doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.022
引用格式：史伟强，王丛慕，宁红，张梦. 大宗铜尾矿的高值化利用：用于制备高性能微晶玻璃[J]. 矿冶，2026，35(2)：357-364.
SHI Weiqiang, WANG Congmu, NING Hong, ZHANG Meng. High-value utilization of bulk copper tailings: preparation of high-performance glass-ceramics[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 357-364.

大宗铜尾矿的高值化利用：用于制备高性能微晶玻璃

史伟强 王丛慕 宁 红 张 梦
（江西江铜环境资源科技有限公司，江西 上饶 334100）

摘 要：为探索大宗铜尾矿资源的高值化利用途径，本研究以江西某铜选矿尾矿为主要原料、CaF_2为晶核剂，采用熔融法制备了$CaO-Al_2O_3-SiO_2$（CAS）系微晶玻璃。通过差示扫描量热法（DSC）确定了基础玻璃的核化与晶化温度，并系统研究了CaF_2掺量（质量分数，下同）、铜尾矿掺量及晶化温度对微晶玻璃晶相组成、微观结构与性能的影响机制。利用X射线衍射（XRD）、扫描电子显微镜-能谱（SEM-EDS）表征了材料的物相与显微结构，并测试了其抗压强度、抗折强度、吸水率及比重等关键性能。结果表明：CaF_2作为有效的晶核剂，其掺量增至7%时，微晶玻璃的析晶机制由表面析晶转变为整体析晶，材料内部晶体结构显著细化、致密，抗压强度随之提升。在优化工艺参数（铜尾矿掺量50%，晶化温度950 ℃）下，可获得以硬硅钙石（$Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$）为主晶相的微晶玻璃，其综合性能最优，抗压强度为124.56 MPa，抗折强度为55.91 MPa，吸水率仅为0.004%，密度为2.79。所制备的微晶玻璃未检测出重金属离子，满足环保与建筑材料应用要求。本研究为铜尾矿的大规模、高附加值资源化利用提供了理论依据与可行的技术方案，兼具环境效益与经济效益。

关键词：铜尾矿；熔融法；微晶玻璃；晶化温度；抗压强度；硬硅钙石
中图分类号：TD952；TD982 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0357-08

High-value utilization of bulk copper tailings: preparation of high-performance glass-ceramics

SHI Weiqiang WANG Congmu NING Hong ZHANG Meng
(Jiangxi JCC Environmental Resources Technology Co. Ltd., Shangrao 334100, Jiangxi, China)

Abstract: To explore high-value utilization pathways for bulk copper tailing resources, this study prepared $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ (CAS) system glass-ceramics via the melting method, using copper tailings from a beneficiation plant in Jiangxi Province as the main raw material and CaF_2 as the nucleating agent. The nucleation and crystallization temperatures of the base glass were determined by differential scanning calorimetry (DSC). The effects of CaF_2 content (mass fraction, same below), copper tailings content, and crystallization temperature on the crystalline phase composition, microstructure, and properties of the glass-ceramics were systematically investigated. The phase composition and microstructure of the materials were characterized using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS). Key properties, including compressive strength, flexural strength, water absorption, and density, were tested. The results indicate that CaF_2 acts as an effective nucleating agent. When its content increases to 7%, the crystallization mechanism of the glass-ceramics shifts from surface crystallization to bulk crystallization. The internal crystal structure becomes significantly refined and densified, leading to an increase in compressive strength. Under optimized process parameters (copper tailings content of 50%, crystallization temperature of 950 ℃), glass-ceramics with xonotlite ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$) as the

收稿日期：2025-06-06 **修回日期：**2025-07-10 **录用日期：**2025-09-05
基金项目：江西铜业股份有限公司科研项目(HJYJ2023001)
第一作者：史伟强，硕士，研究方向为矿冶固废资源化综合利用。E-mail：1160650038@qq.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

primary crystalline phase were obtained, exhibiting optimal comprehensive performance: a compressive strength of 124.56 MPa, a flexural strength of 55.91 MPa, a water absorption rate of only 0.004%, and a density of 2.79. No heavy metal ions were detected in the prepared glass-ceramics, meeting the requirements for environmental protection and building material applications. This research provides a theoretical basis and a feasible technical solution for the large-scale, high-value-added resource utilization of copper tailings, offering both environmental and economic benefits.

Key words: copper tailings; melting method; glass-ceramics; crystallization temperature; compressive strength; xonotlite

随着全球矿产资源的持续开发，铜矿开采过程中产生的尾矿堆积问题日益严峻。据统计，铜尾矿的年排放量可达数亿吨，其长期堆积不仅占用大量土地，还会因重金属离子渗漏对周边土壤和水体造成严重污染，严重威胁生态环境安全，因此铜尾矿的消纳处置是亟需解决的关键问题[1-4]。与此同时，铜尾矿中富含SiO_2、Al_2O_3、CaO等成分，具备作为硅酸盐材料基质的潜力，若能将其转化为高附加值产品，将实现“以废治废、变废为宝”的资源化目标[5-8]。其中，以铜尾矿为主要原料制备微晶玻璃，不仅可有效固化重金属，解决其堆存带来的环境与安全问题，更开辟了一条高值化、规模化利用的新途径，是一项前景广阔且意义重大的工作。

微晶玻璃作为一种高性能无机材料，因其独特的微晶—玻璃复合结构，展现出优异的机械强度、耐腐蚀性、热稳定性和化学稳定性，广泛应用于建筑、电子、航空航天等领域[1]。近年来，利用各类尾矿制备微晶玻璃已成为固废资源化研究的热点。例如，戴旭等[8]利用花岗岩尾矿制备钙铝硅（CAS）系微晶玻璃，发现当熔融温度、核化温度和晶化温度分别保持在1 300、880、980 ℃时，微晶玻璃的性能最佳；于永生等[9]利用珍珠岩尾矿制备α-堇青石微晶玻璃，发现随着烧结温度升高，微晶玻璃中μ-堇青石逐渐转变为α-堇青石，材料孔隙率降低；王锐等[10]利用萤石尾矿制备氟磷灰石微晶玻璃，其工艺具有烧成温度范围宽、对原料成分波动适应性强的特点；ZHANG等[11]则以城市生活垃圾焚烧飞灰协同萤石尾矿制备微晶玻璃，所得材料不仅力学性能和耐腐蚀性优异，还对重金属离子展现出高效的固化效果。这些研究为尾矿基微晶玻璃的制备提供了丰富的技术借鉴。

然而，目前针对铜尾矿制备微晶玻璃，特别是系统研究晶核剂种类与用量、热处理制度等关键工艺参数对材料析晶行为、微观结构及最终性能影响的报道仍相对较少。铜尾矿的成分波动性及其对析晶过程的复杂影响机制尚需深入探究。基于此，本文以江西某铜尾矿为主要原料，CaF_2为晶核剂，采用熔融法制备$CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$（CAS）系微晶玻璃。本研究旨在系统探究$CaF_2$掺量、铜尾矿掺量及晶化温度对微晶玻璃晶相演变、显微结构、力学性能及物理性能的影响规律，明确其最佳制备工艺参数，以期为铜尾矿的大宗量、高值化综合利用提供可靠的理论依据与技术参考。

1 试验

1.1 试验原料

试样取自江西某铜矿尾矿，将全部矿样晒干混匀，并取样化验分析，其主要化学组成如表1所示，主要物相组成如图1所示。由表1和图1可以看出，尾矿的主要矿物组成为石英、钾长石、白云母及透

表1 原材料的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of raw material /%

成分	F	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2
含量	0.25	0.15	0.76	18.19	62.97
成分	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
含量	0.26	2.22	6.71	2.51	4.92
成分	TiO_2	ZnO			
含量	0.44	0.15			

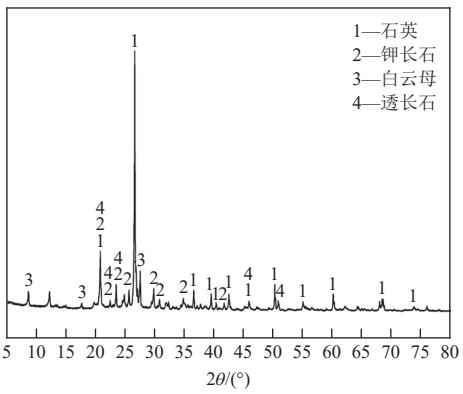


图1 原材料的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of raw materials

长石等，主要化学成分为Al_2O_3、SiO_2、K_2O、CaO和Fe_2O_3，其成分与制备CAS系微晶玻璃基础骨架成分相似[12]，因此用其制备微晶玻璃具有理论可行性。试验所需辅助原料碳酸钠、碳酸钾、碳酸钙、萤石购自国药集团化学试剂有限公司，均为分析纯。

根据铜尾矿的化学成分特征，以铜尾矿利用率最大化为原则，参考CAS相图及相关资料，经优化配比设计后，确定基础玻璃化学成分组成范围见表2。

表2　设计的基础玻璃化学成分

Table 2　Designed chemical composition of the base glass /%

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O
组成范围	35~60	2~12	8~20	3~7	3~8

1.2　测试与表征

采用同步热分析仪（NETZSCH STA 449 F3 Jupiter）对样品进行热分析，气氛为氮气，测试温度范围为30~1 100 ℃，升温速率为10 ℃·min^{-1}。采用X射线衍射仪（RigakuD/MAX-2500PC）对样品进行物相分析，利用CuKα辐照，工作电压为45 kV，电流密度100 mA，每分钟扫描5°，扫描范围为5°~85°。采用扫描电子显微镜（JSM-6380LV）对试样的微观形貌进行测试分析。采用美国铂金埃尔默电感耦合等离子体质谱仪对微晶玻璃进行浸出毒性检测。

1.3　基础玻璃的制备

采用熔融法制备微晶玻璃，工艺流程图如图2所示。根据设计的基础玻璃目标组成，称量铜尾矿及碳酸钙、碳酸钾及萤石等化学辅助原料，取料后使用球磨混料机混合均匀，并置于氧化铝坩埚中放入高温炉在1 450 ℃熔化1 h，待熔融液澄清后倒入预热的耐高温模具内，成型后放入晶化炉在500 ℃退火1 h后进行核化及晶化处理，另取一部分基础玻璃溶液进行水淬烘干处理后得到水淬渣进行差热分析。

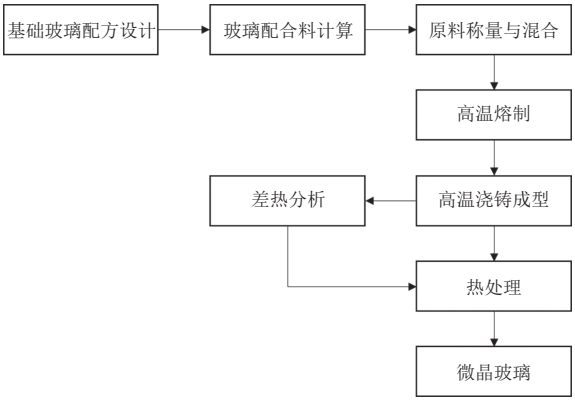


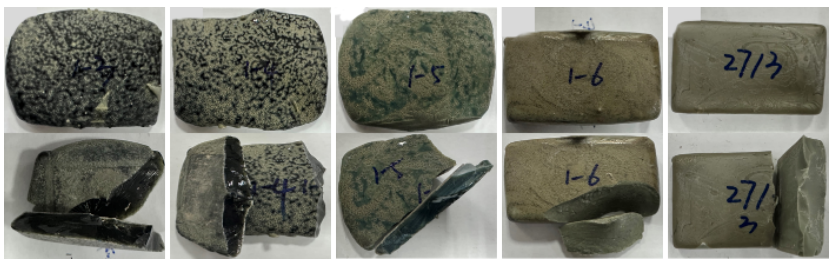
图2　微晶玻璃制备工艺流程图

Fig. 2　Flowchart of the preparation process of glass-ceramics

2　结果与讨论

2.1　CaF_2掺量对微晶玻璃性能的影响

研究表明，CAS系微晶玻璃易发生表面析晶，引入晶核剂可以促进玻璃整体析晶，其中氟化钙（CaF_2）是常用的晶核剂之一。其作用机制在于有效降低玻璃熔体黏度，促进澄清与均化过程，并能诱导玻璃分相，从而为整体析晶创造有利条件[13]。为探究晶核剂掺量的影响并确定最优配比，本文设置了3%、4%、5%、6%及7%五个不同掺量的CaF_2，系统研究其对铜尾矿基微晶玻璃析晶行为及相关性能的影响，结果如图3所示。



(a)CaF_2掺量3%　(b)CaF_2掺量4%　(c)CaF_2掺量5%　(d)CaF_2掺量6%　(e)CaF_2掺量7%

图3　不同CaF_2掺量所得微晶玻璃表观及断裂面形貌

Fig. 3　Appearance and fracture surface morphology of glass-ceramics with different CaF_2 contents

从图3可以看出，当CaF_2掺量为3%~5%时，样品发生显著形变，且析晶模式以表面析晶为主，内部残留大量玻璃相。当CaF_2掺量提高至6%~7%时，样品形貌完整，变形得到有效控制，内部呈现典型的整体析晶特征。这表明CaF_2能有效促进CAS系微晶玻璃从表面析晶向整体析晶转变，其适宜掺量范围为6%~7%。

图4为不同CaF_2掺量下微晶玻璃的抗压强度测试结果。可以看出，铜尾矿基微晶玻璃的抗压强度随CaF_2掺量的增加呈上升趋势。当CaF_2掺量为3%~5%时，由于晶核剂含量不足，析晶困难，样品仅发生表面析晶，导致材料强度处于较低水平。当掺量增至6%

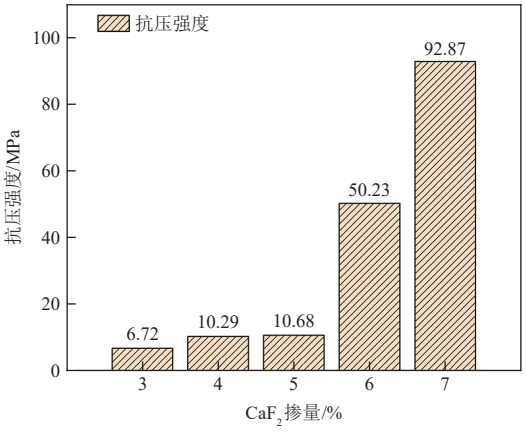


图4 不同CaF_2含量所得微晶玻璃的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of glass-ceramics with different CaF_2 contents

时，析晶模式开始转变，强度随之提升。当掺量达到7%时，样品析晶充分，晶粒结构致密，抗压强度达到最高。因此，综合形貌与性能分析，确定在该尾矿基微晶玻璃体系中CaF_2的最佳掺量为7%。

2.2 尾矿掺量对微晶玻璃性能的影响

图5为不同尾矿掺量下微晶玻璃的X射线衍射（XRD）图谱。分析可知，当尾矿掺量在30%~50%时，微晶玻璃的主晶相均为硬硅钙石（$Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$）。随着掺量由30%增至50%，硬硅钙石特征衍射峰的强度逐渐增强，表明其结晶度提高。当尾矿掺量进一步提升至60%和70%时，衍射图谱中除硬硅钙石主晶相外，开始出现少量枪晶石（$Ca_4Si_2O_7F_2$）的衍射峰，同时硬硅钙石的特征峰强度呈现下降趋势，这可能与过高尾矿掺量带来的成分波动及析晶环境改变有关。

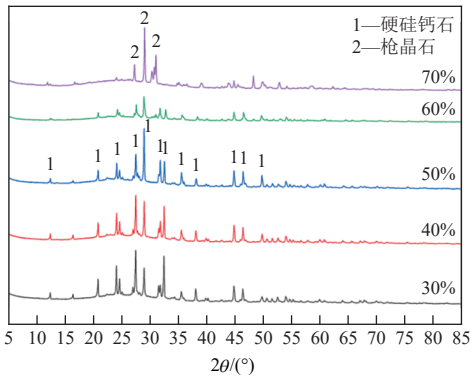


图5 不同尾矿掺量所得微晶玻璃晶的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of glass-ceramics with different tailings contents

图6给出的是不同尾矿掺量所得微晶玻璃抗压强度及抗折强度。从图6可以看出，抗压强度在尾矿掺量为30%~50%时维持在约90 MPa的较高水平，并在掺量为50%时达到峰值92.87 MPa；此后，随掺量继续增加，抗压强度显著下降。抗折强度的变化趋势与之相似，呈现先升后降的规律，同样在尾矿掺量为50%时取得最大值50.25 MPa。这表明适宜的尾矿掺量（50%）有助于形成力学性能优良的微观结构。

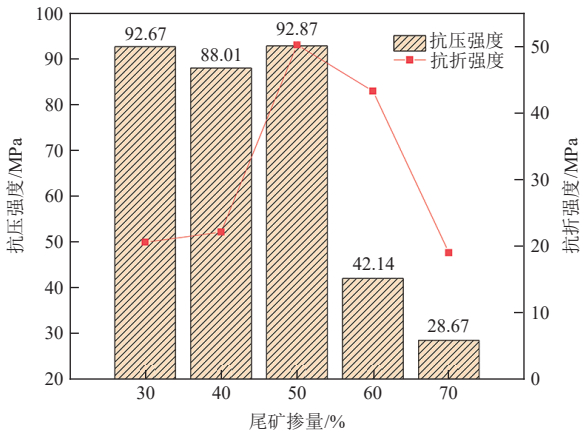


图6 不同尾矿掺量所得微晶玻璃的抗压及抗折强度

Fig. 6 Compressive and flexural strength of glass-ceramics with different tailings contents

图7给出的是微晶玻璃物理性能随尾矿掺量的变化。从图7可以看出，吸水率随尾矿掺量增加呈先降低后升高的趋势，最低值出现在掺量50%附近，表明此时材料致密性最佳。密度则随掺量增加先增大后减小，在中等掺量区（40%~50%）达到较高值，这与晶相组成和玻璃相含量的变化密切相关。

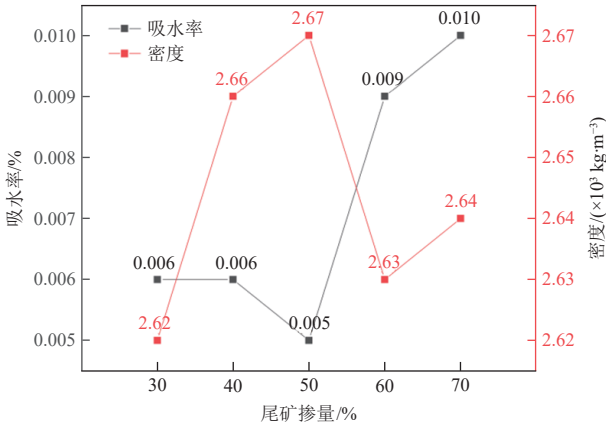


图7 不同尾矿掺量时所得微晶玻璃的吸水率及密度

Fig. 7 Water absorption rate and density of glass-ceramics with different tailings contents

以上试验结果表明，铜尾矿掺量对微晶玻璃的晶相组成、力学性能及物理性能均具有系统性影响。当尾矿掺量为50%时，材料综合性能表现最优：硬硅钙石结晶充分且纯度较高，抗压与抗折强度达到

峰值，同时吸水率最低，显示出优异的致密性。这主要归因于在此配比下，尾矿提供的SiO_2、Al_2O_3等组分与添加剂之间达到了良好的化学平衡，促进了主体晶相的有效生长与致密微观结构的形成。掺量过低（<50%）可能导致成核驱动力不足，而掺量过高（>50%）则可能因杂质成分积累及体系化学稳定性下降，诱发杂相（如枪晶石）生成并恶化材料性能。因此，确定50%为本研究体系中铜尾矿的最佳掺量。

2.3 热处理制度对微晶玻璃性能的影响

对铜尾矿掺量为50%、晶核剂（CaF_2）掺量为7%的基础玻璃水淬液进行烘干、粉磨后，通过差示扫描量热法（DSC）分析其热行为，结果如图8所示。DSC曲线显示，在725 ℃处出现明显的核化放热峰，804 ℃处出现第一晶化吸热峰，923 ℃处出现第二晶化吸热峰，1 035 ℃处出现第二放热峰。依据DSC分析结果，确定核化温度为750 ℃，核化时间150 min；并选取850、900、950及1 000 ℃四个温度点作为晶化温度变量，晶化时间均为150 min。

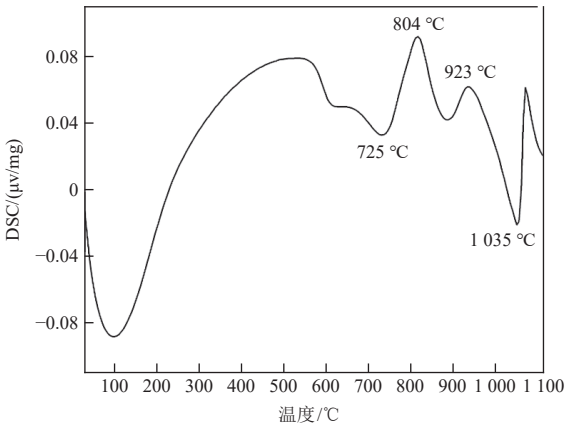


图8 基础玻璃的DSC曲线

Fig. 8 DSC curve of the base glass

图9为晶化温度850、900、950与1 000 ℃时微晶玻璃的宏观表观及断面显微形貌。从图9可以看出，当晶化温度为850~950 ℃时，样品形貌完整、无明显变形，且内部析晶良好，晶体尺寸细小、分布均匀；而当晶化温度升至1 000 ℃时，样品发生显著变形，表明该体系晶化温度不宜超过1 000 ℃。

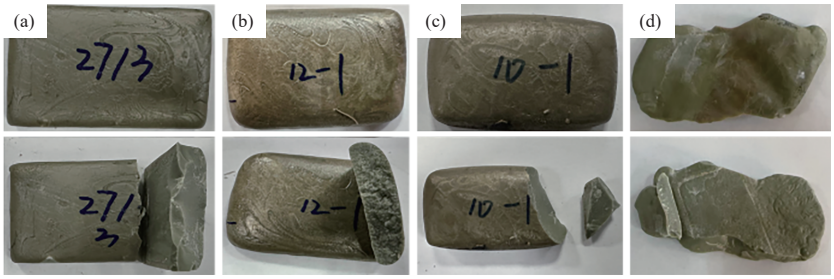


图9 不同晶化温度下所得微晶玻璃表观及断裂面形貌

Fig. 9 Appearance and fracture surface morphology of glass-ceramics at different crystallization temperatures

图10为不同晶化温度下微晶玻璃的抗压强度与抗折强度。从图10可以看出，随着晶化温度升高，材料的抗压与抗折强度均逐步提高。在晶化温度为950 ℃时，强度达到最优值，抗压强度为124.56 MPa，抗折强度为55.91 MPa，均符合《JC/T 872—2019》标准要求。这主要归因于较高温度促进了玻璃相向晶相的转化，结晶度提高，残余玻璃相减少，内部孔隙率下降，从而增强了材料的致密性与力学性能。

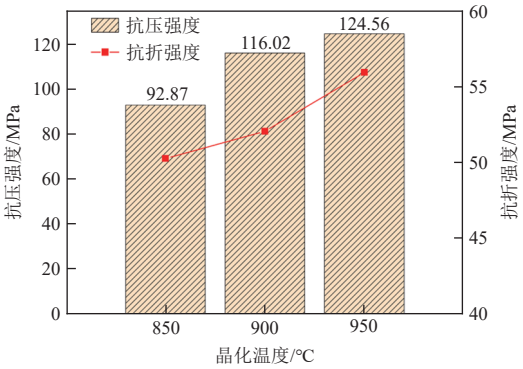


图10 不同晶化温度下所得微晶玻璃的抗压及抗折强度

Fig. 10 Compressive and flexural strength of glass-ceramics at different crystallization temperatures

图11为不同晶化温度下微晶玻璃的吸水率与密度变化。随着晶化温度升高，吸水率逐渐降低，密度逐渐增大。在950 ℃时，吸水率低至0.004%，密度为2.79，亦满足《JC/T 872—2019》标准要求。此变化趋势与原子扩散能力增强、结晶反应更充分、晶体结构趋于致密密切相关。

不同晶化温度下制备的样品XRD分析结果如图12所示。可以看出，在850~950 ℃保温150 min后，样品主晶相均为硬硅钙石（$Ca_6[Si_6O_{17}](OH)_2$），且随温度升高，其特征衍射峰强度有所增强。当温

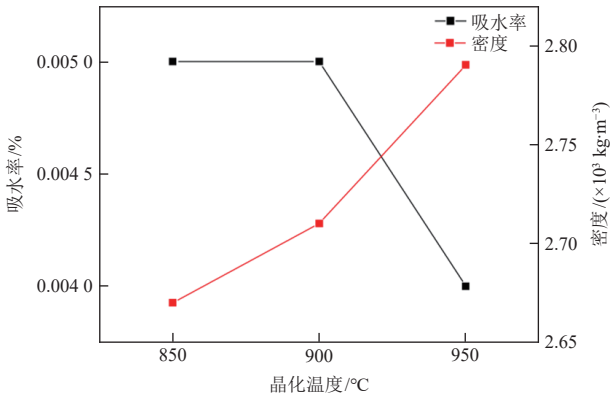


图 11　不同晶化温度下所得微晶玻璃的吸水率及密度

Fig. 11　Water absorption rate and density of glass-ceramics at different crystallization temperatures

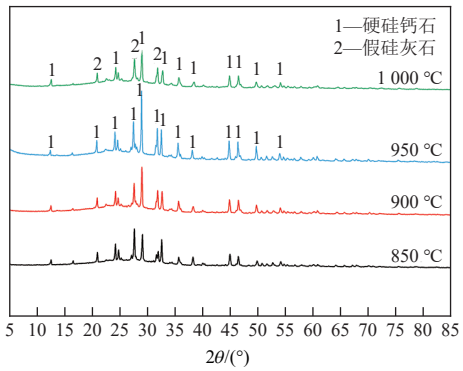


图 12　不同晶化温度下所得微晶玻璃晶的 XRD 图谱

Fig. 12　XRD patterns of glass-ceramics at different crystallization temperatures

度升至 1 000 ℃时，硬硅钙石结构中的结合水脱除，晶体发生分解或相变，生成假硅灰石（α-$CaSiO_3$）新相。

进一步通过扫描电子显微镜（SEM）观察显微结构（图 13），并配合能谱分析（EDS，图 14），对晶化过程进行解析。在 850 ℃时，晶体开始析出但生长尚不充分；900 ℃时，晶体数量增多，结构逐渐致密；950 ℃时，样品表面形成大量晶核并呈辐射状向外生长，构成致密的放射状硬硅钙石晶体结构，与 XRD 结果一致；当温度达到 1 000 ℃时，样品表面出现较多气孔，这主要源于硬硅钙石向假硅灰石转变过程中发生的脱羟基反应与晶体结构重构，伴随体积收缩所致。

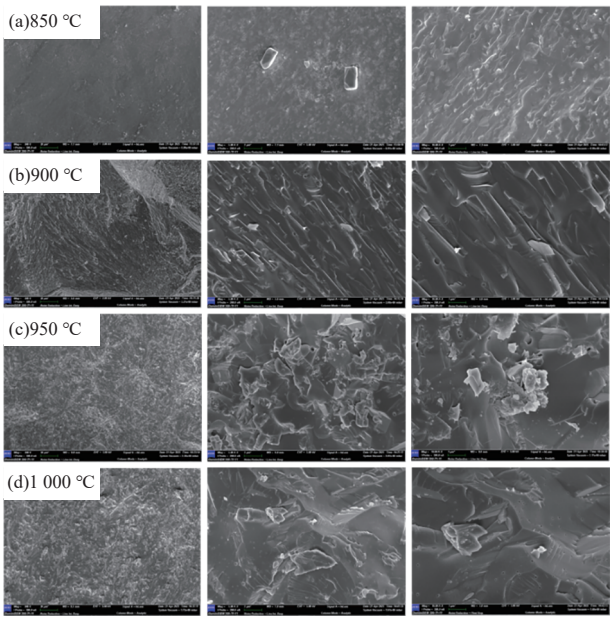


图 13　不同晶化温度下所得微晶玻璃的 SEM 图像

Fig. 13　SEM iamges of glass-ceramics at different crystallization temperatures

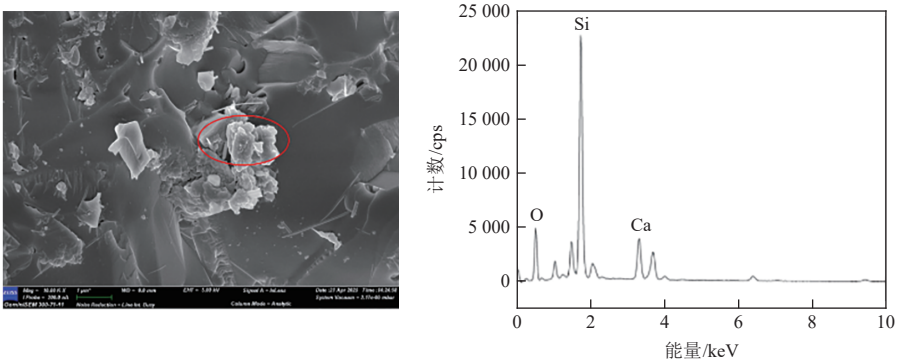


图 14　晶化温度为 950 ℃时所得微晶玻璃的 SEM 图像与元素组成

Fig. 14　SEM image and elemental composition of glass-ceramics crystallized at 950 ℃

2.4　环境与经济效益分析

依据《HJ/T 299—2007 固体废物浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》对铜尾矿基微晶玻璃样品进行浸出毒性测试，检测其中铅、镉元素的浸出浓度，结果如表 3 所示。分析表明，样品中未检出铅、镉，说明该材料不具备危险废物特征，符合环保安全要求，可作为建筑装饰材料使用。

从原料成本角度分析，传统微晶玻璃常以高

表3 铜尾矿基微晶玻璃重金属浸出结果

Table 3 Heavy metal leaching results of copper tailings-based glass-ceramics

样品编号	所测元素	检测结果	单位
微晶玻璃	Pb	未检出	$ug \cdot L^{-1}$
	Cd	未检出	$ug \cdot L^{-1}$

纯石英砂及各类化学添加剂为主要原料，其中助熔剂（如Na_2CO_3）与晶核剂（如Cr_2O_3）占原料质量的20%~30%，导致原料成本占总生产成本的比例高达50%~60%。相较而言，本研究所制备的铜尾矿基微晶玻璃以工业固废铜尾矿为主要原料（掺量可达60%~70%），不仅能有效消纳尾矿，还可显著降低原料采购成本（尾矿处理成本通常仅为传统原料的1/5~1/3）。综合估算，该工艺可使微晶玻璃的整体生产成本较传统方法降低约25%~35%。

基于本研究确定的最佳工艺参数，铜尾矿基微晶玻璃的生产流程主要包括：配料混匀、高温熔融、压延成型、核化处理、晶化热处理、退火、切割与表面磨抛等工序。初步测算，其综合生产成本约为190元$\cdot m^{-2}$。根据前期市场调研，目前市售同类微晶玻璃板材价格普遍在400~600元$\cdot m^{-2}$。因此，利用铜尾矿制备微晶玻璃不仅具有显著的环境效益，也具备突出的市场竞争力和经济可行性。

3 结论

1）研究用铜选矿尾矿富含SiO_2和Al_2O_3，并含有适量的CaO与K_2O，其化学组成适宜作为基础组分用于制备$CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$（CAS）体系微晶玻璃。试验证实，利用该铜尾矿能够稳定制备出高附加值的微晶玻璃产品，实现了固废的升级转化。

2）CaF_2作为晶核剂对微晶玻璃的析晶行为与性能起到关键调控作用。当CaF_2掺量为7%时，能有效促进整体析晶，形成细小、均匀的晶体结构，从而获得综合性能最佳的微晶玻璃样品。

3）原料配比与热处理制度显著影响最终产品的品质。当铜尾矿掺量为50%、晶化温度为950 ℃时，制备出的微晶玻璃性能达到最优，其抗压强度为124.56 MPa，抗折强度为55.91 MPa，吸水率低至0.004%，密度为2.79。此外，材料浸出液中未检测到重金属，证明其对有害组分具有良好的固化封存效果，符合环保标准，具备作为优质建筑装饰或功能材料的应用潜力。综上所述，以铜尾矿为原料制备微晶玻璃，是一项兼具资源循环利用、环境保护和经济效益的绿色技术。

参考文献

[1] 赵庆朝，朱阳戈，孙永升，等. 铜尾矿基微晶玻璃非均匀析晶过程形核机制研究[J]. 有色金属(矿山部分)，2023，75(6)：156-162.
ZHAO Q C, ZHU Y G, SUN Y S, et al. Research on the nucleation mechanism of non-uniform crystallization process of copper tailings-based glass-ceramics[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(6): 156-162.

[2] 谭波，张冬冬，宁平，等. 铜尾矿综合利用研究进展[J]. 化工矿物与加工，2021，50(2)：46-51.
TAN B, ZHANG D D, NING P, et al. Research progress on comprehensive utilization of copper tailings[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(2): 46-51.

[3] 刘海营，杨航，钱志博，等. 铜尾矿资源化利用技术进展[J]. 中国矿业，2020，29(增刊2)：117-120.
LIU H Y, YANG H, QIAN Z B, et al. Technical progress in resource utilization of copper tailings[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup. 2): 117-120.

[4] YANG X, LIU X M, XU C B, et al. Hydrometallurgical detoxification and recycling of electric arc furnace dust[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30: 2076-2094.

[5] 罗云龙，王辅，竹含真，等. CaO/MgO对花岗岩尾矿微晶玻璃物相和性能的影响[J]. 硅酸盐通报，2021，40(12)：4102-4108，4127.
LUO Y L, WANG F, ZHU H Z, et al. Effect of CaO/MgO mass ratio on phases and properties of glass-ceramics prepared from granite tailings[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12): 4102-4108, 4127.

[6] 廖力. 利用铜矿尾矿制备微晶玻璃试验研究[J]. 矿产综合利用，2017(6)：82-85.
LIAO L. Experimental study on preparation of glass-ceramics using copper tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6): 82-85.

[7] 叶升，王鹏，刘平安，等. $CaO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$系微晶玻璃热处理过程中变形机理的研究[J]. 中国陶瓷工业，2015，22(2)：11-13.
YE S, WANG P, LIU P A, et al. Deformation mechanism of $CaO\text{-}MgO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ glass-ceramics during heat treatment[J]. China Ceramic Industry, 2015, 22(2): 11-13.

[8] 戴旭，赵生，周宏磊. 花岗岩尾矿制备CAS系微晶玻璃的研究[J]. 新型建筑材料，2023，50(8)：40-43.
DAI X, ZHAO S, ZHOU H L. Preparation of CAS glass-ceramics from granite tailings[J]. New Building Materials, 2023, 50(8): 40-43.

[9] 于永生，郝小非，彭琪，等. 珍珠岩制备单一α-堇青石微晶玻璃及其性能[J]. 硅酸盐通报，2017，36(3)：770-777.
YU Y S, HAO X F, PENG Q, et al. Preparation and

characterization of single α-cordierite glass-ceramics from perlite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3): 770-777.

[10] 王锐, 李洪玮, 赵伟, 等. 基于萤石尾矿和废玻璃烧结制备氟磷灰石微晶玻璃[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(11): 3834-3843.
WANG R, LI H W, ZHAO W, et al. Preparation of fluorapatite based glass-ceramics from fluorite tailings and waste glass by sintering method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(11): 3834-3843.

[11] ZHANG P, ZHU N, LI F, et al. Preparation of glass-ceramics by municipal solid waste incineration fly ash: heavy metals crystallization mechanism[J/OL]. Environmental Research, 2025, 277. https: //doi.org/10.1016/j.envres.2025.120695.

[12] 潘文平, 康浩. $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 系微晶玻璃的制备及性能研究[J]. 陶瓷, 2018(10): 45-53.
PAN W P, KANG H. Preparation and properties of $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ based glass ceramics[J]. Ceramics, 2018(10): 45-53.

[13] 龚星晨. CaF_2 对 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 系萤石尾矿微晶玻璃析晶与烧结的影响[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018.
GONG X C. Effect of CaF_2 on crystallization and sintering of fluorite tailings glass ceramics in $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.