

攀西钒钛磁铁矿尾矿中战略性矿产及其综合利用

朱志敏¹, 林建², 张国礼², 曾晓军², 陈超¹, 李潇雨¹, 刘应冬¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 会理县财通铁钛有限责任公司, 四川 凉山 615100)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。攀西地区是我国最大的钒钛磁铁矿资源基地, 伴随着钒钛磁铁矿的开采和选冶, 产生了巨量的尾矿。攀西钒钛磁铁矿尾矿中钒、钛、铁、铜、钴、镍、磷、铈等战略性元素的含量较高, 具有潜在的回收价值, 但尚未开展系统的选矿回收实验。通过对攀西地区红格矿区尾矿工艺矿物学的研究, 拟定了尾矿中战略性元素综合利用技术路线, 并开展了系统的选矿回收实验。以浮选选硫—弱磁选铁—强磁浮选选钛—强磁尾矿浮选磷为技术路线, 获得了钴品位为 0.175% 的硫钴精矿、TFe 品位 56.57% 的铁精矿、TiO₂ 品位 45.97% 的钛精矿、P₂O₅ 品位 31.73% 的磷精矿。研究表明, 通过系统的选矿回收实验, 能够减少尾矿排放量 21.3%, 并且, 回收这些战略性矿产能获得年产值 7134.89 万元。因此, 回收攀西地区钒钛磁铁矿尾矿的战略性矿产, 具有良好的经济效益和社会效益。

关键词: 矿物加工工程; 战略性矿产; 综合利用; 尾矿; 钒钛磁铁矿; 攀西

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.006

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 04-0042-08

尾矿是矿产资源开发过程中, 在一定的经济技术条件下, 对矿石中有用组分进行分选、回收后的剩余部分(废弃物), 而从矿石中分选、回收的含有用组分的部分常称为精矿^[1]。一般来说, 矿石中有用组分仅占矿石的少部分, 因此尾矿作为生产精矿的副产品, 其产生的量往往很高^[2]。而且, 随着人类对矿产品需求的不断增长, 低品位矿的开采是未来长期面临的问题, 这加重了尾矿的排放负担^[3]。截至 2019 年底, 我国尾矿累积堆存量约为 220 亿 t, 仅 2019 年尾矿总产生量约为 12.72 亿 t, 其中铁尾矿产生量约为 5.2 亿 t^[4-5]。按照矿物成分, 尾矿包括脉石、残留的有用矿物(比如硫化物-氧化物等)和次生矿物。这些残留的有用矿物, 随着经济的发展和技术的进步, 过去不能利用的也可以综合利用, 成为重要的潜在矿产资源^[6]。然而, 与发达国家相比, 我国尾矿综合利用率较低。以铁矿为例, 美国铁尾矿综合利用率达到 79%^[7], 而我国仅 17% 左右^[8]。此外, 尾

矿库压占土地资源, 产生二次扬尘, 可能发生渗漏、溃坝等地质灾害, 具有生态环境和安全风险^[1,6,9]。因此, 开展尾矿资源的综合利用, 提高尾矿综合利用率, 对降低矿产资源的使用压力、变废为宝, 以及保护环境、减轻安全风险等方面均有着重要的现实意义。

攀西地区是我国最大的钒钛磁铁矿资源基地, 包括攀枝花、红格、白马和太和四大矿区, 累计探明铁矿石资源储量 150 余亿 t, TiO₂ 资源量 12 亿 t, V₂O₅ 资源量 3000 万 t^[10]。经过半个多世纪的生产, 攀西地区产生了钒钛磁铁矿尾矿库 60 余个, 尾矿总堆存量约 80381 万 t^[11-12]。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、铈等战略性矿产^[12-15]。近年来, 一些研究者^[16-19]对承德和攀枝花钒钛磁铁矿尾矿开展了综合利用研究, 但都集中于尾矿中钛铁矿的资源化利用; 也

收稿日期: 2022-06-06

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(DD20189501, DD20221809); 凉山州科技计划重点研发项目(21ZDYF0094)

作者简介: 朱志敏(1978-), 男, 研究员, 从事矿床成因和地质找矿。

有一些学者对钒钛磁铁矿尾矿中钽开展了回收实验^[20-21]，但钽的市场需求有限，难以大规模回收利用。本文选取攀西地区典型的钒钛磁铁矿尾矿——红格矿区尾矿库，在工艺矿物学研究基础上，确定其尾矿综合利用技术路线，系统地开展尾矿中铁、钛、钴、磷等战略性矿产综合利用技术研究，并初步进行经济效益分析。

1 研究区概况

红格矿区是攀西地区钒钛磁铁矿四大矿区中最大的矿区，位于攀枝花市红格新九乡和会理小

黑箐乡交界的路枯一带，距攀枝花市 30 公里，自北向南由安宁村-潘家田、白草、马鞍山、中梁子、红格、湾子田、中干沟等矿区组成，其中红格矿包括红格南矿和红格北矿。

经现场调研，红格北矿早期选铁过程获得了 TFe 品位 55%~56% 的铁精矿，回收率已接近理论值，选钛总回收率在 21%~27% 左右，也达到了较高水平。但是，通过检查选矿流程中各元素的走向（表 1），目前的选矿生产有较高品位的钛、铜、钴、镍、钽等有价值组分进入了尾矿中。

表 1 红格北矿一期选厂各元素在选矿流程中的走向/%

样品名称	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	S	Co*	Ni*	Cu*	Sc*	Ga*	Cd*	TREO*	In*
原矿	22.90	9.35	0.20	0.032	0.48	134	193	157	13.8	54.4	16.8	460	115
干式预选尾矿	9.19	3.53	0.06	0.018	0.071	89.6	33.2	89.6	20.1	32.7	12.7	633	51
铁精矿	55.79	13.32	0.61	0.100	0.23	142	174	158	2.4	99.3	21.3	383	231
选钛入料	19.36	19.85	0.09	0.017	0.37	136	150	122	21.5	44.2	12.5	359	39.8
选钛尾矿	10.73	7.15	0.06	0.016	0.42	174	284	215	23	43.6	8.67	335	68.9
钛精矿	33.09	47.06	0.06	0.014	0.46	150	128	113	14	45.6	14.2	479	68.3

*单位为：g/t。

2 样品采集及分析测试

红格矿区共有尾矿库 44 个，尾矿总堆存量约 21861 万 t。一期尾矿库中有钛、铜、钴、镍、钽、磷等战略性矿产，具有综合利用价值。因此，本文选择已经闭库的红格矿区一期尾矿库作为研究对象，在不同区域采集 4 个样品，每个样品由方圆 50 m 的 4 个样品均匀混合而成，样品总重 8 t。样品经自然风干后，用木质小锤敲碎，并挑出混入大块杂质。处理后的尾矿样品装入样品袋中，送实验室进行测试分析和选矿实验。

尾矿的粒度筛析、化学分析、铁钛物相分析、AMICS 分析及综合利用实验均在中国地质科学院矿产综合利用研究所进行，主量元素采用

X 荧光光谱（XRF）测定，微量元素采用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）测定，矿物分析采用矿物自动定量分析系统（AMICS）测定。

3 尾矿的工艺矿物学特征

3.1 化学成分

样品的粒度筛析、化学分析及铁钛物相分析等表明（表 2~5），样品中主要的有用组分铁、钛、硫等主要分布在 -1+0.1 mm，铁主要分布于赤褐铁矿、硅酸铁和磁性铁中；钛主要分布于钛铁矿中；钴主要分布于硫化物中，其次分布于选矿难以回收的氧化物和硅酸盐中^[22]；磷主要分布于磷灰石中^[23]。

表 2 红格尾矿样品化学多项分析结果

名称	TFe	FeO	TiO ₂	S	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃ *	Sc ₂ O ₃ *	烧失
含量/%	15.28	13.10	10.90	0.28	1.01	35.58	8.65	11.98	8.14	0.74	1.62	0.27	0.10	358	40.40	1.14

*单位为：g/t。

表 3 红格尾矿样品粒度筛析及主要元素分布
Table 3 Particle size and some major elements of tailing samples from the Hongge mine

粒级/mm	产率/%	品位/%			分布率/%		
		TFe	TiO ₂	S	TFe	TiO ₂	S
+2	1.90	17.55	8.73	0.42	2.15	1.46	2.54
-2+1	7.42	14.52	7.79	0.33	6.96	5.10	7.80
-1+0.5	16.63	11.07	7.27	0.24	11.89	10.66	12.71
-0.5+0.25	27.46	14.53	11.85	0.32	25.76	28.69	27.99
-0.25+0.15	18.28	15.48	14.12	0.31	18.27	22.76	18.05
-0.15+0.1	10.19	18.28	14.83	0.32	12.03	13.32	10.39
-0.1+0.075	6.77	18.04	12.41	0.35	7.89	7.41	7.55
-0.075+0.045	7.36	19.89	10.91	0.32	9.45	7.08	7.50
-0.045	3.99	21.74	10.00	0.43	5.60	3.52	5.47
合计	100.00	15.49	11.34	0.31	100.00	100.00	100.00

表 4 红格尾矿样品铁物相分析
Table 4 Iron mineralogical phase analysis of tailing samples from the Hongge mine

名称	菱铁 矿中Fe	赤褐铁 矿中Fe	黄铁 矿中Fe	硅酸 铁中Fe	磁性 铁中Fe	合计
含量/%	0.52	4.34	0.38	3.96	6.04	15.24
分布率/%	3.41	28.48	2.49	25.98	39.63	100.00

表 5 红格尾矿样品钛物相分析
Table 5 Titanium mineralogical phase analysis of tailing samples from the Hongge mine

名称	钛铁 矿中钛	硅酸 盐中钛	金红石 中钛	钛磁铁 矿中钛	合计
含量/%	8.64	1.44	0.042	0.58	10.702
分布率/%	80.73	13.46	0.39	5.42	100.00

3.2 矿物组成

样品的 AMICS 分析表明 (图 1), 尾矿中有用矿物为钛铁矿 (19.59%)、钛磁铁矿 (7.57%)、磷灰石 (2.12%)、黄铁矿 (0.80%)、蓝铜矿-斑铜矿 (0.23%)、磁黄铁矿 (0.06%) 等, 脉石矿物为辉石-钛辉石 (43.27%)、长石 (16.31%)、橄榄石 (5.34%)、云母 (1.6%)、角闪石 (0.94)、绿泥石 (0.69)、石榴石 (0.56%)、帘石 (0.25%)、石英 (0.09%)、榍石 (0.06)、锆石 (0.04)、粘土矿物 (0.04), 此外还含有大量赤-褐铁矿 (30.37%)。

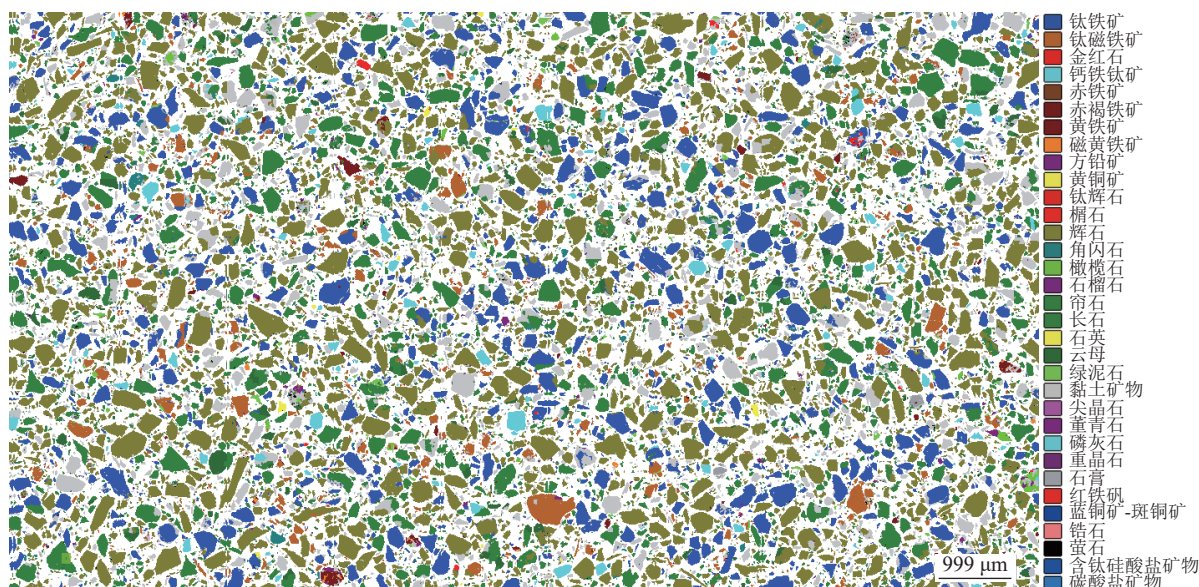


图 1 红格尾矿样品 AMICS 矿物分析
Fig.1 AMICS mineral analysis of tailing samples from the Hongge mine

4 尾矿的综合利用技术

4.1 工艺技术路线的确定

结合钒钛磁铁矿综合利用研究现状和发展趋势，在红格尾矿库工艺矿物学基础上，拟定了尾矿综合利用技术路线（图2），该技术路线优先回收硫钴精矿，既遵循易回收的矿物优先回收的原则，也可确保后续获得优质的铁精矿、钛精矿和磷精矿的合格原料。

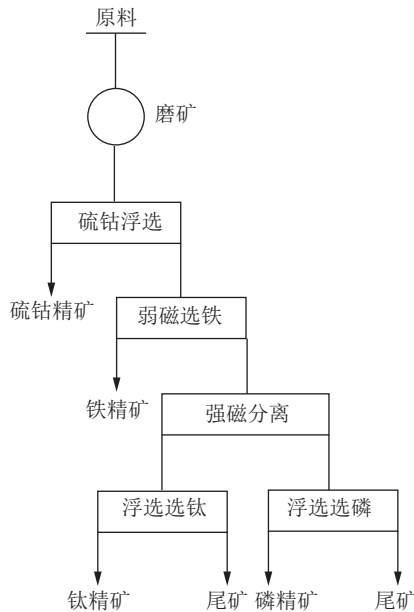


图2 红格尾矿综合利用技术路线

Fig.2 Flowsheet of comprehensive utilization of tailings from the Hongge mine

4.2 矿产综合利用技术

4.2.1 硫钴回收实验

目前，攀西钒钛磁铁矿选矿原则流程为原矿—选铁—选铁尾矿强磁选—强磁精矿浮硫钴—硫钴尾矿选钛。浮选硫钴资源主要是为消除硫化物对钛浮选的影响，由于硫钴量较少，部分选厂甚至没有获得合格的硫钴精矿，造成了硫钴资源的浪费。随着环保和节能减排要求的提高，去除铁精矿中的硫化物，不仅可以有效利用钒钛磁铁矿中的硫钴资源，还可降低铁冶炼过程中的脱硫成本及环保成本。因此，有必要在回收铁钛的资源之前，回收硫钴资源，既可提高硫钴资源的利用率，又可获得低杂质含量的铁、钛精矿以及降低硫化物对钛浮选的影响，同时综合利用后的尾矿也可作为优质的整体利用原料。

针对尾矿中硫钴资源的特点，在磨矿细度、

浮选药剂种类与用量条件实验的基础上，采用一次粗选、一次扫选、一次精选的工艺流程，进行了浮选选硫钴闭路实验（图3），获得硫品位为37.61%、钴品位为1750 g/t，硫回收率为73.69%，钴回收率为14.48%的硫钴精矿（表6），尾矿中S含量仅0.09%，有效回收了尾矿中的硫资源，部分钴资源也可得到回收利用，为后续获得高质量的铁精矿、钛精矿及磷精矿等创造了良好的条件。

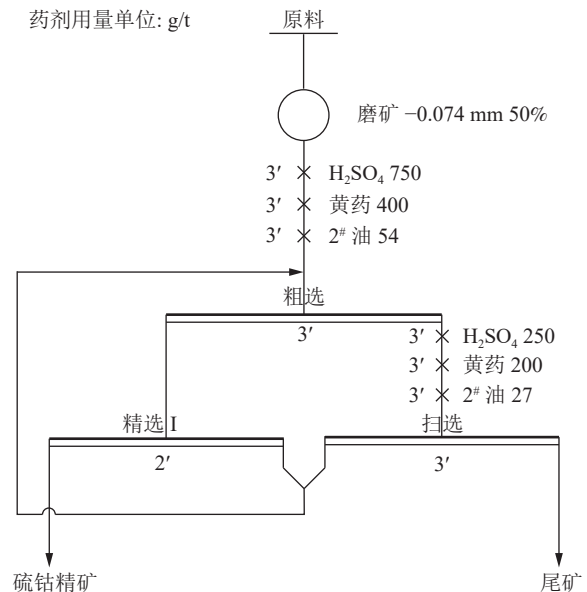


图3 红格尾矿硫钴浮选闭路实验流程

Fig.3 Flowsheet of S-Co closed-circuit flotation test of tailing samples from the Hongge mine

表6 红格尾矿浮选选硫钴闭路实验结果

Table 6 Results of S-Co closed-circuit flotation test of tailing samples from the Hongge mine

产品名称	产率/%	品位		回收率/%	
		S/%	Co/(g/t)	S	Co
精矿	0.63	37.61	1750.00	73.69	14.48
尾矿	99.37	0.09	65.47	26.31	85.52
合计	100.00	0.32	76.07	100.00	100.00

4.2.2 铁回收实验

钛磁铁矿是攀西地区钒钛磁铁矿可工业利用的复合铁矿物，亦是钛、钒、铬、锰、镓、钴等组分的主要载体矿物^[24-25]。工艺矿物学研究表明，原料中含有少量的钛磁铁矿，通过磁选可以获得部分铁精矿，也可为强磁提高钛品位创造条件。针对浮选选硫钴的尾矿，开展了弱磁选铁的实验研究（图4）。随着磁选磁场强度的增加，获得的铁精矿品位与回收率变化不大，铁精矿产率也较

低，这主要是因为原选矿厂工作期间选铁指标较好，尾矿中铁含量低，为了较少铁精矿对后续选钛的影响，确定选铁的磁场强度为 0.14 T，此时可获得 TFe 品位 57% 左右的铁精矿（表 7）。

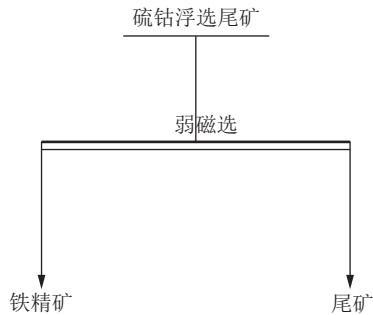


图 4 红格尾矿弱磁选铁实验流程

Fig.4 Flowsheet of iron low intensity magnetic separation from tailing samples from the Hongge mine

表 7 红格尾矿弱磁选铁实验结果

Table 7 Results of low intensity magnetic separation of iron from tailing samples from the Hongge mine

磁场强度/T	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
0.1	铁精矿	6.03	56.86	12.83	22.12	7.21
	尾矿	93.97	12.85	10.59	77.88	92.79
	合计	100.00	15.50	10.73	100.00	100.00
0.12	铁精矿	5.79	57.48	12.74	21.90	6.77
	尾矿	94.21	12.60	10.78	78.10	93.23
	合计	100.00	15.20	10.89	100.00	100.00
0.14	铁精矿	5.93	57.50	13.47	22.19	7.44
	尾矿	94.07	12.71	10.56	77.81	92.56
	合计	100.00	15.37	10.73	100.00	100.00
0.16	铁精矿	6.08	57.04	13.33	22.12	7.61
	尾矿	93.92	13.00	10.48	77.88	92.39
	合计	100.00	15.68	10.65	100.00	100.00

4.2.3 钛回收实验

钛铁矿是攀西钒钛磁铁矿尾矿的主要回收的有价矿物。但是，由于原料来源于已经闭库的尾矿库，经药剂作用和长时间堆存后，钛铁矿的可选性能发生了变化。因此，针对尾矿中钛资源的特点，在传统的 MOS、MOH 等选钛药剂对尾矿中钛已经药剂疲劳难以获得合格钛精矿的情况下，开发了新型高效的选钛药剂，使得尾矿中的钛得以高效回收利用。通过强磁—重选—浮选工艺（图 5），在新研发的选钛药剂基础上，可以获得 TiO₂ 品位为 45.97%，回收率为 65.37% 的选钛流程作业回收率（表 8）。

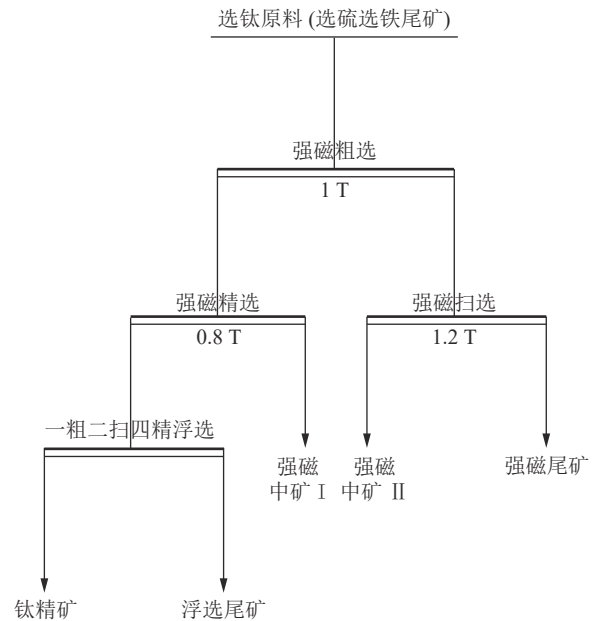


图 5 红格尾矿选钛实验流程

Fig.5 Flowsheet of Ti separation test from tailing samples from the Hongge mine

表 8 红格尾矿选钛全流程实验结果

Table 8 Results of Ti separation test from tailing samples from the Hongge mine

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
钛精矿	14.21	45.97	65.37
浮选尾矿	40.59	5.01	20.35
强磁中矿 I	15.81	4.30	6.80
强磁中矿 II	9.41	5.12	4.82
强磁尾矿	19.98	1.33	2.66
合计	100.00	9.99	100.00

4.2.4 磷回收实验

磷矿是具有战略意义的非金属矿，主要用于制造磷肥、黄磷、磷酸、磷化物及其他磷酸类盐，用于农业和医药、食品、国防等工业，具有不可替代性和不可再生性。在攀西地区钒钛磁铁矿中，磷灰石是分布比较广泛的一种副矿物，各矿区、各矿段不同矿石中含量变化较大，主要富集在辉长岩型矿石中。尾矿经过浮选选硫、弱磁选铁、强磁选钛以后，获得了 P₂O₅ 含量为 1.41% 的选磷原料，磷在强磁选尾矿中有一定程度富集。

针对 P₂O₅ 含量为 1.41% 的选磷原料，通过一粗一扫三精的浮选实验流程获得了 P₂O₅ 品位为 31.73%、浮选作业回收率为 92.56% 的合格磷精矿（图 6，表 9）。该浮选工艺流程药剂制度简单，回收成本低，利用浮选回收钒钛磁铁矿尾矿提取有价金属后的伴生低品位磷资源具有一定的经济效益。

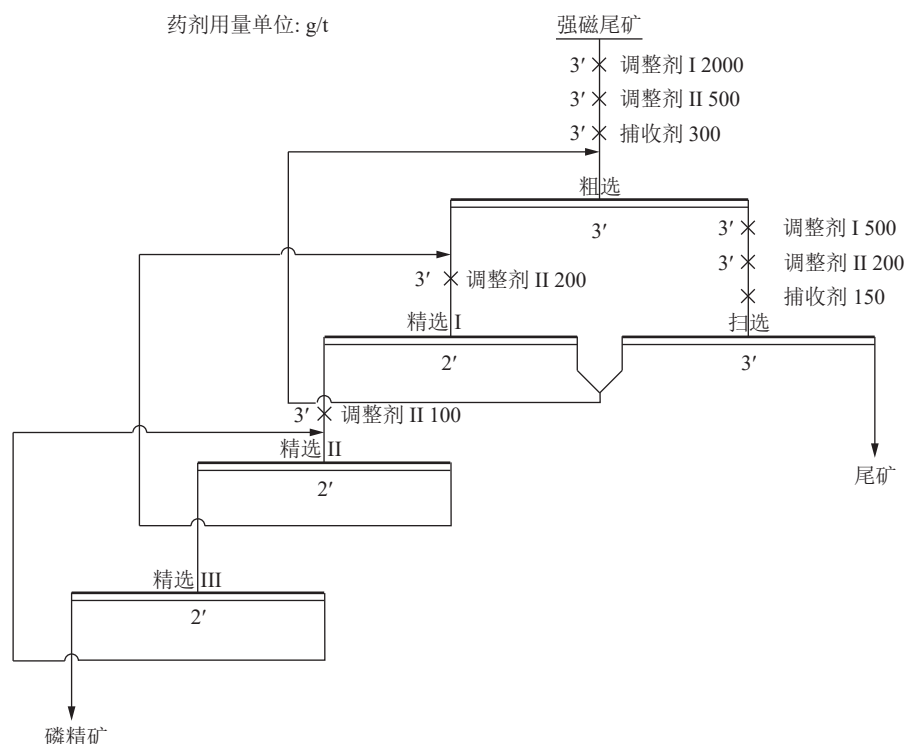


图6 红格尾矿磷浮选实验流程

Fig.6 Flowsheet of phosphorous flotation test of tailing samples from the Hongge mine

表9 红格尾矿浮选选磷探索实验结果

Table 9 Results of phosphorous flotation test of tailing samples from the Hongge mine

产品名称	产率/%	P ₂ O ₅ 品位/%	P ₂ O ₅ 回收率/%
磷精矿	4.26	31.73	92.56
尾矿	95.74	0.11	7.44
合计	100.00	1.46	100.00

4.3 经济效益分析

通过浮选选硫—弱磁选铁—强磁浮选选钛—强磁尾矿选磷的工艺流程，综合实验分别获得了

合格的硫钴精矿、铁精矿、钛精矿、磷精矿，减少尾矿排放量 21.3% (表 10)。以 693.3 万 t 的尾矿堆存量，以年处理 30 万 t 尾矿的规模进行计算，年产硫钴精矿 0.19 万 t，市场价格约 350 元/t，硫钴精矿年产值 66.78 万元；年产铁精矿 1.88 万 t，市场价格 500 元/t，铁精矿年产值 940.80 万元；年产钛精矿 3.97 万 t，市场价格 1500 元/t，钛精矿年产值 5952.99 万元；年产磷精矿 0.35 万 t，市场价格 500 元/t，磷精矿年产值 174.32 万元；因此，回收尾矿中战略性矿产年产值 7134.89 万元。

表10 红格尾矿中战略性矿产回收实验结果

Table 10 Results of strategic mineral resources recovery test of tailing samples from the Hongge mine

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		S	TFe	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	TFe	TiO ₂	P ₂ O ₅
硫钴精矿	0.64	36.15				82.11			
铁精矿	6.27		56.57	13.59			23.22	7.82	
钛精矿	13.23		33.41	45.97			28.93	55.79	
磷精矿	1.16				31.73				50.51
浮钛尾矿	37.79								
强磁选钛尾矿	14.79								
浮磷尾矿	26.12								
总尾矿	78.70								
原料	100.00	0.28	15.28	10.90	0.73	100.00	100.00	100.00	100.00

5 结论

(1) 攀西地区钒钛磁铁矿尾矿中含有大量的有

价成分，潜在资源量巨大。针对攀西地区红格北矿一期尾矿的工艺矿物学研究表明，样品中 TFe

含量 15.28%，TiO₂ 含量 10.90%，S 含量 0.28%，P₂O₅ 含量 1.01%，铁主要分布于赤褐铁矿、硅酸铁和磁性铁中，分别占 28.48%，25.98% 和 39.63%。钛主要分布于钛铁矿中，占 80.73%。样品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，表明该尾矿中有价组分钛含量较高，硫、钴、磷等有一定的综合利用潜力。

(2) 针对该尾矿进行了详细的选矿工艺研究，制定了浮选选硫—弱磁选铁—强磁浮选选钛—强磁尾矿回收磷的技术路线，获得了以下产品：S 品位 36.15%，硫回收率 82.11% 的硫钴精矿；TFe 品位 56.57%，铁回收率 23.22 的铁精矿；TiO₂ 品位 45.97%，钛回收率 55.79% 的钛精矿；P₂O₅ 品位 31.73%，磷回收率 50.51% 的磷精矿，实验指标良好。通过以上战略性矿产的综合利用，能够减少尾矿排放量 21.3%。

(3) 初步经济效益分析表明，以 693.3 万 t 的尾矿存量，以年处理 30 万 t 尾矿的规模进行计算，获得精矿产品约 6.4 万 t/年，回收尾矿中战略性矿产年产值 7134.89 万元，表明处理该尾矿具有良好的经济效益和社会效益。

参考文献：

- [1] Kossoff D, Dubbin W E, Alfredsson M, et al. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 51:229-245.
- [2] Lottermoser B. Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [3] Mason L, Prior T D, Mudd G M, et al. Availability, addiction and alternatives: three criteria for assessing the impact of peak minerals on society[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 19:958-966.
- [4] 王海军, 王伊杰, 李文超, 等. 全国矿产资源节约与综合利用报告 (2019) [M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- WANG H J, WANG Y J, LI W C, et al. Report on national conservation and comprehensive utilization of mineral resources (2019)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [5] 舒敏, 刘昆, 李德军, 等. 铁尾矿资源化利用标准化现状及对策研究[J]. *中国标准化*, 2021(6):154-158.
- SHU M, LIU K, LI D J, et al. Study on standardization status and countermeasures of iron tailings resource utilization[J]. *China Standardization*, 2021(6):154-158.
- [6] Provornaya I V, Yurkevich N V, Dzuba Y A. Mine Tailings: Environmental damage and resource potential[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 459:022084.
- [7] 路畅, 陈洪运, 傅梁杰, 等. 铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5):511-526.
- LU C, CHEN H Y, FU L J, et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings[J]. *Materials Review*, 2021, 35(5):511-526.
- [8] 李德先, 王锦, 张长青, 等. 冀东司家营铁矿尾矿特征及综合利用建议[J]. *地质学报*, 2022, 96(4):1460-1468.
- LI D X, WANG J, ZHANG C Q, et al. Tailing characteristics and comprehensive utilization suggestions of the Sijiaying iron ore deposit in eastern Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(4):1460-1468.
- [9] Hudson-Edwards K A, Macklin M G, Jamieson H E, et al. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Rios Agrioguardiamar, Aznalcollar, Spain[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18:221-239.
- [10] 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.
- WANG Q, LIAO R Y Z, TIAN X L, et al. Vanadium Titanomagnetite deposits in the Panxi region, Sichuan province[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 周家云, 毛益林, 邓杰, 等. 攀西地区金属矿山尾矿资源化综合利用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- ZHOU J Y, MAO Y L, DENG J, et al. Comprehensive utilization of tailings in the Panxi Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [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] 黄霞光, 罗国清, 李亚平. 攀西钒钛磁铁矿中钪的赋存状态研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2016(6):1-4.
- HUANG X G, LUO G Q, LI Y P. Study on the occurrence state of scandium in Panxi vanadium-titanium magnetite[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2016(6):1-4.
- [14] 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.
- LI X Y, ZHU Z M, ZHOU J Y, et al. Comparison of sampling methods for investigation of vanadium-titanium magnetite tailings resources - taking Hongge tailings pond as an example[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):96-99.
- [15] Xiao J H, Chen C, Ding W, et al. Extraction of phosphorous from a phosphorous-containing vanadium titan-

magnetite tailings by direct flotation[J]. *Processes*, 2020, 8:874.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 刘能云, 陈超, 张裕书, 等. 从尾矿中回收钛铁矿的实验研究[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.

[19] 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.

[20] 黄雯孝, 卢可可. 攀西钒钛磁铁矿尾矿中钒的提取工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2):135-139.

HUANG W X, LU K K. Study on scandium extraction technology for Panxi vanadium titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):135-139.

[21] 王浚杰, 肖军辉, 张焯毓, 等. 从攀西地区含钒钒钛磁铁矿尾矿中回收钒研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6):61-64.

WANG J J, XIAO J H, ZHANG Y 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.

[22] 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.

[23] 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. 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.

[24] 陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021(3):99-105.

CHEN C, ZHANG Y S, LI X Y, et al. Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):99-105.

[25] 肖仪武. 钒钛磁铁矿矿石基因特性及其对选铁的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(5):198-201.

XIAO Y W. Ore genetic characteristics of vanadium-titanium magnetite and its influence for mineral processing[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):198-201.

Comprehensive Utilizations of the Strategic Mineral Resources from Vanadium Titano-Magnetite Tailings in the Panxi Region, SW China

Zhu Zhimin¹, Lin Jian², Zhang Guoli², Zeng Xiaojun², Chen Chao¹, Li Xiaoyu¹, Liu Yingdong¹
(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan, China; 2. Huili Caitong Iron Titanium Co., Ltd., Liangshan, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral processing engineering. Extraction of the vanadium titano-magnetite ore deposits in the Panxi Region, the biggest vanadium titano-magnetite mineral resource base, results in the production of a significant volume of tailings. The tailings have a high recovery potential of the strategic mineral resources (eg., Vi, Ti, Fe, Co, Cu, Ni, P, and Sc). Based on the process mineralogy study, we determine the comprehensive utilization technology flowsheet and conduct a systematic recovery test of tailing samples from the Hongge mine in the Panxi Region. By the process of (1) flotation of sulfur, (2) low-intensity magnetic separation of iron, (3) high-intensity magnetic separation and flotation of titanium, (4) flotation of Phosphorous, we obtain the sulfur-cobalt concentrate (Co 0.175%), the iron concentrate (TFe 56.57%), the titanium concentrate (TiO₂ 45.97%) and phosphorous concentrate (P₂O₅ 31.73%). These results show that the systematic recovery test of tailings can reduce the production of a volume of tailings with significant economic and social benefits.

Keywords: Mineral processing engineering; Strategic mineral resources; Comprehensive utilizations; Tailings; Vanadium titano-magnetite; Panxi Region