection[J]. Iron & Steel, 2014, 49(9):92-96.

[11] 杨双平,蔡文淼,郑化安,等.高炉喷吹半焦及其性能分析[J].过程工程学报,2014,14(5):896-899.
Yang Shuangping, Cai Wenmiao, Zheng Huaan, *et al*. Performance Analysis of Semi-coke for Blast Furnace Injection[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(5):896-899.

[12] 王永英,张　鑫,姜思源.双锥燃烧器旋流强度的计算[J].洁净煤技术,2013,19(6):79-84.
Wang Yongying, Zhang Xin, Jiang Siyuan. Swirl intensity calculation of double-cone fine coal combustion chamber[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(6):79-84.

[13] 姜思源,王永英,周建明,等.中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J].煤炭学报,2014,39(6):1148-1153.
Jiang Siyuan, Wang Yongying, Zhou Jianming, *et al*. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6):1148-1153.

[14] 李庆钊,赵长遂,武卫芳,等.基于 TG-FTIR 研究 O_2/CO_2 气氛下烟煤的燃烧特性[J].东南大学学报,2007,37(6):990-995.
Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, *et al*. Investigation on characteristics of bituminous coal combustion in O_2/CO_2 mixtures based on TG-FTIR coupled technology[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(6):990-995.

[15] 周　军.石油焦燃烧特性的试验研究[D].北京:清华大学,2006:4-15.

[16] 肖翠微.中等挥发分烟煤燃烧特性研究[J].煤炭科学技术,2015,43(5):135-138,25.
Xiao Cuiwei. Research on combustion features of medium volatile matter bituminous coal[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5):135-138, 25.

[17] 徐旭常,吕俊复,张　海.燃烧理论与燃烧设备[M].北京:科学出版社,2012:429-433.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net