贵州毕节林口地区硫铁矿尾矿资源潜力分析

孙百川,杨瑞东,罗朝坤,李鑫正

(贵州大学 资源与环境工程学院喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 硫铁矿尾矿是硫磺矿区的主要固废,其随意堆放不仅占用大量土地资源,还对环境产生一定影响,黔西北毕节林口地区运用土法炼硫已有几十年历史,堆存了大量硫铁矿尾矿,经资料分析和实地调查发现林口地区目前堆放硫铁矿尾矿 7 335.72 万 t。通过对矿渣堆网格捡块采样,利用尾矿地球化学勘查方法,对该地区硫铁矿尾矿进行主微量和稀土元素测试,发现硫铁矿尾矿中 TFe、Ti、V、稀土元素已达到边界品位,具有潜在利用价值。通过 X 射线衍射实验(XRD)和扫描电镜(SEM)实验,发现该地区硫铁矿尾矿的矿物主要为石英和赤铁矿,且 TFe 含量为 21.36%~38.36%,具有很好的利用前景。同时结合相关文献资料,对该地区硫铁矿尾矿综合利用提出建议,该研究对相同类型矿山尾矿的综合利用具有一定的借鉴意义。

关键词:贵州毕节;硫铁矿尾矿;尾矿组分特征;资源量估算;综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.004

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2025)02-0023-08

引用格式: 孙百川, 杨瑞东, 罗朝坤, 等. 贵州毕节林口地区硫铁矿尾矿资源潜力分析[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 23-30.

SUN Baichuan, YANG Ruidong, LUO Chaokun, et al. Resource potential analysis of pyrite tailings in linkou area of bijie, guizhou province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 23-30.

截至 2020 年底,全国尾矿库数量近 8 000 座,总量居世界第一位,尾矿累计堆存量已超过 200 亿 t,年新增量约 12.95 亿 t^[1]。尾矿的大量堆积对环境产生较大的危害,且大部分尾矿库有价组分含量接近或高于边界品位,可利用性强、经济价值可观。因此,为响应国家"十四五"规划号召,坚持节约资源和保护环境的基本国策,坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针,查明尾矿资源利用潜力、提升综合利用水平、加强矿山环境保护、倡导绿色矿山建设成为当前的重要任务。

我国硫铁矿资源丰富、储量巨大,因天然硫 磺缺乏,所以硫铁矿成为我国硫磺、硫酸、亚硫 酸盐等基础化学工业产品的最重要的原料,单从 制酸厂排出的硫铁矿尾矿每年有700万 t 以上^[2]。但我国尾矿治理意识薄弱,硫铁矿烧渣的利用率低,大量的废渣没有得到充分地利用,从而长期占用土地,造成环境污染,影响农业生产,危害人体健康。而国外部分国家,因研发强度大、产业政策好等原因,综合回收率远远高于我国,如日本硫铁矿烧渣的利用率为70%~80%,美国为80%~85%,德国几乎为100%^[3],从2012年开始,我国开始致力于硫铁矿尾矿的回收利用技术的研究,在经过长时间的探索,现阶段我国硫铁矿尾矿的资源化技术正逐渐成熟^[4],其中硫铁矿尾矿的选铁实验也取得了较多的成果,伴随着我国对铁矿石资源的强烈需求,根据海关总署数据,2021年我国铁矿石进口额达1.2万亿元,占当年我国进口

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903500); 贵州省科技厅(黔科合平台人才[2018]5613)项目

作者简介:孙百川(1996-),男,硕士,主要从事矿床学及地球化学研究。

通信作者: 杨瑞东(1963-), 男,教授,博士生导师,主要从事矿床学及地球化学研究。

总额的 7%^[5]。因此硫铁矿尾矿的综合利用成为一种趋势。

本研究旨在评估尾矿中资源的潜在可开发性,以毕节林口地区硫铁矿尾矿为例,在调查该地区尾矿堆放和利用情况的基础上,采用矿渣堆网格捡块采集方法采集样品,利用地球化学与矿物学研究方法,确定了尾矿渣的元素组成和元素分布,指导该地区硫铁矿尾矿资源的利用。同时,该研究对其他同类型矿山尾矿综合利用具有一定的借鉴意义。

1 研究区概况

毕节林口硫铁矿为一特大型硫铁矿床,位于 云贵川三省交界处,距离毕节市城北 67~90 km, 属于毕节市林口镇管辖,交通尚属方便。 1992—2008年期间,区内有10个硫磺矿厂和1个 硫铁矿厂, 由于过度开采, 每年要排泄数以万吨 的废弃矿渣。同时该地区采用"土法炼硫"的工 艺,以硫铁矿(黄铁矿、磁黄铁矿等)为原料, 无烟煤为燃料,通过冶炼炉焙烧制取硫磺60。因此 该地区环境污染严重, 近年来政府采取一些处置 措施来治理堆积硫铁矿尾矿, 其中主要以植被恢 复和筑路为主,一定程度上减少了环境污染,但 硫铁矿尾矿来源比较复杂,有机物含量少,植被 生长缓慢, 所以目前以尾矿库堆存为主, 且由于废 渣堆积面积大, 仍有大量废渣未得到有效治理。 通过野外调查研究发现,研究区内硫铁矿尾矿(渣) 以松散的人工堆积物形式分布于沟谷, 且尾矿

(渣)呈松散的角砾状炉渣状态,结构疏松,气 孔发育,矿渣内矿物以隐晶质一非晶质状态存在, 肉眼及放大镜无法辨认,根据颜色的不同,可将 粗粒矿渣(渣块)分为褐渣、黑渣和红渣三种类 型,且宏观调查发现三种类型的矿渣数量相当。

2 样品采集与实验方法

本次工作在尾矿库 25~50 m 的网格间距内进行系统采样,因尾矿库部分进行复垦,覆土 30 cm 左右,故采集地表-50 cm 矿渣,且样品的采取是根据尾矿库中硫铁矿尾矿渣的颜色、构造、风化程度及采样位置来进行采集,共采集样品 147 件,并选取具有代表性样品 22 件进行测试。并在进行全岩地球化学分析前,将采集的样品根据颜色分为黑样、褐样、红样 3 大类;根据采集样品的宏观矿物成分、构造等特征分为 11 小类,再将所有样品用无污染的玛瑙研磨至-0.074 mm 且分析测试前,取相同质量的粉末根据颜色混合为黑样、褐样、红样用于主量元素的测试。

所有样品的分析测试均在广州澳实分析检测有限公司完成。主量元素测试方法为称取两份试样,一份试样加入含硝酸锂的硼酸锂—硝酸锂熔融助熔剂,充分混合后,高温熔融。熔融物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,然后用 PANalytical PW242 型号 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析。同时另一份试样放入马弗炉中,于 1 000 ℃ 灼烧。冷却后称重,样品加热前后的重量差即是烧失量(LOL) 测试结果周表 1

工堆积物形式分布于沟谷,且尾矿 (LOI)。测试结果见表 1。 表 1 黔西北林口地区不同类型矿渣 XRF 化学分析结果/%
Table 1 XRF chemical analysis results of different types of slags in Linkou area, Northwest Guizhou

样品	Al_2O_3	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P_2O_5	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂
黑样	18.74	0.14	50.19	0.13	0.09	25.75	0.03	3.30
褐样	26.35	0.17	30.51	0.14	0.15	35.42	0.02	4.52
红样	18.32	0.05	54.80	0.07	0.11	23.18	< 0.01	3.16

微量元素的测试方法为:将试样分别用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸消解后,用稀盐酸定容,再用 Agilent 5110 电感耦合等离子发射光谱 (ICP-AES) 进行分析,若 Bi/Hg/Mo/Ag/W 较高,需要做相应稀释,再用 Agilent7900 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 分析。测试结果见表 2。

稀土元素的测试方法为:往试样中加入硼酸锂(LiBO₃/Li₃B₄O₇)熔剂,混合均匀,在熔炉中

于 1 025 ℃ 熔融。待熔融液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸消解并定容,然后用 Agilent7900 等离子体质谱仪 (ICP-MS) 分析,分析结果见表 2。

3 分析结果

3.1 化学成分特征

主量元素含量反映了尾矿的基本物质组成, 尾矿中的氧化物含量是其综合利用需要考虑的重

表 2 黔西北林口地区硫铁矿尾矿渣微量及稀土元素化学分析结果/(µg/g)

	Table 2	Chemical analysis of trace and rare earth elements of pyrite tailings in Linkou area, Northwest Guizhou
--	---------	---

- LV [7]	Table 2 Chemical analysis of trace and rare earth elements of pyrite tailings in Linkou area, Northwest Guizhou												
样品	LK-1	LK-2	LK-3	LK-4	LK-5	LK-6	LK-7	LK-8	LK-9	LK-10	LK-11	均值	C.V
Ag	0.09	0.11	< 0.01	0.12	0.05	0.09	0.26	< 0.01	< 0.01	0.14	0.16	0.13	49.56
As	2.60	1.70	4.00	3.10	2.80	2.80	1.60	3.40	12.30	2.20	1.70	3.47	87.07
Be	4.08	2.92	5.76	3.78	6.13	3.35	3.26	5.81	3.61	3.27	5.02	4.27	27.71
Bi	0.05	0.03	0.32	0.11	0.05	0.04	0.01	0.07	0.43	0.03	0.33	0.13	112.31
Cd	0.96	0.15	3.46	1.71	0.66	0.38	1.55	2.98	0.87	0.08	2.86	1.42	84.15
Co	70.70	72.00	65.00	102.50	25.60	70.80	179.50	7.30	35.50	60.90	68.20	68.91	65.29
Cs	1.09	0.63	0.75	0.64	1.07	0.88	0.48	0.60	1.27	0.56	0.97	0.81	31.81
Cu	140.50	89.40	226.00	210.00	130.50	283.00	348.00	43.10	87.70	157.00	158.00	170.29	52.95
Ge	0.51	0.31	0.27	0.35	0.32	0.29	0.27	0.23	0.39	0.31	0.33	0.33	22.97
In	0.18	0.35	0.22	0.27	0.31	0.40	0.58	0.44	0.25	0.31	0.30	0.33	34.06
Li	85.60	47.90	75.10	28.00	120.00	29.30	67.50	104.00	41.30	50.70	87.70	67.01	45.39
Mn	76.00	60.00	62.00	222.00	72.00	91.00	142.00	135.00	82.00	101.00	37.00	98.18	52.55
Mo	4.16	8.74	6.32	9.68	3.79	5.94	3.78	3.15	6.59	5.72	2.31	5.47	42.25
Ni	110.50	198.00	117.50	178.00	48.40	146.00	225.00	30.90	77.60	127.00	144.00	127.54	47.12
Pb	40.50	14.00	17.30	5.50	28.70	10.60	20.60	17.10	14.00	6.60	106.00	25.54	111.60
V	880.00	752.00	958.00	694.00	1 180.00	705.00	1 030.00	951.00	1 220.00	472.00	780.00	874.73	25.49
Sb	1.16	1.13	2.06	0.28	1.26	0.82	1.00	0.84	3.69	0.41	2.18	1.35	72.12
Sc	22.00	23.10	17.20	18.40	37.80	22.40	21.20	19.20	33.20	19.10	18.20	22.89	28.81
Tl	3.26	1.87	0.46	1.66	0.97	0.99	1.14	0.21	0.42	1.60	1.95	1.32	66.44
W	2.90	2.10	4.00	1.90	3.60	2.90	3.20	4.00	4.10	2.50	2.70	3.08	24.96
Zn	16.00	13.00	39.00	57.00	15.00	19.00	10.00	18.00	17.00	9.00	7.00	20.00	74.57
Ba	140.00	54.30	86.80	90.20	102.00	88.30	77.80	53.30	101.00	55.90	74.50	84.01	30.48
Cr	350.00	330.00	740.00	330.00	750.00	540.00	690.00	760.00	840.00	260.00	530.00	556.36	37.91
Ga	44.60	42.60	45.50	29.90	55.70	36.60	36.10	63.60	152.00	33.20	40.20	52.73	65.15
Hf	17.60	16.80	19.50	11.30	24.20	15.20	13.80	24.50	21.80	14.20	18.60	17.95	23.90
La	168.50	49.30	55.40	54.30	91.60	46.80	52.00	90.00	116.50	73.80	72.00	79.11	46.59
Ce	221.00	117.50	233.00	96.30	261.00	134.50	162.50	250.00	208.00	116.50	176.50	179.71	32.48
Pr	39.50	12.70	15.50	13.50	27.20	13.40	13.35	23.40	28.80	17.75	19.65	20.43	41.75
Nd	149.50	47.00	61.90	53.00	114.00	53.50	50.40	95.80	111.50	65.80	81.10	80.32	41.58
Sm	28.10	8.11	13.30	10.75	26.00	11.25	10.55	18.75	19.95	11.65	18.05	16.04	41.45
Eu	4.98	1.82	3.89	2.43	5.93	2.72	2.54	3.84	5.07	2.42	4.58	3.66	37.09
Gd	15.35	6.44	12.00	8.81	18.95	9.12	8.60	14.75	15.65	7.61	14.50	11.98	34.10
Tb	2.38	1.09	1.86	1.43	2.95	1.49	1.52	2.69	2.58	1.21	2.29	1.95	33.20
Dy	15.00	6.47	10.85	8.36	17.35	8.94	9.55	16.95	15.75	7.40	13.25	11.81	33.78
Но	3.07	1.26	2.12	1.65	3.38	1.74	1.90	3.40	3.27	1.51	2.58	2.35	34.51
Er	9.41	3.55	6.23	4.81	9.96	5.17	5.61	9.94	9.66	4.57	7.52	6.95	34.96
Tm	1.47	0.53	0.96	0.72	1.50	0.77	0.86	1.44	1.42	0.69	1.13	1.04	34.59
Yb	9.13	3.31	6.06	4.41	9.38	4.69	5.46	8.81	8.53	4.37	7.22	6.49	34.05
Lu	1.40	0.51	0.92	0.66	1.45	0.71	0.81	1.30	1.27	0.66	1.10	0.98	34.26
Y	85.20	35.60	63.90	49.60	95.10	51.50	54.70	89.50	107.50	45.80	74.50	68.45	34.08
						-							

注: c.v为变异系数。

要指标,从林口硫铁矿尾矿主量化学元素分析结果(表 1)可以看出,林口地区硫铁矿尾矿综合样中主要成分为 Fe_2O_3 , TFe 平均含量高达 31.62%,

参照《中华人民共和国地质矿产行业标准矿产地质勘查规范铁、锰、铬》(DZ/T 0200—2020)[7] 可知,TFe 已达到较低工业品位,极具利用价值。

其次为 SiO₂,平均含量为 28.12%; Al₂O₃ 的平均含量为 21.37%; 而 TiO₂ 的平均含量为 3.66%,具有潜在利用价值^[8]。其他氧化物主要包括 P₂O₅、 K₂O、SO₃ 和 CaO等,但含量均较低,不具有利用价值。通过数据对比发现,三种颜色渣块中化学成分差异明显。其中褐渣中硅和铝的氧化物含量较高,分别为 35.42% 和 26.35%,但 TFe 含量仅为 21.35%,低于其他类型矿渣;红渣中铁的含量较高,为 38.36%,黑渣的 TFe 含量居中,略低于红渣,为 35.13%,且 Si、Al 元素含量也与红渣大致相似;其他氧化物的在三种颜色类型的渣块中趋于一致,且含量较低。

由于不同元素的含量在数值上差异较大,因此本文运用元素富集系数法^[9-10](富集系数 K=样品元素含量/中国上陆壳元素含量)来定量描述微量元素赋存与亏损状态。根据表 2 发现,林口硫铁矿尾矿中微量元素 Ag、Cd、Co、Cu、In、Mo、Ni、V、Sb、Sc、Cr、Ga、Hf元素明显高于中国上地壳元素含量(图 1),其中 V 平均含量达 874.73 μg/g,参照规范^[8,11]可知,达到边界品位,具有潜在利用价值,但其他元素含量未达到边界品位,暂无潜在利用价值。且由于尾矿长期堆积,重金属元素对环境会造成一定影响,如 Cd 含量为 1.42 μg/g,Cu 含量为 170.29 μg/g,Ni 含量为 127.54 μg/g,且变异系数(C.V)普遍较高,因此在综合利用时需着重考虑。

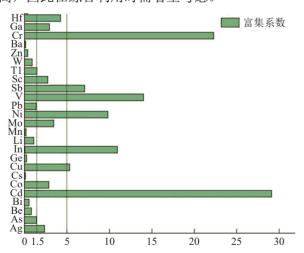


图 1 林口硫铁矿尾矿微量元素相对中国上陆壳的富集 系数

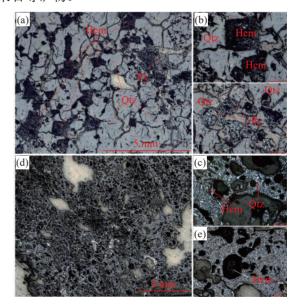
Fig.1 Enrichment coefficient of trace elements in Linkou pyrite tailings relative to the upper continental crust of China

由表 2 可知,林口硫铁矿尾矿中稀土元素平 均含量较高,且变化较大,∑REY 变化范围在 295.2~754.0 μg/g,平均含量为 491.27 μg/g。LREY 变化范围为 242.87~626.93 μg/g,平均为 391.25 μg/g,HREY 变化范围为 52.32~149.98 μg/g,平均 变化范围为 100.02 μg/g。LREY/HREY 变化范围为 3.34~4.93,平均为 3.95,表明轻稀土较重稀土富集,参照《中华人民共和国地质矿产行业标准矿产地质勘查规范 稀土矿产地质勘查规范》(DZ/T 0204—2002)[12],林口硫铁矿尾矿中稀土元素具有潜在利用价值。

3.2 矿物成分特征

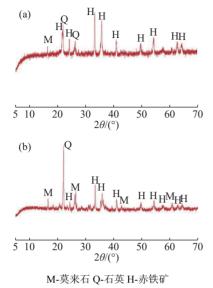
元素在岩石中的赋存状态是尾矿综合利用的一项重要参考指标,为了查明硫铁矿尾矿中的矿物种类,本文利用光学显微镜、X射线衍射实验(XRD)和扫描电镜(SEM)对尾矿进行物相分析,以上实验均在贵州大学完成。

通过光学显微观察发现(图 2),研究区硫铁矿尾矿主要由石英和赤铁矿组成,部分还含有未充分提取的黄铁矿(图 2c),其中未充分燃烧的硫铁矿尾矿中的赤铁矿具有良好晶型,而充分燃烧的尾矿无法识别矿物,因此运用 XRD 分析法对林口硫铁矿尾矿进行分析,根据典型样品的XRD 分析结果(图 3)可知,硫铁矿尾矿除含有赤铁矿、石英外,还有少量褐铁矿、锐钛矿、莫来石等矿物。



Hem-赤铁矿 Qtz-石英 Py-黄铁矿
Hem-hematite Qtz-quartz Py-pyrite
图 2 硫铁矿尾矿主要矿物组成
Fig.2 Main mineral composition of pyrite tailings

为了进一步查明可利用元素的矿物特征,对

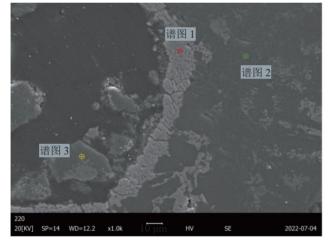


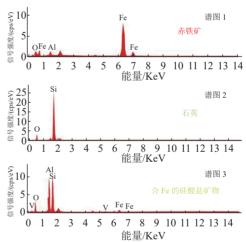
M-mullite Q-quartz H-hematite 图 3 硫铁矿尾矿的 XRD Fig.3 XRD patterns of pyrite tailings

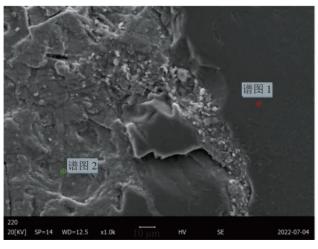
样品进行扫描电镜观察,通过图 4 发现 Fe 主要赋 存在赤铁矿和少量褐铁矿中, 赤铁矿颗粒不纯, 含有少量 Al、Ti、Si,可能对选矿产物铁精矿的 质量造成一定影响; Ti 主要以 TiO, 形态赋存在锐 钛矿中, 但粒度及其细小, 对含钛矿物的选钛工 作还需进一步研究。

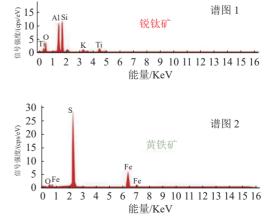
资源潜力分析

黔西北地区硫铁矿尾矿的堆存量较大, 根据 中国地质科学院矿产资源研究所调查报告及毕节 七星关区林口镇历史遗留炼硫废渣环评报告等资 料得知, 毕节林口地区硫铁矿尾矿堆存量为 7 335.72 万 t^[13],这不仅浪费资源和占用土地,还 给环境造成一定的危害, 所以硫铁矿尾矿的综合 利用一直是可持续发展的必然选择, 且当地硫磺 厂生产硫磺所用硫铁矿的类型相同、炼硫工艺相









锐钛矿

谱图1

图 4 硫铁矿尾矿 SEM-EDS Fig.4 SEM-EDS of pyrite tailings

同、废渣组构也相同,不需要采矿、破碎和磨矿作业,是宝贵的二次资源^[14],具有极高可综合利用的可能性;随着选冶矿技术较之前的提高,使其具有较高的回收价值,如邹峰等(2020)根据铁尾矿工艺矿物学性质,采用处理高梯度磁选-浮选联合工艺处理攀枝花白马铁尾矿,最终获得TiO₂ 品位 47.31%、回收率 39.52% 的钛精矿产品,该技术的开发为后期铁矿尾矿资源化的开发提供了技术支撑^[15];攀钢集团矿业公司经过几十年的发展,对铁尾矿的回收具有较成熟的技术,目前已经具有年回收铁精矿 10 万 t、30 万 t 钛精矿的生产能力^[16]。当然尾矿的综合利用不仅局限于此,目前硫铁矿尾矿的综合利用主要有以下几种途径:

硫铁矿尾矿进行减量化资源化处理,回收和综合利用有用资源,是处理尾矿的重要途径。因此本文的核心工作是对毕节林口地区硫铁矿尾矿的资源量进行评价,具体方法为:根据尾矿样品的测试数据,依照金属元素品位要求标准,选出尾矿库中具有潜在利用价值的元素,用元素平均含量(C)乘以尾矿库中尾矿的质量(R),估算尾矿中有用元素的质量(M),即M=C*R。

对照金属元素品位要求,毕节林口地区废弃硫铁矿尾矿中有价元素 TFe、 TiO_2 、V 及稀土元素的含量平均值大于边界品位及工业指标要求,其中 TFe 平均含量为 31.62%,已达到工业品位,估算 TFe 金属量为 2 319.55 万 t; TiO_2 平均含量为 3.66%,估算资源量为 268.49 万 t; V 平均含量为 874.73 μ g/g,估算资源量为 6.42 万 t; 稀土元素含量 491.27 μ g/g,估算资源量为 3.6 万 t(表 3)。

表 3 毕节林口地区尾矿库中有用元素潜在资源 估算结果

Table 3 Estimation results of potential resources of useful elements in tailings pond in Linkou area, Bijie

	C I		, ,
元素	平均含量	尾矿量/万t	资源量/万t
Fe_2O_3	31.62%		2 319.55
TiO_2	3.66%	7 335.72	268.49
V	874.73 μg/g	1 333.12	6.42
∑REY	491.27 μg/g		3.60

除了对有价元素的回收外,研究区内的硫铁矿尾矿还可通过复垦种植农作物、加工成建筑材料或充填采空区等途径来消纳,其中尾矿复垦是农业生产中较重要的应用,常用生物法和微生物

法两种方法进行复垦,目的是为降低土壤中可溶 性重金属含量[17]。但在实际应用中需尾矿的复垦 需要大量良好土壤,而且运输成本较高,目前在 研究区内难以广泛推广;而研究区硫铁矿尾矿中 的化学成分主要以铁、硅、铝、钙、镁的氧化物 为主,含少量钾、钠、硫的氧化物,与建筑材料 十分相近, 因此硫铁矿尾矿在建材业的广泛应用 提供了前提条件,可作为制砖、生产水泥、制备 混凝土、微晶玻璃等建材的原材料,目前已有较 多学者对硫铁矿尾渣进行处理利用, 并取得较好 的成果,如叶巧明等[18]利用川南硫铁矿尾矿配比 一定成分在 1 200~1 400 ℃ 条件下制备出性能优 异的硫铝硅酸盐系列水泥: 冯卡等[19] 发现硫铁矿 尾矿矿渣掺量取 20% 以及混凝土的水灰比取 0.40 时获得抗压强度较好的改良混凝土;李智 等[20] 选择 CMAS 系统,以川南硫铁矿尾矿为原 料,引入ZrO₂、P₂O₅、CaF₂,同尾矿中的TiO₂构 成复合晶核剂,配合料混合均匀后,在一定的条 件下,制得了以透灰石为主晶相的微晶玻璃;充 填采空区是尾矿综合利用最直接的方式, 也是尾 矿减量化极为有效的手段,在确定无资源潜力的 尾渣也可采取该种方法进行处理,以缓解长期堆 放对环境的危害。

5 结 论

- (1)贵州省毕节林口地区硫铁矿尾矿主要化学成分包括: Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和少量的 P_2O_5 、 K_2O 、 SO_3 、CaO等。由于经过高温选矿,尾矿中矿物相发生改变,矿物主要为赤铁矿和褐铁矿,脉石矿物包括石英、莫来石、透长石、石膏、脱硫不完全矿物磁黄铁矿及残留矿物黄铁矿。
- (2)林口地区硫铁矿尾矿中的 Fe、Ti、V 和稀土元素达到边界品位,具有潜在利用价值。其中 TFe 含量较高,达到最低工业品位,且主要赋存在赤铁矿中,根据估算林口地区 TFe 金属量2319.55 万 t,具有较高的综合利用价值。针对硫铁矿尾矿的消纳还可通过充填采空区、复垦种植农作物和加工成建筑材料等途径。

参考文献:

[1] 朱欣然, 乔江晖, 李文超, 等. 全国矿产资源节约与综合利

用报告 (2021)[M]. 北京: 中国地质出版社, 2021.

ZHU X R, QIAO J H, LI W C, et al. National report on conservation and comprehensive utilization of mineral resources (2021) [M]. Beijing: China Geological Publishing House, 2021.

[2] 甘永刚. 安徽某硫铁矿烧渣铁的综合利用研究[J]. 矿产保护与利用, 2013(2):22-25.

GAN Y G. Study on comprehensive utilization of cinder iron from a pyrite mine in Anhui province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2013(2):22-25.

[3] 王全亮. 硫铁矿烧渣综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

WANG Q L. Study on comprehensive utilization of pyrite cinder [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.

[4] 李诗强, 李涛, 张慧. 硫铁矿尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国金属通报, 2021(8):29-30.

LI S Q, LI T, ZHANG H. Development status and prospect of comprehensive utilization of pyrite tailings[J]. China Metals Bulletin, 2021(8):29-30.

[5] 邢凯, 朱清, 邹谢华. 我国铁素资源供给态势分析[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(08):27-37.

XING K, ZHU Q, ZOU X H. Analysis of supply situation of iron resources in China[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(08):27-37.

[6] 崔雅婷. 高岭石型硫铁矿浮选尾矿的几种资源化利用工艺研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.

CUI Y T. Study on several technologies of resource utilization of kaolinite-type pyrite flotation tailings[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.

[7] 中华人民共和国自然资源部. 矿产地质勘查规范 铁、锰、铬: DZ/T 0200-2020 [S]. 北京: 地质出版社, 2020.

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Code for geological exploration of mineral resources iron, manganese and chromium: DZ/T 0200-2020 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020

[8] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册 (2022 年修订本)[M]. 北京: 地质出版社, 2022.

Editorial Board of Manual of Requirements for Mineral Resources Industry. Requirements Manual of Mineral Resources Industry (Revised edition in 2022) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022.

[9] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994(2):140-145.

LI T. Elements abundances of China's continental crusta and its sedimentary layers and upper continental crust[J]. Geochimica, 1994(2):140-145.

[10] 雷志远, 王登红, 李沛刚, 等. 务川大竹园铝土矿床微量元素地球化学特征分析[J]. 贵州地质, 2012, 29(4):249-258.

LEI Z Y, WANG D H, LI P G, et al. Analyses on geochemical characteristics of trace elements of Dazhuyuan bauxite deposit in Wuchuan [J]. Guizhou Geology, 2012, 29(4):249-258.

[11] 中华人民共和国自然资源部. 钒矿地质勘查规范: DZ/T 0322—2018 [S]. 北京: 地质出版社, 2018.

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Code for geological exploration of vanadium ore: DZ/T 0322-2018 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[12] 中华人民共和国国土资源部. 稀土矿产地质勘查规范: DZ/T 0204—2002 [S]. 北京: 地质出版社, 2002.

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2002. Standard for geological exploration of rare earth minerals: DZ/T 0204-2002 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.

[13] 张佳文, 赵元艺, 骆检兰, 等. 滇东北镇雄硫磺矿区环境 地质问题及其对策与意义[J]. 地球学报, 2019, 40(2):329-338.

ZHANG J W, ZHAO Y Y, LUO J L, et al. Environmental geological problems in Zhenxiong sulfur mining area of Northeast Yunnan province and their countermeasures and significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(2):329-338. [14] 张佳文, 刘冠男, 王裕先, 等. 我国硫铁矿固废综合利用及其环境意义[J]. 中国矿业, 2022, 31(1):61-67.

ZHANG J W, LIU G N, WANG Y X, et al. Comprehensive utilization of pyrite solid wastes in China and its environmental significance[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(1):61-67.

[15] 邹锋, 殷志刚, 陈思竹. 攀枝花白马选铁尾矿综合回收利用研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):19-25.

ZOU F, YIN Z G, CHEN S Z. Research on comprehensive utilization of iron tailings from Baima Panzhihua[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):19-25. [16] 袁东. 攀枝花尾矿资源综合利用现状及发展前景浅析[C]. 第十届中国科协年会论文集 (二), 2008: 171-174.

YUAN D. Analysis on the present situation and development prospect of comprehensive utilization of Panzhihua tailings resources [C]. Proceedings of the 10th Annual Conference of China Association for Science and Technology (II), 2008: 171-174.

[17] 易龙生, 米宏成, 吴倩, 等. 中国尾矿资源综合利用现

状[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3):79-84.

YI L S, MI C H, WU Q, et al. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3):79-84.

[18] 叶巧明, 刘建, 张其春. 川南煤系硫铁矿尾矿高岭土综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2002 (1): 41-45.

YE Q M, LIU J, ZHANG Q C. Comprehensive utilization of kaolin in coal measure pyrite tailings in Southern Sichuan [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2002 (1): 41-45. [19] 冯卡, 王馨语. 硫铁矿尾矿矿渣改良混凝土力学性质与

耐久性[J]. 矿产综合利用, 2022(3):6-11+16.

FENG K, WANG X Y. Research on mechanical properties and durability of concrete improved by pyrite tailings and slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3):6-11+16.

[20] 李智, 张其春, 叶巧明. 利用硫铁矿尾矿制备微晶玻璃[J]. 矿产综合利用, 2007(1):42-45.

LI Z, ZHANG Q C, YE Q M. Preparation of glass-ceramics using pyrite tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2007(1):42-45.

Resource Potential Analysis of Pyrite Tailings in Linkou Area of Bijie, Guizhou Province

SUN Baichuan, YANG Ruidong, LUO Chaokun, LI Xinzheng

(School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guizhou, Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Pyrite tailings in sulfur mining area are the main solid wastes, which not only take up a lot of land resources, but also have an impact to the environment. Linkou area in Bijie, northwest Guizhou, has a history of several decades of sulfur refining using the local method, and a large amount of sulfurous iron ore tailings have been piled up, and the analysis of the data and the field survey found that 73,357,200 t of sulfurous iron ore tailings are piled up at present. The main trace and rare earth elements (REE) of pyrite tailings in this area were tested by using the method of tailing geochemical exploration. It was found that TFe, Ti, V and REY in pyrite tailings have reached the boundary grade, which has potential utilization value. Through X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) tests, it is found that the minerals of pyrite tailings in this area are mainly quartz and hematite, and the content of TFe is $21.36\% \sim 38.36\%$, which is equivalent to piling up a large hematite deposit, and has a good utilization prospect. Combined with the relevant literature, the paper puts forward to some suggestions for the comprehensive utilization of pyrite tailings in this area. The study has certain reference significance for the comprehensive utilization of the same type of mine tailings.

Keywords: Bijie, Guizhou; Pyrite tailings; Tailings composition characteristics; Resource volume estimation; Comprehensive utilization