

# 加福煤粉燃烧过程的微观形态观察

(东南大学热能工程研究所) 顾中铸 张永廉 蔡 崧

**摘 要:**应用光学显微镜和扫描电子显微镜对加福煤粉燃烧过程中微观形态的变化规律进行了详细的观察。研究结果表明,加福煤粉燃烧过程中出现白球、棕色球、黑球、黑块 I、黑块 II 这五种形态各异的颗粒,热力工况对其燃尽过程有影响,降低飞灰含碳量关键在于设法将黑块 I 完全燃烧,使黑块 II 尽可能地着火燃烧。

**关 键 词:**煤粉; 燃烧; 光学显微镜; 扫描电子显微镜; 飞灰

中图分类号: TQ534

文献标识码: A

## 1 引言

如何使燃料安全、经济地燃烧,是燃烧界一个十分重要的研究课题。福建加福无烟煤粉由于其挥发份极低且不能集中释放,固定碳的燃烧速度低等特点,着火与燃尽非常困难,为目前世界上最难烧的煤种之一。为了探索降低燃用加福煤粉锅炉飞灰含碳量的有效途径,曾在一维炉内进行了加福煤的燃尽试验,目的在于研究热力工况对加福煤粉燃尽过程的影响。一维煤粉炉试验台取样口位置如表 1 所示。共做了 4 种工况,见表 2,其中工况 I 属正常燃烧;工况 II 是缺氧燃烧;工况 III 和工况 IV 分别为低温和高温(延长高温区)燃烧。表中符号:  $V_1$ 、 $V_2$  分别为一次和二次风量,  $T_1$ 、 $T_2$  为一次和二次风温。 $\alpha$  为过剩空气系数,  $\tau$  为炉内停留时间。

试验结果表明,热力工况对加福煤粉的燃尽有影响,低温和缺氧对燃尽不利;提高炉内平均温度水平(扩大高温区)将降低飞灰的含碳量;在现有燃烧条件下,加福煤粉很难燃尽。为了进一步探索加福煤粉燃烧飞灰含碳量高的原因,对一维炉试验取样颗粒进行了光学显微镜和扫描电子显微镜观察,旨在

研究煤粉燃烧过程中微观形态的变化规律。

表 1 取样口离喷口的距离(mm)

NO	1-6	2-6	3-6	4-6	6-6
距离	300	625	950	1 275	1 925

表 2 试验工况

工况	$T/^\circ\text{C}$						$V_1$	$V_2$	$T_1$	$T_2$	$\alpha$	$\tau$
	1-6	2-6	3-6	4-6	6-6	$\text{m}^3/\text{h}$						
I	1100	1580	1560	1480	1060	3.73	3.15	30	200	1.71	3.83	
II	1200	1500	1520	1430	1040	3.73		30		0.63	7.05	
III	1060	1360	1310	1280	1120	3.73	3.15	30	200	1.17	4.15	
IV	1300	1600	1560	1560	1300	3.73	3.15	30	200	1.17	3.59	

## 2 光学显微镜观察

利用 DV-4 型光学显微镜对上述一维炉取样颗粒进行认真观察,得到的初步印象为:

加福煤粉在炉内燃烧后将出现以五种典型颗粒形态为基础的颗粒群。

图 1 给出了工况 I、工况 IV 各取样口五种颗粒形态的质量百分数变化情况,表 3 列出了四种工况下,第 6-6 取样口的五种颗粒形态的质量百分数。由此可以看出:

(1)离取样口位置越远,白球的质量百分数明显增加;黑块 I 的质量百分数明显减少;白球的增加主要是由于黑块 I 的减少;棕色球开始出现在 4-6 取样口。见图 1(a)。

(2)比较图 1(a)、(b)可知,高温工况的白球、棕色球质量百分数明显增加;黑块 I 的质量减少速度较快;而黑块 II 在燃烧过程中的质量份额则几乎保持不变。

(3)从表 3 可以发现,热力工况对飞灰颗粒形态的质量分布是有影响的。缺氧(工况 II)、低温(工况

收稿日期: 1999-01-19; 修订日期: 1999-05-04

作者简介: 顾中铸(1963-),男,合肥人,博士研究生,教师,主要从事燃烧污染物控制方面的研究。通讯处: 210096 南京·东南大学热能工程

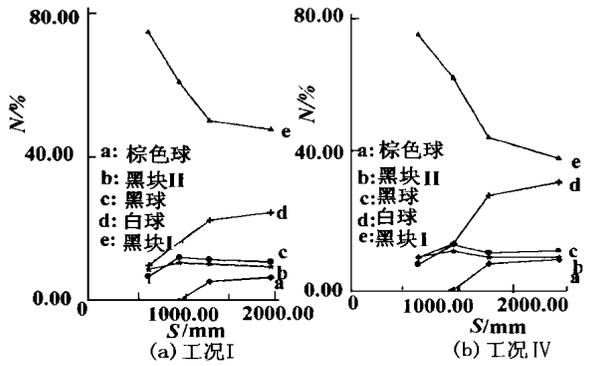


图 1 五种颗粒形态的质量百分数  
离喷嘴距离的变化

III 会使白球的质量百分数减少, 黑块 I 的质量百分数增加; 扩大高温区 (工况 IV) 可以提高加福煤粉的燃尽度。然而, 即使是在高温条件下, 最终取样口的颗粒中, 黑块 I、黑块 II 仍分别占有 38.63% 和 9.53% 的质量份额。

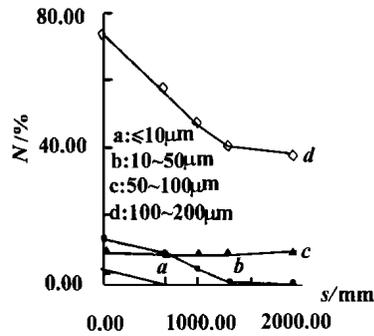


图 2 工况 I, 黑块 I 的粒度  
变化曲线

应用 X-650 型电子探针对上述五种典型颗粒形态进行了元素成分分析, 测试结果表明黑块 I、黑块 II、白球、黑球、棕色球的含碳量分别为 61.43%、85.87%、1.89%、12.6%、3.12%。由此可见, 黑块 I、黑块 II 是加福煤燃烧飞灰含碳量高的主要原因。

图 2 给出了工况 I 条件下各取样口, 黑块 I 的粒度分布的变化情况, 最左边是原煤粉的粒度分布。由图可以看出, 10  $\mu\text{m}$  以下的细颗粒在 2-6 取样口之前即已完全燃尽; 10~50  $\mu\text{m}$  的颗粒也在 4-6 取样口之前基本燃尽; 没有燃尽的是 50  $\mu\text{m}$  以上的较大颗粒, 其中 100~200  $\mu\text{m}$  的大颗粒基本没有燃烧。因此, 提高原煤粉细度, 尤其是减少其中较大颗粒的份额, 可以降低飞灰含碳量。

综上所述, 热力工况对加福煤粉燃尽过程中的

颗粒形态的变化是有影响的, 但在现有锅炉结构及运行条件下, 只有一部分煤粉 (主要是细煤粉) 能基本燃尽; 而相当一部分 (主要是大颗粒) 不能燃尽; 还有一小部分 (黑块 II) 甚至没有被点燃。

表 3 6-6 取样口各颗粒形态的质量百分数

	白球 (%)	棕色球 (%)	黑球 (%)	黑块 I (%)	黑块 II (%)
I	24.75	6.65	10.97	47.96	9.67
II	11.10	5.08	10.14	63.54	10.14
III	12.33	4.87	12.01	60.14	10.55
IV	31.65	8.79	11.38	38.63	9.55

### 3 扫描电子显微镜分析

采用 JSM-35CF 型扫描电子显微镜对前述典型取样颗粒进行扫描观察, 以便得到更为真实的煤粉燃尽过程的微观结构特征。

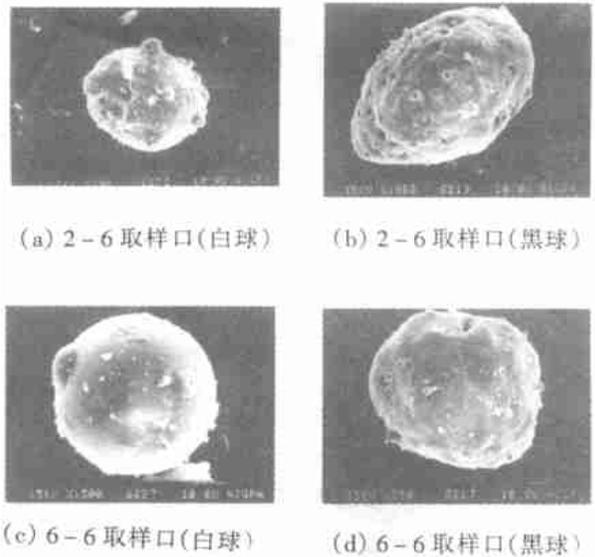


图 3 工况 I, 第 2-6、6-6 取样口白球, 黑球  
扫描图形

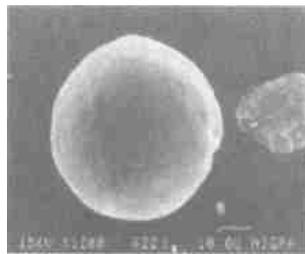


图 4 工况 I, 第三取  
样口棕色球扫  
描图形

图 3 为工况 I, 第 2-6、6-6 取样口白球和黑球的电子扫描图。其中图 (a)、(b) 分别为第 2-6 取样口处的白球和黑球的扫描图形, 由于煤粉入炉燃烧才不久, 外观呈类球形, 表面不平, 粘附有少量细颗粒。其中白球表面有隆

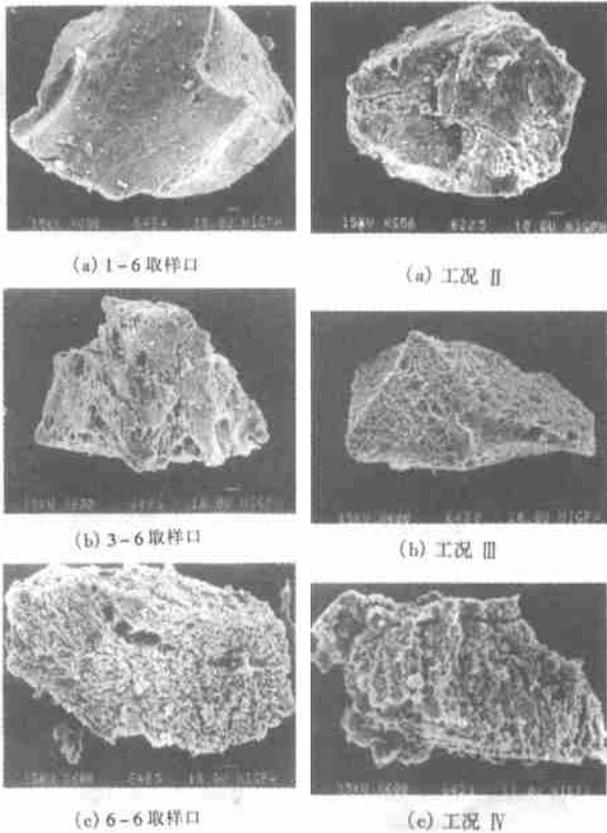


图 5 工况 I , 不同取样口黑块 I 的扫描图形

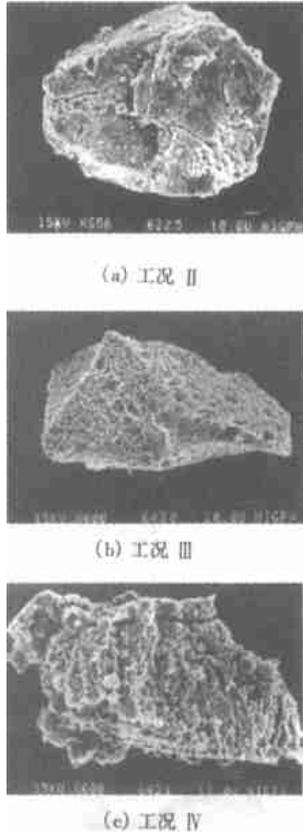


图 6 不同工况下, 第 6-6 取样口黑块 I 的扫描图形

起及少量孔洞, 而黑球表面孔洞较多。图(c)、(d)为第 6-6 取样口的白球和黑球电子扫描图, 与 2-6 取样口相比, 表面孔洞明显减少, 并进一步球化。

图 4 为工况 I 、第 6-6 取样口的棕色球电子扫描图, 其外形与白球基本相同。

图 5(a)、(b)、(c)分别为工况 I 第 1-6、3-6 和 6-6 取样口黑块 I 的电子扫描图。由图可见, 黑块 I 在炉内停留期间形态变化较明显。入炉初期(1-6 取样口)表面开始出现一些孔洞, 到炉膛中部(3-6 取样口)变得棱角钝化, 表面孔洞增多, 变大, 有许多裂痕, 并粘附有一些灰珠, 在炉膛尾部(6-6 取样口)棱角消失, 孔洞增大, 呈蜂窝状, 说明黑块 I 已着火燃烧, 但未燃尽。

图 6(a)、(b)、(c)分别为工况 II (缺氧)、工况 III (低温)、工况 IV(延长高温区)在第 6-6 取样口的黑块 I 的电子扫描图。由图看出热力工况对黑块 I 的燃尽有影响。与工况 I 相比, 缺氧时表面烧蚀程度较轻, 低温时呈浅蜂窝状, 延长高温区, 烧蚀加深, 蜂

窝状明显加深, 表面粘附的灰珠较多。

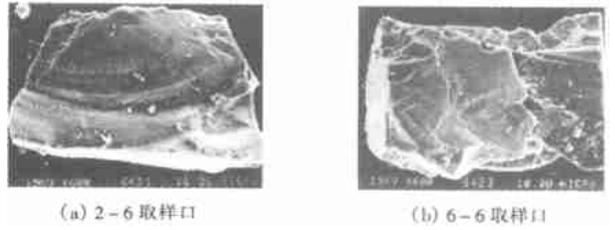


图 7 工况 IV, 不同取样口黑块 II 的扫描图形

图 7(a)、(b)分别为工况 IV, 第 2-6、6-6 取样口黑块 II 的电子扫描图, 看来黑块 II 在炉内停留期间形态变化甚少。结构紧密, 表面几乎无孔, 无裂痕, 说明基本未着火燃烧。

综上所述, 通过电子扫描进一步证实黑块 I 为已经历着火燃烧, 但未燃尽的煤粉; 热力工况对黑块 I 的燃尽有影响; 而黑块 II 的变形能力很差, 基本上未着火燃烧。

### 4 结论

(1)热力工况对加福煤粉的燃尽过程有影响, 扩大高温区、提高炉内温度水平可以降低飞灰的含碳量; 缺氧和低温对燃烧不利;

(2)在锅炉燃烧条件下, 加福煤粉在燃烧过程中形成白球、棕色球、黑球、黑块 I 和黑块 II 五种典型颗粒形态。改变热力工况, 这五种典型颗粒形态不变, 仅仅使各种颗粒形态所占的比例和含碳量有所变化。

(3)黑块 I 、黑块 II 的含碳量较高, 是飞灰含碳量高的主要原因。但在现有燃煤锅炉条件下, 黑块 I 燃烧缓慢, 黑块 II 很难着火燃烧。

### 参考文献

- [1] 李林, 周剑雄. 矿物的电子显微镜研究. 北京: 地质出版社, 1980.
- [2] 张永廉, 顾中铸. 加福煤粉燃烧飞灰的电子探针测定. 东南大学学报, 1989, 19(4).
- [3] 周剑雄. 矿物微区分析概论. 北京: 科学出版社, 1980.

(复 编)

tion, gas-solid fluidized bed, mixing, non-uniformity, oscillation

径向浓淡旋流燃烧器出口扩锥壁温分布及其对抗磨性能的影响 = **Temperature Distribution at the Expansion Cone Wall of a Radial Dense-dilute Swirl Burner Outlet and Its Effect on Abrasion Resistance** [刊, 中]/Niu Haifeng, Li Zhengqi, Sun Rui, (Harbin Institute of Technology), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 15 ~ 17

An analysis is performed of the abrasion resistance loss of a central expansion cone at a radial dense-dilute swirl burner outlet. The wall temperature distribution of the central expansion cone under actual operating conditions is studied and determined. The results obtained can serve as a reliable basis for the rational selection of materials for the central expansion cone, contributing to its enhanced high-temperature abrasion resistance. **Key words:** burner, abrasion, wall temperature distribution

层板室壁无相变流动时的冷却性能 = **Cooling Performance of a Laminated Platelet Wall in the Absence of a Phase-change Flow** [刊, 中]/Wu Huiying, Cheng Huier, Deng Shu (Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 18 ~ 19

An analysis is conducted of the liquid coolant heat transfer in a laminated platelet wall. As a result, identified is a performance parameter  $m_{1/2}$ , which exercises an influence on the platelet wall cooling effectiveness. The above-cited parameter has a bearing on the platelet passage heat exchange area, heat exchange factor and the coolant specific heat. With the platelet thrust chamber serving as an example the authors have determined the effect of the performance parameter  $m_{1/2}$  on the platelet inner wall temperature and the temperature difference between the inner and outer wall. **Key words:** laminated platelet wall, cooling performance, thrust chamber, wall temperature

加福煤粉燃烧过程的微观形态观察 = **Microscopic state Observations of Jiafu Pulverized-Coal Combustion Process** [刊, 中]/Gu Zhongzhu, Zhang Yonglian, Cai Song (Southeastern China University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 20 ~ 22

With the help of an optical microscope and a scanning electronic microscope conducted are the detailed observations of the microscopic-state change relationship of a Jiafu pulverized-coal combustion process. The results of the investigation indicate that there appear in the Jiafu pulverized-coal combustion process five different types of particles, i. e., white, brown and black balls, black lump I and black lump II. The burn-off process is influenced by thermodynamic operating conditions. The key factor in reducing the carbon content of fly ash consists in an attempt to achieve a complete burning of the black lump I and an maximum ignition of the black lump II. **Key words:** pulverized coal, combustion, optical microscope, scanning electronic microscope, fly ash

100MW 螺旋管高压加热器封头应力分析 = **Stress Analysis of the High-pressure Spiral-tube Heater Head of a 100 MW Unit** [刊, 中]/Lu Yue, Zhang Jianping, Jin Jiadong (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 23 ~ 25

Through the use of a finite element method analyzed and evaluated in this paper is a high-pressure heater head. **Key words:** high-pressure heater, mechanics model, boundary conditions, finite element analysis

啮合齿向误差对齿轮承载能力的影响 = **The Effect of Gear Mesh Error on Gear Loading Capacity** [刊, 中]/Yao Shaoming, Cheng YinLi, Huang QinHai (Harbin No. 703 Research Institute), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). — 26 ~ 27

The authors have come up with a method for calculating gear mesh error. Under this method the gear axial inclination angle is divided into two components with the gear mesh error being calculated separately and then added up as per direc-