

铜尾矿制备高强度防腐复合板及性能研究

俞 锦, 李 安, 涂 宇, 高 杨, 章 宁, 李炳蓉, 王全勇

(江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 为探索铜尾矿规模化、高值化利用的新路径,开展了将铜尾矿用于制备防腐复合板的研究。采用X射线荧光(XRF)、激光粒度分析以及X射线衍射(XRD)技术,对铜尾矿的化学组分、粒度分布、物相结构等进行分析,探究了铜尾矿添加量对防腐复合板的弯曲强度、压缩强度、密度、吸水率、耐腐蚀性能的影响规律。结果表明,铜尾矿掺入量最高可达30%,此时,板材的力学性能和耐腐蚀性能未出现明显衰减,可满足湿法冶炼车间地面防腐承重需求,证明了铜尾矿用于制备防腐复合板的可行性,为铜尾矿规模化、高值化利用提供了新思路。

关键词: 铜尾矿; 资源化利用; 防腐复合板; 力学性能; 耐腐蚀性能

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.006

中图分类号: TF811; TF804.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0049-08

铜作为现代工业的重要原料,被广泛应用于机械制造、电力工程、建筑工程、国防军工等领域^[1]。近年来,我国铜产业迅猛发展,市场需求日益增大,铜矿开采规模逐年递增,同时也产生了大量的铜尾矿^[2]。据统计,我国每年新产生铜尾矿达3亿吨以上,存量可达几十亿吨,但利用率较低^[3]。其中,大部分铜尾矿堆存于尾矿库,不仅占用大量土地、耗资巨大,而且污染严重,同时存在着溃坝风险^[4]。因此,对铜尾矿进行综合利用,减少尾矿排放,避免或减轻环境污染,消除安全隐患,实现资源开发与环境保护协调发展,意义重大^[5]。

近年来,业界学者对铜尾矿综合利用进行了大量探索,总结出的铜尾矿利用途径主要有^[6]:第一,回收铜尾矿中的有价金属和其他有利用价值的部分;第二,将铜尾矿用于制备建筑材料,为建材行业提供原材料;第三,将铜尾矿进行回填,弥补矿产开采对地质环境的破坏;第四,在堆放铜尾矿的地区进行土地复垦,种植植物,保护环境。然而,目前形成的铜尾矿综合利用技术始终存在消纳量有限、经济效益不明显等问题^[7]。因此,仍然需要探索铜尾矿规模化、高值化消纳利用新技术。

防腐复合板(也叫高分子复合板或树脂板)是近年来在有色金属湿法冶炼车间应用的高性能防腐板材,采用石英砂、石英粉与有机树脂,经过配料混

料、震压密实、加热固化、抛光切割等多道工序制备而成,属于一种功能性的人造石板材^[8]。与花岗岩、耐酸瓷砖、树脂砂浆、呋喃混凝土等常用的防腐材料相比,防腐复合板表现出更好的力学强度和耐腐蚀性能,同时板材颜色丰富、装饰效果好、维护成本低、使用寿命长,综合性能优异^[9]。防腐复合板适用于湿法冶炼车间的地面、楼面、沟槽等部位的防腐防渗,同时具有良好的承载能力,已经在江铜贵溪冶炼厂、大冶有色、铜陵有色等大型冶炼企业应用,效果良好。

铜尾矿主要成分包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 CaO 、 Fe_2O_3 等,矿物组成主要为石英、云母、长石等,其中石英含量通常在50%以上,因此铜尾矿可代替砂石用于制备人造石等建材^[10]。肖俊杰等^[11]将尾矿用于制备有机人造石,以不饱和聚酯树脂为胶凝材料,制备的人造石性能达到《建筑装饰用人造石英石板》(JG/T 463—2014)行业标准。吴琛等^[12]将铜尾矿用于制备无机人造石,以水泥为胶凝材料,制备的无机人造石板材性能满足《建筑装饰用水磨石》(JC/T 507—2012)要求。防腐复合板也属于一种人造石板材,使用的胶凝材料为具有优良耐腐蚀性能的乙烯基树脂。以铜尾矿替代石英砂、石英粉,用于制备防腐复合板,为铜尾矿的规模化、高值化利用提供了新思路,同时可降低防腐复合板的原料成本。

收稿日期: 2025-08-29; 修订日期: 2026-01-13

基金项目: 赣鄱俊才支持计划·主要学科学术和技术带头人培养项目(20243BCE51109)

作者简介: 俞锦(1996—),男,江西南昌人,硕士,工程师,研究方向: 固废资源综合利用, E-mail: 157111852@qq.com; 通信作者: 王全勇,工程师, E-mail: qywang2021@qq.com

为验证铜尾矿用于制备防腐复合板的可行性,本研究以铜尾矿作为防腐复合板的制备原料,探究铜尾矿添加量对板材弯曲强度、压缩强度、密度、吸水率、耐腐蚀等性能的影响规律。

1 实 验

1.1 实验原料与仪器

实验主要原料包括:铜尾矿,取自江西九江某铜矿山选矿尾矿;石英砂、石英粉,购自巩义市金石粉体材料有限公司, SiO₂含量>99%; 乙烯基树脂,购自上海富晨化工有限公司,牌号为FUCHEM 854; 固化剂,购自广东美亨新材料科技有限公司,牌号为V 688。

实验仪器包括:行星搅拌机, ZJR-10L型,无锡宝沃雷克科技有限公司生产;真空振动压机, 400 mm×400 mm型,莱州市腾源化工机械厂生产;手动抛光机, 400 mm×400 mm型,莱州市腾源化工机械厂生产;全自动切割机, T8型,永康市西德勒工具厂生产;程序控温烘箱, DKN412C型,日本Yamato公司生产。

1.2 实验过程

防腐复合板的制备工艺流程图如图1所示。首先,按照配方称量固料和液料,分别预混。接着,将预混好的液料转移至行星搅拌机中,缓慢加入固料,以50 r/min转速搅拌5 min,确保物料混合均匀。然后将混合好的物料铺置于模具中,再转移至压机中,抽真空,以40 Hz的振动频率压制5 min。成型后,将板材坯体脱模,置于80 ℃烘箱中固化24 h。固化后的板材经抛光、切割处理后,制备成标准试

样,用于后续的特征及性能测试。铜尾矿添加量为30%时,板材的实物图片如图2所示,板材经过抛光、切边处理,尺寸为300 mm×400 mm×15 mm。

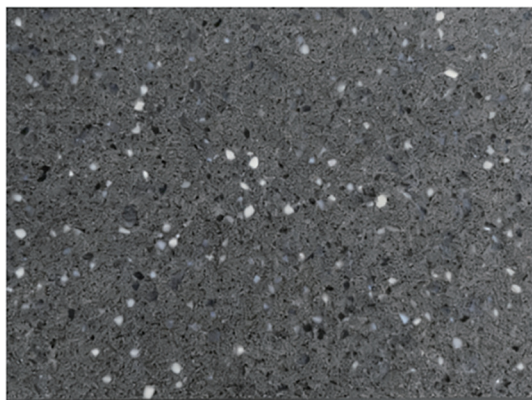


图2 铜尾矿添加量为30%时的板材实物图片
Fig. 2 Actual photograph of a plate with 30% copper tailings addition

1.3 表征测试

尾矿理化性能表征。利用X射线荧光光谱(XRF)和X射线衍射光谱(XRD)对铜尾矿进行化学成分和物相组成分析;利用马尔文粒度分析仪分析铜尾矿的粒度分布。

板材力学性能测试。使用万能试验机测定板材的弯曲强度和压缩强度,测试方法参照GB/T 3810.4—2016《陶瓷砖试验方法 第4部分:断裂模数和破坏强度的测定》和GB/T 9966.1—2020《天然石材试验方法 第1部分:干燥、水饱和、冻融循环后压缩强度试验》。

板材密度及吸水率测试。采用水浸泡饱和法测试板材的密度和吸水率,具体测试方法参照GB/T 35160.1—2017《合成石材试验方法 第1部分:密度和吸水率的测定》。

板材耐腐蚀性能测试。采用质量分数为37%盐酸溶液、40%硝酸溶液、40%硫酸溶液,在室温下,对板材进行为期30 d的浸泡实验,通过对比浸泡前后板材的形貌变化、质量变化及弯曲强度变化,系统评价板材的耐腐蚀性能。

1.4 实验方案

为探究铜尾矿添加量对板材力学性能和耐酸腐蚀性能的影响,本研究在保持板材树脂含量不变的条件下,改变铜尾矿添加量以制备不同板材试样。

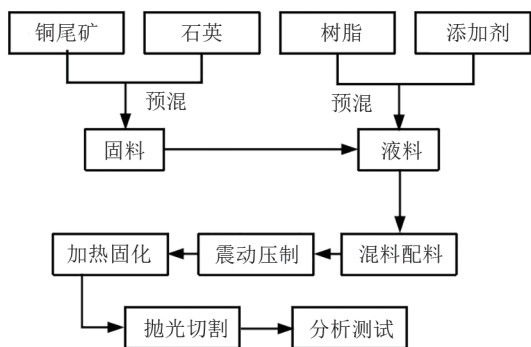


图1 防腐复合板制备工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram for preparation of anti-corrosion composite plates

然后,对所制备板材的弯曲强度、压缩强度、密度、吸水率及酸浸稳定性进行对比测试。具体配方见表1,其中石英砂包括粒径2.36~3.35 mm(4~6目)的粗砂、0.85~2.0 mm(10~20目)的中砂、0.212~0.425 mm(47~70目)的细砂,以及75~150 μm(100~200目)的超细砂。石英粉粒径约为45 μm(325目),添加的铜尾矿主要代替粒径75~150 μm(100~200目)的石英砂和石英粉。

表1 板材配方表

Table 1 Formula table of plates (%)					
组分	铜尾矿	石英砂	石英粉	添加剂	树脂
配方1	0.0	72.8	20.0	0.2	7.0
配方2	10.0	65.4	17.4	0.2	7.0
配方3	20.0	58.1	14.7	0.2	7.0
配方4	30.0	50.8	12.0	0.2	7.0
配方5	35.0	47.1	10.7	0.2	7.0
配方6	40.0	43.5	9.3	0.2	7.0

2 结果与讨论

2.1 铜尾矿理化性能分析

将铜尾矿烘干后用粉碎机打散,进行理化性质分析。该铜尾矿的化学组成见表2,主要成分为SiO₂和Al₂O₃,其中,SiO₂质量分数为63.2%,其余成分为CaO、K₂O、Fe₂O₃、MgO等。

表2 铜尾矿的主要化学组分

Table 2 Main chemical components of copper tailings (% , mass fraction)							
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
含量	63.20	12.70	7.56	6.21	6.10	2.00	1.13

铜尾矿的粒径分布如图3所示,其颗粒的粒径分布于0.54~600 μm之间,D₁₀为9.979 μm,D₅₀为125.4 μm,D₉₀为278.9 μm。

图4为该铜尾矿XRD图谱,显示该铜尾矿的主要矿物成分为石英、长石,并含有少量的方解石、高岭土、黄铁矿等。石英、长石相具有较高的硬度,对于板材而言是有益成分^[13];而少量方解石、黄铁矿相的存在,可能会稍降低所制板材的耐酸性能^[14]。综合上述结果来看,该铜尾矿有望代替细石英砂和石英粉,用以制备防腐复合板。

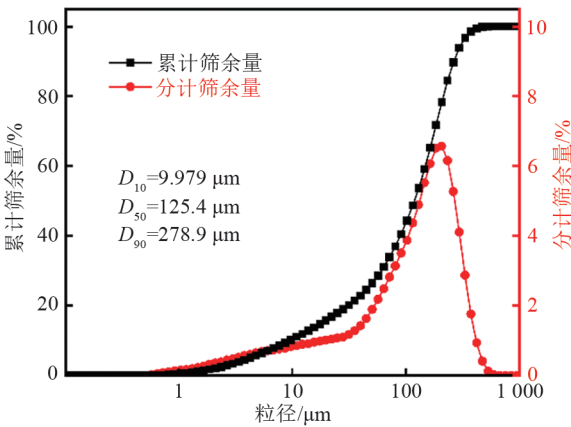


图3 铜尾矿的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of copper tailing

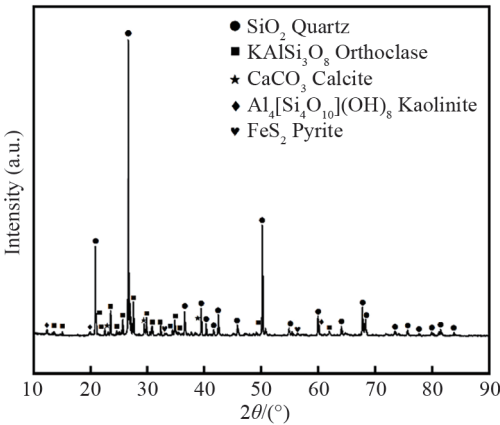


图4 铜尾矿的XRD图

Fig. 4 XRD pattern of copper tailings

2.2 铜尾矿添加量对板材弯曲强度的影响

弯曲强度是指材料在弯曲负荷作用下破裂或达到规定弯矩时能承受的最大应力^[15]。如图5所

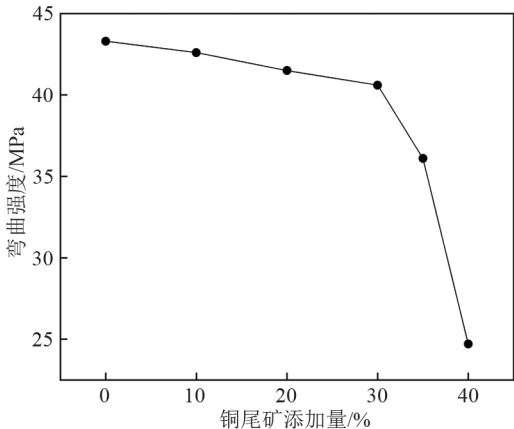


图5 铜尾矿添加量对板材弯曲强度的影响

Fig. 5 Effects of copper tailings addition amount on flexural strength of plates

示,随着铜尾矿添加量的增加,板材的弯曲强度呈现下降趋势。当铜尾矿添加量为0%、10%、20%、30%时,板材的弯曲强度分别为43.3、42.6、41.5、40.6 MPa,降幅较小;随着铜尾矿添加量增至35%,弯曲强度降至36.1 MPa,降幅逐渐增大;而当铜尾矿添加量达到40%时,板材的弯曲强度骤降至24.7 MPa,下降幅度高达42.96%。这是由于板材的树脂含量恒定,在铜尾矿添加量为40%时,粉料占比过高,导致原料流动性变差,降低了所压制板材的密实程度,影响其弯曲强度^[16]。因此,铜尾矿添加量不宜过高。

2.3 铜尾矿添加量对板材压缩强度的影响

压缩强度反映材料抵抗压缩荷载而不失效的能力^[17]。由图6可知,与弯曲强度的变化趋势类似,随着铜尾矿添加量的增加,板材的压缩强度逐渐下降。当铜尾矿添加量为0%、10%、20%、30%时,板材的压缩强度分别为220.6、219.5、219.2、217.5 MPa,几乎未出现明显变化;当添加量为35%时,板材压缩强度降低至180.9 MPa;当添加量达到40%时,板材压缩强度锐减至54.4 MPa,降幅高达75.34%。

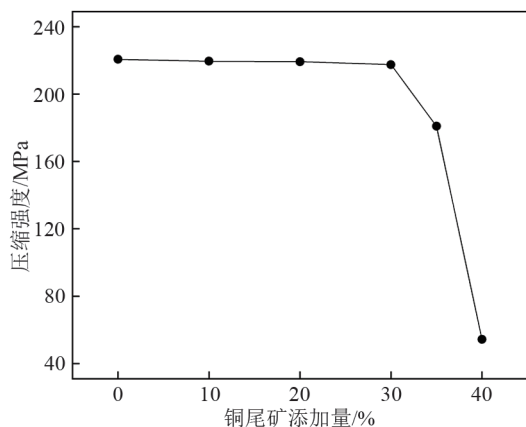


图6 铜尾矿添加量对板材压缩强度的影响

Fig. 6 Effects of addition amount of copper tailings on compressive strength of plates

2.4 铜尾矿添加量对板材密度的影响

密度能在一定程度上反映材料的密实程度^[18]。图7的测试结果表明,当铜尾矿添加量从0%逐步增至30%时,板材的密度从2.410 g/cm³逐渐增至2.460 g/cm³。这是由于铜尾矿中所含的非石英成分,大部分密度均高于石英,所以当铜尾矿添加量

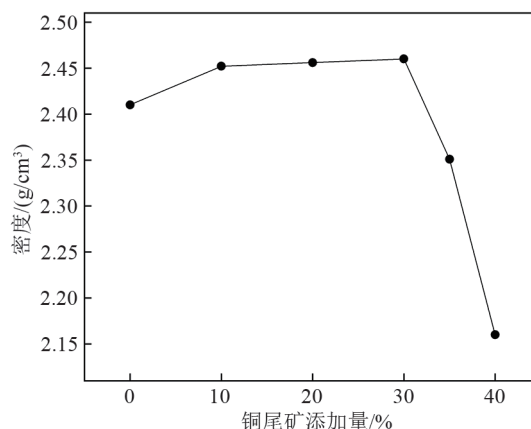


图7 铜尾矿添加量对板材密度的影响

Fig. 7 Effects of addition amount of copper tailings on density of plates

增加时,板材的密度会相应提高。随着铜尾矿添加量达到35%,密度开始小幅下降,降至2.351 g/cm³;而当铜尾矿添加量达到40%时,板材的密度突降至2.16 g/cm³,证明该板材的密实程度大幅下降。因此,从密度测试的结果来看,铜尾矿添加量不应超过30%。

2.5 铜尾矿添加量对板材吸水率的影响

吸水率表示板材在标准大气压下的吸水能力^[19],吸水率越大,板材越容易吸入化学介质而被腐蚀。如图8所示,随着铜尾矿添加量的增加,板材的吸水率先缓慢升高;当铜尾矿添加量达到40%时,板材的吸水率激增约18倍,达到0.52%。该实验结果证实,铜尾矿添加量不宜大于30%,否则将导致板材的吸水率大幅提升,影响板材的耐腐蚀性能。

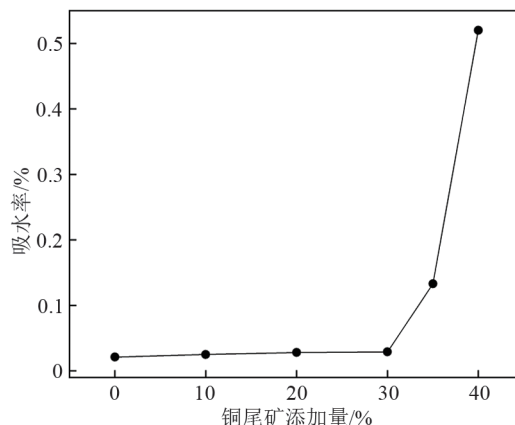


图8 铜尾矿添加量对板材吸水率的影响

Fig. 8 Effects of copper tailings addition amount on water absorption of plates

2.6 铜尾矿添加量对板材耐腐蚀性能的影响

为了探究铜尾矿添加量对防腐复合板耐腐蚀性能的影响,本研究采用酸浸泡法进行实验,测试板材在不同化学介质中浸泡后的质量保持率和弯曲强度保持率,结果如图9和图10所示。

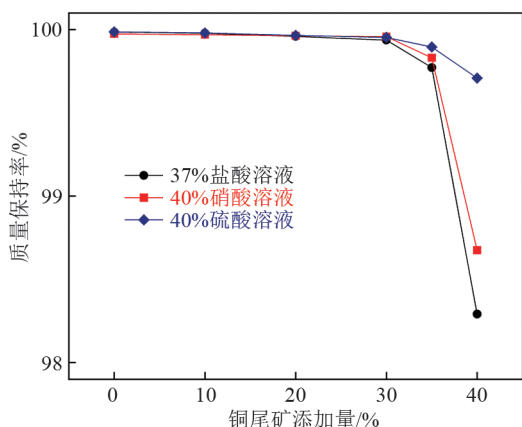


图9 铜尾矿添加量对板材质量保持率的影响

Fig. 9 Effects of addition amount of copper tailings on weight loss rate of plates

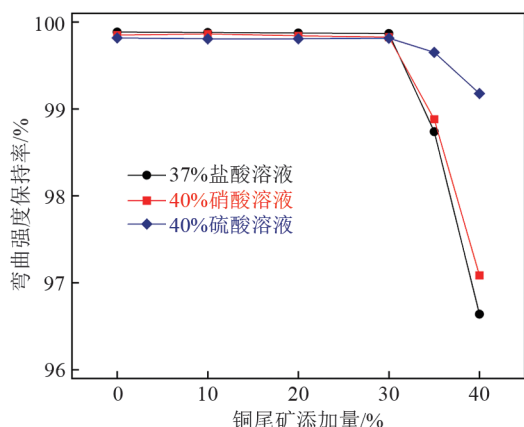


图10 铜尾矿添加量对板材弯曲强度保持率的影响

Fig. 10 Effects of addition amount of copper tailings on flexural strength loss rate of plates

图9和图10显示,板材在三种酸中浸泡后,质量保持率和弯曲强度保持率的变化规律类似。选取浸泡于37%盐酸溶液中的数据为例,当铜尾矿添加量从0%增至30%时,板材的质量保持率从99.99%降至99.94%,弯曲强度保持率从99.88%变为99.87%,变化较小。证明铜尾矿添加量不大于30%时,对板材的酸浸稳定性几乎没有影响。但当铜尾矿添加量增至35%时,质量保持率微降至99.77%,弯曲强度保持率下滑更为明显,为98.74%;当铜尾

矿添加量达40%时,质量保持率仅为98.29%,弯曲强度保持率仅为96.64%,两项指标皆明显下降。结合前文所述,这可能是由于此时板材的密实度大幅降低,孔洞增多,酸液易腐蚀板材,造成质量损失;同时酸液浸蚀破坏了板材内部结构,导致力学性能下降。因此,为了保证所制板材的耐酸稳定性符合要求,铜尾矿添加量应不超过30%。

为了进一步分析添加尾矿所制备防腐复合板的耐腐蚀性能,对浸泡前后防腐复合板的表观状态(实物照片)和微观状态(电镜照片)进行对比分析。由于板材在37%盐酸溶液中浸泡前后的质量变化最大,故选取铜尾矿添加量为30%和40%的板材,分别以其浸酸前后的实物照片和SEM图进行对比,如图11、图12所示。

从图11(a, b)可以看出,铜尾矿含量为30%的板材在浸酸前后的外观几乎没有变化,对比图11(c, d)可知,该板材浸酸前后的SEM图也未出现明显变化,证实该板材对37%盐酸溶液具有良好的耐腐蚀性能。

图12(a, b)显示,含铜尾矿40%的板材由于密实度较差,在酸浸前表面可见细孔,酸浸后孔洞增多,板材整体泛黄绿色,这可能是所添加铜尾矿中,部分黄铁矿相组分被盐酸腐蚀,生成黄绿色的铁盐所致^[20]。相对应地,通过分析图12(c, d)可知,铜尾矿添加量为40%的板材在酸浸前的SEM图中已出现部分孔洞,而在酸浸后的SEM图中,孔洞的数量变多,孔径变大,说明该板材已被37%盐酸溶液腐蚀。因此,为了保证板材的防腐性能,铜尾矿添加量应控制在30%及以下。

3 结 论

为探索铜尾矿规模化、高值化利用新途径,本研究在防腐复合板制备原料中添加了部分铜尾矿,以探究铜尾矿添加量对所制板材各项性能的影响规律,主要结论如下:

1) 由尾矿理化数据分析可知,该铜尾矿SiO₂含量达到63.2%,主要晶相为石英,粒径分布于0.54~600 μm之间。因此,该铜尾矿有望代替细石英砂和石英粉,用于制备防腐复合板。

2) 随着尾矿添加量的增加,板材弯曲强度和压

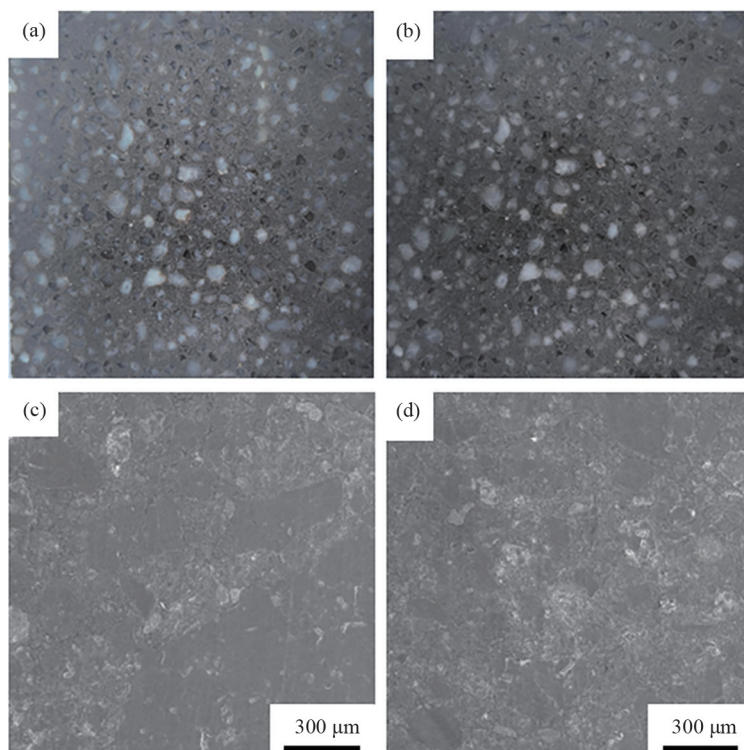


图 11 铜尾矿添加量为30%的板材(a)酸浸前和(b)酸浸后的实物照片,(c)酸浸前和(d)酸浸后的SEM图

Fig. 11 Photographs and SEM images of a plate containing 30% copper tailings (a, c) before and (b, d) after acid leaching

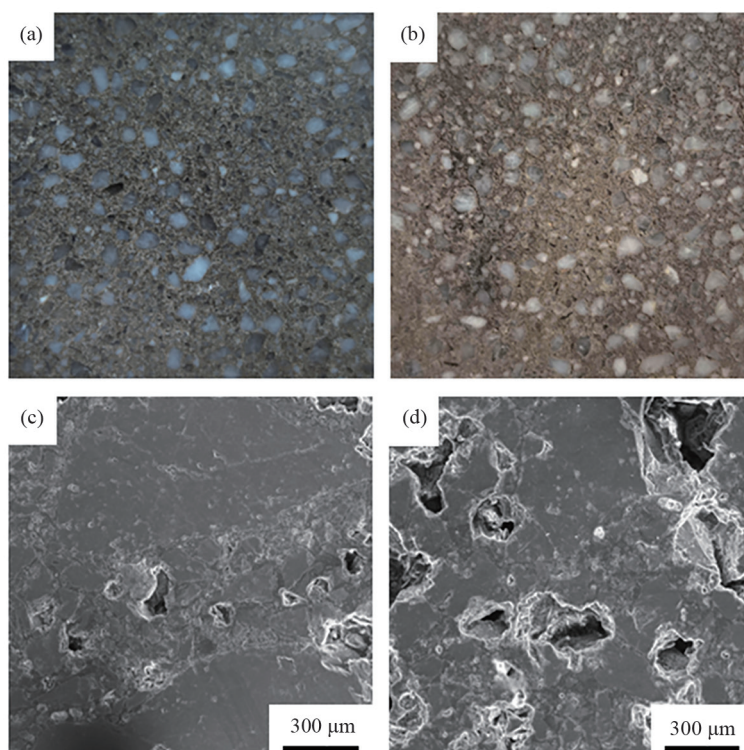


图 12 铜尾矿添加量为40%的板材(a)酸浸前和(b)酸浸后的照片,(c)酸浸前和(d)酸浸后的SEM图

Fig. 12 Photographs and SEM images of a plate containing 40% copper tailings (a, c) before and (b, d) after acid leaching

缩强度随之降低:当尾矿添加量从10%增加到30%时,下降幅度较小;当添加量超过30%时,下降幅

度显著增加。

3) 随着尾矿添加量的增加,板材密度先增加

后减小,在添加量为30%时达到最大值;而吸水率随着尾矿添加量的增加而增大,当尾矿添加量超过30%时,增幅显著增加。

4)酸浸泡前后的弯曲强度和质量变化数据表明,随着尾矿添加量的增加,板材耐腐蚀性能逐渐减弱,当尾矿添加量超过30%时,性能下降更加明显。

5)铜尾矿最佳添加量为30%,据此所制板材的弯曲强度达到40.6 MPa、压缩强度达217.5 MPa、密度为2.460 g/cm³、吸水率为0.029%,酸浸后的质量保持率和弯曲强度保持率分别在99.9%以上和99.8%以上。与未添加铜尾矿的常规防腐板材相比可知,此防腐复合板保持了良好的力学强度、密实度以及耐酸腐蚀性能,满足湿法冶炼车间地面防腐承重的需求。

综上所述,该铜尾矿可替代部分石英质原料,用以制备防腐复合板,为铜尾矿的规模化、高值化利用提供了新思路。

参考文献:

- [1] 张宏泉,李琦缘,文进,等.铜尾矿资源的利用现状及展望[J].现代矿业,2017,33(1): 127-131.
- [2] Lam E J, Gálvez M E, Cánovas M, et al. Evaluation of metal mobility from copper mine tailings in northern Chile [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(12): 11901-11915.
- [3] 耿碧瑶,贺茂坤,张敬,等.基于露天坑尾砂胶结回填治理的充填料浆配比实验研究[J].铜业工程,2024(4): 97-104.
- [4] 张一丁,蔡晓光,黄鑫,等.某尾矿坝动力抗震分析[J].铜业工程,2024(5): 154-160.
- [5] 郭万进,吴明海,王阳,等.我国铜矿尾矿资源化利用技术现状及进展[J].矿产综合利用,2023,44(5): 127-134.
- [6] 刘呈祥.有色金属矿山尾矿综合利用进展[J].世界有色金属,2022(1): 152-154.
- [7] 李炳蓉,于虎,林清泉,等.循环经济模式下铜尾矿资源综合利用研究进展[J].铜业工程,2025(3): 93-105.
- [8] 程彤.高分子复合板材的应用实践[J].江西化工,2020,36(6): 31-33.
- [9] 冯杰,黄素质,梅士银.论高分子复合板材在大冶冶炼厂的应用[J].中国有色金属,2018(增刊2): 38-41.
- [10] Xu R S, Tong H, Kong F H, et al. Potential of copper tailings as supplementary siliceous materials in the preparation of autoclaved aerated concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111250.
- [11] 肖俊杰.钨尾矿/高分子耦合固化制备人造石与性能强化[D].赣州:江西理工大学,2022.
- [12] 吴琛,赵宝军,曾正祥,等.利用铜陵尾矿料制备无人造石装饰材料的研究[J].中国建材科技,2021,30(1): 44-47.
- [13] 施麟芸,匡敬忠,刘松柏,等.铜尾矿建材化应用研究现状及矿物组成影响作用规律[J].硅酸盐通报,2022,41(10): 3511-3524.
- [14] 张德兴,于传兵.选铜尾矿综合回收硫资源研究及实践[J].矿冶,2009,18(3): 24-26.
- [15] 金伟良,赵羽习.锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J].工业建筑,2001,31(5): 9-11.
- [16] 柯书俊,黄洁宁,魏琦.高强人造石的制备与性能研究[J].江西建材,2024(5): 26-29.
- [17] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(12): 1558-1561.
- [18] 王正,鲍甫成,郭文静.木塑复合工艺因子对复合材料性能的影响[J].林业科学,2003,39(5): 87-94.
- [19] 范晓玲,熊春杨,何鑫,等.高性能水泥基人造石板材的性能优化研究[J].石材,2022(12): 9-11.
- [20] Bryson L J, Grundwell F K. The anodic dissolution of pyrite (FeS₂) in hydrochloric acid solutions [J]. Hydrometallurgy, 2014, 143: 42-53.

Preparation and Performance Research of High-Strength Anti-Corrosion Composite Plates Using Copper Tailings

Yu Jin, Li An, Tu Yu, Gao Yang, Zhang Ning, Li Bingrong, Wang Quanyong

(Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to explore new pathways for large-scale and value-added utilization of copper tailings, this study utilized copper tailings to prepare anti-corrosion composite plates. Chemical composition, particle size and phase structure of copper tailings were analyzed by X-ray fluorescence (XRF), laser particle size analysis and X-ray diffraction (XRD). Influence of copper tailings addition on bending strength, compressive strength, density, water absorption, and corrosion resistance of anti-corrosion composite plates was investigated. Results indicated that the maximum incorporation level of copper tailings was 30%. At this point, mechanical properties or corrosion resistance of anti-corrosion composite plates did not show a significant decrease, meeting anti-corrosion and load-bearing requirements for floors in hydrometallurgical workshops. This demonstrated the feasibility of using copper tailings to prepare anti-corrosion composite plates, providing a new idea for large-scale and value-added consumption and utilization of copper tailings.

Key words: copper tailing; comprehensive utilization of resource; anti-corrosion composite plate; mechanical property; corrosion resistance

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.006

引文格式: 俞锦, 李安, 涂宇, 高杨, 章宁, 李炳蓉, 王全勇. 铜尾矿制备高强度防腐复合板及性能研究[J]. 铜业工程, 2026(4): 49-56.

Yu Jin, Li An, Tu Yu, Gao Yang, Zhang Ning, Li Bingrong, Wang Quanyong. Preparation and performance research of high-strength anti-corrosion composite plates using copper tailings[J]. Copper Engineering, 2026(4): 49-56.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc