

资源回收

有色冶金渣的资源化利用研究现状

陈曦 代文彬 陈学刚 祁永峰 王书晓

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 目前我国有色冶炼渣利用率远未达理想水平,废渣长期露天堆存不仅浪费土地资源、污染环境,还造成了有价资源的浪费,有色渣的高值化、无害化利用迫在眉睫。本文首先系统介绍了赤泥、镍铁渣、铜渣、铅锌渣四种典型有色冶金渣的分类和理化特性;而后从有价金属提取和制备建筑材料两方面介绍有色冶金渣的资源化利用,分析选矿、湿法冶金、火法冶金和选冶联合等各种有价金属提取技术的特点,以及有色冶炼渣在制备水泥、混凝土、砖材、路基、微晶玻璃和矿山充填体等建材领域,废水、废气处理和土壤修复等环保领域的应用;最后针对有色渣综合利用率的提高提出了几点建议。

[关键词] 赤泥; 镍铁渣; 铜渣; 铅锌渣; 理化性质; 资源化利用; 有价金属回收; 建筑材料

[中图分类号] TF09 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-5122(2022)05-0009-07

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.05.002

0 前言

有色冶金渣是指有色矿物冶炼过程中产生的废渣,如从铝土矿提炼氧化铝时排出的赤泥、冶炼镍铁合金时产生的镍铁渣、炼铜过程中产生的铜渣等,其产生量与矿石品位及熔剂加入量有关。我国有色冶金行业规模巨大,据统计^[1-2],2021年我国10种有色金属产量为6454万t,同比增长5.4%,呈持续增长态势;有色冶金渣排放量超3000万t,而综合利用率仅60%,远不及黑色冶金渣90%以上的利用水平,造成有色冶金渣的堆存量呈指数型增长。这些废渣长期露天堆存,不但消耗大量土地资源、增加企业成本,且长期的风化淋溶使渣中的有害元素渗入地下水、江河和土壤中,造成严重的环境污染,危害周围人和动植物的健康。同时,渣中的有价组分也未能得到有效利用。冶金渣的减量化、无害化、资源化利用,是整个有色金属行业的共性难题,也是困扰

行业绿色可持续发展的核心问题。

1 常见有色冶金渣的种类与理化性质

1.1 赤泥

赤泥是氧化铝生产过程中产生的,以 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO和 SiO_2 为主的强碱性固体废物,由于含有大量 Fe_2O_3 ,其外观呈红色,故称为赤泥。每生产1t氧化铝将产生0.6~2.5t赤泥。我国作为世界第一的氧化铝生产大国,赤泥年产生量可达上亿吨。

根据氧化铝生产工艺的不同,赤泥可分为拜耳法赤泥、烧结法赤泥和联合法赤泥。不同类型赤泥的化学成分见表1^[3]。由表1可知,拜耳法赤泥明显具有含钙量和含硅量低的特点,但Fe、Al和Na含量较高,主要矿物相为硅铝酸钠、水化石榴石、方解石和一水软铝石;烧结法赤泥和联合法赤泥的含钙量和含硅量较高,主要矿物相为硅酸二钙、方解石、钙钛矿、铁铝酸四钙等,其中硅酸二钙几乎占总质量的50%,可直接用于建筑材料生产。

1.2 镍铁渣

镍铁渣是冶炼镍铁合金过程中产生的,以 Fe_2O_3 、 SiO_2 和MgO等氧化物为主要成分的熔融物经水碎后形成的球形颗粒状工业废渣,通常呈墨绿

[收稿日期] 2022-06-02

[作者简介] 陈曦(1993—),女,博士,山东聊城人,工程师,主要从事大宗固废处置及金属合金化与相变方面的研究。

[引用格式] 陈曦,代文彬,陈学刚,等.有色冶金渣的资源化利用研究现状[J].有色冶金节能,2022,38(5):9-15.

表1 不同类型赤泥的化学成分

类型	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂
拜耳法	10.0~20.0	30.0~60.0	3.0~20.0	2.0~8.0	2.0~10.0	—	—	0.1~10.0
烧结法	5.0~7.0	7.0~10.0	20.0~30.0	46.0~49.0	2.0~2.5	0.2~0.4	1.2~1.6	2.5~3.0
联合法	5.4~7.5	6.1~7.5	20.0~20.5	43.7~46.8	2.8~3.0	0.5~0.7	—	6.1~7.7

色。每生产1 t 镍会产生6~16 t 废渣。镍铁渣已成为我国继铁渣、钢渣、赤泥之后的第四大冶炼工业废渣。

镍铁渣成分因矿石来源、性质和冶炼工艺的不同存在差异。表2为不同类型镍铁渣的化学成分^[4]。由表2可知,高炉镍铁渣属SiO₂-Al₂O₃-CaO系,CaO含量为20%~30%,具有钙含量高、铁含量低的特点,矿含量物相有硅酸二钙、硅酸三钙、碳酸镁、碳酸钙、镁橄榄石和镁尖晶石等,有一定的潜在活性;电炉镍铁渣属SiO₂-MgO-Fe₂O₃系,其MgO含量较高(≥20%),CaO含量较低(≤10%),且其Fe₂O₃含

表2 不同类型镍铁渣的化学成分

类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SO ₃
高炉 镍铁渣	36.12	20.57	29.03	10.15	2.01	1.03	0.14
	35.70	28.03	21.56	9.83	1.92	0.94	0.09
	30.54	26.74	21.61	12.47	1.54	—	1.58
电炉 镍铁渣	50.11	5.27	8.14	25.60	7.15	1.92	0.07
	45.24	4.41	6.15	27.03	12.08	1.03	0.04
	51.02	3.95	3.21	28.41	10.93	0.83	0.10

表3 不同熔炼方法产出铜渣的典型化学成分

熔炼方法	Cu	Fe	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	S	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
密闭鼓风炉熔炼	0.42	29	—	38	—	7.50	11.00	0.74
奥托昆普闪速熔炼(渣不贫化)	1.50	44.40	11.80	26.60	1.60	—	—	—
奥托昆普闪速熔炼(渣贫化)	0.78	44.06	—	29.70	1.40	7.80	0.60	—
因科闪速熔炼	0.90	44.00	10.80	33.00	1.10	4.72	1.73	1.61
诺兰达法熔炼	2.60	40.00	15.00	25.10	1.70	5.00	1.50	1.50
瓦纽科夫法熔炼	0.50	40.00	5.00	34.00	—	4.20	2.60	1.40
白银法熔炼	0.45	35.00	3.15	35.00	0.70	3.30	8.00	1.40
特尼恩特转炉熔炼	4.60	43.00	20.00	26.50	0.80	—	—	—
奥斯麦特熔炼	0.65	34.00	7.50	31.00	2.80	7.50	5.00	—
三菱法熔炼	0.60	38.20	—	32.20	0.60	2.90	5.90	—
艾萨炉熔炼	0.70	36.61	6.55	31.48	0.84	3.64	4.37	1.98
云南冶炼厂艾萨熔炼(电炉贫化)	0.737	41.28	8.25	29.05	0.001	3.86	3.74	1.15

1.4 铅锌渣

铅锌渣是铅锌冶炼时高温熔融炉渣经水碎产

量明显高于高炉镍铁渣,具有镁含量和铁含量高、钙含量低的特点,矿物相以镁(铁)橄榄石为主,具有潜在活性低、易磨性差、利用成本高的特点^[5]。

1.3 铜渣

铜渣是造锬熔炼或火法吹炼过程中产生的,以氧化物、硫化物和硅酸盐为主,同时普遍含有Cu、Fe等金属元素的黑色玻璃状废渣,呈致密状,硬而脆,具有良好的坚固性、稳定性和耐磨性等机械性能。利用现代富氧吹炼强化炼铜工艺,每生产1 t 铜将产生2~3 t 铜渣。2020年,我国精炼铜产量为1 003万t^[6],铜渣排放量高达3 000多万t,其处理方式仍以堆存为主,累计堆存已达3亿t,综合利用力度有待加大。

不同的熔炼方法产出的铜渣化学成分不同,见表3^[7]。由表3可知,铜渣普遍含有0.5%~2.0%的Cu、30%~40%的Fe、30%~40%的SiO₂,以及小于10%的Al₂O₃、Fe₃O₄和CaO,矿物相主要为铁橄榄石、磁铁矿、硫化物、方镁石、黄铜矿和方石英等。特别地,铜渣的有价金属元素含量较高,具有显著的回收价值。

生,以氧化物为主、具有金属光泽的不规则黑色玻璃态废渣,在硫酸盐或碱激发的条件下具备一定的活

性。铅锌冶炼系统每生产 1 t 金属铅将产生 0.71 t 废渣,每生产 1 t 金属锌将产生 0.96 t 废渣。2020 年,我国铅、锌产量分别为 644 万 t 和 643 万 t,同比增长 9.4% 和 2.7%,居世界首位^[8],仅这一年我国新产生的铅锌渣量就高达上千万吨。

如表 4 所示,由于原料和冶炼方法的不同,所得

铅锌渣的主要成分略有区别,但均为 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 和 Al_2O_3 等氧化物,以化合物、固溶体、共晶混合物等形式存在,此外还有硫化物和氟化物等。矿物组成以玻璃相为主,含有少量的乌拉硼石、镁黄长石、铝钙硅和铝铁。

表 4 铅锌渣的典型化学成分

来源	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Na_2O	ZnO	MgO	MnO	%
青海西部矿业 ^[9]	6.232	46.635	12.208	11.681	3.244	8.895	6.863	3.120	
云南某冶炼厂 ^[10]	8.170	35.690	32.780	10.030	0.760	2.190	2.580	—	
云南某冶炼厂 ^[11]	7.270	29.730	30.670	12.480	0.720	6.390	3.270	2.970	
广东某冶炼厂 ^[12]	4.040	15.570	18.480	6.300	0.360	—	0.510	0.710	

2 有色冶金渣的资源化利用

2.1 提取有价金属

2.1.1 选矿技术

利用选矿法从有色冶金渣中回收提取有价金属,具有流程简单易行、处理量大、污染小等优点。根据分离原理的不同,选矿方法可分为浮选、重选和磁选三种。浮选是指根据渣中矿物颗粒表面电性、亲水性、氧化程度等物理化学性质的不同,按矿物可浮性差异进行分选的方法;重选是根据渣中矿物颗粒密度的差异,在一定介质中进行分选的方法;磁选则是根据渣中颗粒磁性差异,在不均匀磁场中进行分选的方法。实践中,需根据废渣的物化性质来选择合适的选别方式。

曾亮亮等^[13]利用强制油冷立环高梯度磁选机对拜耳法赤泥进行磁选提铁,其给矿铁品位为 16%~19%,磁选后铁精矿品位为 45%~50%,回收率为 62%~71%,有效回收了铁资源。董海刚等^[14]利用浮选、重选和磁选方法对含铁量 50% 左右的镍铁渣进行了回收磁铁矿的研究,结果表明,浮选和重选对镍铁渣中铁矿物无明显分选效果,磁选具有一定分选效果,且通过优化磁选工艺可得到铁品位 56.68% 的磁铁矿,回收率为 81.72%。李勇等^[15]对含铜量 0.77% 的云南某铜渣采用两段磨矿、一次粗选、三次精选及三次扫选,中矿依次返回的闭路浮选工艺,可获得铜品位 15.10% 的铜精矿,铜回收率为 65.02%。对于铅锌渣而言,由于渣中各矿物组分互含现象明显、不易分离,选矿工艺回收有价金属的效率较低,难以大规模推广应用,仍处于探索阶段^[16]。

2.1.2 湿法冶金技术

湿法冶金利用不同的浸出方法提取有色冶金渣中的合金元素,并通过电解水溶液的方法回收金属,具有元素针对性强、回收率高、环境友好等特点,是复杂废渣有价金属回收最有效和常用方法之一。湿法冶金主要包括浸出、净化和金属沉积三个过程;按浸出剂特点,浸出可分为酸性浸出、碱性浸出、微生物浸出等;按温度压力条件不同,浸出可分为高温高压浸出和常温常压浸出;按步骤可分为一段、二段、三段浸出;净化方法有溶剂萃取、离子交换、沉淀法和还原法等^[17]。

ZHANG 等人^[18]对广西平铝集团有限公司拜耳法赤泥采取“酸浸-配位萃取”的方法选择性回收其中的铁和稀土,在优化条件下 Fe 的浸出率可达 95.9%,各稀土元素损失率不足 10%。谢武明等^[19]系统研究了赤泥盐酸浸出的工艺参数对铝、铁浸出率的影响,在酸浸温度为 80℃、盐酸浓度 10 mol/L、液固比为 8:1、浸出温度为 150 min 条件下,铝浸出率为 96.7%,铁浸出率为 95.1%。陈冬冬等^[20]利用不同浓度的硫酸溶液选择性提取镍铁渣中的有价元素,首段浸出 H_2SO_4 浓度为 0.05 mol/L, Ni 浸出率为 97.8%,二段浸出 H_2SO_4 浓度为 2.5 mol/L, Fe、Mg 和 Cr 的浸出率分别为 82.43%、91.68% 和 86.50%。SHI 等^[21]采用低酸度氧压浸出工艺处理云南某铜渣, Cu 浸出率为 97%, Fe、Si 浸出率小于 2%,实现高选择性浸出,解决常压浸出铜渣存在的铁硅多、固液分离难的问题。潘凤开等^[22]利用中温嗜热菌和 NaCl 对铅锌渣进行生物浸出-盐浸出处理,在实现有价金属回收资源化的同时实现无害化处理。

2.1.3 火法冶金技术

火法冶金工艺成熟、应用广泛,主要是通过高温下向渣中配入合适的还原剂和辅助剂来提取其中的有价金属元素。近几年应用比较广的工艺有富氧侧吹熔池熔炼工艺、电炉处理工艺和等离子炉处理工艺等。

富氧侧吹熔池熔炼工艺的特点是采用多通道侧吹喷枪以亚声速向熔池内喷入富氧空气和燃料(天然气、煤气、粉煤),剧烈搅动熔体和直接燃烧向熔体补热。相比其他火法处理工艺,富氧侧吹熔池熔炼工艺具有原料适应性广、操作简单、能耗低、有价金属回收率高、环保友好等一系列技术优势^[23-24],可用于处理铜渣、铅锌渣和赤泥等多种有色冶金渣。中国恩菲工程技术有限公司和云南驰宏锌锗股份有限公司^[23-25]利用富氧侧吹炉结合烟化炉处理锌浸出渣,标煤吨耗降低了30%以上,Zn、Pb、Ag、Ge回收率均达92%以上,该技术显著降低了能耗和生产成本,提高了资源利用水平。

电炉处理工艺是利用电极产生的高温熔融废渣以回收其中的有价成分,具有工艺灵活、炉温高、容易控制等优点,处理含Zn、Cr、Ni和Fe等金属元素的冶金固废时有一定优势^[26]。等离子炉处理工艺的热源为等离子炬,具有高温和高热密度的特点,可提高回收效率,具备更好的灵活性和原料适应性。电炉处理工艺在以合金形式回收金属元素的同时实现二次渣的玻璃体化^[27],适用于处理高毒性、难处置和含可回收贵金属的冶金渣。

2.1.4 选冶联合技术

由于有色冶金渣的复杂性,单独使用某一种方式无法高效回收其中的合金元素,故往往将选矿和冶金技术联合起来,结合各自的优点,针对不同有色渣的成分及结构特点,从而更加灵活、高效地处理废渣,实现资源的综合回收。

罗杰等^[28]利用“浮选-高温还原焙烧-磁选”工艺对云南某铜渣进行处理,浮选精矿铜和银的回收率分别为35%和30%,还原焙烧产生的磁选铁精矿品位为72%,铁回收率为89%,烟尘中锌回收率为96%。柳晓等^[29]利用“磁化焙烧-磁选”工艺对山东某赤泥进行提铁,获得铁品位为47.01%的铁精矿,铁回收率为73.01%,实现铁矿物与脉石矿物的分离,但铁品位和铁回收率的提升仍需进一步探索。李国栋等^[30]采用“酸性焙烧-浮选”工艺对西北某湿法炼锌所产出的铅银渣进行铅和银的回收,得到

铅品位46.76%、银含量2846.41 g/t的铅银精矿,铅回收率为75.89%,银回收率为84.06%。该工艺通过酸性焙烧破坏了铅银渣的铁酸锌包裹层,使其中的有价铅银矿物释放,提高了浮选回收率。

2.2 制备建筑材料

2.2.1 用于水泥和混凝土

有色冶金渣原渣或经提取金属后的尾渣,通常含有SiO₂、CaO、Al₂O₃及Fe₂O₃等氧化物,经急冷后可形成大量玻璃相,具备一定的火山灰活性或水硬性,可作为水泥混合材或混凝土掺合料使用,在大量处理废渣的同时可减少不可再生石灰石矿的用量,实现资源的循环利用。

戴剑等^[31]将拜耳法赤泥、粉煤灰、石灰石、铝矾土和石膏细磨并均匀混合,配入4%掺量的钡泥,制成抗压性能良好的含10.05%拜耳法赤泥的高贝利特铁铝酸盐水泥,但在水泥实际使用过程中需解决其泛碱的问题。对于镍铁渣,2018年建材行业制定了《用于水泥和混凝土中的镍铁渣粉》(JC/T 2503—2018)^[32],规定了电炉镍铁渣和高炉镍铁渣粉用于水泥和混凝土中的技术要求、检测方法和交货验收条件等,这意味着镍铁渣在建材领域具备相当的市场认可度和工程化条件。《混凝土用铜渣粉》(T/CBMF 81—2020)协会标准^[33]的发布和王生辉等^[34-35]的研究表明,铜渣、铅锌渣也具备用作水泥混凝土材料的可行性。

2.2.2 制作砖材

利用有色冶金渣与黏土化学成分相似、物理性质相近的特点,可将有色冶金渣用于烧结砖、免烧砖、保温砖和透水砖等砖材的制备。季文君等^[36]利用山西某铝厂的低铁赤泥和粉煤灰制得抗压强度为26.76 MPa、各性能均能满足要求的免烧砖。周琦等^[37]以甘肃白银铜渣、粉煤灰和黏土为主要原料制备了抗压强度最高可达31.5 MPa的烧结砖。娄广辉等^[38]以甘肃金川镍渣为原料制备高强度蒸压镍铁渣砖,废渣总用量高达92%。

2.2.3 生产路基材料

利用有色渣制备沥青混合料等路基材料,是降低成本、减少石灰等不可再生材料消耗的有效手段,也是消耗大宗废渣、减少二次污染的好方法。比如,铜渣掺配一定量的石灰等胶凝材料后,具有较高的力学强度且不易吸水,可广泛应用于路基。而2019年山东省发布了《公路工程赤泥(拜耳法)路基应用技术规程》(DB 37/T 3559—2019)^[39],其中规定了经改

性处理后的拜耳法赤泥用于公路路基的设计及施工要求,使改性赤泥大规模用于路基材料成为可能。

2.2.4 制作微晶玻璃

微晶玻璃是一种在热处理过程中控制基础玻璃晶化、均匀地析出大量的微小晶体,形成兼具玻璃和陶瓷特点的多相固体材料。利用有色渣与玻璃同属硅酸盐体系的特点,将有色渣用于制备微晶玻璃也是近年来的研究热点。北京科技大学利用高温熔融-热处理工艺,以山东铝业的高铁赤泥为原料,制备CaO-SiO₂-Fe₂O₃-Al₂O₃系微晶玻璃,其抗弯强度为70~120 MPa^[40];王宏宇等^[41]利用 Prtrugic 一步法,以东营某铜渣为原料制得性能良好的微晶玻璃,其抗折强度可达109.87 MPa;张文军等^[42]利用高温熔融-水碎工艺,以镍铁渣为原料,协同粉煤灰制得CaO-MgO-Al₂O₃-Fe₂O₃系微晶玻璃,其抗折强度随镍铁渣掺加量的增加而升高,最大为87 MPa。

2.2.5 用作矿山充填

当采矿完成后,为稳定山体和地表强度,必须对矿山坑洞进行回填,以防坍塌和地面下沉,利用具备胶凝特性的有色渣替代高成本充填料进行矿山回填,可在消纳大宗有色渣的同时降低充填的成本,因此有色冶金渣是一种极具发展潜力的矿用充填材料。研究表明,在镍渣掺入量为85%,辅以脱硫石膏、电石渣、硫酸钠和水泥熟料的条件下,可制得7 d强度为2.9 MPa,28 d强度为6.3 MPa的充填体^[43],满足矿山安全开采对充填体的强度要求。需要注意的是,在利用有色冶金渣进行矿山回填的同时,要综合考察回填技术的无害化标准和要求,避免可能带来的环境危害和地下水污染问题。

2.3 用于环保领域

利用有色冶金渣的比表面积大、孔隙率高等物理特性或富含过渡金属氧化物等化学特性,可将其用于废水、废气处理或土壤修复。例如,赤泥对废水Mn²⁺、PO₄³⁻和As均有良好的吸附效果^[44-46],还可脱除废气中的SO₂,脱硫效率可达90%^[47];镍渣可用于吸收重金属废水中的Pb²⁺和Cu²⁺^[48];载镍铜渣催化剂具有较强的裂解焦油能力和抗积炭性能^[49],铜渣还可用来制备铁碳微电解填料以处理甲基橙废水^[49-50]。这是低成本治理污染物的可行方式,但这种方式利用的渣量有限,无法消纳大宗有色渣固废。

3 结束语

有色冶金渣既是大宗固体废物,又是极具利用

价值的二次矿物资源,做好有色冶金渣的大宗化、高值化、无害化利用,功在当代,利在千秋。有色冶金渣种类繁多,对不同理化性质的有色冶金渣,应采用不同方式进行资源化处理。目前的利用方式主要集中在提取有价金属、制备建材和环保领域。但是,当前有色冶金渣的综合利用率较低,相当一部分工艺路线仍停留在技术储备阶段,未能真正实现产业化应用。为切实提高有色冶金渣的资源化利用水平,需加大技术研究和投入力度,真正做到从实验室研究走向工业化利用,同时还需注意以下几点:

1)着力解决关键共性问题,加快技术升级和优化,提高综合利用率。在有色冶金渣处理过程中,往往存在产生二次污染、资源化利用不充分、利用途径较为单一、实用性不强、产业化不够等问题。这些问题严重制约了有色冶金渣工程化应用发展和利用率的提高。

2)注重防止“以废产废”,比如利用火法回收金属元素时避免产生废气和二次渣,利用湿法时避免产生废水;而建材化利用需考虑环境友好性(如赤泥的放射性、泛碱问题)。争取“以废治废”,实现各类废渣的综合利用联合开发,以及不同利用方式间的协同处理,形成低污染、低能耗、技术性与经济性并存的绿色处置产业链。

3)提高规范性,推动有色冶金渣资源化利用在各领域各方向的标准制定工作,使有色冶金渣产业化、工程化利用有据可依,有制可循。

[参考文献]

- [1] 国家统计局. 2022 工业产品产量年度数据[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[R]. 2020.
- [3] 李艳军,张浩,韩跃新,等. 赤泥资源化回收利用研究进展[J]. 金属矿山,2021(4):1-19.
- [4] 吴春丽,谢红波,陈哲,等. 镍铁渣资源化综合利用现状研究[J]. 广东建材,2019,35(6):77-79.
- [5] 李沙,代文彬,潘德安,等. 镍铁渣用于水泥及混凝土的资源化研究综述[J]. 硅酸盐通报,2019,38(6):1764-1768.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>.
- [7] 李小凡,豆志河,张廷安,等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(4):108-118.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部院原材料工业司.

- 2020年铅锌行业运行情况[EB/OL]. [2021-02-08]. https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/yclgy/ys/art/2021/art_feb2f69776f246a3841737c829a5b48d.html.
- [9] 赵启亮. 铅锌渣制备生态胶凝材料的基础研究[D]. 西安建筑科技大学, 2020.
- [10] 方露, 黄萧. 基于铅锌冶炼渣碱激发材料固化铬渣的研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2631-2639.
- [11] ZHANG P, MUHAMMAD F, YU L, et al. Self-cementation solidification of heavy metals in lead-zinc smelting slag through alkali-activated materials[J]. Construction & Building Materials, 2020, 249: 118756.
- [12] 史采星, 郭利杰, 李文臣, 等. 铅锌冶炼渣充填胶凝材料研究及应用[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(2): 160-169.
- [13] 曾亮亮, 魏黎明, 王宝春, 等. 强制油冷立环高梯度磁选机及其用于从赤泥中回收铁矿物[J]. 矿冶工程, 2014, 34(4): 280-283.
- [14] 董海刚, 郭宇峰, 姜涛, 等. 从含铁镍冶金渣中回收磁铁矿的研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(1): 37-39.
- [15] 李勇, 罗星, 卢美玲, 等. 浮选回收云南某铜冶炼渣中的铜[J]. 矿产与地质, 2020, 34(3): 614-618.
- [16] 杨鑫龙, 戴惠新, 李想. 铅锌渣中回收有价元素的方法及研究现状[J]. 国土与自然资源研究, 2014(1): 42-43.
- [17] 赵金艳, 王金生, 郑骥. 有色金属冶炼废渣有价金属湿法回收技术及现状[J]. 矿产综合利用, 2012(4): 7-12.
- [18] ZHANG X, ZOU K, CHEN W, et al. Recovery of iron and rare earth elements from red mud through an acid leaching-stepwise extraction approach[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 458-466.
- [19] 谢武明, 张宁, 李俊, 等. 盐酸浸出提取赤泥中铝和铁的工艺条件优化[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5677-5682.
- [20] 陈冬冬, 饶帅, 谢武明, 等. 硫酸选择性浸出镍铁冶炼渣中有价金属[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 160-165.
- [21] SHI G C, LIAO Y, SU B, et al. Kinetics of copper extraction from copper smelting slag by pressure oxidative leaching with sulfuric acid[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 241: 116699.
- [22] 潘凤开, 郭朝晖, 程义, 等. Pb/Zn 冶炼废渣中重金属的生物浸出-盐浸处理[J]. 环境工程学报, 2008(12): 1672-1676.
- [23] 许欣. 综合回收处理炉设计特点及应用[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 12-16.
- [24] 唐续龙. 危险废物富氧侧吹熔池熔炼处置新技术[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(4): 10-13.
- [25] 许良, 马绍斌. 侧吹浸没燃烧炉+烟化炉处理锌渣技术[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(2): 40-44.
- [26] 张建平. 冶金固废资源化利用现状及发展[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(5): 39-42.
- [27] 蒋晔. 等离子炉处理危险废物工艺[J]. 环境与发展, 2020, 32(3): 114-115.
- [28] 罗杰, 张锦仙, 文姬, 等. 云南某铜冶炼渣资源化综合回收工艺技术研究[J]. 云南冶金, 2017, 46(4): 24-27.
- [29] 柳晓, 韩跃新, 李艳军, 等. 山东某赤泥磁化焙烧-磁选提铁初探[J]. 金属矿山, 2019(2): 60-65.
- [30] 李国栋, 林海, 孙运礼, 等. 酸性焙烧-浮选联合工艺从铅银渣中回收铅银的影响因素和机制[J]. 稀有金属, 2017, 41(9): 1042-1049.
- [31] 戴剑, 陈平, 刘荣进, 等. 利用赤泥研制铁铝酸盐水泥及掺钡活化研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(4): 90-92.
- [32] 工业和信息化部. 用于水泥和混凝土中的镍铁渣粉: JC/T 2503—2018[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [33] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. 混凝土用铜渣粉: T/CCPA 15—2020[S]. 2020.
- [34] 王生辉, 刘荣进, 陈平, 等. 铅锌冶炼废渣对水泥胶砂强度及孔结构的影响研究[J]. 混凝土, 2021(4): 78-81, 86.
- [35] 赵启亮, 李辉, 刘文欢, 等. 铅锌渣生态胶凝材料的制备及水化特性研究[J]. 功能材料, 2021, 52(6): 6145-6151.
- [36] 季文君, 刘云, 李哲. 赤泥及粉煤灰制备免烧砖的工艺探究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 568-572.
- [37] 周琦, 易育强, 傅希圣, 等. 冶金铜渣及粉煤灰烧结砖的研制[J]. 矿产保护与利用, 2006(06): 46-49.
- [38] 娄广辉, 李银保, 符晓, 等. 镍铁渣的基本特性及其制备高强砖的研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(6): 122-126.
- [39] 山东省市场监督管理局. 公路工程赤泥(拜耳法)路基应用技术规程: DB 37/T 3559—2019[S]. 2019.
- [40] 屈振民, 张帅, 张延玲. 高铁赤泥制备 CaO-SiO₂-Fe₂O₃-Al₂O₃ 系微晶玻璃[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(4): 34-38, 71.
- [41] 王宏宇, 孟昕阳, 侯霖杰, 等. 采用 Prtrugic 法制备铜渣微晶玻璃[J]. 江西冶金, 2020, 40(6): 16-23.
- [42] 张文军, 李宇, 李宏, 等. 利用镍铁渣及粉煤灰制备 CMSA 系微晶玻璃的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014,

- 33(12):3359-3365.
- [43] 杨志强,高谦,王永前,等. 利用金川水淬镍渣尾砂开发新型充填胶凝剂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014,36(8):1498-1506.
- [44] 黄河,李勇超,徐政,等. 赤泥吸附废水中 Mn^{2+} 的机理分析研究[J]. 硅酸盐通报, 2019,38(9):2801-2807, 2813.
- [45] 班斓,李贵金,李龙江. 赤泥颗粒吸附剂吸附水中磷酸根离子动态研究[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(3):8-14.
- [46] 陈新年,李瑶. 赤泥基陶粒的研制及含砷饮用水的处理应用[J]. 科学技术与工程, 2019,19(4):264-267.
- [47] 李云. 利用赤泥脱除烟气二氧化硫的研究[J]. 轻金属, 2014(3):14-19.
- [48] 林亮,于岩. 镍渣表面理化特性及对 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 的吸附研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016,44(1):119-123.
- [49] 袁晓涛,胡建杭,张凤霞,等. 铜渣载镍催化剂催化气松木屑的实验研究[J]. 化工进展, 2018,37(10):3919-3927.
- [50] 唐琼瑶,黄磊,刘浩,等. 铜渣制备微电解填料及其处理甲基橙废水的研究[J]. 金属矿山, 2018(1):183-186.

Research Status of Resource Utilization of Nonferrous Metallurgical Slag

CHEN Xi, DAI Wen-bin, CHEN Xue-gang, QI Yong-feng, WANG Shu-xiao

Abstract: At present, the utilization rate of nonferrous metallurgical slag in China is far from the ideal level. Long-term open-air accumulation of waste slag not only wastes land resources and pollutes the environment, but also causes the waste of valuable resources. Therefore, it is urgent to make high-value and harmless use of nonferrous slag. This paper introduced the classification and physicochemical properties of the four kinds of typical nonferrous slag: red mud, ferronickel slag, copper slag and lead-zinc slag systematically, and then introduced the resource utilization of nonferrous metallurgical slag from two aspects of valuable metals extraction and building materials preparation, analyzing the characteristics of various valuable metal extraction technologies such as mineral processing, hydrometallurgy, pyrometallurgy and the combined technology of hydrometallurgy and pyrometallurgy, as well as the application of nonferrous metallurgical slag in the field of building materials such as the preparation of cement, concrete, brick, roadbed, glass ceramics and mine filling and the field of environmental protection such as waste water, waste gas treatment and soil remediation, and finally put forward some suggestions to improve the comprehensive utilization rate of nonferrous slag.

Key words: red mud; ferronickel slag; copper slag; lead-zinc slag; physicochemical properties; resource utilization; recovery of valuable metals; building materials