



# 粉煤灰颗粒的微观分类探讨

## Classification of Fly Ash under the Microstructure

杨帆, 李文兵, 杨望舒

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 鉴于目前关于粉煤灰颗粒的微观分类没有一个普遍、清晰、浅显的分类方法, 且术语不够统一的情况, 为方便学术交流提出了一个新的较普遍、清晰、浅显的原状粉煤灰颗粒分类方法, 使粉煤灰颗粒微观分类方法更加完善。

**关键词:** 粉煤灰分类; 微观; 原状粉煤灰颗粒

中图分类号: X705      文献标志码: A

**Abstract:** At present micro classification of fly ash particles haven't had a general, clear, simple classification method and terms lack unity. In order to facilitate academic exchanges, the authors suggest a general, clear, simple classification method to make fly ash particles micro classification method more perfect, facilitate the experts and scholars.

**Key words:** classification of fly ash; microstructure; raw fly ash

## 0 前言

粉煤灰是火力发电的燃烧产物, 每消耗 4 t 煤就会产生 1 t 粉煤灰。我国的火电装机容量从 2002 年起呈现出爆炸式的增长, 2009 年我国粉煤灰产量达到了 3.75 亿 t, 相当于当年全国城市生活垃圾总量的 2 倍多, 其体积可达到 4.24 亿 m<sup>3</sup>, 相当于每两分半钟就倒满一个标准游泳池, 每天倒满一个水立方。然而粉煤灰只是一种放错地方的资源, 粉煤灰可用作水泥、砂浆、混凝土的掺合料成为水泥、混凝土的组分; 可作为原料代替黏土生产水泥熟料, 制造烧结砖、蒸压加气混凝土、泡沫混凝土、空心砌砖、烧结或非烧结陶粒; 可铺筑道路、构筑坝体、建设港口、农田坑洼低地、煤矿塌陷区及矿井的回填; 也可以从中分选漂珠、微珠、铁精粉、碳、铝等有用物质, 其中漂珠、微珠可分别用作保温材料、耐火材料、塑料、橡胶填料等。

因此, 很多专家学者开展了对粉煤灰的研究, 以期充分开发利用粉煤灰资源, 变废为宝。但绝大部分从事粉煤灰研究的学者侧重于其组成成分和物理化学性质等方面的研究, 很少有人关注其颗粒的微观分类。目前关于粉煤灰

颗粒微观分类方面的资料极少, 没有形成一个普遍、清晰、浅显的分类方法, 而且表征其分类的术语也不够统一规范; 但很多学者在研究粉煤灰时又都会从微观角度观察粉煤灰颗粒形貌, 为其研究结果提供理论依据。鉴于此种情况, 作者在查阅了这方面数量不多的研究成果后加以融合改进提出了一个比较普遍、清晰、浅显的分类方法, 希望能使粉煤灰颗粒微观分类更完善、规范、统一, 以便更有利于学术交流。

## 1 粉煤灰颗粒的微观分类

粉煤灰的颗粒组成和很多因素有关, 波动性很大, 颗粒间的化学成分也不一致, 因此难以对其进行定量描述, 但可以对其进行定性分类。通常直接由电厂烟气道收集到的是原状粉煤灰, 燃煤锅炉底部得到的是炉渣, 但炉渣利用较少。原状粉煤灰实际利用时通常采用磨细、分选等方法加以处理, 其颗粒会被破坏或人为改变了其颗粒组成, 因此以原状粉煤灰为对象加以研究更有普遍意义, 更具代表性。从微观角度观察粉煤灰, 通常需要借助光学显微镜、

扫描电子显微镜和透射电子显微镜等仪器。

### 1.1 粉煤灰颗粒的形成和形貌

王福元等<sup>[1]</sup>研究认为粉煤灰颗粒的形成大致可分为三个阶段：第一阶段，煤粉变成多孔炭粒。此时颗粒的形态基本上无变化，保持原煤粉的不规则碎屑状，但有多孔性，使其表面积极大。第二阶段，多孔炭粒变为多孔玻璃体。此时煤粉中的有机质几乎完全燃烧，其形态大体上仍维持与多孔炭粒相同，比表面积仍较大，但明显小于多孔

炭粒。第三阶段，由多孔玻璃体变为玻璃珠。此时，外形不规则的多孔玻璃体逐渐收缩成圆形玻璃珠，颗粒粒径变小、密度变大，比表面积下降为最小。

### 1.2 当前的分类方法

沈旦申<sup>[2]</sup>将粉煤灰颗粒分为5类：珠状颗粒、渣状颗粒、钝角颗粒、碎屑、黏聚颗粒。珠状颗粒和渣状颗粒可进一步细分。钱觉时<sup>[3]</sup>对沈旦申和 Rohatgi<sup>[4]</sup>的分类加以归纳后得到表1的分类。

表1 粉煤灰中颗粒的分类和特征

颗粒类别和名称	颗粒形貌和结构	粒径/ $\mu\text{m}$	所占比例	
珠状颗粒	漂珠	薄壁空心球状，壁厚约为直径的 10%，壁上常有孔洞	30~100	数量少，占粉煤灰总量的 1%~5%
	空心沉珠	厚壁的空心球状玻璃体，壁厚约为直径的 30%	30~80	数量较多，可达粉煤灰总量的 50%
	复珠	鱼卵状空心玻璃珠，壳内有大量的微珠和碎屑	100~200	数量较少
	密实微珠	实心的玻璃微珠，表面光滑、颜色差异较大	<45	数量多，可达粉煤灰总量的 80%
	富铁微珠	暗色微珠	<45	可达粉煤灰总量的 15%
渣状颗粒	海绵状玻璃渣	海绵状的不规则多孔颗粒	30~200	可达灰渣总量的 30%
	炭粒	多孔球状	30~250	可达灰渣总量的 30%
	钝角颗粒	未熔融或部分熔融颗粒，主要成分为石英	50~250	少量
	碎屑	各种颗粒的碎屑	<30	少量
	黏聚颗粒	各种颗粒的黏聚体	50~250	少量

王运泉等<sup>[5]</sup>采用光学显微镜、电子显微镜等微观技术,从岩石学角度对粉煤灰的显微组分进行了详细而系统的研究,将粉煤灰分为无机与有机组分两类。无机组分来源于煤中矿物质,而有机组分则是未燃烬的煤粒(残炭)。无机组分主要有玻璃微珠、磁铁微珠、不定形颗粒、碎屑石英和莫来石;有机组分主要包括未燃烬的残炭和未变化或变化不明显的煤粒两大类。表2是王运泉的详细分类。

表2 王运泉对粉煤灰颗粒的分类

依据	无机部分		有机部分	
	微珠	不定形颗粒	残炭	煤粒
结构	空心微珠	不规则粒状	空心炭	
	实心微珠	板状	网状炭	
	复合微珠	浸染状	结构炭	
	隐晶微珠		未熔炭	
粒度	粗微珠>50 $\mu\text{m}$	粗粒>50 $\mu\text{m}$	粗粒	
	中微珠20~50 $\mu\text{m}$	中粒 20~50 $\mu\text{m}$	中粒	
	细微珠<20 $\mu\text{m}$	细粒<20 $\mu\text{m}$	细粒	
成分	玻璃微珠	玻璃质		镜质组
	磁铁矿微珠	黏土质		惰性组
颜色	白色微珠			
	黄色微珠			
	黑色微珠			
	棕色微珠			

### 1.3 作者的分类方法

根据收集到的资料,作者发现到目前为止对粉煤灰微观颗粒的分类方法不多,分类依据不一,且术语不够统一。因此作者基于之前学者的成果融合各家,提出了一个较为简单适用的分类方法。首先可以根据形状分为珠状颗粒、海绵体、炭粒;其次珠状颗粒根据其是否能浮在沉灰池的水面上分为漂珠和沉珠;最后沉珠又可以继续分为空心珠、子母珠、富铁珠(磁珠)、密实珠、富钙珠。具体的分类和各种颗粒的特征可见表3。

表3 作者对原状粉煤灰颗粒的分类和特征

颗粒名称	特征	备注
漂珠	壁薄易碎,壁上常有针孔,粒径较粗,能浮在水面上	活性高、轻质、绝热、绝缘、耐高温、流动性好
珠状颗粒	空心珠	数量多
	子母珠	有些颗粒相互黏连在一起的也可归为此类
	富铁珠(磁珠)	有少量含铁量较低的呈多孔不定形状
	密实珠	富含硅铝,活性高
富钙珠	球形度好,表面粗糙但不同于磁珠表面	含量少,高钙灰比低钙灰含量多
海绵体	疏松多孔、形状不规则类似海绵、粒径较粗	数量较多,活性一般
炭粒	多孔、形状不规则的球形、粒径较粗	含量很少

## 1.4 粉煤灰颗粒的 SEM 照片

很多粉煤灰研究者在他们的研究工作中使用扫描电镜 (SEM) 作为研究工具, 从而为他们的试验提供理论依据。图 1~7 为相应的粉煤灰颗粒的 SEM 照片<sup>[6-8]</sup>, 期望能便于研究者比对。

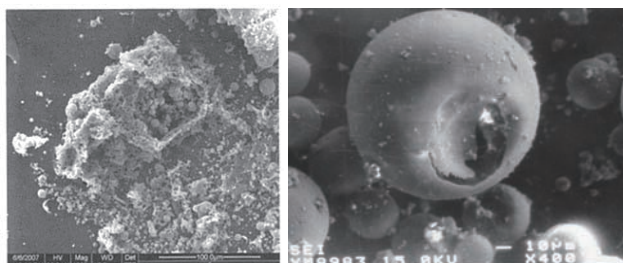


图 1 炭粒扫描电镜照片

图 2 漂珠扫描电镜照片

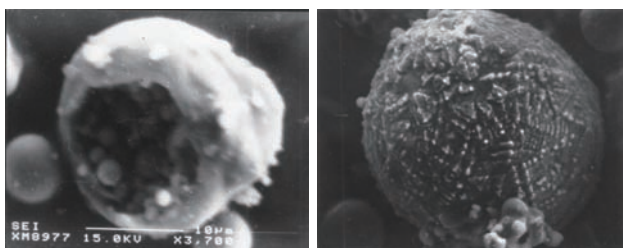


图 3 子母珠扫描电镜照片

图 4 富铁珠扫描电镜照片

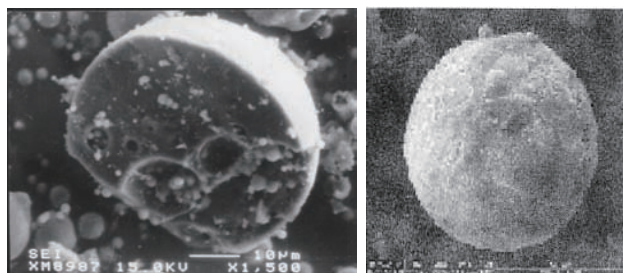


图 5 密实珠扫描电镜照片

图 6 富钙珠扫描电镜照片

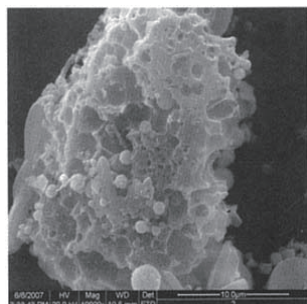


图 7 海绵体扫描电镜照片

## 2 结论

本文的灵感来自于作者涉足粉煤灰领域, 在弄清楚粉煤灰作用的微观机理时遇到的一个困难, 一直没找到一个比较合理满意的对粉煤灰微观颗粒分类的方法, 而且这方面的研究成果极少, 各个研究者对粉煤灰微观颗粒的分类也不尽相同。因此希望借此文抛砖引玉, 引起相关学者的注意, 以使对粉煤灰微观颗粒的分类方法更完善, 便于学术交流。

粉煤灰目前作为最重要的矿物掺合料之一, 极具研究价值且有极大的社会效益, 也必将有很多学者参与粉煤灰的研究。同时作者能力有限, 分类不尽完善, 希望读者补充指正。

另外, 本文作者认为粉煤灰颗粒的微观分类还要与其化学组成结合起来, 这样对粉煤灰作用的微观机理的分析更有帮助, 分类也更有实际意义。期望相关研究者对分类加以细化、补充, 以便更深入地了解粉煤灰作用机理。

## 参考文献

- [1] 王福元, 吴正严. 粉煤灰利用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [3] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] P.K.Rohatgi, P.Huang, R.Guo, B.N.Keshavaram and D. Golden. Morphology and selected properties of fly ash. In: Fly ash, Silica fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Fifth International Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1995(April 21 -25),459-478.
- [5] 王运泉, 张建平, 郑燕君. 粉煤灰的组分特征及其系统分类[J]. 环境科学研究. 1998(6):1-4.
- [6] 薛群虎, 杨源, 袁广亮. 粉煤灰理化性质及形态学研究[J]. 粉煤灰综合利用. 2008(3):3-6.
- [7] 冯绍航, 李辉, 王建礼, 李县军. 超细粉煤灰及其在水泥净浆中的水化特征研究[J]. 混凝土. 2009(3):38-40.
- [8] 李辉, 商博明, 冯绍航, 吴华夏, 蔺进士. 粉煤灰理化性质及微观颗粒形貌研究[J]. 粉煤灰. 2006(5):18-20.

作者简介: 杨帆, 男, 厦门大学建筑与土木工程学院土木工程系研究生. 通信地址: 厦门市思明区思明南路422号(361005). E-mail: yzw19862006@163.com.

收稿日期: 2012年6月14日