

50 kW 循环流化床 O₂/CO₂ 气氛下 煤燃烧及污染物排放特性

段伦博, 周骛, 屈成锐, 陈晓平, 赵长遂
(东南大学能源与环境学院, 江苏省 南京市 210096)

Combustion and Pollutant Emission Characteristics of Coal in a 50 kW Circulating Fluidized Bed Under O₂/CO₂ Atmosphere

DUAN Lunbo, ZHOU Wu, QU Chengrui, CHEN Xiaoping, ZHAO Changsui
(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

ABSTRACT: Combustion experiments of Xuzhou bituminous coal and Longyan anthracite fired in a 50 kW circulating fluidized bed (CFB) setup under air, 21% O₂/79% CO₂, 30% O₂/70% CO₂ and 40% O₂/60% CO₂ atmospheres were done and effects of atmospheres on temperature profile, combustion efficiency and pollutant emission were analyzed. Results show that both coals burn stably under different atmospheres. The temperature increases first and then decreases along the furnace height, and the temperature level elevates with the O₂ concentration. As the O₂ concentration increases, the combustion efficiency improves. The combustion efficiency under air atmosphere is between those under 21% O₂/79% CO₂ and 30% O₂/70% CO₂ atmospheres. As the O₂ concentration increases, SO₂ emission increases without limestone addition. NO emission in 21% O₂/79% CO₂ atmosphere is lower than that in air atmosphere and increases as the O₂ concentration increases. CO emission in 21% O₂/79% CO₂ atmosphere is much higher than that in air atmosphere but decreases quickly as the O₂ concentration increases.

KEY WORDS: O₂/CO₂ combustion; circulating fluidized bed (CFB); combustion efficiency; pollutant emission

摘要: 在热输入功率为 50 kW 的循环流化床富氧燃烧综合试验台上进行徐州烟煤和龙岩无烟煤在空气、21% O₂/79% CO₂、30% O₂/70% CO₂ 和 40% O₂/60% CO₂ 气氛下的燃烧试验, 考察气氛对温度、燃烧效率和污染物排放的影响。结果表明, 2 种煤在不同气氛下均燃烧稳定; 沿炉膛高度方向, 温度先升高后降低; 随着氧化介质中 O₂ 浓度的增加, 温度水平上

升; 随着氧化介质中 O₂ 浓度的提高, 燃烧效率提高; 空气气氛下燃烧效率介于 21% O₂/79% CO₂ 和 30% O₂/70% CO₂ 气氛之间; 未添加脱硫剂时, 随着氧化介质中 O₂ 浓度的提高, 烟煤和无烟煤燃烧 SO₂ 排放浓度提高; 21% O₂/79% CO₂ 气氛下, NO 排放量比空气气氛下低; 随着 O₂ 浓度的升高, NO 排放量升高; 21% O₂/79% CO₂ 气氛 CO 排放量比空气气氛下大很多, 但随着 O₂ 浓度的升高, CO 排放量迅速下降。

关键词: O₂/CO₂ 燃烧; 循环流化床; 燃烧效率; 污染物排放

0 引言

O₂/CO₂ 燃烧技术作为一种新型的可低成本分离回收 CO₂ 且污染物排放较低的全新理念燃烧方式已引起了各国研究者的重视。截至 2009 年 12 月, 世界上建成的 O₂/CO₂ 燃烧的中试规模以上电站已超过 10 个^[1]。

将 O₂/CO₂ 燃烧技术与循环流化床技术相结合的循环流化床 O₂/CO₂ 燃烧技术与煤粉炉 O₂/CO₂ 燃烧技术相比具有其独特的优点:

1) 在 O₂/CO₂ 燃烧技术中, 通过提高氧化介质中的氧浓度, 烟气体积可以大幅减小, 随之锅炉体积也可大幅减小, 这样会给煤粉锅炉受热面的布置带来很大困难。循环流化床锅炉可以通过在热循环回路中增加外置床换热器等受热面来有效地解决这一问题。Saastamoinen 等^[2]研究认为, 氧气浓度从 21% 上升到 60%, 锅炉体积减小为原来的 38%。Alstom 认为富氧燃烧的循环流化床锅炉会大大减小现有空气锅炉的体积和造价, 电厂占地面积变为空气燃烧的 50%, 锅炉体积变为空气燃烧的 44%, 锅炉重量变为 35%, 造价变为 32%。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2011CB707301)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China(2011CB707301).

2) 循环流化床富氧燃烧集成了循环流化床燃烧技术和富氧燃烧技术的优点, 比如燃料适应性强、经济的炉内脱硫和低 NO_x 排放等。循环流化床富氧燃烧技术在全烧生物质或者混烧生物质时, 可以达到 CO_2 的负排放。在循环流化床富氧燃烧中, 由于 CO_2 浓度高, 石灰石的脱硫机制由煅烧碳酸化机制变为直接脱硫机制, 脱硫效率和钙转化率提高^[3-5]。通过烟气循环, 烟气中的 NO_x 被火焰中的还原性基团大量还原, 加之循环 NO_x 和燃料 N 的相互作用, 使得循环流化床富氧燃烧 NO_x 的排放大量降低^[6-8]。

3) 循环流化床富氧燃烧技术不需要开发新型燃烧器。对于煤粉锅炉, 由于高氧浓度的存在, 使得开发新型燃烧器成为必然^[9]。循环流化床锅炉可以将循环烟气中的氧气浓度控制在安全范围, 剩余的氧气可以经过单独的氧气风帽或者氧气管道送入炉膛。

4) 由于循环流化床炉膛内部大量的惰性物料, 循环流化床富氧燃烧锅炉更容易实现从空气燃烧状态到富氧燃烧状态的切换。

目前, 发达国家研究机构包括锅炉制造公司研究重心正对此倾斜, 包括美国能源部、加拿大能源技术中心和 Alstom、B&W、Foster Wheeler 等锅炉制造企业都不同程度地启动了循环流化床 O_2/CO_2 燃烧项目。国内, 浙江大学也进行了小型试验台上的 O_2/CO_2 燃烧研究, 取得了一定的研究成果^[10]。然而针对循环流化床 O_2/CO_2 燃烧特性的系统研究还没有完成。本文搭建了热输入功率为 50 kW 的循

环流化床 O_2/CO_2 燃烧综合试验装置, 研究了 O_2/CO_2 气氛下循环流化床的燃烧特性及污染物排放特性, 对该技术的进一步完善发展具有指导意义。

1 试验及样品

试验选用徐州烟煤和龙岩无烟煤, 其元素分析和工业分析如表 1。原煤经破碎筛分选用的粒度范围为 0~6 mm, 粒度分布如图 1, 其中烟煤的平均粒径为 0.545 mm, 无烟煤的平均粒径为 0.829 mm。

表 1 烟煤和无烟煤的元素分析和工业分析

Tab. 1 Ultimate and proximate analysis of Xuzhou Bituminous Coal

样品	元素分析/%					低位热值/ ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	工业分析/%			
	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}		FC_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	M_{ad}
烟煤	58.97	3.65	7.30	0.67	1.76	23.54	47.33	25.02	25.55	2.10
无烟煤	55.65	1.31	0.23	0.52	2.74	24.64	54.43	6.02	38.23	1.32

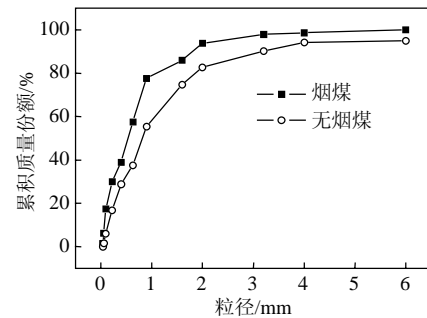


图 1 煤样的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of the coal samples

试验系统为自建的循环流化床 O_2/CO_2 燃烧综合试验装置, 其系统如图 2 所示。循环流化床燃烧

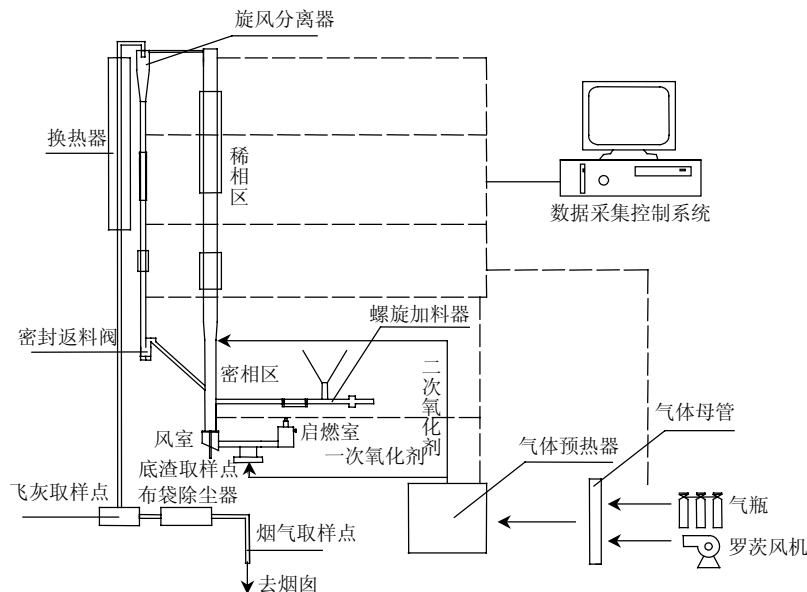


图 2 50 kW 循环流化床 O_2/CO_2 燃烧综合试验装置系统图

Fig. 2 System diagram of the 50 kW oxy-CFB facility

室提升段高度为 4 200 mm，其中密相区高 800 mm，内径为 122 mm；稀相区高度为 3 200 mm，内径为 150 mm；过渡段高度为 200 mm。煤和石灰石由螺旋加料器送入炉内，空气燃烧工况由罗茨风机送风，O₂/CO₂ 燃烧工况由 O₂ 气瓶和 CO₂ 气瓶经气体母管充分混合后送入炉膛燃烧，产生的烟气经空气预热器和布袋除尘器后排入烟囱。工况稳定后，每隔 30 min 对底渣和飞灰取样一次，飞灰取样采用等速取样法，将所取样品充分混合后按 4 分法取样化验其未燃碳量，对具体工况进行重复性试验，相同工况未燃碳含量波动在±10%以内。采用德国 MRU 公司 Vario Plus 型烟气分析仪在线检测烟气中 CO、CO₂、SO₂、NO 等成分，4 种气体的测量精度均为±5%。共进行了 4 个工况下的燃烧试验，气氛分别为空气、21%O₂/79%CO₂、30%O₂/70%CO₂ 和 40%O₂/60%CO₂ 气氛。

2 结果与讨论

2.1 气氛对燃烧效率的影响

试验过程中 2 煤种在不同气氛下均燃烧良好，物料循环回路畅通，典型工况下(加煤量约 8 kg/h，过量氧气系数 1.2，一次氧化剂比例为 0.7)，温度沿炉膛高度的分布如图 3 所示。其中过量氧气系数为实际供氧量与理论需氧量之比。由图可知，不同气氛下燃用烟煤和无烟煤，温度沿炉膛高度均呈先增大后减小的趋势。在密相区底部，由于刚进入炉膛的一次氧化剂和由返料口进入固体循环物料的冷却作用使温度较低；随后挥发分和焦炭剧烈燃烧大量放热，温度迅速升高；较低温度的二次氧化剂的补入，使温度有所降低。此后，密相区内未燃尽的焦炭继续在炉膛稀相区内燃烧，温度较为稳定；但随着燃烧份额的降低和炉壁的散热，稀相区上部温度逐渐降低。从温度水平看，随着燃烧介质中 O₂ 浓度的增加，燃用 2 煤种时炉内温度水平平均提高。一方面，随着 O₂ 浓度的提高，挥发分和焦炭的燃烧速率提高；另一方面，相同过量氧气系数下，氧气浓度的提高使得炉内的烟气量减少，炉内的表观气速降低，固体颗粒在炉内的停留时间变长，燃烧更完全。空气燃烧的温度水平介于 21%O₂/79%CO₂ 气氛和 30%O₂/70%CO₂ 气氛之间，这与前人煤粉炉的研究结果相似^[11]。无烟煤密相区平均床温比烟煤高，这是由于无烟煤的颗粒尺寸比烟煤大，更多的焦炭会在密相区燃烧；无烟煤稀相区温度随炉膛高

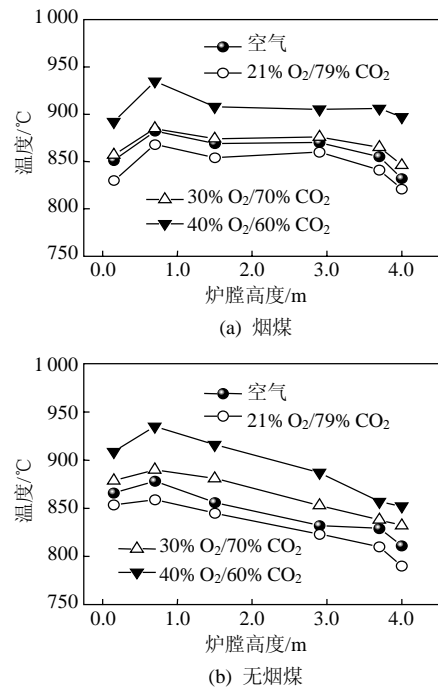


图 3 不同气氛温度沿炉膛高度分布

Fig. 3 Temperature profile along the furnace height

度升高下降幅度比烟煤快，这是因为烟煤进入炉膛后，大量挥发分立即析出，随后被气流携带至稀相区燃烧，而无烟煤的燃烧份额集中在密相区。

各工况底渣和飞灰的可燃碳含量如表 2 和表 3 所示。由表可见，烟煤和无烟煤在循环流化床 O₂/CO₂ 气氛下燃烧，随着氧化介质中 O₂ 含量的增加，其飞灰含碳量和底渣含碳量均降低。空气燃烧时飞灰和底渣含碳量介于 21%O₂ 和 30%O₂ 的 O₂/CO₂ 燃烧之间。

表 2 烟煤不同气氛下燃烧飞灰和底渣含碳量(质量分数)

Tab. 2 Unburnt carbon in the bottom ash and fly ash of bituminous coal under different atmospheres(mass fraction)

燃烧气氛	空气	21%O ₂ /79%CO ₂	30%O ₂ /70%CO ₂	40%O ₂ /60%CO ₂
飞灰	0.196	0.212	0.156	0.135
底渣	0.053	0.077	0.046	0.025

表 3 无烟煤不同气氛下燃烧飞灰和底渣含碳量(质量分数)

Tab.3 Unburnt carbon in the bottom ash and fly ash of anthracite under different atmospheres(mass fraction)

燃烧气氛	空气	21%O ₂ /79%CO ₂	30%O ₂ /70%CO ₂	40%O ₂ /60%CO ₂
飞灰	0.223	0.230	0.184	0.151
底渣	0.076	0.102	0.055	0.048

根据烟气 CO 和 CH₄ 等成分及烟气量计算气体未完全燃烧热损失 q₃，按灰渣份额计算其固体未完全燃烧热损失 q₄，进而计算得到燃烧效率η。烟煤和无烟煤在不同气氛下的燃烧效率如图 4 所示。随

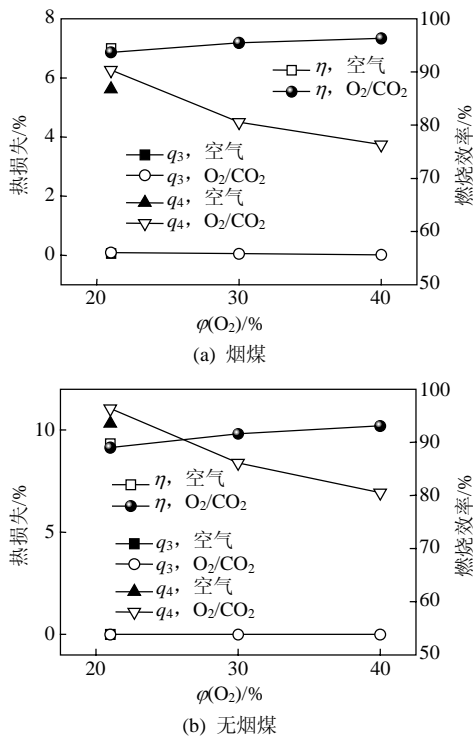


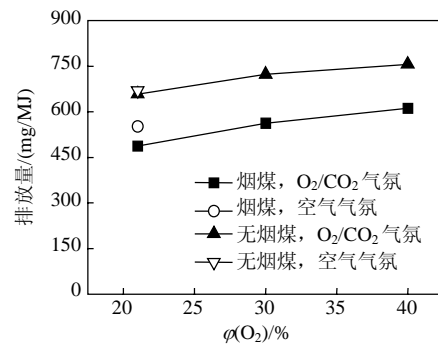
图4 不同气氛下的燃烧热损失和燃烧效率

Fig. 4 Heat loss and combustion efficiency under different atmospheres

随着氧化介质中 O_2 浓度的提高, 烟煤和无烟煤燃烧的固体未完全燃烧热损失和气体未完全燃烧热损失均降低, 燃烧效率提高。21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下的燃烧效率比空气气氛下的燃烧效率低, 表明用 CO_2 取代 N_2 进行燃烧会降低循环流化床的燃烧效率。前人研究^[12-13]表明, CO_2 的存在会延迟煤焦的着火时间, 在 O_2/CO_2 气氛下火焰的传播速率也比空气气氛下低很多, 在 21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下碳颗粒的燃烧速率比在空气气氛下低。本试验中, 2 种气氛下进入炉内的气体总体积相同, 气氛不同导致的烟气体积流量差异忽略不计, 则 2 种气氛下燃烧炉内的表观气速相等, 忽略 CO_2 与 N_2 和固体颗粒之间曳力的不同, 2 种气氛下固体颗粒在炉内的停留时间是相同的。因此, 循环流化床燃烧方式下 21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下煤焦的燃烧速率比空气气氛下低。无烟煤的燃烧效率比烟煤的燃烧效率低, 主要是由于低挥发分无烟煤中固定碳及灰含量高所致。

2.2 不同气氛下 SO_2 排放特性

未加脱硫剂, 2 种煤在 4 种试验气氛下稳定燃烧时, SO_2 的排放量如图 5 所示。 SO_2 排放量单位为 mg/MJ , 即单位热量输入的 SO_2 排放量。循环流化床燃烧过程中, 煤中的 S 在还原性气氛的密相区

图5 不同气氛下 SO_2 的排放特性Fig. 5 SO_2 emission under different atmospheres

先以 H_2S 的形式析出^[14], 继而被气氛中的 O_2 氧化为 SO_2 。从空气气氛到 21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛, 由于燃烧温度降低, 煤中 S 向气态 SO_2 的转化率降低, 同时煤中矿物质的固硫能力增强^[15], SO_2 排放水平下降。随着 O_2 浓度的提高, SO_2 排放水平大幅上升, 一方面由于 O_2 浓度提高, 燃烧温度相应提高, 煤中矿物质的固硫能力下降, S 更易向气态转化; 另一方面, 煤中的 S 在热解过程中通常先以 H_2S 的形式析出, 继而被气氛中的 O_2 氧化为 SO_2 , O_2 浓度提高有利于 H_2S 的氧化; 高 O_2 浓度气氛炉内的表观气速降低使燃料在炉内的停留时间增长也会提高煤中 S 向 SO_2 的转化。

2.3 不同气氛下 NO 排放特性

气氛对循环流化床燃烧 NO 排放特性的影响如图 6 所示, 各气氛下的炉内温度分布见图 4。21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下, NO 的排放特性比空气气氛下低。Zhao 等^[16]、Reidick 和 Kremer^[17]对循环流化床空气燃烧 NO 浓度沿炉膛高度的分布进行了研究, 结果表明 NO 的生成主要在炉膛的密相区, 随着炉膛高度的增加, NO 浓度逐渐下降。循环流化床中 NO_x 的来源主要是燃料 N, 它们在热解过程中, 首先生成 NH_3 、HCN 等气相前驱物, 之后被 O 和 OH 等基团氧化为 NO。如果气氛中 O 和 OH 基团的浓度很低, 那么燃料 N 则主要生成 N_2 。NO 在循环流化床炉内的分解反应主要通过 2 个途径, 一是被气氛中 CH_4 等挥发分还原基团还原, 二是通过焦炭表面发生的 $NO/CO/焦炭$ 的催化还原反应还原。在 21% $O_2/79\%CO_2$ 气氛下, 由于煤焦的燃烧速率变慢, 加上气化反应的发生, 使密相区存在大量新产生的焦炭和 CO, 使 NO 还原反应的程度比空气气氛下大大增大, NO 的排放浓度比空气气氛下大幅降低。随着氧浓度的升高, 床温升高, 炉内还原性气氛减弱, CO 浓度下降, O 和 OH 基团浓度上升, NO

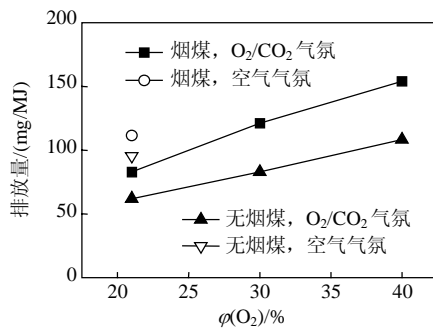


图 6 不同气氛下 NO 的排放特性

Fig. 6 NO emission under different atmospheres

排放量大幅上升。烟煤在 30%O₂/70%CO₂ 气氛下的 NO 排放浓度与空气气氛下相似, 而无烟煤在 30%O₂/70%CO₂ 气氛下的 NO 排放浓度比在空气气氛下低, 这是因为无烟煤固定碳含量高, 燃尽程度不完全以及灰含量高所致。前人研究表明, 煤灰中的矿物质是 NO/CO 焦炭的催化还原反应的催化剂^[17]。

2.4 不同气氛下 CO 排放特性

2 种煤在不同气氛下燃烧 CO 的排放特性如图 7 所示。燃烧过程中 CO 的生成途径主要有 2 条:

1) 挥发分和焦炭的不完全燃烧: $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$; 2) 焦炭的气化反应: $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ 。在空气燃烧过程中, 由于气氛中 CO₂ 浓度比较低, 气化反应速度非常慢, CO 主要是由于焦炭的不完全燃烧生成的。CO 主要生成区域为炉膛密相区, 这里由于缺氧而处于还原性气氛。随着二次风的补入, 气氛中存在过量的氧, 在循环流化床温度下, CO 被迅速氧化, 沿炉膛高度其浓度迅速下降。O₂/CO₂ 气氛下, 密相区新生成的煤焦、高 CO₂ 浓度、还原性气氛、足够的气化温度^[18]和良好的气固混合, 给煤焦气化提供了良好的反应条件, 可以推断煤焦气化将在循环流化床密相区剧烈反应。然而当气体携带煤焦进入稀相区后, 由于足够的 O₂, 煤焦气化产生的 CO 会被迅速氧化, 至旋风分离器出口, CO 的浓度已经非常低。由图 7 可见, 21%O₂/79%CO₂ 气氛下, CO 的排放浓度比空气气氛下高很多, 但还处于同一个数量级。随着 O₂ 浓度的升高, 焦炭的燃烧趋于完全, 加之煤焦气化反应的抑制, CO 的排放浓度降低。30%和 40%O₂ 浓度下, 2 种煤燃烧的 CO 排放浓度已经比空气气氛下低。低 O₂ 浓度下, 无烟煤燃烧 CO 的排放浓度比烟煤大, 主要是由于无烟煤中的固定碳含量高, 燃尽程度差及气化作用造成的。

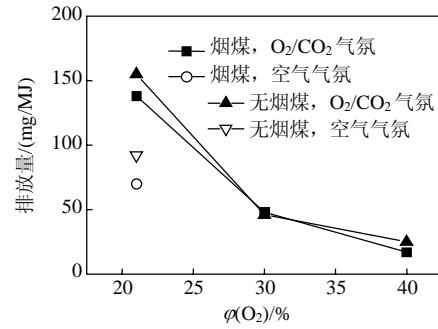


图 7 不同气氛下 CO 的排放特性

Fig. 7 CO emission under different atmospheres

3 结论

在自行搭建的输入热功率为 50 kW 的循环流化床富氧燃烧中试装置上进行徐州烟煤和龙岩无烟煤在配气条件下不同气氛的燃烧试验, 保证加煤量、过剩氧气量和一次氧化剂比例不变, 主要研究不同气氛下煤的燃烧特性和污染物排放特性, 结果表明:

1) O₂ 浓度从 21% 到 40%, 2 种煤在 O₂/CO₂ 气氛下均燃烧稳定; 炉内温度沿炉膛高度先升高后降低; 随着氧化介质中 O₂ 浓度的增加, 温度水平上升; 空气燃烧的温度水平介于 21%O₂/79%CO₂ 和 30%O₂/70%CO₂ 气氛之间。

2) 随着氧化介质中 O₂ 浓度的提高, 烟煤和无烟煤燃烧的固体未完全燃烧热损失和气体未完全燃烧热损失均降低, 燃烧效率提高。

3) 未添加脱硫剂, 21%O₂/79%CO₂ 气氛 SO₂ 排放量比空气气氛下低; 随着 O₂ 浓度的升高, SO₂ 排放量升高。

4) 21%O₂/79%CO₂ 气氛 NO 排放量比空气气氛下低; 随着 O₂ 浓度的升高, NO 排放量升高。

21%O₂/79%CO₂ 气氛 CO 排放量比空气气氛下大很多, 但随着 O₂ 浓度的升高, CO 排放量迅速下降。

参考文献

- [1] Wall T, Yu J L. Coal-fired oxyfuel technology status and progress to deployment[C]// Proceedings of the 34th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, Florida: Coal Technology Association, 2009: 25-36.
- [2] Saastamoinen J, Tourunen A, Pikkarainen T. Fluidized bed combustion in high concentrations of O₂ and CO₂[C]// The 19th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Vienna: Franz Winter, 2006.
- [3] Liu H, Katagiri S, Kaneko U, et al. Sulfation behavior of limestone

- under high CO₂ concentration in O₂/CO₂ coal combustion[J]. Fuel, 2000, 79(8): 945-953.
- [4] Chen C M, Zhao C S, Liang C, et al. Calcination and sintering characteristics of limestone under O₂/CO₂ combustion atmosphere [J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(2): 171-178.
- [5] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O₂/CO₂气氛下燃煤 SO₂排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 41-46.
Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, et al. Experimental Investigation on SO₂ Emission Characteristic During Pulverized Coal Combustion in O₂/CO₂ Environments[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(20): 41-46 (in Chinese).
- [6] Normann F, Andersson K, Leckner B, et al. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(5): 385-397.
- [7] Okazaki K, Ando T. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂[J]. Energy, 1997, 22(2-3): 207-215.
- [8] 李庆钊, 赵长遂, 武卫芳, 等. O₂/CO₂气氛下燃煤 NO 排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33-39): 458-462.
Li Qingzhao, Zhao Changsui, Wu Weifang, et al. Experimental investigation on NO emission characteristic during pulverized coal combustion in O₂/CO₂ environments[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(33-39): 458-462 (in Chinese).
- [9] Chui E H, Douglas M A, Tan Y W. Modeling of oxy-fuel combustion for a western Canadian sub-bituminous coal[J]. Fuel, 2003, 82(10): 1201-1210.
- [10] 毛玉如, 方梦祥, 骆仲浚, 等. 富氧气氛下循环流化床煤燃烧试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(2): 188-191.
Mao Ruoyu, Fang Mengxiang, Luo Zhongyang, et al. Experimental study on coal combustion in a circulating fluidized bed test -facility under oxygen-enriched atmosphere[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(2): 188-191.
- [11] 张利琴, 宋蕾, 吴宁, 等. 煤烟气再循环富氧燃烧污染物排放特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 35-40.
Zhang Liqin, Song Qiang, Wu Ning, et al. Study on pollutant emission characteristics from Oxy-fuel combustion of coal with recycled flue gas[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(29): 35-40(in Chinese).
- [12] Molina A, Shaddix C. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion[J]. Proceedings of the combustion institute, 2007, 31(2): 1905-1912.
- [13] Kiga T, Takano S, Kimura N, et al. Characteristic of pulverized coal combustion in the system of oxygen/ recycled flue gas combustion [J]. Energy Convers Mgmt, 1997, 38(Suppl): 129-134.
- [14] Duan Lunbo, Zhao Changsui, Zhou Wu, et al. Sulfur evolution from coal combustion in O₂/CO₂ mixture [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 86(2): 269-273.
- [15] Czakiert T, Bis Z, Muskala W, et al. Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(6): 531-538.
- [16] Zhao J, Breerton C, Grace J R, et al. Gas concentration profiles and NO_x formation in circulating fluidized-bed combustion[J]. Fuel, 1997, 76(9): 853-860.
- [17] Reidick A, Kremer H. Pollutant formation during coal combustion in a CFB test furnace[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 3309-3315.
- [18] Jamil K, Hayash J I, Li C Z. Pyrolysis of a victorian brown coal and gasification of nascent char in CO₂ atmosphere in a wire-mesh reactor [J]. Fuel, 2004, 83(7-8): 833-843.



段伦博

收稿日期: 2010-07-07。

作者简介:

段伦博(1982), 男, 讲师, 主要从事洁净煤燃烧、污染控制及 CO₂ 减排方面的研究, duanlunbo@seu.edu.cn;

赵长遂(1945), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事洁净煤燃烧及燃煤大气污染物防治方面的研究, cszhao@seu.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)