

攀枝花钒钛磁铁矿尾矿资源特征及综合利用建议

刘应冬^{1,2}, 魏友华², 陈超¹, 林建³, 李潇雨¹, 朱志敏¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041; 2. 数学地质四川省重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 川威集团矿业总公司, 四川 成都 610059)

摘要:这是一篇矿业工程领域的论文。攀枝花是我国最大的钒钛磁铁矿资源基地, 随着钒钛资源的开发利用, 产出了巨量的尾矿, 不仅占用大量土地, 而且有用成分未能够被充分利用, 造成资源浪费, 同时还存在一定的安全、环境风险。本文选取了攀枝花地区22个具有代表性的尾矿库, 开展尾矿资源潜力、有价元素赋存特征、可利用性、经济价值等系统研究。分析表明: 攀枝花尾矿中含有大量的有价成分, 潜在资源量巨大。其中铁金属量5200万t, 平均品位10.87%, 钛金属量为2907万t, 平均品位6.08%, 稀土金属量13.03万t, 平均品位272 g/t, 钴金属量4.23万t, 平均品位88 g/t, 钨金属量1.221万t, 平均品位26 g/t, 五氧化二磷总量249万t, 平均品位0.52%。矿尾矿资源的综合利用主要有两个方向, 一是二次开发利用, 先进行铁、钛、硫、钴、磷等有价元素的回收利用; 二是整体利用, 在二次回收利用的基础上进行适当调配用于生产保温建筑材料、水泥、陶瓷、玻璃、耐火材料、土壤改良剂、混凝土和建筑用砂等。从而实现尾矿整体利用, 最终解决尾矿资源化、减量化、无害化问题。

关键词: 矿业工程; 钒钛磁铁矿; 攀枝花; 尾矿资源; 二次回收; 整体利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.005

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0035-07

矿产资源是人类社会赖以生存和发展不可缺少的物质基础。它既是人们生活资料的重要来源, 又是极其重要的社会生产资料^[1]。而我国大多数铁矿资源的品位较低, 必须要经过破碎、磨矿和分选得到精矿后才能冶炼^[2]。通常情况下, 铁尾矿是指选矿厂在特定的经济技术条件下, 将矿石破碎、筛分、研磨、分级、再经重选、磁选(或加浮选)和化选等选别工艺流程, 回收铁精矿后排放的固废弃物^[3-4]。尾矿等固体废弃物的大量堆存, 不仅占用大量土地, 而且尾矿中的有用成分未能够被充分利用, 造成资源浪费, 同时对广大人民的生命财产安全产生严重威胁^[5-6]。以往的矿山开采过程中, 由于开发利用技术、设备落后等因素的限制导致大量有价元素随同尾矿一起被废

弃, 因此尾矿具有巨大的潜在利用价值。在大力推进资源节约集约利用、加快建设生态文明的今天, 一个重要的任务就是要开发利用好长期搁置的大量尾矿资源。

攀枝花是我国钒钛磁铁矿的主要成矿带, 蕴藏着极其丰富的钒钛磁铁矿资源, 也是世界上同类矿床的重要产区之一。从南至北主要由攀枝花、红格和白马三大矿区构成。钒钛磁铁矿保有储量超过70亿t^[7]。经过近五十年的资源开发产生了巨量的固体废弃物, 其中尾矿是重要的固体废弃物之一。攀西钒钛磁铁矿尾矿库中尾矿的特点是, 矿物成分复杂, 伴生元素众多, 尾矿中除含有数量可观的钒、钛外, 还含有值得回收的铁、铜、钴、镍、磷、钨等战略性矿产^[8-11]。据不完全

收稿日期: 2023-06-10

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(DD20230341, DD20230039); 国家自然科学基金战略性矿产资源开发利用专项(2021YFC2900800); 数学地质四川省重点实验室开放基金资助课题(scsxdz2022-08)

作者简介: 刘应冬(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事地质找矿及矿山环境地质调查研究。

统计, 三大矿区资源开发共形成大小尾矿库 52 个, 尾矿累积堆存量约 5.7 亿 t^[12], 尾矿堆存不仅占压了大量的土地资源, 对环境造成了重大的影响, 还存在很大的安全隐患。近年来, 一些研究者^[13-16]对承德和攀枝花钒钛磁铁矿尾矿开展了综合利用研究, 但都集中于个别尾矿中钛铁矿的资源化利用, 尚未解决区域性的尾矿资源特征及规模化利用问题。本文选取攀枝花地区典型的 22 个具有代表性的尾矿库, 开展尾矿资源潜力、有价元素赋存特征、可利用性、经济价值等系统研究, 为钒钛磁铁矿尾矿修复治理提供依据。

1 样品采集及分析测试

攀枝花钒钛磁铁矿尾矿库大多数是典型的上游式尾矿库。上游式尾矿库是我国目前普遍采用的方法, 据统计我国有色金属矿山的尾矿库 80% 是采用该方法筑坝^[17]。上游式尾矿库的整个沉积尾矿剖面可以分成粗、中、细若干个沉积区^[18]。并且由于尾矿粒度、矿浆成分、浓度、流量等变化, 使尾矿沉积层出现粗细相间的夹层、互层、交错、透镜体、千层饼等现象, 结构上表现为不均一性和各向异性^[19]。

尾矿库调查可分为概查和详查两种方法。概查是指以人工开挖方式采集 0~数米的表浅层尾矿样, 或以洛阳铲在尾矿库合理布设勘探孔取样。详查则是指通过布设浅钻工程, 获得尾矿库不同部位、不同深度(控制不同采矿期)尾矿样品的调查工作^[20]。一般而言, 尾矿元素和矿物组成与尾矿库类型和排砂口位置密切相关, 排砂口一般位于坝体上。攀枝花钒钛磁铁矿尾矿库主要以山谷型尾矿库为主, 通常是单面筑坝, 不同时期排砂口位置及排砂方向较为一致, 其元素在横向上有明显的分异现象^[19]。因此, 本次工作以概查为主, 采用多条垂直于子坝的平行剖面以控制整座尾矿库, 剖面线距一般为 50~100 m, 点距 30~50 m。大致较均匀控制整个尾矿库库区为原则, 每件样品以方圆 10 m 内的 5 个以上采样点组合而成, 分别编号装袋。共调查尾矿库 22 座, 调查的尾矿堆存量 4.7 亿 t, 共采集尾矿样品 118 件, 样品具有代表性。

尾矿的测试分析主要包括粒度筛析、化学分析、物相分析等, 上述测试分析均在中国地质科

学院矿产综合利用研究所实验室进行。

2 尾矿资源特征

经实验室分析, 攀枝花尾矿中含有大量的有价成分, 见表 1, 潜在资源量巨大。其中铁金属量 5200 万 t, 平均品位 10.87%, 在中天矿业尾矿库最高品位可达 16.78%; 钛金属量为 2907 万 t, 平均品位 6.08%, 最高品位 10.90%, 另外经质白沙沟、秀水河漂水崖、中天矿业、中钛矿业有限公司、三友尾矿库、龙麟芥地箐尾矿库 TiO₂ 品位接近原矿品位, 可能早期选矿作业未进行钛的回收, 这些尾矿库二次回收钛的经济潜力巨大。稀土金属量 13.03 万 t, 平均品位 272 g/t, 钴金属量 4.23 万 t, 平均品位 88 g/t, 钨金属量 1.221 万 t, 平均品位 26 g/t, 五氧化二磷总量 249 万 t, 平均品位 0.52%。由此可知, 早期排放的尾矿中仍然有较多的有用矿物从强磁选尾矿或浓缩溢流作业排入尾矿中。

为查清各样品的矿物组成成矿, 选取芥地箐尾矿库样品进行了 AMICS 分析。矿物相组成分析结果见表 2。芥地箐尾矿库中主要有用矿物为钛磁铁矿、钛铁矿、硫化物、磷灰石等, 主要脉石矿物为辉石-钛辉石、橄榄石、长石、云母、角闪石等, 具有二次综合回收利用的前提。

3 综合利用建议

从表 1 可知, 攀枝花尾矿中含有大量的有价成分, 部分尾矿库中的钛品位甚至接近原矿品位。由于攀枝花钒钛磁铁矿开发历史悠久, 早期的选矿工艺水平有限, 存在资源利用水平不高、部分有用资源未提取等历史问题, 大量的有价元素被抛尾。因此, 本文针对攀枝花地区的钒钛磁铁矿尾矿资源特点, 提出了有价元素回收利用, 剩余组分整体利用的方案, 可实现全组分回收利用, 主要应用途径有以下几方面。

3.1 有价元素综合利用

攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中除主要的铁和钛以外, 还伴生有一定量的稀土、硫钴、钨、磷等资源, 均具有一定的综合利用价值。许多研究者对各元素的综合利用做了大量的研究工作。杨耀辉等^[21]针对红格矿区低品位细粒级难选橄辉岩型钒钛磁铁矿石, 矿石破碎至-3 mm 经湿式预选抛尾,

可以获得铁品位为 21.05%、回收率为 83.61% 的预选精矿，抛除产率为 41.12%、铁品位为 5.91% 的废石。预选精矿经磨矿-弱磁选-搅拌磨再磨-弱磁粗选-磁团聚重选机精选，可以获得铁品位为 57.25%、回收率为 46.54% 的精矿，铁精 TiO₂ 含量为 9.55%。邓建等^[22] 针对攀西某选铁尾矿进行

了钛铁矿浮选药剂优化实验研究，经过捕收剂、抑制剂、硫酸等药剂优化实验，利用硫酸+EMA+MOH，通过磁选除铁-浮选脱硫+一粗一扫五次精选选钛流程，闭路实验可以获得钛精矿产率 25.18%，TiO₂ 品位 46.48%，回收率 71.31% 的良好指标。

表 1 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿调查结果
Table 1 Survey results of Panzhihua vanadium-titanium magnetite tailings

序号	尾矿库名称	剖面号	TFe/%	TiO ₂ /%	TREO/(g/t)	S/%	Co/(g/t)	Sc/(g/t)	P ₂ O ₅ /%	堆存量/万t
1	白马青岗坪	L01	9.70	3.30	86.1	0.56	95.9	26.5	0.26	3456
2	白马万碾沟	L01	11.15	3.32	73.0	0.49	95.0	15.7	0.092	6655
		L02	11.42	3.42	42.7	0.38	112	14.6	0.092	
3	经质白沙沟	L01	8.80	7.40	646	0.19	68.5	26.6	0.61	1556
		L01	12.01	5.36	507	0.27	124	23.1	0.79	
4	白草油房沟	L02	13.79	8.44	897	0.57	109	21.6	0.68	2268
		L03	13.40	6.25	539	0.32	110	21.2	0.76	
		L01	9.45	5.60	357	0.53	74.0	15.7	1.46	
5	潘家田南坝山	L02	9.46	5.22	302	0.42	65.2	19.4	1.10	2187
		L03	11.38	3.53	68.1	0.57	99.5	17.1	0.099	
		L01	11.09	6.84	149	0.068	87.8	30.0	0.32	
6	秀水河三道拐	L02	10.18	5.91	132	0.11	82.2	32.4	0.28	1019
		L01	13.09	8.71	152	0.20	170	29.0	0.40	
7	秀水河漂水崖	L01	13.09	8.71	152	0.20	170	29.0	0.40	455
8	一立钒钛	L01	9.05	4.16	57.0	0.23	59.9	30.4	0.10	1164
9	中天矿业	L01	16.78	10.26	136	0.18	134	28.0	0.24	99
10	天龙尾矿库	L01	10.45	6.46	160	0.026	100	38.9	0.18	240
		L01	11.75	8.29	383	0.34	63.8	23.5	0.84	
		L02	12.05	9.45	368	0.054	67.3	26.5	0.40	
		L03	8.83	4.77	318	0.042	61.8	26.0	1.33	
11	中钛矿业有限公司	L04	11.10	8.19	210	0.21	138	22.3	0.58	463
		L01	9.71	4.47	257	0.26	103	29.3	0.28	
		L02	9.48	4.02	257	0.24	96.5	29.8	0.27	
		L01	9.87	5.43	385	0.052	60.6	14.8	1.39	
12	龙蟒牛望田	L01	10.15	5.02	43.8	0.45	77.4	33.6	0.042	21467
		L02	9.40	5.81	42.6	0.42	83.2	32.6	0.042	
13	远达矿业	L01	9.87	5.43	385	0.052	60.6	14.8	1.39	378
14	攀矿马家田	L01	10.15	5.02	43.8	0.45	77.4	33.6	0.042	21467
15	红发尾矿库	L01	9.33	4.81	220	0.12	65.7	31.7	0.34	427
16	鑫元尾矿库	L01	9.56	4.98	213	0.091	76.3	32.7	0.40	65
17	三友尾矿库	L01	8.95	10.38	313	0.043	100	24.9	0.72	75
18	忠发干堆场	L01	8.53	4.23	334	0.042	67.3	25.8	0.53	101
19	先力矿业	L01	8.85	4.38	234	0.25	54.6	22.6	0.57	258
20	二滩拉扯沟	L01	12.23	4.54	358	0.065	47.9	24.8	0.61	390
21	二滩尾矿库	L01	12.54	6.76	284	0.087	85.8	25.7	0.41	235
22	龙蟒莽地管	L01	15.28	10.90	466	0.28	82.90	26.35	1.01	693.3
潜在资源量(万t)			5200.46	2907.57	13.03	118.27	4.23	1.22	249.68	47829
平均品位			10.87	6.08	272.43	0.25	88.46	25.55	0.52	

表 2 荞地箐尾矿库矿物相组成分析
Table 2 Mineral phase multipurpose analysis of Qiudiqing tailings pond

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
钛磁铁矿	7.57	云母	1.6
钛铁矿	19.59	角闪石	0.94
磁黄铁矿	0.06	绿泥石	0.69
黄铁矿	0.8	帘石	0.25
蓝铜矿-斑铜矿	0.23	石榴石	0.56
磷灰石	2.12	石英	0.09
赤、褐铁矿	30.37	楣石	0.06
辉石-钛辉石	43.27	黏土矿物	0.04
橄榄石	5.34	锆石	0.04
长石	16.31		

邓杰等^[23]研究了从攀西某钒钛磁铁矿选铁尾矿中回收硫钴资源的关键因素和工艺流程,采用浮选—精矿再磨再选—高场强阶段磁选工艺可以得到含钴 0.40%、含硫 50.45% 的钴硫精矿,钴和硫回收率分别为 6.74% 和 19.07%,同时得到含硫 37.23%、硫回收率 20.81% 的硫精矿。朱志敏等^[24]针对攀枝花红格矿区正长伟晶岩脉稀有-稀土矿石,采用“弱磁选铁-强磁重选预富集-浮选选钛,强磁尾矿阶段强磁富集-浮选精选稀土”流程,应用铁、钛、稀土协同提取加工流程,处理 Fe、TiO₂ 含量分别为 18.48% 和 7.40%,稀土 REO 含量为 158 g/t 伴生稀土的钒钛磁铁矿样品,初步获得铁精矿品位为 60.96%,回收率为 38.07%,稀土经过富集后 REO 含量为 0.36%,浮选精选实验可获得稀土精矿 REO 含量为 39.63%,对原矿稀土 REO 回收率为 27.99%。王浚杰^[25]对攀西钒钛磁铁矿尾矿进行了回收钽的实验研究。采用碳酸钠碱熔融焙烧-浸出工艺和氟化物溶解-尾矿,钽浸出率分别为 60.94% 和 72.22%。与碱熔融焙烧-浸出工艺相比,氟化物溶解-浸出工艺省去了繁琐耗能的焙烧工序,含钽尾矿直接与氟化物结合进行浸出,钽浸出率更高。陈超^[26]对攀西某钒钛磁铁矿尾矿含 P₂O₅ 品位 0.87% 的矿石进行了浮选选硫、弱磁选铁、强磁选钛以后,获得了 P₂O₅ 含量为 1.41% 的选磷原料。对该原料进行一粗一扫三精的浮选实验,获得了 P₂O₅ 品位为 31.73%、浮选作业回收率为 92.56% 的合格磷精矿,对原料回收率为 72.55%。

对传统工艺的优化改进,新技术和装备的开发,浮选药剂的优化,上述研究为攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中钛、铁、稀土、硫、钴、钽、磷等

资源的回收利用成为了可能。

3.2 剩余组分整体利用

研究表明,通过系统的有价元素回收实验,能够减少尾矿排放量约 20% 左右,相对于攀枝花庞大的尾矿堆存量,依然是杯水车薪。攀枝花地区钒钛磁铁矿尾矿的主要化学成分有硅、铝、钙、镁的氧化物和少量钾、钠、铁、硫的氧化物(见表 2)。其中硅、铝含量较高,且 80% 以上都是非金属矿物,与建筑材料十分相近,这就为尾矿在建材业的广泛应用提供了前提条件^[27]。通常只要掺加少量其他原料,进行适当调配,便可用做许多建筑材料的原料。用作建筑材料是尾矿资源化、减量化的重要途径之一,可用在生产保温建筑材料、水泥、陶瓷、玻璃、耐火材料等,并可以用做混凝土粗细骨料和建筑用砂。但用作建筑材料也存在产品价值较低,运输半径有限,消耗量较少,难以大规模整体利用的问题。需要制备附加值更高的建筑材料,以促进尾矿资源的整体消纳利用。

李林等^[28]以攀西钒钛磁铁矿尾矿和废玻璃为主要原料通过高温烧结法制备储水泡沫陶瓷,50.0% 的钒钛磁铁矿尾矿和 50.0% 的废玻璃为原料,外加 3.0% 的石英,0.3% 的 SiC,3.0% 的 Na₃PO₄,在 1040 °C 制得性能较优的储水泡沫陶瓷,材料的体积密度为 0.26 g/cm³,体积吸水率为 56.5%,抗压强度为 0.68 MPa。采用 SEM、XRD 等检测手段研究材料的微观形貌及物相组成,结果表明储水泡沫陶瓷内部由三维立体结构组成,有利于储存水分。刘海军等^[29]将钒钛磁铁矿尾矿用作水泥混合材,利用机械活化和化学活化的方法,提高了尾矿的反应活性,采用球磨时间 5 h 或以石灰为激发剂的条件,可明显提高尾矿的反应活性。机械活化的效果明显优于化学活化,掺入 35% 尾矿(球磨 5 h 后)的水泥砂浆性能达到了 GB 175-2007《通用硅酸盐水泥》中 42.5R 复合硅酸盐水泥的标准。杨飞等^[30]利用钒钛磁铁矿尾矿、石灰石及石英砂为原料,采用钒钛磁铁矿尾矿:石灰石:石英=20:75:5 的工艺条件,混合料经 1400 °C 煅烧 30 min 后,可制备出性能优于 42.5R 普通硅酸盐水泥标准的熟料。李华彬等^[31]以钒钛磁铁矿尾矿为主要原料经过科学配方及合理的烧成工艺制度成功地研制出性能优异的尾矿瓷质砖,并进行了工业性生产,产品性能达到或超过 EN176-91 标准。还可以制备建筑用轻质隔墙条板,以质量配比为钒钛

磁铁矿尾矿比长石比二氧化硅比高岭土=65:20:10:5为基准,外加0.1%发泡剂碳化硅、3%稳泡剂磷酸钠和3%助熔剂四硼酸钠,其热处理制度为:113℃下保温60min,并随炉降温。样品性能为体积密度为0.59g/cm³,吸水率为2.45%,抗压强度3.88MPa,符合国标GB/T 23451-2009部分性能要求^[12]。还可用作土壤改良剂及微量元素肥料,尾矿中往往含有Fe、Cu、V、B、P等元素,这正是维持植物生长和发育的必需元素,可以作为土壤改良剂或微量元素肥料^[32]。

综合利用可最大化实现尾矿价值,既使尾矿中有价金属得到回收利用,又使尾矿得到整体规模化利用,是今后尾矿资源化、减量化、无害化利用研究的一个重要方向^[33]。

4 结 论

(1) 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中含有大量的有价成分,潜在资源量巨大。据调查的22个典型尾矿库,其中铁金属量5200万t,平均品位10.87%;钛金属量为2907万t,平均品位6.08%;稀土金属量13.03万t,平均品位272g/t;钴金属量4.23万t,平均品位88g/t;钨金属量1.221万t,平均品位26g/t;五氧化二磷总量249万t,平均品位0.52%。

(2) 攀枝花地区的钒钛磁铁矿尾矿资源的综合利用主要有两个方向,一是二次开发利用,攀枝花地区大部分尾矿资源具备综合利用价值,可进行铁、钛、硫、钴、磷等有价元素的二次开发利用,二次利用不仅减少了资源浪费,增加企业利润,还能整合星罗棋布的大量小尾矿库,减少土地资源占用,减小安全隐患风险;二是整体利用,在二次回收利用的基础上进行适当调配,便可做许多建筑材料的原料,主要用在生产保温建筑材料、水泥、陶瓷、玻璃、耐火材料、土壤改良剂、混凝土和建筑用砂等。

(3) 总之,攀枝花钒钛磁铁矿尾矿量巨大,含有大量有价元素,可进行尾矿再选,再进一步加工形成建筑材料或土壤改良剂,整体利用的产品往往附加价值不高,难以有效解决尾矿所带来的问题,因此,未来研究尾矿资源化问题,需要因地制宜,注重开发高附加值产品,实现尾矿整体利用,最终解决尾矿资源化、减量化、无害化问题。

参考文献:

- [1] 李玉凤,包景岭,张锦瑞.铁尾矿资源开发利用现状分析[J].中国矿业,2015,24(11):77-81+121.
- [2] 唐湘华.锡矿山锑矿保安矿柱安全开采技术研究与应用[J].湖南有色金属,2015,31(1):5-7.
- [3] 杨小平,祝禄发,于水.重要建(构)筑物下保安矿柱开采实验研究[J].采矿技术,2012,12(5):7-8+24.
- [4] 翟文斌.探采结合在锡矿山锑矿开采中的实践[J].湖南有色金属,2015,31(2):5-7+10.
- [5] 雷力,周兴龙,李家毓,等.我国钨山尾矿资源综合利用现状与思考[J].矿业快报,2008(9):5-8.
- [6] 蒲含勇,张应红.论我国矿产资源的综合利用[J].矿产综合利用,2001(4):19-23.
- [7] 王茜,廖阮颖子,田小林,等.四川省攀西地区钒钛磁铁矿[M].北京:科学出版社,2015.
- [8] 王录锋,代长富.从攀枝花钒钛磁铁矿中回收钨研究进展[J].矿产综合利用,2022(4):21-26.
- [9] 黄霞光,罗国清,李亚平.攀西钒钛磁铁矿中钨的赋存状态研究[J].有色金属(选矿部分),2016(6):1-4.
- [10] 惠博,杨耀辉.攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿矿石性质研究及对选矿工艺的影响[J].矿产综合利用,2020(4):126-129.

- HUI B, YANG Y H. Properties of olive-pyroxene vanadium-titanium magnetite ore in Hongge mining area of Panxi research and influence on mineral processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):126-129.
- [11] XIAO J H, CHEN C, DING W, et al. Extraction of phosphorous from a phosphorous-containing vanadium titanomagnetite tailings by direct flotation[J]. *Processes*, 2020(8):874.
- [12] 朱志敏, 刘应冬, 陈超, 等. 攀枝花矿业城市矿山地质环境调查成果报告[R]. 成都: 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 2021.
- ZHU Z M, LIU Y D, CHEN C, et al. Report of mining geo-environment survey of the Panzhihua mining city[R]. Chengdu: Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, 2021.
- [13] 吕子虎, 赵登魁, 程宏伟, 等. 某钒钛磁铁矿尾矿资源化利用[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2020(1):55-58.
- LV Z H, ZHAO D K, CHENG H W, et al. Resource utilization of titanomagnetite tailings[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(1):55-58.
- [14] 印万忠, 徐东, 杨耀辉, 等. 承德某钒钛磁铁矿尾矿资源化利用技术研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):37-42.
- YIN W Z, XU D, YANG Y H, et al. Research on the recycling technology for a vanadium-titanium magnetite tailings in Chengde[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):37-42.
- [15] 刘能云, 陈超, 张裕书, 等. 从尾矿中回收钛铁矿的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(1):65-68.
- LIU N Y, CHEN C, ZHANG Y S, et al. Experimental study on recovery of ilmenite from tailings[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(1):65-68.
- [16] 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.
- [17] 李凤霞. 浅析我国尾矿库与尾矿堆积坝的特点[J]. *企业导报*, 2014(8):121-122.
- LI F X. Brief analysis of characteristics of tailings ponds and tailings stacking DAMS in China[J]. *Enterprise Guide*, 2014(8):121-122.
- [18] 徐宏达. 上游式尾矿坝的沉积规律[J]. *有色矿山*, 2003(32):40-49.
- XU H D. Sedimentary law of upstream tailings DAMS[J]. *Nonferrous Mines*, 2003(32):40-49.
- [19] 李潇雨, 朱志敏, 周家云, 等. 钒钛磁铁矿尾矿资源调查取样方法比较——以红格尾矿库为例[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):96-99+47.
- LI X Y, ZHU Z M, ZHOU J Y, et al. Comparison of sampling methods for investigation of vanadium-titanium magnetite tailings resources - taking Honggetailings pond as an example[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):96-99+47.
- [20] 王洛锋. 尾矿资源调查方法探讨与实践[J]. *中国钨业*, 2017(32):55-58+74.
- WANG L F. Investigation method and practice of tailings resources[J]. *China Tungsten Industry*, 2017(32):55-58+74.
- [21] 杨耀辉, 惠博, 廖祥文, 等. 红格低品位难选橄辉岩型钒钛磁铁矿石选矿试验[J]. *金属矿山*, 2016(10):77-82.
- YANG Y H, HUI B, LIAO X W, et al. Beneficiation test on low-grade and refractory olivine-pyroxenite type vanadium-titanium magnetic ore from Hongge[J]. *Metal Mine*, 2016(10):77-82.
- [22] 邓建, 杨耀辉, 王洪彬, 等. 攀西某选铁尾矿中钛铁矿浮选药剂优化试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3):77-83.
- DENG J, YANG Y H, WANG H B, et al. Experimental study on optimization of flotation reagents for ilmenite from an iron dressing tailing in Panxi area[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(3):77-83.
- [23] 邓杰, 张渊, 刘飞燕, 等. 钒钛磁铁矿选铁尾矿中硫钴资源综合回收研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2015(2):30-33+48.
- DENG J, ZHANG Y, LIU F Y, et al. Recovery of cobalt and sulfur from the iron ore tailing of vanadium-titanium magnetite[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2015(2):30-33+48.
- [24] 朱志敏, 刘飞燕, 邓冰. 四川攀枝花钒钛磁铁矿中稀土的赋存状态与综合利用[C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 2019: 427.
- ZHU Z M, LIU F Y, DENG B. Occurrence state and multipurpose utilization of rare earth in Panzhihua vanadium titanium magnetite, Sichuan[C]. Summary of papers from the 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods. 2019: 427.
- [25] 王俊杰, 肖军辉, 张焯毓, 等. 从攀西地区含钪钒钛磁铁矿尾矿中回收钪研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(6):61-64.
- WANG J J, XIAO J H, ZHANG H Y, et al. Recovery of scandium resource from Sc-bearing vanadium-titanium magnetite tailings in Panxi region[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(6):61-64.
- [26] 陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 攀西某钒钛磁铁矿尾矿中磷的回收实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):165-169.
- CHEN C, ZHANG Y S, LI X Y, et al. Recovery of phosphorus from a vanadium titanium magnetite tailing in Panxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):165-169.
- [27] 陈永亮, 张一敏, 陈铁军. 铁尾矿建材资源化研究进展[J]. *金属矿山*, 2009(1): 162-165.
- CHEN Y L, ZHANG Y M, CHEN T J. Progress in research of using iron tailings as building material resource[J]. *Metal Mine*,

2009(1): 162-165.

[28] 李林, 姜涛, 陈超, 等. 攀西钒钛磁铁矿尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):7-13+6.

LI L, JIANG T, CHEN C, et al. Comprehensive utilization of blast furnace slag containing titanium[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):7-13+6.

[29] 刘海军, 赵丽丽. 钒钛磁铁矿尾矿的活化及用作水泥混合材的试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4):97-102.

LIU H J, ZHAO L L. Activation of vanadium-titanium magnetite tailing and its application as cement admixture[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4):97-102.

[30] 杨飞, 孙晓敏. 利用钒钛磁铁矿尾矿制备普通硅酸盐水泥熟料的研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(2):75-81.

YANG F, SUN X M. Preparation of ordinary Portland cement clinker from vanadium-titanium magnetite tailing[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(2):75-81.

[31] 李华彬, 何安西, 邓天秀, 等. 尾矿瓷质砖配方及烧成工艺研究[J]. 中国陶瓷, 1999(1):31-33.

LI H B, HE A X, DENG T X, et al. Research on the proportioning schedule and sintering-shaping process of ceramic tile with the tailings of V-bearing titanium magnetite[J]. China Ceramics, 1999(1):31-33.

[32] 刘应冬, 徐力, 陈超, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿资源及综合利用 [C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 2019: 422.

LIU Y D, XU L, CHEN C, et al. Tailings resources and multipurpose utilization of Panzhihua vanadium titanium magnetite [C]. Summary of papers from the 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods. 2019: 422.

[33] 陈桃, 简胜, 谢贤, 等. 钒钛磁铁矿尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2):174-178.

CHEN T, JIAN S, XIE X, et al. Research progress on comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(2):174-178.

Tailings Resource Characteristics and Multipurpose Utilization Suggestions of Panzhihua Vanadium-titanium Magnetite, SW China

Liu Yingdong^{1,2}, Wei Youhua², Chen Chao¹, Lin Jian³, Li Xiaoyu¹, Zhu Zhimin¹

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technical Innovation Center of Rare Earth Resources, China Geological Survey, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China; 2. Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan, China; 3. Mining Corporation of Chuanwei Group, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mining engineering. Panzhihua is the largest vanadium-titanium magnetite resource base in China. With the development and utilization of vanadium titanium resources, a large number of tailings have been produced, which not only occupies a lot of lands but also useful ingredients are not fully utilized, resulting in resource waste. At the same time, there are certain safety and environmental risks. This paper selects 22 representative tailings ponds in the Panzhihua area to conduct systematic research on tailings resource potential, valuable element occurrence characteristics, availability, and economic value. Analysis shows that Panzhihua tailings contain a large number of valuable components and have a huge potential resource. The amount of iron metallicity is 52 million tons, with an average grade of 10.87%, titanium metallicity is 29.07 million tons, with an average grade of 6.08%, rare earth metallicity is 130300 tons, with an average grade of 272 g/t, cobalt metallicity is 42300 tons, with an average grade of 88 g/t, scandium metallicity is 122100 tons, with an average grade of 26 g/t, and the Phosphorus pentoxide is 2.49 million tons, with an average grade of 0.52%. There are two main directions for the multipurpose utilization of mineral tailings resources. One is secondary development and utilization, with advanced recovery and utilization of valuable elements such as iron, titanium, sulfur, cobalt, and phosphorus. The second is overall utilization, which is based on secondary recycling and appropriate allocation for the production of insulation building materials, cement, ceramics, glass, refractory materials, soil amendments, concrete, and construction sand. To achieve the overall utilization of tailings and ultimately solve the problems of tailings resource utilization, reduction, and harmless treatment.

Keywords: Mining engineering; Vanadium-titanium magnetite; Panzhihua; Tailings resources; Secondary recycling; Overall utilization