

资源回收

甘肃祁连山某地典型金属尾矿渣性质 与综合利用途径

陈延军^{1,3} 任增茂^{1,2} 胡永权^{1,2} 罗天祥^{1,3} 陈德琪^{1,2}

(1. 甘肃省建材科研设计院有限责任公司, 甘肃 兰州 730020;

2. 甘肃省绿色建筑技术重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

3. 甘肃省建筑材料资源综合利用工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730020)

[摘要] 针对当前甘肃省祁连山一带金属尾矿渣堆存造成的生态环境破坏问题,通过实地调研,重点选取该地区酒泉境内金尾矿、铜尾矿、铁尾矿三种尾矿渣的代表性样品为研究对象,测试分析其密度、粒径分布、化学成分、矿物组成、重金属浸出毒性及放射性等理化性质,并探讨上述尾矿渣制备建筑材料的可行性及在建材方面的应用方向。研究结果表明,三种尾矿渣表现出明显的资源属性、经济属性等特点,该研究结果为该地区金属尾矿渣的资源化利用提供基础参考。

[关键词] 固废资源;尾矿渣;金尾矿;铜尾矿;铁尾矿;资源化;物理化学性质;建筑材料

[中图分类号] TD989; TU528

[文献标志码] A

[文章编号] 1008-5122(2022)03-0001-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.03.001

0 前言

金属尾矿渣是金属矿山开采出来的矿石经过选矿厂选取有价值的精矿后而残留的其他物质^[1]。由于未经处理的尾矿渣包含大量的重金属元素、选矿过程中使用的石灰以及多种化学药剂,一旦发生渗滤会污染周边土壤及环境。目前,我国在尾矿渣综合利用方面虽取得了一些研究成果,但大部分地区的尾矿渣的综合利用率还比较低,很多研究仍关注于有用组分的提取与回收,一些研究成果尚达不到减量化和资源化的目的。与国内其他行业固废的利用水平相比,尾矿渣的综合利用在技术上还存在

很大差距。近几年,国家有关部门多次发文鼓励和支持尾矿、建筑垃圾、工业废弃物等大宗无机固废资源化利用技术及装备的研发。因此,金属选矿尾渣的资源化利用已成为近年来一个研究热点。

甘肃省的金属矿产资源十分丰富,矿产资源开发在带动地方经济的同时也给周边环境造成了一系列的污染问题,特别是近年来甘肃祁连山国家级自然保护区生态破坏严重,部分地区环境污染凸显,环境风险进一步加大。目前,甘肃省出台的如《甘肃省防范化解尾矿库安全风险工作实施意见》《甘肃省尾矿库监督管理试行办法》等一系列相关法律法规将严格实行尾矿库总量控制,要求尾矿库回采后必须采取相应措施进行治理^[2]。尾矿渣虽然是经过多重筛选而剩下的“废弃物”,但仍含有大量可以利用的成分^[3],由于经济和技术水平的限制,有用成分的回收和利用难度大,至今未能实现一定规模的产业化应用。此外,伴随甘肃省矿产资源开发量的增大,尾矿产出量上升,而自然资源又相对紧缺,因此,尾矿渣成为重要的二次资源,研究金属尾矿渣的综合利用具有重要的现实意义。

在此背景下,选择甘肃祁连山地区酒泉市的三

[收稿日期] 2021-12-08

[基金项目] 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(编号:2018YFC1903700)

[作者简介] 陈延军(1986—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,主要从事绿色建材与无机固废资源综合利用方面的研究。

[引用格式] 陈延军,任增茂,胡永权,等.甘肃祁连山某地典型金属尾矿渣性质与综合利用途径[J].有色冶金节能,2022,38(3):1-6,15.

种典型金属尾矿渣作为研究对象,通过测试其主要理化性质,在理论上分析金属尾矿渣制备建筑材料的可行性,并探讨该地区金属尾矿渣在建材方面的应用方向。

1 典型尾矿渣的筛选

1.1 尾矿渣类型的筛选

曾有学者对甘肃省尾矿库的区域分布、类型、矿种等进行了统计:甘肃省约有 230 座尾矿库,其中涉及重金属的尾矿库比重较高,以铅锌矿、金矿、铁矿和铜矿为主^[4]。针对本研究,通过调查统计,祁连山地区沿线的 4 个市(金昌、张掖、酒泉、嘉峪关)共有尾矿库 38 座,以金尾矿、铁尾矿、铜尾矿和萤石尾矿为主,具体分布如图 1 所示。但由于萤石尾矿资源化利用的主要途径是提取萤石精粉,因此选择金尾矿、铁尾矿和铜尾矿作为本文的研究对象。

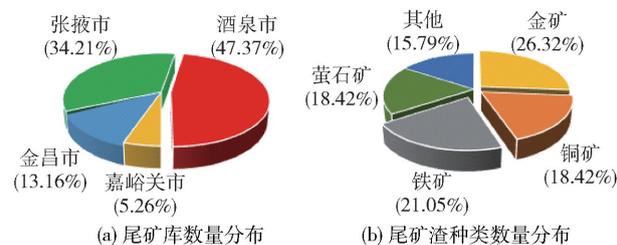


图 1 甘肃祁连山地区周边尾矿库分布情况

1.2 取样地的筛选

2017 年,《甘肃祁连山国家级自然保护区管理条例》发布实施后,受此政策影响,祁连山国家级自然保护区及其周边原有的大量选矿企业关停,故本文以祁连山地区(非自然保护区内)现有选矿生产企业排出的选矿尾渣(假设无再选和有价元素回收价值)为对象进行分析研究。由于目前闭库和复垦的尾矿库表面已采取环保措施,进行了压实覆盖或植被种植,因此取样难度较大,样品代表性差,并且采样会对原有环保措施造成破坏,考虑到同一地区不同矿区同一类型尾矿渣产生过程和成分基本相近,也鉴于酒泉地区尾矿库数量和尾矿渣类型多,本文选择了该地区具有代表性或典型性、且正处于使用状态的肃北县某铁尾矿、金塔县某铜尾矿、瓜州县某金尾矿三个尾矿库区作为取样地点。

2 样品采集与测试方法

2.1 样品采集

采样采用简单随机采样法,采样点位按棋盘型设置。依据《工业固体废物采样制样技术规范》

(HJ/T 20—1998)和尾矿库容量大小,确定最少采样 80 份。由于尾矿的最大粒度(筛余量约 5% 时的筛孔尺寸)为 4.75 mm,根据标准所述切乔特公式,应采的最低份样量 $Q \geq Kd^\alpha$ (K 为缩分系数,代表尾矿渣的不均匀程度, K 值越大,尾矿渣越不均匀; d 为尾矿渣最大粒度的直径; α 为经验常数,随尾矿渣的均匀程度和易破碎程度而定),这里 K 取 0.06, α 取 1,计算可得最小份样量 $Q \geq 0.285$ kg。

2.2 样品测试

将尾矿渣小样进行混合,对混合后的总样采取圆锥四分法进行缩分,并将缩分后的样品(试样)等分成两份尾矿大样,一份供试验检测,一份作为保留样^[5]。参照《建筑用砂》(GB/T 14684—2011)的试验方法,将供检测用的大样再分样,用于分析尾矿的理化性质,如粒度、化学成分、重金属浸出毒性及放射性等,检测项目见表 1。此时要注意采样所用的塑料袋完好密封,避免与其他样品相互污染。

表 1 样品检测项目及依据

序号	检测项目	检测依据	预处理
1	粒度分析		
2	表观密度	GB/T 14684—2011	105℃ 烘干至恒量
3	堆积密度/孔隙率		
4	化学成分		105℃ 烘干至恒重,
5	氯离子含量	GB/T 176—2017	研磨至全部通过
6	碱含量		0.15 mm 方孔筛
7	重金属浸出毒性	GB 5085.3—2007	风干
8	放射性	GB/T 6566—2010	105℃ 烘干至破碎磨细至粒径 ≤ 0.16 mm

3 三种尾矿渣的物理及化学性能

3.1 密度

尾矿渣由于含有各种金属,在相近粒级条件下,其表观密度一般比天然砂要大。而由于尾矿砂颗粒形状和级配的关系,其堆积密度有可能低于天然砂。尾矿渣堆积在尾矿库中,由于沉积的作用,尾矿渣的密度往往随着尾矿料堆的增大有一定的提高。三种尾矿渣的密度测试结果见表 2。

表 2 三种尾矿渣和天然砂的密度对比

项目	金尾矿	铜尾矿	铁尾矿	《建筑用砂》
表观密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 550	2 620	2 860	$\geq 2 500$
松散堆积密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 150	1 220	1 400	$\geq 1 400$
孔隙率/%	55	53	51	≤ 44

从表 2 可以看出,三种尾矿渣的表观密度均符

合建筑用砂的要求,而金尾矿、铜尾矿的松散堆积密度小于建筑用砂的要求,若用于混凝土细骨料,拌制过程中会出现物料匀质性差的问题,且三种尾矿渣的孔隙率均大于建筑用砂,说明尾矿渣的级配不良,若作为骨料或掺合料使用,会增加混凝土中胶凝材料的用量,所以使用时的掺合量应通过试验进一步确定。

3.2 粒度分析

粒度分析用粒度曲线表示,能够比较直观地表示粒径相对大小和颗粒的均匀程度,有助于尾矿渣在不同领域的高效利用。尾矿渣的粒径大小与矿石本身性质、选矿工艺过程有关,不同的选矿工艺得到的尾矿渣分布特征有所区别,但大多为细砂。使用 Malvern 激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000),采用干法对三种尾矿渣的粒度分布进行测试。该仪器主要技术指标为:粒径范围为 $0.020 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$,颗粒折射率为 1.520,颗粒吸收率为 0.1,透光率为 $3.08\% \sim 3.12\%$,光源为 $632.8\ \text{nm}$ He-Ne 激光器附以 $466\ \text{nm}$ 固体蓝光光源。为了保证实验结果的准确性,测试时分别对同一样品随机取三份试样进行测试,然后对三组实验结果求取均值。此外,由于使用激光粒度分析仪测定粒度组成时,是在微米级的范围内进行测量,因此对团聚大的颗粒进行了分散预处理以保证样品的测试准确度。三个尾矿渣样品的粒度分布和粒度特征参数分别见图 2 和表 3。

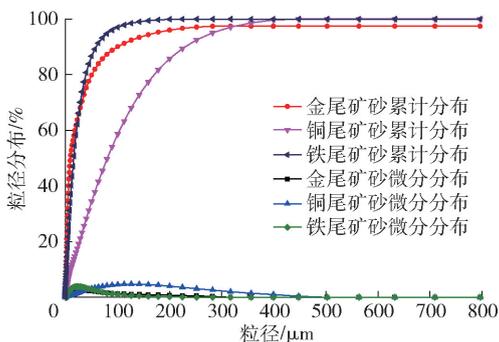


图 2 三种典型尾矿砂的粒径分布

表 3 三种典型尾矿砂的粒度特征参数

特征参数	金尾矿	铜尾矿	铁尾矿
比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	581	102	406
一致性	3.04	0.84	1.18
$d_{10}/\mu\text{m}$	1.32	9.68	2.13
$d_{50}/\mu\text{m}$	9.30	80.29	15.53
$d_{90}/\mu\text{m}$	90.07	229.55	58.70
$D[3,2]/\mu\text{m}$	3.32	18.87	4.76
$D[4,3]/\mu\text{m}$	31.75	102.92	24.86

从图 2 可看出,三种尾矿的粒径为 $0 \sim 400\ \mu\text{m}$,颗粒均很细小,且其微分分布和累计分布曲线趋势基本一致。从表 3 可知,金尾矿砂最细,其体积平均粒径 $D[4,3]$ 为 $31.75\ \mu\text{m}$,中位径 $d_{50} = 9.30\ \mu\text{m}$,表面积平均粒径 $D[3,2]$ 为 $3.32\ \mu\text{m}$,比表面积为 $581\ \text{m}^2/\text{g}$ 。该样品的 $d_{50} - D[4,3] = -22.45\ \mu\text{m}$,表明粒度分布的对称性较差,粒度微分分布的峰高大约在 2.8% 处;粒度分布的离散度为 $(d_{90} - d_{10})/d_{50} \approx 9.54$;而铜尾矿渣和铁尾矿渣粒度分布的离散度分别为 2.74 和 3.64,相比之下,金尾矿渣样品的粒度分布较宽,离散度较大,分布不均匀。总之,上述三种尾矿砂的粒度分布宽,对称性差,从各自的 d_{10} 也可以看出超细粉偏多。究其原因,可能是在选矿过程中,为了使有用矿物充分地解离从而得到较高品位的多种精矿,进行细磨甚至超细磨后选别,造成了易磨矿物过磨,尾渣中有价金属多以微粒甚至未单体解离的连生体存在,导致尾矿的泥化现象严重^[6]。此外,选矿往往是在矿浆状态下进行的,尾矿通过管道排入尾矿库后,经过一段时间的水分流失,形成尾矿堆。在这个过程中由于水的作用,尾矿砂粒度分布往往不均匀。因此,考虑到上述三种尾矿渣粒径呈微细状态,若作为原料制备建材产品,将对其强度产生不利影响。因此,为了满足建材生产需要,配合选矿流程进行有针对性的分选或分级十分必要。

同时为了进一步验证尾矿的粒径分布范围,更好地评价尾矿渣在建材方面的应用范围,按照《建筑用砂》(GB/T 14684—2011)中颗粒级配的试验方法测定了三种尾矿的粒径分布,测试结果如图 3 所示。

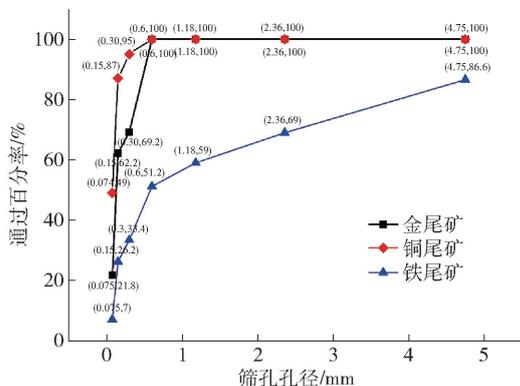


图 3 三种尾矿的颗粒级配曲线

图 3 的筛分数据表明,金尾矿粒径在 $0.075 \sim 0.3\ \text{mm}$ 范围的占大多数,约占总量的 78.2% (质量比)。参照《固体矿产尾矿分类》(DZ/T 0371—2021)中的粒度分类,金尾矿和铜尾矿中粒径大于

0.074 mm 的颗粒质量分别约占总质量的 78.2% 和 70.2%, 超过总质量的 50% 且不超过总质量的 85%, 说明金矿和铜尾矿粒度介于尾粉砂与尾细砂之间; 而粒径大于 0.074 mm 的铁尾矿颗粒质量约占总质量的 93.0%, 超过总质量的 85%, 说明铁尾矿属于尾细砂。根据 GB/T 14684—2011 中细度模数的计算方法, 金尾矿和铜尾矿的细度模数均为 0.7, 属于特细砂; 而铁尾矿的细度模数为 2.2, 属于

细砂。如果用于加气混凝土的制备, 原材料的细骨料粒度 0.08 mm 筛余不应大于 20%, 而上述三种尾矿中只有铁尾矿符合要求, 因此应对金尾矿和铜尾矿进行预分级处理。

3.3 化学成分

尾矿渣化学成分是尾矿渣综合利用的物质基础。依据 GB/T 176—2017 中的化学方法定量分析三种尾矿中的主要化学成分, 结果见表 4。

表 4 三种尾矿渣的主要化学成分

类型	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O + 0.658K ₂ O	LOI
金尾矿	53.50	9.52	12.89	6.46	3.91	0.52	0.07	3.32	8.15
铜尾矿	70.95	12.95	5.37	1.28	2.11	0.86	0.08	0.66	5.01
铁尾矿	53.68	19.00	3.47	9.27	6.56	0.52	0.1	1.26	3.43

从表 4 分析结果看, 三种尾矿以硅、钙、铝、镁、铁的氧化物为主, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 三者的总含量均超过 75%, 其中铜尾矿最高, 为 89.27%, 金尾矿最低, 为 75.91%, 这说明三种尾矿具有不同的可利用性和潜在活性。按化学成分不同以及 SiO₂ 含量, 这三种尾矿渣均属于复合成型^[7]。如果将这三种尾矿渣用作建筑材料的原料, 还必须对尾矿的矿物组成作详细的分析研究。若用作生产加气混凝土的原料, 尾矿砂中有一部分 SiO₂ 以石英状态存在, 称为游离 SiO₂。游离 SiO₂ 在一定条件下与有效氧化钙发生反应, 玻璃相含量越高, 尾矿的活性就越高。还有一部分 SiO₂ 以其他矿物组分存在, 这种化合物 SiO₂ 不能与氧化钙发生有效反应。尾矿中石英的大致含量可根据尾矿砂的物相分析进一步确定, 也可根据 SiO₂ 含量随着石英含量增加而增加这一原理来估算。表 4 中金尾矿和铁尾矿的 SiO₂ 含量不能满足制备加气混凝土 SiO₂ 含量大于 60% 的要求, 需要加入一定量硅含量高的硅质原料。

3.4 矿物组成

尾矿渣的矿物组成及各矿物之间的嵌布关系直接决定尾矿渣的性质及应用方向, 是尾矿渣综合利用的矿物学基础。采用 RigakuSmart Lab(9) 转靶 X 射线粉末衍射仪对尾矿砂的矿物组成进行了测定分析, 其工作条件为: 管电压 20 ~ 45 kV, 管电流 10 ~ 200 mA, 最大功率 9 kW, 最小步进角度 0.000 1°, 测试角度 5° ~ 90°。结果如图 4 所示。

从图 4 可知, 三种尾矿的衍射峰峰形狭窄尖锐对称, 且峰值较高, 说明尾矿矿物的结晶程度较高;

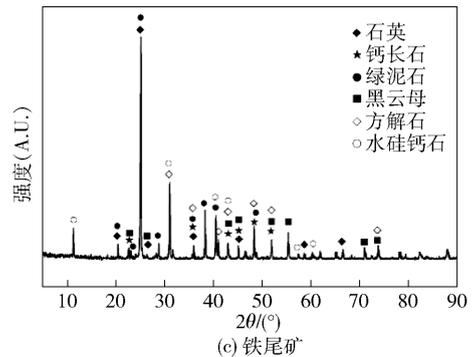
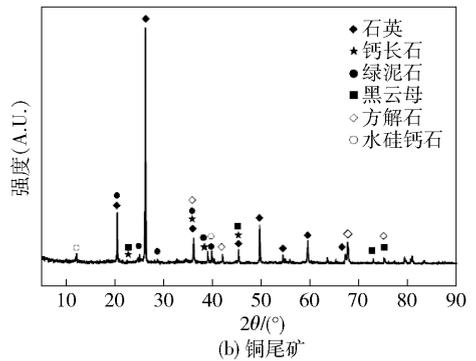
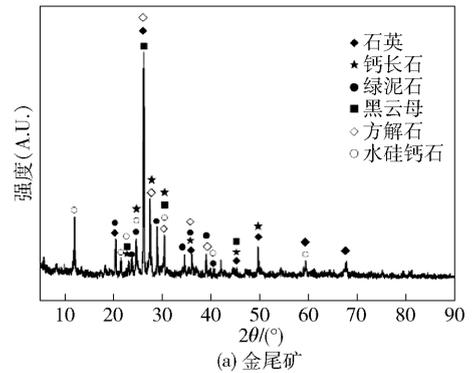


图 4 三种尾矿的 XRD 分析图谱

主要衍射峰与石英的衍射峰一致,说明三种尾矿中的主要物相是石英,非金属矿物成分含量较接近;图中没有明显的金属氧化物、硫化物的衍射峰,可能是因为这两者的含量都低于XRD的检测限,需要借助其他方法进一步分析表征;此外,矿物成分还有钙长石、绿泥石、黑云母、方解石和水硅钙石,尾矿中的铁、镁、铝主要赋存于伴生硅酸盐矿物绿泥石和黑云母中,并存在广泛的类质同象置换现象,形成多种化学成分复杂的绿泥石类矿物。在上述XRD衍射定

性分析基础上作XRD定量分析,通过全峰拟合估算,三种尾矿中 SiO_2 含量为50%~70%,这与化学分析中的 SiO_2 含量大致吻合。

3.5 重金属浸出毒性

通常重金属离子浸出量的大小与重金属在原料中含量的多少没有直接关系,而与重金属的存在状态有关。为了评价尾矿砂中重金属对环境的危害性和风险性,测定了三种金属尾矿渣的浸出毒性,结果见表5。

表5 三种金属尾矿渣浸出毒性鉴别

序号	检测项目	检测方法	标准限值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	检测结果			检出限
				金尾矿	铜尾矿	铁尾矿	
1	总银		5	ND	ND	ND	0.002 9
2	砷		5	0.015 5	0.016 8	0.001 2	0.001 0
3	钡		100	0.015 5	0.027 6	0.090 4	0.001 8
4	铍		0.02	ND	ND	ND	0.000 7
5	镉		1	ND	0.002 5	ND	0.001 2
6	总铬	HJ 766—2015	15	ND	ND	ND	0.002 0
7	铜		100	ND	0.012 2	ND	0.002 5
8	镍		5	ND	0.527	ND	0.003 8
9	铅		5	ND	ND	ND	0.004 2
10	硒		1	0.002 3	0.042 1	0.002 0	0.001 3
11	锌		100	ND	0.058 3	ND	0.006 4
12	汞	GB 5085.3—2007 附录 B	0.1	ND	ND	ND	0.002
13	烷基汞	GB/T 14204—1993	不得检出	ND	ND	ND	甲基汞 10 ng/L, 乙基汞 20 ng/L, 乙基汞的检出限为 20 ng/L
14	铬(六价)	GB/T 15555.4—1995	5	ND	ND	ND	0.004
15	无机氟化物 (不包括氟化钙)	GB 5085.3—2007 附录 F	100	ND	ND	ND	0.74
16	氰化物(以CN计)	GB 5085.3—2007 附录 G	5	ND	ND	ND	0.000 1

注:1)“ND”表示测试结果低于检出限,即未检出;2)按照HJ/T 299—2007制备固体废物浸出液;3)烷基汞包括甲基汞和乙基汞;4)标准限值依据GB 5085.3—2007表1

从表5可知,三种尾矿渣都含有一定量的重金属,如金尾矿渣和铁尾矿渣含有砷、钡、硒等;铜尾矿渣含有砷、钡、镉、铜、镍、硒、锌等。在一定的环境条件下,以上尾矿渣所含的重金属离子具有浸出风险,但其浸出浓度均远低于《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)标准规定的最高限值,对周边环境的危害性较小,因此认为,这三种尾矿渣并不是危险废物,属于一般废弃物。

3.6 放射性

考虑到尾矿渣中的天然放射性核素在其利用过程中可能富集和迁移,导致环境放射性水平升高和附加的辐射照射^[8],将其作为后期加工制备建材产品的原材料时,会对周围局部环境造成不同程度的

放射性影响,特别是对周围人群带来附加的外照射,因此对样品进行了放射性检测,以评估其对周围环境的污染程度。三种尾矿渣的放射性测试结果见表6。

表6 金属尾矿渣放射性检验结果

尾矿类型	放射性核素比活度/ (Bq/kg)			内照射 指数 Ir	外照射 指数 Ia	评价
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K			
金尾矿	22.42	23.86	409.30	0.11	0.25	合格
铜尾矿	26.18	12.34	150.06	0.13	0.15	合格
铁尾矿	11.92	2.91	68.92	0.06	0.06	合格

注:外照射指数 $I_r = C_{\text{Ra}}/370 + C_{\text{Th}}/260 + C_{\text{K}}/4200$,内照射指数 $I_a = C_{\text{Ra}}/200$,测量结果不确定度(1σ) $\leq 20\%$

从表6可知,三种金属尾矿砂的放射性均在规定的限值之内,作为建筑材料的原材料是安全的。

3.7 综合利用途径

由于三种尾矿渣在粒度特征、化学组成、物相组成、重金属浸出毒性及放射性等方面存在差异,它们在制备建筑材料方面有不同的用途。查阅国内相关文献资料^[9-16],上述尾矿渣既可用于制备蒸压加气混凝土、轻质隔热保温材料、泡沫混凝土、建筑用砖、水泥等传统建材,也可用于制备泡沫陶瓷、陶粒滤料、微晶玻璃等高附加值新型建材。以采用铜尾矿渣制备蒸压加气混凝土砌块为例,原料的成分须与通常使用的粉煤灰相似,铜尾矿渣不仅需要提供 SiO_2 ,还需要提供 Al_2O_3 ,与 CaO 水热反应生成水化硅酸钙和水化铝硅酸盐,从而使砌块获得强度。《蒸压加气混凝土制品用铜尾矿硅质原料应用技术规程》(DB36/T 1274—2020)要求铜尾矿渣的 SiO_2 含量 $\geq 65\%$, SO_3 含量 $\leq 2\%$,碱含量 $\leq 5\%$,由此可见上述铜尾矿渣具备用作生产蒸压加气混凝土所需硅质材料的应用潜力。

此外,除主要成分外,三种尾矿渣的 SO_3 、 Cl^- 含量相对较低,这与制备水泥混凝土所需的硅质混合材料的化学组分十分相近,说明尾矿渣具有一定的活性。三种尾矿渣的 Cl^- 含量约为0.1%,由于氯离子侵蚀作用引起的钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构性能劣化的最普遍、最严重的原因,按照《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2019)的规定,在各种环境作用等级下,混凝土中氯离子的最大含量不允许超过0.3%,这说明上述三种尾矿渣用作钢筋混凝土原材料是可行的。

如果尾矿渣的硫酸盐含量较高,会和水泥里的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化氯酸钙生成化学反应,且随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度逐渐下降,水化物发生分解,进而生成硫铝酸钙和石膏,体积膨胀,造成混凝土被破坏。上述三种尾矿渣中硫酸盐(折算成 SO_3 ,按质量计)最大含量为0.86%,未超过《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)中 SO_3 含量3.5%的规定值,因此从该方面考虑,尾矿渣替代部分原料生产水泥是可行的。

总之,充分挖掘尾矿渣的特性,在研究矿物性能的基础上开发相关建材产品,是尾矿渣综合利用的发展趋势,且具有广阔的前景。

4 结论

本文从密度、颗粒级配、化学成分、矿物组成、重

金属浸出毒性、放射性等多个方面进行了三种金属尾矿渣性质研究与分析,结果表明三种尾矿渣与传统矿产资源一样,同样表现出明显的资源属性、经济属性与环境属性等特点,为研究同类型尾矿渣在建筑材料体系中的应用提供了初步理论基础。结论如下:

1) 三种尾矿渣中矿物主要以石英矿物为主,此外还含有少量的钙长石、绿泥石、黑云母、方解石等,其主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 等,且 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 三者的总含量均超过75%;且其密度与建筑用砂的密度接近但粒度细小,因此在资源特征上总体与传统的建材原料成分基本相近,可视为一种待改进的活性混合材,通过加工、改性后可作为建材生产原料。

2) 三种尾矿渣的重金属浸出量小,表明它们属于一般废弃物,对周边环境的危害较小,且无放射性污染。

3) 三种尾矿渣作为二次资源,假设在无再选和回收价值前提下对其进行整体利用,通过现有的技术条件可将其用于生产蒸压加气混凝土、水泥、建筑用砖、微晶玻璃等新型建材。

[参考文献]

- [1] 张涛,袁敏,常文韬,等. 典型尾矿高附加值利用关键技术研究与示范[M]. 天津大学出版社,2015.
- [2] 甘肃省出台防范化解尾矿库安全风险工作实施意见[EB/OL]. [2020-05-15]. <https://www.gsfbz.com/content-12-66106-1.html>.
- [3] 陈虎,沈卫国,单来,等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土,2012,268(2):88-92.
- [4] 赵立芳,刘佳,张兆虎,等. 甘肃省尾矿库环境风险分析及防范措施[J]. 黄金科学技术,2018,26(5):656-661.
- [5] 住房和城乡建设部. 生活垃圾焚烧灰渣取样制样与检测:CJ/T 531—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- [6] 辛保泉,万露,赵海燕,等. 尾矿砂物理力学性能测试及坝体稳定性分析[J]. 中国测试,2019,45(6):35-41.
- [7] 童雄. 尾矿资源二次利用的研究与实践[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [8] 姜子英. 工业废渣利用与天然放射性照射监管的思考[C]//中国环境科学学会学术年会论文集(2016),2016:782-788.
- [9] 孙旭东,刘晓敏,龚裕,等. 黄金尾矿建材化利用的研究现状及展望[J]. 金属矿山,2020(3):12-22.
- [10] 刘文博,姚华彦,王静峰,等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. 材料导报,2020,34(Z1):268-270.

(下转第15页)

命的工业实践[J]. 铜业工程, 2020(5):39-42.

与资源综合利用[J]. 硫酸工业, 2019(11):14-23.

[5] 张化刚, 曹汝俊, 董木森. 祥光铜业冶炼烟气超低排放

Study on Effects of Auxiliary Materials Control on Copper Smelting Production Process

LIU Jing-shi, LIU Shi-xiang, DONG Guang-gang, WEI Dong, LIU Gui-xin

Abstract: The roles of bulk auxiliary materials in the production process, including quartz sand, quick-lime powder, hydrogen peroxide, barium sulfate, industrial sodium sulfate, limestone, etc., were elaborated in this article, and effects of quality and dosage variations of auxiliary materials on production were analyzed. Auxiliary materials are applied in the smelting industry for stabilizing furnace conditions, slagging and impurities removal, improving product quality, recovering valuable metals, increasing recovery rate, protecting the environment and other purposes. There are many kinds of such auxiliary materials in great demand, so a sound quality control system for auxiliary materials should be built in production.

Key words: copper smelting; bulk auxiliary materials; quality control; dosage control; quartz sand; quick-lime powder; hydrogen peroxide

(上接第6页)

[11] 肖莉娜, 朱街禄. 铜尾矿粉基复合胶凝材料水化特性研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(2):61-63.

[12] 胡亚桥, 覃星朗, 谢经鹏. 基于新型胶凝材料的超细铜尾矿充填试验及应用[J]. 采矿技术, 2021(4):163-165.

[13] 严峻, 聂松, 刘松柏, 等. 利用铜尾矿作硅质原料制备硅酸盐水泥熟料的研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40

(4):1273-1279.

[14] 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(S2):117-120.

[15] 刘淑鹏, 张小伟. 我国金属矿山尾矿综合利用现状及对策[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(3):75-78.

[16] 佟志芳, 范佳乐, 曾庆钊, 等. 利用金属尾矿制备泡沫微晶玻璃的研究现状及展望[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(2):34-41.

Properties and Ways of Utilization of Metal Tailings Slag in Qilian Mountains in Gansu Province

CHEN Yan-jun, REN Zeng-mao, HU Yong-quan, LUO Tian-xiang, CHEN De-qi

Abstract: In view of the current ecological environment damage caused by the accumulation of metal tailings in the Qilian Mountains of Gansu Province, through on-the-spot investigation, the representative samples of gold tailings, copper tailings and iron tailings in Jiuquan area were selected as the research objects, and its density, particle size distribution, chemical composition, mineral composition, heavy metal leaching toxicity and radioactivity were tested and analyzed. The feasibility of preparing building materials with the above tailings and the application direction in building materials were discussed. The results showed that the three kinds of tailings all showed obvious resource attributes and economic attributes, which provided reference for the resource utilization of metal tailings in the region.

Key words: solid waste resources; tailings; gold tailings; copper tailings; iron tailings; resource utilization; physicochemical property; building material