

煤层气与煤矸石在循环流化床内混烧 影响因素的试验研究

陈艳容¹, 张 力¹, 冉景煜¹, 樊 湖²

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆西水水电开发有限公司, 重庆 409809)

摘 要: 针对影响煤层气与煤矸石循环流化床内混合高效燃烧关键因素(混烧比 R 、二次风率 r_2 、过量空气系数 α)进行试验, 研究这3种运行参数对炉内温度场以及燃烧效率的影响。试验结果表明: 与纯烧煤矸石相比, 采用煤层气/煤矸石混烧可使炉内温度场分布更加均匀, 提高燃烧效率。当混烧比 $R=0.2$ 时, 炉内温度场比较均匀, 燃烧效率相对较高; 随着 r_2 的增加, 燃烧效率先升高后降低; 随着过量空气系数 α 增大, 炉膛密、稀相区的温度均降低, 燃烧效率先升高后降低。在本试验条件下, $R=0.2$, $r_2=0.3$, $\alpha=1.3$ 综合燃烧效果较好。

关键词: 煤层气; 煤矸石; 循环流化床; 混烧; 温度场分布; 燃烧效率

中图分类号: TD849.5

文献标识码: A

Experiment key factors of coal-bed gas and coal gangue co-combustion in circulating fluidized bed

CHEN Yan-rong¹, ZHANG Li¹, RAN Jing-yu¹, FAN Hu²

(1. School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Youshui Hydropower Exploiture of Chongqing Co., Ltd., Chongqing 409809, China)

Abstract: The co-combustion test of coal-bed gas and coal gangue were performed in circulating fluidized bed (CFB), the studies about bed temperature field and combustion efficiency were done when the test parameters including the gas/gangue mixing ratios (R), second air rate (r_2) and excess air coefficient (α) were different. The results show that the co-combustion has an important effect on the combustion optimization, compared with combustion of coal gangue only, the distribution of bed temperature becomes well-proportioned and the combustion efficiency increases when the coal-bed gas has been mixed. The combustion efficiency is higher when the gas/gangue mixing ratios is 0.2. The second air rate and the excess air coefficient have different effect on temperature in dense bed and dilute phase region, but both parameters have an optimum value corresponding to the highest combustion efficiency. With the increase of the second air rate, the combustion efficiency increases firstly and then reduces. With the increase of excess air coefficient, the temperature in dense bed and dilute phase region fall, the combustion efficiency increases firstly and then reduces. The integrated combustion effect is more preferable when $R=0.2$, $r_2=0.3$ and $\alpha=1.3$.

Key words: coal-bed gas; coal gangue; circulating fluidized bed (CFB); co-combustion; distribution of bed temperature; combustion efficiency

煤层气和煤矸石是煤炭开采过程中的废弃物, 这些废弃物的大量排放既污染环境, 又造成了资源的浪

费。目前针对煤矸石和洗煤泥或生物质在循环流化床中的混烧等的研究较多^[1-6], 对煤矸石与煤层气在循环流化床 (CFB) 中的混合燃烧的研究则少见报道。煤矸石具有挥发分低、高灰分、难着火的特点^[7-9], 采用煤层气和煤矸石循环流化床混烧的方式, 炉膛密相区的高温床粒, 使煤层气喷入后可及时着火; 同时煤层气燃烧形成的高温火焰提高了炉膛温度, 可强化劣质燃料的燃烧, 提高燃烧效率及燃烧稳定性。在混烧中, 由于煤层气燃烧速度快, 消耗大量氧气, 而煤矸石难着火, 煤层气送入循环流化床燃烧, 可能会和煤矸石抢风, 使煤矸石燃烧不完全, 而合理的煤层气/煤矸石混烧比, 一、二次风配比等对实现其优化燃烧具有关键作用^[10-12]。

为完善这一技术, 本文在数值研究的基础上^[13-14], 对影响循环流化床内煤层气与煤矸石混合高效燃烧关键因素包括混烧比 R 、二次风率 r_2 、过量空气系数 α 进行了试验研究, 以实现煤层气和煤矸石合理的综合利用。试验采用的煤矸石是重庆中梁山煤矸石, 其工业分析 M_{ar} , A_{ar} , V_{ar} , FC 和 Q_{ne} 分别为 13.04%, 57.97%, 15.18%, 25.55% 和 11.76 MJ/kg。试验中采用的煤层气用甲烷和氮气按体积比 3:7 的比例混合而成, 其低位热值 11.4 MJ/m³。其中混烧比 R 为煤层气与煤矸石的发热量之比。

1 试验系统与试验方法

试验设备包括 50 kg/h 循环流化床试验装置、煤层气供气系统、烟气分析检测设备以及相应的附属设备和管路。密相区截面积为 150 mm × 230 mm, 高度 700 mm; 稀相区截面积为 200 mm × 280 mm, 高度 2 200 mm; 布风板面积为 140 mm × 220 mm, 设计流速 35 m/s。煤层气燃烧器布置在两层二次风之间, 如图 1 所示。试验过程中, 使用沿炉高和烟道布置的 K 型热电偶以及与之配套的巡检仪测定炉膛各断面温度; 使用 Lancom SeriesII 便携式烟气分析仪测定尾部烟气成分。试验中, 煤层气与煤矸石的混烧比 R 分别取 0, 0.1, 0.2, 0.3。 $R=0$ 表示纯烧煤矸石。

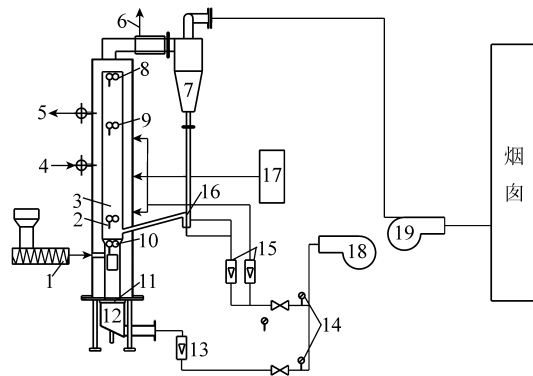


图 1 混烧试验装置

Fig. 1 The sketch map of co-combustion tester

- 1——旋给料机；2——密相区；3——炉膛；4——循环进水；5——循环出水；6——冷却水套；7——旋风分离器；8——排烟温度测点；9——稀相区；10——床层温度测点；11——布风板；12——风室；13, 15——转子流量计；14——压力表；16——“L”型阀；17——煤层气供气系统；18——送风机；19——引风机

2 试验结果及分析

2.1 混烧比对炉内温度场及燃烧效率的影响

图 2 为 $\alpha=1.3$, $r_2=0.3$ 的条件下, 不同混烧比 R 对温度场影响的试验结果。由图 2 可看出, 当 $R=0$, 即纯烧煤矸石时, 密、稀相区温差最大; $R=0.2$ 时, 密、稀相区温差较小, 炉内温度场较为均匀。因为纯烧煤矸石时, 由于其低热值、高灰分的特点, 其燃烧份额分布、燃烧组织都不理想。通入煤层气燃烧后, 煤层气燃烧形成的高温火焰提高了炉膛温度, 有助于未燃尽煤矸石颗粒的燃烧, 同时气流速度增大, 增强了炉内的搅动和热质传递, 温度分布趋于均匀。但煤层气的通入量过大时, 炉膛稀相区的气流量增加, 气体流速增大, 固体颗粒浓度降低, 稀相区的燃烧份额减少, 同时由于带入大量低温气体, 烟气量也会增大, 其燃烧放热的效果就会减弱, 炉膛上部的温度增幅不大。

表 1 为 $\alpha=1.3$, $r_2=0.3$ 时, 不同混烧比对燃烧效率、飞灰含碳量和出口 CO 浓度影响的试验结果。从表 1 看出, $R=0.2$ 的飞灰含碳量和排放 CO 浓度较低, 燃烧效率比较高。这是因为 $R=0.2$ 的炉内温度场比较均匀, 燃烧强度和份额比较理想。 $R=0.3$ 时, 炉膛稀相区的气体流速增大较多, 固体颗粒浓度降低, 有研究表明^[15], 传热系数与截面平均颗粒浓度的 0.5 次方成正比, 颗粒浓度越低, 传热系数越小,

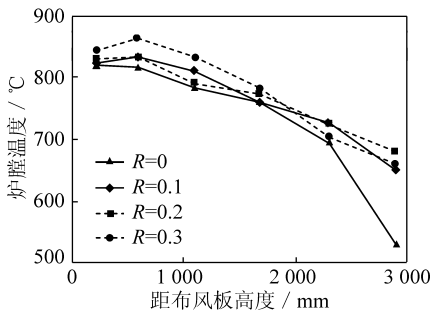


图 2 混烧比对温度场的影响

Fig. 2 The influence of different gas/gangue mixing ratios on the distribution of bed temperature

表 1 不同混烧比下的燃烧效率、飞灰含碳量、排放 CO 浓度
Table 1 The value of the combustion efficiency, carbon quality of the ejection ash and consistency of the ejection CO at different gas/gangue mixing ratios

混烧比	燃烧效率/%	飞灰含碳量/%	排放 CO 浓度/ 10^{-6}
0	89.8	25.7	125
0.1	91.9	21.5	120
0.2	93.0	13.0	86
0.3	92.0	17.2	106

因此炉膛稀相区传热系数降低, 烟焓高, 烟气量大, 过量的热量带到尾部, 排烟温度升高, 热效率降低.

2.2 二次风率对炉内温度场及燃烧效率的影响

图 3 为 $\alpha = 1.3$, $R = 0.2$ 时, 二次风率 r_2 对温度场影响的试验结果. 由图 3 可以看出, r_2 减小时, 密相区温度降低, 密相区与稀相区温差减小, 温度更趋于均匀. r_2 对燃烧的影响有 2 个方面: 在总风量保持不变的情况下, r_2 减小则一次风量增加, 一方面密相区氧浓度增高, 燃烧气氛由还原态向氧化态转移, 燃料放热量增大; 另一方面, 密相区流化速度增大, 使更多的燃料颗粒进入稀相区, 密相区燃烧份额减小, 稀相区燃烧份额增大, 密、稀相区温度更趋于均匀. 由于实验所用的煤矸石平均粒径较小, 挥发分较少, 第 2 个方面对燃烧的影响更明显. 因此, 降低 r_2 , 使得一次风速提高, 更多的细颗粒煤矸石进入稀相区, 降低了密相区的燃烧强度, 密相区温度降低, 而稀相区燃烧份额增加较多, 稀相区温度升高.

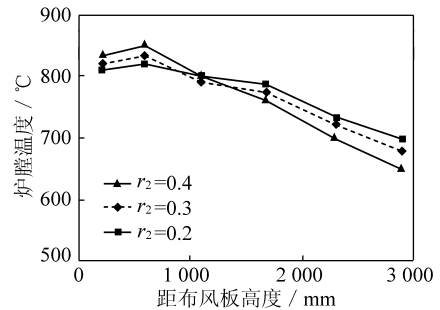
图 3 $R = 0.2$ 时, 二次风率对温度场的影响Fig. 3 The influence of second air rate on the distribution of bed temperature when $R = 0.2$

图 4 为二次风率 r_2 对燃烧效率、飞灰含碳量、排放 CO 浓度影响的试验结果. 由图 4 可以看出, 在总风量不变的情况下, 随 r_2 增大, 对于不同混烧比, 燃烧效率先升高后降低, 飞灰含碳量逐渐减小, 炉膛出口 CO 浓度先减少后增大, 且在 $r_2 > 0.3$ 时, 出口 CO 浓度上升得比较快, 燃烧效率降低. $R = 0.2$ 时, 飞灰含碳量和排放 CO 浓度低于其他工况, 燃烧效率较高.

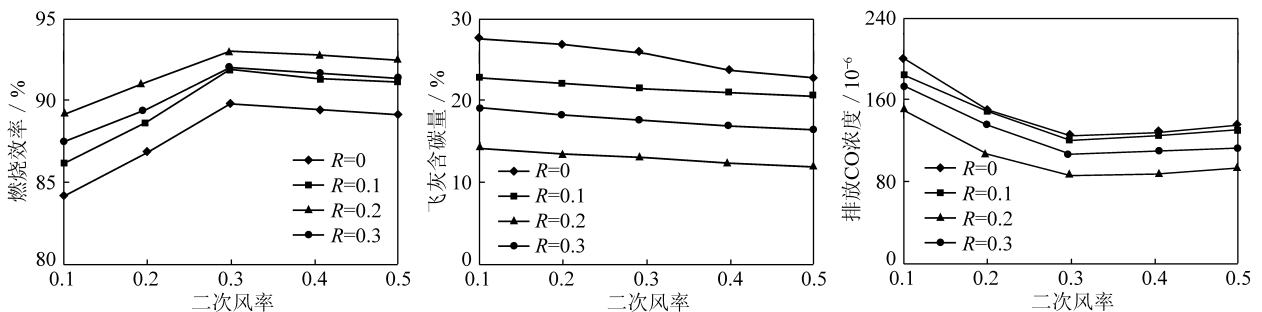


图 4 二次风率对燃烧效率、飞灰含碳量、排放 CO 浓度的影响

Fig. 4 The influence of second air rate on the combustion efficiency, the carbon quality of the ejection ash and the ejection CO

当二次风率较小时, 由于一次风量所占比重较大, 炉内上升气流速度增大, 更多的细颗粒和 CO 被带到稀相区, 但又来不及燃烧, 所以飞灰含碳量和 CO 排放浓度较高. 在过量空气系数不变时, 随着二次风

率增大, 一次风量逐渐变少, 流化风速变小, 被带到稀相区的细颗粒和 CO 份额减少, 且在炉内的停留时间增加, 由于二次风量增大, 颗粒能在稀相区更“富氧”的气氛下燃烧, 同时煤层气的通入对稀相区的燃烧也有促进作用, 因此飞灰含碳量和出口 CO 浓度降低较快. 当二次风率大于 0.3 时, 二次风口以下的炉膛密相区氧浓度下降较多, 还原性氛围增强, CO 的生成浓度增加, 二次风量的大幅增加使得大量温度相对较低的空气进入炉膛, 炉膛密相区温度降低, 助燃效果降低, 造成了出口 CO 浓度升高. 当二次风率增大到一定程度时, 飞灰含碳量减少的幅度趋缓, 而 CO 排放浓度有明显的增加, 受两者同时作用, 燃烧效率先升高后降低, $r_2 = 0.3$ 时, 燃烧效率较高.

2.3 过量空气系数对炉内温度场及燃烧效率的影响

由图 5 可以看出, 随着过量空气系数的增大, 炉膛密、稀相区的温度均降低. 随着过量空气系数增大, 炉膛内流化速度增大, 在炉内颗粒浓度相同的情况下, 物料循环量增大, 烟气速度增加, 烟气与受热面间的传热系数增大, 受热面吸热量增多, 炉内温度降低, 且由于通入煤层气时带入大量冷气体, 稀相区温度降低较明显; 过量空气系数增大, 炉膛出口热损失增大也会导致炉内温度降低.

图 6 为不同过量空气系数对燃烧效率、飞灰含碳量和出口 CO 浓度影响的试验结果. 由图 6 可以看出, 随过量空气系数增大, 燃烧效率先增大后降低, 排放 CO 浓度降低, 飞灰含碳量先降低后增大. 过量空气系数增大, 炉内处于“富氧”气氛, 可降低 CO 的生成及促进 CO 的燃烧, 因此出口排放 CO 浓度降低.

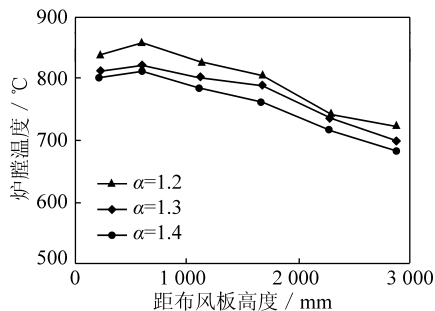


图 5 $R = 0.2$ 时, 过量空气系数对温度场的影响

Fig. 5 The influence of excess air coefficient on the distribution of bed temperature when $R = 0.2$

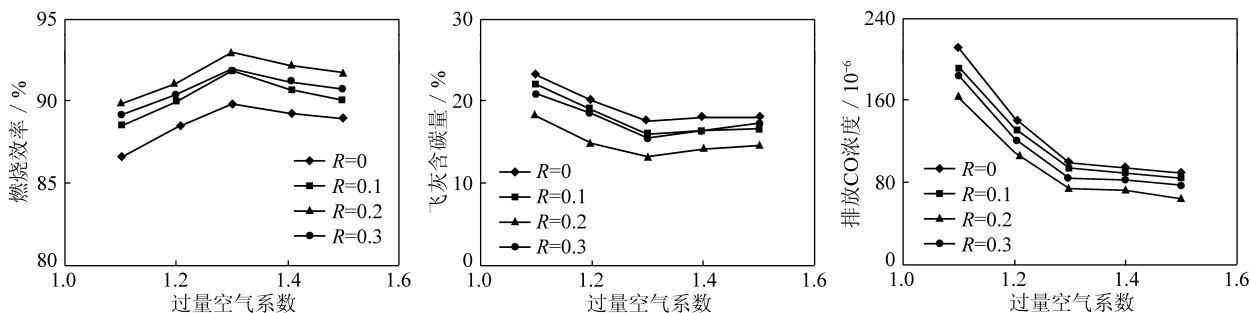


图 6 过量空气系数对燃烧效率、飞灰含碳量、排放 CO 浓度的影响

Fig. 6 The influence of excess air coefficient on the combustion efficiency, carbon quality of the ejection ash, the ejection CO

由于煤矸石低挥发分和难燃尽的特性, 过量空气系数增大, 则炉内氧浓度提高, 有利于煤矸石颗粒快速燃烧, 降低飞灰含碳量, 当过量空气系数增大到一定程度, 煤矸石颗粒在炉内的停留时间缩短, 炉内温度降低, 对着火燃烧不利, 飞灰含碳量的损失增加. 受飞灰含碳量和排放 CO 浓度的同时影响, 燃烧效率先增加后降低, 当过量空气系数等于 1.3 时, 燃烧效率较高.

3 结 论

- (1) 与纯烧煤矸石相比, 采用煤层气/煤矸石混烧技术可使炉内温度场分布更均匀, 提高燃烧效率.
- (2) 不同混烧比 R 对炉内温度场、燃烧效率的影响较大. 当 $R = 0.2$ 时, 密、稀相区温差小于其他工况, 炉内温度场比较均匀, 飞灰含碳量和排放 CO 浓度较低.
- (3) 二次风率 r_2 降低, 密相区温度降低, 密、稀相区温差减小; 随 r_2 增大, 飞灰含碳量降低, 燃烧效率和炉膛出口 CO 浓度先降低后升高. 当 $r_2 > 0.3$, CO 排放浓度开始明显升高.

(4) 过量空气系数 α 增大, 炉膛密、稀相区的温度均降低, 燃烧效率先升高后降低, 出口 CO 浓度降低, 飞灰含碳量先降低后升高. 当 $\alpha > 1.3$ 时, 炉膛出口热损失增大, 燃烧效率降低.

(5) 在本试验工况中, $R = 0.2$, $r_2 = 0.3$, $\alpha = 1.3$ 的综合燃烧效果较好, 为合理的运行工况.

参考文献:

- [1] Nevalainen H, Jegoroff M, Antti T, et al. Firing of coal and biomass and their mixtures in 50 kW and 12 MW circulating fluidized beds-phenomenon study and comparison of scales [J]. Fuel, 2007, 86 (1): 2 043 - 2 051.
- [2] Manon Van de Velden, Jan Baeyens, Bill Dougan, et al. Investigation of operational parameters for an industrial CFB combustor of coal, biomass and sludge [J]. China Particuology, 2007, 5 (4): 247 - 254.
- [3] Shin D, Jang S, Wang J H. Combustion characteristics of paper mill sludge in a lab-scale combustor with internally cycloned circulating fluidized bed [J]. Waste Management, 2005, 25 (7): 680 - 685.
- [4] Suksankraisorn K, Patumsawad S, Vallikul P, et al. Co-combustion of municipal solid waste and thai lignite in a fluidized bed [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45 (6): 947 - 962.
- [5] Fang M, Yang L, Chen G, et al. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85 (11): 1 273 - 1 282.
- [6] 殷庆勇, 于海, 蔡祥义, 等. 煤泥、煤矸石混烧循环流化床锅炉的特点分析 [J]. 锅炉技术, 2005, 36 (6): 18 - 20.
Yin Qingyong, Yu Hai, Cai Xiangyi, et al. Characteristic analyses of the combined firing mud coal and gangue circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Technology, 2005, 36 (6): 18 - 20.
- [7] 冉景煜, 牛奔, 张力, 等. 煤矸石热解特性及热解机理热重法研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (5): 640 - 643.
Ran Jingyu, Niu Ben, Zhang Li, et al. Thermogravimetric study on pyrolysis performance and mechanism of coal residue [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (5): 640 - 643.
- [8] Tomeczek J, Palugniok H. Kinetics of mineral matter transformation during coal combustion [J]. Fuel, 2002, 81 (10): 1 251 - 1 258.
- [9] Arenillas A, Rubiera F, Pis J J, et al. Thermal behaviour during the pyrolysis of low rank perhydrous coals [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 68 - 69 (8): 371 - 385.
- [10] 宋新南, 李伟. 多燃料混合燃烧的燃烧学参数计算方法 [J]. 工业炉, 2000, 22 (3): 49 - 52.
Song Xinnan, Li Wei. A calculation method on combustion references for multi-fuel mix-combustion [J]. Industrial Furnace, 2000, 22 (3): 49 - 52.
- [11] 柴沁虎, 丁艳军, 张德华, 等. 掺烧火炬气的燃煤锅炉热力特性研究 [J]. 中国电力, 2003, 36 (4): 17 - 20.
Chai Qinhu, Ding Yanjun, Zhang Dehua, et al. Testing and study of thermo-dynamic performance of coal-fired boiler with flare gas blended [J]. Electric Power, 2003, 36 (4): 17 - 20.
- [12] Priyanka Kaushal, Tobias Proll, Hermann Hofbauer. Model development and validation: co-combustion of residual char, gases and volatile fuels in the fast fluidized combustion chamber of a dual fluidized bed biomass gasifier [J]. Fuel, 2007, 86 (17): 2 687 - 2 695.
- [13] Assari M R, Basirat Tabrizi H, Saffar-Avval M. Numerical simulation of fluid bed drying based on two-fluid model and experimental validation [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (2): 422 - 429.
- [14] 周建军, 王炯, 冉景煜, 等. 在 CFB 锅炉中煤粉不同喷入位置对炉内固相运动特性的影响 [J]. 动力工程, 2007, 27 (5): 672 - 676.
Zhou Jianjun, Wang Jiong, Ran Jingyu, et al. Effects of different pulverized coal spouting position on the solid-phase flow characteristics of CFB boilers with complex combustion [J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27 (5): 672 - 676.
- [15] 路春美, 程世庆, 王永征, 等. 循环流化床锅炉设备与运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 59 - 61.
Lu Chunmei, Cheng Shiqing, Wang Yongzheng, et al. The equipment and operation of circulating fluidized bed [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 59 - 61.