



利用金矿尾矿烧制陶粒的正交实验研究

段美学¹, 闫传霖², 赵蔚琳²

(1. 烟台清泉实业有限公司, 山东 烟台 264670; 2. 济南大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 采用正交实验方法研究金矿尾矿掺量、粉煤灰掺量、煤粉掺量、预热温度、预热时间、焙烧温度、焙烧时间 7 个因素对陶粒制品性能的影响; 以陶粒的堆积密度、筒压强度和吸水率性能作为考查指标, 得出烧制陶粒的最优方案。结果表明, 金矿尾矿掺量为 55 g, 粉煤灰掺量为 34 g, 煤粉掺量为 3 g, 预热温度为 450 ℃, 预热时间为 60 min, 焙烧温度为 1 150 ℃, 焙烧时间为 120 min 时, 制得的陶粒综合性能最好。

关键词: 金矿尾矿; 陶粒; 正交实验

中图分类号: TU521

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2014)04-0064-04

Orthogonal Test of Preparing Ceramsites Using Gold Tailings

DUAN Meixue¹, YAN Chuanlin², ZHAO Weilin²

(1. Yantai Qingquan Industrial Co., Ltd., Yantai 264670, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The orthogonal test was used to study the effect parameters such as dosage of gold tailings, fly ash, coal, preheating temperature, preheating time, calcination temperature, and calcination time on property of ceramsites. The packing density, cylinder pressive strength and water absorption rate were selected as the indexes. The optimum parameters were obtained. The results show that when the mass of gold tailings is 55 g, the mass of fly ash is 34 g, the mass of coal is 3 g, the preheating temperature is 450 ℃, the preheating time is 60 min, the calcination temperature is 1 150 ℃ holding 120 min, the comprehensive property of the ceramsites is the best.

Key words: gold tailings; ceramsite; orthogonal test

金矿尾矿是金矿石在提取生产过程中产生的废渣^[1], 一般含有较多的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等成分, 并且含有多种矿物质, 如石英、长石、云母等^[2-5]。含有这些组成成分的物质通常可以用来制作建筑用砂、建筑用砖、微晶玻璃、陶粒等。合理利用金矿尾矿, 既是对资源的节约, 也是对环境的保护, 具有很高的经济效益和社会效益。陈晓玲^[6]以安徽低硅铁尾矿为主要原料采用

烧结法研究微晶玻璃的制备, 王长龙等^[7]以煤矸石和铁尾矿为主要原料制备加气混凝土, 李振等^[8]以菱镁矿尾矿、硼泥和硅石为主要原料通过固相反应烧结制备镁橄榄石, 为合理利用金矿尾矿提供了很好的思路。本文中以金矿尾矿为主要原料, 与粉煤灰混合搅拌成球, 经焙烧后制备烧结陶粒, 为金矿尾矿的高附加值利用开辟新的途径。

1 实验原料

主要原料是金矿尾矿, 取自于山东某金矿厂, 辅助原料是 II 级粉煤灰和煤粉, 均取自于山东某电厂。

1.1 金矿尾矿

首先需要对金矿尾矿进行粉磨处理, 根据性能测试和实验研究所需要的细度, 使用球磨机将尾矿物料粉磨至通过 100 目(粒径 150 μm)方孔筛。采用 X 射线荧光光谱仪对尾矿物料进行化学成分测试, 结果如表 1 所示。由表可知, 金矿尾矿中硅、铝成分较多, SiO₂、Al₂O₃ 的质量分数分别为 75.23%、11.63%, 可以为陶粒制品提供强度, 另外还含有 Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O 等助熔剂, 而且 SO₃、TiO₂、P₂O₅ 对烧制陶粒无影响。各成分的含量符合或接近烧制陶粒所要求的含量范围^[9], 只需添加辅助原料稍作调整即可。

1.2 粉煤灰

在金矿尾矿中, SiO₂ 含量过高, 而 Al₂O₃ 含量过低, 因此需要添加粉煤灰来降低硅含量和提高铝含量, 使混合原料的化学成分含量在合适的范围内。粉煤灰的化学分析结果如表 1 所示。

1.3 煤粉

在原料中可燃物较少的情况下可加入适量煤粉。煤粉在焙烧过程中主要起助燃作用, 燃烧后提供热能, 增加内能。由于金矿尾矿中可燃物很少, 粉煤灰中的可燃物也比较少, 因此可加入适量煤粉助燃。对煤粉进行烧失量测试, 测得其烧失量为 93.5%。

2 实验设计

以金矿尾矿粉、粉煤灰、煤粉为原料进行正交实验, 对原料配比及工艺参数进行优化。

收稿日期: 2014-03-02, 修回日期: 2014-05-20。

第一作者简介: 段美学(1963—), 男, 工程师, 主要从事水泥生产、技术与管理工作。E-mail: 672870600@qq.com。

表 1 金矿尾矿及粉煤灰的化学组成
Tab. 1 Chemical composition of gold tailings and fly ash

试样	质量分数/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
金矿尾矿	75.23	11.63	2.09	1.52	0.78	1.16	3.19	3.21	0.28	0.10
粉煤灰	43.21	28.75	8.32	2.89	0.53	0.30	0.75	0.30	1.04	0.33

2.1 陶粒的制备和测试

金矿尾矿粉、粉煤灰、煤粉进行配料,混合均匀后加入水,充分搅拌制成生料浆,手工成型制成生料球,经过干燥、预热、焙烧、冷却后制成陶粒。采用扫描电镜和 X 射线衍射仪对陶粒进行测试分析,按照国家标准要求对所制陶粒的性能进行测试,包括筒压强度、堆积密度、吸水率、软化系数等指标。

2.2 实验方案

由于影响陶粒性能的因素比较多,因此为了获得性能良好的陶粒制品,采用正交实验对原料配比及工艺条件进行研究。选取尾矿掺量、粉煤灰掺量、煤粉掺量、预热温度、预热时间、焙烧温度、焙烧时间共 7 个因素,每个因素取 2 个水平,按 L₈(2⁷)进行实验,各因素水平如表 2 所示。以堆积密度、筒压强度、吸水率作为考查指标对烧制陶粒的优方案进行分析。考查指标中,堆积密度和吸水率越小越好,筒压强度越大越好。

表 2 正交实验的因素及水平
Tab. 2 Orthogonal factors and levels

水平	A	B	C	D	E	F	G
	尾矿粉质量/g	粉煤灰质量/g	煤粉质量/g	预热温度/℃	预热时间/min	焙烧温度/℃	焙烧时间/min
1	55	34	0	450	25	1 140	60
2	65	44	3	600	60	1 150	120

是粉煤灰掺量 B 的极差,说明粉煤灰掺量对筒压强度的影响最大。由于筒压强度是越大越好,因此粉煤灰掺量的第 2 水平优于第 1 水平,取第 2 水平较好。其次是煤粉掺量 C 的极差,为 0.29,仅次于最大极差 0.31,取第 2 水平较好。焙烧温度 F 的极差为 0.27,取第 2 水平较好。焙烧时间 G 的极差为 0.23,取第 1 水平较好。其余对筒压强度影响较小的因素是尾矿掺量 A、预热温度 E、预热时间 F,尾矿掺量应取第 2 水平,预热温度应取第 1 水平,预热时间取第 1 水平较好。

从吸水率的实验结果来看,最大的极差是煤粉掺量 C 的极差 1.75,说明煤粉掺量对吸水率的影响最大。由于吸水率越小越好,因此煤粉掺量取第 2 水平较好;其次是粉煤灰掺量的极差为 1.6,取第 1 水平较好;焙烧温度的极差为 0.9,焙烧时间的极差为 0.75,均取第 2 水平较好。其余 3 个对吸水率影响较小的因素是尾矿掺量 A、预热温度 D、预热时间 E,金尾矿掺量的第 1 水平较好,预热温度的第 2 水平较好,预热

3 结果分析

以陶粒的堆积密度、筒压强度、吸水率作为考查指标对实验结果进行的分析如表 3 所示。

从堆积密度的实验结果来看,焙烧时间 G 的极差为 24.5,是最大的极差,说明焙烧时间的变化对堆积密度的影响最大。因为堆积密度越小越好,它的第 2 水平优于第 1 水平,所以取它的第 2 水平。其次是煤粉掺量 C 的极差,为 16.5,第 2 水平比第 1 水平好,因此取第 2 水平。预热温度 D 和焙烧温度 F 的极差均为 10.5,第 1 水平优于第 2 水平,取第 1 水平较好。其余 3 个因素,尾矿掺量 A、粉煤灰掺量 B、预热时间 E 的极差较小,分别为 1.5、9.5、8.5,金尾矿掺量取第 1 水平较好,粉煤灰掺量取第 2 水平较好,预热时间取第 2 水平较好。

从筒压强度的实验结果来看,最大的极差是 0.31,

时间的第 1 水平较好。

1)金矿尾矿掺量 A 对各考查指标的影响。对 3 个考查指标来说,尾矿掺量的极差都不是最大的,也就是说,尾矿掺量不是影响最大的因素。从表 3 中看出,对堆积密度和吸水率来说,尾矿掺量取第 1 水平较好;对筒压强度来说,取第 2 水平较好,但取第 1 水平也不是很差。综合考虑,尾矿掺量取第 1 水平为好,为 55 g。

2)粉煤灰掺量 B 对各考查指标的影响。对于吸水率来说,粉煤灰掺量取第 1 水平较好;对堆积密度来说,取第 2 水平较好,但取第 1 水平也不是很差;对于筒压强度来说,取第 2 水平较好,取第 1 水平也不是太差。综合来看,应取第 1 水平,为 34 g。

3)煤粉掺量 C 对各考查指标的影响。对于吸水率来说,煤粉掺量的极差最大,是影响最大的因素,取第 2 水平较好;对堆积密度和筒压强度来说,煤粉掺量均取第 2 水平时较好,因此煤粉掺量应取第 2 水平,

表 3 实验结果的正交分析

Tab. 3 Orthogonal analysis of experimental results

编号	A 尾矿粉掺量	B 粉煤灰掺量	C 煤粉掺量	D 预热温度	E 预热时间	F 焙烧温度	G 焙烧时间	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	筒压强 度/MPa	吸水率/%
1	1	1	1	1	1	1	1	848	5.29	6.8
2	1	1	1	2	2	2	2	836	5.12	5.1
3	1	2	2	1	1	2	2	808	5.93	5.0
4	1	2	2	2	2	1	1	824	5.66	6.6
5	2	1	2	1	2	1	2	800	5.22	4.7
6	2	1	2	2	1	2	1	854	5.86	4.1
7	2	2	1	1	2	2	1	842	5.73	7.9
8	2	2	1	2	1	1	2	826	5.39	7.6
堆积 密度	k_1	829.0	834.5	838.0	824.5	834.0	824.5	842.0		
	k_2	830.5	825.0	821.5	835.0	825.5	835.0	817.5		
	极差	1.5	9.5	16.5	10.5	8.5	10.5	24.5		
	优方案	A1	B2	C2	D1	E2	F1	G2		
筒压 强度	K_1	22.00	21.49	21.53	22.17	22.47	21.56	22.54		
	K_2	22.20	22.71	22.67	22.03	21.73	22.64	21.66		
	k_1	5.50	5.37	5.38	5.54	5.62	5.39	5.64		
	k_2	5.55	5.68	5.67	5.51	5.43	5.66	5.41		
	极差	0.05	0.31	0.29	0.03	0.19	0.27	0.23		
	优方案	A2	B2	C2	D1	E1	F2	G1		
吸 水 率	K_1	23.5	20.7	27.4	24.4	23.5	25.7	25.4		
	K_2	24.3	27.1	20.4	23.4	24.3	22.1	22.4		
	k_1	5.88	5.18	6.85	6.10	5.88	6.43	6.35		
	k_2	6.08	6.78	5.10	5.85	6.08	5.53	5.60		
	极差	0.20	1.60	1.75	0.25	0.20	0.90	0.75		
	优方案	A1	B1	C2	D2	E1	F2	G2		

为 3 g。

4) 预热温度 D 对各考查指标的影响。对 3 个考查指标来说, 预热温度的极差都不是最大的, 也就是说, 预热温度不是影响最大的因素。从表 3 中看出, 对堆积密度和筒压强度来说, 预热温度取第 1 水平较好; 对吸水率来说, 取第 2 水平较好, 但取第 1 水平也不是很差。综合考虑, 预热温度取第 1 水平为好, 为 450 ℃。

5) 预热时间 E 对各考查指标的影响。对 3 个考查指标来说, 预热时间的极差都不是最大的, 也就是说, 预热时间不是影响最大的因素。从表 3 中看出, 对堆积密度来说, 预热时间取第 2 水平较好; 对筒压强度来说, 取第 1 水平较好, 但取第 2 水平也不是很差; 对吸水率来说, 预热温度的极差最小, 取第 1 水平较好, 取第 2 水平也可以。综合考虑, 预热时间取第 2 水平为好, 为 60 min。

6) 焙烧温度 F 对各考查指标的影响。对 3 个考查指标来说, 焙烧温度的极差都不是最大的, 也就是说, 焙烧温度不是影响最大的因素。从表 3 中看出, 对筒压强度和吸水率来说, 焙烧温度取第 2 水平较好; 对堆积密度来说, 取第 1 水平较好, 但取第 2 水平也不是很差。综合考虑, 焙烧温度取第 2 水平为好, 为 1 150 ℃。

7) 焙烧时间 G 对各考查指标的影响。对堆积密度来说, 焙烧时间的极差最大, 是影响最大的因素, 取第 2 水平较好; 对筒压强度来说, 取第 1 水平较好, 但取第 2 水平也不是很差; 对吸水率来说, 取第 2 水平较好, 因此最终焙烧时间应取第 2 水平, 为 120 min。

通过各因素对 3 个考查指标的影响分析, 得出最优方案如下: 金矿尾矿粉掺量为 55 g, 粉煤灰掺量为 34 g, 煤粉掺量为 3 g, 预热温度为 450 ℃, 预热时间为 60 min, 焙烧温度为 1 150 ℃, 焙烧时间为 120 min。

对采用优方案制备的陶粒进行 X 射线衍射 (XRD) 分析, 采用扫描电镜 (SEM) 对陶粒断面进行观察, 结果如图 1、2 所示。可以看出, 陶粒中含有较多石英、莫来石、钙长石等矿物。莫来石由 SiO_2 和 Al_2O_3 形成, 硬度较大, 可以为陶粒提供更高的强度^[10]。钙长石晶体一般为板状或板柱状, 可以降低陶粒的烧成温度, 熔融后钙长石玻璃体填充在莫来石颗粒之间, 使陶粒制品减少空隙, 变得致密, 从而可以提高陶粒的机械强度^[11], 使吸水率减小。由 SEM 图像可看出, 陶粒试样的内部出现了很多液相, 冷却后形成大量光滑的玻璃体, 有利于提高陶粒的强度。在图 2(c) 中可以看到陶粒内部的网状结构, 大气孔较少, 以小气孔为主, 小

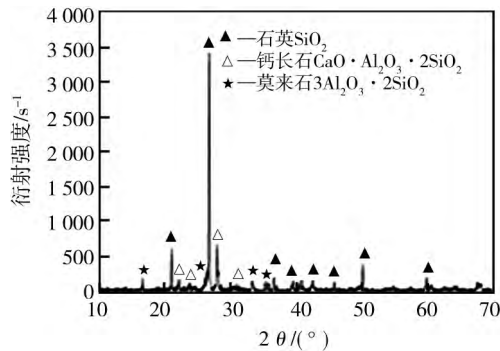


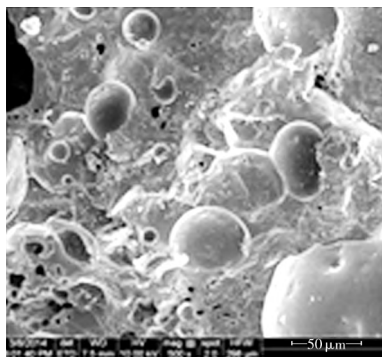
图1 优方案制备陶粒的X射线衍射谱图

Fig. 1 XRD pattern of ceramsites prepared with optimal parameters

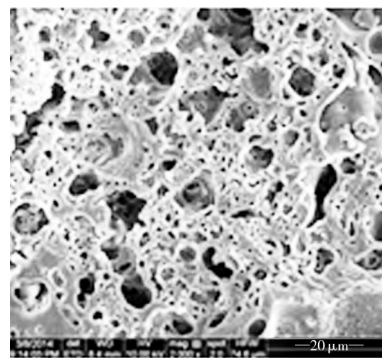
气孔多为密闭孔。在图2(d)中可以看到钙长石的板状或板柱状结构,端口呈现贝壳状或参差状。

4 结论

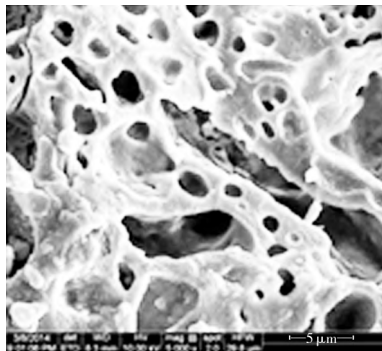
以金矿尾矿为主要原料,利用焙烧工艺制备陶粒,为得到性能良好的陶粒制品,采用正交实验方法,以所制陶粒的堆积密度、筒压强度和吸水率为考查指标,对各因素进行分析,确定每个因素的最优水平。最终确定的最优方案如下:金矿尾矿粉掺量为55 g,粉煤灰掺量为34 g,煤粉掺量为3 g,预热温度为450 ℃,预热时间为60 min,焙烧温度为1 150 ℃,焙烧时间为120 min。



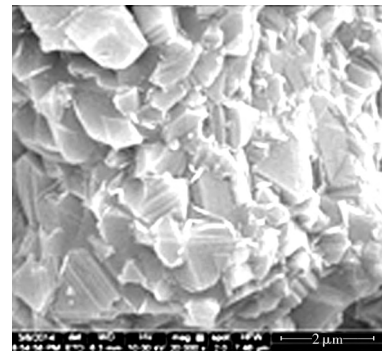
(a) 放大 500 倍



(b) 放大 2 000 倍



(c) 放大 5 000 倍



(d) 放大 20 000 倍

图2 优方案制备陶粒断面的扫描电镜图像

Fig. 2 SEM images of ceramsites prepared with optimal parameters

参考文献 (References):

- [1] 陈平. 中国黄金尾矿综合利用的现状和发展趋势[J]. 黄金, 2012 (10): 47-51.
- [2] 赖才书, 胡显智, 字富庭. 我国矿山尾矿资源综合利用现状及对策[J]. 矿产综合利用, 2011 (4): 11-14.
- [3] TERRY LAY G F, ROCKWELL M C, WILTSHIRE J C, et al. Characteristics of silicate glasses derived from vitrification of manganese crust tailings [J]. Ceramics International, 2009, 35 (5): 1961-1967.
- [4] 刘润华, 许珠信, 刘畅, 等. 尾矿资源现状及综合利用技术的进展[J]. 黄金, 2011, 32 (11): 66-69.
- [5] LIU Haiming, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Study on static and dynamic strength characteristics of tailings silty sand and its engineering application[J]. Safety Science, 2012, 50 (4): 828-834.
- [6] 陈晓玲. 低硅铁尾矿制微晶玻璃的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2011 (5): 41-44.
- [7] 王长龙, 乔春雨, 王爽, 等. 煤矸石与铁尾矿制备加气混凝土的试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 764-770.
- [8] 李振, 曲殿利, 郭玉香, 等. 菱镁矿尾矿与硼泥合成橄榄石研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (2): 248-252.
- [9] 邓宏卫. 轻质高强粉煤灰陶粒的制备及其混凝土性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] 刘楷. 不锈钢污泥制备高性能陶粒的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [11] 毛锡双. 超轻页岩陶粒的制备及焙烧机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.