

# 无烟煤流化床燃烧中热破碎现象的研究综述

何宏舟<sup>1</sup>, 骆仲泱<sup>2</sup>, 岑可法<sup>2</sup>

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

**摘 要:** 归纳用于衡量破碎程度的参数, 分析产生破碎的机理, 研究影响热破碎的因素, 讨论破碎现象对燃烧的作用。总结认为, 流化床燃烧中, 无烟煤的破碎具有较大随机性, 受煤质影响极大, 粒径、炉床温度、停留时间、流化介质及流化速度等对破碎也有重要影响。煤的破碎有利于提高煤焦颗粒的燃烧速率, 但同时也会增加炉床内可扬尘颗粒数量, 导致飞灰未燃碳含量增加的后果。实现破碎物料的准确快速取样和建立破碎前后颗粒平均粒径之间的关系是今后破碎研究工作尚待解决的问题。

**关键词:** 无烟煤; 流化床; 破碎  
**中图分类号:** TK224, TQ51  
**文献标识码:** A

## 1 前 言

煤的热破碎特性是指煤粒在进入高温流化床后其粒度发生急剧减小的一种性质。煤粒在燃烧过程中的热破碎主要是由于自身因素而引起的颗粒变化过程, 具有短时间内快速改变粒度的特点。

国际上, 较早系统地对煤热破碎现象开展研究的是意大利学者 Massimilla 和 Chirone 等人<sup>[1~3]</sup>; 此后, Stubington、Dakic、Fuentes、Marbán、J. M. Lee 和 S. H. Lee 等人也先后分析了不同煤种

在流化床燃烧中不同工况下的热破碎情况<sup>[4~8]</sup>。国内对煤燃烧中破碎问题的研究起步相对较晚, 最早开展此方面工作的是浙江大学的张宏焘等人<sup>[9]</sup>; 近年来, 马利强、吴正舜、何宏舟等人也分别对煤在流化床燃烧中的热破碎问题开展了研究, 这些研究包括了从衡量破碎程度的参数到破碎产生机理、破碎结果描述、影响破碎因素和破碎对燃烧的作用等方面内容<sup>[10~12]</sup>。表 1 综合了国内外关于煤流化床燃烧破碎现象的一些研究情况。

表 1 关于流化床煤燃烧中破碎现象的研究

研究者	煤种/粒径/mm	反应器/尺寸(内径/mm)	研究内容	取样方法	研究条件
Andrej <sup>[3]</sup>	褐煤/(1.65~3.28)	流化床/100	二次破碎	篮技术取料	750~900 °C, (2%/8%/10%)O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , 5~8 颗/次
Chirone <sup>[1~2]</sup>	(1) 烟煤/(1~16) (2) 无烟煤/(1.8~12)	流化床/40	一次破碎	篮技术取样	850 °C, N <sub>2</sub> , 球形颗粒, 1 颗/次
Chirone <sup>[3]</sup>	烟煤/(3~6.35)	流化床/40	二次破碎	篮技术取样	900 °C, 21%/5%O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , 1 颗/次
Cui <sup>[14]</sup>	烟煤/(2.8~5.6)	压力流化床/55	二次破碎	球形阀卸料取样	850 °C, N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> , 1.6 MPa, 给料: 1 g/次
Dacombe <sup>[15]</sup>	烟煤, 无烟煤/(1.4~3.35)	沉降炉/12×5×2 050	破碎(100 ms-1s)	水冷取样器	1 627 °C, Air, 球形颗粒, 1 颗/次
Dakic <sup>[5]</sup>	烟煤, 无烟煤/(2.0~15)	流化床/100	一次破碎	可移动流化床装置 冷却取料	850 °C, N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> +15%O <sub>2</sub> , Air, 给料: 1~5 g/次
何宏舟 <sup>[12]</sup>	无烟煤/(2.0~5.0)	流化床/50	破碎(一次+二次)	卸载取料	850~950 °C, Air, 给料: 1.0 g/次
Lee(1) <sup>[7]</sup>	无烟煤/(1~5.6)	CFB 反应器/35	破碎(一次+二次)	卸载取料	760~850 °C, N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ; 给料: 4 g/次
Lee(2) <sup>[8]</sup>	无烟煤/(2~12)	热天平反应器/55	一次破碎	篮技术取料	750~900 °C, N <sub>2</sub> , 给料: 0.5~0.8 g/次
Marbán <sup>[6]</sup>	褐煤, 无烟煤, 石墨/ (0.68~3.5)	流化床/52.5	破碎(一次+二次)	“篮技术”+ 气枪冷却取料	750~950 °C, N <sub>2</sub> , Air; 给料: 0.5~2.5 g/次
马利强 <sup>[10]</sup>	不同宏观岩相烟煤/ (0.71~4.0)	流化床/41	一次破碎	抽吸取样	900 °C, N <sub>2</sub>
Sundback <sup>[11]</sup>	烟煤/(2.2~6.2)	流化床/64	二次破碎	CO <sub>2</sub> 浓度监测	750~850 °C, (0.5%/10%)O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , 1 颗/次
Stubington <sup>[4]</sup>	(1) 烟煤/(5~12) (2) 无烟煤/(2~12)	(1) 管式反应器/20 (2) 流化床/40	一次破碎	篮技术取料	850 °C, N <sub>2</sub> , 球形颗粒
吴正舜 <sup>[11]</sup>	烟煤, 无烟煤/(0.5~8.0)	CFB 反应器/35	一次破碎+燃烧破碎	抽吸取料	850 °C, N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ; 给料: 5.0 g/次(一次破碎), 50 g/次(燃烧破碎)
张宏焘 <sup>[9]</sup>	烟煤/(4.3~7.0)	流化床/30	一次破碎	翻转倾倒取料	900 °C, N <sub>2</sub> , Air; 给料: 10 颗/次

收稿日期: 2005-07-18; 修订日期: 2006-02-16

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510026)

作者简介: 何宏舟(1967-)男, 福建惠安人, 集美大学副教授, 博士

## 2 衡量破碎程度的参数

许多研究者认为可采用破碎几率和破碎比来反映煤的破碎程度<sup>[1-4, 10]</sup>。破碎几率  $P_f$  定义为经历破碎的煤颗粒数  $N_{fr}$  与给煤总颗粒数  $N_{bt}$  之比, 即  $P_f = N_{fr} / N_{bt}$ ; 而破碎比  $N_f$  则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  $N_f = N_{out} / N_{in}$ 。考虑到破碎不仅引起颗粒数量的变化, 而且还引起了颗粒粒径的变化, 为综合反映破碎对颗粒的数量和粒度方面的变化影响, 浙江大学最早提出了用破碎指数  $S_f$  来反映煤的流化床破碎特性<sup>[9]</sup>。破碎指数  $S_f$  定义为  $S_f = N_f / F_d$ , 其中  $F_d$  为破碎前后颗粒度变化率,  $F_d$  定义为  $F_d = \sum X_i d_i / d_0$ 。这里,  $X_i$  为某筛分粒度下的质量份额,  $d_i$  为某筛分粒度下的平均直径,  $d_0$  为破碎前煤的原始平均直径。 $S_f$  越大, 则表示破碎越严重。另外, 由于破碎对煤燃烧的影响更多地体现在改变入炉煤的粒度分布和煤颗粒的燃烧表面积上。近年来, 又有学者引入了归一化颗粒重量分布等参数来衡量煤的破碎程度, 以同时反映破碎后煤颗粒的粒度和重量分布份额情况<sup>[17]</sup>。归一化颗粒重量  $(g / (mm \cdot g))$  定义为  $\bar{w}_i = w_i / (\Delta d_i \sum w_i) = X_i / (\Delta d_i)$ , 其中  $\Delta d_i$  为某筛分粒径间隔。破碎指数  $S_f$  和归一化颗粒重量分布等参数能较好地综合反映煤的破碎情况, 已被越来越多的研究者用作衡量煤破碎程度的指标<sup>[9]</sup>。

## 3 产生破碎机理

煤不是各向同质的均匀材料, 煤在燃烧中发生的破碎现象强烈地依赖于其颗粒的内部结构。Chirone 把煤的热破碎分为 3

类<sup>[3]</sup>, 即一次破碎、二次破碎和逾越破碎。其中, 一次破碎发生在燃烧的前期阶段, 是因高温热冲击而产生的热应力和挥发份析出而在颗粒内部集聚产生膨胀压力的共同作用而导致的颗粒破碎现象。在流化床条件下, 由于热质交换非常强烈, 颗粒的平均升温速率可达  $5 \sim 150 \text{ K/s}$ <sup>[18]</sup>, 大颗粒由于其  $Bi$  数较大, 颗粒表面和内部存在有较大温差, 在碳粒内部产生较高的热应力, 并在其气孔、裂隙处产生较大的应力集中, 当该应力大于碳粒的极限抗张强度时, 颗粒发生破碎。

Chirone 研究了球形煤颗粒的一次破碎机理<sup>[19]</sup>。用 Weibull 理论描述非均相物质内部张力分散的情况, 建立颗粒累积破损几率与表面张力、荷载应力、表面抗力、材料的最大临界应力等之间的关系, 认为当最大表面抗力小于荷载应力(因挥发份析出而产生的压力)时, 颗粒发生破碎。李爱民等人计算球形碳颗粒的受力情况<sup>[20]</sup>, 认为大颗粒碳粒表面处具有最大压应力, 在碳球中心处具有最大拉应力, 拉应力是造成碳粒破碎的主要因素; Dacomber 等人发现<sup>[13]</sup>, 随颗粒径增加, 颗粒强度减小而内部张力增加, 大颗粒内部中心位置是最早到达破碎临界点。通过比较不同颗粒径下因热应力所引起的颗粒破碎时间和不同温度梯度下产生的破碎动量, 认为在大颗粒煤破碎时, 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(见图 1)。

二次破碎发生在焦炭燃烧中。Sundback 认为煤的二次破碎

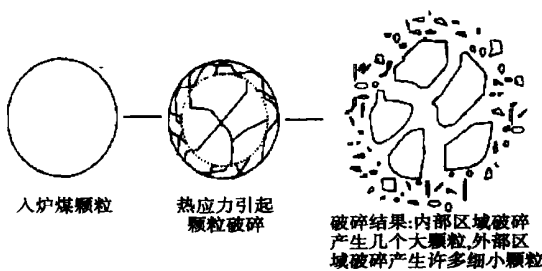


图 1 球形颗粒因热应力作用而导致破碎的机理示意图

是由于高温热应力的作用削弱了煤粒内部各元素之间结合的化学键力, 在流化床中剧烈的碰撞运动作用下导致内部各种不规则形状晶粒之间联结的“骨架”崩裂而发生<sup>[19]</sup>; Marban 认为二次破碎主要缘于燃烧中颗粒间的碰撞。他用“碰撞”理论解释了燃烧过程中无烟煤二次破碎随粒径增加而变明显、随温度升高而有所削弱的现象<sup>[6]</sup>。认为燃烧过程中焦颗粒的碰撞次数正比于其燃尽时间, 因此也正比于颗粒的初始粒径。随着燃烧温度的升高, 颗粒的燃烧总时间减少, 于是颗粒之间的总碰撞次数随之减少, 二次破碎程度减弱。

逾越破碎发生在颗粒燃烧的最后阶段, 当颗粒的燃烧完全受内表面反应控制的时候, 根据发生方式不同, 逾越破碎可分为均衡逾越和外围逾越两种: 当燃烧发生在反应动力学控制区时, 在颗粒孔隙率增大超过其区域临界值条件下, 逾越破碎发生并立即蔓延到整个颗粒中, 大颗粒瞬间破碎成小颗粒, 此时发生均衡逾越; 而当燃烧处于扩散控制时则发生外围逾越。Fuentes 用拓扑法研究了煤燃烧中的外围逾越破碎现象<sup>[21]</sup>。他认为燃烧中氧通过扩散渗透到颗粒的孔隙中, 会在颗

粒内部产生一个沿径向浓度分布梯度; 随着反应进行, 尽管靠近颗粒中心的地方孔隙减小, 但颗粒总的孔隙却增加。当颗粒外层某个位置的孔隙率增加超过临界孔隙率  $\epsilon_{cr}$  时, 在磨蚀碰撞和化学反应的共同作用下, 有一些外部固体碎片会从颗粒母体中被剥离, 发生外围逾透破碎。

Lui 等人应用逾透理论研究了煤焦孔隙的发展与破碎之间的关系, 发现煤焦薄壳中由挥发份析出和燃烧而形成的大孔隙在逾透破碎中起主要作用<sup>[22]</sup>。颗粒壳表面相邻大孔之间、连接内部空隙和外部环境的连接处存在的狭短缺陷(脆弱点)可能在进一步燃烧中断裂, 形成破碎。

#### 4 破碎现象描述

由于煤的非各向同性结构特点, 一次破碎带有很大的随机性。基于破碎过程中不同粒径范围颗粒数目的概率平衡理念, Chen 等人提出用随机函数模型来描述一次破碎现象<sup>[23]</sup>。通过引入转化强度函数以反映颗粒从某个粒径范围转化到另一个粒径范围的概率; 得到一次破碎过程中任一时刻颗粒的最大连续可能尺寸分布函数为  $f(D) \approx (\pi/2) V_m^{-1} D^2 \exp(-\frac{\pi}{6} \frac{D^3}{V_m})$ , 其中:  $D$ —颗粒径;  $V_m$ —颗粒的平均体积。另外, 不少研究者认为流化床燃烧中煤的二次破碎行为可用两个统计分布函数来描述<sup>[2, 24~25]</sup>: 其一为  $F(d_b) = \frac{1}{\sigma_{dev} \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(d_b - d_{mean})^2}{2\sigma_{dev}^2}]$ , 其二为  $f(d_t/d_b) = a_1 (d_t/d_b)^{a_2} (1 - d_t/d_b)^{a_3}$ 。其中:  $F(d_b)$ —直径为  $d_b$  的焦炭颗粒发生破碎的几率密度;  $f(d_t/d_b)$ —破碎后颗粒尺寸的分布函数;  $d_{mean}$ —分布平均值, 代表最有

可能发生破碎的粒径;  $\sigma_{dev}$ —标准偏差;  $d_t$ —颗粒破碎后的体积粒径;  $a_1, a_2, a_3$ —与煤焦性质有关的待定参数。这里, 函数  $F(d_b)$  决定了燃烧中哪一个颗粒破碎, 而函  $f(d_t/d_b)$  数则预测了破碎后粒径分布。

#### 5 影响破碎的因素

影响无烟煤在流化床燃烧中热破碎的因素主要有煤质、煤颗粒径和运行工况等因素。

##### 5.1 煤质的影响

###### 5.1.1 煤阶的影响

一般情况下, 随着煤阶的升高, 煤的破碎变得较剧烈(见图 2)<sup>[8]</sup>; 但也有例外, 如在压力流化床燃烧中, 有些煤焦的二次破碎程度随其煤阶的升高而降低<sup>[14]</sup>。

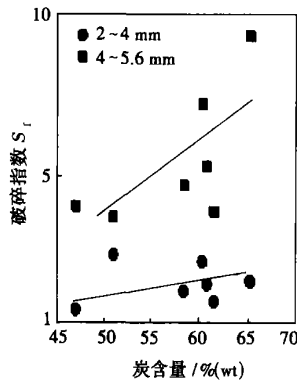


图 2 一次破碎率随煤阶的变化

###### 5.1.2 挥发份与灰含量的影响

在其它条件相同情况下, 煤的破碎程度随其挥发份含量的增加而加剧。Zhang 的研究得到了煤的破碎指数与煤干燥无灰基挥发份之间存在着有如图 3 所示的关系<sup>[26]</sup>。但也有研究发现<sup>[19]</sup>, 较高和较低挥发份煤的热爆程度相对较不剧烈; 而中等挥发份煤的热破碎较为剧烈。另外, 煤中的灰含量对破碎也有一定影响; Lee 发现<sup>[27]</sup>, 当颗粒径较大时 ( $> 4$

mm), 随着颗粒中灰含量的增加, 韩国无烟煤的破碎变得较不剧烈, 如图 4 所示。还有, 文献<sup>[10]</sup>研究认为, 煤中灰的成份对破碎也有影响。含粘土成份较高的煤, 其破碎程度也较不剧烈。

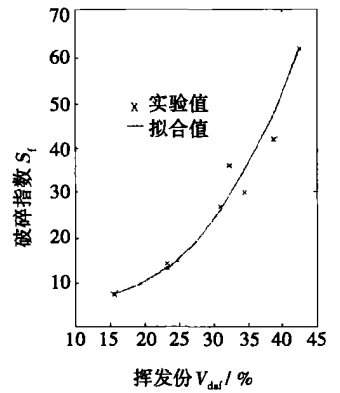


图 3 煤的一次破碎程度(破碎指数)随煤种挥发份含量的变化

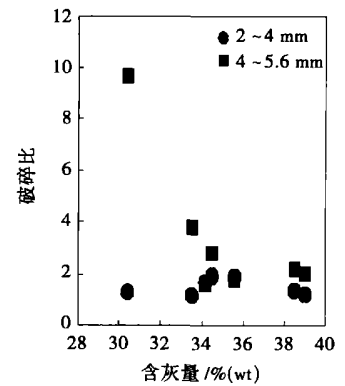


图 4 一次破碎程度随煤种含灰量的变化

###### 5.1.3 硬度的影响

硬度是影响煤破碎的最重要煤质参数之一。Zhang 发现<sup>[9]</sup>, 显微硬度越小的煤, 其破碎越厉害; Dacombe 发现<sup>[13]</sup>, 煤的破碎比随其颗粒抗压强度的增加而按指数规律减少(见图 5)。Lee 发现当粒径较大时, 随着煤的哈氏硬度 HGI 增大, 韩国无烟煤的破碎指数变小, 破碎变得较不剧烈<sup>[8]</sup>; 但最近也有研究发现<sup>[7, 12]</sup>, 随着 HGI 增

加,某些无烟煤颗粒在流化床试验台上的破碎变得更厉害,产生了更多的细小颗粒。

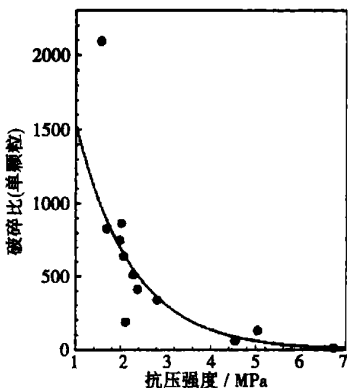


图 5 破碎比随抗压强度的变化

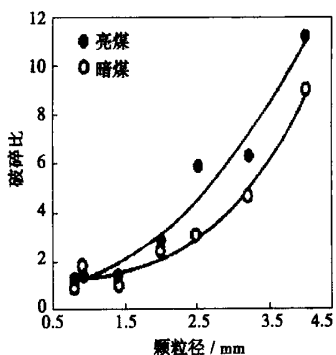


图 6 不同粒径亮煤和暗煤颗粒的破碎比比较

### 5.1.4 煤质组分的影响

由于煤中不同显微组分物质的破碎性质不同<sup>[28]</sup>:镜质组在热解时会经历剧烈的一次破碎,而丝质组的破碎特性不显著。因此煤中不同的显微组分含量也必会影响其破碎程度,富含镜质组的煤的破碎要剧烈一些,而富含丝质组的煤的破碎要少。Chirone 发现在燃烧过程中<sup>[1]</sup>,有的煤颗粒始终不发生破碎。何宏舟发现同一种煤的不同宏观煤岩组分颗粒的破碎性质不同<sup>[2]</sup>,含碳量少、灰份多的暗煤颗粒在燃烧过程中不发生破碎。马利强发现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(见图 6)<sup>[10]</sup>。

### 5.1.5 孔隙结构的影响

研究认为<sup>[8, 29]</sup>,随着煤颗粒中孔隙体积和孔隙率的增加,挥发份有更多的释放渠道,可以更容易逃出颗粒,因此将减少颗粒的内部张力,将使破碎变得较不剧烈。图 7 反映了这种情况<sup>[8]</sup>:随着颗粒孔隙体积和孔隙率的增加,无烟煤颗粒破碎变得较不剧烈。但对于特殊煤种也有例外<sup>[27]</sup>:某些孔径和孔隙率较高的韩国无烟煤颗粒的破碎却相当剧烈。

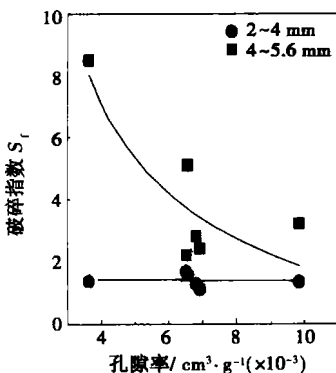


图 7 破碎指数随颗粒孔隙率变化情况

此外,煤的平衡水份含量及煤的受热变形性质也是影响其破碎的重要煤质因素。平衡水份含量较大和燃烧中经历塑性变型的无烟煤,其破碎较不剧烈;煤的一次破碎程度随煤的增锅膨胀系数(CSN)增加而减弱<sup>[4]</sup>。

### 5.2 颗粒径的影响

有研究认为<sup>[8]</sup>,粒径是比煤质对破碎影响更大的参数,大颗粒煤由于比小颗粒煤含有绝对数量更多的挥发份而更易于破碎。Chirone 的研究得到了煤的破碎比随颗粒径的增加而单调增加的结论(见图 8)<sup>[1]</sup>。他甚至发现煤的二次破碎程度也随着其初始煤焦

颗粒尺寸的增加而增大<sup>[2]</sup>。但对于某些特殊无烟煤,也有研究发现<sup>[12, 27]</sup>,大颗粒和小颗粒煤的热破碎性质较差,而中间粒度煤的热破碎程度较剧烈。另外,有相当多的研究认为<sup>[1, 5-6, 11]</sup>,煤的一次破碎存在有极限粒径,小于该粒径的颗粒不会发生破碎,极限粒径尺寸与煤种有关。

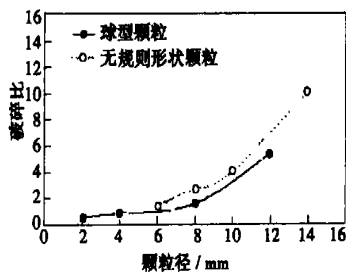


图 8 破碎比随颗粒径的变化情况

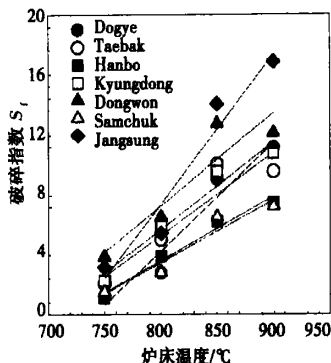


图 9 炉床温度对无烟煤破碎的影响

### 5.3 运行工况的影响

#### 5.3.1 温度的影响

随着炉膛温度的升高,无烟煤在流化床中的一次破碎变得更为剧烈(见图 9)<sup>[8]</sup>。这是容易理解的:一方面,温度升高使得颗粒内的温度梯度变大,所产生的热应力增大,破碎相应地变得剧烈;同时,温度升高也使挥发份析出的速率加快,使得颗粒内部的膨胀压力骤然增高,从而增大破碎强度。但温度变化对二次破碎的影

响不明显<sup>[2,6,12]</sup>。随着运行温度提高,无烟煤在流化床燃烧中发生的二次破碎程度有轻微减弱<sup>[7]</sup>。

### 5.3.2 停留时间的影响

一次破碎发生在挥发份析出的早期,早于或就在煤的塑性变形阶段。Zhang 发现一次破碎主要发生在投煤后的前 10 s 内,达到最大值后开始降低(见图 10)<sup>[26]</sup>。Cui 发现二次破碎也主要发生在燃烧的早期阶段<sup>[14]</sup>。

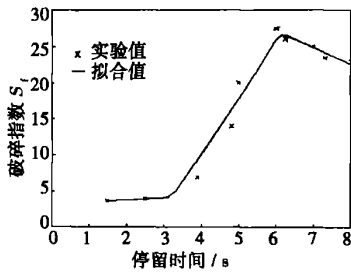


图 10 破碎指数随煤颗粒在流化床停留时间的变化

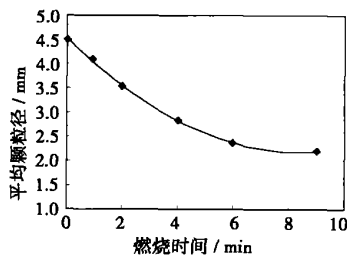


图 11 炉床颗粒平均粒径随时间的变化(亮煤,床温 1 173 K)

在流化床燃烧的初始阶段,无烟煤的破碎比快速增加,而后,由于大颗粒发生二次破碎和小颗粒燃尽等因素的综合作用,随着时间推移,破碎比停留在一个相对稳定的水平上<sup>[13]</sup>。研究发现<sup>[12]</sup>,在燃烧早期,入炉煤颗粒平均粒径迅速减小,随着燃烧进行,在二次破碎的作用下,颗粒的平均粒径衰减趋缓并趋于一个稳定值(见图 11)。

### 5.3.3 流化介质及流化速度的影响

无烟煤在空气中的一次破碎要比在惰性气体中的破碎更剧烈。Maiban 认为其原因是由于在反应性气氛中会增加颗粒的温度,从而使颗粒中残余挥发份更多地析出所致<sup>[6]</sup>。但研究也同时发现<sup>[2~3,14,16]</sup>,反应气体中氧的浓度对二次破碎行为却几乎没有影响。

另外,当流化速度增大时,颗粒间的碰撞加剧,会使二次破碎变得较为剧烈,燃烧过程中会产生更多细小颗粒,细颗粒在颗粒径分布份额中所占的比例增大(见图 12)<sup>[7]</sup>。

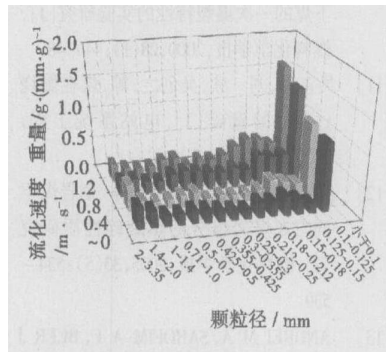


图 12 流化速度对无烟煤破碎的影响(韩国煤,  $N_2$ , 1 123 K, 2~3.35 mm)

## 6 破碎对燃烧的影响

煤的破碎影响了煤的燃烧反应性,并改变了给煤的粒度分布,直接决定了炉床内的固体颗粒浓度和物料的扬析夹带过程,炉内的传热过程和煤颗粒的燃烧过程。在许多情况下,特别是对于燃烧某些灰份较高的无烟煤,当循环流化床料是由煤自身燃烧产生的灰提供时,煤的破碎特性对于锅炉的燃烧和运行就有着特别重要的影响。

一方面,破碎影响了煤的燃烧反应性,对燃烧有正面作用:破碎会导致煤焦颗粒外壳的脱落,当燃烧反应由扩散控制时,破碎

使得灰层传质阻力减小,从而提高煤焦颗粒的燃烧反应速率;同时,破碎的结果使得颗粒总的孔隙率增加,也有利于提高煤焦的燃烧速率<sup>[10]</sup>。另一方面,破碎改变了给煤的粒度分布,提高了焦炭颗粒的磨蚀率,增加了可扬析颗粒数量。与大多数烟煤所发生的中心破碎(破碎后由一个颗粒变为几个粒径较小颗粒)的情况不同,不少无烟煤在流化床燃烧时发生圆周破碎<sup>[27]</sup>,破碎后生成几个稍大颗粒和许多细小颗粒。研究发现<sup>[11,15]</sup>,无烟煤在流化床燃烧中的破碎产生的绝大多数颗粒的粒径在 0.3 mm 以下,因此破碎会增加无烟煤在流化床燃烧中的可扬析颗粒数量。研究认为<sup>[29]</sup>,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。由于破碎的作用,在燃烧无烟煤的 CFB 锅炉中,炉膛稀相区烟气中的细粉浓度明显偏大<sup>[30]</sup>。另外,由于破碎提高了焦炭颗粒的总外部表面积,因而也会提高焦炭颗粒的磨蚀率;无烟煤流化床燃烧中的破碎导致了炉床中煤焦颗粒的球形度增加<sup>[6,12]</sup>。颗粒间磨蚀率的提高会增加流化床中不可循环颗粒数目,从而带来增加飞灰未燃碳含量的后果。

## 7 存在问题及研究工作展望

破碎研究存在的一个主要问题是如何实现物料的快速取样。目前,关于破碎后物料的取样还存在有一些不足:比如,在破碎研究中较常使用的“篮技术”取样法,其要求“篮子”的屏蔽尺寸要足够大,以允许床料能顺利通过篮子,但这样可能会屏蔽掉破碎产生的一些小颗粒,造成小于篮子屏蔽尺寸细小颗粒损失;而对于“抽吸取

样”,在抽吸过程中发生的颗粒碰撞破碎难于避免,会造成对破碎结果计算的误差。另外,大而规则的颗粒可能会造成抽吸管路堵塞。还有,取样过程中物料的迅速冷却也会产生温度应力,导致破碎,影响对破碎结果统计的准确性;同样,“翻转倾倒取样”也难于防止高温颗粒之间因碰撞而产生的新破碎和避免因聚冷造成温差应力破碎,因此也存在有统计误差;而“卸载取料”则难于实现快速取样。因此,发展一种快速、准确的取样(装置)方法对于正确理解无烟煤的热破碎规律很重要。另外,鉴于无烟煤的破碎具有一定的随机性,在以往的工作中,虽然发现破碎后颗粒的大部分质量分布仍集中于原粒径及其低一至二档的粒径档中<sup>[10,12]</sup>,但极少有研究者能建立起耦合影响破碎因素(包括煤质特性和运行参数)的破碎前后颗粒平均粒径之间的关系,尚无法给工程设计以量化指导,也是今后研究要着力解决的一个难点问题。

参考文献:

[1] CHIRONE R, MASSIMILLA L. Primary fragmentation of a coal in fluidized bed combustion [ A ] . 22th Symposium on Combustion [ C ] . Pittsburgh: The Combustion Institute, 1988. 267—279.

[2] CHIRONE R, SALATINO P, MASSIMILLA L. Secondary fragmentation of char particles during combustion in a fluidized bed [ J ] . *Combustion and Flame* 1989, 77: 79—90.

[3] CHIRONE R, MASSIMILLA L, SALATINO P. Comminution of carbons in fluidized bed combustion [ J ] . *Progress of Energy Combustion Science*, 1991, 17: 297—326.

[4] STUBINGTON J F, LINJEWILE T M. The effects of fragmentation on devolatilization of large coal particles [ J ] . *Fuel* 1989, 68: 155—160.

[5] DAKIC D, HONING G, VALK M. Fragmentation and swelling of various coals during

devolatilization in a fluidized bed [ J ] . *Fuel* 1989, 68: 911—916.

[6] MARBAN G, PIS J J, FUERTES A B. Characterizing fuels for atmospheric fluidized bed combustion [ J ] . *Combustion and Flame* 1995, 103: 41—58.

[7] LEE J M, KIM J S, KIM J J. Comminution characteristics of Korean anthracite in a CFB reactor [ J ] . *Fuel* 2003, 82: 1349—1357.

[8] LEE S H, KIM S D, LEE D H. Particle size reduction of anthracite coals during devolatilization in a thermobalance reactor [ J ] . *Fuel*, 2002, 81: 1633—1639.

[9] 张宏焘. 煤在流化床燃烧过程中的破碎特性及焦炭表面灰层扩散传质特性的研究 [ D ] . 杭州: 浙江大学, 1990.

[10] 马利强, 路霖, 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.

[11] 吴正舜, 刘欣, 吴创之, 等. 煤在燃烧过程中的破碎 [ J ] . *电站系统工程*, 2003, 19(2): 4—7.

[12] 何宏舟, 骆仲决, 方梦祥, 等. 龙岩煤不同宏观煤岩组分的热破碎性质研究 [ J ] . *燃料化学学报* 2005, 33(5): 534—539.

[13] ANDREI M A, SAROFIM A F, BEER J M. Time-resolved burnout of coal particles in a fluidized bed [ J ] . *Combustion and Flame* 1985, 61: 17—27.

[14] CUI Y B, STUBINGTON J F. In-bed char combustion of Australian coals in PFBC. 3. Secondary fragmentation [ J ] . *Fuel* 2001, 80: 2245—2251.

[15] DACOMBE B, POURKASHANIAN M, WILLIAMS A, *et al.* Combustion-induced fragmentation behavior of isolated coal particles [ J ] . *Fuel* 1999, 78: 1847—1857.

[16] SUNDBACK C A, BEER J M, SAROFIM A F. Fragmentation behavior of single coal particle in a fluidized bed [ A ] . 20th Symposium on Coal Combustion [ C ] . London: 1984. 1495—1520.

[17] WINTER F, LIU X. Ash formation during CFB coal combustion—a laboratory study [ A ] . *Proceedings of the 7th International Conference on Circulating Fluidized Beds* [ C ] . Canada: CSCE, 2002. 653—660.

[18] STUBINGTON J F, SASONGKO D. On the heating rate and volatile yield for coal particles injected into fluidized bed combus-

tors [ J ] . *Fuel* 1998, 77: 1021—1025.

[19] CHIRONE R, MASSIMILLA L. The application of weibull theory to primary fragmentation of a coal during devolatilization [ J ] . *Power Technology*, 1989, 57: 197—212.

[20] 李爱民, 池涌, 严建华, 等. 大颗粒碳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.

[21] FUERTES A B, MARBÁN G. Modelling gasification reactions including the percolation phenomenon [ J ] . *Chemical Engineering Science*, 1994, 49(22): 3813—3821.

[22] LIU G, WU H, GUPTA R P, *et al.* Modeling the fragmentation of non-uniform porous char particles during pulverized coal combustion [ J ] . *Fuel* 2000, 79: 627—633.

[23] CHEN W Y, NAGAEAJAN G, ZHANG Z P. Stochastic modeling of devolatilization-induced coal fragmentation during fluidized-bed combustion [ J ] . *Ind Eng Chem Res* 1994, 33(1): 137—145.

[24] CUI Y B, STUBINGTON J F. A mathematical model of in-bed char combustion of Australian coals in PFBC [ J ] . *Fuel* 2001, 80: 2049—2056.

[25] MARBAN G, PIS J J, FUERTES A B. Simulation of secondary fragmentation during fluidized bed combustion [ J ] . *Powder Technology*, 1996, 89: 71—78.

[26] ZHANG H T, CEN K F, YAN J H, *et al.* The fragmentation of coal particles during the coal combustion in a fluidized bed [ J ] . *Fuel* 2002, 81: 1835—1840.

[27] LEE J M, KIM J S, KIM J J, *et al.* Combustion and fragmentation characteristics of Korean anthracite [ A ] . *Sixteenth International Conference on Fluidized Bed Combustion* [ C ] . Nevada: CIBO, 2001. 889—898.

[28] BERBAU FORSCHUNG Co. Rapid pyrolysis of bituminous coal in air [ R ] . Germany: Berbau-Forschung Co., 1976.

[29] BROWN R G, AHRENS J, CHRISTOFIDES N. The contributions of attrition and fragmentation to char elutriation from fluidized beds [ J ] . *Combustion and Flame* 1992, 89: 95—102.

[30] 何宏舟. CFB 锅炉洁净燃烧福建无烟煤的理论及试验研究 [ D ] . 杭州: 浙江大学, 2005.

( 辉 编 辑 )

无烟煤流化床燃烧中热破碎现象的研究综述 = A Survey of the Research Findings Concerning the Thermal Fragmentation Phenomena of Anthracite During its Combustion in a Fluidized Bed [刊, 汉] / HE Hong-zhou (Energy and Power Engineering Research Institute under the Jimei University, Xiamen, China, Post Code: 361021), LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa (State Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 221 ~ 226

The parameters used for judging fragmentation degrees are summarized. The mechanism governing the generation of thermal fragmentation is analyzed along with a study of the factors having an impact on thermal fragmentation and a discussion of the effect of fragmentation phenomena on combustion. Based on the above, the authors have come to the conclusion that during the process of combustion in a fluidized bed, the fragmentation of anthracite assumes a comparatively high random character and is greatly influenced by coal quality. Coal particle size, furnace bed temperature, residence time, fluidized medium and fluidization speed etc. also have an important influence on the fragmentation of coal. The fragmentation of coal is conducive to enhancing the combustion rate of coal tar particles, but at the same time increases the quantity of particles liable to be elutriated inside the furnace bed, thus resulting in an increase of unburned carbon content in fly ash. The realization of an exact and quick sampling of fragmented materials and the establishment of a proper relationship between average particle sizes before and after the fragmentation pertain to problems yet to be solved in the research of fragmentation phenomena. **Key words:** anthracite, fluidized bed, fragmentation, survey

生物质燃料再燃研究进展 = Recent Advances in the Study of Biomass Fuel Reburning [刊, 汉] / DUAN Jia, LUO Yong-hao, CHEN Wei (Mechanical and Power Engineering College under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 227 ~ 230

The biomass is a kind of regenerative energy source and biomass fuel features a zero amount of net CO<sub>2</sub> emissions. The use of biomass fuel can reduce greenhouse gas emissions meeting the requirements for realizing sustainable development. The modes of biomass fuel reburning include: direct reburning, indirect and advanced reburning. The above three modes can without exception effectively reduce the NO<sub>x</sub> emissions. A relatively large amount of research involves the use of wood for direct burning and the use of the gasified gas of artificially simulated biomass represents an effective means for the study of indirect reburning. A variety of factors can influence reburning. They include: biomass fuel types, its size, constituent elements, fuel-bearing gas, fuel injection location, burn-off air and excess air factor in the reburning zone. Finally, some proposals for furthering the study of biomass fuel reburning have been put forward. **Key words:** biomass fuel, direct reburning, indirect reburning, advanced reburning

燃气轮机入口空气冷却系统的技术经济性能 = Technical Performance and Cost-effectiveness of Gas Turbine Inlet Air Cooling Systems [刊, 汉] / LI Hui, FU Lin, ZHU Ying-xin (Department of Architectural Science and Technology, Qinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 231 ~ 234

Atmospheric ambient-temperature has a great influence on the performance of gas turbines. The adoption of cooling technology to cool down the air at the inlet of a gas turbine can improve its performance. The performance and cost-effectiveness of different inlet air cooling systems is compared and analyzed, which have been installed on machine units in Beijing, Harbin, Shanghai and Guangzhou. The research results indicate that in the above-mentioned four cities with typical Chinese climates, the evaporative cooling mode can maximally enhance the power generation capacity of gas turbines by 4% to 7%. However, such a cooling mode can only increase the annual power generation capacity by less than 1%. If the inlet air temperature is cooled down to 10 °C with the help of an electrical refrigerating machine or an absorber cooler, the power generation capacity of a gas turbine could be increased by a maximum of 9% to 15% and the annual ca-