

100 t/d 气化飞灰预热燃烧锅炉设计与运行

满承波¹,朱建国^{1,2},吕清刚^{1,2},欧阳子区¹,刘敬樟¹

(1.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:煤气化技术是煤炭梯级利用的主要方式之一,近年来发展迅速、使用广泛。但煤气化过程无法将煤中的碳全部转化利用,煤经过气化后仍有部分可燃物残留在气化飞灰中。其中循环流化床煤气化产生的气化飞灰碳含量相对较高,低位发热量达 12~25 MJ/kg,若能加以利用会显著提高碳的利用率。气化飞灰的挥发分极低,传统燃烧技术很难处理。为了实现气化飞灰的高效燃烧,并同时控制燃烧的 NO_x 排放水平,提出并发展了预热燃烧技术。该技术将气化飞灰在流化床预热燃烧器中进行预热,在缺氧条件下通过化学反应产生热量将燃料自身预热至 850~950 °C 并脱除部分燃料氮,再将预热后的燃料通入煤粉炉膛,在炉内通过分级配风实现高效低 NO_x 燃烧。针对一台采用预热燃烧技术的气化飞灰预热燃烧锅炉,开展调试和工程试验,通过考察预热燃烧器和炉膛内的温度分布和变化规律、气化飞灰的燃烧效率以及 NO_x 原始排放,研究气化飞灰的预热特性、预热后的高温气固混合燃料的燃烧特性和 NO_x 排放特性。结果表明,预热燃烧锅炉可以燃用挥发分<3%的气化飞灰,锅炉运行稳定,气化飞灰燃烧效率可达 98% 以上,NO_x 原始排放浓度最低可达 261.94 mg/m³,经脱硝处理能达到超低排放。预热燃烧锅炉实现了气化飞灰的高效低氮燃烧,证明了预热燃烧技术在超低挥发分燃料处理方面的可行性和技术先进性。

关键词:预热燃烧;超低挥发分燃料;气化飞灰;煤粉锅炉;高效低氮

中图分类号:TK16;TQ536.4 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2021)03-0088-06

Design and operation of a 100 t/d gasification fly ash boiler

MAN Chengbo¹, ZHU Jianguo^{1,2}, LYU Qinggang^{1,2}, OUYANG Ziqu¹, LIU Jingzhang¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Coal gasification technology is one of the main ways of coal cascade utilization, which develops rapidly and is widely used recently. However, the coal gasification process is not able to convert all the carbon in the coal, and some combustibles remain in the gasification fly ash after coal gasification. The gasification fly ash produced by circulating fluidized bed (CFB) coal gasification usually has high carbon content, and its low calorific value can reach 12–25 MJ/kg. The high-efficient combustion of gasification fly ash powders can improve the coal utilization rate. However, gasification fly ash powder can be hardly burned by the conventional combustion technologies due to its low volatile content. In order to realize efficient combustion of gasification fly ash and control NO_x emission, the technical route of combustion with fuel preheating was put forward and developed. The gasification fly ash powders are first preheated to 850–950 °C in a CFB, and then the resulting fuel gas and char particles are burned out in the furnace. In addition, the reaction conditions of high temperature and anoxia are conducive to the removal of fuel nitrogen in the preheated burner, so that the NO_x emission can also be realized with staged air distribution in the furnace. In this study, several commissioning and engineering tests were carried out for a boiler with preheating combustion technology of gasification fly ash. The preheating characteristics of gasification fly ash, combustion characteristics and NO_x emission characteristics of high temperature gas–solid mixture fuel were studied by investigating the temperature distribution and variation in preheating burner and furnace, combustion efficiency and original NO_x emission of gasification fly ash. The results show the gasification fly ash with volatile below 3% could be preheated and burnt out stably. The combustion efficiency can reach 98% and the original NO_x emission can achieve the lowest concentration of 261.94 mg/m³, and the ultra-low emission can be achieved after denitration treatment.

收稿日期:2021-02-01;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.SW21020101

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0602003)

作者简介:满承波(1986—),男,山东聊城人,助理研究员,研究方向为煤炭高效清洁利用。E-mail:manchengbo@iet.cn

引用格式:满承波,朱建国,吕清刚,等.100 t/d 气化飞灰预热燃烧锅炉设计与运行[J].洁净煤技术,2021,27(3):88–93.

MAN Chengbo, ZHU Jianguo, LYU Qinggang, et al. Design and operation of a 100 t/d gasification fly ash boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 88–93.



移动阅读

The high efficiency and low nitrogen combustion of gasification fly ash is realized by preheating and burning boiler, and the feasibility and advantage of preheating combustion technology in ultra-low volatile fuel treatment are proved.

Key words: preheating combustion; ultra-low volatile fuel; gasification fly ash; powder carbon boiler; high efficiency and low NO_x

0 引言

煤气化技术是煤炭梯级利用的主要方式之一,近年来发展迅速、使用广泛。流化床煤气化是较常见的一种煤气化工艺^[1-3],其产生的煤气热值为 $5\ 000\sim 6\ 300\ \text{kJ}/\text{m}^3$,作为工业燃气在化工、冶金、陶瓷等领域得到了广泛应用。但流化床煤气化产生的气化飞灰低位发热量可达 $12\sim 25\ \text{MJ}/\text{kg}$,且产量巨大,若能加以利用将大幅提高流化床煤气化工艺的煤炭利用率。由于流化床气化炉产生的气化飞灰挥发分极低($V_{\text{daf}}<3\%$),传统燃烧方式很难处理。

国内外针对气化飞灰直接燃烧的研究与应用较少,较为相近的研究主要是针对低挥发分无烟煤和兰炭。无烟煤的燃烧技术研究主要集中在 W 火焰锅炉技术方面,但 W 火焰锅炉燃烧温度较高,因此 NO_x 排放均普遍较高($>800\ \text{mg}/\text{m}^3$)^[4-5]。国内通过引进和改进国外技术,在 W 火焰锅炉技术、旋流燃烧技术等方面对燃用无烟煤、贫煤等低挥发分煤种也开展了研究和工程实践,部分 W 火焰锅炉已能将 NO_x 原始排放降至 $800\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以下,最低达 $547\ \text{mg}/\text{m}^3$ ^[6-11]。流化床锅炉的煤种适应性广,也被用于燃用无烟煤,但其燃烧温度偏低,因此燃烧效率较低。Adanez 等^[12]在循环流化床试验研究中发现,无烟煤的燃烧效率仅在 $90.5\%\sim 93.0\%$ 。何宏舟等^[13-15]研究了福建无烟煤在循环流化床中的燃尽特性,表明燃烧效率一般不超过 90% 。可见,循环流化床技术可解决无烟煤的着火和稳燃问题,但燃烧效率偏低。20 世纪 80 年代,日本学者提出高温空气燃烧技术,将空气预热至 $800\ ^\circ\text{C}$ 以上,然后与燃料混合燃烧^[16],Suda 等^[17]研究结果表明,该技术可缩短煤粉的着火时间,提高燃烧稳定性,对于挥发分较低(9.8%)的无烟煤可实现稳定的着火燃烧。但该技术多用于气体燃料燃烧,煤粉燃烧并未进入工程实践。兰炭也是一种超低挥发分碳基燃料,近年来作为煤干馏等工艺的副产品也面临处理问题。我国对兰炭的大比例掺烧开展了相关研究,在 135 ^[18]、 300 ^[19-20]和 $660\ \text{MW}$ ^[21-22]煤粉锅炉上实现了烟煤掺烧兰炭的稳定运行,兰炭的挥发分约为 10% ,最高掺烧比例为 50% ,燃烧效率可达 98% 以上,但尚无法实现更高比例兰炭的掺烧。

因此,目前无烟煤和兰炭等低挥发分燃料的燃

烧难以实现高效低氮,电站锅炉掺烧比例低于 50% ,工业锅炉鲜见相关研究,挥发分低于 3% 的超低挥发分燃料在工业锅炉中 100% 纯燃鲜见报道。本文针对以一台 $100\ \text{t}/\text{d}$ 气化飞灰锅炉的设计、建设和调试运行情况为例,对预热燃烧技术在气化飞灰燃烧方面的工程应用进行介绍,阐述了一种超低挥发分燃料高效低 NO_x 利用的可行技术路线。

1 锅炉设计

1.1 设计依据

预热燃烧技术是由中国科学院工程热物理研究所提出的创新性燃烧技术。该技术将煤粉燃烧分为 2 个阶段:第 1 阶段为预热阶段,将煤粉通入流化床式的燃烧器中,配以较低当量比的空气,煤粉在强还原性气氛下发生热解、气化和部分燃烧,反应生成焦炭和煤气的混合物,释放的热量将燃料自身加热至 $800\ ^\circ\text{C}$ 以上;第 2 阶段为燃烧阶段,将预热产生的高温焦炭与煤气混合物通入炉膛,与空气混合进行燃烧,实现燃料燃尽。该技术路线利用流化床燃料适应性广的优点,首先将燃料加热至自身燃点以上的温度,再送入炉膛配风进行燃烧,从而解决了超低挥发分燃料着火困难的问题。

近年来,在 $30\sim 2\ 000\ \text{kW}$ 试验平台上开展了机理、小试和中试试验研究^[23-26],燃用的燃料包括无烟煤和热解半焦($V_{\text{daf}}<10\%$)、气化飞灰($V_{\text{daf}}<3\%$),均实现了燃料的顺利点火、稳定燃烧和高效燃尽,燃烧效率 $>95\%$ 、 $\text{NO}_x<200\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($6\%\ \text{O}_2$),证明了该技术路线的可行性和先进性。在前期机理研究和中试试验的数据支撑下,于 2017 年在广西河池市建成了 $100\ \text{t}/\text{d}$ 气化飞灰预热燃烧锅炉示范工程,用于处理 2 台 $2.5\ \text{万}\ \text{m}^3/\text{h}$ 流化床煤气化炉产生的气化飞灰,气化飞灰干燥无灰基挥发分约 2.82% ,低位发热量为 $23.59\ \text{MJ}/\text{kg}$ 。该锅炉于 2018 年调试运行,2019 年通过 $(72+48)\ \text{h}$ 运行考核。

1.2 燃料成分

气化飞灰锅炉的燃料受其前端煤气化工艺的影响很大,该 $100\ \text{t}/\text{d}$ 锅炉与其前端的煤气化炉同时开展设计,无法获得准确的燃料成分,因此最初采用类似的其他煤气化炉的气化飞灰燃料成分开展设计(表 1)。但项目投运后由于煤气化炉入炉煤质和运行参数不同,其产生的气化飞灰成分与设计参数有

较大不同,最终运行按照实际燃料成分进行校核和调整。

实际燃料的工业分析、元素分析和发热量见表1。可知该种燃料的低位发热量高达23.59 MJ/kg,热值与动力用煤相当,说明气化飞灰中的残留可燃物含量仍较高,具有进一步燃烧利用的价值。但气

表1 气化飞灰成分分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of gasification fly ash

燃料	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}	
设计燃料	0.06	59.66	2.17	38.11	38.86	0.20	0.26	0.34	0.62	13.61
实际燃料	0.55	31.35	2.82	65.28	65.84	0.56	0.39	0.59	0.72	23.59

由于预热燃烧技术的燃烧器为循环流化床型式,因此燃料粒径可能对燃烧器的运行产生一定影响。本文采用FRITSCH Analysette 22 NanoTec 激光粒度仪+干法测量,获得了气化飞灰的粒径分布,如图1所示。全部燃料颗粒直径在0~120 μm ,其中 d_{90} 和 d_{50} 分别为74 μm 和38 μm ,与传统煤粉炉燃用的煤粉粒径较相似。

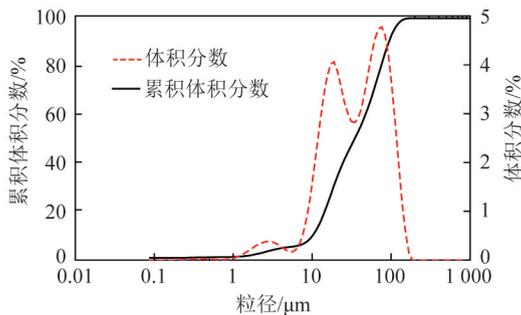


图1 气化飞灰的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of gasification fly ash

1.3 主要设计参数

气化飞灰锅炉的主要设计参数见表2。该锅炉设为一台饱和蒸汽锅炉,额定蒸汽量为20 t/h,额定温度和压力分别为249 $^{\circ}\text{C}$ 、3.82 MPa,设计燃料消耗量为100 t/d。但由于实际产生的气化飞灰热值与设计之初偏差较大(表1),因此该锅炉在运行时的实际燃料消耗量与设计消耗量有较大差别。由于锅

表2 锅炉主要设计参数

Table 2 Main design parameters of the boiler

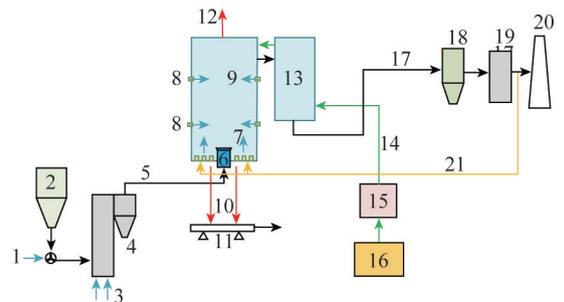
项目	数值
额定蒸发量/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	20
饱和蒸汽压力/MPa	3.82
饱和蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	249
给水温度/ $^{\circ}\text{C}$	105
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	≤ 200
设计燃料消耗量/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	100

化飞灰的干燥无灰基挥发分极低,仅为2.82%,现有煤粉燃烧技术均无法燃用该种燃料。另外,气化飞灰的水分较低,这是由于该种燃料是粉煤在流化床煤气化炉内900 $^{\circ}\text{C}$ 左右高温条件下发生煤气化反应后产生的副产品,直接经仓泵输送至储仓,避免了吸水过程,这为燃料的输送提供了有利条件。

炉的燃烧器热功率、炉膛受热面等已确定,因此按照输入热功率不变估算,实际的气化飞灰消耗量约为57.6 t/d。

1.4 工艺流程

锅炉的工艺流程如图2所示,主要包括烟风系统、水系统、物料系统、点火燃烧系统和尾部烟气处理系统。锅炉的现场照片如图3所示。



- 1—送粉风; 2—气化飞灰储罐; 3—一次风; 4—预热燃烧器;
5—预热燃料; 6—燃料喷嘴; 7—二次风; 8—三次风; 9—炉膛;
10—灰渣; 11—灰渣输送; 12—主蒸汽; 13—尾部烟道;
14—给水; 15—除氧器; 16—除盐水箱; 17—尾部烟气;
18—烟气净化系统; 19—除尘器; 20—烟囱; 21—再循环烟气

图2 锅炉工艺流程

Fig.2 Technical process of the boiler



图3 锅炉实物图

Fig.3 Photograph of the boiler

气化飞灰从煤气化炉产生后输送至一个储仓,通过给粉机落入送粉管,由送粉风携带送入预热燃烧器。燃料在预热燃烧器中与一次风混合后实现流态化高温预热反应,形成的高温预热燃料从炉膛底部进入炉膛。二次空气从炉膛底部配入,与高温预热燃料混合进行燃烧。三次风经低温空气预热器和高温空气预热器预热后在炉膛不同高度位置水平送入炉内,促进燃料燃尽。燃烧产生的高温烟气经余热回收及废气处理系统后由引风机送至烟囱。再循环烟气从袋式除尘器后面抽出,在必要时送入炉底,与二次风混合进入炉膛,以调节燃烧温度和 NO_x 排放。

2 锅炉运行情况

作为基于预热燃烧技术路线的锅炉示范项目,该锅炉于2018年进行多次调试,于2019年通过运行考核,在60%~100%负荷下连续稳定运行(72+48)h。

2.1 燃烧器运行情况

燃烧器为循环流化床结构。送粉风携带气化飞灰进入燃烧器,一次风提供床料和燃料的流化所需空气,燃烧器内总的空气当量比约为0.2。在最初升温引燃过程完成后,气化飞灰在燃烧器内0.2当量比的强还原性气氛下发生热解、气化和部分燃烧反应,实现自维持预热。循环流化床燃烧器内设有4个K型热电偶,其中3个设置在提升管的上、中、下部,另一个在U型返料器内。4个测温点的温度随时间的变化如图4所示。可以看出,在120h运行过程中,4个温度点温度相近且曲线平滑,说明燃烧器运行稳定、温度均匀,物料循环正常,气化飞灰可稳定连续预热到900℃左右,达到预热效果。

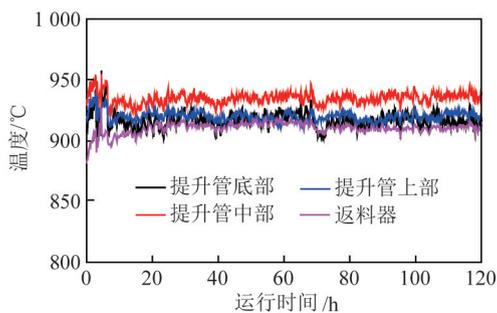


图4 燃烧器内的温度变化

Fig.4 Change of temperature in the CFB burner

2.2 炉膛运行情况

锅炉炉膛中沿高度方向布置7个热电偶,插深为300mm,即测量距离壁面300mm处的温度,其120h温度变化曲线如图5所示。二、三次风为预热

后的燃料提供了充足的氧气,实现了炉内燃烧稳定,因此图5中各温度曲线均稳定变化。为了分析炉膛内的温度分布,选取2个不同运行负荷下不同炉膛高度的特征温度进行对比,如图6所示。可见,锅炉在70%和80%负荷下炉膛内的温度分布趋势大致相同,且温度沿炉膛高度方向变化不大,高度400~10000mm的温度在800~1050℃,与传统煤粉锅炉相比,温度分布更均匀。除温度沿高度分布较为均匀外,该锅炉的最高燃烧温度也较低。采用红外测温枪测得的炉内火焰最高温度约为1200℃,明显低于传统煤粉锅炉主燃烧区的最高温度(一般超过1400℃)。

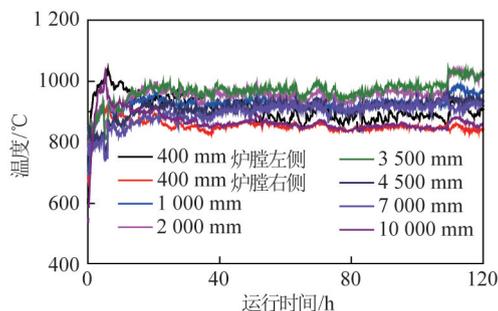


图5 炉膛内的温度变化

Fig.5 Temperature changing in the furnace

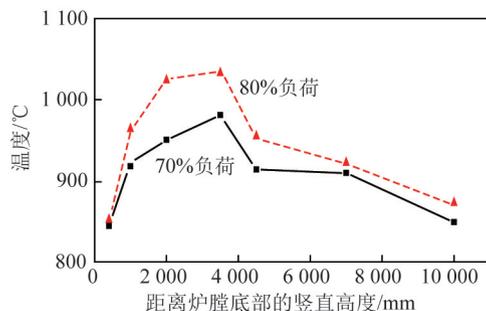


图6 炉膛内沿高度方向的温度变化

Fig.6 Change of temperature along the height in the furnace

该锅炉能够实现燃烧温度较低的原因是其炉膛配风方式和比例与传统煤粉锅炉不同。传统煤粉锅炉的二次风当量不低于0.6~0.8,主燃烧区总空气当量比在1.0左右,实现主燃烧区的高温高氧浓度燃烧,以确保燃料的着火和稳燃。锅炉采用预热燃烧技术,预热燃料的燃烧具有特殊性^[27]。由于气化飞灰进入炉膛前,已在预热燃烧器中被预热至850℃以上,高于燃料自身的燃点,因此在进入炉膛后只要将二次风合理配入即可点燃。锅炉二次风当量比为0.2~0.4,主燃烧区总空气当量比仅为0.4~0.6,仍可实现良好的着火和稳燃效果,燃料燃尽所需的空气再由炉膛上部不同高度布置的三次风提供。因此,在这种配风形式和比例下,锅炉在保持燃烧效率

的前提下,炉内的最高温度较低且整体温度分布较均匀,有利于降低 NO_x 排放。

2.3 燃烧效率

工程试验研究了2种不同负荷下气化飞灰的燃烧效率(表3),可以看出,在70%和80%两个负荷下,气化飞灰均获得了较高的燃烧效率。气化飞灰的挥发分极低、灰分高,但飞灰含碳量和底渣含碳量均控制在较低水平。这是因为气化飞灰在预热燃烧器中进行高温预热过程中,燃料颗粒的性质发生改变,颗粒内部孔隙结构变大,化学反应表面积增加,达到了燃料改性效果,提高了燃尽性能,进而获得了较高的燃烧效率。

表3 燃烧效率

Table 3 Combustion efficiency

项目	工况1	工况2
锅炉负荷/%	70	80
尾气CO浓度/ 10^{-6}	79	53
气体不完全燃烧热损失/%	0.05	0.03
飞灰含碳量/%	5.46	3.76
底渣含碳量/%	1.34	1.01
固体不完全燃烧热损失/%	2.14	1.46
燃烧效率/%	97.81	98.51

2.4 NO_x 排放

在保证锅炉燃烧效率条件下,对二次风比例进行调整。在70%和80%两个负荷下,控制二次风当量比低于0.4, NO_x 排放情况见表4。可以看出,2个工况的 NO_x 原始排放均低于 300 mg/m^3 (6% O_2),其中80%负荷较70%负荷的 NO_x 原始排放略有升高,一方面是由于80%负荷的二次风当量比略高,且主燃烧区温度略高,2个因素均造成了 NO_x 略有升高。但这2个工况的 NO_x 原始排放均远低于文献[6-11]中无烟煤燃烧的 NO_x 排放水平,甚至低于绝大多数烟煤锅炉的 NO_x 排放水平,这主要是因为:① 气化飞灰在预热燃烧器内预热过程中,部分燃料氮在高温强还原性气氛下脱出,被还原为 N_2 ,实现了第1阶段脱氮;② 在炉膛主燃烧区,二次风当量比低于0.4,主燃烧区总空气当量比低于0.6,仍属于强还原性气氛,进一步抑制了 NO_x 的生成。

表4 NO_x 排放量

Table 4 NO_x emission

项目	工况1	工况2
输入功率负荷/%	70	80
燃烧器空气当量比	0.15	0.16
二次风当量比	0.37	0.39
NO 排放量(6% O_2)/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	261.94	281.46

3 结论

1) 气化飞灰可实现连续稳定供粉,在当量比低于0.2的强还原气氛下,气化飞灰可稳定、连续进行热解、气化和部分燃烧反应,并自预热至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,转化为煤气和焦炭的混合物。

2) 预热后的燃料进入煤粉炉炉膛,通过分级配风可实现稳定燃烧,炉膛内温度在 $800 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$,沿垂直方向分布均匀,火焰最高温度约为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,较传统煤粉锅炉更低。

3) 燃料预热后实现了改性和预热脱氮,在炉膛内燃烧效率可达98%以上, NO_x 原始排放最低可达 261.94 mg/m^3 (6% O_2)。

参考文献(References):

- [1] YIN X L, WU C Z, ZHENG S P, et al. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk [J]. Biomass & Bioenergy, 2002, 23(3): 181-187.
- [2] ZHANG H, GUO X, ZHU Z. Effect of temperature on gasification performance and sodium transformation of Zhundong coal [J]. Fuel, 2017, 189(1): 301-311.
- [3] JU F, CHEN H, YANG H, et al. Experimental study of a commercial circulated fluidized bed coal gasifier [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(8): 818-822.
- [4] 陈晓珊, 张卫会. W型火焰锅炉技术特点及应用前景分析[J]. 东北电力学院学报, 1994, 14(3): 135-142.
CHEN Xiaoshan, ZHANG Weihui. Technical characteristics and application prospect of W-flame boilers [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 1994, 14(3): 135-142.
- [5] 李争起, 任枫, 刘光奎, 等. W火焰锅炉高效低 NO_x 燃烧技术[J]. 动力工程学报, 2010, 30(9): 645-662.
LI Zhengqi, REN Feng, LIU Guanghui, et al. Combustion technologies of down-fired boilers with high efficiency and low- NO_x emissions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(9): 645-662.
- [6] 马仑, 方庆艳, 张成, 等. 600 MW W型火焰锅炉拱上二次风低 NO_x 燃烧特性的数值模拟及优化[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(1): 64-70.
MA Lun, FANG Qingyan, ZHANG Cheng, et al. Numerical simulation and optimization for the influence of the arch secondary air on low- NO_x combustion characteristics of a 600 MW down-fired boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(1): 64-70.
- [7] 兰艳旭, 王晖, 邱福岗, 等. 乏气风布置对“W”型火焰锅炉低氮燃烧特性的影响[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6): 76-82.
LAN Yanxu, WANG Hui, QIU Fugang, et al. Influence of tertiary air arrangement on low- NO_x combustion characteristics for a "W" type flame boiler [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 76-82.
- [8] 宋健. W型火焰锅炉低 NO_x 燃烧技术的数值模拟与应用[J]. 湖

- 南电力,2020,40(5):82-86.
- SONG Jian.Numerical simulation and application of low NO_x emission technology based on combined combustion for a W-shaped Flame Boiler[J]. Hunan Electric Power,2020,40(5):82-86.
- [9] SONG M H,ZENG L Y,ZHAO Y, et al. Secondary air distribution in a 600 MWe multi-injection multi-staging down-fired boiler: A comprehensive study[J]. Journal of the Energy Institute,2020,93(3):1250-1260.
- [10] CHENT,ZHOU Y D,WANG B, et al. Investigations on combustion optimization and NO_x reduction of a 600 MWe down-fired boiler: Influence of rearrangement of tertiary air and jet angle of secondary air and separated over-fire air[J]. Journal of Cleaner Production,2020,277:124310.
- [11] YANG W,WANG B,LEI S Y, et al. Combustion optimization and NO_x reduction of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air[J]. Journal of Cleaner Production,2019,210:1120-1130.
- [12] ADÁNEZ J,DE DIEGO L F,GAYÁN P, et al. A model for prediction of carbon combustion efficiency in circulating fluidized bed combustors[J]. Fuel,1995,74(7):1049-1056.
- [13] 何宏舟,苏建民.燃烧福建无烟煤的循环流化床锅炉的设计特点及运行性能分析[J].华东电力,2003,31(4):4-7.
HE Hongzhou, SU Jianmin. Analysis of design feature and operation performance of circulating fluidized bed boiler burning Fujian anthracite[J]. East China Electric Power,2003,31(4):4-7.
- [14] 何宏舟,骆仲泱,岑可法.影响福建无烟煤在锅炉中燃尽的若干因素[J].动力工程,2006,26(3):359-364.
HE Hongzhou, LUO Zhongyang, CEN Kefa. Factors influencing the burn-out rate of Fujian anthracite in CFB boilers[J]. Journal of Power Engineering,2006,26(3):359-364.
- [15] 何宏舟,路仲泱,岑可法.细颗粒无烟煤焦在CFB锅炉燃烧室内的燃尽特性研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):97-102.
HE Hongzhou, LUO Zhongyang, CEN Kefa. Modeling research on the burnout characteristics of fine anthracite char particle in CFB combustor [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(19):97-102.
- [16] KATSUKI M,HASEGAWA T. The science and technology of combustion in highly preheated air[J]. Symposium(International) on Combustion,1998,27(2):3135-3146.
- [17] SUDA T,TAKAFUJI M,HIRATA T, et al. A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2002,29(1):503-509.
- [18] 刘家利,郭孟狮,李炎.135 MW 机组锅炉掺烧半焦试验及经济性分析[J].洁净煤技术,2017,23(2):86-91.
LIU Jili, GUO Mengshi, LI Yan. Economic analysis for a 135 MW pulverized coal fired boiler blending with semi-coke[J]. Clean Coal Technology,2017,23(2):86-91.
- [19] 杜进,王志超,黎海平.大比例掺烧超低挥发分碳基燃料在300MW 电站煤粉锅炉上的实践[J].湖南电力,2020,40(2):45-49.
DU Jin, WANG Zhichao, LI Haiping. Practice of large proportion burning of ultra-low volatile carbon-based fuel in 300 MW pulverized coal boiler [J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(2):45-49.
- [20] 杨剑锋,杜进,黄璞,等.300MW 电站煤粉锅炉大比例掺烧半焦的试验研究[J].热力发电,2020,49(7):69-76.
YANG Jianfeng, DU Jin, HUANG Pu, et al. Experimental research on large proportion co-firing of semi-coke in a 300 MW pulverized coal boiler [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7):69-76.
- [21] 赵晓鹏,苏永健,徐义巍,等.660 MW 超临界电站煤粉锅炉大比例掺烧兰炭试验研究[J].华电技术,2020,42(12):22-27.
ZHAO Xiaopeng, SU Yongjian, XU Yiwei, et al. Experimental study on large-proportion semi coke co-combustion in a 660 MW supercritical pulverized coal boiler [J]. Huadian Technology, 2020, 42(12):22-27.
- [22] 王志超,王莹燕,李彦军,谭恺,蒋华,赵晓鹏,冯平安,姚伟.兰炭燃烧特性及其在660 MW 机组上的大比例掺烧试验研究[J].华电技术,2020,42(7):35-41.
WANG Zhichao, WANG Yingyan, LI Yanjun, et al. Combustion characteristics of semi-coke and its large-proportion co-combustion experimental research in a 660 MW unit [J]. Huadian Technology,2020,42(7):35-41.
- [23] ZHU J G,OUYANG Z Q,LYU Q G. 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.
- [24] YAO Y,ZHU J G,LYU 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.
- [25] WANG J,ZHU J G,LYU Q G. Experimental study on combustion characteristics and NO_x emissions of pulverized anthracite preheated by circulating fluidized bed [J]. Journal of Thermal Science,2011,20(4):355-361.
- [26] OUYANG Z Q,ZHU J G,LYU Q G. Experimental study on preheating and combustion characteristics of pulverized anthracite coal[J]. Fuel,2013,113:122-127.
- [27] 欧阳子区.无烟煤粉预热及其燃烧和污染物生成特性实验研究[D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2014:44-45.
OUYANG Ziqu. Experimental study on preheating and combustion characteristics and pollutants emission of pulverized anthracite [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences,2014:44-45.