

利用液态磷渣制备乳浊玻璃

舒 杼¹, 周 俊^{2*}, 王焰新¹, 卢学实¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学教育部纳米矿物材料及应用工程研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 为实现炼磷排放的高温液态磷渣的热能、物质的同步回收利用, 并消除其环境污染问题, 通过现场试验, 以高温液态磷渣为主要原料, 直接与 16.5% 的石英粉和 8.5% 的高岭土热配合, 再经 1450 °C 熔炼、浇铸成型和 850 °C 乳化热处理, 制得了乳浊玻璃板材。磷渣乳浊玻璃的抗折强度为 43.68 MPa, 耐酸性为 0.51%, 耐碱性为 0.04%, 能满足建筑装饰材料的质量要求。ESEM、XRD 和 EDS 分析结果共同表明, 母玻璃的乳浊机理在于主体玻璃中析出了富 Ca 元素的粒径为 0.1~0.4 μm 的非晶质球形颗粒。由于高温液态磷渣掺量高达 75%, 改性剂掺量低且成本低廉, 生产线易于配置, 本研究具有较高的工业化生产可行性、较佳的经济效益和应用前景。

关键词: 液态磷渣; 乳浊玻璃; 污染控制; 资源化。

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2009)06-1019-06

收稿日期: 2009-01-20

On-Site Preparation of Opaque Glass Using Liquid Phosphorus Slag

SHU Zhu¹, ZHOU Jun^{2*}, WANG Yan-xin¹, LU Xue-shi¹

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Engineering Research Center of Nano-Geomaterials of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract In order to recycle both the heat energy and the material of hot liquid phosphorus slag discharged from the phosphorus smelting furnace and eliminate its environmental problem, on-site preparation tests were carried out beside the smelting furnace by undertaking the following process: first, 75.0% fresh hot liquid phosphorus slag was mixed directly with 16.5% quartz powder and 8.5% kaolin clay, and then melted at 1450 °C and cast-molded into parent glass panels which were subsequently heat-treated at 850 °C and transformed into opaque glass which possesses bending strength, acid resistance and alkali resistance respectively of 43.68 MPa, 0.51% and 0.04%, and so is applicable for wall decorating in buildings. Results of ESEM, XRD and EDS analyses indicate that the mechanism of emulsification of parent glass is attributed to the phase separation of parent glass and so the deposition of the non-crystalline spherical granules with particle sizes of about 0.1–0.4 μm. Since high proportion of hot liquid phosphorus slag is consumed, cheap modifying raw materials are used and ordinary glass manufacturing facilities can be directly employed, the proposed on-site test process is cost-effective and feasible for industrial manufacturing.

Key words: liquid phosphorus slag; opaque glass; pollution control; waste recycling.

电炉法炼磷是国内外普遍采用的单质磷生产工艺。液态磷渣是电炉法炼磷产生的工业废物, 每生产 1 t 单质磷将排放 8~10 t 液态磷渣, 通常从炼磷电炉排渣口流出, 呈高温熔融态, 温度为 1300~1500 °C (图 1)。高温液态磷渣的现役处理方式是将其直接水淬冷却为常温颗粒状磷渣, 再作为废弃物露天堆放。这种处理方式不仅浪费巨额热能, 消耗水资源, 占用

土地, 而且磷渣中的磷酸盐、氟化物和重金属等有害物质在大气降水的淋滤作用下还会污染土壤和水体 (陈豪立, 1999; 高明等, 2003)。

为实现水淬冷却后的颗粒磷渣资源化, 少量颗粒磷渣已被回收利用于生产水泥、砖块和农肥等 (Shi and Qian, 2000; 刘冬梅等, 2007; 刘秋美等, 2007), 也有试制微晶玻璃、多孔玻璃的报道 (Lebedeva *et al.*,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 40830748); 贵阳市科技攻关项目 (2006 字第 48 号)。

作者简介: 舒杼 (1985-), 博士研究生, 环境工程专业, E-mail: zhushu426@gmail.com。* 通讯作者: 周俊, E-mail: zhoujun@cug.edu.cn

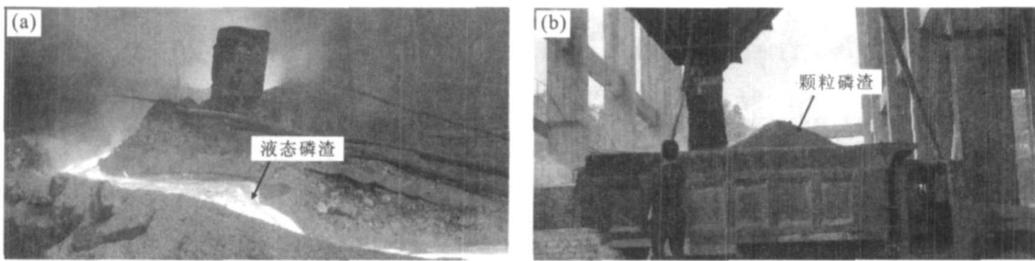


图 1 高温液态磷渣排放(a)和水淬颗粒磷渣运输(b)照片

Fig. 1 Photographs of the discharge of liquid phosphorus slag (a) and the transportation of the water-quenched grain phosphorus slag (b)

2000; 杨家宽等, 2003). 然而, 这些针对水淬冷却后颗粒磷渣的资源化技术仅仅回收利用了高温液态磷渣的物质资源, 其蕴含的大量热能在水淬冷却过程中被白白浪费. 鉴于液态磷渣的主要化学成分类似于硅灰石(硅酸钙), 以硅酸钙的恒压比热容 $260 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ (Parks and Kelly, 1926) 类比估算, 液态磷渣在水淬冷却处理过程中所浪费热能约为 $3.4 \times 10^8 \text{ J}/\text{t}$. 据统计, 2006 年我国的单质磷产量已达到 $6.9 \times 10^5 \text{ t}$ (陶俊法, 2008), 则相应因液态磷渣水淬冷却处理所浪费的热能约为 $2.7 \times 10^{15} \text{ J}$, 折合 $9.2 \times 10^4 \text{ t}$ 标准煤, 数量惊人. 因此, 研究既能回收液态磷渣的物质, 又能回收热能的资源化技术, 节能减排意义将更为重大.

本次研究以实现高温液态磷渣的物质、热能的双效回收利用为目标, 设计了直接利用炼磷高温液态磷渣制备建筑装饰用乳浊玻璃工艺方案. 在炼磷企业现场成功试制出边长为 $60 \sim 200 \text{ mm}$ 、厚 $8 \sim 10 \text{ mm}$ 的乳浊玻璃. 乳浊玻璃是指主体玻璃中均匀分布着大量微粒的玻璃. 由于微粒折射率与主体玻璃不同, 光线照射时遇到微粒产生散射而使乳浊玻璃宏观上呈不透明的乳浊态. 均匀分散的微粒可以是未完全熔融的砂粒、微小气泡、分相的液滴、析出的非晶质体或晶粒. 乳浊玻璃已被广泛用作建筑装饰材料, 如玻璃马赛克、斑纹玻璃板、镶嵌玻璃等(王承遇和陶瑛, 1998).

1 试验

1.1 高温液态磷渣的物化性质

本文现场试验系在贵州省开阳县某磷化工企业的炼磷炉排渣口旁进行. 在现场实验前期, 定期对炼磷炉排出的高温液态磷渣进行了 5 次取样, 待其自然冷却后测定化学组成(表 1). 结果显示, 炼磷生产中排放的高温液态磷渣的化学组成相对稳定, 可确保磷渣乳浊玻璃制备试验期间原料成分的稳定性和

结果的可重现性.

另选取石英粉、高岭土作为液态磷渣的改性剂化学组成见表 1, 设计的现场试验配方如表 2 所示, 总投料量为 8000 g . 该配方是在前期一系列实验室配方试验基础上获得的最佳配方.

1.2 现场试验过程

现场试验工艺流程如图 2 所示, 具体步骤为: (1) 改性剂配合、预热. 按配方表 2, 将石英粉、高岭土称量并混合均匀, 装入 1 L 的坩埚内, 置于电阻丝台车炉(RT2-80-12 型)中预热至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温备用; (2) 高温热配料. 利用升降式硅钼棒高温电炉(JG-MT-40-16 型, 以下简称升降炉)将一口 5 L 的坩埚预热至 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$; 当炼磷炉排渣时, 使用容积为 4 L 的铁勺从炼磷炉排渣口舀取高温液态磷渣; 将经过预热的石英粉、高岭土混合料与高温液态磷渣同步均匀地倒入预热好的坩埚中, 并利用搅拌器深入坩埚中对倒入的混合料不断搅拌, 使石英粉、高岭土与高温液态磷渣初步混合; 需说明的是高温液态磷渣的倒入量要小于表 2 所示重量; (3) 配比较对. 将坩埚连同配合料一起放在台秤上, 补充倒入一定量的高温液态磷渣, 使液态磷渣与石英粉、高岭土的比例符合表 2 的配方要求; (4) 改性液态磷渣熔炼. 将装有热配料所得混合物的坩埚放回升降炉中, 在 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 下熔炼 60 min 后进行一次搅拌; 再在 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 继续熔炼 30 min , 获得料性均匀改性液态磷渣; (5) 浇铸成型. 将改性液态磷渣浇铸到已预热至 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 的堇青石质模具中, 规格分别为 $60 \times 20 \times 8 \text{ mm}^3$ 、 $60 \times 60 \times 8 \text{ mm}^3$ 和 $200 \times 200 \times 10 \text{ mm}^3$, 成型为母玻璃板; (6) 乳化热处理. 前期热处理温度及时间系列试验显示, 在 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 60 min 为最佳热处理温度制度. 因此, 将母玻璃板连同模具趁热转移到已预热至 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 的台车炉中, 再在 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温热处理 60 min , 随炉自冷退火, 即制得磷渣乳浊玻

表 1 2007 年不同月份高温液态磷渣(LPS)和改性剂的化学组成(%)

Table 1 Chemical compositions of liquid phosphorus slag (LPS) in different months of 2007 and that of modifying raw materials

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TFe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	其他	合计
8 月 LPS	40.85	5.02	46.3	1.18	0.94	0.43	0.44	0.29	2.78	0.82	0.95	100
9 月 LPS	40.89	5.04	46.34	1.75	0.68	0.29	0.47	0.22	2.92	0.79	0.61	100
10 月 LPS	41.42	4.98	45.68	1.05	0.76	0.45	0.50	0.24	2.83	0.85	1.24	100
11 月 LPS	41.92	5.08	44.60	1.24	0.96	0.37	0.49	0.35	3.19	0.81	0.99	100
12 月 LPS	41.01	5.02	45.79	1.41	0.73	0.32	0.48	0.26	2.98	0.82	1.18	100
石英粉	97.76	0.28	0.35	0.11	0.05	0.15	0.45	0.28	0.01	0.03	0.53	100
高岭土	46.62	35.86	0.08	0.05	0.12	0.09	0.28	0.15	0.02	15.41	1.32	100

表 2 现场试验配方

Table 2 Dosage of raw materials used in the on-site preparation test

原料	液态磷渣	石英粉	高岭土	合计
配比(%)	75.0	16.5	8.5	100.0
重量(g)	6 000.0	1 320.0	680.0	8 000.0

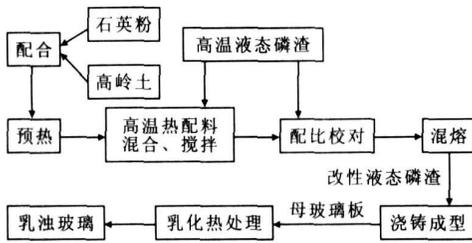


图 2 直接利用高温液态磷渣制备乳浊玻璃的现场试验工艺流程

Fig. 2 Flow chart of on-site preparation of opaque glass from hot liquid phosphorus slag

璃样品。

1.3 性能测试方法

利用 X 射线粉晶衍射仪(XRD, 日本 Rigaku 公司 D/M ax-3B 型, CuK α 射线辐射)测试样品的晶相组成;使用 5% 的氢氟酸溶液将样品的断面切片侵蚀约 1 min, 烘干后喷碳处理, 利用带有能谱仪(EDS)的环境扫描电子显微镜(ESEM, 荷兰 FEI 公司 Quanta-200FEG 型)观测样品的显微结构, 并测试微区化学组成。

利用 WE50 型液压式万能材料试验机, 采用三点法, 测定规格为 60 \times 20 \times 8 mm³ 磷渣乳浊玻璃样品的抗折强度, 跨距为 50 mm, 加压速度为 1 mm \cdot min⁻¹;将规格为 60 \times 20 \times 8 mm³ 样品切割为 20 \times 20 \times 8 mm³ 试块, 分别置于 1% H₂SO₄、1% NaOH 溶液中浸泡 650 h, 测定样品的质量损失率, 以评估样品的耐化学腐蚀性。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌与微观结构

图 3 给出了未经热处理的母玻璃和经过 850 $^{\circ}$ C 热处理 60 min 所得乳浊玻璃的表观形貌照片。由图 3 可见, 经过乳化热处理, 透明的母玻璃已转化成为了不透明的白色乳浊玻璃, 表面平整光滑, 玉质感较强。

ESEM 测试结果(图 4)显示, 未经热处理的母玻璃为均匀玻璃相, 而经 850 $^{\circ}$ C 热处理 60 min 所得的磷渣乳浊玻璃在微观上是由粒径在 0.1~0.4 μ m 之间的规则的球形颗粒分布于残余玻璃相中构成。因此, 乳浊玻璃的乳化机理可认为是, 在热处理过程中, 大量的球形颗粒物从玻璃母体中析出, 当可见光照射时, 由于可见光波长(0.38~0.78 μ m)与球形颗粒粒径相近, 光线根据所遇颗粒的不同粒径大小分别产生瑞利散射和米氏散射, 使样品在宏观上呈现乳浊态(王承遇和陶瑛, 1998)。

图 5 给出了磷渣乳浊玻璃和母玻璃的 XRD 分析结果。结果显示, 两者的 XRD 图谱均无晶相峰出现, 表明磷渣乳浊玻璃与其母玻璃一样, 均为非晶态。由此可认为, 磷渣乳浊玻璃中分散的球形颗粒为非晶质颗粒, 表明母玻璃在 850 $^{\circ}$ C 下热处理时的

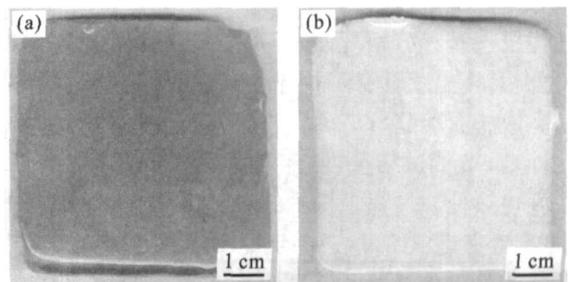


图 3 母玻璃(a)和乳浊玻璃(b)的表观形貌照片

Fig. 3 Surface appearance photographs of the parent glass (a) and the opaque glass (b)

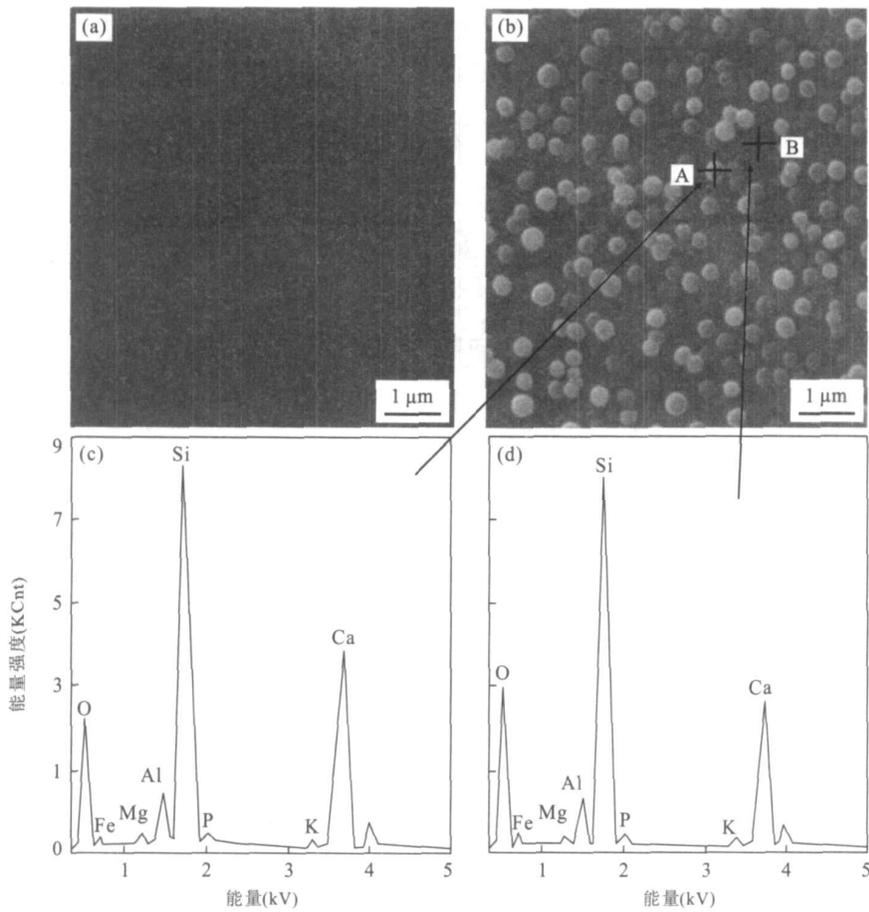


图 4 母玻璃(a)和乳浊玻璃(b)的 ESEM 显微照片; 乳浊玻璃中的球形颗粒物(c)及其背景区域(d)的 EDS 图谱
 Fig. 4 ESEM images of the parent glass (a) and the opaque glass (b), EDS spectra of the spherical granule (c) and its background area (d) in the opaque glass

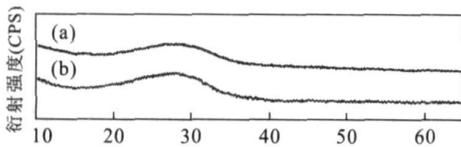


图 5 母玻璃(a)和乳浊玻璃(b)的 XRD 图谱
 Fig. 5 XRD patterns of the parent glass (a) and the opaque glass (b)

乳化机理属于分相乳浊, 即母玻璃在热处理时发生了分相, 析出了具有不同于主体玻璃化学组成的非晶态液滴而引起母玻璃乳浊(王承遇和陶瑛, 1998)。此外, EDS 测试结果(图 4)证实, 相对于主体玻璃, 在乳化热处理过程中析出的球形颗粒出现了明显的 Ca 元素富集现象, 这进一步证实了热处理过程中分相行为的发生及因此而导致的母玻璃乳浊现象。

2.2 物理化学性能

乳浊玻璃的化学组成如表 3 所示, 其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO , 属于 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 玻璃系统。

表 4 给出了磷渣乳浊玻璃及其母玻璃的物化性能测试结果。表中显示, 乳浊玻璃的抗折强度为 43.68 MPa, 远高于母玻璃的 9.85 MPa, 其原因可结合微观结构(图 4)进行解释。未经热处理的母玻璃尚未发生乳浊, 依然保持透明玻璃形貌, 抗折强度与普通平板玻璃(通常为 8 ~ 10 MPa)相当; 经 850 °C 热处理 60 min 后, 母玻璃发生了分相乳浊, 在主体玻璃中析出了非晶质颗粒, 显然这些非晶质颗粒有利于阻止残余玻璃相中裂纹的扩展, 从而增强了乳浊玻璃样品整体的抗折强度 (McMillan, 1979), 使其远高于母玻璃和普通平板玻璃。

另外, 从表 4 也可知, 磷渣乳浊玻璃和母玻璃均具有较好的耐碱性, 但前者的耐酸性相对较差。结合 ESEM 及 EDS 测试结果可以认为, 碱金属 Ca 的富集及其形成的高钙非晶质颗粒不利于抵抗酸液侵蚀, 从而导致了磷渣乳浊玻璃的整体耐酸性降低, 但其耐酸性仍远优于天然花岗岩板材(王婧等, 2008),

表 3 乳浊玻璃的化学组成(%)

Table 3 Chemical compositions of the opaque glass

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TFe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	其他	合计
组成	52.03	7.21	35.02	1.02	0.51	0.35	0.44	0.27	2.46	0.69	100.00

表 4 磷渣乳浊玻璃及其母玻璃的物理化学性能及其与天然花岗岩的对比

Table 4 Properties of the opaque glass and the parent glass and those of the natural granite

	母玻璃	磷渣乳浊玻璃	天然花岗岩
抗折强度(MPa)	9.85	43.68	15.00
耐酸性(%)	0.03	0.51	0.91
耐碱性(%)	0.05	0.04	0.08

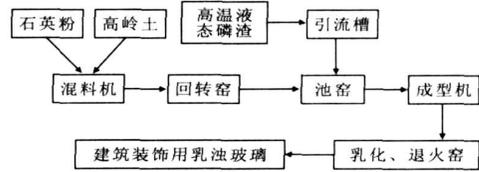


图 7 直接利用高温液态磷渣制备乳浊玻璃的工业化生产线设备配置

Fig. 7 Production facility scheme for industrial manufacturing of opaque glass from hot liquid phosphorus slag

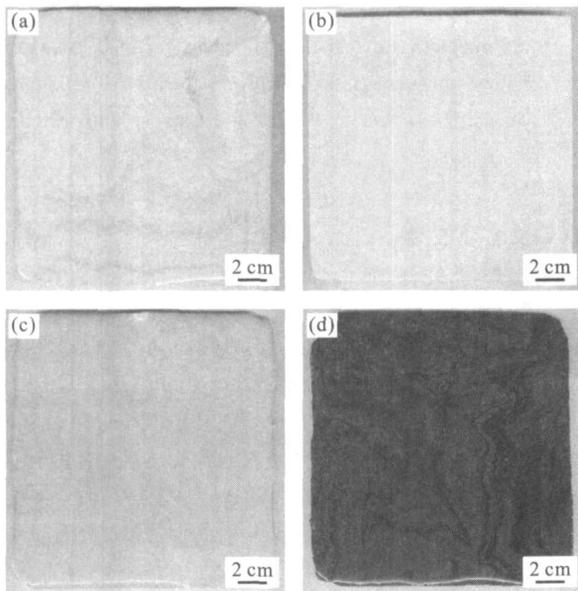


图 6 各种颜色的磷渣乳浊玻璃板材照片

Fig. 6 Photographs of the opaque glass samples with different colours

去, 因为高温液态磷渣和改性剂可以直接通过计量后按比例投入熔融窑炉之中。

根据现场试验工艺流程, 并参考现役玻璃生产过程, 可配置工业化生产线如图 7 所示, 相应的生产流程具体为: 将改性剂(石英粉、高岭土)按照配比称量, 投入混料机混合均匀, 再利用回转窑进行预热; 通过引流槽将炼磷炉排出的高温液态磷渣直接引入玻璃池窑窑头, 并按配比同步投入改性剂, 利用耐热搅拌器在窑头进行初始搅拌混合; 在池窑中, 液态磷渣与改性剂充分混熔、均化、澄清, 获得料性均匀的改性液态磷渣; 再通过常规的浇铸、压延或压制等玻璃成型设备, 将改性液态磷渣成型为母玻璃板, 并随即将其转移至辊道窑或梭式窑中, 在 850 °C 下乳化热处理 60 min, 再经退火冷却, 即制得磷渣乳浊玻璃产品。

由上述产业化方案可知, 磷渣乳浊玻璃的生产可有效利用高温液态磷渣的热能, 从而大幅度降低生产能耗, 同时又由于主要原料为液态磷渣废弃物, 而改性剂仅为廉价的石英粉和高岭土, 且掺量较低, 故原料总成本也较低。经初步估算, 磷渣乳浊玻璃的生产总成本可控制在 20 元/m² 以内, 与陶瓷生产成本相近, 完全可成为一种制造成本低廉的建筑装饰材料, 市场竞争力强, 产品销路广, 经济前景可观。

能满足建筑装饰材料的耐酸性要求。

2.3 装饰效果及其应用前景

在现场试验中, 通过向磷渣液中添加各种玻璃着色剂, 成功制备了规格为 200×200×10 mm³ 的多种颜色的乳浊玻璃板材(图 6), 样品外观色泽圆润、玉质感强, 色彩可调, 可实现产品的系列化, 具有较好的装饰效果, 可作为建筑装饰材料推广应用。

2.4 产业化工艺路线及实现方案

本文所述现场试验对将来直接利用高温液态磷渣工业化生产建筑装饰用乳浊玻璃具有很好的模拟性。未来的产业化工艺路线可以直接按照图 2 给出的现场试验工艺流程图, 只是配比较对步骤可以省

3 结论

(1) 以预热后的石英粉和高岭土为改性剂, 按需添加玻璃着色剂, 通过高温热配料, 直接将炼磷电炉排放的高温液态磷渣与改性剂、着色剂混合、熔炼, 获得改性液态磷渣, 再经浇铸成型、850 °C 保温热处

理 60 min 后,可制得各种颜色的磷渣乳浊玻璃,其抗折强度较高、化学稳定性较好,可作为建筑墙面装饰之用;(2)ESEM、XRD 和 EDS 分析结果共同表明,在热处理过程中,因分相而从母玻璃中析出的富 Ca 元素的粒径为 0.1~0.4 μm 的非晶质球形颗粒,导致了母玻璃的乳浊,同时提高了产品的抗折强度;(3)本工艺可实现高温液态磷渣的热能、物质的双效回收利用,解决了磷渣的环境污染,具有较佳的资源、能源价值和环保意义.液态磷渣掺量高,改性剂掺量低且成本低廉,生产设备为常规设备,故本研究具有较高的工业化生产可行性和经济效益.

References

- Chen, H. L., 1999. Comprehensive utilization of slag of yellow phosphor furnace. *Guizhou Chemical Industry*, 4: 7—8 24 (in Chinese with English abstract).
- Gao, M., Wei, C. F., Zhou, B. T., et al., 2003. Study on characteristics of chemical component and agrochemistry behavior of slag containing silicon. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 9(2): 220—228 (in Chinese with English abstract).
- Lebedeva, O. E., Dubovichenko, A. E., Kotsubinskaya, O. I., et al., 2000. Preparation of porous glasses from phosphorus slag. *Journal of Non-crystalline Solids*, 277(1): 10—14.
- Liu, D. M., Fang, K. H., Shi, Y., 2007. Effects of phosphorus slag on hydration properties and pore structure of cement paste. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 35(1): 109—113 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. M., Cao, J. X., Yang, L., 2007. Study on the influences of phosphorus slags powder on the property of high performance concrete. *Concrete*, 6: 54—55 62 (in Chinese with English abstract).
- McMillan, P. W., 1979. *Glass-ceramics* (second ed). Academic Press, London.
- Parks, G. S., Kelly, K. K., 1926. The heat capacity of calcium silicate. *Journal of Physical Chemistry*, 30(9): 1175—1178.
- Shi, C. J., Qian, J. S., 2000. High performance cementing materials from industrial slags—A review. *Resources Conservation and Recycling*, 29: 195—207.
- Tao, J. F., 2008. Present status and development prospect of yellow phosphorus industry in China. *Inorganic Chemicals Industry*, 40(6): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Tao, Y., 1998. Opaque glass (I). *Glass & Enamel*, 26(2): 57—59 (in Chinese).
- Wang, J., Zhang, H. F., Xu, W. C., et al., 2008. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling orogenic belt and its tectonic implication. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 474—486 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. K., Xiao, B., Yao, D. W., et al., 2003. Preparation and microstructure analysis of glass-ceramics based on yellow phosphorus slag. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2: 40—43 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈豪立, 1999. 黄磷炉渣的综合利用途径. *贵州化工*, 4: 7—8, 24.
- 高明, 魏朝富, 周保同, 等, 2003. 含硅熔渣的化学组成特征与农业化学行为研究. *植物营养与肥料学报*, 9(2): 220—228.
- 刘冬梅, 方坤河, 石妍, 2007. 磷渣对水泥浆体水化性能和孔结构的影响. *硅酸盐学报*, 35(1): 109—113.
- 刘秋美, 曹建新, 杨林, 2007. 磷渣粉对高性能混凝土性能影响的研究. *混凝土*, 6: 54—55, 62.
- 陶俊法, 2008. 中国黄磷工业现状与发展前景. *无机盐工业*, 40(6): 1—4.
- 王承遇, 陶瑛, 1998. 乳浊玻璃(一). *玻璃与搪瓷*, 26(2): 57—59.
- 王婧, 张宏飞, 徐旺春, 等, 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(4): 474—486.
- 杨家宽, 肖波, 姚鼎文, 等, 2003. 黄磷渣微晶玻璃制备及显微结构分析. *矿产综合利用*, 2: 40—43.