

铜冶炼渣综合利用技术发展现状及展望

宋厚彬¹, 林荣琪^{1*}, 杨浩¹, 李勇², 丘裕春¹, 张艳平¹, 徐海波¹

(1. 黑龙江紫金铜业有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161041;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要:铜冶炼渣的产生和堆存具有严重的生态环境安全隐患,如何充分利用铜冶炼渣,实现二次资源的综合利用,降低环境安全风险,已成为目前的研究热点。**目的:**通过整合和总结铜冶炼渣综合利用领域内已有的研究成果和知识,探讨铜冶炼渣在道路基层材料中的应用前景并提出相关建议。**方法:**对相关文献进行系统性的回顾和分析。**结论:**利用铜冶炼渣制备道路基层材料不仅可以规模化消纳铜冶炼渣,降低铜冶炼渣排放、堆存带来的潜在环境污染问题,还可以有效解决传统道路基层材料原材料来源受限的问题,对地区基础设施建设和生态环境可持续发展具有重要意义。

关键词:固体废弃物;铜冶炼渣;固废综合利用;路基材料;环境安全

中图分类号: TU528, TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2024)04-0007-05

Comprehensive utilization of copper smelting tailings technology development status and prospects

SONG Houbin¹, LIN Rongqi^{1*}, YANG Hao¹, LI Yong², QIU Yuchun¹, ZHANG Yanping¹, XU Haibo¹

(1. Heilongjiang Zijin Copper Industry Co., Ltd., Qiqihaer Heilongjiang 161041, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: The generation and storage of copper smelting slag poses serious ecological and environmental safety risks. How to make full use of copper smelting slag, achieve comprehensive utilization of secondary resources, and reduce environmental safety risks has become a current research hotspot. **Purpose:** By integrating and summarizing the existing research results and knowledge in the field of comprehensive utilization of copper smelting slag, this study explores the application prospects of copper smelting slag in road base materials and puts forward relevant suggestions. **Method:** Conduct a systematic review and analysis of relevant literature. **Conclusion:** The use of copper smelting slag to prepare road base materials can not only utilize copper smelting slag on a large scale, reduce potential environmental pollution problems caused by the discharge and storage of copper smelting slag, but also effectively solve the problem of limited sources of raw materials for traditional road base materials, which is very important for regional infrastructure construction and sustainable development of the ecological environment are of great significance.

Key words: solid waste; copper smelting tailings; comprehensive utilization of solid waste; road base materials; environmental safety

随着我国经济和工业化进程的快速发展,铜等金属材料产生量持续增加^[1]。金属铜是一种与生活

密切相关的有色金属,被广泛应用于家用电气、机械加工、航空航天、建筑工程等领域,铜的产量仅次于铝位居第二位^[2]。然而,随着铜的产生量和需求量的日益增加,铜冶炼过程中产生的冶炼废渣也随之增加^[3]。铜冶炼渣是炼铜过程中产生的一种冶金废渣,按照处理方法不同,铜冶炼渣可以分为两大类:火法铜冶炼渣和湿法铜冶炼渣。因火法炼铜具有原

收稿日期:2024-01-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904603)

作者简介:宋厚彬(1990—),男,工程师,建筑工程专业,主要从事尾渣建材化利用研究,E-mail:451948993@qq.com。

通信作者:林荣琪(1985—),男,机械工程专业,工程师,E-mail:lin-rongqi@126.com。

料适应性强、能源成本低、生产效率高等技术优势,当前全球80%以上的铜均采用该工艺生产,通常产出1 t冰铜会同时产生2.2 t的铜冶炼渣^[4]。目前,我国每年精炼铜产量约为1 000万t,而铜冶炼渣年产出量超过2 000万t^[5]。

铜冶炼渣的主要成分为Fe、Si、Cu和Zn等多种重金属元素,在长期露天堆存过程中受风化等物理侵蚀存在重金属溢出风险^[6],带来巨大的环境污染隐患,开展铜冶炼渣的无害化、资源化、全量化综合利用迫在眉睫^[7]。随着我国对铜冶炼渣安全消纳处置的重视程度不断提高,铜冶炼渣的综合利用技术在过去几十年取得一定的进展,但目前整体综合利用率仍然较低,尚无真正能够将铜冶炼渣“吃干榨净”的成套综合利用技术。本文在分析铜冶炼渣特点的基础上,论述当前铜冶炼渣资源化利用的主要

途径,并对铜冶炼渣资源化利用发展方向进行展望,为铜冶炼渣的全量化利用提供参考。

1 铜冶炼渣综合利用技术难点

1.1 铜冶炼渣的理化特性

目前国内铜冶炼工艺主要分为湿法冶炼和火法冶炼两种,由此产生的尾渣主要分为水淬渣和浮选渣,水淬渣颗粒接近于石英砂可用于建筑地材,浮选渣颗粒极细模度系数约300 μm ,因本身较细再利用方面具有局限性^[8]。由于原矿性质与冶炼工艺的差异,不同地区不同冶炼厂所生产的铜冶炼渣性质各异,火法炼铜尾渣的主要化学成分为 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 CuO 等,同时含有少量的 SO_3 、 MgO 、 TiO_2 等组分,是一种典型的硅酸盐渣^[9]。典型铜冶炼渣的主要化学成分见表1。

表1 铜冶炼渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical components of copper smelting slag

成分	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	MoO_3	/%
含量	1.368	0.888	7.22	27.350	0.101	0.215	0.484	
成分	PbO	Fe_2O_3	CuO	ZnO	CaO	TiO_2	K_2O	
含量	0.139	53.333	0.319	1.194	5.177	0.414	1.489	

由表1可知,铜冶炼尾渣的主要化学成分为 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等,主要化学成分含量之和>95%,以及含有少量的 SO_3 、 MgO 、 TiO_2 等组分。由图1可知,铜冶炼尾渣的主要矿物为橄榄石、辉石和磁铁矿,含铁矿物铁橄榄石相的存在,不利于有价金属在铜和伴生铜中的转化利用,这也导致了铜冶炼尾渣综合利用困难^[10]。

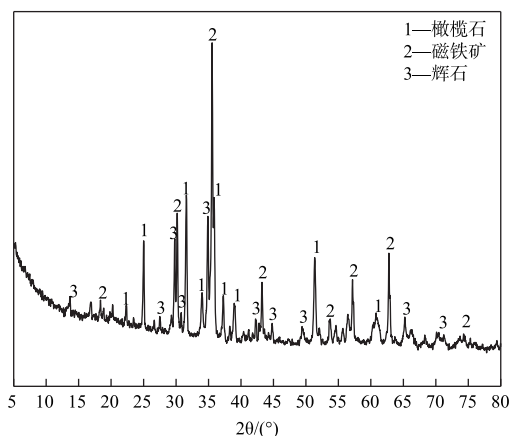


图1 铜冶炼渣的XRD分析图谱

Fig. 1 XRD analysis spectrum of copper smelting slag

1.2 铜冶炼渣处置存在的问题

1.2.1 环境问题

因铜冶炼渣经过粉磨、浓密过滤工艺之后粒度

较小,以粉末状堆存装载和运输过程中会产生扬尘污染环境,自然堆放遇5级以上大风会产生大量扬尘,车辆运输行程路线随着车轮碾压也会带起大量粉尘污染环境^[11];铜冶炼渣含有铜、铅等重金属离子,经雨水冲洗后可能将重金属离子带入到河流或者渗透入地下水中,进而造成水资源污染,破坏生态系统的稳定^[12];尾渣堆存会污染场区土壤,铜冶炼渣渗滤液中所含有的重金属物质会破坏土壤结构、影响土壤质量,同时,重金属对于土壤的影响表现出长期性和不可降解性,严重影响周边植被生长,有害重金属会在植被中积累,通过食物链进行富集,对人类身体健康造成影响^[13]。

1.2.2 堆存经济问题

因铜冶炼渣属于一般工业固体废物,按现行国家标准应采用三防措施(防扬撒、防流失、防渗漏),所需场地较大,工程投资较多,配套设施复杂、投资巨大,后期维护成本较多,需时刻维护覆盖、扬尘治理、渗滤液收集处理等,铜冶炼渣堆存土地紧缺,行政报批繁杂,运输成本高,社会因素较多不易处理^[14]。

2 铜冶炼渣综合利用技术现状

2.1 铜冶炼渣中有价元素回收

铜冶炼渣中有含有部分铜、铁、锌等有价元素,

通常采用熔炼法、湿法浸出以及尾渣再选等方式进行回收利用^[15]。熔炼法主要包括还原硫化法、氯化熔炼法、鼓风熔炼法。湿法浸出主要包括酸浸出法、碱浸出法、氯化浸出法以及生物浸出法。尾渣再选通常是采用磁选与浮选相结合的方式对铜、铁元素进行回收,进而产生经济价值^[16]。例如,采用磁选或者其他工艺将尾渣中的铁元素提取,将铜冶炼渣内部含有的磁铁矿粉介质提取出用于洗煤工艺,清除煤炭中所含有的杂质,提高煤炭的品质同时减少尾渣的处理量^[17]。袁风香^[18]采用预选、抛尾、磨矿—单一弱磁选流程,获得了含铁品位 56% 以上的铁精矿,综合回收率达到 64%;邹丽萍等^[19]采用一粗一精一扫、中矿顺序返回流程浮选,浮选尾矿二次弱磁选的工艺,最终获得铁品位大于 64%、铜品位大于 24% 的铁精矿和铜精矿,回收率达到了 85.91% 和 62.33%。但是,对铜冶炼渣中有价组分进行回收后仍会产生大量二次尾渣,需进一步研究,采用其他方案对二次尾渣进行消纳利用。

2.2 铜冶炼渣制备砖石材料

铜冶炼渣可以掺和少量水泥,通过压制成型制备出步道砖、路缘石、标砖、仿大理石板等,用于市政工程和建筑工程^[20]。现阶段国内个别省份已完善了免烧砖的设备工艺,其主要制备工艺流程为:储料仓(水泥、矿粉、石英砂)—称重设备—搅拌机—储料斗—输送带—布料机—静压砖机—码放堆存^[21]。尾渣制砖可以节约大量堆积铜冶炼渣所占用的土地和资金,消除铜冶炼渣对环境的影响,同时又可以变废为宝,充分利用铜冶炼渣产生经济效益。

2.3 铜冶炼渣制备水泥、混凝土掺合料

铜冶炼渣中含有大量的氧化铁,可以充当水泥铁质原料用于水泥生产,大多数铜冶炼渣对应的活性铁含量、硫化物含量、氯化钙含量、相对密度、粒度组成、粉尘含量均满足要求^[22]。例如,CHEN 等^[23]将铜冶炼渣掺入硅酸盐水泥中,可以有效提高材料抗压强度;FELIPE 等^[24]使用铜冶炼渣替代水泥作为胶凝材料,铜与硅酸钙水化产物有一定的空间相关性,可以促进水化产物的形成,进一步减少铜从碱性胶凝基质中的浸出,将有效阻碍铜冶炼渣中有毒元素迁移;MITHUN 等^[25]用铜冶炼渣替代细砂作为细骨料,与传统混凝土相比,具有较低的总孔隙率、较小的吸水性和降低氯离子渗透,同时抗拉和抗压强度均有所提高,可有效减少河砂的消耗量。水泥、混凝土等原料为建筑、市政、水利等行业的主要构成材料,随着政府性老城区改造、公共实施建设等

工程的拉动,水泥市场将会持续运营,铜冶炼渣用作水泥和混凝土掺合料的市场也逐渐扩大^[26]。

2.4 铜冶炼渣用于矿坑回填

二十世纪七八十年代,社会发展城市建设多采用黏土砖,导致城市周边烧结砖矿坑特别普遍,土资源被利用后无法恢复^[27]。靠近城市较近冶炼厂产生的铜冶炼渣经无害化处理后通过采取相关的防渗保护措施,进行“矿坑回填治理”,取土坑采用尾渣堆存填平,上顶面地表覆土恢复耕种,解决了铜冶炼渣堆存的问题,同时也创造了大量农田,增加了耕地面积,利国惠民^[28]。

2.5 铜冶炼渣制备吸附材料

由于铜冶炼渣中含有较高比例的铁元素,通过添加还原剂,可以通过氧化还原反应去除污染废水中的重金属,也可以用于制备白炭黑等材料用于污水处理。张伟伟等^[29]通过化学改性,制备了铜冶炼渣系磷酸盐复合吸附材料,可以有效去除污水中的重金属 Pb、Cr、Cd、Cu 和 Ni 离子,对 Pb、Cd、Ni 的吸附主要由铁基磷酸盐凝胶共沉降和硅氧四面体形成的网络结构固定协同作用,然而对 Cr 的吸附以硅氧四面体形成非桥接氧结构固定为主,对 Cu 的吸附则主要以铁基磷酸盐凝胶共沉降为主;靖青秀等^[30]利用铜冶炼渣制备多孔陶粒,为曝气生物滤池提供滤料以处理含氨氮等的废水,在配比质量比为铜渣:碳酸氢钠:造孔剂=10:1:1、煅烧温度为 1 050℃、保温时间为 30 min 的条件下,所制得的陶粒性能较优,可去除废水中 80% 的 NH_4^+-N 。

3 铜冶炼渣综合利用技术新进展

东北三省的道路运输网尚未完善,高速路快速路的建设与南方城市相比相差甚远,因地域经济原因政府性投资建设较为缓慢^[31]。黑龙江紫金铜业有限公司与矿冶科技集团有限公司合作,深度研究铜冶炼渣在市政路、高速公路道路基层上的应用,目前已取得重大突破进展。铜冶炼渣模数系数较低,经长达六个月的实验室研究,采用碎砾石配比才有少量水泥拌合形成水泥稳定基层;采用原状塑性土与铜冶炼渣摊铺至道路路基层中充当持力层,经实际建设实验,道路样段各项工序按设计及规范文件标准施工,经数据收集,各项指标均优于设计标准规范。因铜冶炼渣孔隙率小、保水性好,铺设完成后道路路基层体现出的压实度、密实度、弯沉值均较为优异。每千米 12 米宽道路将消耗 1 万 t 铜冶炼渣,相比传统天然砂石料每千米施工成本将节省约 40%

投资。铜冶炼渣应用于路基材料现场如图2所示。



图2 铜冶炼渣应用于路基材料现场照片

Fig.2 Field photos of copper smelting slag applied to roadbed materials

随着东北老工业基地的振兴,中俄边贸经济的进一步合作,东北三省将迎来前所未有的发展,建筑行业道路工程将大量推进投资建设。铜冶炼渣用于道路基层材料将是进一步研究推广的主要方向,既解决了生产企业的副产品处置问题,又可为道路工程建设提供多项选择。

4 结论与展望

近些年来,铜冶炼渣的综合利用技术不断积累,但实际应用研究进展相对缓慢。目前铜冶炼渣利用相对单一,地域性限制较多,资源利用率和产品附加值不高。针对铜冶炼渣有效成分的再筛选和回收,要结合当地区域性矿物特性,开发合理工艺,提高铜冶炼渣资源回收效率;材料化利用方面,应进一步探究加工半成品或成品,结合国家政策有的放矢地促进尾矿资源利用形成产业链,推进铜冶炼渣加工产品销售发展。开发铜冶炼渣原状形态参加其他配料(如粉煤灰、素土等普遍性配料)的综合利用技术,探究有效配比直接用于道路工程或者筑坝等大型土石方工程。铜冶炼渣利用必须完成从废渣到材料的深度转变,从地域性特征考虑,结合经济效益社会环境,实现铜冶炼渣零排放、零堆存,促进铜冶炼渣资源综合利用。

参 考 文 献

- [1] 工业固废网. 2021—2022 年度中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R]. 北京, 2023.
Industrial solid waste network. 2021—2022 development report on comprehensive utilization of solid waste in China's bulk industry[R]. Beijing, 2023.
- [2] 张强, 钟琼, 贾振宏, 等. 世界铜矿资源与矿山铜生产状况分析[J]. 矿产与地质, 2014, 28(2): 196-201.
- [3] 张鑫, 徐洪傲, 余彬, 等. 铜冶炼渣选矿试验研究[J]. 矿冶, 2023, 32(2): 41-48.
ZHANG Xin, XU Hongao, YU Bin, et al. Experimental study on beneficiation of copper smelting slag [J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(2): 41-48.
- [4] 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.
- [5] 孔祥艳, 赵冰, 李艳军, 等. 铜冶炼渣中铁的生物炭深度还原—磁选回收试验[J]. 金属矿山, 2022, 51(5): 111-116.
KONG Xiangyan, ZHAO Bing, LI Yanjun, et al. Study on iron recovery from copper smelting slag by deep reduction with biochar and magnetic separation[J]. Metal Mine, 2022, 51(5): 111-116.
- [6] 徐琳, 唐金荣. 我国铜资源供给风险识别及分析研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 555-562.
XU Lin, TANG Jinrong. Copper supply risk identification and analysis study in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(3): 555-562.
- [7] 胥林朋, 刘士祥, 李肖斌, 等. 铜冶炼渣尾矿综合利用现状及研究[J]. 铜业工程, 2022(1): 31-34.
XU Linpeng, LIU Shixiang, LI Xiaobin, et al. Current status and research on comprehensive utilization of copper smelting slag tailings[J]. Copper Engineering, 2022(1): 31-34.
- [8] PARKER T, SHI F, EVANS C, et al. The effects of electrical comminution on the mineral liberation and surface chemistry of a porphyry copper ore[J]. Minerals Engineering, 2015, 82: 101-106.
- [9] 张明, 高利坤, 饶兵, 等. 铜冶炼渣湿法浸出资源化高效回收研究现状[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 88-97.
ZHANG Ming, GAO Likun, RAO Bing, et al. Research status of resource efficient recovery of copper smelting slag from hydrometallurgy leaching [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(5): 88-97.
- [10] 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.
TANG Chaofan, ZHANG Rongliang. Research progress on high-value utilization of copper slag [J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(5): 117-123.
- [11] 李小凡, 豆志河, 张延安, 等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4): 108-118.
LI Xiaofan, DOU Zhihe, ZHANG Tingan, et al. Progress in comprehensive utilization of copper smelting slag [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(4): 108-118.
- [12] 金尚勇, 李永鹏, 陈虎. 铜冶炼危险废物环境管理问题探讨[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(3): 142-143, 147.

- JIN Shangyong, LI Yongpeng, CHEN Hu. Discussion on environmental management of copper smelting hazardous waste[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(3):142-143,147.
- [13] 张维,傅开彬,王磊,等.四川某铜矿选冶渣综合理化特性及环境污染特性评价[J/OL]. 环境化学, 2023:1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20230726.1743.014.html>. ZHANG Wei, FU Kaibin, WANG Lei, et al. Comprehensive physicochemical properties and environmental pollution characteristics evaluation of the reselected copper smelting slag[J/OL]. Environmental Chemistry, 2023:1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20230726.1743.014.html>.
- [14] 姚占珍,李平德.还原+磁选工艺在甘肃某铜渣选尾矿铁组分回收中的应用[J].中国资源综合利用,2020,38(6):88-90. YAO Zhanzhen, LI Pingde. Application of reduction+magnetic separation process in recovery of iron components in a copper slag tailings in Gansu[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(6):88-90.
- [15] YIN F, XING P, LI Q, et al. Magnetic separation-sulphuric acid leaching of Cu-Co-Fe matte obtained from copper converter slag for recovering Cu and Co[J]. Hydrometallurgy, 2014, 149:189-194.
- [16] TIAN Q H, LI Z C, WANG Q M, et al. Synergistic recovery of copper, lead and zinc via sulfurization-reduction method from copper smelting slag[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(12):3847-3859.
- [17] 陈文亮,刘占华,丁银贵,等.某铜冶炼渣综合回收铜、铁工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2019(4):58-62. CHEN Wenliang, LIU Zhanhua, DING Yingui, et al. Study on comprehensive recovery of copper and iron from a copper smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(4):58-62.
- [18] 袁凤香.某铜冶炼尾渣选铁试验研究[J].现代矿业,2022,38(11):117-119. YUAN Fengxiang. Experimental study on iron separation of a copper smelting tailings[J]. Modern Mining, 2022, 38(11):117-119.
- [19] 邹丽萍,杨有智,邓红飞,等.某铜冶炼渣中铜、铁的综合利用回收研究[J].现代矿业,2022,38(10):162-165. ZOU Liping, YANG Youzhi, DENG Hongfei, et al. Study on comprehensive recovery of copper and iron in a copper smelting slag[J]. Modern Mining, 2022, 38(10):162-165.
- [20] MANUEL M J, MARIA A M, FRANCISCO P-F. Technological behaviour and leaching tests in ceramic tile bodies obtained by recycling of copper slag and MSW fly ash wastes[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2021, 23(2):1-10.
- [21] 王帅,张帅柯,王宇琪.铜渣粉制备活性粉末混凝土路面砖的试验研究[J].安徽建筑,2022,29(6):155-156. WANG Shuai, ZHANG Shuaike, WANG Yuqi. Experimental study on the preparation of activated powder concrete pavement bricks using copper slag powder[J]. Anhui Architecture, 2022, 29(6):155-156.
- [22] MEYSAM N, ALI R P. Properties of concrete containing copper slag waste[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(8):605-615.
- [23] CHEN Q S, TAO Y B, FENG Y, et al. Utilization of modified copper slag activated by Na_2SO_4 and CaO for unclassified lead/zinc mine tailings based cemented paste backfill[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 290:112608. DOI: 10.1016/J. JENVMAN. 2021.112608.
- [24] FELIPE V, MARCO A A, JEAN-FRANÇOIS G, et al. Copper entrapment and immobilization during cement hydration in concrete mixtures containing copper tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312. DOI: 10.1016/J. JCLEPRO. 2021.127547.
- [25] MITHUN B M, NARASIMHAN M C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:837-844.
- [26] SAHU A, KUMAR S, SRIVASTAVA A K L, et al. Performance of recycled aggregate concrete using copper slag as fine aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82:108364. DOI:10.1016/J. JOBE. 2023.108364.
- [27] LU K F, SUN W, GAO T, et al. Preparation of new copper smelting slag-based mine backfill material and investigation of its mechanical properties[J]. Construction and Building Materials, 2023, 382. DOI: 10.1016/J. CONBUILDMAT. 2023.131228.
- [28] SATYANARAYANA REDDY C N V, DHANUNJAYA KUMAR REDDY R. Copper slag potential for use as backfill/fill material in conventional and reinforced earth retaining walls[J]. Indian Journal of Geosynthetics and Ground Improvement, 2020, 9(1):46-51.
- [29] 张伟伟,周春财,孙金科,等.基于CaO改性的铜渣系磷酸盐材料及其重金属吸附机制[J].环境化学,2021,40(9):2891-2900. ZHANG Weiwei, ZHOU Chuncai, SUN Jinke, et al. Heavy metals adsorption mechanism based on copper slag phosphate material modified by CaO[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(9):2891-2900.
- [30] 靖青秀,张呈熙,黄晓东,等.铜渣基水处理陶粒的制备及性能研究[J].功能材料,2020,51(8):8100-8104. JING Qingxiu, ZHANG Chengxi, HUANG Xiaodong, et al. The preparation and performances of copper slag based ceramics applied for water treatment[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(8):8100-8104.
- [31] 王海成,金娇,刘帅,等.环境友好型绿色道路研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2137-2169. WANG Haicheng, JIN Jiao, LIU Shuai, et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(7):2137-2169.