

国内典型煤种在富氧条件下的燃烧性能

张 大 兴

(中国神华能源股份有限公司 国华惠州热电分公司,广东 惠州 516086)

摘 要:为掌握富氧燃烧对不同煤种燃烧性能的影响,在煤粉气流着火温度试验炉和改造后的一维火焰燃烧试验台架上进行国内典型烟煤和贫煤在不同 O_2 体积分数下的煤粉气流着火温度、一维火焰炉燃尽率、结渣性能测试。研究表明,随着 O_2 体积分数的增加,不同煤种均呈现煤粉气流着火温度下降、燃尽率上升的规律,表明 O_2 体积分数的增加可以提高燃煤的燃烧稳定性和经济性,同时随着 O_2 体积分数的增加,炉膛燃烧尖峰温度提前并升高,燃煤的结渣性能加重。需要注意的是不同煤种的燃烧性能受 O_2 体积分数的影响程度不同,具体煤种需进行相应的富氧燃烧试验确定。

关键词:富氧燃烧;神华烟煤;潞安贫煤;燃烧温度;飞灰含碳量;燃尽率;结渣

中图分类号:TK229;TK229.6

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)02-0090-06

Oxygen-enriched combustion characteristics of typical coals in China

ZHANG Daxing

(Guohua Huizhou Thermal Power Branch Company, China Shenhua Energy Co., Ltd., Huizhou 516086, China)

Abstract: In order to completely elucidate the different coal's combustion performances under oxygen enriching condition—and provide reference for oxygen concentration selection, boiler and burner design, as well as the heating surface arrangement, the ignition temperature, burn-out rate, slagging characteristic of typical bituminous coal and lean coal were tested on a one-dimensional flame fire furnace and a modified pulverized coal-air flow test furnace under different oxygen concentrations. The results show that the ignition temperature decreases and the burnout rate raises with the increasing of oxygen concentration. The enriched-oxygen combustion can improve combustion stability and combustion economy of coal. Likewise, the combustion peak temperature increases and slagging aggravates. It should be noted that the effects of oxygen concentration on the combustion performance for different type coal are varied. The coal sample needs to be tested with specific oxygen-enriched combustion to determine its combustion performance.

Key words: oxygen-enriched combustion; Shenhua coal; Lu'an coal; combustion temperature; carbon content of fly ash; burn-out rate; slagging

0 引 言

由于全球工业化进程加快,大气中的温室气体 CO_2 浓度已经从工业革命之前的 280×10^{-6} 上升到近 390×10^{-6} ,相应的地表温度较20世纪平均增加了 $(0.74 \pm 0.18)^\circ C$ 。我国已成为世界上 CO_2 排放最多的国家,其排放量占全球排放量的 $1/3$ 左右^[1]。烟气再循环+富氧燃烧技术具有降低 NO_x 排放、提高燃烧稳定性和燃烧效率等优点,同时该技术也是国

际上具有发展前景的一种燃烧后分离捕集 CO_2 技术,既适用于现役常规燃煤电站锅炉技术的改造,又可用于新建大型电站燃煤锅炉机组^[2-6]。

为了保证煤粉在富氧燃烧条件下仍能满足锅炉的安全运行,国内外相关研究机构进行了大量的理论和试验研究。高建强等^[7]研究了300 MW褐煤富氧燃烧锅炉系统仿真模型;吴海波^[8]通过对常规空气燃烧锅炉部分的计算参数、公式修正,开发了新型富氧燃烧计算模型。廖海燕等^[9]研究了200 MW富

收稿日期:2017-08-21;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.017

基金项目:中国华能集团总部科技资助项目(HNKJ15-H11)

作者简介:张大兴(1979—),男,贵州安顺人,工程师,主要从事火力发电厂锅炉运行和管理方面的工作。E-mail:1242906200@qq.com

引用格式:张大兴.国内典型煤种在富氧条件下的燃烧性能[J].洁净煤技术,2018,24(1):90-95.

ZHANG Daxing. Oxygen-enriched combustion characteristics of typical coals in China[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 90-95.

氧燃煤电厂制粉系统及磨煤机参数的选取。煤粉的燃烧特性是锅炉设计的主要依据之一,采用富氧燃烧方式后,燃烧气氛的变化必然对煤粉的燃烧性能产生影响。吴迪等^[10]研究了 CO_2 的物理化学属性对煤粉富氧燃烧着火性能的影响,与 N_2 相比 CO_2 会引起煤粉着火延迟;而刘彦丰等^[11]在热重分析仪上的研究表明,在 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下的燃烧性能曲线没有明显变化,煤粉着火温度略有下降。孙青等^[12]利用马弗炉和平面火焰携带流反应器研究了神华煤在富氧条件下的结渣性能,表明富氧条件将加重试验煤样的结渣。而35 MW富氧燃烧工业示范工程的建成和调试成功,标志着我国在富氧燃烧的关键装备研发、系统集成和调试运行等方面的能力总体达到了国际前沿^[13-14]。

锅炉采用富氧燃烧技术后,由于燃烧气氛及燃烧产物与常规燃烧有所不同,将影响到锅炉燃烧系统设计、制粉系统设计、炉内燃烧过程、火焰辐射特性、传热特性、沾污积灰与结渣特性、锅炉受热面设计与布置等多个方面。本文利用一维火焰燃烧试验炉以及煤粉气流着火温度试验炉,在更接近实际锅炉的燃烧状态下,对国内典型的烟煤和贫煤进行富氧状态下的燃烧和结渣性能测试,以为富氧燃烧锅炉设计以及现役煤粉锅炉采用富氧燃烧需进行的设备改造提供参考和依据。

1 试验设备及测试方法

1.1 煤粉气流着火温度试验炉及测试方法

图1为煤粉气流着火温度试验台,炉体为立式电加热炉,有效高度610 mm,内径175 mm,2级炉膛均由双套管碳化硅烧制而成,配有调压器以调节炉壁温度,炉顶轴线上装有1个一次风喷嘴和2个二次风喷嘴,气流由上而下流动且被加热至煤粉着火,送风机送入气体为空气。测试方法参见文献^[15]。

图2为富氧燃烧条件下的煤粉气流着火温度试验台,与图1的区别在于送风机送入参与燃烧的气体为 O_2/CO_2 混合物,其余均和图1一致。常规燃烧和富氧燃烧时,一次风和二次风均为常温状态。

1.2 一维火焰燃烧试验炉及测试方法

一维火焰炉燃烧试验台如图3所示,系统由炉体、给粉机、送风机、引风机、除尘器等设备组成。气、粉混合物由锥体顶部引入,炉顶和第1级炉体的锥型渐扩结构使气粉混合物在加热过程中均匀膨胀,充满截面,消除了烟气回流,形成无轴向混合的柱塞状流

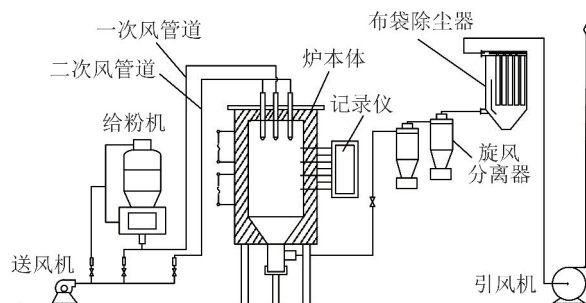


图1 煤粉气流着火温度测试炉及系统示意

Fig. 1 Pulverized coal ignition temperature test furnace and system schematic diagram

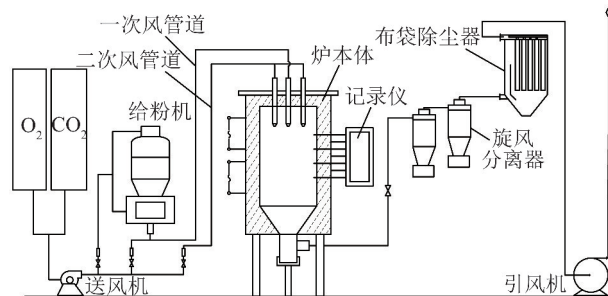


图2 富氧燃烧下的煤粉气流着火温度测试炉及系统示意

Fig. 2 Pulverized coal ignition temperature test furnace and system schematic diagram at oxy-enriched combustion

动。因此沿炉膛轴向测定的参数可表征煤粉气流燃烧过程的特征。炉膛从上到下分为6级,分别对应1~6级测点。具体试验方法参见文献^[16]。

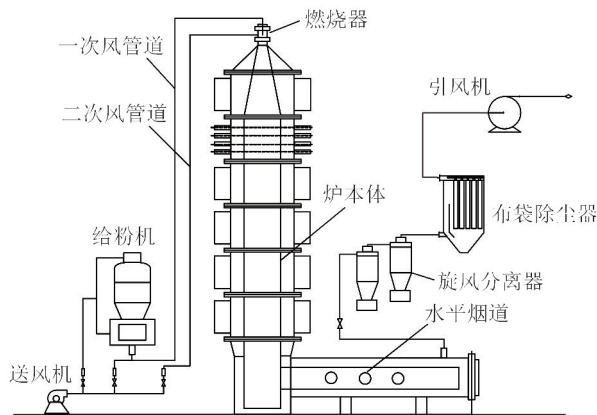


图3 一维火焰炉燃烧试验台

Fig. 3 One-dimensional flame furnace combustion test bench

1.3 一维火焰燃烧试验炉改造及富氧燃烧测试方法

由于富氧燃烧会产生极高的燃烧温度,为使炉内燃烧过程接近常规燃烧方式,通常需要从锅炉排烟抽取70%~80%富含 CO_2 的烟气再循环,与纯氧混合后送入燃烧器。为了模拟实际锅炉在富氧状态下的燃烧状态,对一维火焰燃烧试验炉进行了改造

(图4)。主要改造包括:①增加了循环风机,代替原来的送风机,将满足要求的烟气和纯氧混合物送入炉内燃烧;②增加了O₂供给设备;③烟气加热器,将烟气和O₂混合物温度控制在120℃左右,保证烟气中的水分不冷凝;④其他计量及测量设备。

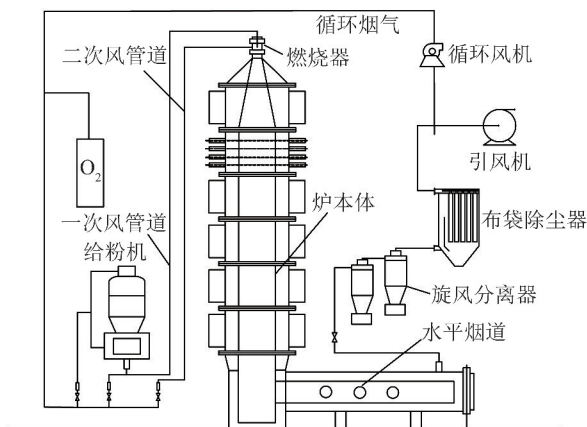


图4 富氧燃烧+烟气循环一维火焰炉燃烧试验台

Fig.4 One-dimensional flame furnace combustion test bench

富氧燃烧条件下的试验方法和前述常规一维火焰炉的试验方法基本一致,只是将烟气和O₂混合物替代原来的空气,由循环风机通过给煤机和二次风管道送入炉内燃烧。

2 试验结果与分析

2.1 试验煤样及试验工况

选取国内典型烟煤(神华煤)和贫煤(潞安煤)作为试验煤种,其基本煤质特性参数见表1。神华煤为极易着火和燃尽的燃烧性能优良的烟煤,但灰熔融温度低,具有严重的结渣倾向;潞安煤为难着火和难燃尽的燃烧性能较差的贫煤,但灰熔融温度高,结渣倾向较低,试验煤样为空气干燥基状态。一维火焰炉燃烧试验的电加热控制的第1~6级最低壁温分别为800、1000、1100、1100、1100、1000℃。燃煤入炉热量控制在46.06 MJ/h,即神华煤和潞安煤的给煤量分别为29.21、27.92 g/min,炉膛出口O₂量为3.5%,具体控制参数及运行参数参见表2。

表1 试验煤样的煤质参数

Table 1 Coal quality parameters of test coal

煤种	$M_l/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$w(C_{ar})/\%$	$w(H_{ar})/\%$	$w(O_{ar})/\%$	$w(N_{ar})/\%$	$w(S_{1,ar})/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	ST/℃
神华烟煤	15.4	5.98	6.73	34.13	62.79	3.64	10.33	0.67	0.44	23.42	1 160
潞安贫煤	2.4	0.73	18.77	18.76	69.99	3.46	3.89	1.19	0.30	26.99	>1 500

表2 试验工况的入炉风量

Table 2 Intake air volume of one-dimensional flame furnace

煤种	工况	O ₂ 体积分数/%	一维火焰炉试验			煤粉气流着火温度试验		
			入炉总气体量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	循环烟气体量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	入炉O ₂ 量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	入炉总气体量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	入炉CO ₂ 量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	入炉O ₂ 量/(Nm ³ ·h ⁻¹)
神华烟煤	Case1	21 ^a	15.27	0	0	6.11	0	0
	Case2	21	15.27	12.50	2.77	6.11	4.83	1.28
	Case3	30	10.08	7.31	2.77	4.03	2.82	1.21
	Case4	40	7.32	4.55	2.77	2.93	1.76	1.17
	Case5	50	5.75	2.98	2.77	2.30	1.15	1.15
潞安贫煤	Case6	21 ^a	14.53	0	0	5.81	0	0
	Case7	21	14.53	11.89	2.64	5.81	4.59	1.22
	Case8	30	9.59	6.96	2.63	3.84	2.69	1.15
	Case9	40	6.97	4.33	2.64	2.79	1.67	1.12
	Case10	50	5.47	2.83	2.64	2.19	1.10	1.10

注:a表示纯空气状态,其余均为富氧+烟气循环状态。

2.2 煤粉气流着火温度测试结果

图5为试验煤样在不同工况下的煤粉气流着火温度。可见,随着O₂体积分数的增加,神华煤和潞安煤的煤粉气流着火温度均下降,表明煤粉随着O₂

体积分数的升高而提前着火,有利于提高煤粉的燃烧稳定性,当继续增加O₂体积分数,煤粉气流着火温度下降幅度逐渐减少。另外,在相同的O₂体积分数下,燃烧性能优良的神华煤煤粉气流着火温度下

降幅度更大,表明煤种的燃烧性能更好,煤粉气流着火温度受 O_2 体积分数的影响更大。另外,在空气状态下,潞安煤的煤粉气流着火温度为 $790\text{ }^\circ\text{C}$,但没有明显的着火现象,只是出现较多的火星。而当 O_2 体积分率在30%以上时,潞安煤可见明显的燃烧火焰。当煤粉在进入炉膛受热后,短时间内快速升温,同时析出大部分挥发分,挥发分与一次风及烟气中的 O_2 混合燃烧。当环境中的 O_2 含量较低时,挥发分的燃烧时间较长,局部放热强度降低。随着 O_2 体积分数的增加,根据化学反应的质量作用定律,挥发分的燃烧速度随 O_2 体积分数的升高而增大,该区域燃烧反应物的放热速率提高,从而形成局部的高温区。局部的高温区促使更多的挥发分析出,并将焦炭更快地加热到着火状态,使局部反应温度进一步提高,从而形成一次风射流边界着火燃烧的良性循环。因此通入富氧空气流,有助于形成局部高温区,且对燃烧性能优良的烟煤效果优于燃烧性能较差的贫煤,但需注意燃烧强度增加后带来的燃煤结渣性能增强的问题。

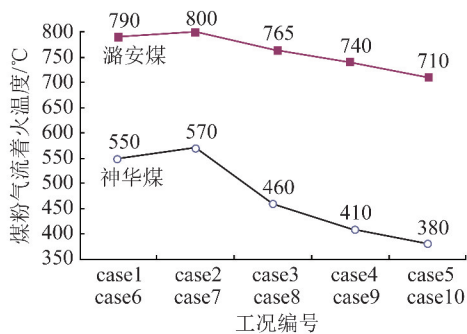


图5 试验煤样的煤粉气流着火温度

Fig. 5 Ignition temperature of pulverized coal of test coal

气氛对煤粉气流的着火也有一定影响,即使都采用21%的 O_2 体积分率,神华煤和潞安煤在富氧燃烧+烟气循环气氛下的煤粉气流着火温度分别比空气气氛下高 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20\text{ }^\circ\text{C}$,说明 CO_2 对煤粉着火具有延迟作用。主要原因是 CO_2 的比热容比 N_2 大,挥发分在 O_2/CO_2 气氛中的扩散速率降低。另外,有研究表明^[10],当富氧燃烧系统 O_2 分压在26%~29%时,煤粉着火温度与空气气氛燃烧接近,这与本试验 O_2 分压为21%的试验结果吻合。

2.3 富氧条件下的燃烧温度

图6为神华煤和潞安煤的炉膛烟气温度。最高烟气温度位置表征了煤种的着火性能,高温烟气越靠近炉膛上部则该煤种的着火性能越好。在纯空气

状态下,神华煤的最高烟气温度在第1级,而潞安煤的最高烟气温度在第2级,主要是因为难燃煤种的燃烧反应速度低,着火滞后。当 O_2 体积分率提高后,火焰根部温度(即第1级炉膛烟气温度)迅速提高,着火明显提前,且 O_2 体积分率越高,第1级炉膛烟气温度越高,即使对于燃烧性能较差的潞安煤,当 O_2 体积分率达到30%以上,烟气最高温度也出现在第1级炉膛。可见,富氧燃烧使火焰变短,燃烧强度提高,燃烧速度加快,因此需注意采取适当措施,避免燃烧器的过热烧损和烟气减少带来的局部高温。

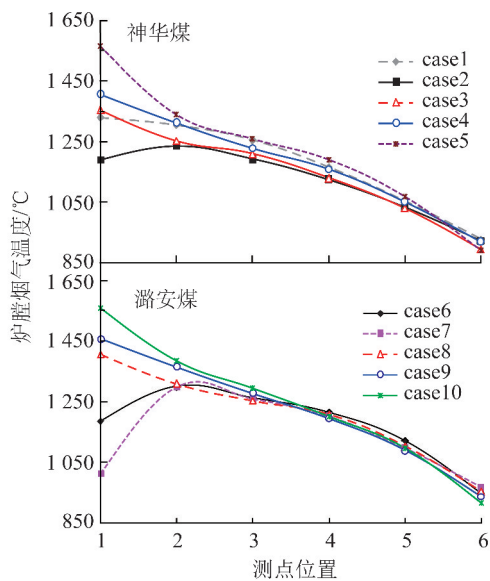


图6 神华煤和潞安煤在不同工况下的炉膛燃烧温度

Fig. 6 Combustion temperature of Shenhua coal and Lu'an coal under different conditions

同时,由图6可以看出,气氛对煤种的着火影响较大,即使均采用21%的 O_2 体积分率,神华煤和潞安煤在纯空气状态下的第1级炉膛火焰燃烧温度高于富氧燃烧+烟气循环工况,再次说明 CO_2 对煤粉着火具有延迟作用,这与前述煤粉气流着火温度的测试结果一致。采用富氧燃烧+烟气循环燃烧方式,随着 O_2 体积分数的增加,炉膛辐射换热量增加。一方面随着 O_2 体积分率增加,三原子气体成分增加,使得炉内辐射能力增强,进而提高了炉内传热效率;另一方面,随着 O_2 体积分率增加,燃烧产物量迅速减少,炉内充满度降低,导致烟气辐射能力下降。炉内辐射换热系数受这两方面的综合作用,当 O_2 体积分率小于30%时,三原子气体增加带来的辐射换热的影响小于燃烧产物减少带来的辐射能力下降的影响。

2.4 富氧条件下的燃尽性能

图7为神华煤和潞安煤在不同工况下的飞灰含

碳量比较,图8为试验煤样在炉膛第6级的燃尽率比较。结果表明,由于神华煤自身优良的燃尽性能,采用富氧燃烧对降低飞灰含碳量、提高燃尽率的作用非常有限。而对于燃尽性能较差的潞安煤,富氧燃烧在降低飞灰含碳量、提高燃尽率方面的作用明显,当 O_2 体积分数从21%增加到30%,第6级飞灰含碳量从15.87%降低到2.57%,相应的燃尽率从95.51%提高到99.37%,但随着 O_2 体积分数继续增加,这种改善效果越来越差。

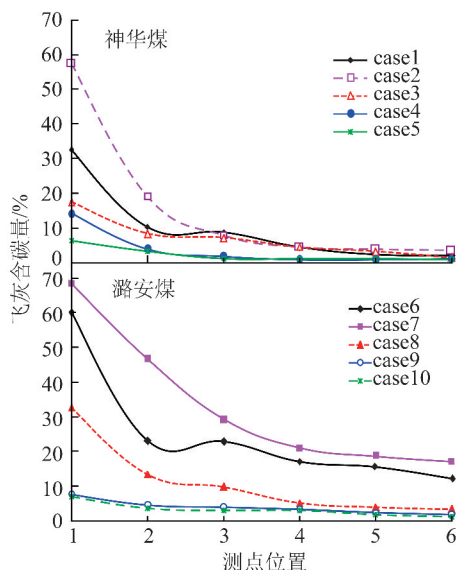


图7 神华煤和潞安煤在不同工况下的飞灰含碳量

Fig. 7 Unburned carbon in fly ash of Shenhua coal and Lu'an coal under different conditions

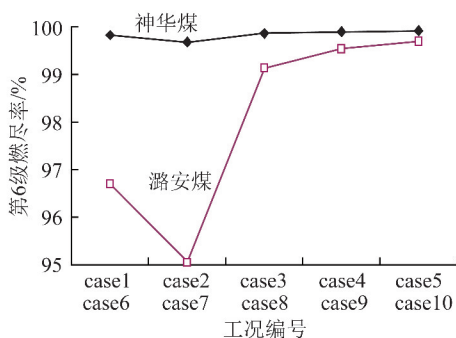


图8 试验煤样的第6级燃尽率

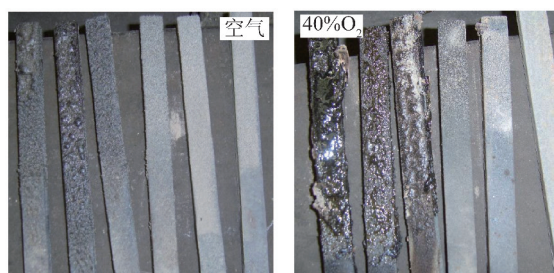
Fig. 8 Burn-out rate at the sixth furnace of test coals

和前述燃烧温度的现象一致,即使都在21%的 O_2 体积分数下,神华煤和潞安煤均表现出在富氧燃烧+烟气循环条件下的飞灰含碳量高于空气状态,说明 CO_2 不仅对煤粉着火具有延迟作用,同时对煤粉的燃尽也起阻碍作用。

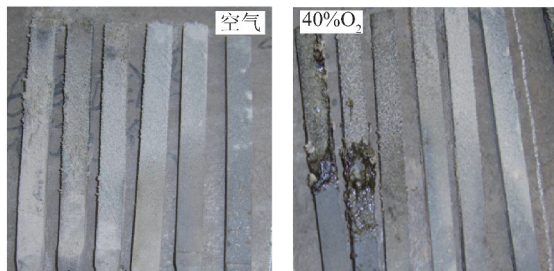
2.5 富氧条件下的结渣性能分析

图9为神华煤和潞安煤的渣棒渣型,图中从左

到右的渣棒分别对应炉膛的第1~6级测点。可见,随着 O_2 体积分数的增加,炉内结渣趋于严重,这与高 O_2 体积分数下炉内火焰温度升高有直接关系。在空气状态下,神华煤的结渣较为严重,前2级渣棒均为严重的熔融渣型,当 O_2 体积分数增加到40%时,炉膛第3级的烟温也升高至1250℃,导致前3级渣棒均出现严重的熔融渣型。由于烟气中氧含量较高,且神华煤灰中的铁含量也较高,在氧化性气氛中,铁往往以 Fe_2O_3 的形态在渣中出现,因此渣的颜色由黑色变为略带红色。在循环烟气气氛下,烟气中的 CO_2 体积分数较高,空气条件下煤灰中的钙主要以CaO的形式存在,而在循环烟气燃烧条件下,反应产物中存在一定量 $CaCO_3$, $CaCO_3$ 易黏结,并会促进低灰熔融温度钙黄长石、钙长石的生成,从而加重结渣情况。潞安煤为典型的高灰熔融温度煤,在纯空气状态下,最为严重的渣型仅为弱黏聚等级,当 O_2 体积分数增加到40%时,出现最为严重的熔融渣型,结渣趋势变化规律与神华煤一致。因此,需注意 O_2 体积分数增大带来的结渣加剧问题。



(a) 神华煤



(b) 潞安煤

图9 神华煤和潞安煤在纯空气和40% O_2 状态下的渣棒渣型

Fig. 9 Slagging type of Shenhua coal and Lu'an coal in pure air condition and 40% O_2

3 结论

1) 采用富氧燃烧+烟气循环燃烧方式时,随着氧气浓度升高,煤粉气流着火温度降低,燃尽率升高,表明富氧燃烧方式可提高煤粉的燃烧稳定性和经济性。

但随着 O_2 体积分数的进一步升高,煤粉气流着火温度降低幅度和燃尽率升高幅度都逐渐减小。

2) O_2 体积分数升高时,燃烧性能优异的烟煤降低煤粉气流着火温度的效果优于燃烧性能较差的贫煤。在改善煤粉燃尽性能、提高燃烧效率方面,燃烧性能较差的贫煤较燃烧性能优异的烟煤明显。

3) 随着 O_2 体积分数升高,燃烧前期火焰温度增加明显,也即提高了火焰根部温度,同时也增加了煤样在炉内的结渣倾向,即使对于高灰熔融温度的潞安煤,当 O_2 体积分数达到 40% 以后,都出现了最为严重熔融渣型,因此需注意富氧燃烧导致煤样结渣加剧带来的对锅炉安全运行的问题。

4) 煤粉锅炉采用富氧燃烧+烟气循环燃烧方式时,结合煤粉锅炉燃烧经济性和燃烧安全性,推荐 O_2 体积分数在 30% 以内。实际应用中,应根据具体工程需求,通过实际试验结果权衡富氧燃烧带来燃烧效果以及由此增加的经济负担,确定最佳氧含量。

参考文献 (References):

[1] 兰健,吕田,金永星. 烟气再循环技术研究现状及发展趋势[J]. 节能,2015(10):4-8.
LAN Jian, LYU Tian, JIN Yongxing. Research status and development trend of flue gas recirculation technology[J]. Energy Conservation, 2015(10):4-8.

[2] 马莉娜,邓志友,龙建锋. 富氧燃烧技术研究现状及发展[J]. 时代农机,2015,42(12):35-36.
MA Li'na, DENG Zhiyou, LONG Jianfeng. The current situation and development of oxygen enriched combustion technology[J]. Times Agriculture Machinery, 2015, 42(12):35-36.

[3] 张玉锋,李旭圆,王金鹏. 火电厂锅炉节能减排技术探讨[J]. 工程技术研究,2017(2):221,256.
ZHANG Yufeng, LI Xuyuan, WANG Jinpeng. Discussion on boiler energy saving and emission reduction technology in thermal power plant[J]. Engineering Technology Research, 2017(2):221,256.

[4] 王勇,黄晓宏,卢兴,等. 富氧燃烧条件下燃煤 NO_x 排放的实验研究[J]. 环境工程学报,2016,10(7):3751-3755.
WANG Yong, HUANG Xiaohong, LU Xing, et al. Experimental study of NO_x emissions from coal combustion under oxy-fuel conditions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7):3751-3755.

[5] 吴乃新,汪丽芬,王恩禄. 富氧燃烧烟气焓温特性分析[J]. 能源研究与信息,2017,33(2):88-91.
WU Naixin, WANG Lifan, WANG Enlu. Study on flue gas enthalpy-temperature characteristics of oxy-fuel combustion[J]. Energy Research and Information, 2017, 32(2):88-91.

[6] 潘艳男,张民. 浅谈煤炭富氧燃烧减排的技术发展[J]. 应用能源技术,2016(3):44-46.

PAN Yannan, ZHANG Min. Brief discussion on technical development of coal oxy-fuel combustion emission[J]. Applied Energy Technology, 2016(3):44-46.

[7] 高建强,孙少东. 300 MW 褐煤富氧燃烧锅炉制粉系统仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报,2017,29(2):437-444.
GAO Jianqiang, SUN Shaodong. Study on pulverizing system simulation model of 300 MW lignite oxygen-enriched combustion boiler[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2):437-444.

[8] 吴海波. 不同 O_2/CO_2 配比下锅炉的富氧燃烧特性研究[J]. 锅炉技术,2017,48(2):50-53.
WU Haibo. Study on the characteristics of oxygen fuel combustion boiler in different O_2/CO_2 ratio[J]. Boiler Technology, 2017, 48(2):50-53.

[9] 廖海燕,张维,余学海,等. 200 MW 富氧燃煤电厂制粉系统及磨煤机参数的选取研究[J]. 中国电力,2016,49(1):23-27.
LIAO Haiyan, ZHANG Wei, YU Xuehai, et al. Pulverizing system and coal pulverizer's parameter selection for 200 MW oxygen enriched coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2016, 49(1):23-27.

[10] 吴迪,邹春,蔡磊,等. CO_2 的物理化学属性对于煤粉富氧燃烧着火的影响[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(6):558-562.
WU Di, ZOU Chun, CAI Lei, et al. Effect of physical and chemical properties of CO_2 on ignition of coal particle in O_2/CO_2 atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(6):558-562.

[11] 刘彦丰,陈启召,殷立宝. O_2/CO_2 气氛下烟煤掺烧褐煤燃烧特性[J]. 热力发电,2017,46(3):7-12.
LIU Yanfeng, CHEN Qizhao, YIN Libao. Co-combustion on characteristics of bituminous coal and lignite in O_2/CO_2 atmosphere[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3):7-12.

[12] 孙青,张泰,黄晓宏,等. 富氧燃烧方式下神华煤熔融特性实验研究[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(2):179-185.
SUN Qing, ZHANG Tai, HUANG Xiaohong, et al. Study of ash fusion behavior of Shenhua coal during oxygen enriched combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(2):179-185.

[13] 曾洁,潘绍成,冉桑名,等. 35 MW 富氧燃烧煤粉锅炉开发与研究[J]. 东方电气评论,2016,30(120):24-28.
ZENG Jie, PAN Shaocheng, RAN Shenming, et al. Research and development of 35 MW oxyfuel combustion PC boiler[J]. Dongfang Electric Review, 2016, 30(120):24-28.

[14] 毛宇,柳朝晖,陈灿,等. 富氧燃烧工程示范系统集成研发及运行性能[J]. 东方电气评论,2017,31(122):17-23.
MAO Yu, LIU Zhaohui, CHEN Can, et al. Integrated research and operating performance of oxyfuel combustion demonstration engineering system[J]. Dongfang Electric Review, 2017, 31(122):17-23.

[15] 国家能源局. 煤粉气流着火温度的测定方法:DL/T 1446—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2016.

[16] 国家能源局. 煤粉燃烧结渣特性和燃尽率一维火焰炉测试方法:DL/T 1106—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.