

# 蒙古国某斑岩型铜尾矿制备轻质多孔陶瓷正交实验研究

李伟光<sup>1</sup>, 宋厚彬<sup>2</sup>, 刘海营<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 李学亮<sup>1</sup>, Sazini Makamu<sup>3</sup>, 杨浩<sup>2</sup>, 张艳平<sup>2</sup>

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 大兴 102628;
2. 黑龙江紫金铜业有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161041;
3. 南非国家矿业技术研究院, 豪登 兰德堡 2196

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0101-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.011

**摘要** 以蒙古国某典型斑岩型铜尾矿为主要原料, 添加钠长石、高岭土、发泡剂 SiC, 制备轻质多孔陶瓷材料。通过正交实验研究了物料配比、粉磨时间、发泡剂种类、发泡剂用量和烧成温度对轻质多孔陶瓷表观密度和抗压强度的影响。当  $m(\text{铜尾矿}) : m(\text{钠长石}) : m(\text{高岭土})$  为 6.4 : 2.7 : 0.9、粉磨时间为 15 min、发泡剂(SiC)掺量为 0.1%、烧成温度为 1180 °C、保温时间为 60 min 时, 获得的多孔陶瓷材料表观密度为 580 kg/m<sup>3</sup>, 抗压强度为 4.90 MPa, 软化系数为 0.92。

**关键词** 蒙古国; 斑岩型铜尾矿; 轻质多孔陶瓷材料; 表观密度; 抗压强度

## 引言

蒙古国铜矿资源以斑岩型铜矿为主, 大量铜尾矿排放给矿业行业可持续发展来了巨大的环境压力和潜在的风险, 尤其是蒙古国高寒生态脆弱地区的生态风险更大。铜尾矿化学成分复杂, 伴生有硫、铅、砷等有害元素, 限制了其在多个领域的大规模资源化利用。如何实现铜尾矿减量化、高值化和全程无害化是行业关注的焦点。近年来利用尾矿生产建材逐步成为铜尾矿资源减量化利用的主要方向, 研发铜尾矿大规模消纳技术成为研究热点。总体来说, 开发用尾矿制备高附加值建筑材料的资源综合利用技术是解决蒙古国铜尾矿堆存带来的环保问题的有效途径之一<sup>[1-2]</sup>。

多孔陶瓷材料是经高温烧制、发泡生长而成, 其气孔间不贯通、吸水率低、孔径为毫米级, 并且气孔为闭孔, 孔隙率高, 密度及导热系数低, 在保温隔热性能上更具优势<sup>[3-5]</sup>。目前多孔陶瓷材料的制备方法也不尽相同, 在成型方式、发泡剂种类和烧成制度的筛选上研究较多。近年随着原料资源短缺和环境保护的加强, 蛇纹石、页岩、湖泊淤泥、煤矸石和珍珠岩等矿业固废也逐步在多孔陶瓷制备上应用。铜尾矿是复杂多元矿物体系, 不同于天然矿物原料, 其中残余的含重金属矿物、硫化矿物等有害组分和复杂氧化物

组分都会影响制备工艺和产品性能, 因此在铜尾矿制备大尺寸保温隔墙材料方面仍存在尾矿掺量低、气孔结构不均匀、抗压强度低、烧成范围窄等技术难点<sup>[6]</sup>。

通过对蒙古国某典型斑岩型铜尾矿理化特性的研究, 发现该尾矿中含有大量硅铝组分, 主要矿物为石英、钾长石等, 通过添加钠长石、高岭土、SiC 等辅助原料, 可实现高温半熔融状态下的软化发泡, 从而制备出具有封闭孔隙的轻质多孔陶瓷材料。铜尾矿和高岭土可为多孔陶瓷材料提供硅铝质组分, 起到骨架支撑增加强度的作用, 同时钠长石及铜尾矿中的钾长石可为多孔陶瓷体系提供大量钾、钠组分作为熔剂, 降低多孔陶瓷材料烧成体系的共熔点, 促进体系的半熔融软化发泡<sup>[7-9]</sup>。本文以该尾矿为主要原料, 添加钠长石、高岭土、发泡剂制备轻质多孔陶瓷材料, 通过开展物料配比、粉磨时间、发泡剂细度、发泡剂用量、烧成温度正交实验, 制备出了高性能多孔陶瓷材料, 为蒙古国典型斑岩型铜尾矿的高值化利用提供了一条新的路径。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

实验用斑岩型铜矿浮选尾矿来自蒙古国乌兰巴托市某铜矿, 样品为灰白色粉末状固体, 辅助原料选

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0121000)

作者简介: 李伟光(1992—), 男, 北京人, 硕士, 主要从事矿冶固废资源化利用研究, E-mail: liweiguang@bgrimm.com。

用中国江西的高岭土及钠长石粉,铜尾矿及辅助原料的 X 射线荧光光谱分析结果见表 1,铜尾矿的 X 射线衍射图谱见图 1。由表 1 和图 1 可知,尾矿的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  等,主要矿物为石英(45.36%)、钾长石(18.72%)、钠长石(10.27%);高岭土的化学成分主要是硅铝组分,可为多孔陶瓷的孔结构提供韧性和强度;钠长石的钠氧化物含量较高,可降低多孔陶瓷的熔融软化温度,促进发泡剂 SiC 颗粒在高温半熔融状态下氧化反应的发生,从而促进多孔陶瓷材料气孔结构的生成。

表 1 主要原料的 X 射线荧光光谱分析结果 /%  
Table 1 X-ray fluorescence spectrum analysis of copper tailings

| 化学成分 | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | CaO  | MgO  | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{SO}_3$ | Loss |
|------|----------------|-------------------------|------|------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|------|
| 铜尾矿  | 67.74          | 15.73                   | 0.67 | 0.95 | 3.68                 | 3.72                  | 2.70                    | 2.38          | 1.36 |
| 钠长石  | 77.50          | 11.98                   | 0.61 | 1.52 | 0.36                 | 7.15                  | 0.32                    | 0.02          | 0.45 |
| 高岭土  | 45.71          | 40.32                   | 0.77 | 0.66 | 2.53                 | 0.18                  | 7.27                    | 0.16          | 2.14 |

## 1.2 实验方法及测试方法

实验采用如图 2 所示的流程制备多孔陶瓷材料。将铜尾矿、钠长石、高岭土、发泡剂(细度为 500 目的 SiC 粉末)按比例加入到球磨机中,加水湿磨;采用喷

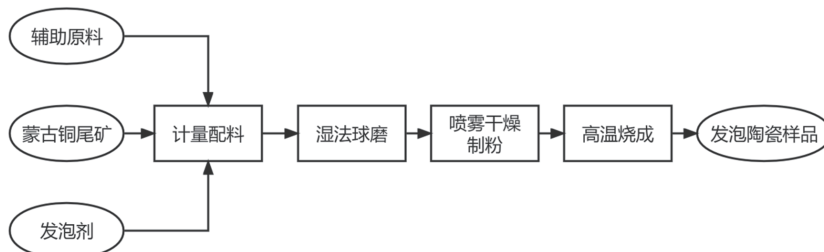


图 2 试验流程  
Fig. 2 Test flow chart

## 2 实验结果及分析

### 2.1 发泡剂种类实验

多孔陶瓷材料的气孔形成原理为在高温时坯体产生部分液相,此时发泡剂在高温时发生分解和氧化等化学反应放出大量气体,从而在液相的表面张力作用下形成均匀封闭的微细气孔<sup>[10-11]</sup>,因此发泡剂是否在高温状态下发生氧化分解反应是影响发泡陶瓷性能的关键因素。首先进行发泡剂种类的影响实验,实验选取 5 种常规的高温发泡剂,分别为炭粉、煤矸石、纯碱、氧化铁及 SiC,拟定的原料质量配比为铜尾矿 70%、钠长石 20%、高岭土 10%,其他实验条件为粉磨时间 15 min、烧成温度 1 200 ℃、保温时间 60 min。实验结果见表 2,由实验结果可知,针对铜尾矿配料体系,

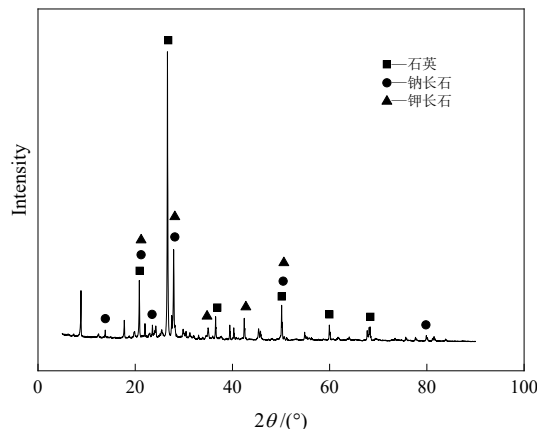


图 1 铜尾矿 XRD 衍射分析图谱  
Fig. 1 XRD diffraction pattern of copper tailings

雾干燥塔进行干燥,形成稳定微细粒球形颗粒状细粉;在方形高温窑具中均匀布料,随后在马弗炉中烧成,即得到多孔陶瓷材料。

多孔陶瓷材料的性能测试按照国标 GB/T 23451—2009《建筑用轻质隔墙条板》进行,通过物料配比、发泡剂用量、烧成制度正交实验获得表观密度和抗压强度最优的多孔陶瓷材料制备配方和工艺,再对最优工艺制备的产品进行表观密度、抗压强度和软化系数测试。

以炭粉、煤矸石、纯碱及氧化铁为发泡剂的烧成坯体表观密度较大,均无明显发泡效果,以 SiC 为发泡剂的烧成坯体表观密度为 614  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,具有明显的发泡效果,因此 SiC 是此体系下合适的发泡剂。

表 2 发泡剂种类实验结果  
Table 2 Test results of foaming agent types

| 试验编号 | 发泡剂种类 | 发泡剂用量/% | 多孔陶瓷材料表观密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|------|-------|---------|---------------------------------------------|
| 1    | 炭粉    | 5.0     | 2 320                                       |
| 2    | 煤矸石   | 7.0     | 2 551                                       |
| 3    | 纯碱    | 2.0     | 1 900                                       |
| 4    | 氧化铁   | 4.0     | 2 156                                       |
| 5    | SiC   | 0.5     | 614                                         |

注:不同的发泡剂发泡能力有差异,因此发泡剂的用量有差别。

2.2 正交实验

2.2.1 正交实验设计

为更好地验证以该铜尾矿为主要原料制备多孔陶瓷的物料配比、磨矿时间、发泡剂掺量和烧成温度等因素对多孔陶瓷性能的影响, 进行 6 因素 3 水平正交实验。实验共设置 6 个影响因素: 铜尾矿掺量 A、钠长石掺量 B、高岭土掺量 C、粉磨时间 D、发泡剂用量 E、烧成温度 F, 每个因素选取 3 个水平, 此水平因素确定的原料掺量为基准用量, 其真实用量为对组成体系进行均一化处理后的用量。粉磨时间、发泡剂用量、烧成温度和烧成时间的水平依据前期探索实验条件确定, 正交实验的因素和水平表见表 3, 正交实验的  $L_{18}(3^6)$  表见表 4。

表 3 铜尾矿发泡陶瓷配方及工艺条件正交因素和水平  
Table 3 Orthogonal factor and level table of formula and process conditions of copper tailings foamed ceramics

| 因素 | 铜尾矿<br>/% | 钠长石<br>/% | 高岭土<br>/% | 磨矿<br>时间/min | 发泡剂<br>掺量/% | 烧成<br>温度/℃ |
|----|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------|------------|
| 1  | 50        | 20        | 5         | 10           | 0.1         | 1 180      |
| 2  | 60        | 30        | 10        | 15           | 0.3         | 1 200      |
| 3  | 70        | 40        | 15        | 20           | 0.5         | 1 220      |

选取多孔陶瓷材料的关键性能指标抗压强度和表观密度作为考核指标。考核指标依据为《GB/T 23451—2009 建筑用轻质隔墙条板》中规定, 表观密度在  $950\text{ kg/m}^3$  以下, 越小越好; 抗压强度在  $3.5\text{ MPa}$  以上, 越大越好。

2.2.2 正交实验结果分析

表 5 为发泡陶瓷的表观密度、抗压强度的性能测试结果。K1、K2 和 K3 分别是因素 A、B、C、D、E、F 的第 1 水平、第 2 水平和第 3 水平所在实验中考察指标的平均值; 极差是同一因素的考察指标的最大值与最小值之差, 其大小代表因素的水平改变对考察指标的影响大小, 极差越大说明该因素对考察指标的影响越大。

对正交实验结果进行直观分析可知多孔材料表观密度的极差  $R_A > R_D > R_B > R_C > R_E > R_F$ , 即对多孔材料表观密度的影响较大的因素排名为 A 尾矿用量、D 发泡剂掺量和 B 钠长石用量。表观密度越小, 多孔陶瓷材料性能越优, 因此取得最优表观密度的实验条件为 A1B1C1D2E1F2; 多孔陶瓷抗压强度的极差  $R_D > R_A > R_C > R_E > R_B > R_F$ , 即对多孔材料抗压强度影响较大的因素排名为 D 发泡剂掺量、A 尾矿用量以及 C 高岭土用量。抗压强度越大, 多孔陶瓷材料性能越优, 因此取得最优抗压强度的实验条件为 A2B2C2D1E2F1。

(1) 铜尾矿用量对发泡陶瓷性能的影响

表 4 正交实验表  $L_{18}(3^6)$   
Table 4 Orthogonal Experiment Table  $L_{18}(3^6)$

| 因素    | 尾矿<br>/wt% | 钠长石<br>/wt% | 高岭土<br>/wt% | 发泡剂<br>掺量/wt% | 磨矿<br>时间/min | 烧成<br>温度/℃ |
|-------|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|------------|
| 实验 1  | 50         | 20          | 5           | 0.1           | 10           | 1 180      |
| 实验 2  | 50         | 30          | 10          | 0.3           | 15           | 1 200      |
| 实验 3  | 50         | 40          | 15          | 0.5           | 20           | 1 220      |
| 实验 4  | 60         | 20          | 5           | 0.3           | 15           | 1 220      |
| 实验 5  | 60         | 30          | 10          | 0.5           | 20           | 1 180      |
| 实验 6  | 60         | 40          | 15          | 0.1           | 10           | 1 200      |
| 实验 7  | 70         | 20          | 10          | 0.1           | 20           | 1 200      |
| 实验 8  | 70         | 30          | 15          | 0.3           | 10           | 1 220      |
| 实验 9  | 70         | 40          | 5           | 0.5           | 15           | 1 180      |
| 实验 10 | 50         | 20          | 15          | 0.5           | 15           | 1 200      |
| 实验 11 | 50         | 30          | 5           | 0.1           | 20           | 1 220      |
| 实验 12 | 50         | 40          | 10          | 0.3           | 10           | 1 180      |
| 实验 13 | 60         | 20          | 10          | 0.5           | 10           | 1 220      |
| 实验 14 | 60         | 30          | 15          | 0.1           | 15           | 1 180      |
| 实验 15 | 60         | 40          | 5           | 0.3           | 20           | 1 200      |
| 实验 16 | 70         | 20          | 15          | 0.3           | 20           | 1 180      |
| 实验 17 | 70         | 30          | 5           | 0.5           | 10           | 1 200      |
| 实验 18 | 70         | 40          | 10          | 0.1           | 15           | 1 220      |

发泡陶瓷的表观密度在尾矿用量为 50% 时最小, 为  $319.45\text{ kg/m}^3$ , 但其抗压强度仅为  $1.65\text{ MPa}$ , 远远低于标准要求; 发泡陶瓷的抗压强度在尾矿用量为 70% 时最大, 为  $5.41\text{ MPa}$ , 此时表观密度为  $463.22\text{ kg/m}^3$ , 多孔陶瓷材料的两项指标均较优, 综合以上分析, 最终确定的尾矿用量为 70%。

(2) 钠长石掺量对发泡陶瓷性能的影响

发泡陶瓷的表观密度在钠长石掺量为 20% 时最小, 为  $344.09\text{ kg/m}^3$ , 此时抗压强度为  $2.9\text{ MPa}$ , 抗压强度不能满足标准要求; 发泡陶瓷的抗压强度在钠长石掺量为 30% 时最大, 为  $5.24\text{ MPa}$ , 此时表观密度为  $608.17\text{ kg/m}^3$ ; 而钠长石掺量在 40% 时, 发泡陶瓷的抗压强度为  $4.39\text{ MPa}$ , 表观密度为  $442.15\text{ kg/m}^3$ , 两项指标在钠长石掺量为 30% 和 40% 时均较优, 当钠长石掺入量较小时, 可增加尾矿的用量, 因此最终确定的钠长石掺量为 30%。

(3) 高岭土掺量对发泡陶瓷性能的影响

发泡陶瓷的表观密度在高岭土掺量为 5% 时最小, 为  $387.07\text{ kg/m}^3$ , 此时抗压强度为  $2.03\text{ MPa}$ , 抗压强度不能满足标准要求; 发泡陶瓷的抗压强度在高岭土掺量为 10% 时最大, 为  $5.63\text{ MPa}$ , 此时表观密度为  $559.89\text{ kg/m}^3$ , 而高岭土掺量在 15% 时, 发泡陶瓷的抗压强度为  $3.60\text{ MPa}$ , 表观密度为  $447.44\text{ kg/m}^3$ , 两项指标在高岭土掺量为 10% 和 15% 时均较优, 当高岭土掺量较小时, 可增加尾矿的用量, 因此最终确定的高

表 5 发泡陶瓷材料配方及工艺正交实验结果  
Table 5 Orthogonal experimental results of formula and process of foamed ceramic materials

| 水平   | 因素  |        |        |        |        |        | 性能测试结果                     |          |
|------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------|----------|
|      | 尾矿  | 钠长石    | 高岭土    | 发泡剂掺量  | 磨矿细度   | 烧成温度   | 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 抗压强度/MPa |
| 1    | 1   | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 204.01                     | 0.47     |
| 2    | 1   | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 301.79                     | 2.29     |
| 3    | 1   | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 188.53                     | 0.29     |
| 4    | 2   | 1      | 1      | 2      | 2      | 3      | 319.36                     | 1.60     |
| 5    | 2   | 2      | 2      | 3      | 3      | 1      | 980.43                     | 4.58     |
| 6    | 2   | 3      | 3      | 1      | 1      | 2      | 729.63                     | 7.29     |
| 7    | 3   | 1      | 2      | 1      | 3      | 2      | 571.47                     | 8.39     |
| 8    | 3   | 2      | 3      | 2      | 1      | 3      | 404.44                     | 1.41     |
| 9    | 3   | 3      | 1      | 3      | 2      | 1      | 279.34                     | 1.07     |
| 10   | 1   | 1      | 3      | 3      | 2      | 2      | 199.65                     | 0.63     |
| 11   | 1   | 2      | 1      | 1      | 3      | 3      | 707.03                     | 3.82     |
| 12   | 1   | 3      | 2      | 2      | 1      | 1      | 315.73                     | 2.42     |
| 13   | 2   | 1      | 2      | 3      | 1      | 3      | 432.99                     | 2.32     |
| 14   | 2   | 2      | 3      | 1      | 2      | 1      | 825.35                     | 15.59    |
| 15   | 2   | 3      | 1      | 2      | 3      | 2      | 382.71                     | 1.51     |
| 16   | 3   | 1      | 3      | 2      | 3      | 1      | 337.09                     | 4.04     |
| 17   | 3   | 2      | 1      | 3      | 1      | 2      | 430.02                     | 3.74     |
| 18   | 3   | 3      | 2      | 1      | 2      | 3      | 756.98                     | 13.78    |
| 表观密度 | K1  | 319.46 | 344.09 | 387.08 | 632.41 | 419.47 | 490.32                     |          |
|      | K2  | 611.75 | 608.18 | 559.90 | 343.52 | 447.08 | 435.88                     |          |
|      | K3  | 463.22 | 442.15 | 447.45 | 418.49 | 527.88 | 468.22                     |          |
|      | 极差  | 292.29 | 264.08 | 172.82 | 288.89 | 108.41 | 54.45                      |          |
|      | 优方案 | A1     | B1     | C1     | D2     | E1     | F2                         |          |
| 抗压强度 | K1  | 1.65   | 2.91   | 2.03   | 8.22   | 2.94   | 4.70                       |          |
|      | K2  | 5.48   | 5.24   | 5.63   | 2.21   | 5.83   | 3.97                       |          |
|      | K3  | 5.41   | 4.39   | 4.88   | 2.11   | 3.77   | 3.87                       |          |
|      | 极差  | 3.83   | 2.33   | 3.60   | 6.12   | 2.89   | 0.83                       |          |
|      | 优方案 | A2     | B2     | C2     | D1     | E2     | F1                         |          |

岭土掺量为 10%。

(4)发泡剂掺量对发泡陶瓷性能的影响

发泡陶瓷的表观密度在发泡剂掺量为 0.3% 时最小,为 343.52 kg/m<sup>3</sup>,此时抗压强度为 2.21 MPa,抗压强度不能满足标准要求;发泡陶瓷的抗压强度在发泡剂掺量为 0.1% 时最大,为 8.22 MPa,此时表观密度为 632.41 kg/m<sup>3</sup>,而发泡剂掺量为 0.5% 时,发泡陶瓷的抗压强度为 2.10 MPa,表观密度为 418.49 kg/m<sup>3</sup>,抗压强度不能满足标准要求,因此最终确定的发泡剂掺量为 0.1%。

(5)粉磨时间对发泡陶瓷性能的影响

发泡陶瓷的表观密度在粉磨时间 10 min 时最小,为 419.46 kg/m<sup>3</sup>,此时抗压强度为 2.94 MPa,抗压强度不能满足标准要求;发泡陶瓷的抗压强度在粉磨时间

15 min 时最大,为 5.83 MPa,此时表观密度为 447.07 kg/m<sup>3</sup>,两项考核指标均较优,因此最终确定的粉磨时间为 15 min。

(6)烧成温度对发泡陶瓷性能的影响

发泡陶瓷的表观密度在烧成温度 1 200 ℃ 时最小,为 435.87 kg/m<sup>3</sup>,此时抗压强度为 3.97 MPa;发泡陶瓷的抗压强度在烧成温度为 1 180 ℃ 时最大,为 4.69 MPa,此时表观密度为 490.32 kg/m<sup>3</sup>,两项考核指标均较优,因此最终确定的烧成温度为 1 180 ℃。

2.3 多孔陶瓷最佳配方及工艺流程验证实验

经正交实验得出的多孔陶瓷材料制备的最佳物料配比为铜尾矿用量 70%、钠长石掺量 30%、高岭土掺量 10%,发泡剂掺量 0.1%,对各物料用量进行归一

化处理后所得最佳物料配比为铜尾矿掺加量 64%、钠长石掺加量 27%、高岭土掺加量 9%、发泡剂掺量 0.1%; 最佳制备工艺为磨矿时间 15 min, 烧成温度 1 180 ℃, 保温时间 60 min。按照最佳工艺条件制备实验发泡陶瓷样块, 其最终表观密度为 580 kg/m<sup>3</sup>, 抗压强度为 4.90 MPa, 软化系数为 0.92, 各项指标均满足标准《GB/T 23451—2009 建筑用轻质隔墙条板》中的规定, 最优产品性能测试结果见表 6。图 3 为该多孔陶瓷样块 SEM 分析结果, 由 SEM 图可以看出, 以该铜尾矿

为主要原料制备的多孔陶瓷内部形成了密集、孔径均匀的封闭孔隙, 保证了多孔陶瓷质量轻的特点, 同时孔与孔之间的孔壁较厚, 使得多孔陶瓷兼具了高强的性能。

表 6 优化的产品性能测试结果  
Table 6 Test results of optimal product performance

| 项目   | 抗压强度/MPa | 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 软化系数  |
|------|----------|----------------------------|-------|
| 产品性能 | 4.90     | 580                        | 0.92  |
| 标准要求 | ≥3.50    | ≤900                       | ≥0.80 |

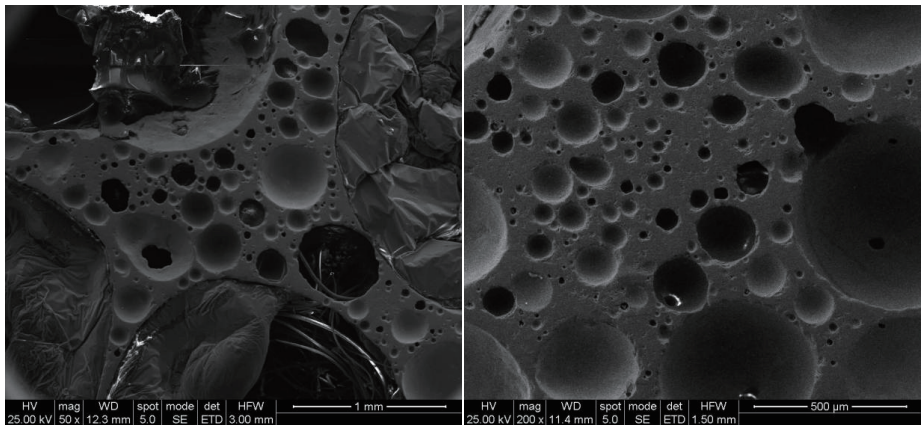


图 3 最佳配方及最佳工艺流程制备的多孔陶瓷 SEM 分析结果  
Fig. 3 SEM analysis of porous ceramics with the optimal formula and process flow

### 3 结论

- (1)以蒙古国某铜尾矿为主要原料可制备出表观密度为 580 kg/m<sup>3</sup>、抗压强度为 4.90 MPa、软化系数为 0.92 的多孔陶瓷材料, 各项指标均满足标准《GB/T 23451—2009 建筑用轻质隔墙条板》中的要求。
- (2)以蒙古国铜尾矿、钠长石、高岭土为原料制备多孔陶瓷材料的优化配方为铜尾矿掺加量 64%、钠长石掺加量 27%、高岭土掺加量 9%, 发泡剂掺量 0.1%; 最佳制备工艺为磨矿时间 15 min, 烧成温度 1 180 ℃, 保温时间 60 min。

#### 参考文献:

[1] 姜葱葱, 董祎然, 黄世峰, 等. 基于原位发泡工艺的固废基发泡陶瓷研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(9): 2510–2526.  
JIANG C C, DONG Y R, HUANG S F, et al. Research progress of solid waste-based foamed ceramics based on in-situ foaming process[J]. Journal of Silicate, 2022, 50(9): 2510–2526.

[2] 赵绘婷, 董龙浩, 谢梅竹, 等. 以煤矸石制备发泡陶瓷的研究[J]. 中国陶瓷工业, 2022, 29(3): 26–30.  
ZHAO H T, DONG L H, XIE M Z, et al. Study on preparation of foamed ceramics from coal gangue[J]. China Ceramic Industry, 2022, 29(3): 26–30.

[3] 詹学武, 邢益强, 吴晓鹏, 等. 花岗岩废料基闭孔发泡陶瓷的正交试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2650–2655.  
ZHAN X W, XING Y Q, WU X P, et al. Orthogonal experimental study

on closed-cell foamed ceramics based on granite waste[J]. Silicate Bulletin, 2020, 39(8): 2650–2655.

[4] 徐娜, 王挺. 采用发泡-流延成型工艺制备多孔莫来石发泡陶瓷[J]. 耐火材料, 2020, 54(4): 330–333.  
XU N, WANG T. Porous mullite foamed ceramics were prepared by foaming-tape casting process[J]. Refractory, 2020, 54(4): 330–333.

[5] 郭震, 严伟. 发泡陶瓷保温装饰一体板的研究与应用[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(6): 114–116.  
GUO Z, YAN W. Research and application of thermal insulation and decoration of integrated plate with foamed ceramics[J]. New building materials, 2020, 47(6): 114–116.

[6] 彭团儿, 李洪潮, 刘玉林, 等. 工业固废制备发泡陶瓷研究及应用进展[J]. 陶瓷, 2019(12): 9–22.  
PENG T E, LI H C, LIU Y U L, et al. Research and application progress of foamed ceramics prepared from industrial solid waste[J]. Ceramics, 2019(12): 9–22.

[7] 温晓庆, 王林俊, 毕晟, 等. 尾矿和发泡剂对发泡陶瓷板(砖)的性能影响[J]. 砖瓦, 2019(12): 47–50.  
WEN X Q, WANG L J, BI S, et al. Influence of tailings and foaming agent on properties of foamed ceramic board[J]. Brick and tile, 2019(12): 47–50.

[8] 王玉文, 张士察, 钟路生, 等. 发泡陶瓷产业发展现状及前景[J]. 陶瓷, 2019(8): 9–12.  
WANG Y W, ZHANG S C, ZHONG L S, et al. Development status and prospect of foamed ceramics industry[J]. Ceramics, 2019(8): 9–12.

[9] 熊灿光, 王慧, 曾令可. 利用抛光废渣制造发泡陶瓷[J]. 山东陶瓷, 2019, 42(3): 3–8.  
XIONG C G, WANG H, ZENG L K. Making foamed ceramics from polishing waste residue[J]. Shandong Ceramics, 2019, 42(3): 3–8.

- [10] 马子钧. 利用硅酸盐工业废(尾)矿制备发泡陶瓷的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
MA Z J. Study on preparation of foamed ceramics from waste (tailings) ore of silicate industry [D]. Beijing : Beijing University of Technology, 2019.
- [11] 杨航, 李伟光, 申士富, 等. 江西某铜尾矿制备发泡陶瓷的正交试验研究[J]. 铜业工程, 2019(2): 78–86.  
YANG H, LI W G, SHEN S F, et al. Orthogonal experimental study on preparation of foamed ceramics from a copper tailings in Jiangxi[J]. Copper Engineering, 2019(2): 78–86.

## Orthogonal Experiment on Preparation of Lightweight Porous Ceramics from a Porphyry Copper Flotation Tailings in Mongolia

LI Weiguang<sup>1</sup>, SONG Houbin<sup>2</sup>, LIU Haiying<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, LI Xueliang<sup>1</sup>, Makamu Sazini<sup>3</sup>, YANG Hao<sup>2</sup>, ZHANG Yanping<sup>2</sup>

1. Mining and Metallurgy Technology Group Co., Ltd., Daxing 102628, Beijing, China;  
2. Heilongjiang Zijin copper industry co., ltd., Qiqihaer 161041, Heilongjiang, China;  
3. Mintek, Randburg 2196, Gauteng Province, South Africa

**Abstract:** Lightweight porous ceramic materials is prepared from flotation tailings of a typical porphyry copper ore in Mongolia, albite, kaolin and foaming agent SiC. The effects of material ratio, grinding time, foaming agent type, foaming agent dosage and sintering temperature on the apparent density and compressive strength of lightweight porous ceramics are studied by orthogonal tests. When the ratio of  $m$  (copper tailings) :  $m$  (albite) :  $m$  (kaolin) is 6.4 : 2.7 : 0.9, the grinding time was 15min, the content of foaming agent (SiC) was 0.1%, the sintering temperature was 1180℃ and the holding time was 60min, the technological process was the best. At this time, the apparent density of porous ceramic material was 580 kg/m<sup>3</sup>, the compressive strength was 4.90 MPa and the softening coefficient was 0.92.

**Keywords:** Mongolian porphyry; copper tailings; lightweight porous ceramic materials; apparent density; compressive strength

引用格式: 李伟光, 宋厚彬, 刘海营, 李勇, 李学亮, Sazini Makamu, 杨浩, 张艳平. 蒙古国某斑岩型铜尾矿制备轻质多孔陶瓷正交实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 101–106.  
LI Weiguang, SONG Houbin, LIU Haiying, LI Yong, LI Xueliang, Makamu Sazini, YANG Hao, ZHANG Yanping. Orthogonal experiment on preparation of lightweight porous ceramics from a porphyry copper flotation tailings in mongolia[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 101–106.

投稿网址: <http://kcbhy.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)