

## 攀枝花地区含钪钒钛磁铁矿尾矿提钪关键技术研究

邓冰<sup>1</sup>, 王晓慧<sup>1</sup>, 梁友伟<sup>1</sup>, 肖军辉<sup>2</sup>

(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, 四川省稀土技术创新中心, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。攀枝花某钒钛磁铁矿尾矿中的钪主要以类质同象形式赋存于辉石和钛铁矿中, 部分辉石及其他硅酸盐矿物嵌有钛磁铁矿, 钒钛磁铁矿尾矿中的矿物嵌布关系复杂, 性质相似, 钪元素含量低而且分散。对该钒钛磁铁矿尾矿, 采用擦洗-沉降预抛尾-选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾工艺, 抛除的尾矿产率为 30.32%, 实现了有效抛尾; 钪元素得到较好富集, 钪含量由 60.96 g/t 提高到 70.90 g/t, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率为 81.04%。

**关键词:** 矿物加工工程; 铁钛尾矿; 提钪; 有益组分; 综合回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.007

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0050-05

钪(Sc)是一种地球上分布极为分散的稀土元素, 其在地壳中的含量为 22 ~ 30 g/t<sup>[1-3]</sup>。由于钪具有高熔点、高沸点、低密度等优良的物理性质, 其在航天器、冶金、火箭、导弹、电子、核能、激光、电光源和超导体等尖端技术领域应用广泛, 我国也将钪列为国家战略性矿产资源<sup>[3-5]</sup>。钪一般与其他矿物伴生, 鲜有钪独立矿物, 通常是从含钪二次资源中进行回收。钪回收提取技术仍属于钪资源有效综合利用的技术难题<sup>[6-8]</sup>。

攀枝花地区是我国钒钛磁铁矿重要的成矿带, 目前该地区资源开发共形成大小尾矿库 52 个, 尾矿累积堆存量约 5.8 亿 t。攀枝花钒钛磁铁矿尾矿属于典型的多金属类铁尾矿, 其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, 还含有值得回收的钴、镍、钪、稼、硫等共伴生元素。从价值上看, 回收这类铁尾矿中的伴生元素, 已远远超过主金属元素铁的回收价值。目前攀枝花地区钒钛磁铁矿中具备回收利用的共伴生组分钴、镍、硫已经开始回收利用, 但是钪的综合利用还处于实验研究阶段<sup>[9-10]</sup>。

对攀西钒钛磁铁矿而言, 赋存于磁铁矿和钛铁矿中的钪, 大部分会富集到铁、钛选矿的铁

精矿和钛精矿产品中, 而部分赋存于钛辉石中的钪, 则主要进入到选钛矿尾矿中。本次实验以攀枝花某钒钛磁铁矿尾矿为研究对象, 开展相关工艺矿物学及提钪选矿实验研究, 具有重要的现实意义。

## 1 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿性质

### 1.1 原矿化学分析

实验原料为攀西红格矿区乔地箐尾矿库的尾矿, 其化学多项分析结果及矿物组成见表 1、2。

表 1 试样多元素分析结果/%  
Table 1 Multi-element analysis results of samples

Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
59	42.17	12.91	11.28	10.85	10.23	1.04	3.26	1.95	1.01

\*单位为 g/t。

从表 1 可知, 本次实验样品中氧化钪含量 59 g/t, 为该钒钛尾矿中的有用利用组分, 达到钪综合回收的最低工业品位。

从表 2 结果可知, 样品中的主要矿物有辉石-钛辉石、钛铁矿、长石、钛磁铁矿、橄榄石、磷灰石、云母等矿物, 其他矿物含量较低。

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 四川省科技计划(重点研发)项目(2021YFG0268)

作者简介: 邓冰(1986-), 男, 副研究员, 主要从事战略性矿产资源综合利用技术研究。

表2 矿石矿物组成/%  
Table 2 Mineral composition of the ore

钛磁铁矿	云母	钛铁矿	角闪石	磁黄铁矿	绿泥石	黄铁矿	帘石	蓝铜矿
7.57	1.6	19.59	0.94	0.06	0.69	0.8	0.25	0.23
石榴石	磷灰石	赤、褐铁矿	辉石	橄榄石	长石	石英	榍石	锆石
0.56	2.12	0.48	43.27	5.34	16.31	0.09	0.06	0.04

### 1.2 样品 AMICS 矿物分析

为查清样品的矿物组成，对样品进行了 AMICS 分析。

从图 1、2 可知，样品中钛铁矿及钛磁铁矿以单矿物零星分布为主，连生体矿物多为包裹及浸染形式嵌布在硅酸盐基体上。部分辉石及其他硅酸盐矿物嵌有钛磁铁矿，辉石结构中包裹部分磁铁矿。钪分布规律与辉石-钛辉石、钛铁矿的含量

关系密切。

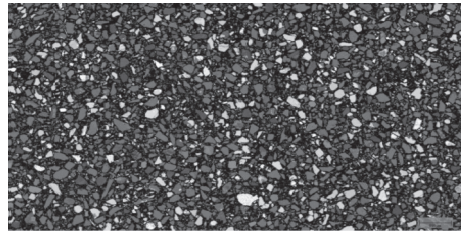


图1 样品 AMICS 背散射  
Fig.1 AMICS backscattering of sample

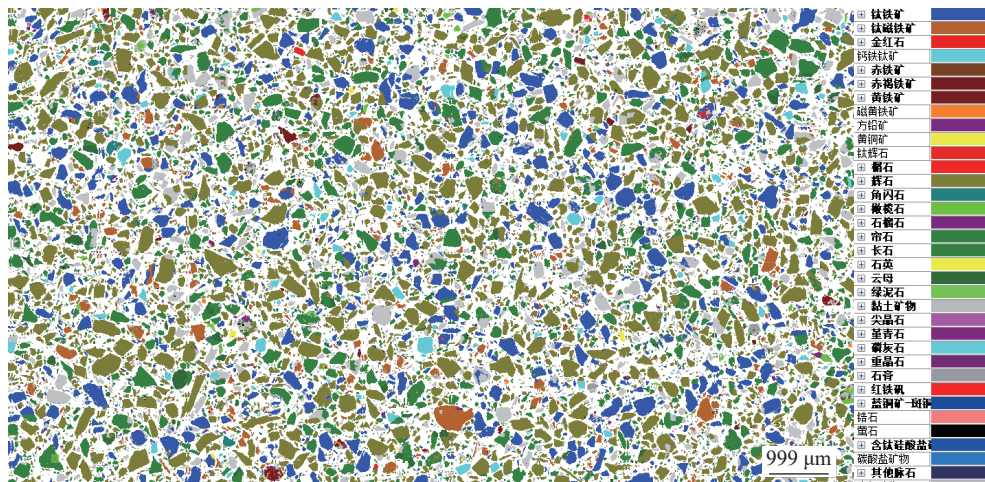


图2 样品 AMICS 矿物分析  
Fig.2 AMICS mineral analysis of sample

### 1.3 钪的赋存状态

研究中未发现钪的独立矿物，为得到钪在不同矿物中的含量，先将样品经磁选、浮选预富集，再通过人工重砂、手工拣选得到主要矿物的单矿物，通过对矿石中主要矿物进行钪分析，矿石中的钪主要以类质同象的形式赋存在辉石-钛辉石、钛铁矿中。辉石类中含量最高，可达 79 g/t，具体配分情况见表 3。

的铁精矿和钛精矿产品中，部分赋存于辉石、角闪石等非金属矿物中的钪，则主要进入到选钛的尾矿中。因此，从选钛尾矿中用物理选矿手段富集提钪的关键是：有效富集选钛尾矿中的钛辉石、角闪石等含钪非金属矿物。

表3 钪在主要矿物中的分配率

矿物	矿物量/%	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的配分量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 的分配率/%
钛磁铁矿	7.57	29	2.2	4.36
钛铁矿	19.59	45	8.82	17.53
辉石类	44.21	79	34.93	69.42
长石	16.31	16	2.61	5.19
橄榄石类	5.34	33	1.76	3.50
其他	6.98	0	0	0.00
	100.00		50.32	100.00

## 2 提钪探索实验

根据钒钛磁铁矿矿石成因分析可知，钒钛磁铁矿中的钪元素主要以类质同象形式赋存于钛辉石、钛铁矿、磁铁矿、角闪石中；赋存于磁铁矿、钛铁矿中的钪则大部分会富集到铁、钛选矿

### 2.1 单一反浮选实验

铁钛选矿尾矿中钪主要以类质同象形式分布在辉石和钛铁矿中，而硅酸盐类矿物中钪的含量相对较低，而样品中钛铁矿及钛磁铁矿以单矿物零星分布为主，连生体矿物多为包裹及浸染形式嵌布在硅酸盐基体上。基于此，为使矿物充分单体解离，探索实验在细磨条件下，进行了单一反浮选抛尾捕收剂选择实验。实验条件：在磨矿细度-0.074 mm 95%，采用不同类型捕收剂，调浆 3 min，反浮选 8 min，实验结果见表 4。

表 4 单一反浮选抛尾捕收剂选择实验结果  
Table 4 Results of single reverse flotation tailing trap selection test

浮选药剂及用量/(g/t)	产品名称	产率/%	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 回收率/%
KX302: 200	精矿	84.31	62.60	87.18
	尾矿	15.69	49.50	12.82
	原矿	100.00	60.55	100.00
淀粉: 500 KX302: 200	精矿	82.68	61.40	86.53
	尾矿	17.32	45.60	13.47
	原矿	100.00	58.66	100.00
淀粉: 500 KX986: 200	精矿	77.66	61.42	80.23
	尾矿	22.34	52.60	19.77
	原矿	100.00	59.45	100.00
淀粉: 500 E1000: 200	精矿	67.12	63.00	71.25
	尾矿	32.88	51.90	28.75
	原矿	100.00	59.35	100.00
淀粉: 500 醚胺盐: 200	精矿	83.16	60.80	85.97
	尾矿	16.84	49.00	14.03
	原矿	100.00	58.81	100.00

从表 4 结果看出，在细磨条件下采取单一反浮选抛尾措施，采用 KX302 捕收剂的反浮选效果较好，反浮选尾矿中的 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低。因此，初步确定反浮选抛尾捕收剂采用 KX302。

### 2.2 电选实验

根据尾矿中矿物的导电性差异，实验考虑通过电选作业进行矿物分选，以考查各分选产品中钪的富集效果。实验条件：试样未磨，固定给料时间 5 min，在不同调整电选参数下开展电选实验。实验结果见表 5。

从表 5 实验结果看出，对钛尾矿通过调整电选参数进行分选时，各产品中的 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量差别不大，没有表现出富集趋势。因此，采用电选对该钛尾矿也达不到分选富集钪的目的。

表 5 电选实验结果/%

Table 5 Results of electric selection test		产率/%	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 分布率/%
电选参数	产品			
	名称			
	精矿	19.61	47.30	18.57
	中矿	77.88	50.70	79.03
转速: 180 r/min 电压: 22 kv	尾矿	2.51	47.80	2.40
	原矿	100.00	49.96	100.00
	精矿	31.12	51.60	31.22
转速: 180 r/min 电压: 25 kv	中矿	66.46	51.50	66.54
	尾矿	2.42	47.50	2.24
	原矿	100.00	51.43	100.00
转速: 250 r/min 电压: 25 kv	精矿	16.71	48.90	16.63
	中矿	79.52	49.20	79.62
	尾矿	3.77	48.90	3.75
	原矿	100.00	49.13	100.00

### 2.3 擦洗-沉降抛尾实验

选钛尾矿样品-0.074 mm 粒级含量为 50% 左右，其中的细粒级矿物通常为硬度较小、较易磨的绿泥石等粘土矿物，这部分矿物一般钪含量较低。因此，根据样品中矿物的可碎性、可磨性差异，考虑通过擦洗-沉降的物理方法预先抛出一定量的尾矿，以减轻对后续作业的影响，减少后续作业的处理量。

取试样 500 g，放入 2000 mL 的烧杯中，添加不同分散剂，搅拌擦洗 30 min，沉降 5 min，抽取上层矿泥，作为预抛尾产物。实验结果见表 6。

表 6 擦洗-沉降预抛尾实验对比结果  
Table 6 Comparison results of scrub-settlement pre-tail test

调浆分散剂添加	产品名称	产率/%	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 分布率/%
①空白	矿泥	9.26	28.6	4.41
	钪粗精矿	90.74	63.30	95.59
	原矿	100.00	60.08	100.00
②碳酸钠 10 kg/t	矿泥	12.02	50.9	10.90
	钪粗精矿	87.98	56.80	89.10
	原矿	100.00	56.11	100.00
③六偏磷酸钠 10 kg/t	矿泥	10.51	46.70	8.37
	钪粗精矿	89.49	61.10	91.63
	原矿	100.00	58.62	100.00

从表 6 结果看出，对铁钛选矿尾矿进行擦洗-沉降预抛尾时，不添加分散剂的抛尾效果较好。当抛除的上层矿泥产率为 9.26% 时，Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低，为 28.6 g/t，Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分布率仅为 4.41%。由此看来，对选钛尾矿采取擦洗-沉降预抛尾是一种有效

的措施，可有效降低后续的选矿成本。

### 3 综合流程实验

铁钛选矿尾矿中钪的载体矿物钛辉石、钛铁矿等硬度相对较大，与其他绿泥石等黏土矿物存在可碎性、可磨性差异。综合第二部分探索实验流程及结果，考虑采用阶磨阶选工艺，在适当提高磨矿细度的前提下，采取擦洗-沉降预抛尾-选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾的联合工艺流程进行实验。实验流程见图3，实验结果见表7。

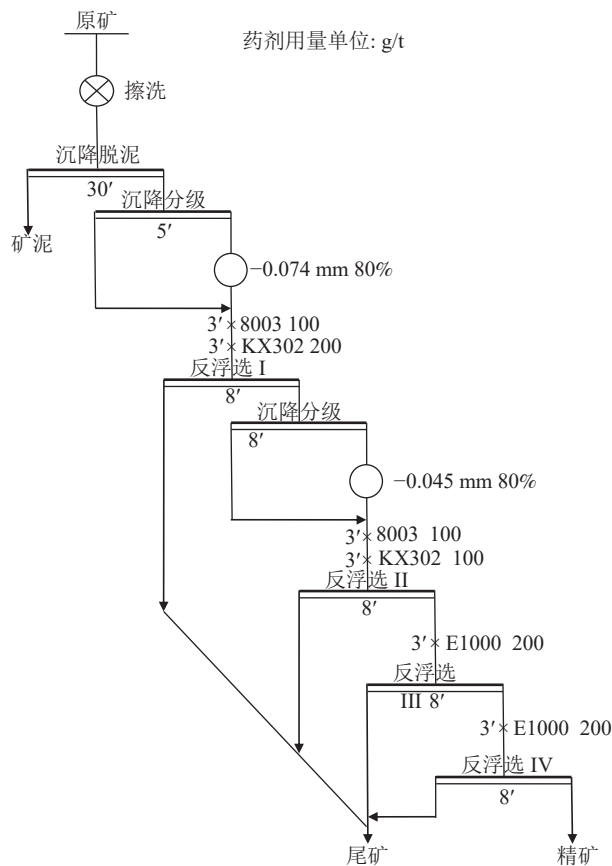


图3 擦洗-沉降预抛尾-选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾实验流程

Fig.3 Scrub-settlement pre-tail-selective secondary grinding-stage reverse flotation test process

表7 擦洗-沉降预抛尾-选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾实验结果/%

Table 7 Test results of scrub-settlement pre-tail-selective secondary grinding-stage and reverse flotation

产品名称	产率/%	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/(g/t)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 分布率/%
矿泥	10.71	16.00	2.81
尾矿	19.61	48.60	16.15
精矿	69.68	70.90	81.04
原矿	100.00	60.96	100.00

从表7结果看出，在适当提高磨矿细度的前提下，采取擦洗-沉降预脱泥和选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾工艺，对钪尾矿提钪效果较好，各抛尾作业产出尾矿中的 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低，最终可获得精矿含 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 70.90 g/t，Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率 81.04% 的较好指标。

将钪钛磁铁矿尾矿经过擦洗-沉降预脱泥和选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾后获得的钪精矿进行 XRD 测试，图4钪精矿的 XRD 测试结果表明钪在钪精矿中的赋存状态比较分散，主要集中在辉石类、闪石类矿物中。

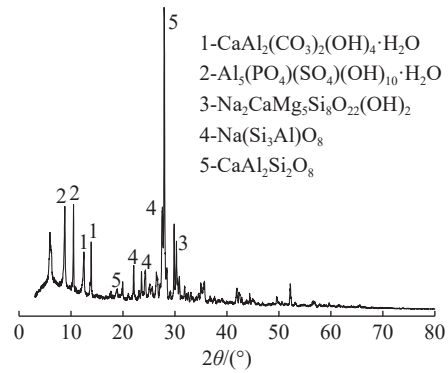


图4 钪精矿 XRD

Fig.4 X-Ray Diffraction of scandium concentrate

### 4 结论

(1) 实验样品为选铁、钪后的钪钛磁铁矿尾矿，主要矿物组分有辉石-钛辉石、钛铁矿和钛磁铁矿，其次为长石、橄榄石、云母，其他矿物含量较少。目的元素钪主要以类质同象形式赋存于辉石和钛铁矿中，样品中部分辉石及其他硅酸盐矿物嵌有钛磁铁矿，辉石结构中包裹部分磁铁矿；钛铁矿及钛磁铁矿主要以单矿物零星分布为主，连生体矿物多以包裹及浸染形式嵌布在硅酸盐基体上。

(2) 采用擦洗-沉降预抛尾-选择性二段磨矿-阶段反浮选抛尾联合工艺，抛除的尾矿产率为 30.32%，实现了有效抛尾；钪含量由 60.96 g/t 提高到 70.90 g/t，Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率为 81.04%，钪元素得到了较好的富集。

(3) 由于铁钛尾矿中的矿物嵌布关系复杂，性质相似，钪元素含量低而且分散，所以从铁钛尾矿中依靠选矿手段富集提钪难度较大，选矿富集比不高，仅能为下一步冶金分离提取钪准备原料。

(4) 通过和以往的研究成果对比, 各类型钒钛磁铁矿中钒含量具有一定的波动, 多在 20~60 g/t 之间, 矿体围岩要高于铁钛矿石。

### 参考文献:

- [1] 孙帅, 孙宏骞, 宋静, 等. 钒资源现状及溶剂萃取在钒提取过程中的应用研究进展[J]. *过程工程学报*, 2020(8):877-886.  
SUN S, SUN H Q, SONG J, et al. Current status of scandium resources and application of solvent extraction in Guns extraction[J]. *The Journal of Process Engineering*, 2020(8):877-886.
- [2] 赵宏军, 陈秀法, 李娜, 等. 全球钒资源供需分析及对策建议[J]. *中国矿业*, 2019(4):57-62.  
ZHAO H J, CHEN X F, LI N, et al. Analysis of global vanadium resource supply and demand and countermeasures[J]. *China Mining Industry*, 2019(4):57-62.
- [3] 孙军, 刘云龙, 崔滔. 我国钒矿资源概况及产业发展建议[J]. *资源与产业*, 2019, 21(2): 74-79  
SUN J, LIU Y L, CUI T. Introduction to China's scandium resource and suggestions on its industrial development [J]. *Resources and Industries*, 21(2): 74-79.
- [4] 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. *科学通报*, 2020, 65(33): 3651-3652.  
HOU Z Q, CHEN J, ZHAI M G. Current status and frontiers of research on critical mineral resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3651-3652.
- [5] 邱叶红, 董惠, 朱刘. 钒回收提取技术发展现状[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(10):145-146.  
QIU Y H, DONG H, ZHU L. Development status of scandium recovery and extraction technology[J]. *Comprehensive Utilization of Resources in China*, 2021, 39(10):145-146.
- [6] 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 of scandium extraction technology in Panxi vanadium titanium-magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):135-139.
- [7] 刘亚川, 丁其光. 中国西部重要伴生矿产综合利用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.  
LIU Y C, DING Q G, et al. Comprehensive utilization of important associated mineral resources in Western China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [8] 王录锋, 代长富. 从攀枝花钒钛磁铁矿中回收钒研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(4):21-26.  
WANG L F, DAI C F. Progress in recovering scandium from vanadium titanomagnetite in Panzhihua[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(4):21-26.
- [9] 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 L, et al. Recovery of scandium resource from Sc-bearing vanadium-titanium magnetite tailings in Panxi Region [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 41(6): 61-64.
- [10] 朱浚杰, 沈春英, 丘泰. 稀有元素钒的研究现状[J]. *材料导报*, 2006, 20(F5): 379-381  
ZHU M J, SHEN C Y, QIU T. Research state of lanthanon-scandium [J]. *Material Guide Report*, 20(F5): 379-381.

## Research on Sandium Extraction of Scandium Vanadium Titanomagnetite in Panzhihua

Deng Bing<sup>1</sup>, Wang Xiaohui<sup>1</sup>, Liang Youwei<sup>1</sup>, Xiao Junhui<sup>2</sup>

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, CAGS, Applied Technology Innovation Center of Rare Earth Resources, China Geological Survey, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of mineral processing engineering. Sandium in vanadium titanomagnetite tailings in Panzhihua is mainly found in pymene and titanium ore, some pymene and other silicate minerals are embedded with titanium tailings, and the mineral embedding has complex relationship and similar properties, low and scattered scandium element content, scrub-settlement pre-dumping-selective two-stage anti-flotation dumping is adopted; the dumping rate is 30.32%; scandium element is increased from 60.96 g/t to 70.90 g/t, and the Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> recovery rate is 81.04%.

**Keywords:** Mineral processing engineering; Iron titanium tailings; Extract scandium; Beneficial components; Comprehensive recovery