

# 基于灰颗粒的物理特性为分类原则的试验研究

徐有宁, 李洪涛

(沈阳工程学院 沈阳市循环流化床燃烧技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110136)

**摘 要:** 循环流化床(CFB)锅炉炉内的燃烧及传热与炉内床料的状态密切相关, 而炉内床料主要是由燃煤含有的矿物组分经过燃烧、爆裂和磨损过程形成的。文中对 6 种煤样在固定床燃烧后, 使用可视化显微仪, 获取了灰颗粒的微观形貌特征, 根据灰颗粒的机械强度和耐磨性能的不同, 将灰颗粒定义为 3 类不同性质的灰。以此为基点, 采用固定床燃烧后冷态振动筛分和流化床实验台热态流化后筛分的方法, 研究了不同燃烧温度下升温速率对灰颗粒粒径变化的影响, 以及不同燃烧温度下燃烧时间对灰颗粒粒径变化的影响, 推演了不同煤样在燃烧过程中的演化特征。结果表明: 3 类灰颗粒在不同的燃烧温度和时间的演化过程存在明显的不同, 从而为预测循环流化床中的床料粒径分布提供了理论依据。

**关 键 词:** 灰颗粒; 磨损; 破碎; 归类; 演化特征

中图分类号: TK229. 6 文献标识码: A

## 引 言

循环流化床中的床料粒径分布影响煤在其中燃烧过程中的传热传质等特性, 也影响床内的热负荷分布。在对循环流化床燃烧进行模拟计算过程中, 计算床料粒径分布是必不可少的过程<sup>[1]</sup>。在以煤灰为床料的循环流化床中, 煤中矿物质如何转化成灰, 这些灰在床中的演化将决定了循环流化床的粒径分布<sup>[2~3]</sup>。为了得到循环流化床中床料的粒径分布, 文献[4~9]对煤在循环流化床中燃烧的破碎和磨损行为进行了大量的研究, 研究表明煤的特性和煤燃烧条件会影响灰颗粒的演化过程。比如, 床内流化速度的提高会加剧颗粒的磨损, 从而产生更多的细颗粒。迄今为止, 对于循环流化床中给煤的碎裂及成灰基本达成共识, 即通常经历一系列的热解、破碎和燃烧过程, 如图 1 所示。这些研究者虽考虑到煤灰的硬度不同, 磨损特性也不相同, 但始终没有人明确提出根据灰颗粒的物理特性作为分类原则对灰颗

粒的演化进行研究, 因此, 这种笼统破碎和磨损规律使人们无法在继续的研究中将其作为依据。为解决此问题, 对国内运行的 6 台循环流化床电站锅炉煤样和灰样进行实验研究, 将灰颗粒定义为 3 类不同性质的灰, 分析了不同性质的灰颗粒在燃烧过程中的演化特征。

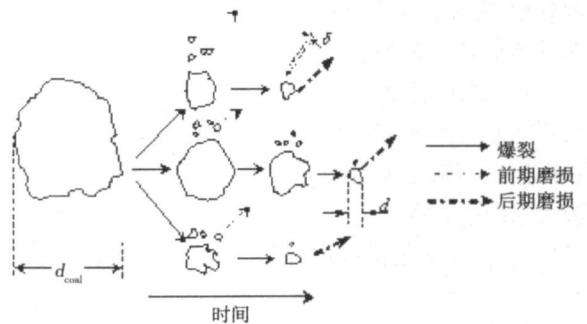


图 1 煤颗粒破碎模型

表 1 煤质特性

|                                  | DP   | HG   | LP   | JX   | JZ   | SB   |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $C_{daf} / \%$                   | 82.9 | 71.4 | 86.1 | 78   | 85.6 | 78.1 |
| $H_{daf} / \%$                   | 5.8  | 8.1  | 5.3  | 5    | 5.1  | 6.8  |
| $O_{daf} / \%$                   | 9.2  | 17.6 | 12.1 | 6.2  | 6.6  | 13   |
| $N_{daf} / \%$                   | 1.5  | 1.9  | 1.7  | 1.3  | 1.1  | 1.3  |
| $S_{daf} / \%$                   | 0.6  | 1    | 1.5  | 1.0  | 1.5  | 0.9  |
| $A_d / \%$                       | 39.3 | 42.7 | 43.4 | 35.1 | 30.7 | 39.3 |
| $M_{ar} / \%$                    | —    | 17.9 | —    | —    | 13.9 | 8.5  |
| $Q_{net, ar} / MJ \cdot kg^{-1}$ | 10.5 | 13.6 | 18.2 | 17   | 15.5 | 12.7 |
| $C_d^f / \%$                     | 37.6 | 28.4 | 37.9 | 44.1 | 51.1 | 36.8 |
| $V_d^f / \%$                     | 23.1 | 28.9 | 18.7 | 20.8 | 18.2 | 23.9 |
| $M_{ar}^f / \%$                  | 2.9  | 12.7 | 1.6  | 1.7  | 9.9  | 9.1  |

## 1 灰颗粒的分类

燃煤颗粒进入流化床进行燃烧后, 形成的灰颗

收稿日期: 2007-01-22; 修订日期: 2007-03-12

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2004-527); 沈阳市科技计划基金资助项目(1041037-4-02)

作者简介: 徐有宁(1962-)男, 辽宁沈阳人, 沈阳工程学院教授, 博士

粒就处于持续的磨损状态, 只有机械强度足够大的灰颗粒才能够保持颗粒状, 并以一定的粒径存在于燃烧系统中。因此, 直接分析流化床床料的物理特征对灰进行分类是不可取的。

本文利用可视化显微仪记录了 6 种不同煤样在固定床燃烧后灰样的特征图像, 如表 1 和图 2~图 4 所示。表 1 中 DP、HG、LP、JX、JZ、SB 分别为东旁、皇姑、乐平、锦西、锦州、沈北热电厂选用煤种。

实验将放置在耐火网上的煤样投入到预热温度为 800 °C 马弗炉中加热, 采用耐火网的目的是确保有足够的氧气使得煤样完全燃烧, 并保持温度恒定, 大约 30~60 min 后 (根据煤样的尺寸和形状确定) 煤颗粒燃尽。对于有些较软的灰样, 为了避免由于更换背景而引起的破碎, 则直接以耐火网为背景。

根据不同煤样的实验结果, 可将煤燃烧后的组分归为 3 类 (第一类灰颗粒、第二类灰颗粒、第三类灰颗粒)。

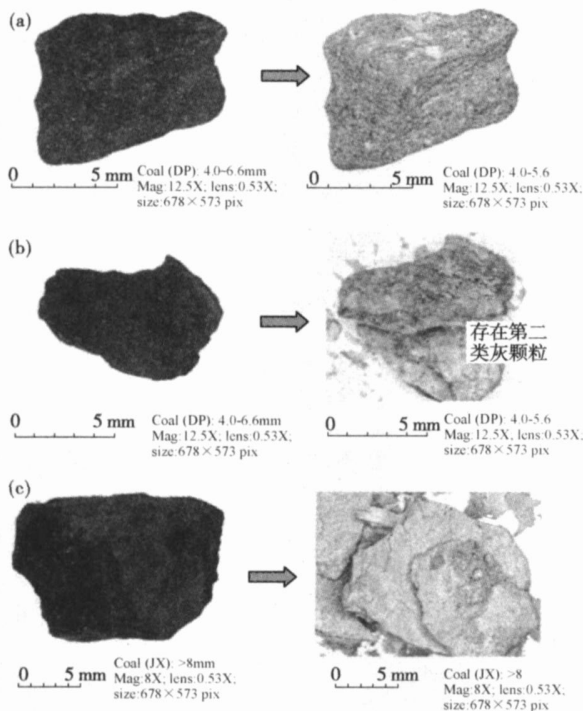


图 2 第一类灰颗粒典型特征

第一类灰颗粒指的是灰颗粒较硬且不易磨损的灰颗粒, 这类灰颗粒主要来源于煤矸石或是包含石英及黄铁矿等较硬矿物质的煤颗粒, 如图 2 所示。如果这类灰颗粒具有各向同性, 则一般不会有碎颗粒存在, 如图 2(a) 所示; 此外, 这类灰颗粒在燃烧后, 从外观来看, 具有层状结构且棱角分明。

第二类灰颗粒指的是灰颗粒较为蓬松, 粘结性

不强, 易于破碎的灰。这类灰颗粒通常能够保持原始煤样的形状和大小, 但是受到磨损易于破碎为小颗粒, 如图 3 所示。也存在一些煤样在燃烧形成的灰颗粒具有膨胀现象, 如图 3(c) 所示。值得注意的是: 在大的煤样燃烧后形成的灰颗粒中, 第一类灰颗粒和第二类灰颗粒可能同时存在, 如图 2(b) 所示。

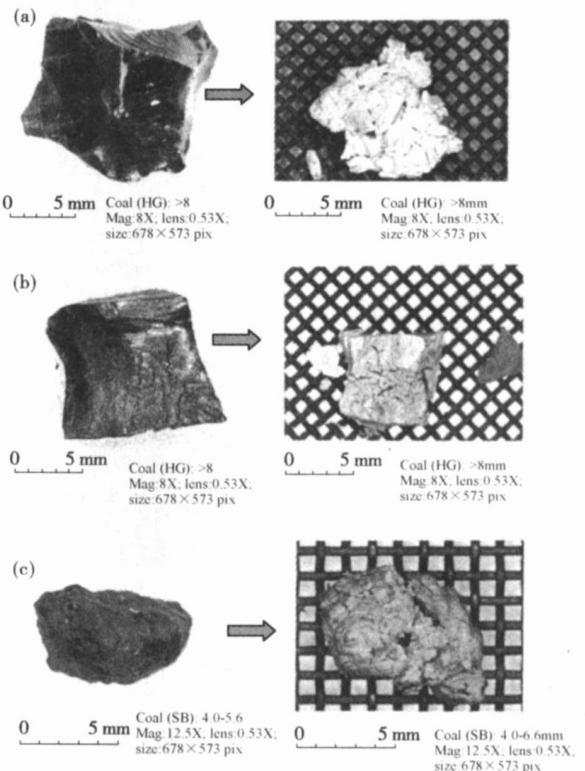


图 3 第二类灰颗粒典型特征

第三类灰颗粒指的是煤燃烧后直接生成的粒径小于 10 μm 的灰颗粒, 这一类灰颗粒以飞灰的形式离开锅炉, 对床料粒径分布没有影响。从图像上看, 与煤样的粒径相比, 燃烧后残留物的粒径明显变小。从本质上说, 是由于煤中细微弥散的矿物质, 它们相互之间的作用力非常小, 燃烧就能够使得颗粒分离。

依据本文提出的灰颗粒分类原则将煤划分为 3 类, 也就是确定煤中 3 类灰颗粒份额, 再根据不同种类灰颗粒含量的比例定性煤的种类。如煤中某类灰颗粒的比例超过 50%, 或这类灰颗粒在 3 种灰中比例最高, 则把此种煤定为这类灰的煤。

## 2 灰颗粒的粒径分布特征

### 2.1 不同燃烧温度下升温速率对灰颗粒粒径变化的影响

温度对煤的破碎行为有很大的影响, 相同的煤, 不同的燃烧温度, 或不同的升温速度将导致煤燃烧

时有不同的破碎程度<sup>[4]</sup>。本文采用马弗炉静态燃烧冷态振动筛分的方法研究了燃烧温度和升温速率对灰颗粒粒径变化的影响。

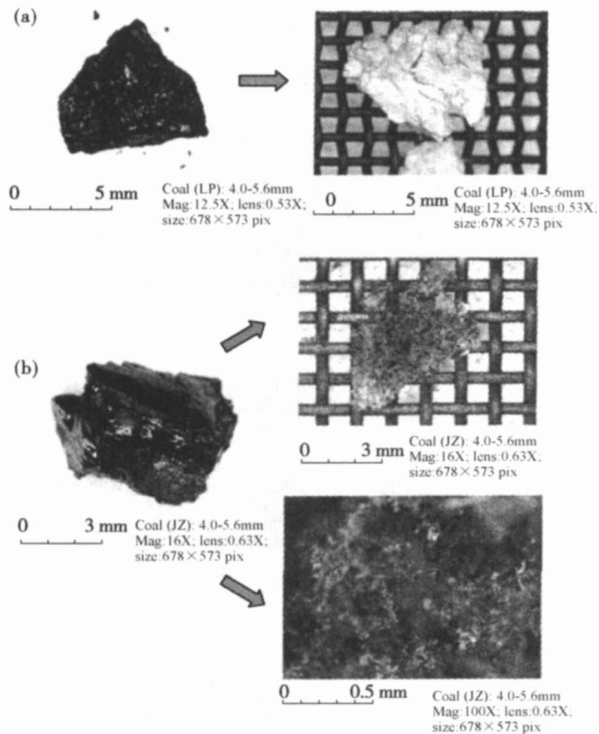


图 4 第三类灰颗粒典型特征

图 5 和图 6 分别反映了在马弗炉中随燃烧温度变化, DP 煤和 HG 煤在两种不同加热方式下的灰颗粒粒径变化的情形。第一种采用直接将煤样投入到预热温度并保持燃烧 1 h; 另一种采用冷态逐渐升温到设定温度后保持燃烧 1 h, 升温速率为 8 °C/min。在空气中完全冷却后, 然后在振筛机中用 1.5 mm 振幅, 振筛约 50 min, 测量其灰颗粒与原煤样质量平均粒径减少量。其中按照本文所采用的分类方法, 可将 DP 煤归于第一类灰的煤, HG 属于第二类灰的煤。

在质量平均颗粒粒径相似的情况下, 对两种煤样采用不同的升温方式。实验发现: 两种煤样以不同的升温方式燃烧后, 经过筛分形成的灰颗粒粒径均减少; 但对于第一类灰的煤, 采用直接将煤样投入到预热温度比采用冷态逐渐升温到设定温度后完全燃烧所形成的灰颗粒粒径减少的程度要高, 且第一类灰的煤燃烧后形成的灰颗粒粒径变化程度随燃烧温度的升高变化越明显。对于不同的加热方式, 第二类灰的煤在改变初始设定温度条件下, 粒径变化的程度不是很大, 但筛分后质量平均粒径明显变小。由此, 可以推断出加热速率对第一类灰颗粒的影响

程度要高于对第二类灰颗粒的影响, 而第二类灰颗粒在磨耗过程中, 粒径变化明显。

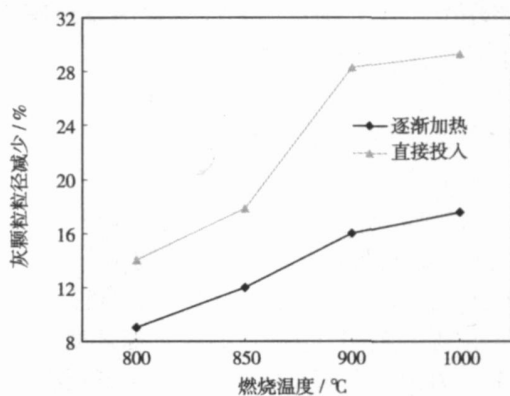


图 5 燃烧温度和加热速度对第一类灰颗粒的煤的粒径的影响

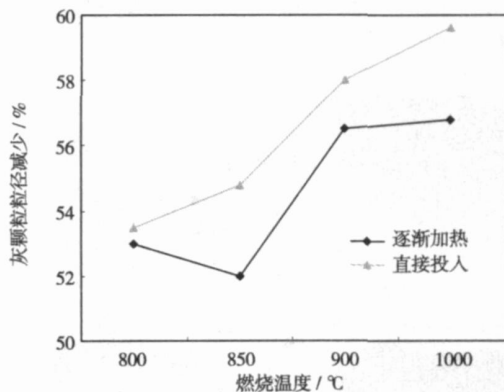


图 6 燃烧温度和加热速度对第二类灰颗粒的煤的粒径的影响

## 2.2 不同燃烧温度下燃烧时间对灰颗粒粒径变化的影响

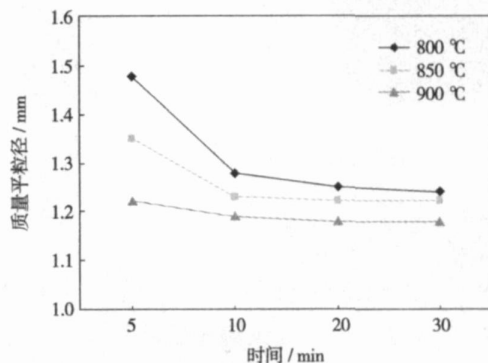


图 7 不同燃烧温度下, 第一类灰颗粒粒径随时间的变化

固定床燃烧后冷态振动筛分的方法与循环流化床实际燃烧过程不可避免地存在一定差别, 本文还

在循环流化床实验台上进行了不同燃烧温度下, 煤粉燃烧时灰颗粒质量平均粒径随运行时间的减少的热态实验。图 7 和图 8 分别反映了第一类灰颗粒和第二类灰颗粒的煤在不同燃烧温度下, 其炉底灰颗粒质量平均粒径随运行时间的变化结果。在实验中存在灰分对粒径分布的影响, 为了解决这个问题, 采用添加 0.25 mm 的砂粒, 使其折算为收到基灰分为 50%。添加的砂粒的质量可由下式求得:

$$m_{\text{con}} = (1 - 2A_{\text{ar}})m_c \quad (1)$$

式中:  $m_{\text{con}}$ —所需添加的砂粒的质量;  $A_{\text{ar}}$ —所用煤种的收到基灰分;  $m_c$ —煤样的质量。

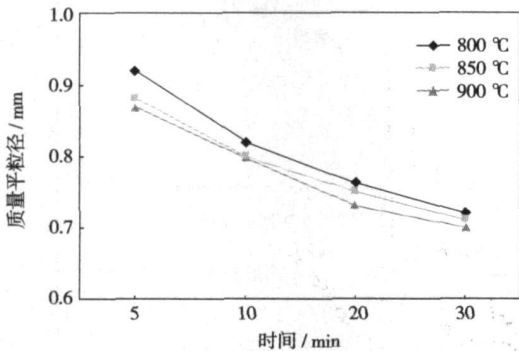


图 8 不同燃烧温度下, 第二类灰颗粒粒径随时间的变化

在不同种类的煤的灰颗粒粒径随燃烧温度和时间变化的实验中, 分别采用折算灰量为 50% 时质量平均粒径为 2 mm 的 DP 煤和 HG 煤, 其中 DP 煤的干

燥基灰分为 39.3%, HG 煤的收到基灰分为 42.7%。在循环流化床实验台上采用流化风速 3.6 m/s 进行热态模拟实验, 通过调整燃烧时间, 并在空气中冷却后, 测量其炉底灰颗粒质量平均粒径的变化。实验结果如图 7 和图 8 所示: 在一段时间内, 第一类灰颗粒(DP 煤)粒径变化, 随着初期变化明显, 进一步燃烧时间的延长, 这类灰颗粒的粒径基本不发生变化; 第二类灰的煤(HG 煤)粒径变化, 随着燃烧时间的改变, 粒径不断发生变化明显在不同燃烧温度下。值得注意的是预热温度的调整对第一类灰的煤的粒径变化要大于第二类灰的煤。

### 3 灰颗粒的演化过程

在前人研究的基础上, 提出灰的分类原则对灰颗粒的演化过程进行了深一步的研究。当灰颗粒投入马弗炉内燃烧时, 这时磨损的可以忽略, 第一类灰颗粒粒径的变化受燃烧温度和温度变化速率的影响更大。由于煤中矿物质的不同, 虽然燃烧条件相同时, 但不同类别灰颗粒的演化过程有着本质区别。表 2 反映了各类灰的煤在马弗炉内的演化过程: 3 类灰的煤在投入马弗炉后都存在一次碎裂现象, 持续燃烧一段时间后, 第一类灰的煤和形成的灰颗粒的粒径都与一次碎裂后的煤颗粒相似, 只是第一类灰的煤的灰颗粒存在硬的灰壳, 而第二类灰的煤的灰颗粒中不存在硬的灰壳; 至于第三类灰的煤同样也存在一次碎裂现象, 但完全燃烧后, 质地较为松散, 不能筛分出大的灰颗粒。

表 2 3 类灰颗粒在马弗炉内的演化过程

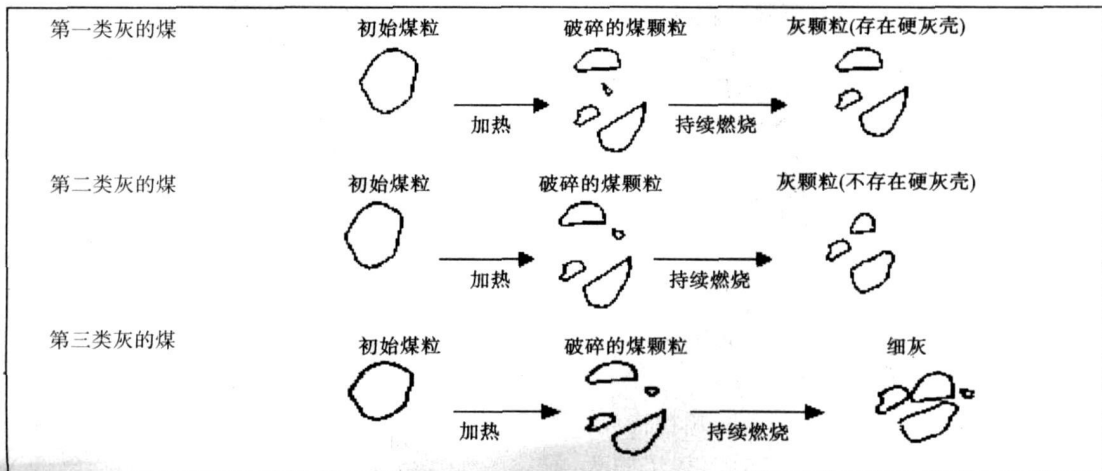


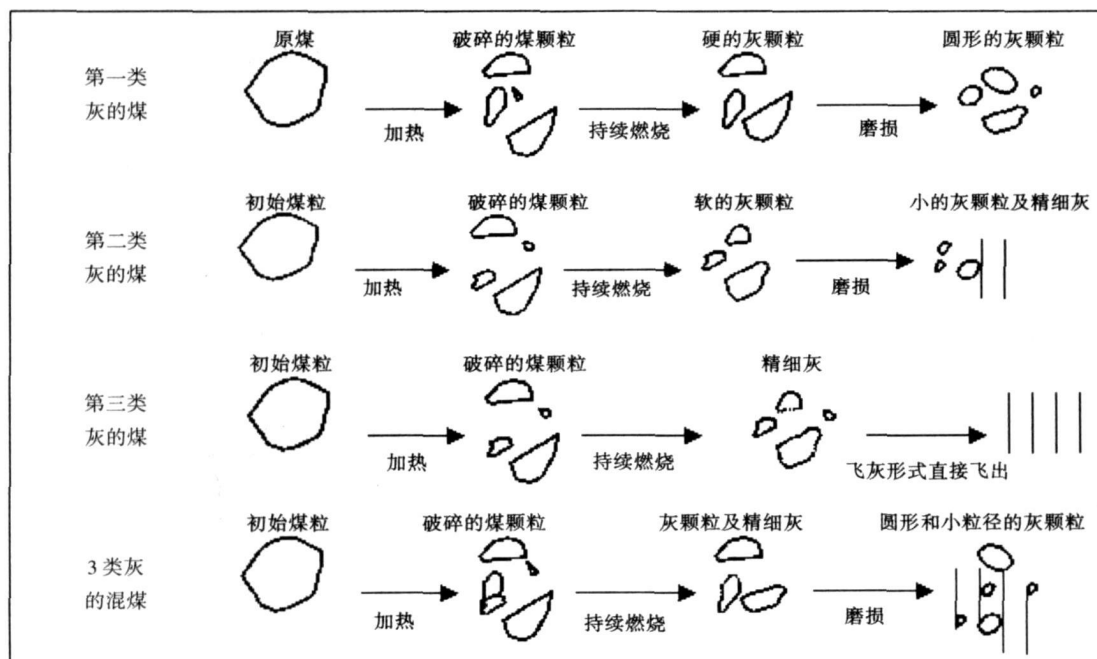
表 3 推演出不同类别灰的煤在流化床内的演化过程: 煤粉在投入流化床实验台后, 同样都存在一次碎裂现象。由于煤中所含矿物质成分不同, 所成灰

颗粒表现出来的物理特征也不同。第一类灰的煤形成的灰颗粒的机械强度大和耐磨性能好, 可以认为粒径基本不变化, 后期的磨损只是使得灰颗粒的球

形度变大; 第二类灰的煤和形成的灰颗粒的粒径随着运行时间的增长而不断变小, 最终以第三类灰颗粒的形式离开流化床锅炉; 第三类灰颗粒粒径较小, 直接从流化床锅炉中逃逸出去, 可以不考虑对流化

床锅炉的粒径分布的影响。可以这样认为, 因为第一类灰颗粒对流化床锅炉的粒径分布起着至关重要的作用, 就可根据煤的性质来预测流化床锅炉的粒径分布。

表 3 3 类灰颗粒在循环流化床锅炉内的演化过程



### 4 结 论

根据灰颗粒的机械强度和耐磨性能的不同, 将灰颗粒定义为 3 类不同性质的灰, 以此为依据进行了不同燃烧温度下升温速率对灰颗粒粒径变化的影响和不同燃烧温度下燃烧时间对灰颗粒粒径变化的影响的实验研究。实验研究表明: 燃烧的温度和温度变化速率对第一类灰颗粒粒径分布影响较大, 而对第二类灰颗粒的最终粒径影响不大; 而运行时间的长短对第二类灰颗粒最终粒径的影响较大, 对第一类灰颗粒粒径分布几乎没有影响。也就是说破裂行为对灰中第一类灰颗粒最终粒径分布影响较大, 对灰中第二类灰颗粒的最终分布影响不大; 而磨损行为对灰中第一类灰颗粒最终粒径分布影响不大, 对第二类灰颗粒的最终粒径影响较大。

流化床床料可认为主要由第一类灰颗粒构成, 而第二类灰颗粒逐渐演化为飞灰。因此, 提出的灰颗粒进行分类方法对研究流化床床料的粒径分布具有积极意义, 即可以根据燃煤的成灰特性预测出给煤最佳平均粒径, 进而调整碎煤机运行工况, 使得流化床床料粒径分布保持在给定范围。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 刘向军, 徐旭常. 循环流化床内稠密气固两相流动的数值模拟 [ J ] . 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 161—165.
- [ 2 ] 刘铁雷, 徐有宁. 循环流化床锅炉灰颗粒床料的形成机理 [ J ] . 浙江电力, 2005, 3: 45—48
- [ 3 ] 姚多喜, 支霞臣. 煤中矿物质在燃烧过程中的演化特征 [ J ] . 矿业安全与环保, 2002, 9(3): 4—5
- [ 4 ] 吕俊复, 杨海瑞. 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
- [ 5 ] YAN L, GUPTA R P. A mathematical model of ash formation during pulverized coal combustion [ J ] . Fuel, 2002, 81: 337—344
- [ 6 ] JOUKO LATVA SOMPPIL, MIKKO MOISIO. Ash formation during fluidized bed incineration of paper mill waste sludge [ J ] . Aerosol Sci, 1998, 29(4): 461—480.
- [ 7 ] JEFFREY L COOK, KHANG SOON JAI. Attrition and changes in particle size distribution of lime sorbents in a circulating fluidized bed absorber [ J ] . Powder Technology, 1996, 89(1): 1—8.
- [ 8 ] CHIRONE R, MASSIMILLA L, SALATINO P. Comminution of carbons in fluidized bed combustion [ J ] . Prog Energy Combust Sci, 1991, 17(4): 297—326
- [ 9 ] DAKIE D. Fragmentation and swelling of various coals during devolatilization in a fluidized bed [ J ] . Fuel, 1989, 68: 79—84.

(编辑 滨)

lium compressor in a helium circulation-based turbo-generator unit is one of the decisive factors ensuring a high efficiency of electric power generation. By using numerical simulation software NUMECA, the relationship between the aerodynamic performance and similarity criterion of a subsonic and axial helium test compressor was studied along with an analysis of the mechanism of helium flow in the cascades. An exploratory study was also performed of the impact of the similarity criterion at an equal Reynolds number on the performance of the compressor blades. The analysis of the blade aerodynamic performance has led to the conclusion that with air as a working medium being used to simulate the helium compression process, when the Mach number at this operating condition is smaller than 0.4, very little influence on the flow in the flow path of the compressor will be exercised by the Mach number. As a result, the influence in question can be basically neglected. If a reaction of more than 0.5 is employed, the increase of positive pre-whirl of the blades can maintain the efficiency at a relatively high level. Under the condition of a relatively small Mach number the adiabatic exponent  $k$  will not exercise a great influence on the similarity simulation. **Key words:** helium compressor, aerodynamic performance, numerical simulation, similarity theory

基于齿根弯曲疲劳强度的渐开线涡旋齿载荷模型 = A Load Model for Involute Scroll Teeth Based on Tooth Root Bending-fatigue Strength [刊, 汉] / QIANG Jian-guo, MA Xiao, LIU Zhen-quan (College of Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, Post Code: 730050) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 615 ~ 619

The specific features of acting pressure and stress of involute scroll teeth were analyzed and the criterion for calculating bending fatigue-strength of scroll tooth roots was determined with a load model based on tooth root bending-fatigue strength being obtained. The study shows that the pressure distribution law on the internal and external wall surface of the scroll tooth is different and the stress at any point on the scroll tooth approximates to the bending stress of a pulsation cycle. Thus, a safety factor method can be used to calculate the bending fatigue-strength of scroll tooth root. During operation the scroll teeth are subjected to the internal pressure in a  $\pi$  spreading angle area having a spread angle interval of  $\pi$ . The magnitude of the internal-pressure load is equal to the pressure difference of inner and outer wall surface of the scroll tooth. However, the load resulting from the inner pressure will change discontinuously. When the crank rotating angle assumes one featuring an exhaust-discharge initiation, the inner pressure not only reaches its maximum but also the acting area is farthest away from the central zone of the scroll tooth with its safety factor attaining a minimum value. The selection of a rational exhaust-discharge initiation angle constitutes a major approach for enhancing the scroll tooth strength and stability. **Key words:** scroll machinery, tooth root bending-fatigue strength, load model

基于灰颗粒的物理特性为分类原则的试验研究 = An Experimental Study of the Classification Principle of Ash Particles Based on Their Physical Properties [刊, 汉] / XU You-ning, LI Hong-tao (Shenyang City Key Laboratory on Circulating Fluidized Bed (CFB) Combustion Technology, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, China, Post Code: 110136) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 620 ~ 624

The combustion and heat transfer in a circulating fluidized bed (CFB) boiler is closely related to the status of the in-boiler bed material, which is formed mainly in the course of combustion, explosive fragmentation and wear abrasion of mineral constituents contained in fuel coal. The microscopic morphological characteristics of ash particles were obtained by using a visual microscope after six kinds of coal samples have been burned in a fixed bed. The ash particles were classified into three kinds with different characteristics according to their mechanical strength and wear-resistant properties. On this basis, a study was conducted of the impact of temperature rise speed and combustion time at different combustion temperatures on the change of ash particle diameter. The study has been undertaken by adopting a cold-state vibration sifting method after combustion on a fixed bed and a sifting process following a hot-state fluidization on a fluidized bed test rig. Moreover, the evolution characteristics of different ranks of coal in the course of combustion have been deduced. The results show that with respect to the evolution process of different combustion temperatures and durations the three kinds of ash particles exhibit a conspicuous difference. As a result of the foregoing, a theoretical basis is provided for the forecast of a particle diameter distribution of bed materials in the circulating fluidized bed. **Key words:** ash particle, wear abrasion, fragmentation, classification, evolution characteristics, experimental study