

流化床 O_2/CO_2 气氛对烟煤焦反应速率的影响研究

王文康¹, 卜昌盛¹, 熊金琴¹, 王昕晔¹, 张居兵¹, 朴桂林¹, 张孝勇²

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司, 北京 102206)

[摘要] 流化床 O_2/CO_2 燃烧是实现煤炭清洁利用及近零碳排放的有效技术之一. 为进一步探究工业流化床 O_2/CO_2 燃烧条件下的煤颗粒燃烧机制, 本研究在小型流化床试验台上, 通过在线测量流化床出口烟气中 O_2 和 CO 的浓度, 深入考察了 O_2/CO_2 取代 O_2/N_2 后, 不同的床层温度 (800~900 °C)、 O_2 浓度 (4%~10%) 及颗粒粒径 (2~8 mm) 下的烟煤焦燃烧特性. 实验结果表明: O_2/CO_2 气氛下, 煤焦反应速率随床层温度的升高、 O_2 浓度的升高和颗粒粒径的降低而增加; 煤焦燃烧反应由 O_2 扩散控制, 气化反应由反应动力学控制; 相较于 O_2/N_2 气氛, 低床温下, O_2/CO_2 气氛下的 O_2 扩散速率降低是煤焦反应速率改变的主要原因; 高床温下, 除 O_2/CO_2 气氛下 O_2 的扩散速率降低外, 煤焦气化反应对煤焦反应速率的影响同样不可忽略.

[关键词] 流化床, O_2/CO_2 燃烧, 烟煤, 燃烧, 气化

[中图分类号] TQ534.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)04-0053-06

Investigation on Reaction Rate of Bituminous Coal-Char Particles in O_2/CO_2 Atmosphere in a Fluidized Bed

Wang Wenkang¹, Bu Changsheng¹, Xiong Jinqin¹, Wang Xinye¹,
Zhang Jubing¹, Piao Guilin¹, Zhang Xiaoyong²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. China Datang Corporation Science and Technology Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: Oxy-fuel fluidized bed (FB) combustion is one of the promising technologies achieving the clean utilization of coal and nearly zero emission of CO_2 from coal fired power plants. To obtain the oxy-fuel combustion characteristics of coal particles in the industry FB conditions, experimental study of combustion of bituminous coal particles is conducted in a bench-scale FB in O_2/CO_2 and O_2/N_2 atmospheres through continuously measuring the concentrations of O_2 and CO in the exit gas at the bed temperatures of 800~900 °C, the O_2 concentrations of 4%~10% and the coal particle sizes of 2~8 mm. Results indicate that the combustion rate of bituminous coal-char particle increases with the increase of bed temperature, O_2 concentration and the decrease of the coal-char size in O_2/CO_2 atmosphere. Oxidation of coal-char is controlled by the diffusion of O_2 , whereas gasification of coal-char is limited by the reaction kinetics. Compared with coal-char combustion in the O_2/N_2 atmosphere, the decreased diffusivity of O_2 in CO_2 is the main reason for the changed reaction rate of coal-char particle in O_2/CO_2 atmosphere at a low bed temperature. However, at a high bed temperature, in spite of the low diffusion rate of O_2 , the effect of gasification on the coal-char reaction could not be ignored as consequence of the increased gasification rate.

Key words: fluidized Bed, O_2/CO_2 combustion, bituminous coal, combustion, gasification

控制化石燃料利用过程中的 CO_2 排放已成为全人类共同关注的话题. 煤炭在未来的长时期内仍将是我国最为主要的一次能源, 其中燃煤电站用煤是煤炭消费的主体, 约占 64%, 发展燃煤电站 CO_2 减排技术迫在眉睫. 富氧燃烧(又称流化床 O_2/CO_2 燃烧)是通过利用空气分离所获得的 O_2 和部分循环烟气来代替

收稿日期: 2017-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51606104)、江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB470010)、中国博士后科学基金面上项目(2016M591879)、安徽省科技重大专项计划(15cz02045).

通讯联系人: 卜昌盛, 博士, 讲师, 研究方向: 煤燃烧与气化. E-mail: csbu@njnu.edu.cn

空气与燃料组织燃烧,可大幅提高烟气中的 CO_2 浓度,具备低成本、大规模减排 CO_2 的潜力^[1]. 流化床富氧燃烧技术继承了流化床燃烧的技术优势,其相较于煤粉炉富氧燃烧在燃料选择的多样性、操作的灵活性等方面更具优势.

在流化床 O_2/CO_2 燃烧条件下,探明 O_2/CO_2 取代空气后对煤燃烧特性的改变机制,是掌握该技术的首要环节之一. 针对 O_2/CO_2 气氛下煤粉反应动力学, Duan 等^[2]、Naredi 和 Pisupati^[3]、Wang 等^[4] 在热重实验平台上对比研究了 O_2/N_2 与 O_2/CO_2 气氛下多种煤样的燃烧过程,当反应温度较低时($<800\text{ }^\circ\text{C}$), O_2/CO_2 气氛下的 DTG 曲线与 O_2/N_2 气氛下的基本重合;反应温度升高后($>850\text{ }^\circ\text{C}$), O_2/CO_2 气氛下的失重速率显著增加;相较于 O_2/N_2 气氛, O_2/CO_2 气氛下燃烧反应区域向高温区偏移. Liu 等^[5] 采用热重及差示扫描量热法(TG-DSC)细致研究了 O_2/CO_2 与 O_2/N_2 气氛下煤焦反应动力学,结果表明, O_2/CO_2 气氛下 CO_2 与 O_2 竞争煤焦表面的碳反应活性位点,而 O_2/N_2 气氛下 N_2 无化学吸附力,致使 O_2/CO_2 气氛下 O_2 的吸附活性位点数量降低,燃料的燃烧反应性减弱. Scala 和 Chirone^[6-7]、Saucedo 等^[8]、Roy 等^[9] 重点研究了流化床 O_2/CO_2 燃烧条件下的煤焦- CO_2 气化反应特性及其对煤焦燃烧反应的影响,研究指出煤焦- CO_2 反应由化学反应动力学控制,反应速率较低. CO_2 取代 N_2 后,除引发煤焦- CO_2 气化反应外, O_2 在 CO_2 气氛下的扩散速率也明显低于 N_2 气氛. 本文作者前期^[10-14] 在高温可视化流化床试验平台上,细致研究了高 O_2 浓度下 O_2/CO_2 取代 O_2/N_2 对我国典型煤种煤颗粒燃烧特性的影响规律,并建立了颗粒尺度的燃烧模型,定量分析了氧气扩散速率的改变和煤焦- CO_2 气化反应对燃烧特性的影响. 研究发现, CO_2 气氛下较低的 O_2 扩散速率是导致该气氛下燃烧特性(如燃烧速率降低、燃烧温度降低)相对于 O_2/N_2 气氛改变的主要原因.

总体而言,当前有关流化床 O_2/CO_2 燃烧的基础性研究,主要从探究 CO_2 取代 N_2 对煤燃烧特性改变的角度出发,分析改变机制. 然而,前期研究中选取的实验条件与工业流化床的燃烧条件差异较大. 在工业流化床锅炉内煤颗粒周围的 O_2 浓度长时间处于 $3\% \sim 7\%$,煤颗粒粒径为 $1 \sim 10\text{ mm}$,床层温度在 $800 \sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ ^[15]. 为此,本研究将在小型流化床试验台上,通过模拟工业流化床锅炉内煤颗粒的燃烧条件,分析 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下烟煤颗粒的燃烧特性,加深对流化床 O_2/CO_2 燃烧的认知,为流化床 O_2/CO_2 燃烧锅炉的改造、设计及运行提供一定的理论支持.

1 实验系统及工况

燃烧实验在一小型热态流化床试验系统上进行,如图 1 所示. 该系统主要由流化床本体、电加热器、配气装置、温度控制器及数据采集器等组成. 流化床本体为圆柱形石英玻璃,内径为 30 mm ,高 $1\ 250\text{ mm}$,中段布置多孔石英板作为布风板,布风板开孔率为 0.3% ,实测布风板阻力系数为 0.26 . 流化床本体外侧装有电加热元件并具有良好的保温,电加热元件的额定功率为 4 kW . 流化床床温通过一根伸入床层内部的 K 型热电偶测量并通过 PID 自动调节控制. O_2 、 CO_2 和 N_2 气源由相应的钢瓶气供给,经质量流量计计量后进入混气器内,形成模拟的 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛,而后进入流化床本体. 流化床出口烟气经取样后进入 MRU 增强型烟气分析仪,在线检测烟气中 O_2 和 CO 的浓度并自动存储于计算机,烟气分析仪的测量相对误差在 3% 以内.

选用粒径 $100 \sim 200\ \mu\text{m}$ 的石英砂作为床料,静止料层高 50 mm . 实验测量临界流化风速为 0.01 m/s . 燃烧实验的流化风速设定在 2.5 倍临界流化风速,对应于鼓泡流态化. 烟气采样测量时,因烟气在取样测量管内流动会导致测量结果显示延迟. 在本试验系统中,通过空白实验测量得 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下烟气从取样至烟气分析仪测量结果稳定的时间为 24 s (该段时间主要为气体流通时间). 因而,每工况下电脑采集的前 24 s 数据将不用于燃烧特性的分析.

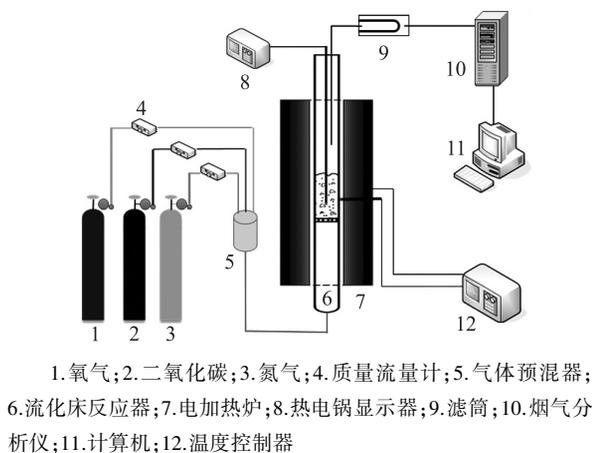


图 1 热态流化床试验系统

Fig. 1 Experimental system of fluidized bed unit

依据我国的煤炭分类标准 GB/T 5751-2009,本研究选取烟煤作为实验原料. 工业分析显示烟煤中挥发分含量为 12.8%_{ad},灰分含量为 38.5%_{ad},水分含量为 1.9%_{ad},固定碳含量为 46.8%_{ad};元素分析显示碳、氮、氢、硫、氧的含量分别为 82.21%_{daf}、1.12%_{daf}、4.31%_{daf}、0.99%_{daf}、11.37%_{daf}.

为模拟工业流化床锅炉内燃料颗粒的燃烧条件,实验所制定的工况列于表 1. 每工况下,当床层达到设定温度并稳定后开始实验. 为保证流化床反应器内(烟煤颗粒周围)相对稳定的温度场和反应气氛,将已称重质量为 m_0 的单个烟煤颗粒加入流化床,同时开启烟气分析仪的采样通道. 每工况至少重复 6 次,以保证数据的可靠性.

表 1 实验工况表
Table 1 Operation conditions

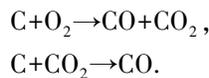
工况	反应气氛	床层温度/℃	氧气浓度/%	颗粒粒径/mm
床层温度的影响	O ₂ /N ₂ 、O ₂ /CO ₂	800、825、850、875、900	6	4
氧气浓度的影响	O ₂ /N ₂ 、O ₂ /CO ₂	850	4、6、8、10	4
颗粒粒径的影响	O ₂ /N ₂ 、O ₂ /CO ₂	850	6	2、4、6、8

2 实验结果及讨论

图 2 显示了 O₂/CO₂ 气氛下,床温 850 ℃,O₂ 浓度为 4%,粒径为 4 mm 的烟煤颗粒燃烧过程中流化床出口 O₂ 及 CO 浓度随时间的变化规律:烟煤颗粒加入流化床后,迅速与床料进行换热,颗粒温度升高,挥发分开始析出、燃烧消耗 O₂,流化床出口 O₂ 浓度迅速降低,烟煤颗粒中 CO 的析出及部分挥发分的不完全燃烧致使出口烟气中 CO 的浓度升高. Stubington 等^[16]实验拟合出流化床燃烧条件下煤颗粒脱挥发分时间 t_{dev} (s) 与颗粒粒径 d_p (mm) 的关系为 $t_{dev} = 1.84d_p^{1.5}$ (该式的预测误差在 30% 以内). 由该式,本工况下 4 mm 烟煤颗粒的脱挥发分时间约为 15 s. 图 2 中虚线即代表煤颗粒脱挥发分结束的时刻(实际煤颗粒脱挥发分和焦炭燃烧并无准确分界,但为研究方便仍采用脱挥发分完成的时刻作为煤焦的起始反应时刻). 煤脱挥发分完成后,颗粒表面的焦炭开始燃烧消耗 O₂,随着反应的进行,烟气中 O₂ 浓度先降低后逐渐升高,CO 浓度先升高后降低;当 O₂ 浓度回升至 4%,CO 浓度降低至 0%时,烟煤颗粒燃烧反应过程结束.

前期实验研究表明,流化床 O₂/CO₂ 与 O₂/N₂ 气氛下的煤颗粒脱挥发分特性并无显著差异^[11]. 本文将着重分析 CO₂ 取代 N₂ 后对烟煤焦炭燃烧特性的影响及影响机制.

焦炭燃烧阶段主要发生如下所示的煤焦-O₂ 燃烧反应和煤焦-CO₂ 气化反应:



依据焦炭燃烧反应过程中的碳、氧平衡关系,建立质量守恒方程:

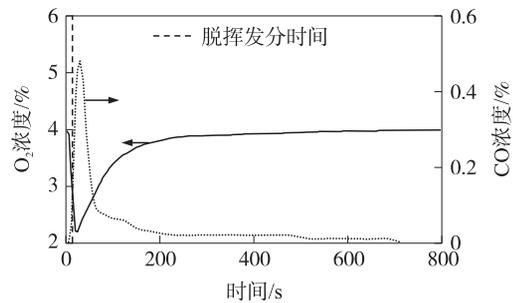
$$\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{in}} + \frac{32}{44} \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{in}} = \dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{out}}(t) + \frac{16}{28} \dot{m}_{\text{CO}}^{\text{out}}(t) + \frac{32}{44} \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{out}}(t), \quad (1)$$

$$\frac{12}{44} \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{in}} + \dot{m}_{\text{C}}^{\text{cons}}(t) = \frac{12}{44} \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{out}}(t) + \frac{12}{28} \dot{m}_{\text{CO}}^{\text{out}}(t). \quad (2)$$

式中, $\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{in}}$ 和 $\dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{in}}$ 分别为流化床入口 O₂ 和 CO₂ 的质量流量(g/s); $\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{out}}(t)$ 、 $\dot{m}_{\text{CO}}^{\text{out}}(t)$ 和 $\dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{out}}(t)$ 分别为出口烟气中 O₂、CO 和 CO₂ 的瞬时质量流量(g/s); $\dot{m}_{\text{C}}^{\text{cons}}(t)$ 为焦炭的瞬时反应速率(g/s).

联立式(1)与式(2),求解焦炭的瞬时反应速率:

$$\dot{m}_{\text{C}}^{\text{cons}}(t) = \frac{12}{32} [\dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{in}} - \dot{m}_{\text{O}_2}^{\text{out}}(t)] + \frac{3}{14} \dot{m}_{\text{CO}}^{\text{out}}(t). \quad (3)$$



O₂/CO₂ 气氛,床温 850 ℃,O₂ 浓度 4%,烟煤颗粒粒径 4 mm

图 2 典型试验条件下流化床出口烟气成分

Fig. 2 A typical example of gas profile in the exit gas

对式(3)在 (t_{dev}, t_{burn}) 时间区域积分, 获得煤中固定碳量 m_c (g):

$$m_c = \int_{t_{dev}}^{t_{burn}} \dot{m}_C^{cons}(t) dt. \quad (4)$$

式中, t_{burn} 为煤颗粒燃尽时间(s).

依据实验煤样的初始质量 m_0 , 计算煤中固定碳的含量为 m_c/m_0 . 经统计分析, 本文在不同燃烧条件下 m_c/m_0 的计算值与工业分析测定的固定碳含量的差异均在 7% 以内, 表明烟气分析仪的测量结果准确可信.

下文将重点探讨不同流化床床层温度、不同 O_2 浓度和不同烟煤颗粒粒径下, O_2/CO_2 气氛下烟煤焦炭的反应速率与 O_2/N_2 气氛的差异, 并分析烟煤焦的燃烧机制. 为便于数据的对比分析, 煤焦反应速率 r 及煤焦炭转化率 x 分别由式(5)和(6)计算:

$$r = -\frac{1}{m_0} \frac{dm_t}{dt} = \frac{1}{m_0} \dot{m}_C^{cons}(t), \quad (5)$$

$$x = \frac{m_0 - m_t}{m_0}. \quad (6)$$

式中, r 为煤焦反应速率; x 为煤焦炭转化率; $\frac{dm_t}{dt}$ 为 t 时刻下煤焦的瞬时反应速率(g/s).

2.1 流化床床层温度的影响

O_2/CO_2 气氛和 O_2/N_2 气氛下, O_2 浓度为 6%, 不同床温下, 粒径为 4 mm 的烟煤焦反应速率随煤焦炭转化率的变化如图 3 所示. 两种气氛不同床层温度下, 焦炭反应速率均随煤焦炭转化率呈下降趋势(图 4 和图 5 显示相同结论). 图 3(a) 显示, 当床层温度由 800 °C 增加至 900 °C, O_2/N_2 气氛下的焦炭燃烧反应速率无明显改变, 表明焦炭的燃烧过程不受燃烧反应动力学控制; 而图 3(b) 显示 O_2/CO_2 气氛下的煤焦反应速率随床温的增加而增加.

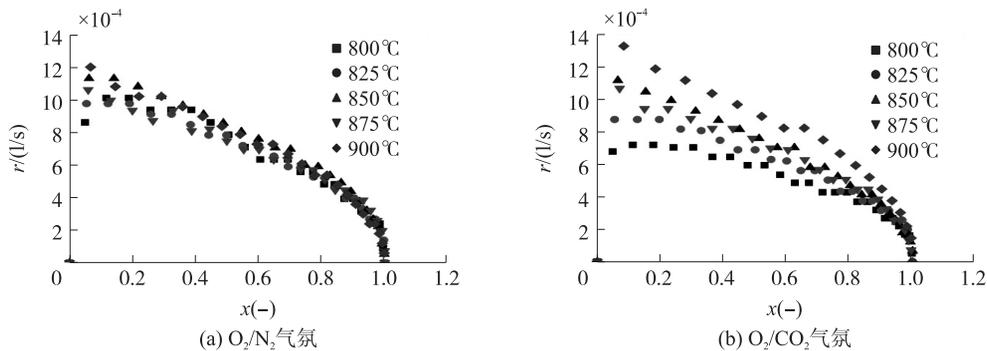


图 3 流化床条件下床层温度对烟煤焦反应速率的影响

Fig. 3 Effect of bed temperature on the reaction rate of bituminous coal char particle

对比图 3(a) 与 (b), 床温 800 °C, O_2/CO_2 气氛下的煤焦反应速率低于 O_2/N_2 气氛; 升高床温至 900 °C 时, O_2/CO_2 气氛下的煤焦反应速率高于 O_2/N_2 气氛. O_2/CO_2 气氛下, 除发生煤焦燃烧反应外, 同时发生煤焦气化反应. 但低床温下煤焦气化反应的速率较低^[13], 如 800 °C 时 O_2/CO_2 气氛下煤焦主要发生燃烧反应, 由于 O_2 在 CO_2 中的扩散速率低于在 N_2 中的扩散速率, 燃烧反应速率相较 O_2/N_2 气氛降低, 同时也表明焦炭燃烧反应速率受 O_2 的扩散控制; 升高床温后, 由于气化反应由反应动力学控制^[17], O_2/CO_2 气氛下的煤焦气化反应速率增加, 提高了煤焦整体的反应速率(燃烧反应加气化反应), 气化反应对煤焦整体反应速率的贡献不可忽略.

2.2 O_2 浓度的影响

图 4 显示了 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下, 床层温度 850 °C, 不同 O_2 浓度下, 4 mm 烟煤焦反应速率随碳转化率的变化规律. 如图 4 所示, 由于焦炭燃烧反应受 O_2 的扩散速率控制, O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下的焦炭反应速率均随着 O_2 浓度的增加而显著增加. 作者前期在流化床试验平台上通过热电偶测量了 O_2/CO_2 气氛 10% O_2 浓度下烟煤颗粒燃烧过程中的颗粒温度变化, 发现颗粒温度接近于床温^[12]. 因而, 本研究

中, O₂/CO₂ 气氛下当 O₂ 浓度由 4% 升高至 10% 时, 颗粒燃烧温度同样会接近于床温 850 ℃, 气化反应的变化基本可以忽略. 因而, 图 4(a) 和(b) 显现出相似的燃烧规律.

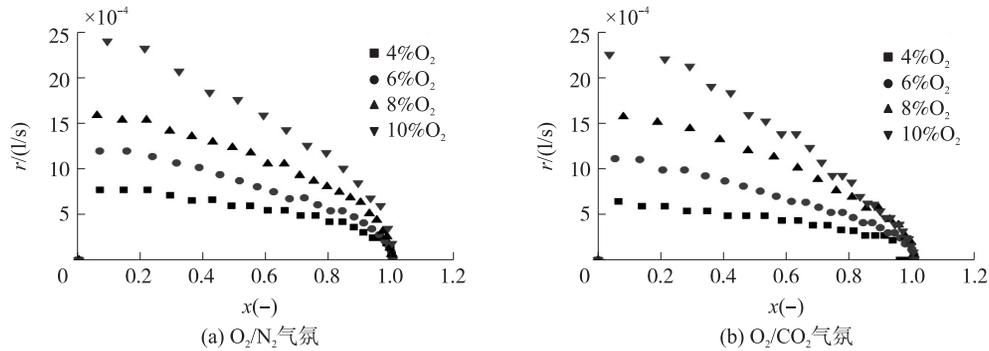


图 4 流化床条件下 O₂ 浓度对烟煤焦反应速率的影响

Fig. 4 Effect of O₂ concentration on the reaction rate of bituminous coal char particle

对比图 4(a) 与(b), 相同 O₂ 浓度下 O₂/CO₂ 气氛下的焦炭反应速率低于 O₂/N₂ 气氛, 且表现出两者差异随 O₂ 浓度的增加而降低的趋势. 此外, 当 O₂/CO₂ 气氛下的 O₂ 浓度高于 O₂/N₂ 气氛时, O₂/CO₂ 气氛下的燃烧反应速率明显高于 O₂/N₂ 气氛 (例如 O₂/CO₂ 气氛 6% O₂ 浓度下的煤焦燃烧速率高于 O₂/N₂ 气氛 4% O₂ 浓度下的煤焦燃烧速率). 这一结论也解释了中试流化床富氧燃烧条件下^[18], 通过适当提高入炉 O₂ 浓度可获得与空气气氛相近的燃料燃烧特性.

2.3 烟煤焦颗粒粒径的影响

O₂ 浓度 6%, 床层温度 850 ℃, O₂/CO₂ 气氛和 O₂/N₂ 气氛下, 不同粒径的烟煤焦反应速率随煤焦炭转化率的变化如图 5 所示. O₂/CO₂ 和 O₂/N₂ 气氛下, 煤焦反应速率随颗粒粒径的增加而降低, 进一步验证了煤焦燃烧反应由 O₂ 的扩散控制. 工业流化床条件下, 适当降低煤颗粒粒径有助于提高 O₂/CO₂ 气氛下煤焦的反应速率.

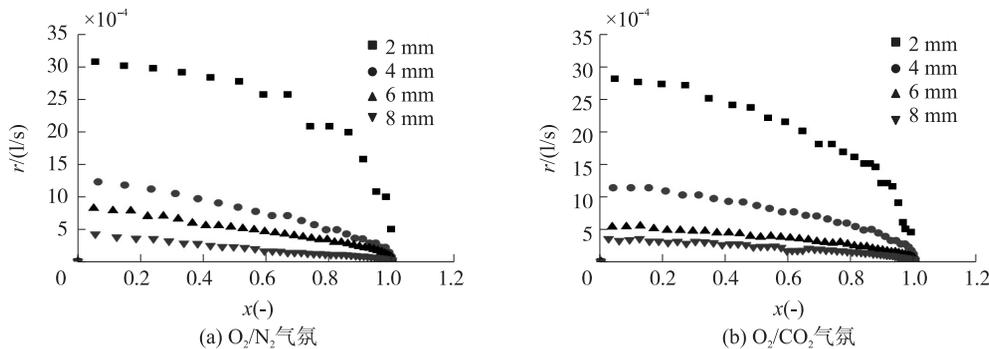


图 5 流化床条件下烟煤粒径对煤焦反应速率的影响

Fig. 5 Effect of the size of bituminous coal particle on its reaction rate

对比图 5(a) 与(b), 对于同一粒径的烟煤焦颗粒, 由于 O₂/CO₂ 气氛下煤焦颗粒周围的 O₂ 扩散速率低于 O₂/N₂ 气氛下的值, 致使 O₂/CO₂ 气氛下的燃烧速率降低.

3 结语

为进一步揭示工业流化床富氧燃烧条件下的烟煤颗粒燃烧特性, 在热态流化床试验台上, 通过在线测量 O₂/CO₂ 气氛与 O₂/N₂ 气氛下单个烟煤颗粒在燃烧过程中流化床出口 O₂ 和 CO 的浓度, 研究分析了流化床床层温度 (800~900 ℃)、O₂ 浓度 (4%~10%) 和烟煤颗粒的粒径 (2~8 mm) 对煤焦反应速率的影响规律及燃烧机制. 研究表明:

(1) 煤焦燃烧反应由 O₂ 扩散控制, 气化反应由反应动力学控制. O₂/CO₂ 气氛下煤焦的反应速率随流化床床温的增加而增加, 而 O₂/N₂ 气氛下的煤焦反应速率不随床温发生改变. 低流化床床温下 (800 ℃), 由于 O₂/CO₂ 气氛下的 O₂ 扩散速率低于 O₂/N₂ 气氛, 煤焦反应速率低于 O₂/N₂ 气氛; 随流化床床温的升

高, O_2/CO_2 气氛下煤焦气化反应速率显著增加, 高床温下 (900 °C) 煤焦反应速率高于 O_2/N_2 气氛, 气化反应对煤焦反应速率的影响不可忽略。

(2) O_2/CO_2 气氛与 O_2/N_2 气氛下煤焦反应速率随 O_2 浓度的增加和颗粒粒径的降低而增加。 O_2/CO_2 气氛下, 适当提高 O_2 浓度和降低煤焦的颗粒粒径是提高煤焦反应速率有效方式。

[参考文献] (References)

- [1] MATHEKGA H I, OBOIRIEN B O, NORTH B C. A review of oxy-fuel combustion in fluidized bed reactors[J]. *Int J of Energy Res*, 2016, 40: 878–902.
- [2] DUAN L B, ZHAO C S, ZHOU W, et al. Investigation on coal pyrolysis in CO_2 atmosphere[J]. *Energy fuels*, 2009, 23: 3 826–3 830.
- [3] NAREDI P, PISUPATI S. Effect of CO_2 during coal pyrolysis and char burnout in oxy-coal combustion[J]. *Energy fuels*, 2011, 25: 2 452–2 459.
- [4] WANG C, ZHANG X, LIU Y, et al. Pyrolysis and combustion characteristics of coals in oxyfuel combustion[J]. *Appl Energy*, 2012, 97: 264–273.
- [5] LIU Y, FU P, ZHANG B, et al. Study on the surface active reactivity of coal char conversion in O_2/CO_2 and O_2/N_2 atmospheres[J]. *Fuel*, 2016, 181: 1 244–1 256.
- [6] SCALA F, CHIRONE R. Combustion of single coal char particles under fluidized bed oxyfiring conditions[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49: 11 029–11 036.
- [7] SCALA F, CHIRONE R. Fluidized bed combustion of single coal char particles at high CO_2 concentration[J]. *Chem Eng J*, 2010, 165: 902–906.
- [8] SAUCEDO M A, BUTEL M, SCOTT S A, et al. Significance of gasification during oxy-fuel combustion of a lignite char in a fluidised bed using a fast UEGO sensor[J]. *Fuel*, 2015, 144: 423–438.
- [9] ROY B, BHATTACHARYA S. Combustion of single char particles from Victorian brown coal under oxy-fuel fluidized bed conditions[J]. *Fuel*, 2016, 165: 477–483.
- [10] BU C, LIU D, CHEN X, et al. Ignition behavior of single coal particle in a fluidized bed under O_2/CO_2 and O_2/N_2 atmospheres: a combination of visual image and particle temperature[J]. *Appl Energy*, 2014, 115: 301–308.
- [11] BU C, LECKNER B, CHEN X, et al. Devolatilization of a single fuel particle in a fluidized bed under oxy-combustion conditions. Part A: Experimental results[J]. *Combust flame*, 2015, 162: 797–808.
- [12] BU C, PALLARÈS D, CHEN X, et al. Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: char combustion characteristics, an experimental study[J]. *Chem Eng J*, 2016, 287: 649–656.
- [13] BU C, GÓMEZ B A, CHEN X, et al. Effect of CO_2 on oxy-fuel combustion of coal-char particles in a fluidized bed: modeling and comparison with the conventional mode of combustion[J]. *Appl Energy*, 2016, 177: 247–259.
- [14] 卜昌盛, 庄亚明, 刘道银, 等. 单颗粒流化床富氧燃烧特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36: 1 143–1 147.
BU C S, ZHUANG Y M, LIU D Y, et al. Fluidized bed combustion of a single coal particle in oxy-fuel environments[J]. *J Eng Thermophys*, 2015, 36: 1 143–1 147. (in Chinese)
- [15] LECKNER B. Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation[J]. *Prog Energy Combust Sci*, 1998, 24: 31–61.
- [16] STUBINGTON J F, NG K W K, MOSS B, et al. Comparison of experimental methods for determining coal particle devolatilization times under fluidized bed combustor conditions[J]. *Fuel*, 1997, 76(3): 233–240.
- [17] NILSSON S, GÓMEZ B A, CANO D F. Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in a fluidized bed[J]. *Fuel*, 2012, 92(1): 346–353.
- [18] DUAN L, SUN H, ZHAO C, et al. Coal combustion characteristics on an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor with warm flue gas recycle[J]. *Fuel*, 2014, 127: 47–51.

[责任编辑: 严海琳]