

文章编号: 0253-240X(2005)05-0534-06

龙岩煤不同宏观煤岩组分的热破碎性质研究

何宏舟^{1,2}, 骆仲泱¹, 方梦祥¹, 王勤辉¹, 岑可法¹

(1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 集美大学 能源与动力工程研究所, 福建 厦门 361021)

摘要:用筛分和浮选法对龙岩煤进行分选, 得到不同粒径、不同宏观煤岩的龙岩煤颗粒。在热天平上进行热解破碎研究, 并在自制的小型流化床上进行燃烧破碎试验。结果表明, 亮煤与灰煤均发生一次破碎, 破碎后生成许多细小颗粒, 其中粒径 0.8 mm 以下的细颗粒占多数, 暗煤则不发生一次破碎。随着升温速率和颗粒粒径的增大, 一次破碎变得较为剧烈。颗粒性质、颗粒粒径、炉床温度和燃烧时间等因素对龙岩煤在流化床燃烧中的破碎均有重要影响。亮煤与灰煤因结构致密, 颗粒中大孔隙少, 显微硬度大, 灰分少等原因使得它们在燃烧中发生严重破碎, 而暗煤颗粒则因相反的原因不发生破碎或仅发生轻微破碎。粒径越大, 炉床温度越高, 燃烧时间越长, 破碎越剧烈。亮煤与灰煤在燃烧中均发生了二次破碎, 其中亮煤的二次破碎更剧烈。燃烧后期, 亮煤的颗粒破碎比灰煤更快; 由于破碎, 入炉煤颗粒平均粒径在燃烧早期迅速减小, 而后随着燃烧的进行而逐步趋于一个稳定值; 亮煤在流化床燃烧中服从等密度燃烧模式, 暗煤服从等直径燃烧模式, 而灰煤则服从混合燃烧模式。

关键词: 龙岩煤; 宏观煤岩; 热破碎

中图分类号: TQ531 文献标识码: A

煤的破碎极大地影响煤在流化床中的燃尽特性。研究认为^[1,2], 对于 2 mm 及更大的煤颗粒, 是破碎而不是磨蚀决定了焦炭在流化床燃烧中的扬析。福建无烟煤的 CFB 锅炉燃烧存在飞灰中未燃炭含量偏高、燃烧效率达不到设计值等问题。这与煤种较低的反应性有关, 同时也与其特殊的破碎性质有关, 即煤种在燃烧中发生了剧烈的破碎, 产生了大量的微细颗粒, 其中来不及在炉膛中燃尽而又未能被分离器捕捉的微细颗粒便构成了飞灰残炭。

关于煤的热破碎问题, 近年来国内外学者已进行了很多研究, 得到了有意义的成果。Dacomber 等^[3]发现, 较高和较低挥发分煤的热爆程度相对不剧烈, 而中等挥发分煤的热破碎较为剧烈; 大颗粒煤破碎时, 表面区域会破碎成许多小碎片, 而内部区域则破碎成几个大碎片。Lee 等^[4]发现相对于大多数烟煤所发生的中心破碎, 有不少无烟煤则发生圆周破碎, 即破碎后生成 1 个~2 个稍大颗粒和许多细小颗粒。马利强等^[5]发现不同宏观煤岩颗粒的破碎性质不同, 富含镜质组的亮煤的破碎程度要比富含惰性组的暗煤的破碎更剧烈。吴正舜等^[6]则发现无烟煤破碎后大多数颗粒的粒径集中在 0.3 mm 以下。这些成果极大地丰富了人们对煤燃烧中热破

碎现象的认识。

研究认为^[7], 煤质特性是影响煤热破碎的主要因素之一。福建无烟煤属中灰煤, 具有挥发分、含硫量极低、灰熔点很低、炭化程度高、结构致密、煤质脆、热稳定性差、入炉煤细粉含量大等特点, 其燃烧性质十分特殊。本文以一种典型福建无烟煤-龙岩煤为对象, 研究不同宏观煤岩颗粒的热破碎性质。

1 实验

根据颗粒表面反射率差异, 龙岩煤在宏观上大体可分为三类: 一是表面乌黑发亮的颗粒; 一为表面黯淡无光泽的颗粒和表面光泽度介于两者之间的颗粒。通过配备不同质量浓度的 $ZnCl_2$ 溶液, 用浮选法对龙岩煤进行分选, 发现表面乌黑发亮颗粒的密度大多在 1.7 g/cm^3 以下, 本文定义为亮煤; 表面黑暗无光泽颗粒的密度在 2.0 g/cm^3 以上, 定义为暗煤; 表面光泽度介于亮煤与暗煤之间、密度在 $1.8 \text{ g/cm}^3 \sim 1.9 \text{ g/cm}^3$ 的颗粒定义为灰煤颗粒。不同煤岩、不同粒径颗粒的工业分析、孔隙阻力系数^[8] ($PRN = [V_{ad}] [M_{ad}]$)、孔隙容积、和显微硬度分析见表 1。由表 1 可见, 与烟煤和其他无烟煤不同^[9], 随着密度的增加, 龙岩煤颗粒的挥发分含量不是减少, 而是增加了。

收稿日期: 2004-12-29; 修回日期: 2005-06-27。

基金项目: 国家教育部重点实验室访问学者基金(ZDNY2003002)。

作者简介: 何宏舟(1967-), 男, 福建惠安人, 副教授, 博士研究生, 工程热物理专业。E-mail: hhe99@126.com。

表1 龙岩煤不同煤岩、不同粒径颗粒的工业分析、孔隙阻力系数、孔隙容积、和显微硬度

Table 1 Proximate analysis, PRN, $H_{m,y}$ and Pore volume of different LY lithotype with different particle size

Sample	Particle size d/mm	Proximate analysis $w_{ad}/\%$				PRN V_{ad}/M_{ad}	$H_{m,y}$ kg/mm^2	Pore volume $v/\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$
		M	A	V	FC			
LY clarain ($\rho = 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3 \sim 1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$)	1.6 ~ 2.0	6.68	6.82	2.65	83.85	0.396 7	92.2	0.136 6
	2.0 ~ 3.2	7.00	7.86	2.46	82.68	0.351 4		
	3.2 ~ 4.0	6.50	4.88	2.33	86.29	0.358 4		
	4.0 ~ 5.0	7.24	4.27	2.63	85.86	0.363 2		
	5.0 ~ 8.0	6.34	7.32	3.36	82.98	0.529 9		
LY culm ($\rho = 1.8 \text{ g}/\text{cm}^3 \sim 1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$)	1.6 ~ 2.0	6.35	10.84	3.18	79.63	0.500 8	48.7	0.003 5
	2.0 ~ 3.2	4.82	24.70	4.92	65.56	1.020 7		
	3.2 ~ 4.0	6.05	11.62	3.59	78.74	0.428 1		
	4.0 ~ 5.0	4.86	31.68	3.88	59.58	0.798 3		
	5.0 ~ 8.0	4.83	27.36	4.33	63.48	0.896 5		
LY durain ($\rho > 2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$)	1.6 ~ 2.0	4.12	48.59	4.78	42.51	1.160 2	31.4	0.092 4
	2.0 ~ 3.2	1.76	79.33	5.32	13.59	3.022 7		
	3.2 ~ 4.0	2.40	78.47	5.11	14.02	2.129 2		
	4.0 ~ 5.0	2.85	70.30	5.05	21.80	1.771 9		
	5.0 ~ 8.0	2.26	78.13	5.79	13.82	2.561 9		

$H_{m,y}$: microscope hardness

1.1 固定床破碎 固定床破碎实验在 Mettler TOLDO TGA/SDTA851^e 热重仪上进行。试验分三组进行测试不同宏观煤岩颗粒在不同升温速率和不同颗粒尺寸下的热破碎情况。粒径为 2.0 mm ~ 2.6 mm, 3.2 mm ~ 4.0 mm 和 5.0 mm ~ 8.0 mm 的亮煤、灰煤和暗煤颗粒。根据粒径不同, 每次取 1 颗 ~ 8 颗, 使用高纯氮做裂解气, 水平吹入, 流量 60 mL/min, 热天平的升温速率分别为 50 K/min, 100 K/min 和 150 K/min。试验时把煤颗粒先预置于石英坩锅中。起始温度 25 °C, 根据预置升温程序加热至 950 °C, 保持 5 min, 然后降至室温, 观察颗粒的破碎情况。每个工况的实验重复 2 次。

1.2 流化床破碎 流化床破碎性质测试在小型鼓泡流化床燃烧炉上进行。粒径为 1.6 mm ~ 2.0 mm, 2.6 mm ~ 3.2 mm 和 4.0 mm ~ 5.0 mm 的亮煤、灰煤和暗煤以 5 颗/次 ~ 10 颗/次(约 1 g), 投入到 850 °C、900 °C 和 950 °C 左右的小型流化床燃烧炉中。该试验台由温控系统、空气预热系统、测量系统和流化床主体反应器等部分组成。主体反应器的内径为 50 mm, 高 600 mm, 由螺纹陶瓷管外缠绕电热丝加热, 再外套刚玉管和保温材料构成。主体反应器中的床料为经过淘洗和煅烧的石英砂, 其静止高度为 100 mm, 颗粒密度为 2 550 kg/m³, 粒径为 0.2 mm ~ 0.355 mm。流量为 1.2 m³/h 的空气经转子流量计调节后进入预热器预热, 经布风板后进入主体反应器, 将反应器内的物料流化, 同时通过温控系统对反应器内物料加热; 当物料温度达到预定值

并稳定时, 加入煤并燃烧一定时间。而后把空气切换成氮气, 使之停止反应并冷却, 氮气的流量为 0.45 m³/h。待反应炉降至 200 °C 左右时, 卸下炉子并取出其中的物料进行筛分、计数和称量, 得到不同宏观煤岩颗粒的一次破碎率随燃烧时间的变化及破碎后颗粒质量分布情况^[10]。

鉴于破碎过程的随机性, 每个工况的实验重复 3 次, 最后结果取 3 组试验的平均值。

2 结果与分析

引入以下两个参数^[11, 12], 反映不同宏观岩相煤的破碎程度。

(1) 一次破碎率 P_f 。 P_f 定义为经历破碎的母煤颗粒数与给煤总颗粒数之比, 即 $P_f = n_f/N_{tot}$;

(2) 破碎比 N_f 。 N_f 定义为破碎结束后煤颗粒的总数 N_{out} 与破碎前原始投煤颗粒总数 N_{in} 之比, 即 $N_f = N_{out}/N_{in}$ 。

2.1 热天平破碎 实验发现亮煤与灰煤发生了一次破碎, 而暗煤不发生一次破碎。从破碎类型看, 亮煤可能同时发生了中心破碎和表面破碎^[4, 13], 破碎后形成几个较大颗粒和很多小颗粒; 灰煤则发生表面破碎, 破碎后有许多片状颗粒从表面脱落; 暗煤虽不发生破碎, 但轻轻磕碰后能发现有许多细小颗粒从表面脱落。

图 1 比较了亮煤在 3 个不同升温速率下的破碎情况。由图 1 可见, 随升温速率的增加, 亮煤的破碎变得较剧烈。因为颗粒内部温度不均匀而产生的热

应力是发生燃烧破碎的主要原因^[3,14]。升温速率越大,颗粒内的温度梯度越大,颗粒内部产生的热应力就越大,破碎就越剧烈。

图 2 比较了在 150 K/min 升温速率下不同粒径亮煤的破碎情况。由图 2 可知,随粒径增大,破碎也变得较剧烈。某些粒径较大的颗粒($d = 5.0 \text{ mm} \sim 8.0 \text{ mm}$ 中的大颗粒)却又不发生破碎,在同样条件下重复 3 次试验,只有一次颗粒发生了严重破碎,而另外两次却没有发生破碎,破碎率 P_f 仅为 1/3。这是由于不同粒径颗粒的表面结构、孔隙特性、灰黏土成分、热梯度等不同所致。

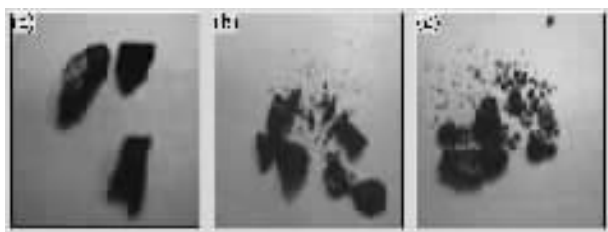


图 1 升温速率对破碎的影响

Figure 1 Effect of heating rate on the fragmentation (LY clarain, $d = 3.2 \text{ mm} \sim 4.0 \text{ mm}$, 3 particles)
(a) 50 K/min; (b) 100 K/min; (c) 150 K/min



图 2 粒径对破碎的影响

Figure 2 Effect of particle size on the fragmentation (LY clarain, 150 K/min)
(a) $d = 2.0 \text{ mm} \sim 2.6 \text{ mm}$ (6 particles);
(b) $d = 3.2 \text{ mm} \sim 4.0 \text{ mm}$ (3 particles);
(c) $d = 5.0 \text{ mm} \sim 8.0 \text{ mm}$ (1 particles)

龙岩无烟煤与韩国 Kyungdong 煤的工业分析性质相近,而作者在热天平上的实验结果也与 Lee 等^[4]的研究较接近,这两种煤均发生圆周破碎,破碎后均产生大量细小颗粒。与一般烟煤的破碎不同,烟煤主要发生中心破碎,破碎的结果是由一个大颗粒变成几个粒径较小的颗粒。

对亮煤破碎后的颗粒筛分发现,粒径在 0.8 mm 以下的细颗粒占多数。虽然亮煤与灰煤在破碎后所产生的细颗粒数目很多,但这些细颗粒所占的质量份额却较少。因此,按质量份额计算的破碎后颗粒

平均粒径并不会出现急剧减小。

2.2 流化床燃烧中的破碎 与热天平的试验结果相似,不同宏观煤岩龙岩煤颗粒在流化床燃烧中的破碎性质差异很大。亮煤发生了严重破碎,产生了许多尺寸不等的细小颗粒,这些颗粒由于自身密度较小,被流化气体托起,浮在了床料上面燃烧,灰煤也发生了严重破碎,产生了许多尺寸不等的颗粒,流态化条件下,这些颗粒混夹在石英砂床料中燃烧,暗煤颗粒不发生破碎或只发生轻微破碎,由于密度较大,在流化床燃烧中,暗煤颗粒很快地沉降到了布风板上。

研究认为^[14,15],挥发分析出而产生的“胀力”和颗粒表面与中心受热不同而产生的“热拉应力”是煤燃烧发生一次破碎的两个主要原因。试验发现,煤颗粒性质、粒径、炉床温度、和燃烧时间等因素对龙岩煤的破碎均有重要影响。图 3 比较了粒径为 2.6 mm ~ 3.2 mm 的不同岩相煤颗粒在 850 °C 炉床温度下燃烧 1 min 后的破碎情况。由于流化床燃烧,亮煤破碎后产生的 0.71 mm 以下的小颗粒在燃烧中出现了一定程度的熔融现象,与石英砂黏合在一起,不易计数;灰煤燃烧后表面裹灰,筛分过程中出现磨蚀和颗粒二次破碎,产生为数不少的小颗粒,也给计算破碎产生细颗粒数带来影响;暗煤由于在燃烧后结构疏松,筛分过程中也有出现颗粒破碎现象。为比较方便,本文研究所涉及的破碎后颗粒仅指粒径大于 0.71 mm 的颗粒。

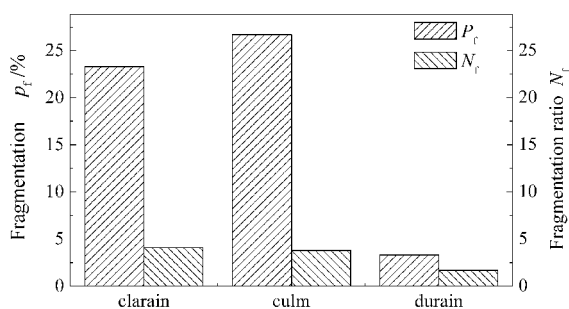


图 3 不同宏观煤岩颗粒的破碎比较

Figure 3 Fragmentation of LY coal with different lithotypes (parent particle size 2.6 mm ~ 3.2 mm, burn 1 min at bed temperature of 1 123 K, only those particle diameters bigger than 0.7 mm were counted after fragmentation)

由图 3 可见,亮煤与灰煤发生了严重破碎,暗煤仅发生轻微破碎。研究认为^[8,9,12,15],破碎程度随挥发分与 PRN 的增大而增高,这与作者的研究结果有出入。其原因可能在于,对龙岩煤而言,虽然亮煤的挥发分较低,PRN 值小,但显微硬度大,灰含量也少,

煤颗粒内部的黏结力较弱 ,较易于破碎 ;而暗煤的挥发分虽较高 ,PRN 值大 ,但其显微硬度较小 ,同时灰含量高 ,颗粒内的黏结力较大 ,不容易破碎。另一方面 ,亮煤与灰煤颗粒中的孔隙以亚微孔 ($d < 0.1 \mu\text{m}$)和超微孔 ($d < 0.01 \mu\text{m}$)居多 ,能够作为挥发分析出通道的大孔隙孔隙极少 ;此外福建无烟煤属非膨胀煤 ,受热过程中不发生塑性变形 ,如颗粒内部的挥发分析出后不能及时导出 ,就只有以颗粒破碎作为释放压力的途径 ,而暗煤颗粒中却存在有为数不少的细孔和微孔 ($d > 0.1 \mu\text{m}$) ,这些孔隙能够作为挥发分析出的快速通道 ,在一定程度上缓解了挥发分析出而造成的颗粒内部压力 ,因此不发生破碎。亮煤的显微硬度较大 ,在原煤的破碎过程中 ,亮煤表面易于形成“裂缝隙”等颗粒创伤 ,这些表面裂缝隙在受热或挥发分析出过程中会成为破碎“诱发点”而加速和加剧颗粒的破碎^[16] ;从试验结果看 ,用显微硬度、而不是 PRN 或挥发分等参数作为判断不同煤岩颗粒破碎的倾向性可能更合适。

图 4 比较了三个不同粒径亮煤颗粒在 900 °C 下的破碎情况。由图 4 可见 ,粒径越大 ,破碎越剧烈。这种情况与热天平的破碎相似 ,也与文献 [5 ,12 ,17] 报道的研究结果一致。在流化床条件下 ,煤颗粒进入流化床后 ,颗粒外部温度瞬间可增加至床层温度 ,而内部温度的升高则有一时间延迟 ,因此造成了很大的内外温差 ,形成了很大的热应力。粒径增大后 ,热解引起的颗粒内部温度不均匀性问题更加突出 ;由于粒径是颗粒内部析出的挥发分向外逃逸所需经过的最大距离 ,挥发分传输时遇到的阻力与此距离成正比 ,大颗粒内部挥发分外逸时产生的压力梯度要比小颗粒的大 ,大颗粒煤的颗粒比表面积比小颗粒煤的小 ,

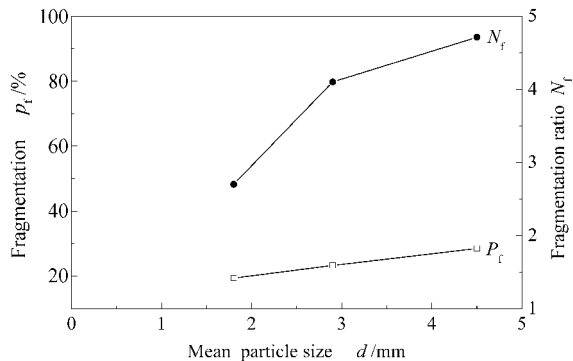


图 4 破碎随初始粒径的变化曲线

Figure 4 Effect of original particle size on fragmentation

也不利于析出挥发分的逃逸 ;大颗粒煤比小颗粒煤更易于热爆。

图 5 和图 6 对比了不同炉床温度下亮煤和灰煤的破碎情况。图 5 中的一次破碎率是指燃烧 1 min 后的破碎颗粒数与总投煤颗粒数之比。由图 5 和图 6 可见 ,随着炉膛温度的增加 ,破碎变得较剧烈。随着炉床温度升高 ,炉床对颗粒的传热速率加快 ,颗粒中的温度梯度变大 ,从而破碎张力增大 ,破碎就变得较为剧烈。

图 7 和图 8 反映了不同岩相龙岩煤颗粒在燃烧中的颗粒一次破碎率随时间变化情况。由图 7 可见 ,随着燃烧时间的变化 ,保持原粒径的颗粒越来越少 ,一次破碎率越来越大。粒径为 4.0 mm ~ 5.0 mm 的亮煤颗粒 ,在 900 °C 炉床中燃烧 6 min 后再筛分时 ,已无法得到与原粒径相当的颗粒 ,颗粒粒径发生了严重破碎。而由图 8 ,对比亮煤和灰煤一次破碎率随时间的变化可以发现 ,不论是亮煤或是灰煤 ,在燃烧中均发生了二次破碎。虽然在燃烧早期 ,灰煤的一次破碎率高于亮煤 ,但亮煤在燃烧中发生了更为

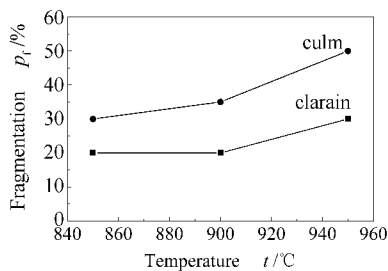


图 5 破碎随炉床温度的变化曲线
Figure 5 Effect of bed temperature on fragmentation

$d = 2.6 \text{ mm} \sim 3.2 \text{ mm}$,
burn 1 min

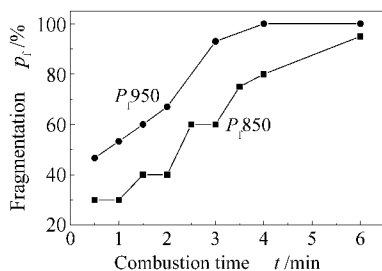


图 6 不同炉床温度下一次破碎率随时间变化曲线

Figure 6 Variation of P_f with combustion time under different bed temperature
culm , $d = 2.6 \text{ mm} \sim 3.2 \text{ mm}$

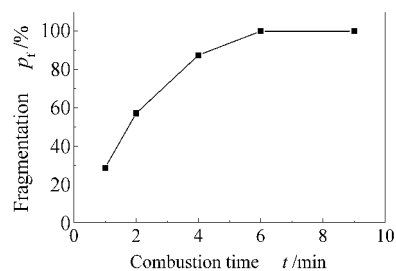


图 7 亮煤一次破碎率随时间变化曲线

Figure 7 Variation of P_f with combustion time
clarain , $d = 4 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$,
bed temperature 1 173 K

剧烈的二次破碎,燃烧后期,亮煤的颗粒破碎更厉害。

图9比较了根据不同标尺计算的、粒径为4.0 mm~5.0 mm的亮煤颗粒在900℃炉床温度燃烧时,破碎比随时间的变化。图10描述了在该条件燃烧时,颗粒平均粒径随时间的变化情况。由图9可见,在燃烧早期(<4 min),因破碎而产生的大颗粒数(指未被携带离开炉床的颗粒)随燃烧时间的推移变化不大,而在燃烧后期(>4 min),颗粒尺寸

受二次破碎的影响,各个粒径范围的大颗粒均近似地按同样的规律衰减。而由图10可知,燃烧早期,颗粒平均粒径迅速减小,随着燃烧进行,平均颗粒粒径衰减趋缓,并逐步趋于一个稳定值。另外,结合图9和图10可推知,虽然破碎产生了数量不少的细颗粒(N_f 较大),但一次破碎后颗粒的大部分质量还是集中于爆裂前的粒径范围及其略低些的粒径范围,这个结果与马利强等^[5]的研究一致。

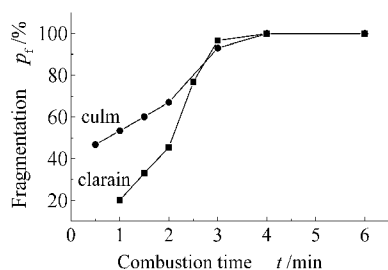


图8 不同煤岩颗粒一次破碎率随时间变化曲线

Figure 8 Variation of P_f with combustion time
 $d = 2.6 \text{ mm} \sim 3.2 \text{ mm}$,
bed temperature 1 223 K

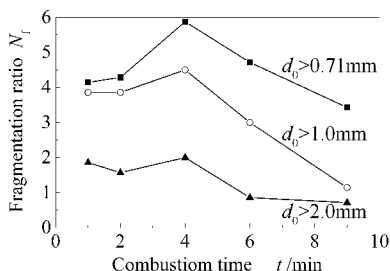


图9 亮煤颗粒破碎比随燃烧时间的变化

Figure 9 Variation of fragmentation ratio (N_f) with time
clarain, $d = 4.0 \text{ mm} \sim 5.0 \text{ mm}$,
bed temperature 1 173 K

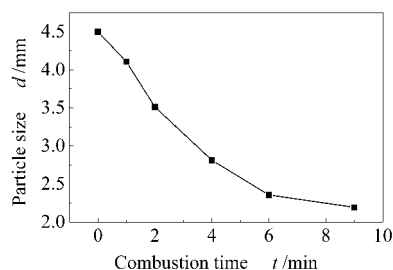


图10 炉床颗粒平均粒径随时间的演化

Figure 10 Variation of mean particle size with time
clarain, bed temperature 1 173 K

破碎本身不仅与颗粒所属煤种的燃烧性质有关,而且还与颗粒自身的表面和结构特性有关,比如颗粒表面吸附的细粉和存在的裂缝等,致使破碎试验的重复性不好。同样的尺寸、同样的密度、同样的燃烧条件,有时得到的试验结果却不一样。

通过对流化床早期燃烧后的底渣筛分发现,破碎后的亮煤颗粒呈黑色焦炭状,暗煤颗粒呈灰块石

状,而灰煤颗粒表面呈褐色,敲碎后能见内部黑色的炭焦。因此可以推断,亮煤因其主要成分是(密实)碳,表面密实,气孔不发达,在燃烧中发生严重破碎,服从等密度的燃烧方式;而暗煤在燃烧中不发生破碎,燃烧中,空气通过表面发达的气孔扩散到颗粒内部进行反应,服从等直径的燃烧方式;对于灰煤,则服从混合燃烧模式。

参考文献:

- [1] BROWN R C, AHRENS J, CHRISTOFIDES N. The contributions of attrition and fragmentation to char elutriation from fluidized beds[J]. Combust Flame, 1992, 89(1): 95-102.
- [2] DONSI G, MASSIMILLA L, MICCIO M. Carbon fines production and elutriation from the bed of a fluidized coal combustor[J]. Combust Flame, 1981, 41: 57-69.
- [3] DACOMBE P, POURKASHANIAN M, WILLIAMS A, YAP L. Combustion-induced fragmentation behavior of isolated coal particles[J]. Fuel, 1999, 78(15): 1847-1857.
- [4] LEE J M, KIM J S, KIM S M, KIM J J, LEE S H, KIM Y H, SONG B H, KIM S D. Combustion and fragmentation characteristics of Korean anthracite[J]. In: DONALD W, GEILING P E, ed. Sixteenth International Conference on Fluidized Bed Combustion[C]. Nevada, USA; 2001. P: 889-898.
- [5] 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]. 燃料化学学报, 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.)
- [6] 吴正舜, 刘欣, 吴创之, 张春林, 陈汉平, 刘德昌, 常杰, 马隆隆. 煤在燃烧过程中的破碎[J]. 电站系统工程, 2003, 19(2): 4-6. (WU Zheng-shun, LIU Xin, WU Chuang-zhi, ZHANG Chun-lin, CHEN Han-ping, LIU De-chang, CHANG Jie, MA Long-long. The fragmentation of coal during combustion[J]. Power System Engineering, 2003, 19(2): 4-6.)
- [7] CHIRONE R, MASSIMILLA L, SALATINO P. Comminution of carbons in fluidized bed combustion[J]. Prog Energy Combust Sci, 1991, 17(4): 297-326.
- [8] DAKIC D, VAN der HONING G, VALK M. Fragmentation and swelling of various coals during devolatilization in a fluidized bed[J]. Fuel, 1989, 68(7): 911-916.

- [9] 刘彦鹏. 流化床燃烧过程中煤颗粒特性对灰渣形成特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
(LIU Yan-peng. Effects of coal particle properties on the ash formation in fluidized bed combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.)
- [10] STUBINGTON J F, WANG A L T. Unburnt carbon elutriation from pressurized fluidized bed combustion of Australian black coals[J]. Fuel, 2000, **79**(10):1155-1160.
- [11] LEE J M, KIM J S, KIM J J. Comminution characteristics of Korean anthracite in a CFB reactor[J]. Fuel, 2003, **82**(11):1349-1357.
- [12] ZHANG H T, CEN K F, YAN J H, NI M J. The fragmentation of coal particles during the coal combustion in a fluidized bed[J]. Fuel, 2002, **81**(14):1835-1840.
- [13] FUERTES A B, MARBAN G. Modelling gasification reactions including the percolation phenomenon[J]. Chem Eng Sci, 1994, **49**(22): 3813-3821.
- [14] 李爱民, 池涌, 严建华, 倪明江, 岑可法. 大颗粒炭在流化床中燃烧的热应力破碎理论[J]. 煤炭学报, 1998, **23**(2):208-211.
(LI Ai-min, CHI Yong, YAN Jian-hua, NI Ming-jiang, CEN Ke-fa. A thermal stress breakage theory for large carbon particles during combustion in fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 1998, **23**(2):208-211.)
- [15] STUBINGTON J F, LINJEWILE T M. The effects of fragmentation on devolatilization of large coal particles[J]. Fuel, 1989, **68**(2):155-160.
- [16] BAR-ZIV E, KANTORVICH I I. Mutual effects of porosity and reactivity in char oxidation[J]. Prog Energy Combust Sci, 2001, **27**(6): 667-697.
- [17] MARBAN G, PIS J J, FUERTES A B. Characterizing fuels for atmospheric fluidized bed combustion[J]. Combust Flame, 1995, **103**(1-2):41-58.

Thermal fragmentation of Longyan anthracite with different lithotypes

HE Hong-zhou^{1, 2}, LUO Zhong-yang¹, FANG Meng-xiang¹, WANG Qin-hui¹, CEN Ke-fa¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China ;

2. Institute for Energy and Power Engineering of Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract : Three different lithotypes of Longyan (LY) anthracite with different particle size were separated by means of flotation technique. Experiments of the particle fragmentation during pyrolysis and combustion were conducted in a TGA system and a pilot scale fluidized bed furnace, respectively. It is shown that for clarain and culm many new fine particles are generated during pyrolysis, most of which has a size smaller than 0.8 mm. The primary fragmentation reaction of clarain and culm becomes severely with the increase of heating rate and the sample particle size. For durain particle, no obvious fragmentation is found under the same experimental condition. Factors, such as particle properties, particle size, furnace's bed temperature and combustion time, have an important effect on the fragmentation of LY anthracite during its combustion in fluidized bed. Clarain and culm occur tremendous fragmentation in fluidized bed due to their compact structure, few large pores in inner particle, high microscope-hardness ($H_{m,n}$) and low ash content. The fragmentation of clarain and culm tends to be severely with the increase of particle size, bed temperature and combustion time. Durain doesn't have obvious fragmentation during combustion in fluidized bed. Both clarain and culm undergo the secondary fragmentation during combustion, but the secondary fragmentation of clarain is severely in the late stage of combustion. The particle size of clarain declines more rapidly than that of culm. In the early stage of combustion, the mean particle size of clarain decreases promptly as a result of primary fragmentation, but with the time going it falls to a stable size. The combustion model of clarain in fluidized bed is equidensity shrinking core model, while that of durain is equidiameter one, and that of culm is a mixed model.

Key words : Longyan anthracite ; lithotype ; thermal fragmentation

Foundation item : Visit Scholar Foundation of Key Laboratory of Ministry of Education (ZDNY2003002).

Author introduction : HE Hong-zhou (1967-), male, Ph. D. student, Associate Professor, specialty of engineering thermodynamics. E-mail : hhe99@126.com