

铜渣尾矿制备镁橄榄石-尖晶石复相材料性能研究

李炳蓉¹, 高 杨¹, 王全勇¹, 朱勇强², 俞 锦¹, 涂 宇¹, 张 威¹, 孙云龙¹

(1. 江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂, 江西 贵溪 335424)

摘要: 铜渣尾矿是火法炼铜产生的铜渣经浮选贫化后得到的固体废弃物, 其大量堆存将带来严重的环境与安全隐患。本文以铜渣尾矿为主要原料, 添加轻烧氧化镁和活性氧化铝, 采用高温固相烧结法制备镁橄榄石-尖晶石复相材料, 并系统研究了烧结温度对其物相组成、显微结构及物理性能的影响。结果表明: 试样烧结后的主晶相为镁橄榄石和尖晶石, 铁橄榄石相完全分解; 随着烧结温度的升高, 镁橄榄石与尖晶石晶粒逐渐长大, 材料致密化程度不断提高。当烧结温度为1 400 ℃时, 试样的综合性能最优, 体积密度为2.75 g/cm³, 显气孔率为24.11%, 常温耐压强度达到138.5 MPa。

关键词: 铜渣尾矿; 镁橄榄石; 尖晶石; 烧结温度; 固废资源化

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.004

中图分类号: TQ175.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0034-07

铜是现代工业不可或缺的基础材料, 在电力传输、新能源、电子信息等领域发挥着关键支撑作用。随着我国铜消费需求的持续增长, 铜矿资源开采规模不断扩大, 铜冶炼行业快速发展^[1]。铜渣是火法炼铜过程中产生的一种成分复杂的工业副产物, 既含有As、Pb、Cr等有害元素, 也富含Cu、Co、Zn、Fe等有价金属, 具备一定的资源化利用潜力^[2-3]。据统计, 每生产1 t金属铜产生2~3 t铜渣。2023年我国精炼铜产量达1 299万 t, 相应铜渣排放量约3 000万 t, 累计堆存量已逾3亿 t, 占用大量土地资源^[4-5]。同时, 铜渣中残留的重金属易随降水淋溶进入周边土壤及水体, 引发环境污染, 长期堆存的渣场还存在崩塌、滑坡等安全隐患^[6]。然而, 受限于铜渣复杂的矿物组成与多元素共生嵌布特性, 其资源化利用仍面临较大技术瓶颈。当前铜渣资源化水平整体偏低, 铁和铜的利用率分别不足1%和12%^[7]。

近年来, 铜渣的资源化利用已成为国内外研究的热点。Mansourkiyaei等^[8]从循环经济角度分析了铜渣可持续综合利用的技术经济可行性。Wu等^[9]系统综述了铜渣在金属回收、建筑材料、环保材料、工业填料、陶瓷原料及农业改良剂等多个领域的应用路径, 指出铜渣正从“环境负担”向“城市矿山”

转变。在陶瓷材料方面, Zhang等^[10]以铜渣尾矿和废玻璃为主要原料制备了轻质泡沫微晶玻璃。另有研究利用铜渣与锂辉石尾矿成功制备了抗压强度达140 MPa的建筑陶瓷^[11]。

此外, 以高碳铬铁渣等工业固废为原料制备复相材料的研究取得了一定进展^[12-14]。例如, 冯泽成等^[15]通过添加电熔镁砂、板状刚玉促进了顽火辉石向镁橄榄石的转变, 在适当热处理温度下可获得高强度、良好抗热震性且重金属离子浸出浓度较低的复相材料。然而, 铜渣尾矿(即铜渣经选铜等工艺处理后的尾渣)在800~1 000 ℃下易分解、磁铁矿氧化不稳定、耐火度低等特性, 限制了其在耐火材料中的直接应用^[16]。目前, 以铜渣尾矿为原料制备镁橄榄石-尖晶石复相材料的研究尚属空白。事实上, 铜渣尾矿中仍含有丰富的SiO₂、Al₂O₃、MgO等组分, 具备合成镁橄榄石-尖晶石复相材料的物质基础^[17]。

基于此, 本文以铜渣尾矿为主要原料, 通过添加轻烧氧化镁、活性氧化铝调控化学组成, 采用高温固相烧结法制备镁橄榄石-尖晶石复相材料, 促进铁橄榄石向镁橄榄石的转化, 并诱导尖晶石相原位生成, 从而提升复相材料的耐高温与抗侵蚀性能。同时, 系统分析了烧结温度对复相材料物相组

收稿日期: 2026-05-25; 修订日期: 2026-06-26

基金项目: 江西铜业技术研究院有限公司企业项目(YJYZX2025003, YJYZX2025005)

作者简介: 李炳蓉(1994—), 男, 辽宁营口人, 博士, 工程师, 研究方向: 无机矿物加工及资源综合利用, E-mail: libingrongwust@foxmail.com;

通信作者: 高杨, 工程师, E-mail: 18292491256@163.com; 王全勇, 工程师, E-mail: qywang2021@qq.com

成、显微结构及力学性能的影响,旨在实现铜渣尾矿的高值化利用。

1 实验

1.1 原料

试验中所用的原料有铜渣尾矿细粉(<0.088 mm)、轻烧氧化镁细粉(<0.088 mm)和活性氧化铝细粉(<0.088 mm),主要化学组成见表1。其

表1 原料的主要化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials (% , mass fraction)

原料	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	CaO	K ₂ O
铜渣尾矿	54.30	30.6	6.64	—	2.18	1.61	1.37
轻烧氧化镁	1.05	2.44	0.70	94.23	—	1.41	—
活性氧化铝	—	0.06	98.22	0.01	—	0.03	—

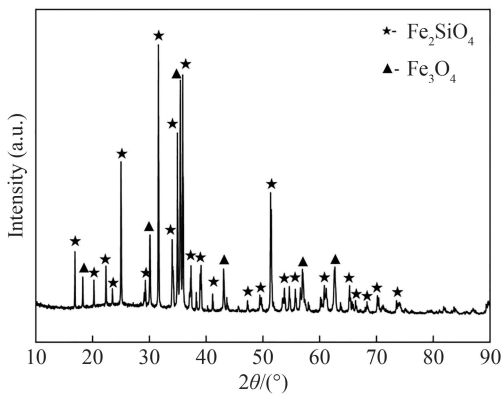


图1 铜渣尾矿XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of copper smelting slag tailings

为使铜渣尾矿中铁橄榄石充分分解并转变为镁橄榄石,本研究根据镁橄榄石的理论组成^[14],通过添加轻烧氧化镁和活性氧化铝来调节化学组成。具体配方为:铜渣尾矿62.5%,轻烧氧化镁34.4%,活性氧化铝3.1%。

1.2 试样制备

首先按配比分别称取铜渣尾矿、轻烧氧化镁和活性氧化铝细粉,于卧式球磨机中充分混合4 h,得到混合原料;然后将混合原料在单轴压力成型机中以100 MPa压力压制成Φ36 mm×36 mm圆柱形生坯;最后将生坯于110℃干燥24 h后,置于高温电阻炉中,以7℃/min的升温速率升温至940℃,保温3 h后,分别以5℃/min升至1350、1400和1450℃,并保温3 h。参考高碳铬铁渣及镍渣基镁橄榄石-尖

晶石复相材料烧结温度^[15,18],结合前期实验结果,确定本研究的烧结温度为1350~1450℃。保温结束后随炉冷却,冷却过程中高温段(>800℃)平均降温速率为10~12℃/min,低温段(<800℃)降温速率约为5℃/min。待试样冷却至常温后取出,进行性能检测。

晶石复相材料烧结温度^[15,18],结合前期实验结果,确定本研究的烧结温度为1350~1450℃。保温结束后随炉冷却,冷却过程中高温段(>800℃)平均降温速率为10~12℃/min,低温段(<800℃)降温速率约为5℃/min。待试样冷却至常温后取出,进行性能检测。

1.3 性能检测

采用X射线衍射仪(XRD)和自动矿物参数分析系统分析烧后试样的物相组成,参照GB/T 2997—2015测量烧后试样的显气孔率及体积密度,参照GB/T 5072—2023测试试样的常温耐压强度,通过扫描电子显微镜(SEM)观察破碎后试样的显微结构,并对其元素分布进行分析。

2 结果与讨论

2.1 物相组成

图2为经不同烧结温度处理后试样的XRD图谱。可以看出烧后试样中均以镁橄榄石和尖晶石为主晶相,并伴有少量方镁石。相较于铜渣尾矿的XRD图谱,铁橄榄石衍射峰完全消失且无SiO₂衍射峰出现,说明煅烧后试样中的铁橄榄石完全分解。此外,随着烧结温度的升高,试样中镁橄榄石和尖晶石的衍射峰逐渐增强并发生偏移,说明烧结温度的升高有利于镁橄榄石和尖晶石的晶体发育;衍射峰的偏移则归因于体系中过量铁的存在,促进了

镁铁橄榄石 $[(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4]$ 与镁铁铝尖晶石固溶体 $[(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4]$ 的形成,进而影响了晶体的晶格常数。

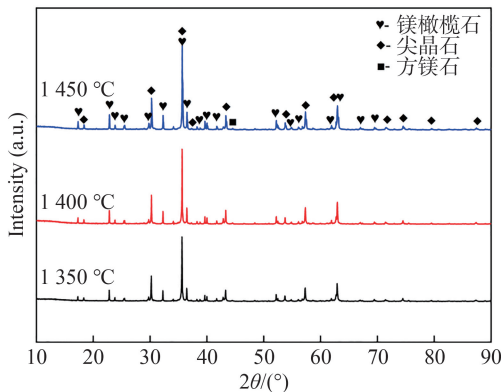


图2 经不同烧结温度处理后试样的XRD图谱
Fig. 2 XRD patterns of samples treated at different sintering temperatures

图3给出了不同烧结温度对试样物相含量的影响。可以看出,随着烧结温度的升高,试样中镁橄榄石和方镁石的含量逐渐减少,尖晶石和硅酸盐玻璃相逐渐增多。当烧结温度大于1 400 ℃时,试样中镁橄榄石和尖晶石的比例接近1:1。

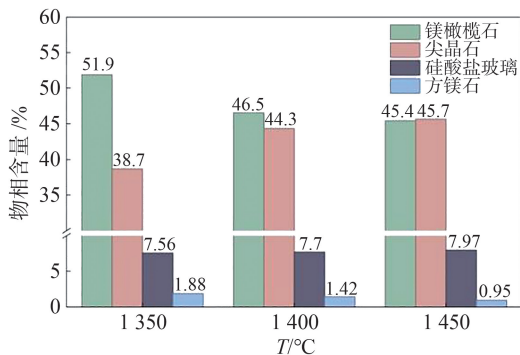
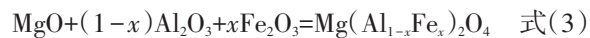
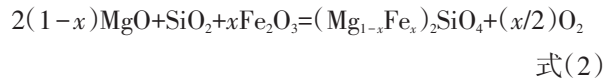
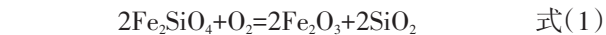


图3 不同烧结温度对试样物相含量的影响
Fig. 3 Effects of sintering temperature on phase content of samples

研究表明,在氧化气氛下,铁橄榄石会首先分解为 Fe_3O_4 和无定形 SiO_2 ,最终 Fe_3O_4 氧化转变为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ^[19]。引入的轻烧氧化镁可与无定形 SiO_2 反应生成镁橄榄石,该反应通常在1 450 ℃以下基本完成^[14, 20]。随着温度继续升高,体系中剩余的氧化镁进一步与活性氧化铝及 Fe_2O_3 反应生成尖晶石相。铁橄榄石分解、镁橄榄石固溶体生成以及尖晶石固

溶体生成的反应方程式分别如式(1~3)所示。



为进一步研究体系中铁离子对尖晶石晶体结构的影响,采用Rietveld法对各试样XRD图谱进行拟合精修。不同烧结温度处理的试样中,尖晶石的晶格常数和晶胞体积见表2。

表2 不同烧结温度下尖晶石晶格常数与晶胞体积
Table 2 Lattice constant and cell volume of spinel at different temperatures

烧结温度/℃	晶格常数/nm	晶胞体积/nm ³
1 350	0.835 25	0.582 7
1 400	0.834 99	0.582 1
1 450	0.834 62	0.581 4

结果表明,随着烧结温度的升高,试样中尖晶石的晶格常数和晶胞体积均不断减小。在 MgAl_2O_4 结构中, Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 均能进入晶体结构。由于 Fe^{3+} 与 Al^{3+} 具有相似的离子半径,其更倾向于取代 Al^{3+} 形成 $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_4$ 固溶体,进而提升尖晶石材料的机械强度^[21]。而 Fe^{2+} 主要取代 Mg^{2+} 占据四面体位置形成 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$ 固溶体。本文中铜渣尾矿主要由铁橄榄石和磁铁矿组成。在烧成过程中铁离子会进入 MgAl_2O_4 结构中生成 $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ 固溶体。随着烧结温度的升高,体系中液相量逐渐增多, $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{O}$ 中的 Fe^{2+} 易溶解在液相中,使尖晶石晶胞体积逐渐减小^[22]。此外,铜渣尾矿中 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 等杂质离子也能够固溶于镁橄榄石和尖晶石相中,引起晶格畸变,为 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 的扩散提供额外驱动力,从而促进镁橄榄石和尖晶石晶粒长大^[23]。

2.2 物理性能

表3列出了经不同烧结温度处理后试样的常温物理性能。结果表明,随着烧结温度的升高,试样的线收缩率和体积密度逐渐增大,显气孔率逐渐降低,而耐压强度则呈先升后降的趋势。虽然提高烧结温度有利于提升试样的体积密度和致密化程度,但当温度升至1 450 ℃时,试样的耐压强度反而降

低,这可能是温度过高使得试样出现过烧现象(玻璃相增多),导致其脆性增加的缘故。综合比较,当烧结温度为1 400 ℃时,试样的体积密度为2.75 g/cm³,显气孔率为24.11%,耐压强度为138.5 MPa,此时试样综合性能最优。

表3 不同烧结温度试样的常温物理性能

Table 3 Physical properties of samples treated at different sintering temperatures

检测项目	烧结温度/℃		
	1 350	1 400	1 450
线收缩率/%	1.03 ± 0.23	2.29 ± 0.09	3.91 ± 0.15
体积密度/(g/cm ³)	2.61 ± 0.01	2.75 ± 0.03	2.83 ± 0.02
显气孔率/%	27.3 ± 0.45	24.11 ± 0.09	21.6 ± 0.11
耐压强度/MPa	92.2 ± 3.21	138.5 ± 4.02	122.2 ± 5.13

2.3 显微结构

图4和表4分别为经不同烧结温度处理后试样断口的SEM图像及能谱分析结果。可以看出,烧后试样中均存在大量气孔,其主要物相为镁橄榄石(深灰色区域)和尖晶石(浅灰色区域),其中尖晶石晶粒多被镁橄榄石包裹。随着烧结温度的升高,镁橄榄石和尖晶石晶粒逐渐长大,大量边界清晰的八面体状及粒状尖晶石晶粒填充于镁橄榄石晶粒之间的间隙中,试样中的大气孔数量不断减少。能谱分析

结果显示,镁橄榄石和尖晶石中均固溶有Fe³⁺/Fe²⁺、Zn²⁺等离子,这有利于降低试样的烧结温度。由于镁橄榄石和尖晶石均为高熔点物相,本身难以烧结,晶粒间直接结合较为困难。随着烧结温度升高,镁橄榄石和尖晶石晶粒逐渐长大,但尖晶石生成过程中伴随的体积膨胀^[24]同样不利于两相直接结合程度的提高。此外,考虑到镁橄榄石[(10~12) × 10⁻⁶/K]和尖晶石[(7~8) × 10⁻⁶/K]的热膨胀系数存在差异,在冷却过程中界面处会产生热应力,也会导致微裂纹的产生[图4(c)],进而对试样的耐压强度产生不利影响。

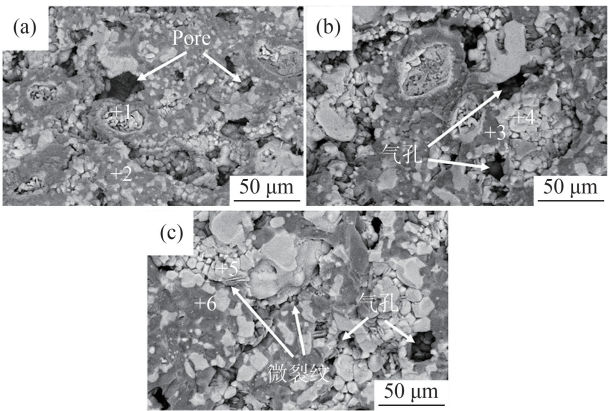


图4 不同烧结温度处理后试样SEM图像
Fig. 4 SEM images of samples treated at different sintering temperatures: (a) 1 350 °C; (b) 1 400 °C; (c) 1 450 °C

表4 图4中各点的能谱分析结果

Table 4 EDS analysis of points in Fig.4(%, atom fraction)

标示点	Mg	Al	Si	Fe	Zn	Ca	O
1	20.5	5.7	1.4	47.2	0.9	0.2	23.9
2	24.6	3.9	21.7	3.5	3.5	3.5	42.1
3	41.9	—	26.8	8.5	1.1	0.9	20.9
4	20.4	7.5	—	39.0	0.9	0.4	31.2
5	17.0	5.6	1.1	59.1	1.2	—	16.1
6	37.2	—	11.9	30.3	3.9	0.1	16.5

图5为1 400 ℃处理后试样的SEM图像。由图5可以看出,经1 400 ℃烧结后,试样中存在发育良好的尖晶石晶粒,而镁橄榄石则被冷却过程中形成的玻璃相包裹。尽管反应温度为1 400 ℃以上时,镁橄榄石能快速生成,但试样中液相量对晶体发育仍有着极为重要的影响^[25]。因此,采用热力学软件FactSage 6.2中的Equilib模块计算了烧结过程中理论液相含量与温度的关系,结果如图6所示。可以

看出,随着烧结温度的升高,试样中的液相含量逐渐增加,约为7%,这与物相分析结果(图3)基本一致。高温条件下液相能够充分填充晶粒间的空隙,通过润湿作用极大地促进传质和颗粒的重排过程,镁橄榄石和尖晶石晶粒不断发育,有效提高了试样的烧结速率。随着烧结过程中晶粒尺寸的增长,在晶界迁移的带动下,气孔逐渐聚集、融合,在晶界处形成较大的气孔并逐渐排出,烧后试样的致密化

程度不断提高,有利于其耐压强度和体积密度的提高。

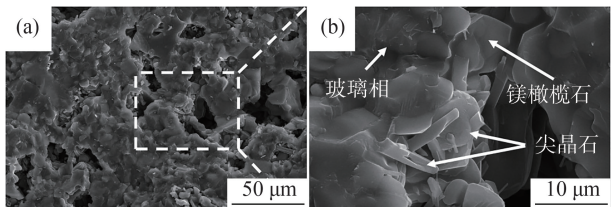


图5 经1400℃处理后试样的SEM图像
Fig. 5 SEM images of samples treated at 1400 °C:
(a) 1 000 × ; (b) 5 000 ×

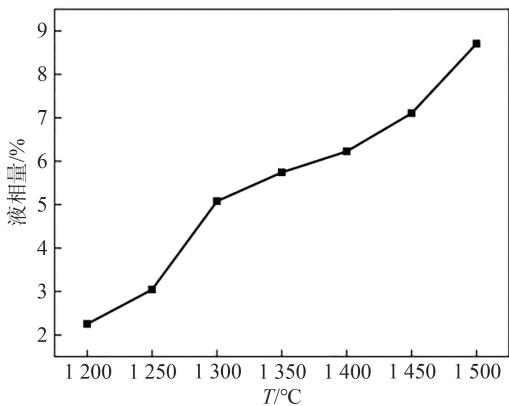


图6 温度对理论液相量的影响
Fig. 6 Effects of sintering temperature on theoretical liquid phase content

为对比其他工业废渣材料制备的镁橄榄石-尖晶石材料的性能,表5列出了不同原料制备的镁橄榄石-尖晶石体系材料的性能。可以看出,本研究制备的复相材料与以高碳铬铁渣、煤矸石、镍渣和菱镁矿尾矿等原料制备的同类材料相比,在耐压强

表5 不同原料制备的MgO-Al₂O₃-SiO₂体系材料性能
Table 5 Properties of MgO-Al₂O₃-SiO₂ materials prepared from different raw materials

原料	材料体系	温度/℃	常温耐压强度/MPa
高碳铬铁渣 ^[15]	镁橄榄石-尖晶石	1 200	108.8
镍渣 ^[18]	镁橄榄石-尖晶石	1 450	15.95
煤矸石、菱镁矿尾矿 ^[26]	镁橄榄石-尖晶石-方镁石	1 300	56.0
菱镁尾矿 ^[27]	镁橄榄石-尖晶石-方镁石	1 600	—
菱镁尾矿、二次铝灰 ^[28]	镁橄榄石-尖晶石-方镁石	1 300	61.4
铜渣尾矿(本文)	镁橄榄石-尖晶石	1 400	138.5

度指标上(138.5 MPa)具有明显优势。

3 结 论

1)以铜渣尾矿为原料,采用高温固相烧结法制备镁橄榄石-尖晶石复相材料。铁橄榄石相完全分解,主晶相转变为镁橄榄石和镁铁铝复合尖晶石,并伴有少量方镁石。随着烧结温度的升高,镁橄榄石和尖晶石的衍射峰逐渐增强,有利于两相晶体的发育与生长。

2)烧结温度对试样的物理性能具有显著影响。随着温度升高,试样的线收缩率和体积密度逐渐增加,显气孔率逐渐降低,耐压强度呈先增大后减小的趋势。当烧成温度为1400℃时,试样综合性能最优:体积密度为2.75 g/cm³,显气孔率为24.11%,耐压强度达到138.5 MPa。

3)显微结构分析表明,烧后试样中尖晶石晶粒多被镁橄榄石包裹;随烧结温度升高,晶粒逐渐长大,出现大量边界清晰的八面体状和粒状尖晶石,填充于镁橄榄石晶粒间隙。高温下液相量增多,通过润湿作用促进传质和颗粒重排,气孔逐渐排除,致密化程度提高。铜渣尾矿中Fe³⁺/Fe²⁺、Zn²⁺和Ca²⁺等离子能够稳定地固溶于镁橄榄石和尖晶石相中,具有良好的环境安全性。

参考文献:

[1] Du J L, Zhang F X, Hu J H, et al. Direct reduction of copper slag using rubber seed oil as a reductant: iron recycling and thermokinetics [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132546.

[2] Klaffenbach E, Montenegro V, Guo M X, et al. Sustainable and comprehensive utilization of copper slag: a review and critical analysis [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2023, 9(2): 468-496.

[3] 李明冬, 饶剑, 刘星, 等. 铜冶炼渣综合利用现状与展望 [J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 251-261.

[4] 余伟奇. 铜渣资源化利用研究现状及展望 [J]. 铜业工程, 2023(4): 173-179.

[5] 张延安, 王坤, 豆志河, 等. 铜渣贫化及其高值化利用 [J]. 铜业工程, 2024(3): 85-96.

[6] 姚艺佳, 柯璇, 刘硕, 等. 铜冶炼渣资源化处理及综合利用研究进展 [J]. 有色金属科学与工程, 2025, 16(5): 689-698.

- [7] 唐超凡, 张荣良. 铜渣高价值化利用研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(5): 117-123.
- [8] Mansourkiyai S, Golzary A. Innovative approaches to circular economy in copper slag management: maximizing resource efficiency and sustainability [J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106903.
- [9] Wu Z J, Zhou J, Liang J L, et al. Comprehensive utilization of copper slag: an overview [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2026, 14(2): 121209.
- [10] Zhang L X, Liang L S, Li Y, et al. Preparation of lightweight foam glass-ceramics from copper slag tailings: secondary aluminum slag as pore-forming agent [J]. Ceramics International, 2024, 50(21): 43699-43709.
- [11] Lemougna P N, Yliniemi J, Adesanya E, et al. Reuse of copper slag in high-strength building ceramics containing spodumene tailings as fluxing agent [J]. Minerals Engineering, 2020, 155: 106448.
- [12] 周永祥, 贺阳, 刘晨, 等. 高碳铬铁渣用作混凝土粗骨料的探索性研究 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48(1): 6-9.
- [13] 谭瑞松, 王有义, 宋波, 等. 高碳铬铁渣综合利用研究现状与发展趋势 [J]. 能源环境保护, 2026, 40(1): 42-53.
- [14] 梁金源, 张礼华, 刘来宝, 等. 高碳铬铁渣基尖晶石-镁橄榄石高强陶瓷骨料的制备及性能 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 1054-1062.
- [15] 冯泽成, 赵惠忠, 韩欢师, 等. 高碳铬铁渣制备镁橄榄石-尖晶石复相材料的性能研究 [J]. 耐火材料, 2021, 55(6): 491-497.
- [16] 陈先友, 魏昶, 李兴彬, 等. 含砷铜渣中砷的分离与固化 [J]. 矿冶, 2024, 33(2): 264-270.
- [17] 马北越, 高陟, 任鑫明. 铜渣高附加值利用研究现状 [J]. 耐火与石灰, 2022, 47(1): 23-28.
- [18] 李琦, 钱烽烽, 付启新, 等. 镍渣/稻壳研制轻质镁橄榄石-尖晶石耐火材料 [J]. 非金属矿, 2019, 42(4): 41-43.
- [19] 王洪阳, 包焕均, 张文韬, 等. 铁橄榄石的氧化分解及碱浸溶硅 [J]. 金属矿山, 2020(10): 167-173.
- [20] 陈少一, 刘浩, 王周福, 等. 温度及组成对镁橄榄石合成过程的影响 [J]. 陶瓷学报, 2017, 38(5): 621-625.
- [21] Carbonin S, Martignago F, Menegazzo G, et al. X-ray single-crystal study of spinels: *in situ* heating [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2002, 29(8): 503-514.
- [22] Wu T, Kohlstedt D L. Rutherford backscattering spectroscopy study of the kinetics of oxidation of $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1988, 71(7): 540-545.
- [23] 董浩然, 聂建华, 梁永和, 等. 烧成温度对菱镁矿尾矿合成镁橄榄石性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6): 2054-2061.
- [24] 王世贞, 韩兵强, 谭丹, 等. 电熔镁砂对钙长石-尖晶石隔热耐火材料性能的影响 [J]. 耐火材料, 2026, 60(1): 1-7.
- [25] Li B R, Wei Y W, Wang J H, et al. Improved hydration resistance of CaO granules *via* sol-processed metal oxide protective layers [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(9): 4878-4890.
- [26] 王千千, 咎文字, 马北越, 等. 煤矸石粉加入量对菱镁矿尾矿制备镁质多孔骨料的影响 [J]. 耐火材料, 2026, 60(1): 54-58.
- [27] 林浩鑫, 田琳, 刘晓妍, 等. 热处理温度对菱镁尾矿合成 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-MgAl}_2\text{O}_4\text{-MgO}$ 复相砂的影响 [J]. 化工环保, 2024, 44(3): 427-431.
- [28] 周萍, 马北越, 任鑫明. 煅烧温度对菱镁矿尾矿制备 $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ 复相多孔材料性能的影响 [J]. 耐火材料, 2023, 57(2): 104-106, 112.

Properties of Forsterite-Spinel Composite Prepared from Copper Smelting Slag Tailings

Li Bingrong¹, Gao Yang¹, Wang Quanyong¹, Zhu Yongqiang², Yu Jin¹, Tu Yu¹, Zhang Wei¹, Sun Yunlong¹

(1. Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. Guixi Smelter, Jiangxi Copper Company Limited, Guixi 335424, China)

Abstract: Copper smelting slag tailings are solid wastes obtained from flotation depletion of copper slag generated in pyrometallurgical copper smelting. Their massive accumulation produces serious environmental and safety hazards. Forsterite-spinel composite materials were prepared by a high-temperature solid-state sintering method using copper smelting slag tailings as the main raw material, with addition of light-burned magnesia and activated alumina. Effects of sintering temperature on phase composition, microstructure, and physical properties of the materials were systematically investigated. Results showed that the main crystalline phases of sintered samples were forsterite and spinel, while fayalite phase was completely decomposed. As sintering temperature increased, grains of forsterite and spinel gradually grew, and densification degree of the material continuously improved. When sintering temperature was 1 400 °C, the sample exhibited the best comprehensive performance, with a bulk density of 2.75 g/cm³, an apparent porosity of 24.11%, and a cold compressive strength of 138.5 MPa.

Key words: copper smelting slag tailings; forsterite; spinel; sintering temperature; solid waste resourceization

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.004

引文格式: 李炳蓉, 高杨, 王全勇, 朱勇强, 俞锦, 涂宇, 张威, 孙云龙. 铜渣尾矿制备镁橄榄石-尖晶石复相材料性能研究[J]. 铜业工程, 2026(4): 34-40.

Li Bingrong, Gao Yang, Wang Quanyong, Zhu Yongqiang, Yu Jin, Tu Yu, Zhang Wei, Sun Yunlong. Properties of forsterite-spinel composite prepared from copper smelting slag tailings[J]. Copper Engineering, 2026(4): 34-40.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc