

燃煤的一次破碎、成灰和燃烬特性实验研究

杨 朦, 马素霞

(太原理工大学 热能与动力工程系, 山西 太原 030024)

摘要: 煤的一次破碎、成灰和燃烬特性对循环流化床的物料平衡和燃烧有着重要的影响。本研究通过实验, 研究了内蒙褐煤、平朔混煤、朔州贫煤和郑州烟煤的一次破碎、成灰和燃烬特性, 给出了各煤种破碎前后、成灰后的颗粒粒度分布和燃烬曲线。计算了各煤质的粒度变化率, 得到了能够满足工业预测的煤颗粒一次破碎后的平均粒径的关联式。实验结果显示, 不同煤种的一次破碎、成灰和燃烬特性差别较大。挥发分高、灰分低和固定碳含量高的煤种的一次破碎程度高; 给煤中粗颗粒质量份额越多, 一次破碎程度越高, 粒度分布率越小; 挥发分较大的煤质, 其成灰中的细灰质量份额较大; 内蒙褐煤的燃烧速率最大, 燃烬时间较短, 约为 30 min; 郑州烟煤的燃烬时间约 25 min; 平朔混煤和朔州贫煤的燃烬时间约为 45 min。

关键词: 一次破碎; 成灰特性; 燃烬时间; 平均粒径

中图分类号: TQ533.2 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.02.013

引 言

物料平衡是循环流化床锅炉设计和运行中需要考虑的重要方面。给煤的一次破碎、成灰和燃烬特性对循环流化床内的物料平衡有着极其重要的影响。给煤颗粒进入炉膛后, 经历了一系列的粒径变化, 从热解时的一次破碎、燃烧中的二次破碎、焦炭燃烬到磨耗成灰, 煤灰粒径不断减小, 形成了具有一定粒度分布的循环灰、飞灰和渣灰, 并最终以飞灰和渣灰的形式排出炉膛, 构成循环流化床的“一进二出”灰平衡系统。燃煤一次破碎特性给出煤粒热解后焦炭颗粒的粒度分布, 其决定了沿炉膛高度的燃烧份额分布。燃煤成灰特性是指煤粒燃烧完并经过磨耗后形成的灰粒度分布, 其决定了循环流化床的灰平衡。煤粒燃烬特性是指煤的燃烬时间。不同煤质、不同粒径的煤颗粒的一次破碎特性、成灰特性和燃烬特性不同。

国内外已有不少学者分别对煤的一次破碎特

性、成灰特性和燃烬特性进行了广泛的研究, 主要有燃烧过程中一次破碎特性的影响因素分析^[1], 以及不同煤种在不同工况下的热破碎特性^[2]; 清华大学对燃煤成灰特性进行了各种实验研究^[3-5]; 文献[6]分析了粒径对无烟煤颗粒在循环流化床锅炉中燃烬特性的影响。

本实验研究了内蒙褐煤、平朔混煤、朔州贫煤和郑州烟煤的一次破碎、成灰和燃烬特性, 为循环流化床锅炉的物料浓度优化和燃烧份额优化提供所需的燃煤特征数据。当然, 还会对其它煤质进行研究, 建立多煤质或全煤质特性数据库。

1 实验煤质分析

实验煤质为内蒙褐煤、平朔混煤、朔州贫煤和郑州烟煤, 其工业分析见表1, 表中NMH为内蒙褐煤, PSH为平朔混煤, SZP为朔州贫煤, ZZY为郑州烟煤。实验前采用烘箱去除内在水分, 保持煤样干燥。

表1 实验煤样的工业分析(%)

Tab. 1 Proximate analysis of coals (%)

煤样	M	V	A	FC
NMH	39.14	24.66	8.00	28.2
PSH	9.52	20.81	45.88	23.79
SZP	7.49	8.15	41.60	42.76
ZZY	5.58	19.62	60.08	14.72

2 燃煤一次破碎特性

2.1 实验装置

实验设备包括管式炉和振筛机实验台。管式炉实验台结构见图1。该实验台的主体反应器为内径

收稿日期: 2014-12-25; 修订日期: 2015-07-01

作者简介: 杨 朦(1989-), 女, 湖北武汉人, 太原理工大学硕士研究生。

18 mm 的陶瓷管,由其周围的硅碳棒进行加热,反应器的温度由可控硅控制。

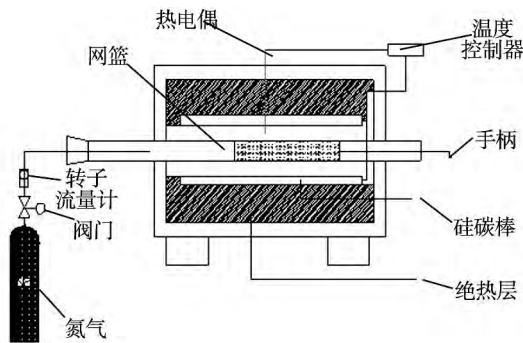


图 1 一次破碎测试装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 实验过程

取一定质量的煤样,在振筛机中进行筛分,按粒径大小分成 7 档(0-500、500-1 000、1 000-2 000、2 000-3 200、3 200-6 000、6 000-8 000 和 >8 000 μm)。将管式炉加热到 850 ℃,并保持不变,然后从管式炉的一端通入氮气。在坩埚中装入约 20 g 的某一档煤样,5 min 后取出,并快速将坩埚放入隔绝空气的条件下,直到彻底冷却。重复上述过程 7 次,然后将所有冷却后的该档煤样放入振筛机中进行筛分,按照粒径大小筛分成 14 档(0-30、30-60、60-100、100-150、150-200、200-300、300-400、400-500、500-1 000、1 000-2 000、2 000-3 200、3 200-6 000、6 000-8 000 和 >8 000 μm),用电子天平称量并记录每一档质量。分别对每一档粒径的给煤进行上述操作。

2.3 实验结果与分析

2.3.1 一次破碎特性

不同煤质的 7 档煤粒一次破碎之后总的焦炭颗粒粒径的分布如图 2 和图 3 所示。

2.3.2 粒度分布率

粒度变化率描述煤质的破碎特性^[7]。F_d 为颗粒破碎后的平均粒径 d_{out} 与破碎前的平均粒径 d_{in} 的比值,即

$$F_d = d_{out}/d_{in} = \frac{1}{d_{in}} \left(\sum_{i=1}^n x_i d_i \right) \quad (1)$$

式(1)中 x_i 为一次破碎后焦炭第 i 档颗粒的质

量份额; d_i 为一次破碎后焦炭第 i 档颗粒的平均直径。

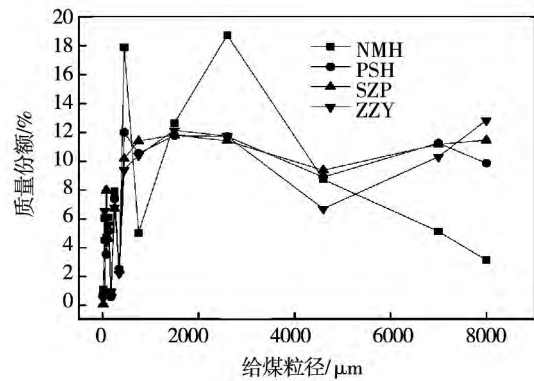


图 2 一次破碎后颗粒质量份额分布
Fig.2 Particle mass fraction distribution after the primary fragmentation

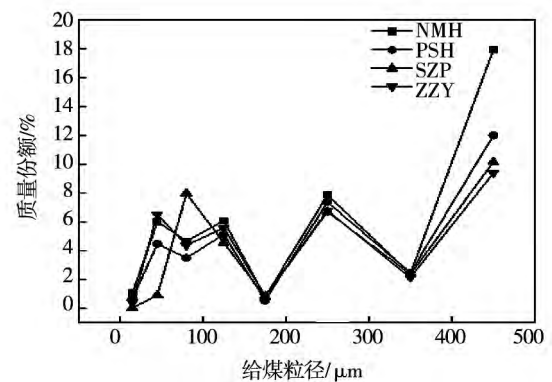


图 3 一次破碎后 0-500 μm 细颗粒质量份额分布

Fig.3 Particle mass fraction distribution of 0-500 μm particle size after the primary fragmentation

粒度变化率越小表明颗粒的破碎程度越大。由图 4 可知,一次破碎程度由大到小排序为:内蒙褐煤 > 朔州贫煤 > 郑州烟煤 > 平朔混煤。这是由于内蒙褐煤的挥发分含量最高,灰分含量最低。挥发分在析出的过程中,使得内蒙褐煤颗粒内部积聚的压力最大,而灰分低,使得颗粒各部分之间的黏结力最小,颗粒更容易破碎,因此其破碎最严重。其次为朔州贫煤,其挥发分含量最低,灰分含量偏高,但是其固定碳含量最高。随着固定碳含量增加,颗粒内部裂隙增多,颗粒的不均匀性增强,使得颗粒容易破

碎 因此朔州贫煤破碎程度大。郑州烟煤破碎程度低主要是由于其有最高的灰分含量和最低的固定碳含量。综上所述,破碎程度随着挥发分含量的增加、灰分含量的减少和固定碳含量的增加而变得剧烈。

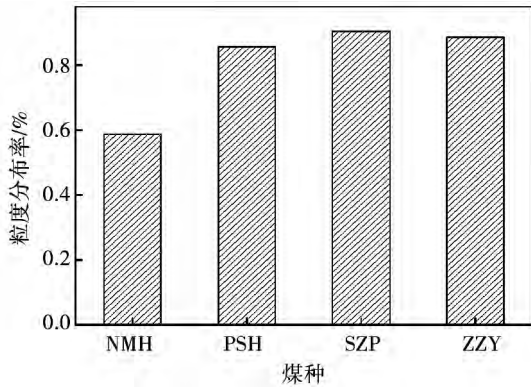


图 4 粒度变化率分布

Fig. 4 Distribution of particle size changing ratio

2.3.3 给煤粒度分布对一次破碎特性的影响

改变褐煤给煤粒度分布,变化情况如表 2 所示。分析不同给煤粒度分布对一次破碎特性的影响。

表 2 不同给煤粒度分布

Tab. 2 Distributions of different initial coal particle sizes

粒径范围/ μm	原始数据	方案 1	方案 2
0 - 500	30.12	+10	-10
500 - 1 000	13.91	+10	-10
1 000 - 2 000	11.97	-4	+4
2 000 - 3 200	10.49	-4	+4
3 200 - 6 000	7.82	-4	+4
6 000 - 8 000	10.96	-4	+4
> 8 000	14.96	-4	+4

由图 5 和图 6 可见,对于给煤平均粒径较小的方案 1,其粒度变化率为 0.595 8,给煤平均粒径较大的方案 2,其粒度变化率为 0.582 8。由此可知,给煤平均粒径越大,一次破碎程度越剧烈。

这是因为随着粒径的增大,热解引起的温度梯度和颗粒内部的温度不均匀性更加突出。虽然挥发分析出的阻力增加^[8],但是粒径增大,结构上的不均匀性越明显^[9],内部裂隙增加,因此破碎程度越强,产生的碎片越多。反之,颗粒越小,破碎程度越弱。颗粒中热量迅速传播,温差小并且作用时间短,

热应力小,结构均一,因此不易破碎,破碎强度小。

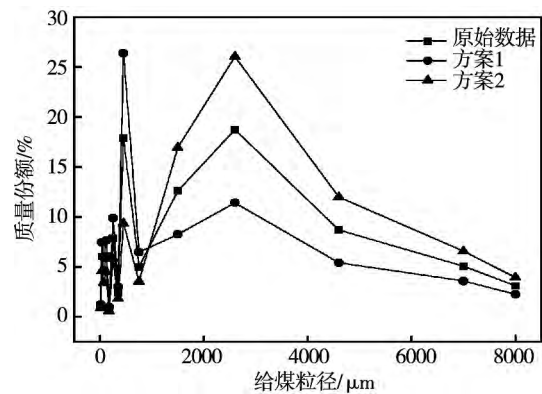


图 5 不同给煤粒度分布下的一次破碎

Fig. 5 The primary fragmentation of different weight fraction distributions of coal particle size

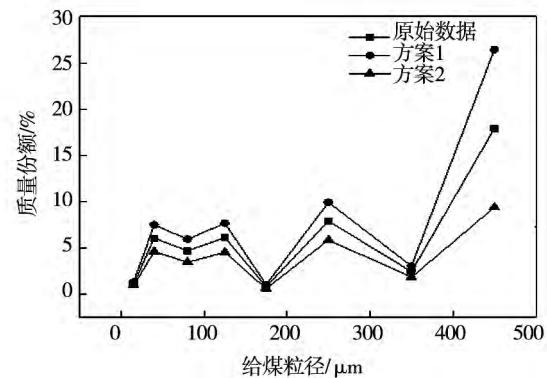


图 6 图 5 中 0 - 500 μm 细颗粒的一次破碎

Fig. 6 The primary fragmentation of 0 - 500 μm particle size in Fig. 5

2.3.4 一次破碎前后平均粒径的关联式

煤颗粒一次破碎后的焦炭平均粒径与破碎前的平均粒径、温度和煤种本身特性有关。通过数据分析,给出了以下 3 个关联式。

$$d_{out} = a_1 d_{in}^{b_1} T^{m_1} V_{daf}^{n_1} \quad (2)$$

$$d_{out} = a_2 d_{in}^{b_2} T^{m_2} A^{n_2} \quad (3)$$

$$d_{out} = a_3 d_{in}^{b_3} T^{m_3} FC^{n_3} \quad (4)$$

利用 Origin 数据处理软件,对本次实验的 4 个煤质和以前实验完成的长焰煤、内蒙古 1 号煤、贫煤、亮煤、暗煤、阳泉矸石煤质的一次破碎数据进行处理,拟合所得 3 个关联式中的各常数如表 3 所示。

表 3 自定义拟合后所得相关参数

Tab. 3 Related parameters for curve fitting with custom equations

参数	a_i	b_i	m_i	n_i	R^2
1	171.003 3	0.880 0	-0.770 4	0.029 2	0.950 1
2	180.194 2	0.864 7	-0.786 3	0.052 8	0.952 2
3	263.555 9	0.860 7	-0.798 0	-0.036 1	0.949 6

3 个关联式的误差分布如图 7 所示。

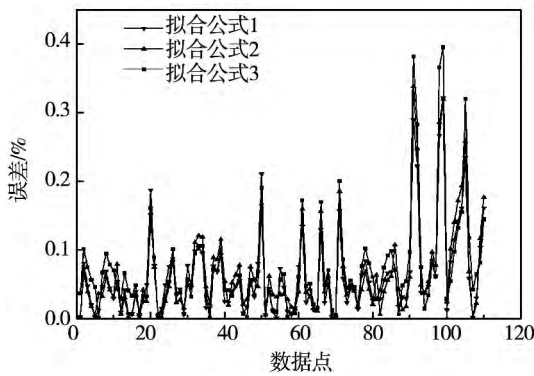


图 7 拟合公式误差分布图

Fig. 7 Error distribution of fitting formula

图 7 显示 9 个煤种的计算值与实验的相对误差大部分在 10% 以内,这说明 3 个函数关联式能较好的反应一次破碎后的焦炭平均粒径随煤种、床温、煤粒初始平均粒径的变化关系。

3 成灰特性

3.1 实验装置及实验过程

成灰特性研究的实验设备包括马弗炉和振筛机。将马弗炉加热到 850 °C,并保持温度不变。取一定量的某档给煤颗粒送入炉中,120 min 后取出,保证其充分燃烬。将得到的灰样送入振筛机,振筛 60 min 后灰颗粒被筛分成 14 档,用电子天平分别称量每一档的质量并记录下来。重复上述过程 7 次,得到实验数据。

3.2 实验结果与分析

煤灰颗粒经过初始的快速磨损阶段这一过程以后得到的粒度分布,为该煤种的本征成灰数据,它不受实际锅炉运行条件的影响,只和煤种有关^[10]。由图 8 和图 9 可知,不同煤种成灰特性不同,其中内蒙

褐煤灰中细颗粒质量份额最高,粗颗粒比例最低;朔州贫煤粗颗粒含量最高。这主要是由于内蒙褐煤挥发分析出后,焦炭颗粒孔隙率大,在炉膛中经历破碎和磨损严重。

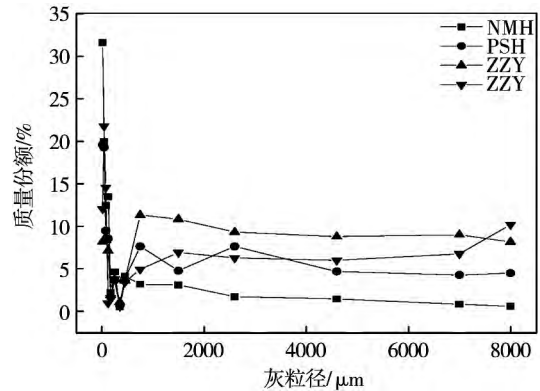


图 8 给煤成灰特性灰颗粒质量份额分布
Fig. 8 Particle mass fraction distribution of ash formation

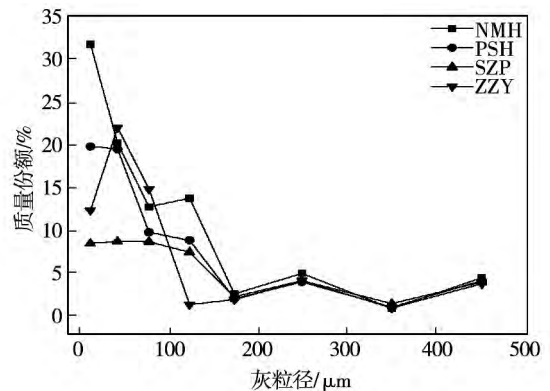


图 9 给煤成灰特性 0 - 500 μm 细灰颗粒的质量份额分布

Fig. 9 0 - 500 μm particle mass fraction distribution of ash formation

通过实验可知,在同样的给煤粒径分布条件下,内蒙褐煤中 60 - 200 μm 的灰颗粒的质量份额为 28.21%,朔州贫煤为 17.46%,郑州烟煤为 17.17%,其中内蒙褐煤含量最多。但是内蒙褐煤细灰颗粒质量份额含量高,其中 0 - 60 μm 的部分质量份额 51.61%,所以内蒙褐煤的灰大部分以飞灰的形式排出炉膛。

由图 10 可知,灰颗粒粒径主要集中在 0 - 500 μm 的范围内。与图 3 中一次破碎后内蒙褐煤焦炭

颗粒质量份额分布对比可知,细颗粒的质量份额在经历一次破碎之后发生了变化。说明在炉膛内焦炭颗粒经历的二次破碎以及磨耗对灰粒度分布有较大影响。

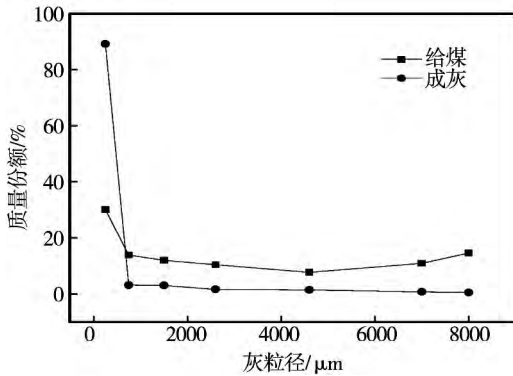


图 10 内蒙褐煤给煤粒度分布与成灰粒度分布的对比

Fig. 10 Comparison of coal and ash particle size distributions of NMH

4 燃 烬 特 性

4.1 实验装置及实验过程

煤种与一次破碎特性实验相同,实验中取两档(6 000 - 8 000 μm、>8 000 μm)。实验设备与成灰特性实验相同。每一档煤样取 5 ± 0.01 g。将称量好的煤样放入 850 °C 的马弗炉中加热 20 min 后取出,放入氮气氛围中冷却至常温,用电子天平称量其质量并记录下来,然后再放入炉中加热 5 min 之后取出,放入氮气氛围中冷却至常温,用电子天平称量并记录其质量,依次重复上述操作,每隔 5 min 记录一组数据,依次类推直至相邻两次质量变化小于 0.001(0.2%) g。同一档给煤颗粒,在同样的实验条件下做 3 组实验,取其平均燃烬时间。对剩下的一档给煤重复上述实验,得到实验数据。

4.2 实验结果与分析

由图 11 知,内蒙褐煤的燃烧速率最大,燃烬时间较短,约为 30 min; 郑州烟煤的燃烬时间最短,约 25 min。这主要是因为内蒙褐煤挥发分含量最高,煤质疏松,煤粉通过热解析出挥发分,形成多孔性的碳粒结构^[11],空隙率大。另外在挥发分析出的过程

中,碳粒膨胀,也增大了内部孔隙和外部反应的表面积。碳粒的燃烧和气化首先在外表面进行,之后反应气体向空隙内部渗透扩散,反应表面积大,燃烧容易,燃尽时间短。而郑州烟煤灰分含量最大,煤粉燃烧过程中,会形成一层灰壳,增大了氧气向碳粒中心扩散的阻力,对燃烧造成消极的影响。

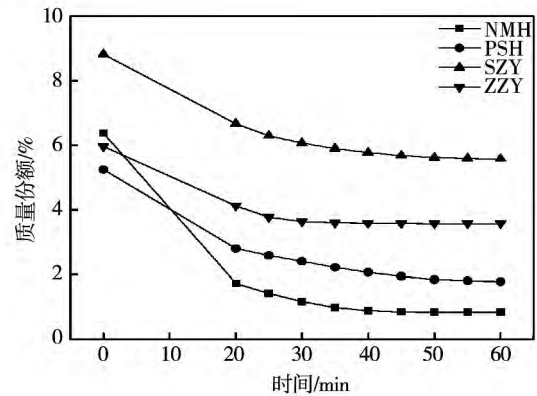


图 11 6 000 - 8 000 μm 粒径燃烬时间对比

Fig. 11 Comparison of burnout times for coal particle size between 6 000 - 8 000 μm

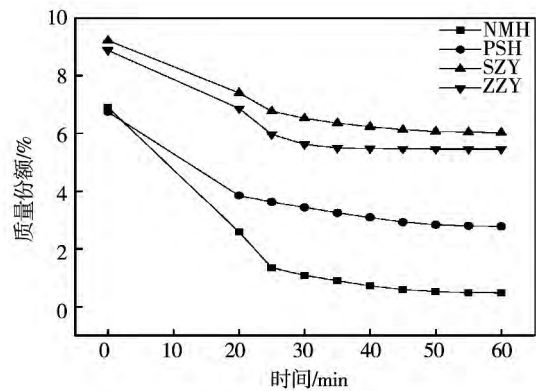


图 12 大于 8 000 μm 粒径燃烬时间对比

Fig. 12 Comparison of burnout times for coal particle size larger 8 000 μm

对比图 11 和图 12 知,煤粒径不同,燃烧速率也不同,粒径越大,燃烧速率越低,燃烬的时间越长。随着颗粒粒径减小,比表面积增大,有利于挥发分的析出和煤颗粒的非均相着火,煤颗粒本身的热阻减小。同时着火温度和最大燃烧速率对应下的温度随煤颗粒粒径的减小而减小^[11]。

5 结 论

(1) 不同煤种的一次破碎、成灰和燃烬特性差别较大。挥发分高、灰分低和固定碳含量高的煤种一次破碎程度高。

(2) 给煤粒径对一次破碎特性有影响。给煤中粗颗粒质量份额越多,一次破碎程度越高,粒度分布率小。

(3) 挥发分较大的煤质,其成灰中的细灰质量份额较大。

(4) 内蒙褐煤的燃烧速率最大,燃烬时间较短,约为 30 min; 郑州烟煤的燃烬时间约 25 min; 平朔混煤和朔州贫煤的燃烬时间约为 45 min。

参考文献:

- [1] 黄建辉,徐明厚,等. 煤燃烧过程中一次破碎的影响因素分析[J]. 工程热物理学报,2005,26(3): 519-522.
HUANG Jian-hui, XU Ming-hou, et al. Significant factors affecting the primary fragmentation of coal particles during coal combustion [J]. Journal of engineering thermophysics, 2005, 26(3): 519-522.
- [2] 秦 宏, 柏静儒, 等. 流化床内煤的热破碎实验研究[J]. 东北电力大学学报, 2008, 28(6): 72-74.
QIN Hong, BAI Jing-ru, et al. Experiment study on thermal fragmentation of fluidized bed lignite [J]. Journal of northeast dianli University natural science edition, 2008, 28(6): 72-74.
- [3] 杨海瑞, 肖显斌, 吕俊复, 等. CFB 锅炉内成灰特性的实验研究方法[J]. 化工学报, 2003, 54(8): 1183-1187.
YANG Hai-rui, XIAO Xian-bin, LV Jun-fu, et al. Experimental technique on coal ash formation in CFB combustion [J]. Journal of chemical industry and engineering, 2003, 54(8): 1183-1187.
- [4] 吕俊复, 杨海瑞, 张建胜, 等. 一种研究飞灰粒径分布和磨耗的简单方法[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(5): 387-390.
LV Jun-fu, YANG Hai-rui, ZHANG Jian-sheng, et al. A simple method to investigate the ash size distribution and its attrition [J]. Journal of combustion science and technology, 2003, 9(5): 387-390.
- [5] 吕俊复, 杨海瑞, 张建胜, 等. 流化床燃烧煤的成灰磨耗特性[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(1): 1-5.
LV Jun-fu, YANG Hai-rui, ZHANG Jian-sheng, et al. Investigation on the ash size distribution and attrition during the coal combustion in fluidized bed [J]. Journal of combustion science and technology, 2003, 9(1): 1-5.
- [6] 庄煌煌, 何宏舟, 等. 粒径对福建无烟煤在 CFB 锅炉中燃烬的影响[J]. 过程工程学报, 2013, 13(5): 846-850.
ZHUANG Huang-huang, HE Hong-zhou, et al. Influence of the particle size of Fujian anthracite coal on its burnout in CFB boiler [J]. The Chinese journal of process engineering, 2013, 13(5): 846-850.
- [7] Lee SH, Kim S D, Lee D H. Particle size reduction of anthracite coals during devolatilization in a thermobalance reactor [J]. Fuel, 2002, 81(13): 1633-1639.
- [8] 马利强, 路霖鹤, 岳光溪. 流化床条件下煤的一次爆裂特性的实验研究[J]. 燃烧化学学报, 2000, 28(1): 44-48.
MA Li-qiang, LU Ji-ling, YUE Guang-xi. Experimental study on primary fragmentation of coals in fluidized bed [J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2000, 28(1): 44-48.
- [9] 杨 杰, 马素霞. 管式炉种燃煤一次破碎特性的实验研究[J]. 煤炭转化, 2012, 35(3): 48-53.
YANG Jie, MA Su-xia. Experimental study on primary fragmentation characteristics of coal in tube furnace [J]. Coal conversion, 2012, 35(3): 48-53.
- [10] 李海明, 杨海瑞. 煤的成灰磨耗特性对循环流化床内物料平衡的影响[J]. 2004, 27(1): 36-40.
LI Hai-ming, YANG Hai-rui. Relevance of ash attribution to solids particle size distribution in CFB boiler [J]. Coal conversion, 2004, 27(1): 36-40.
- [11] 张晓博, 赵 虹, 杨建国. 不同粒径煤粉煤质变化及燃烧特性研究[J]. 2011, 36(6): 999-1003.
ZHANG Xiao-bo, ZHANG Hong, YANG Jian-guo. Study on the variation of coal properties for different coal diameters and their effects on combustion characteristics [J]. Journal of China coal society, 2011, 36(6): 999-1003.

(姜雪梅 编辑)

燃煤的一次破碎、成灰和燃烬特性实验研究 = **Experiment Study on Primary Fragmentation Ash Formation and Burnout Characteristics of Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] YANG Meng, MA Su-xia (Department of Thermal Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2). -220 -225

The primary fragmentation, ash formation and burnout characteristics of coal have an important impact on the combustion and mass balance of circulating fluidized bed boiler. In this paper, four different coals, Inner Mongolia lignite coal, Pingshuo mixed coal, Shuozhou lean coal and Zhengzhou bituminous coal, were experimentally studied, and particle size distributions of coals before and after fragmentation and burnout characteristics were presented. The rate of particle size change after coal primary fragmentation was calculated, and an empirical correlation that agrees with the industrial prediction for coal primary fragmentation was obtained. Experimental results show that there are large differences in the primary fragmentation, ash formation and burnout characteristics for different coals. The coal with higher volatile content, lower ash content and higher fixed carbon content has higher degree of primary fragmentation. The more the mass fraction of coarse coal particles in feeding coal, the higher degree of primary fragmentation and the lower rate of particle size change. And the more volatile content in feeding coal, the higher mass fraction of fine ash particles. Among the studied four coals, Inner Mongolia lignite has highest burn rate and relatively short burnout time, approximately 30 minutes, compared to 25 minutes for Zhengzhou bituminous coal, and 45 minutes for Shuozhou lean coal and Zhengzhou bituminous coal. **Key words:** primary fragmentation, ash formation, burnout time, average particle size

煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算方法研究 = **Research on Thermal Efficiency Calculation Method for Boiler Mixedly Burning pulverized coal and BFG** [刊, 汉] YE Ya-lan (Jiangsu Maritime Institute, Nanjing, China, Post Code: 211170), SI Feng-qi, XU Zhi-gao (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), JIANG Wen-hao (Huatian Engineering & Technology Corporation, MCC, Nanjing, China, Post Code: 210000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2). -226 -232

Due to the special properties of blast furnace gas (BFG) and the resulting different settings for the boiler heating-surface, along with the measurement difficulty of quantifying fuels entering furnace, the method for calculating and