

珞璜电厂粉煤灰微珠的精细化分选

刘汇东, 宋红见, 魏建朋, 刘晶晶, 李青倩

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 针对华能集团重庆珞璜电厂煤粉炉粉煤灰的利用问题, 采用XRF、XRD、Siroquant定量、SEM-EDS及光学显微镜等技术手段, 在深入分析煤粉炉粉煤灰的岩石学、矿物学、元素地球化学特征的基础上, 对此类粉煤灰的微珠进行浮沉、弱磁选和气流分级等精细化分选实验研究。结果显示, 以水为介质的浮沉实验可获得质量分数0.15%的漂珠; 磁场强度 208×10^3 A/m 湿式弱磁选实验可获得质量分数14.8%、 Fe_2O_3 含量44.65%的磁珠; 气力旋流分级实验可获得中值粒径分别为89.6、40.2、21.3、12.7、8.1、4.9 μm 共6个粒度级的粉煤灰微珠产品, 表明通过精细化分选获得的粉煤灰微珠产品能够适应多种领域的应用, 显著提高此类粉煤灰的高值利用率。

关键词 煤粉炉粉煤灰; 微珠; 精细化分选; 气流分级

中图分类号 X752

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.008

Experiments on fine separation of microspheres from fly ash of Luohuang coal-fired power plant

LIU Huidong, SONG Hongjian, WEI Jianpeng, LIU Jingjing, LI Qingqian

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract The petrological, mineralogical and chemical characteristics of the fly ash from Luohuang coal-fired power plant of Huaneng Group in Chongqing, China were studied using XRF, XRD, Siroquant, SEM-EDS, and optical microscope. Experiments of sink-float separation, magnetic separation and size grading were carried out based on analyses of those characteristics for improving the utilization rate and added value of the fly ash. As the experimental result indicated, cenospheres of 0.15% were separated by means of the water-medium sink-float separation first; then magnetic microspheres (with Fe_2O_3 content of 44.65%) were available through the wet low-intensity magnetic (260 mT) separation; finally an air classification of the remaining non-magnetic microspheres was applied to obtain microspheres with six different size fraction: 89.6, 40.2, 21.3, 12.7, 8.1 and 4.9 μm . According to the above fine separation procedure, a variety of fly ash sphere products adapting to special application fields can be acquired, improving both the utilization rate and added economic value of Luohuang fly ash. Meanwhile, the environmental pressure caused by the fly ash will be relieved effectively.

Keywords pulverized coal furnace fly ash; cenospheres; fine separation procedure; air classification

中国是煤炭消耗大国也是火力发电大国, 燃煤电厂粉煤灰也因此成为最主要的固体废弃物之一。长期以来, 中国粉煤灰利用率偏低, 据绿色和平组织的一项调查, 中国粉煤灰的综合利用率不足30%, 低于美国(39%)和欧洲(47%)的平均水平^[1]。加之中国粉煤灰产生量巨大(预计“十二五”末粉

煤灰年产生量将达到5.7亿t), 粉煤灰逐年累积将对社会经济和生态环境造成持续性压力。

中国燃煤电厂粉煤灰的利用以生产水泥、混凝土等基础建材为主, 技术水平和经济附加值偏低。对粉煤灰分选、分级的研究亦主要针对此类应用展开, 例如, 为满足水泥、混凝

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB238902); 教育部创新团队发展计划项目(IRT13099)

作者简介: 刘汇东, 博士研究生, 研究方向为大宗工业固体废弃物资源化, 电子信箱: haydn15liu@gmail.com

引用格式: 刘汇东, 宋红见, 魏建朋, 等. 珞璜电厂粉煤灰微珠的精细化分选[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 49-55.

土生产对烧失量的要求,采用摩擦电选或浮选法从粉煤灰中分离未燃尽碳;为满足细度要求将粉煤灰粗略分为I-III级灰及等外灰等。有学者针对个别高铁粉煤灰,研究了磁法分选铁精矿用作炼铁原料^[1]。杨久俊等^[2]、陈胜利等^[3]研究了粉煤灰中微珠的分离提取技术。以上研究存在的主要问题是,缺少针对某一特定电厂粉煤灰的精细化、系统化分选,对粉煤灰中有价组分的发掘及利用不够充分,因此整体的粉煤灰利用率和经济附加值低下。本文以华能集团重庆珞璜电厂煤粉炉粉煤灰为例,在理论分析的基础上,通过科学实验,研究此类粉煤灰中微珠的系统化、精细化分选。

1 样品采集及测试方法

华能集团重庆珞璜电厂是西南地区最大的全脱硫环保型火力发电厂,现有三期工程共6台煤粉炉发电机组,主要燃料松藻矿区的高灰、中高硫-高硫半无烟煤。近年来煤炭消耗量约为600万t/a,年产生煤粉炉粉煤灰约200万t。现建有4套粉煤灰分选系统,最高可年产I级粉煤灰80万t,II级粉煤灰100万t。分级粉煤灰以100~150元/t不等的价格售出,基本全部用于水泥、混凝土生产。

粉煤灰样品取自珞璜电厂气力输灰管线,所采集样品即刻装入塑封袋内以防污染。实验室内缩分取样300g,从中取10g制成光片,方法为:将树脂、固化剂按一定比例混合均匀后与样品在模具中混合搅拌,静置24h使之凝固成型;除去模具,依次使用不同粒级的砂纸及抛光布对光片进行处理;部分样品用于光学显微镜、扫描电镜分析,剩余样品用于元素、矿物质量分数分析。

依照《GB/T 212—2008 煤的工业分析标准》,测量粉煤灰样品的灰分或烧失量。

粉煤灰样品中Si、Al、Fe、Ti、Ca、K、Mg等常量元素的测试,采用美国Thermo Fisher公司的ADVANT' XP+型X射线荧光光谱仪。为保证测试精度,待测样品预先进行高温灰化(依照ASTM标准)。高温灰经加拿大Claisse公司的TheBee-10型电熔样机进行熔片法制样,并用美国国家标准与技术研究院(NIST)的2089、2090、2091号标准样品进行数据校准。

矿物组成分析采用日本Rigaku公司的D/Max 2500CP型X射线衍射仪(XRD, Cu靶, K α 射线,步长0.02°,功率40 kV, 150 mA)完成矿物组成鉴定。样品粉末压片,扫描速度为2°/min,扫描范围2.6°~70°。

采用偏光显微镜(Leica DM4500P)和带能谱仪(EDS)的扫描电镜(SEM, FEI Quart 650G),获取粉煤灰样品微观形貌、矿物组成及元素分布等信息。

采用煤科总院唐山研究院研制生产的CXG-90A型磁选管进行湿式弱磁选实验。采用北京航空航天大学粉体技术实验室研制的JFC-10F型气流分级机进行粉煤灰微珠的分级。所得粉煤灰的分级产品采用Malvern Mastersizer 2000型激光粒度仪(配备Hydro G型样品分散装置)进行粒度分析。

2 粉煤灰的物质组成

2.1 粉煤灰的烧失量及常量元素含量

珞璜电厂粉煤灰的烧失量(loss on ignition, LOI)及常量元素(氧化物)含量(质量分数)分别为LOI 3.89%, SiO₂ 49.47%, Al₂O₃ 20.67%, Fe₂O₃ 14.32%, CaO 4.45%, SO₃ 1.40%, TiO₂ 1.75%, K₂O 1.29%, MgO 1.17%, Na₂O 0.45%。根据国标《GB/T1596—2005 用于水泥和混凝土中的粉煤灰》,一级粉煤灰中LOI、SO₃质量分数上限分别为5%和3%。珞璜粉煤灰中LOI、SO₃质量分数均低于上述标准,是其能大规模用于水泥、混凝土生产的直接原因;粉煤灰中Fe₂O₃显著富集,与松藻煤中黄铁矿含量高^[4]有关。

2.2 粉煤灰的矿物组成

珞璜电厂粉煤灰的矿物组成为石英(quartz)、莫来石(mullite)、赤铁矿(hematite)和磁赤铁矿(maghemite),如图1所示。珞璜电厂采用煤粉炉,炉膛中心温度超过1400°C。原煤(主要是松藻煤)中存在的高岭石、伊蒙混层矿物、黄铁矿、方解石等矿物^[5]经过高温作用后基本全部熔融分解,最终形成以硅铝质为主的无定型玻璃体(图1中衍射角 $2\theta=15^\circ\sim38^\circ$ 区间谱线向上凸起的部分)。通过Siroquant定量技术^[6]分析,珞璜粉煤灰中无定型玻璃体质量分数约为70%,具备良好的火山灰活性。熔融体在冷却过程中通过重结晶作用形成莫来石、赤铁矿和磁赤铁矿。磁赤铁矿($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)具备磁铁矿假象,具有强磁性,原理上通过弱磁选即可将其有效分选出来。

3 实验结果与分析

3.1 磁性微珠的分选

3.1.1 粉煤灰磁性物质的分离

根据经验,粉煤灰中总铁(TFe)质量分数为5%(约合Fe₂O₃ 7.1%)以上时,具备回收利用价值^[7]。珞璜电厂粉煤灰中Fe₂O₃质量分数达到14.32%,且有部分铁元素以强磁性的磁赤铁矿形式赋存于粉煤灰中。通常湿式磁选较干式磁选所获得的铁精矿品位普遍更高,因而采用弱磁选法从粉煤灰中分离铁磁性组分。

理论上,磁场强度与铁精矿品位呈反比,而与总铁回收率成正比。经多次实验后,选定磁场强度为 208×10^3 A/m,此时的铁精矿品位与总铁回收率达到平衡。取50g粉煤灰样品,加约500 mL水、1 mL无水乙醇(作为分散剂)充分搅拌均匀,配成磁选料浆进行湿式弱磁选将最终获得的磁性灰浆、非磁性灰浆烘干后分别测定质量、烧失量和常量元素含量。

3.1.2 磁性粉煤灰的常量元素组成

实验结果如表1所示。《GB/T 25953—2010 有色金属选矿回收铁精矿》规定,一、二、三级铁精矿中的TFe(总铁)质量分数分别不低于65%、60%、55%。

由表1可知,磁性灰中Fe₂O₃质量分数富集至44.65%,合TFe 31.26%,低于三级铁精粉相应指标;硅、铝质量分数仍占有较高比重。这可能与磁赤铁矿的赋存状态有关,如果磁赤

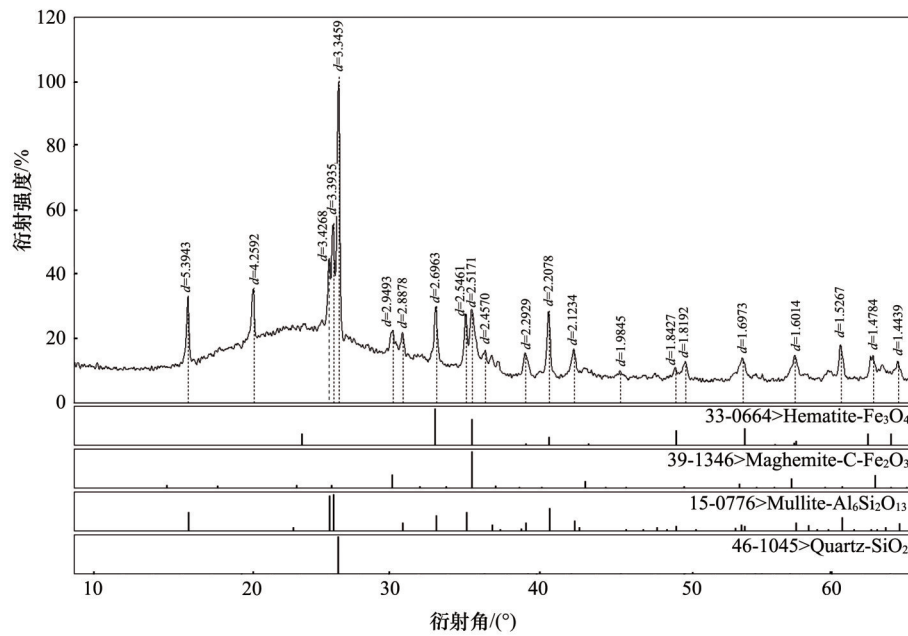


图1 珞璜粉煤灰的XRD谱图及矿物定性分析

Fig. 1 XRD pattern and mineral qualitative analysis of Luohuang fly ash

表1 磁性灰及非磁性灰的回收率、烧失量及常量元素组成

Table 1 Recovery rate, loss on ignition and contents of major elements of the magnetic and non-magnetic fly ash (%)

样品	回收率	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
磁性灰	14.8	1.31	31.79	14.20	44.65	3.34	0.77	1.46	0.66	1.03	0.19
非磁性灰	80.4	4.49	49.66	23.20	9.79	4.93	1.58	2.47	1.45	1.25	0.52

铁矿与硅铝质紧密共生,单体解离度低,则无法单纯通过改善磁选条件提高铁精矿品位。

3.1.3 磁性粉煤灰的矿物学特征

光学显微镜和电子扫描显微镜(SEM)下,磁性粉煤灰颗粒基本全部呈球形,如图2所示,赤铁矿或磁赤铁矿晶体包覆在非晶质玻璃球体的表面,形成所谓的富铁微珠或磁性微珠(图2(a)、(b))。SEM-EDS分析结果如图3所示(根据图2(d)中测点1和测点2的数据),除少量富铁矿物碎屑外,珞璜粉煤灰中绝大部分铁元素以富铁微珠(包括磁性微珠)的形式存在。富铁微珠剖面上具有明显的分层结构,外部包覆为Fe-O质,内部为Si-Al-Ca-O质(图2(d),图3)。此外,还发现富铁微珠与非晶质玻璃体相黏连的情况(图2(b))。硅铝质体与富铁矿物的紧密共生关系造成了磁性粉煤灰中铁含量无法进一步提高。理论上通过增加磨矿工序可以一定程度上提高粉煤灰中磁性组分的单体解离度,提高磁性粉煤灰的铁品位,但其技术经济性有待考察。总之,从珞璜粉煤灰中分离铁精矿用作炼铁原料可能不具备技术经济优势。

磁性微珠铁磁性强、流动性好的特性使其成为一种重介质选煤的优良加重质。以磁珠替代磁铁矿粉作为重介质粉,具有耐氧化、耐磨、配制悬浮液允许容浓度大、悬浮液稳定性好、加重质损耗少、减轻设备磨损等诸多优点^[8],而且成本

更低。此外由于其特殊的磁、电及高密度特性,富铁微珠或磁性微珠还可用作橡胶、工程塑料、功能性建材等的特种填充料^[9],具备较高的经济附加值。

综上所述,相比于回收铁精矿用作炼铁原料,从粉煤灰中分选磁性微珠应用于功能性材料,产生的经济效益将更加显著。因此,从珞璜粉煤灰中弱磁选分离磁性微珠可以作为其高值利用的途径之一。

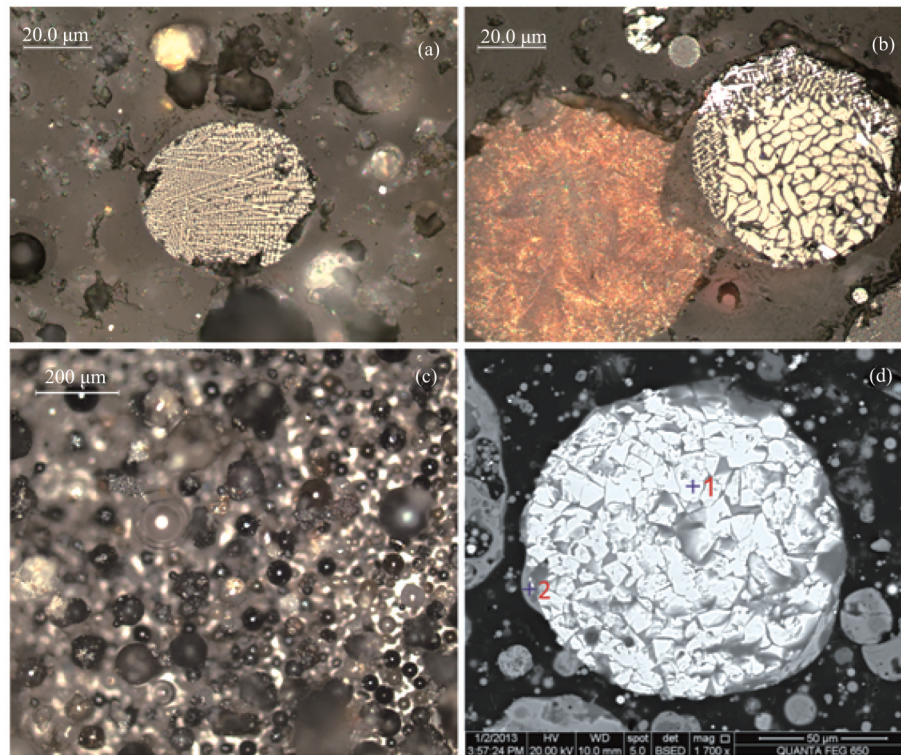
3.2 漂珠的分选

粉煤灰微珠按照密度可划分为漂珠($\rho < 1$)和沉珠($\rho \geq 1$)。漂珠在粉煤灰中含量甚微,一般仅为0.2%~0.5%,少数可达约1%^[10]。漂珠由于其低密度、高机械强度、热稳定性好等优异物理化学性能,可以广泛应用于低密度油井水泥、轻质混凝土、树脂材料、聚合物材料、合金材料、耐火材料及净水剂等领域^[11-13]。

采用浮沉实验,以水作为介质进行漂珠的分选,步骤如下:

1) 取200 g珞璜粉煤灰样品置于1000 mL烧杯中,加入200 mL水,玻璃棒搅拌均匀。

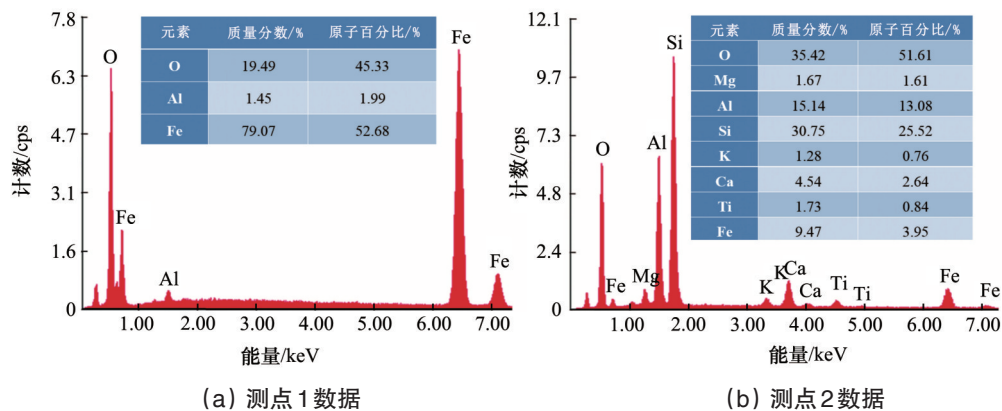
2) 加入5 mL乙醇,继续搅拌均匀。少量乙醇的加入利于样品分散,尤其是减少漂珠与未燃尽残碳的团聚,同时又不会显著改变分选介质的密度。



(a)(b)(c)为光学显微镜照片;(d)为SEM照片(其中1和2为测点)

图2 珞璜磁性粉煤灰的光学显微镜及SEM照片

Fig. 2 Optic micrographs and SEM picture of magnetic microspheres separated from the Luohuang fly ash



(a) 测点1数据

(b) 测点2数据

图3 SEM-EDS谱图及测点元素组成

Fig. 3 SEM-EDS patterns and elemental contents of the detected spots

3) 加水至 1000 mL,用电磁搅拌器搅拌 1 min,然后使样品静置。

4) 静置约 30 min,沉珠($\rho \geq 1$)和矿物碎屑完全沉降,收取水面漂浮物,成分主要为漂珠和浮碳。

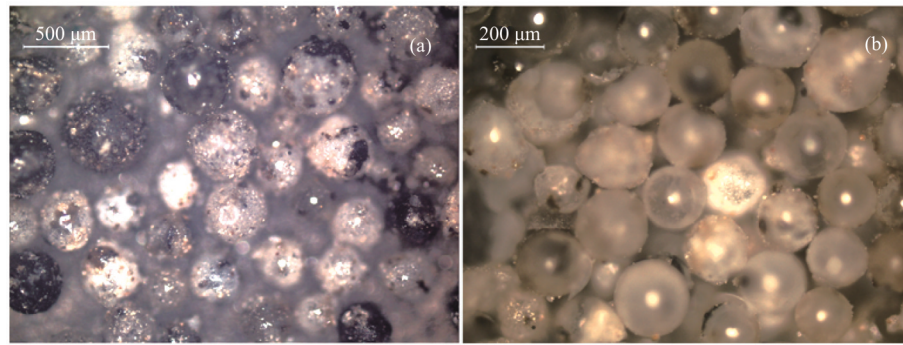
5) 重复步骤 3、步骤 4,操作多次直至水面无明显漂浮物。

6) 将收取的漂浮物合并、烘干,850℃下焙烧 2 h,冷却后称量,得灰白色漂珠 0.3 g。

漂珠属于空心微珠的一种,普遍具有粒径大、壁薄的特征。所得漂珠经筛分后分别置于光学显微镜下观察其形貌

特征。结果发现,60目以上漂珠粒径约为 300~500 μm ,其表面黏连有更细的微珠,或被少量矿物碎屑、碳粒等杂染(图 4(a));60目以下漂珠粒径约 200 μm ,粒径均匀,珠型良好,多数为纯净的半透明状(图 4(b))。

经计算,珞璜粉煤灰中漂珠质量分数为 0.15%,低于 0.2%~0.5%的一般水平。但鉴于漂珠较高的市场价值(每吨售价约 3000~5000 元),且分选工艺简单,因而在不显著增加工序、能耗的前提下,仍可考虑从珞璜粉煤灰中分选漂珠,以提高整体的经济效益。



(a) 大于60目

(b) 小于60目

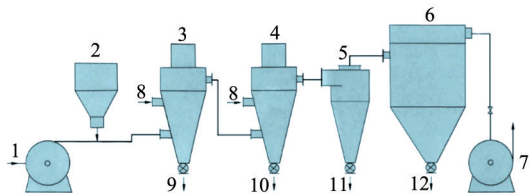
图4 珞璜粉煤灰漂珠的显微镜照片

Fig. 4 Micrographs of cenospheres separated from Luohuang fly ash

3.3 微珠产品的气流分级

粉煤灰中玻璃微珠的质量分数可以高达80%以上,且在越细的粒度范围内玻璃微珠质量分数越高^[14]。杨久俊等^[15]将粒径28 μm以下的微珠称为超细微珠(粉),超细微珠在高级涂料、油漆领域具有重要应用^[16],且市场价值更高。不同的应用领域对粉煤灰微珠的粒度要求不同,因而有必要对粉煤灰微珠进行粒度分级,使每一级的粒度分布足够窄,以适应不同应用领域的要求。

采用JFC-10F型气流分级机,其结构如图5所示。



1-鼓风机;2-进料器;3-强制分级机;4-强制分级机;
5-旋风除尘器;6-布袋除尘器;7-引风机;8-二次风;9-粗粉;
10-一级成品粉;11-二级成品粉;12-三级成品粉

图5 JFC-10F型气流分级机结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structure of the JFC-10F type air classifier

取粉煤灰样品3000 g,由气流分级机进料器2加入,调节3、4、5转速分别为200、400、800 r/min,由9、10、11处获得I、II、III级微珠。将由12获得的全部样品重新投入进料器进行二次分选。调节3、4转速分别为1600、2600 r/min,从接料口9、10、11获得IV、V、VI级微珠产品;接料口12处未收集到样品。最终获得如表2所示的I~VI共6个粒度级别的粉煤灰微珠产品。通过肉眼观察,I级微珠产品整体呈黑灰色,夹杂白色颗粒较多,推测未燃尽碳及漂珠(或富铁微珠)在这一粒级较为集富;其余粒级微珠均呈灰白色。

表2 珞璜粉煤灰玻璃微珠气流分级样品在不同体积分数下的粒度分布

Table 2 Particle size analysis of air-classification microspheres from the Luohuang fly ash

粒度级别	粒径/μm				$M_{90}/\%$
	$V_{90}=10\%$	$V_{90}=50\%$	$V_{90}=90\%$	$V_{90}=95\%$	
原灰	6.1	50.7	178.4	—	—
I	40.5	89.6	213.4	272	43.3
II	21.7	40.2	77.9	100	13.7
III	12.0	21.3	39.8	50	17.2
IV	6.2	12.7	25.5	32	10.5
V	2.5	8.1	17.2	20	6.9
VI	1.4	4.9	10.6	13	8.4

注: V_{90} 为体积分数; M_{90} 为质量分数。

目前大规模应用于工业生产的微珠都是通过特殊工艺专门合成的,技术难度大,成本高,售价更高。如美国3M公司和德国WSKT公司合成的不同等级的高性能空心玻璃微珠,在中国市场售价达到10000~50000元/t;中国同类产品品质稍差,但售价仍达到2000~10000元/t。因此,针对不同的应用领域,从粉煤灰中分选出相应粒度级别的玻璃微珠投入市场,具有成本低、经济效益显著的优势。美国3M公司系列微珠产品的参数及粒度分布如表3所示,与3M公司生产的系列微珠产品相比,珞璜粉煤灰分级微珠产品具有更窄的粒度分布,可以满足多种应用对粒度分布的要求,例如,VI级微珠对应3M公司的G-400产品,可用于生产维护性涂料、胶黏剂等,II级微珠对应3M公司的G-850产品,可用于聚合物混凝土、装饰涂料、环氧树脂地坪等领域。珞璜电厂分级微珠的抗压强度、密度等方面的参数性能尚待进一步研究。

表3 美国3M公司系列微珠产品参数及粒度分布

Table 3 Parameters and size distribution of microsphere products from the 3M company (USA)

产品系列	抗压强度/ MPa	密度/ (g·L ⁻¹)	粒径/μm				颜色	应用领域
			V _{Vf} =10%	V _{Vf} =50%	V _{Vf} =90%	最大 ²		
G-200	>413.41	2500	1	4	9	12	灰	工业油漆, 粉末涂料
G-400	>413.41	2400	1	5	14	24	灰	维护性涂料, 胶黏剂
G-600	>413.41	2300	1	6	24	40	灰	
G-800	>413.41	2200	2	18	75	200	灰	聚合物混凝土, 装饰涂料,
G-850	>413.41	2100	12	40	100	200	灰	环氧地坪
G-3125	>13.78	700	50	95	120	125	灰	保龄球, 人造石, 油井水
G-3150	>13.78	700	55	105	135	145	灰	泥, 屋顶涂料, 耐火材料,
G-3500	>13.78	700	65	130	200	225	灰	轻质水泥, 保温层

注: 1-体积分数为90%的微珠保持完好时所能承受的最大压强; 2-微珠的体积分数达到95%; V_{Vf}为体积分数。

3.4 微珠的精细化分选流程

煤粉炉是目前燃煤电厂最为常用的炉型之一, 煤粉炉粉煤灰也成为最主要的一个粉煤灰类型。煤粉炉粉煤灰中往往存在一定比例的粉煤灰微珠。由于煤粉炉燃烧温度高(1200~1700℃), 燃烧过程中煤中无机矿物发生较程度熔融, 熔融态的小液滴冷却过程中由于表面张力作用最终形成的球状固体颗粒即粉煤灰微珠; 当入料原煤中黄铁矿、菱铁矿等富铁矿物含量较高时, 则可考虑从粉煤灰中分选富铁微珠或磁性微珠。有研究表明, 煤粉炉粉煤灰中漂珠的含量与原煤挥发分含量呈正相关关系^[17,18]。因此, 对于主要以高挥发分煤(例如烟煤等)作为入料原煤的煤粉炉粉煤灰, 其中漂珠的分选和利用尤为值得关注。

煤粉炉粉煤灰中往往同时含有多种不同类型的微珠(漂珠、磁珠、沉珠等)。不同类型微珠以及不同粒度微珠的适用领域不同, 针对市场需求进行精细化、系统化的微珠分选和分级, 不仅可以大幅提高此类粉煤灰的经济附加值, 还可做到物尽其用, 有效提高粉煤灰利用率, 减轻粉煤灰造成的环境压力。

基于上述实验分析, 设计了图6所示的粉煤灰微珠精细化分选流程:

- 1) 将浮沉法分选漂珠与湿式弱磁选相结合, 在磁选调浆阶段进行漂珠的回收。
- 2) 湿式弱磁选分选磁性组分, 烘干后获得磁珠产品。
- 3) 磁选尾矿烘干后采用气流分级机进行玻璃微珠的多级分选, 通过调节分级机参数获得特定粒度级别的玻璃微珠产品。

以上单项分选技术目前均已成熟, 可以实现工业化生产。珞璜电厂现有的多套粉煤灰分选设备仍可作为粗选或预选设备继续加以利用, 以节省投资。

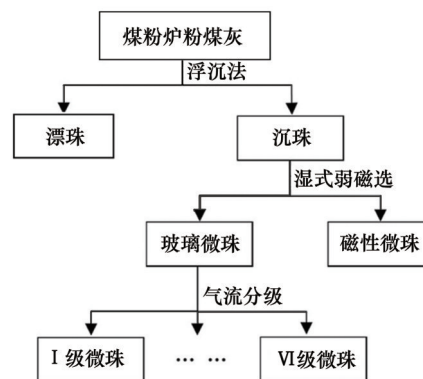


图6 珞璜电厂粉煤灰微珠的精细化分选流程

Fig. 6 Fine separation procedure of the fly ash microspheres from Luohuang power plant

4 结论

1) 珞璜电厂煤粉炉粉煤灰微珠的精细化分选基本流程为: 采用浮沉法(以水为介质)分离漂珠; 采用湿式弱磁选法获取磁珠; 对剩余的玻璃微珠采用气力旋流法进行粒度分级。

2) 对珞璜电厂粉煤灰进行微珠分选, 以水为介质的浮沉法获得占总质量0.15%的漂珠; 磁场强度 208×10^3 A/m的湿式弱磁选, 获得质量分数14.8%、Fe₂O₃含量为44.65%的磁珠; 气力旋流分级获得中值粒径分别为89.6、40.2、21.3、12.7、8.1、4.9 μm共6个粒度级的粉煤灰微珠产品。

3) 通过粉煤灰微珠精细化分选流程, 可以获得多种类型、多个粒度级的微珠产品, 可实现粉煤灰经济附加值和利用率的最大化, 并为同类型粉煤灰的资源化利用提供参考。

珞璜电厂粉煤灰中的漂珠、磁珠及各粒度级玻璃微珠的具体应用效果及其性能参数尚待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Blissett R S, Rowson N A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash[J]. Fuel, 2012, 97(1): 1-23.
- [2] 姚志通. 固体废弃物粉煤灰的资源化利用[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Yao Zhitong. Sesource utilization of solid waste fly ash[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [3] 杨久俊, 黄明, 张磊, 等. 粉煤灰微珠分离提取与深加工的初步研究[J]. 新型建筑材料, 2003(8): 14-16.
Yang JiuJun, Huang Ming, Zhang Lei, et al. A preliminary study on the extraction and deep processing of fly ash cenosphere[J]. New Building Material, 2003(8): 14-16.
- [4] 陈胜利, 李炳炎, 杨久俊, 等. 利用粉煤灰资源分离提取微珠技术与设备的研究及应用[J]. 砖瓦, 2004(1): 40-43.
Chen Shengli, Li Bingyan, Yang JiuJun, et al. Research and application of technology and equipment for extraction and separation of bead from the fly ash resource[J]. Brick, 2004 (1): 40-43.
- [5] Dai S F, Zhou Y P, Ren D Y, et al. Geochemistry and mineralogy of the Late Permian coals from the Songzao Coalfield, Chongqing, southwestern China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(5): 678-688.
- [6] Dai S F, Li J T, Jiang Y F, et al. Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Hailiushu Mine, Daqingshan coalfield, Inner Mongolia, China: Implications of sediment-source region and acid hydrothermal solutions[J/OL]. International Journal of Coal Geology (2014- 12- 03) [2014- 12- 03]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516214002626>.
- [7] 王福元, 吴正严. 粉煤灰利用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Wang Fuyuan, Wu Zhengyan. Fly ash Utilization Handbook[M]. Beijing: China Power Press, 2004.
- [8] Groppo J, Honaker R. Economical recovery of fly ash-derived magnetics and evaluation for coal cleaning[C/OL]// 2009 World of Coal Ash Conference [2014-06-21]. [http://www.flyash.info/2009/040-groppo 2009. pdf](http://www.flyash.info/2009/040-groppo%202009.pdf).
- [9] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F. Thermal and electrical properties of magnetite filled polymers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(8): 1041-1053.
- [10] 杨赞中, 刘玉金, 杨赞国, 等. 热电厂粉煤灰漂珠的物化性能及应用[J]. 建材技术与应用, 2002(6): 13-16.
Yang Zanzhong, Liu Yujin, Yang Zanguo, et al. The physical and chemical properties and application of fly ash floating beads in thermal power plant [J]. Building Materials Technology and Application, 2002(6): 13-16.
- [11] Chand N, Sharma P, Fahim M. Correlation of mechanical and tribological properties of organosilane modified cenosphere filled high density polyethylene [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21): 5873-5878.
- [12] Luong D D, Gupta N, Rohatgi P K. The high strain rate compressive response of Mg-Al alloy/fly Ash cenosphere composites[J]. Journal of Material, 2011, 63(2): 48-52.
- [13] Rohatgi P K, Gupta N, Schultz B F, et al. The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams [J]. Journal of the Minerals, 2011, 63(2): 36-42.
- [14] 陈树义. 国外粉煤灰在建材工业中的开发应用[J]. 粉煤灰综合利用, 1990(2): 27-34.
Chen Shuyi. Development and application of fly ash in the overseas building materials industry[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1990 (2): 27-34.
- [15] 杨久俊, 黄明. 粉煤灰的高附加值精细加工设备与技术[C]//中国首届商品粉煤灰及磨细矿渣加工与应用技术交流大会论文集. 北京: 中国资源综合利用协会粉煤灰专业委员会, 2003: 6-12.
Yang JiuJun, Huang Ming. High value-added fine processing equipment and technology of fly ash[C]//The 1st Conference of Processing and Application Technology Exchange of Chinese Commercial Fly Ash and Ground Slag. Beijing: Fly Ash Committee of China Resources Comprehensive Utilization Association, 2003: 6-12.
- [16] 刘伯元, 黄世鲜, 江广成. 超细玻璃微珠的研究[C]//第九届全国粉体工程学术会暨相关设备、产品交流会论文专辑. 北京: 北京粉体技术协会, 2003: 5-13.
Liu Boyuan, Huang Shixian, Jiang Guangcheng. Research on the ultrafine fly ash microspheres[C]// The 9th National Powder Engineering Conference and Exchange Meeting of related Equipment and Products. Beijing: Beijing Powder Technology Association, 2003: 5-13.
- [17] Field M A, Gill D W, Morgan B B, et al. Combustion of pulverized coal [R]. Leatherhead: The British Coal Utilization Research Association, 1967.
- [18] Padia A K S. The behavior of ash in pulverized coal under simulated combustion conditions[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1976.

(责任编辑 韩晓明)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。