

石煤提钒尾渣基钙长石烧结砖的烧结及重金属固化机理

李欣聪¹, 卢晶荣¹, 郭鑫桥²

(1. 郑州财经学院 土木工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。石煤提钒尾渣是一种危险的工业废弃物, 综合利用石煤提钒尾渣具有重要的环保与经济意义。本研究以石煤提钒尾渣为主要原料制备了建筑用烧结砖, 研究了烧成温度对样品结构和性能的影响规律, 探究了 Cu、V 和 Zn 重金属浸出活性的钝化机理。结果表明: 烧成温度显著影响烧结砖的相组成、显微结构和性能。适当提高烧成温度不仅有助于石英与原料中的碱性物质反应, 生成富硅液相, 提高样品的致密度, 而且促进了黄长石向钙长石转变及莫来石生成。这些晶相与玻璃相互胶结, 赋予制品较高的致密度和抗压强度。此外, 提高烧成温度增大了制品中 Cu、V 和 Zn 的残渣态含量, 减小了制品的孔径与孔容积, 从而实现了 Cu、V 和 Zn 的固化。采用烧成温度为 1 200 °C, 保温时间为 3 h 的工艺制度, 制备出的建筑用烧结砖的各项性能均满足《烧结普通砖》(GB/T 5101—2003) 中 Mu25 等级的要求, 且制品的 Cu、V、Zn 重金属浸出浓度均低于标准值。研究结果为石煤提钒尾渣的综合利用提供了新的思路。

关键词: 陶瓷及复合材料; 石煤提钒尾渣; 建筑用烧结砖; 烧成; 重金属离子浸出浓度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.022

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0153-08

引用格式: 李欣聪, 卢晶荣, 郭鑫桥. 石煤提钒尾渣基钙长石烧结砖的烧结及重金属固化机理[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 153-160.

LI Xincong, HU Jingrong, GUO Xinqiao. Sintering and heavy metal solidification mechanism of anorthite building sintered brick from stone coal tailings after vanadium extraction[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 153-160.

石煤是一种含 V 的重要矿物资源, 我国的石煤资源丰富, 分布广泛, 储量高达 600 亿 t, 我国石煤品质较低, 含 V₂O₅ 约 0.13%~0.90%, 且大多 V 以类质同象的形式赋存于白云母, 因此普遍采用焙烧-强酸浸出-萃取工艺从石煤中提取 V₂O₅。该工艺产生了大量的尾渣, 截止至 2020 年, 我国提钒尾渣的堆存量已高达 6 000 多亿 t。这些尾渣不仅占用土地资源, 且含有的重金属随雨水冲刷释放而污染周边水体, 因此石煤提钒尾渣堆放处理产生的环境污染问题亟待解决。

石煤提钒尾渣含有大量与普通硅酸盐水泥制品组份相似的 SiO₂, 因此它被广泛用作混凝土掺

合料。然而, 水泥混凝土制品具有较高的气孔率, 在实际使用过程中, 各种侵蚀介质沿气孔进入混凝土内部, 与游离态 CaO 及 Ca(OH)₂、3CaO·SiO₂·3H₂O 与 3CaO·Al₂O₃·6H₂O 等水化产物发生化学反应。这不仅消耗了包裹重金属的凝胶相, 而且造成混凝土开裂, 从而释放了制品中的重金属, 污染土壤与水体。

利用危险固体废弃物制备建筑用烧结砖是当前研究的热点, 该方法通过高温烧结不仅使制品的矿相发生转变, 而且能实现重金属的晶体固化及玻璃相包覆, 赋予烧结砖优异的力学性能与环境安全性^[1]。目前大量学者用钢渣、赤泥与尾矿等

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 全国大中专院校就业创业课题 (JYB2020085)

作者简介: 李欣聪 (1991-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为高新性能混凝土。

工业废弃物替代黏土制备建筑用烧结砖^[1]。在众多的建筑烧结砖中，钙长石烧结砖是一种强度高及耐腐蚀性能优异的建筑材料。如中国学者刘强等^[2]以废砖料为主要原料，以 ZnO 为添加剂，经 1 300 °C 烧结制备出抗折强度高、钙长石晶体发育良好的建筑用砖。中国学者王传运等^[3]使用选铁尾矿制备出抗折强度大于 15 MPa 的烧结砖，研究发现，晶粒长度与厚度分别为 2 μm 与 0.2~0.4 μm 的钙长石交错生长，使制品具有良好的物理性能。然而这些研究大多瞄准钙长石烧结砖的微结构特征与物理性能，忽略了制品的环境安全性。尤其针对那些重金属含量较高的固体废弃物，通过分析钙长石烧结砖中重金属的形态分布及浸出性能，评价重金属的释放风险就尤为迫切。

石煤提钒尾渣含有较多的 SiO₂、Al₂O₃ 与 CaO，其化学组分与黏土相似，故可代替黏土制备建筑用烧结砖。值得注意的是，烧结砖的结构与性能不仅受配方组成的影响，还与烧成温度密切相关^[3]，这是由于坯体在高温下发生复杂的物理化学反应，显著影响制品的结构与性能^[4-5]。因此系统研究烧结过程中提钒尾渣烧结砖中结构与性能的变化规律，有助于实现产品的工业化生产。基于此，作者以某石煤提钒尾渣为主要原料制备钙长石基建筑用烧结砖，详细研究了烧结砖的烧成机

理，探索了烧结过程中重金属形态分布及重金属的浸出风险，研究结果为石煤提钒尾渣的高值化利用提供了数据参考。

1 原料与方法

1.1 实验原料

图 1 表明，实验所用的石煤提钒尾渣(以下简称“尾渣”)的主要矿物为石英和石膏。前期研究发现，单独使用该尾渣制备出的烧结砖存在产品变形与收缩严重的缺点。为改善其烧结性能，本研究引入少量粘土和粉煤灰，粘土取自河南省郑州市某地，粉煤灰取自郑州市某电厂。表 1 为实验所用原料的化学组成。

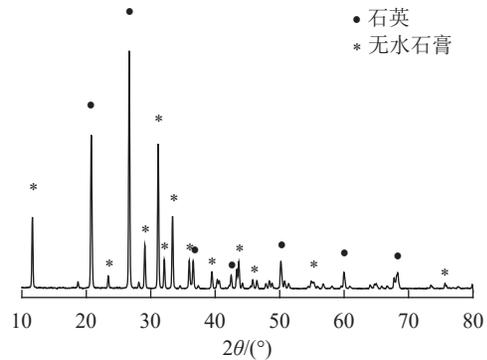


图 1 钒尾渣的 XRD
Fig.1 XRD of vanadium tailing

表 1 原料的化学组成/%
Table 1 Chemical composition of raw materials

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CuO	ZnO	V ₂ O ₅	IR
尾渣	54.36	11.22	16.36	1.89	2.95	0.93	0.80	0.50	2.95	0.02	8.02
粘土	57.96	16.59	1.69	1.31	3.91	1.37	0.56	0.18	1.06	0	15.47
粉煤灰	39.66	31.29	8.15	1.47	2.94	1.99	0.67	0.05	1.08	0	12.69

1.2 实验方法与设备

将原料球磨至 -74 μm，基于前期的研究结果，按配方(尾渣:粘土:粉煤灰:水=70:15:10:5，质量比)将原料混合均匀。在 20 MPa 的压力下制备出尺寸为 50 mm × 50 mm × 10 mm 的坯体。生坯经 80~90 °C 干燥 12 h 后，经高温烧成得到建筑用烧结砖样品。

采用等离子发射光谱仪(ICP)分析原料的化学组成；根据 GB/T 2542—2003 方法检测烧结砖的抗压强度、体积密度和气孔率；采用 RIGAKU D/MX-IIIa 型 X 射线衍射仪(XRD)分析样品的矿物组成；用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜

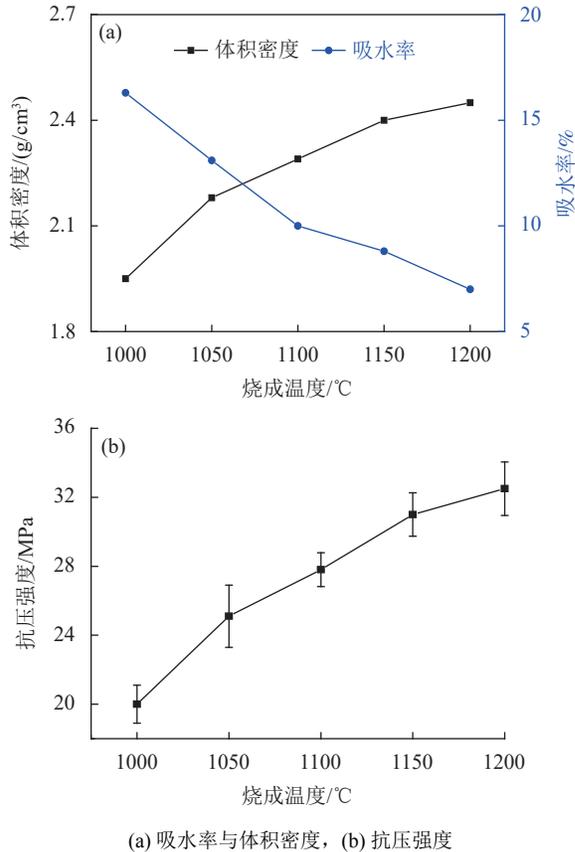
(SEM)分析样品的微观结构；根据文献报道的 BCR 顺序提取法^[6]分析样品中的重金属形态(弱酸提取态、可还原态与可氧化态、残渣态)；以 N₂ 为吸附气体，采用 BJ5 型比表面测定仪测试样品的孔径；基于 HJ/T 299—2007 《固体废物浸出毒性浸出方法》测试样品中重金属的浸出浓度；参考 GB/T 2542—2012 《砌墙砖实验方法》标准测试制品的抗冻融性。

2 结果与讨论

2.1 制品的物理性能

提高烧成温度能促进坯体内各种物理化学反

应的进行。为研究烧成温度对样品的影响，将干燥完全的生坯分别升至不同温度保温3 h。冷却后样品的物理性能见图2。



(a) 吸水率与体积密度, (b) 抗压强度
(a) Water absorption and bulk density, (b) Compressive strength

图2 烧成温度对样品性能的影响

Fig.2 Performances of samples as a function of sintering temperature

图2表明,随着烧成温度的升高,样品的体积密度和抗压强度不断增大,吸水率逐渐减小。当烧成温度从1000℃升至1200℃,样品的体积密度和抗压强度分别从1.95 g/cm³与20.00 MPa增至2.45 g/cm³与32.5 MPa。其原因为提高烧成温度,加速了液相的粘滞流动,提高了样品的致密度,促进了目标相的生成。液相与目标相相互胶结,提高了制品的强度,相关机理将在图3与图4中详细阐述。当烧成温度为1200℃时,样品的强度已超越《烧结普通砖》(GB/T 5101—2003)中Mu25等级的要求。

2.2 制品的烧结机理

图3为经不同温度烧成的样品的XRD。由图3可知,当温度从1000℃升至1150℃,石英相(PDF卡片号:46-1045)和无水硫酸钙(PDF卡片号:37-1496)的衍射峰强度逐渐减弱,其原因为

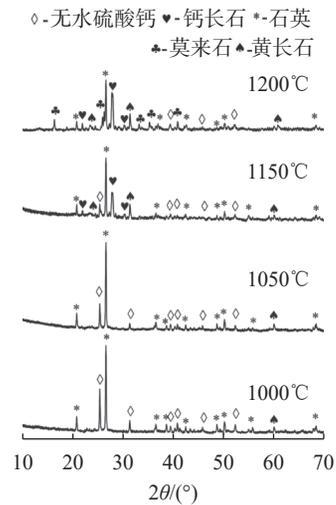
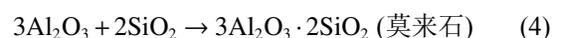
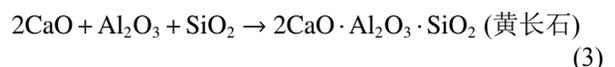
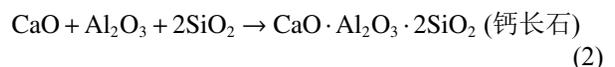
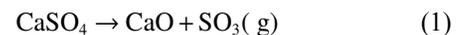


图3 经不同温度烧成的样品的XRD

Fig.3 XRD of samples sintered at different temperatures

在加热过程中,石英与原料中的Al₂O₃及碱性组份(CaO与MgO)反应,生成CaO/MgO-Al₂O₃-SiO₂三元系统液相。故随温度的升高,石英相的含量逐渐减少。在高温下液相粘滞流动填充气孔,改善了样品的致密度与强度。事实上,这些液相冷却后包裹晶粒,导致样品的衍射峰强度随温度的升高逐渐降低,这与文献^[5]的结论一致。从图3还可知,经1150℃烧成的样品中出现了黄长石(PDF卡片号:35-0755)和钙长石(PDF卡片号:41-1486)的衍射峰。这是由于无水硫酸钙在800~900℃加热分解成CaO,它与原料中的Al₂O₃与SiO₂组份在1100~1200℃反应,分别生成钙长石与黄长石(见式1~3)^[7]。据报道,钙长石是强度的贡献者,可促进裂纹的偏转,延长裂纹的扩展途径^[7]。因此当烧成温度从1000℃升至1150℃,试样的强度显著上升。当烧成温度进一步升至1200℃,钙长石的衍射峰强度进一步增加,此外,Al₂O₃与SiO₂发生反应,生成莫来石相(PDF卡片号:84-1205)(见式4)。莫来石具有耐高温与强度高等特点^[8]。钙长石与莫来石的生成赋予样品较高的抗压强度,这和文献的结论一致^[8-9]。



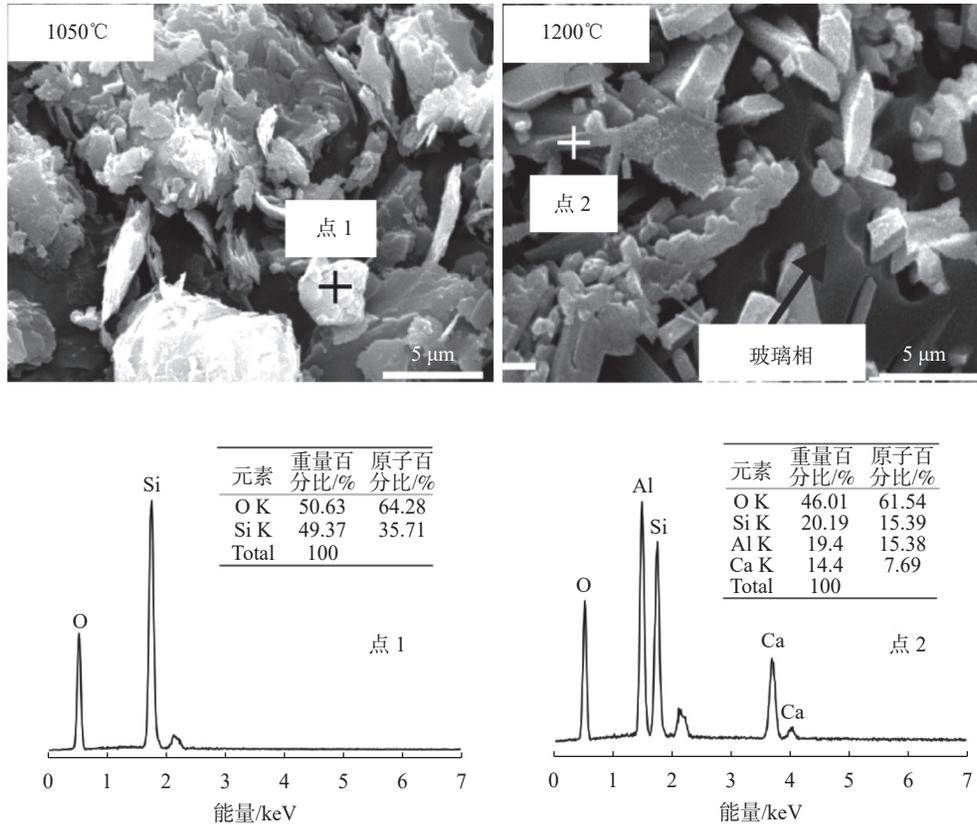


图 4 经不同温度烧成的样品的 SEM 形貌
Fig.4 SEM of samples sintered at different temperatures

图 4 为经不同温度烧成的样品的 SEM。由图 4 可知，经 1 050 °C 烧成的样品孔隙结构发达，许多球状石英均匀分布，表明经 1 050 °C 烧成后，原料中的石英未完全参与熔融反应，因此样品的抗压强度低，气孔率高。当烧成温度升至 1 200 °C，大量的石英与 CaO 与 MgO 组份发生反应，生成富硅液相，这显著减少了石英相(点 1)含量，提高了样品的致密度。这与图 3 的结论一致。液相的生成促进粒子的迁移，加速了陶瓷材料的矿相重构及晶粒的发育生长，促进了钙长石的生成及生长。因此经 1 200 °C 烧成的试样中条棒状钙长石(点 2)发育良好，其构成烧结砖的骨架，赋予样品较高的强度。

2.3 重金属浸出活性的钝化机理

尾矿一般含有少量的重金属元素，因此需对制品进行环境安全性分析。根据 HJ/T 300—2007 标准，以醋酸为腐蚀液对样品进行浸出实验，然后固液分离，检测浸出液中重金属的浓度，其结果见图 5。

从图 5 可知，提高烧成温度显著降低了制品中 Cu、V、Zn 的浸出浓度。在温度为 1 000 °C

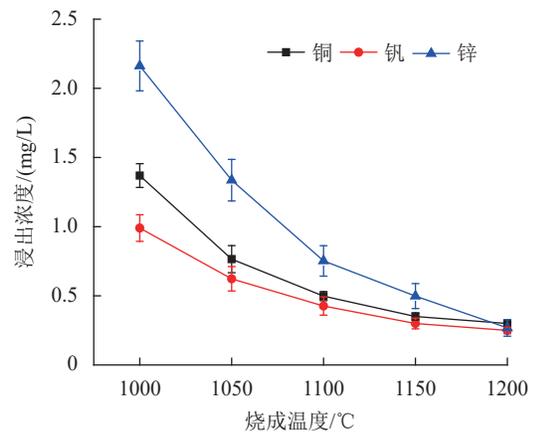


图 5 经不同温度烧成的样品的重金属浸出浓度
Fig.5 Leaching concentration of heavy metals from samples sintered at different temperatures

时，Cu、V、Zn 的浸出浓度分别高达 1.37、0.99 与 2.16 mg/L。随着温度的升高，上述重金属的浸出浓度显著下降，当温度为 1 150 °C 时，其浸出浓度下降均超过了 50%。重金属浸出活性的变化与相组成及显微结构密切相关。研究者^[10]发现，Zn、Cu 和 Fe₂O₃ 在高温烧结过程中会发生反应，生成 ZnFe₂O₄ 与 CuFe₂O₄ 尖晶石，这显著提高了

Zn 与 Cu 被酸液浸出的难度。V 在 920 °C 时能与 Al_2O_3 发生固化反应，生成耐酸腐蚀的 $\text{V}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ ^[11]。另一方面，提高温度，促进了原料中碱性组份 (CaO、MgO) 与 Al_2O_3 及 SiO_2 反应，生成 CaO/MgO- Al_2O_3 - SiO_2 三元系统液相。在冷却过程中，液相转变成玻璃相，填充制品的孔隙，不仅抑制腐蚀液沿孔道结构与重金属接触，而且还抑制了重金属的释放。这些因素协同作用，降低了 Cu、V、Zn 的浸出活性。

上述结果表明，Cu、V、Zn 重金属在烧结砖制品中的浸出特性与烧制温度密切相关，其原因可能是这些重金属在高温转化成稳定且不易迁移的晶相。为了能清晰观察到重金属目标相特征峰的演变规律，本实验在配方的基础上，额外引入氧化铜、五氧化二钒与氧化锌，使坯体中 Zn、Cu 与 V 元素的质量百分含量符合 ZnFe_2O_4 、 CuFe_2O_4 与 $\text{V}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ 的分子理论摩尔百分比，高温烧成后样品的相组成见图 6。

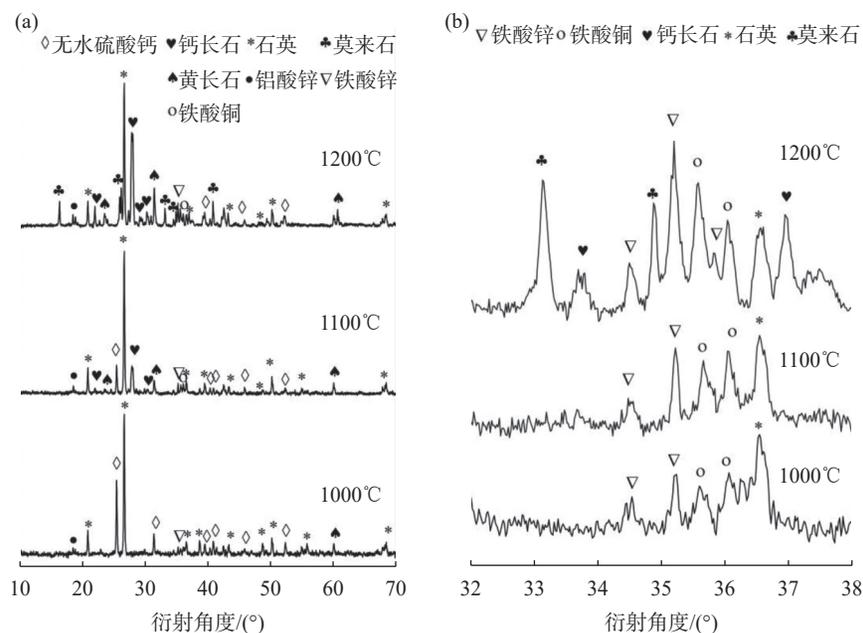


图 6 经不同温度烧成的样品的 XRD
Fig.6 XRD of samples sintered at different temperatures

通过比较图 6 与图 3，研究发现引入 Zn、Cu 与 V 源后，出现了 ZnFe_2O_4 、 CuFe_2O_4 与 $\text{V}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ 晶相。结合图 6(a) 与 (b) 可知，随温度的升高，这几种目标相的衍射峰强度逐渐增强，这表明在高温烧成过程中，样品中的 ZnO、PbO 与 CuO 分别与 Fe_2O_3 与 Al_2O_3 发生固相合成反应，生成难以溶出的 ZnFe_2O_4 、 CuFe_2O_4 与 $\text{V}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ 晶相，这与文献^[10-11]的结论相一致。事实上， ZnFe_2O_4 与 CuFe_2O_4 中的金属原子和氧原子以离子键结合，且 Zn 与 Cu 元素填充在由氧元素构成的八面体与四面体结构内，故 ZnFe_2O_4 与 CuFe_2O_4 的结构稳定，在弱酸性环境下，重金属组份难以迁移。

重金属的分布形态显著影响其浸出活性。根据 BCR 法，重金属的分布一般分为弱酸提取态、可还原态、可氧化态及残渣态。其中弱酸提取态重金属容易被浸出，对环境的毒害作用最大；可

还原态与可氧化态重金属较为稳定，其以离子键的形式存在，且只能在强还原与强氧化的条件下才能被释放；残渣态重金属分布在晶相中，它最稳定，对环境生物的毒性最小。本研究测试了不同样品中的重金属的分布状态，其结果见图 7。

从图 7 可知，当温度为 1000 °C 时，Zn 和 Cu 的形态特征较为类似，其稳定性较差，两者的残渣态含量均不足 40%。以 Zn 为例，弱酸提取态、可还原与可氧化态及残渣态分别为 38.0%、30.6% 与 31.4%。Cu 形态分布为弱酸提取态 29.2%、可还原与可氧化态 41.8%、残渣态 29.0%。提高烧成温度，Cu 和 Zn 的残渣态含量逐渐上升。经 1200 °C 烧成的样品中，Cu 和 Zn 的残渣态含量分别为 51.9% 和 60.0%。图 6 所述，提高烧成温度，促进了 ZnFe_2O_4 与 CuFe_2O_4 目标相的合成。事实上 ZnFe_2O_4 与 CuFe_2O_4 具有非常稳定的化

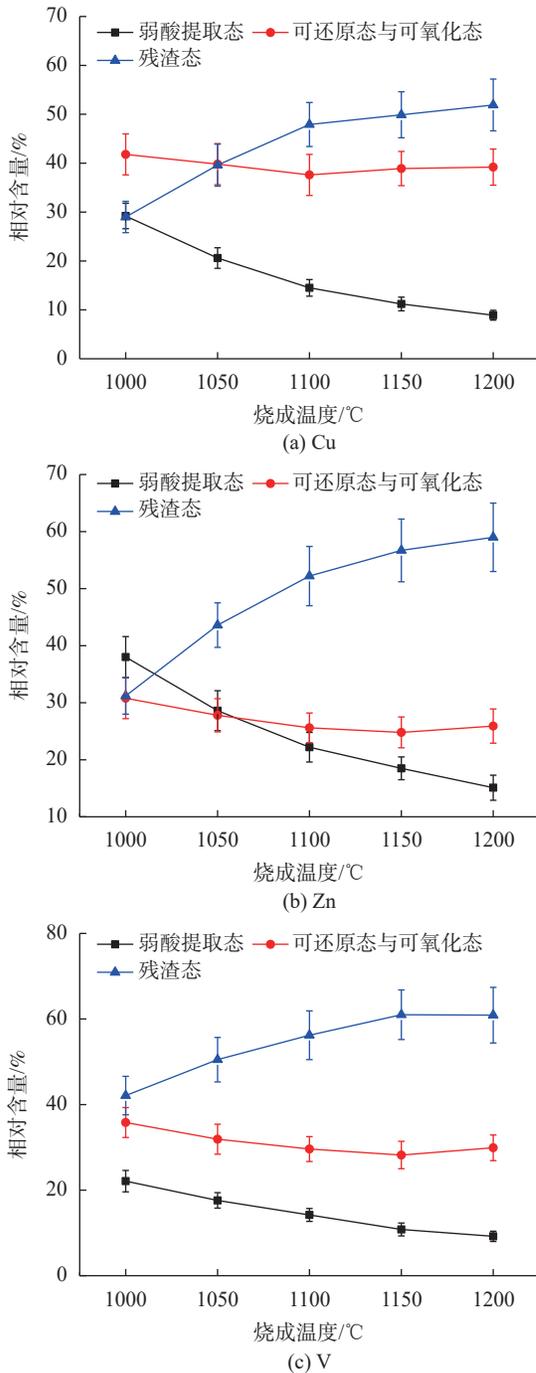


图 7 经不同温度烧结的样品中重金属形态分布
Fig.7 Heavy metals distribution in samples sintered at various temperatures

学性质，即使在高温下也有较强的耐熔体侵蚀能力，因此 $ZnFe_2O$ 与 $CuFe_2O_4$ 相的合成提高了样品中 Cu 和 Zn 残渣态的含量。相比 Zn 和 Cu，V 的稳定性较好，在 1 000 °C 时，其主要形态为残渣态 (42.10%)，这是因为 V 主要以 $V_2Al_2O_6$ 晶相的形式存在。随着烧结温度上升，V 弱酸提取态向残渣态的转变不及 Zn 和 Cu 显著，这表明 V 的迁

移性较差，故其更稳定。通过综合分析图 5 与图 6 可知，重金属浸出浓度的下降与其残渣态含量的变化规律密切相关，这表明，在烧结过程中，Zn、Cu 与 V 的浸出活性以 $ZnFe_2O$ 、 $CuFe_2O_4$ 及 $V_2Al_2O_6$ 的晶体形式被钝化。

样品的孔容积和孔径大小也是影响重金属浸出的重要因素。图 8 为样品在不同温度下其孔容积和孔径的变化规律。从图 8 可知，提高烧成温度显著降低了样品的孔容积与孔径。当烧成温度为 1 000 °C 时，样品具有最大的孔容积与孔径，其值分别为 $0.030 \text{ cm}^3/\text{g}$ 与 30.2 nm。随着温度的升高，CaO/MgO、 Al_2O_3 与 SiO_2 反应生成 CaO/MgO- Al_2O_3 - SiO_2 三元系统液相的现象加剧，液相粘滞流动填充气孔，提高了样品的致密度。故经 1 200 °C 烧成的样品具有最致密的结构，其孔容积与孔径分别降低至 $0.005 \text{ cm}^3/\text{g}$ 与 6.1 nm。事实上，随温度的升高，孔容积、孔径大小及气孔率的变化趋势相一致。这说明，样品的致密度受内部孔隙结构变化的影响。结合图 5 与图 8 可知，较小的孔径降低了样品的孔隙结构，不但不利于酸液与重金属的接触，而且抑制了重金属的释放。

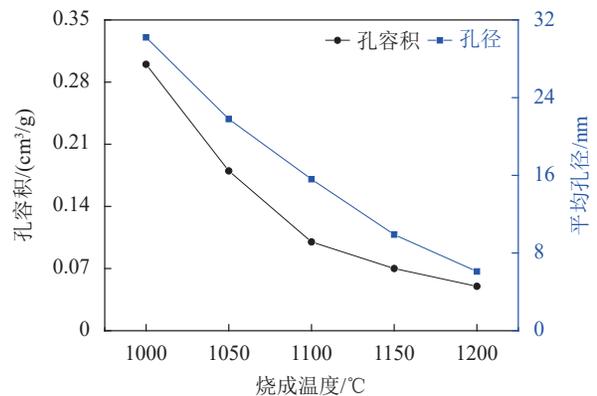


图 8 烧成温度对烧结砖样品的孔径和孔容积的影响规律

Fig.8 Effect of firing temperature on the pore size and volume of sintered brick samples

2.4 制品的抗冻融性能分析

为避免建筑用砖在潮湿的环境中因气孔内水分结冰引起开裂现象，烧结砖制品需具备较好的抗冻融性能。图 9 是制品 50 次冻融实验前后的抗压强度。

从图 9 可知，提高烧制温度能有效改善制品的抗冻融性能。随烧成温度的升高，经 50 次冻融循环实验后，样品抗压强度的下降趋势逐渐减

小。当烧成温度从 1 000 °C 升至 1 200 °C，烧结砖制品的强度损失率从 32.50% 降至 6.15%。图 1(a)、图 4 与图 8 表明，随着温度的升高，液相的粘度降低，其粘滞流动加快，促进了气孔的排出，这显著减小了制品的孔容积和孔径大小，阻碍水份沿着孔道结构渗入制品，因此，烧结砖的抗冻融性能随烧成温度的升高而逐渐改善。

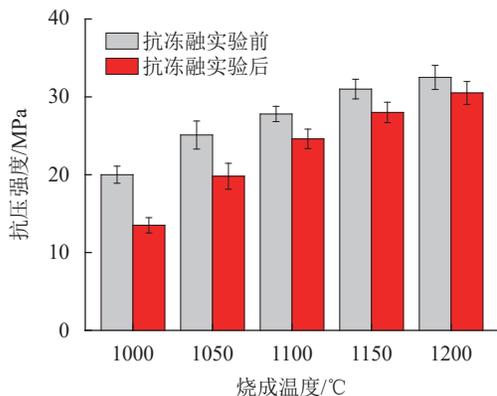


图 9 烧结砖样品的抗冻融性能随烧成温度变化的关系曲线

Fig.9 Freeze thaw resistance of samples as a function of sintering temperature

3 结 论

(1) 提高烧成温度一方面促进石英与碱性组份反应，生成富硅液相，另一方面加速了黄长石向钙长石的转变及莫来石的生成，玻璃相与晶相相互胶结，改善了制品的致密度和抗压强度。在烧结过程中，Zn 和 Cu，V 重金属逐渐从弱酸提取态向残渣态转变，制品的孔径与孔容积变小，结构变致密，两者协同作用，实现了 Zn 和 Cu，V 浸出活性的钝化。

(2) 采用烧成温度为 1 200 °C、保温时间 3 h 的工艺条件，可制备出的气孔率为 23.6%，体积密度为 2.45 kg/m³，抗压强度为 32.5 MPa 的建筑用烧结砖，样品的综合性能超过了《烧结普通砖》(GB/T 5101—2003) 中 Mu 25 等级的要求。烧结砖样品中的 V、Zn 与 Pb 离子的浸出浓度明显低于《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007) 标准的要求。

参考文献：

[1] 侯静, 徐众, 吴恩辉, 等. 双碳背景下提钒弃渣制备集热涂层及其性能[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):40-44.

HOU J, XU Z, WU E H, et al. Preparation and properties of heat-collecting coating from vanadium extraction slag under double carbon background[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):40-44.

[2] 刘强, 潘志华, 李庆彬, 等. 钙长石系轻质隔热砖的制备及钙长石形成过程[J]. *硅酸盐通报*, 2010(6):6.

LIU Q, PAN Z H, LI Q B, et al. Preparation of anorthite light insulating brick and formation process of anorthite[J]. *Silicate Bulletin*, 2010(6):6

[3] 王传运, 张亚忠, 周宁生, 等. 煅烧温度对微孔钙长石轻质材料性能的影响[J]. *耐火材料*, 2015, 49(2):4.

WANG C Y, ZHANG Y Z, ZHOU N S, et al. Effect of calcination temperature on properties of microporous anorthite lightweight material[J]. *Refractory Materials*, 2015, 49(2):4

[4] 马莹, 朱军, 尹洪峰, 等. 用石煤提钒尾矿制备免烧砖[J]. *金属矿山*, 2013(8):162-164.

MA Y, ZHU J, YIN H F, et al. Preparation of unfired brick with vanadium extracted tailings from stone coal[J]. *Metal Mine*, 2013(8):162-164.

[5] 罗立群, 王召, 魏金明, 等. 铁尾矿-煤矸石-污泥复合烧结砖的制备与特性[J]. *中国矿业*, 2018(3):127-131.

LUO L Q, WANG Z, WEI J M, et al. Preparation and characteristics of iron tailings coal gangue sludge composite sintered brick[J]. *China Mining*, 2018(3):127-131.

[6] URE A, QUEVAUVILER P, MUNTAU H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments: An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European Communities[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, 51(1/2/3/4):135-151.

[7] 孙强强, 亢小红. 钙长石系尾矿微晶玻璃的制备及发光性能[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):152-155.

SUN Q Q, KANG X H. Experiment of preparing feldspar glass-ceramics and luminescence properties[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):152-155.

[8] 肖永丰. 粉煤灰提取氧化铝方法研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):156-162.

XIAO Y F. Study on the methods of leaching alumina from fly ash[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):156-162.

[9] 孙晓刚, 王海龙, 邢军, 等. TiO₂ 对黄金尾砂微晶泡沫玻璃非等温析晶活化能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):151-156.

SUN X G, WANG H L, XING J, et al. Effect of TiO₂ on

crystallization activation energy of gold tailings microcrystalline foam glass[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(1):151-156.

[10] U S, YOSHIMURA M H. Direct fabrication of ferrite MFe₂O₄ (M=Zn, Mg)/Fe composite thin films by soft solution

processing[J]. [Chemistry of Materials](#), 2000, 12(12):3805-3810.

[11] LU X, SHIH K M. Phase transformation and its role in stabilizing simulated lead-laden sludge in aluminum-rich ceramics[J]. [Water Research](#), 2011, 45(16):5123-5129.

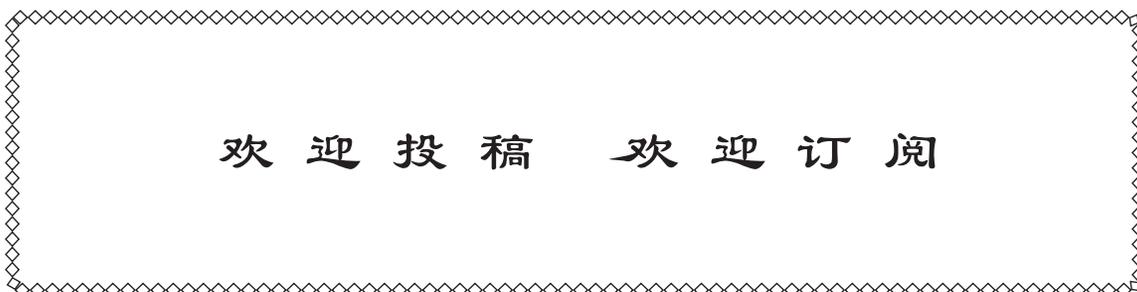
Sintering and Heavy Metal Solidification Mechanism of Anorthite Building Sintered Brick from Stone Coal Tailings After Vanadium Extraction

LI Xincong¹, HU Jingrong¹, GUO Xinqiao²

(1.School of Civil Engineering, Zhengzhou College of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2.Henan Provincial Urban and Rural Planning and Design Research Institute Co. , Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. Vanadium extraction tailing from stone coal is a dangerous industrial waste. Comprehensive utilization of vanadium extraction tailings from stone coal has important environmental and economic significance. The fired bricks for building were prepared from the vanadium extraction tailings of stone coal. The effects of firing temperature on microstructure and properties were studied, and the leaching activity passivation mechanism of Cu, V, and Zn heavy metal was explored. The results showed that sintering temperature significantly affected the phase composition, microstructure and performances of sintered bricks. Properly increasing the firing temperature was not only in favour of silicon-rich liquid phase generation to increase the density of samples by the reaction between quartz and alkaline element in raw materials, but also contributed to anorthite transformation from melilite and the mullite formation. These crystalline phases bond with glass, endowing the product with high density and compressive strength. In addition, an increase in firing temperature improved the Cu, V, and Zn residual content in the product, reduced the pore size and volume, thus achieving the solidification of Cu, V, and Zn. With the 1 150 °C firing temperature and 3 h holding time, the properties of the sintered building bricks can meet the requirements of standard Mu25 in 《fired common bricks》 (GB/T5101-2003). Cu, V, and Zn leaching concentrations in the product were below the standard values. This study provides a new insight for the efficient utilization of vanadium tailings from stone coal.

Keywords: Ceramics and composites; Vanadium tailings from stone coal; Fired brick for building; Sintering; Heavy metal ion leaching concentration



欢迎投稿 欢迎订阅