doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.007

引用格式：张仪杰，袁加巧，余安美，陈丽，陈明军，蒋维，文书明，柏少军. 攀枝花钛铁矿选钛尾矿中钛的赋存特征与二次回收[J]. 矿冶，2026，35(1)：46-51.

ZHANG Yijie, YUAN Jiaqiao, YU Anmei, CHEN Li, CHEN Mingjun, JIANG Wei, WEN Shuming, BAI Shaojun. Occurrence characteristics and secondary recovery of titanium from titanium separation tailings of Panzhihua ilmenite[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 46-51.

攀枝花钛铁矿选钛尾矿中钛的赋存特征与二次回收

张仪杰[1] 袁加巧[1] 余安美[1] 陈 丽[1] 陈明军[1]
蒋 维[1] 文书明[1,2] 柏少军[1,2]

（1. 昆明理工大学 国土资源工程学院，昆明 650093；
2. 复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室，昆明 650093）

摘 要：为实现攀枝花地区钛资源的二次利用，以某选钛尾矿为研究对象，开展了系统的工艺矿物学与选矿试验研究。工艺矿物学分析表明，该尾矿中TiO_2品位为4.63%，SiO_2含量为45.57%，属于典型低品位高硅钛铁矿石；钛的赋存形式复杂，其中72.57%以钛铁矿形式存在，嵌布粒度微细（主要集中在0.02~0.36 mm），另有22.25%的钛以类质同象形式赋存于硅酸盐矿物中，增加了回收难度。选矿试验结果表明，在磨矿细度为−0.074 mm占比72%的条件下，采用单一强磁选、摇床重选或螺旋溜槽均难以实现钛铁矿的有效富集。最终采用强磁选-摇床重选联合工艺，获得了TiO_2品位为15.32%、回收率为53.44%的预富集精矿，为同类复杂尾矿中钛资源的综合利用提供了可行的技术途径。

关键词：钛铁矿；尾矿；钛；工艺矿物学；强磁选；重选；联合工艺；预富集

中图分类号：TD983；TD922；TD923 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0046-06

Occurrence characteristics and secondary recovery of titanium from titanium separation tailings of Panzhihua ilmenite

ZHANG Yijie[1] YUAN Jiaqiao[1] YU Anmei[1] CHEN Li[1] CHEN Mingjun[1]
JIANG Wei[1] WEN Shuming[1,2] BAI Shaojun[1,2]

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metals, Kunming 650093, China)

Abstract: To achieve the secondary utilization of titanium resources in the Panzhihua area, systematic process mineralogy and mineral processing test studies were conducted on the titanium separation tailings. The process mineralogy analysis indicates that the tailings have a TiO_2 grade of 4.63% and an SiO_2 content of 45.57%, classifying them as typical low-grade, high-silica titanium-bearing iron ore. The occurrence form of titanium is complex, with 72.57% existing as ilmenite, which is finely disseminated (mainly in the range of 0.02 −0.36 mm). An additional 22.25% of titanium occurs in silicate minerals in an isomorphic form, increasing the difficulty of recovery. The mineral processing test results show that under the condition of a grinding fineness of 72% passing −0.074 mm, it is difficult to achieve effective concentration of ilmenite using single methods such as high-intensity magnetic separation, shaking table gravity separation, or spiral chute gravity separation. Ultimately, a combined process of high-intensity magnetic separation and shaking table gravity separation was adopted, successfully obtaining a pre-

收稿日期：2024-11-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52374270)
第一作者：张仪杰，硕士研究生，研究方向为浮选理论与资源综合利用。E-mail：15209991827@163.com
通信作者：柏少军，博士，教授；E-mail：baishaojun830829@126.com

concentrate with a TiO_2 grade of 15.32% and a recovery of 53.44%. This provides a feasible technical pathway for the comprehensive utilization of titanium resources in similar complex tailings.

Key words: ilmenite; tailings; titanium; process mineralogy; high-intensity magnetic separation; gravity separation; combined process; pre-concentration

钛是地壳中分布最广且丰度较高的元素之一，其质量占地壳的0.61%，在所有元素中位列第九。钛具有良好的合金化能力，可与其他金属形成高强度、低膨胀系数的合金材料，并具备优异的耐腐蚀性能，因而被广泛应用于化工、电力、冶金、制盐等传统工业领域，同时在航空航天、海洋工程、体育器材等新兴领域中的应用也日益增多[1]。

我国钛矿资源丰富，目前已发现矿产地205处，主要工业矿物为钛铁矿与金红石[2]。我国钛资源总体呈现储量大、分布广但相对集中的特点，且以原生钛铁矿为主，金红石资源较少；矿石多为贫矿，且均以多金属共生矿形式存在[3]。攀枝花地区是我国最大的钒钛磁铁矿基地，其矿石以品位低、矿物组成复杂为典型特征[4,5]。攀西地区钒钛磁铁矿中TiO_2平均品位约为5%，占全国钛铁矿资源的96%[6,7]。攀西地区采用“先选铁、后选钛”的综合利用原则流程[6,7]，为获得高品质铁精矿，需对原矿进行细磨处理，导致选铁尾矿（即选钛原料）中−0.039 mm粒级含量高达13%左右。这部分微细粒级矿物因质量小、动量低，在常规浮选过程中与气泡碰撞几率低，导致浮选速率与回收率下降，同时易造成细泥干扰，降低精矿品位[8]。

目前，钛铁矿的常用选矿方法包括重选、磁选、电选、浮选及其联合工艺[9-13]。针对细粒级钛铁矿，浮选工艺因选择性强、富集比高而表现出显著优势[14]，但由于我国钛铁矿普遍品位较低，直接浮选成本较高，通常需要在浮选前进行预富集。本研究以攀枝花某钛铁矿选矿厂的钛铁矿选钛尾矿为研究对象，采用化学分析、物相分析、光学显微镜观察与物理筛分等手段，系统开展工艺矿物学研究，查明钛在矿石中的赋存状态与嵌布特征；在此基础上，根据矿物学特性探索钛的高效回收工艺，研究结果旨在为该类钛铁资源的合理利用提供技术参考。

1 工艺矿物学研究

1.1 化学成分与化学物相

研究原矿为攀枝花某含钛铁矿选钛尾矿TiO_2品位为4.63%，与国内钛铁矿石TiO_2平均品位（约5%）相近，主要可回收元素为Ti和Fe。脉石成分以MgO、SiO_2和Al_2O_3为主，含量分别为6.58%、45.57%和13.35%，属于典型的低品位高硅钛铁矿石，其主要化学成分见表1。钛化学物相分析结果见表2。

表1 含钛铁矿尾矿的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of ilmenite tailings /%

成分	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	P
含量	4.63	9.53	6.58	15.63	45.57	13.35	0.02

表2 含钛铁矿尾矿中钛的化学物相

Table 2 Chemical phase analysis of titanium in the titanium-bearing iron ore tailings /%

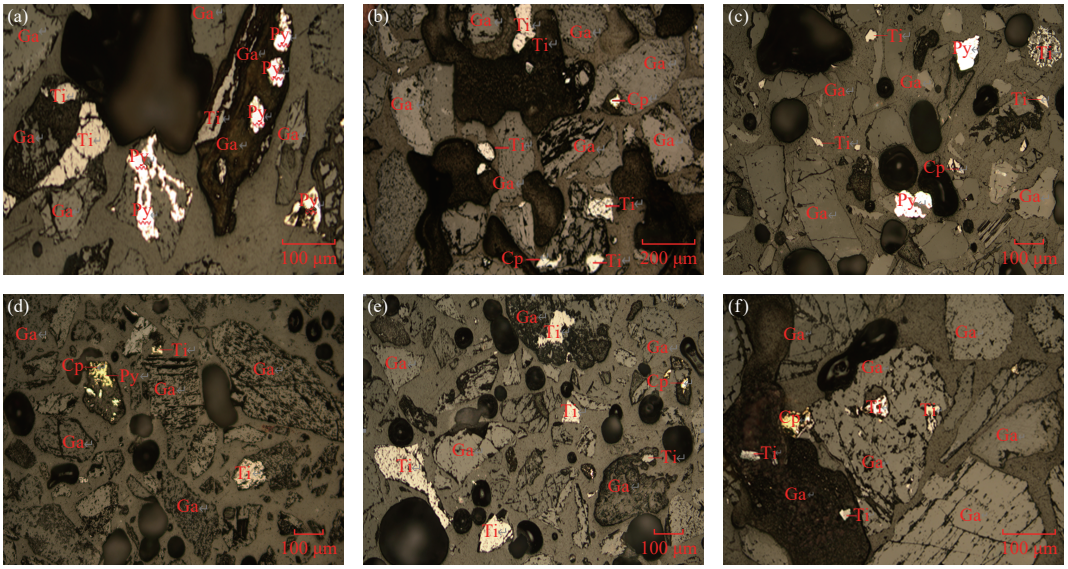
相别	钛铁矿中钛	钛磁铁矿中的钛	辉石中钛	硅酸盐及其它矿物中钛	总钛
含量	3.36	0.11	0.13	1.03	4.63
分布率	72.57	2.37	2.81	22.25	100.0

由表2可知，原料中的钛主要赋存在钛铁矿中，分布率高达72.57%。赋存于钛磁铁矿与辉石中的钛含量相对较低，分布率分别为2.37%和2.81%。此外，钛在硅酸盐及其他矿物相中的分布率为22.25%，占比虽次于钛铁矿，因分布率不低，也不可忽视。

1.2 金属矿物嵌布特征

攀枝花某含钛铁矿尾矿中的金属矿物以钛铁矿为主，伴生少量黄铁矿与黄铜矿。整体上，金属矿物含量较低，单体解离度普遍不高，且嵌布粒度普遍较细，主要集中在0.02~0.36 mm，其中主要以<0.05 mm的粒级为主。各金属矿物的具体嵌布特征及赋存状态如图1所示。

钛铁矿在反射光下呈灰白微带粉红色，硬度较高，反射率相对较低，表现为非均质性并具有磁性。其嵌布粒度集中于0.02~0.36 mm，并以<0.05 mm粒级为主，矿物含量约占矿床总量的4.2%。钛铁矿的单体解离度仅为31.1%，大部分与脉石矿物形成连生体。黄铁矿反射色为淡黄色，硬度高，反射率较高（约50%），具均质性。镜下未见其单体矿物，主要与脉石构成连生体，偶见其与钛铁矿、黄铜矿及脉石共同连生。黄铁矿嵌布粒度同样以<0.05 mm为主，含量约占矿床的0.5%。黄铜矿反射色为黄色，硬度中等，反射率较高（约45%），具弱非均质性。镜下亦未观察到其



Py—黄铁矿；Ti—钛铁矿；Ga—脉石；Cp—黄铜矿

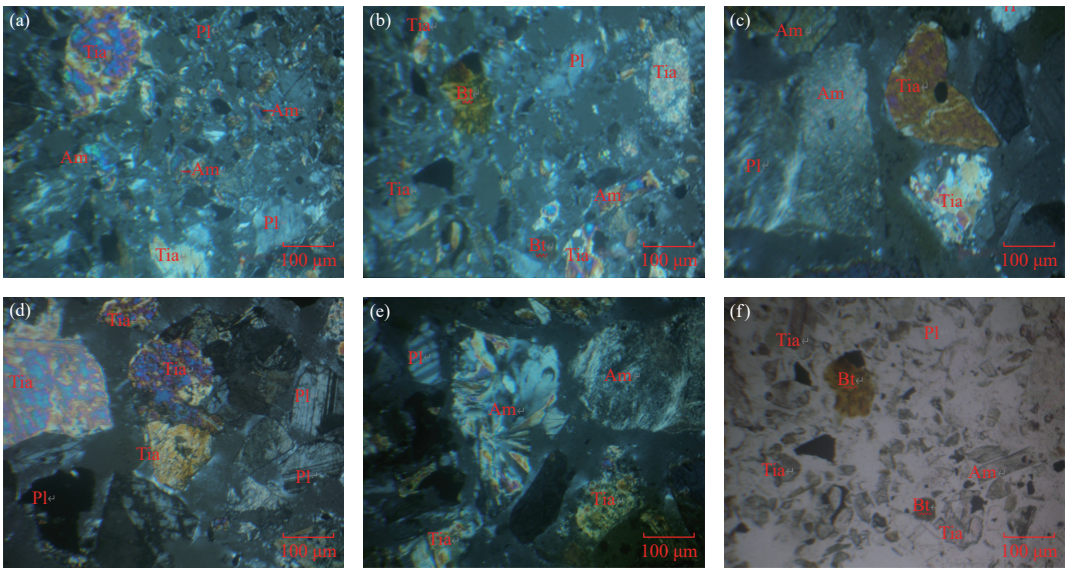
图1　攀枝花钛铁矿选钛尾矿的光学显微镜照片

Fig. 1　Optical microscope photographs of the titanium separation tailings from Panzhihua's titanium-bearing iron ore

单体，主要与脉石或钛铁矿、黄铁矿构成连生体。其嵌布粒度均小于0.05 mm，含量约占矿床总量的0.2%。

1.3　非金属矿物嵌布特征

原矿中的非金属矿物主要由钛辉石、斜长石、角闪石、橄榄石、黑云母及白云石等组成，非金属矿的嵌布特征图如图2所示。钛辉石含量约为57.6%，是主要的非金属矿物。其多呈淡紫色，具晶屑状结构，正突起显著。该矿物发育一组完全解理，偶见第二组解理，在偏光显微镜下显示二级红橙干涉色。斜长石含量约为34.5%，通常无色，呈晶屑状，正突起较低。镜下可见钠长石双晶、肖钠双晶及卡纳双晶，并伴有轻微的绢云母化蚀变现象。角闪石类矿物（包括绿泥石、纤闪石及普通角闪石）含量约为4.4%。原生矿物呈褐色，蚀变后多呈绿色或黄绿色，具明显多色性。该类矿物正突起较高，消光角较小，在偏光显微镜下显示褐色异常干涉色。橄榄石含量约为1.2%，呈无色晶屑状，正突起显著，表面粗糙，无解理但裂纹发育，干涉色为2~3级。黑云母含量约为0.3%，呈褐色片状，具



Tia—含钛辉石；Am—角闪石；Pl—斜长石；Bt—黑云母

图2　攀枝花钛铁矿选钛尾矿中非金属矿的光学显微镜照片

Fig. 2　Optical microscope photographs of non-metallic minerals in the titanium separation tailings from Panzhihua's titanium-bearing iron ore

多色性及一组极完全解理，表现为褐色异常干涉色和平行消光。白云石含量约为0.5%，呈无色晶屑状，干涉色为高级白。此外，不透明矿物含量约占1.5%。

1.4 粒度分布

为探明攀枝花某含钛铁矿尾矿中钛元素的分布规律，对该尾矿样品进行了系统的粒度筛析试验。将样品按粒级从+0.5 mm至−0.019 mm进行分级，系统考察了各粒级中TiO_2的品位及金属分布率，结果如表3所示。由表3可知，TiO_2品位随粒级减小呈递减趋势，由+0.5 mm粒级的6.51%逐渐降低至−0.019 mm粒级的6.01%，表明钛元素在粗粒级中相对富集。金属分布率数据进一步印证了这一规律：−0.1~+0.074 mm粒级与−0.074~+0.037 mm粒级的TiO_2金属分布率分别达到31.33%和19.11%。特别值得注意的是，+0.5~+0.037 mm的TiO_2累计金属分布率高达84.11%，充分证明尾矿中绝大部分钛铁矿赋存于粗粒级区间。因此，优化粗粒级物料的回收工艺是提高钛铁矿综合回收指标的关键所在。

表3 攀枝花钛铁矿选钛尾矿粒度筛析结果

Table 3 Particle size screening results of the titanium separation tailings from Panzhihua's titanium-bearing iron ore

粒级/mm	产率/%		TiO_2品位/%	TiO_2金属分布率/%	
	个别	累计		个别	累计
+0.5	5.41	12.54	6.51	7.60	7.60
−0.5~+0.2	11.21	16.62	5.26	12.73	20.34
−0.2~+0.1	18.05	34.67	3.42	13.33	33.67
−0.1~+0.074	33.13	67.80	4.38	31.33	65.00
−0.074~+0.037	19.03	86.83	4.65	19.11	84.11
−0.037~+0.019	7.02	93.85	5.22	7.91	92.02
−0.019	6.15	100.0	6.01	7.98	100.0
合计	100.0		4.63	100.0	

2 选矿试验研究

2.1 强磁选预富集试验

磨矿是钛铁矿分选的关键预处理环节，其目的是实现有用矿物与脉石的有效解离。由于矿石粒度较粗，需要通过磨矿提高钛铁矿的单体解离度。然而，过磨会导致能耗增加、矿物表面氧化及泥化，进而影响分选效果。

采用SLon立环脉动高梯度磁选机对磨矿后产品进行强磁选，重点考察磨矿细度和磁场强度对分选指标的影响，结果见表4。由表4可知，随着磨矿时间延长，TiO_2品位呈下降趋势，这可能是由于过磨现象加剧所致；当磁感应强度从0.7 T降至0.5 T时，精矿产率从42.29%降至36.74%，TiO_2回收率从75.96%降至68.88%；继续降低磁场强度至0.4 T，各项指标进一步恶化。在优化条件（−0.074 mm占比72%，磁感应强度0.7 T）下，可获得产率42.29%、TiO_2品位8.32%、回收率75.96%的粗精矿。强磁选预富集试验结果表明，强磁选能有效预富集钛铁矿，但需联合其他工艺进一步提高精矿品位。

表4 攀枝花钛铁矿选钛尾矿磨矿产品直接强磁选预富集试验结果

Table 4 Pre-concentration test results of direct high-intensity magnetic separation for the ground product of Panzhihua's titanium separation tailings /%

试验条件	产品名称	产品指标		
		产率	TiO_2品位	TiO_2回收率
−0.074 mm占比72%，磁感应强度0.7 T	精矿	42.29	8.32	75.99
	尾矿	57.71	1.93	24.01
	原矿	100.0	4.63	100.0
−0.074 mm占比82%，磁感应强度0.7 T	精矿	34.45	9.72	72.32
	尾矿	65.55	1.95	27.68
	原矿	100.0	4.63	100.0
−0.074 mm占比72%，磁感应强度0.5 T	精矿	36.74	8.68	68.88
	尾矿	63.26	2.28	31.12
	原矿	100.0	4.63	100.0
−0.074 mm占比82%，磁感应强度0.5 T	精矿	27.39	10.42	61.64
	尾矿	72.61	2.45	38.36
	原矿	100.0	4.63	100.0
−0.074 mm占比82%，磁感应强度0.4 T	精矿	23.53	11.17	56.77
	尾矿	76.47	2.62	43.23
	原矿	100.0	4.63	100.0
−0.074 mm占比82%，磁感应强度0.6 T	精矿	31.45	10.11	68.67
	尾矿	68.55	2.12	31.33
	原矿	100.0	4.63	100.0

2.2 摇床重选试验

为实现钛铁矿的富集，基于钛铁矿与脉石矿物的密度差异开展了摇床重选试验：磨矿细度−0.074 mm占比72%的细度，磨矿产物经摇床重选后直接得到精矿、中矿与尾矿三种产物。在床面坡度2°、冲程9 mm、冲次260次·min^{-1}、给矿浓度30%的条件下所得分选指标如表5所示：精矿产率21.29%，TiO_2品位13.42%，回收率61.71%；中矿产率10.34%，TiO_2品位5.64%，回收率12.60%；尾矿TiO_2品位降至1.74%，回收率25.69%。试验证明，摇床重选能有效提高TiO_2品位，实现钛铁矿的初步富集。

2.3 螺旋溜槽试验

为对比不同重选设备效果，开展Φ400 mm螺旋溜槽试验：将磨矿产品（−0.074 mm占比72%）放入螺旋溜槽进行分选，最终得到精矿、中矿与尾矿三种产物，试验结果见表6。由表6可知，在相同给矿条件下，

表5 攀枝花钛铁矿选钛尾矿磨矿产品直接摇床重选预富集试验结果

Table 5 Pre-concentration test results of direct shaking table gravity separation for the ground product of Panzhihua's titanium separation tailings /%

试验条件	产品名称	产品指标		
		产率	TiO_2品位	TiO_2回收率
床面坡度为2°、冲程9 mm、冲次260次/min、给矿浓度30%，分选细度为−0.074 mm占72%	精矿	21.29	13.42	61.71
	中矿	10.34	5.64	12.6
	尾矿	68.37	1.74	25.69
	原矿	100.0	4.63	100.0

表6 攀枝花钛铁矿选钛尾矿磨矿产品直接螺旋溜槽预富集试验结果

Table 6 Pre-concentration test results of direct spiral chute gravity separation for the ground product of Panzhihua's titanium separation tailings /%

试验条件	产品名称	产品指标		
		产率	TiO_2品位	TiO_2回收率
给矿浓度30%，分选细度为−0.074 mm占比72%，Φ400 mm螺旋流槽	精矿	19.29	13.42	55.86
	中矿	8.45	7.53	13.73
	尾矿	72.26	1.95	30.41
	原矿	100.0	4.63	100.0

精矿产率为19.29%，TiO_2品位为13.42%，回收率为55.86%；中矿和尾矿的TiO_2品位分别为7.53%和1.95%。

与摇床重选相比，螺旋溜槽在精矿品位相同的情况下，回收率降低5.85个百分点，表明其分选效果略逊于摇床重选。

2.4 强磁选—摇床重选联合工艺

由上述试验结果可知，单一强磁选虽能实现初步富集，但精矿品位仍偏低；单一重选虽能提高品位，但回收率有限。为此，采用强磁选—摇床重选联合工艺处理磨矿产品。具体操作为：将湿式磨矿后所得矿浆（−0.074 mm占比72%）引入SLon立环脉动高梯度磁选机进行强磁选，将强磁选粗精矿再采用摇床进行精选，得到最终精矿、中矿与尾矿。试验结果（表7）显示，联合工艺最终获得TiO_2品位15.32%、回收率53.44%的分选指标，显著优于任何单一工艺，为后续浮选作业提供了合格的给料。

表7 攀枝花钛铁矿选钛尾矿磨矿产品强磁选—摇床重选组合工艺试验结果

Table 7 Combined process test results of high-intensity magnetic separation and shaking table gravity separation for the ground product of Panzhihua's titanium separation tailings /%

试验条件	产品名称	产品指标		
		产率	TiO_2品位	TiO_2回收率
强磁选—摇床重选组合工艺	精矿	16.15	15.32	53.44
	中矿	6.32	6.72	9.17
	尾矿1	22.22	3.01	14.45
	尾矿2	55.31	1.92	22.94
	原矿	100.0	4.63	100.0

3 结论

1）攀枝花某含钛铁矿尾矿属低品位高硅型钛铁矿石，TiO_2品位为4.63%。钛主要赋存于钛铁矿中（分布率72.75%），其次以类质同象形式分布于硅酸盐矿物中（22.25%）。矿石中钛铁矿含量为4.2%，嵌布粒度以0.02~0.36 mm为主，且多与脉石矿物共生。

2）单一选矿方法难以实现钛铁矿的有效富集。在磨矿细度−0.074 mm占72%条件下，强磁选、摇床重选和螺旋溜槽分选获得的精矿TiO_2品位分别为8.32%、13.42%和13.42%，回收率分别为75.96%、61.71%和55.86%。

3）强磁选—摇床重选联合工艺可显著提高分选效率，获得TiO_2品位15.32%、回收率53.44%的预富集精矿，为该类难处理钛铁矿的资源化利用提供了技术可行方案，并为后续浮选作业奠定了原料基础。

参考文献

[1] 李政，陈从喜. 全球钛资源行业发展现状[J]. 地球学报，2021, 42(2): 245-250.
LI Z, CHEN C X. Development status of global titanium resources industry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 245-250.

[2] 张晓伟，张万益，童英，等. 全球钛矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用，2019, 39(5): 68-75.
ZHANG X W, ZHANG W Y, TONG Y, et al. Current situation and utilization trend of global titanium resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 68-75.

[3] 吴贤，张健. 中国的钛资源分布及特点[J]. 钛工业进展，2006(6): 8-12.
WU X, ZHANG J. Distribution and characteristics of titanium resources in China[J]. Titanium Industry Progress, 2006(6): 8-12.

[4] 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.

[5] 杜雨生，马龙秋，孟庆有，等. 四川攀西某难选钛铁矿重选精矿浮选试验研究[J]. 金属矿山，2019(4): 82-87.
DU Y S, MA L Q, MENG Q Y, et al. Experimental study on the

flotation of a refractory ilmenite gravity concentrate in Sichuan Panxi area[J]. Metal Mine, 2019(4): 82-87.

[6] 王洪彬，李金，张国华. 攀西钒钛磁铁矿中钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 23-29.
WANG H B, LI J, ZHANG G H. Efficient recovery of ilmenite from vanadium bearing titanomagnetite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23-29.

[7] 陈树民. 攀枝花钒钛磁铁矿钛铁矿回收工艺流程优化探讨[J]. 矿产综合利用, 2009(5): 7-10.
CHEN S M. Research on the technological flowsheet for recovering ilmenite from Panzhihua vanadious titanomagnetite ore and its optimization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009(5): 7-10.

[8] 胡厚勤，谢海云，罗荣飞. 攀西钒钛磁铁矿粗、细粒钛铁矿混合浮选的可行性研究[J]. 矿冶, 2023, 32(4): 33-39.
HU H Q, XIE H Y, LUO R F. Feasibility study on mixed flotation of coarse and fine ilmenite in the west of Panzhihua area[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(4): 33-39.

[9] 吴雪红. 某选钛尾矿钛的再回收试验[J]. 现代矿业，2017, 33(4): 104-107, 112.
WU X H. Titanium recycling test on a titanium separation tailings[J]. Modern Mining, 2017, 33(4): 104-107, 112.

[10] 熊堃，文书明，郑海雷. 钛铁矿资源加工研究现状[J]. 金属矿山, 2010(4): 93-96.
XIONG K, WEN S M, ZHENG H L. Research on mineral processing status of ilmenite resources[J]. Metal Mine, 2010(4): 93-96.

[11] 肖玮，邵延海，尉佳怡，等. 钛铁矿浮选药剂研究现状及展望[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(5): 160-167.
XIAO W, SHAO Y H, WEI J Y, et al. Research status and prospect of ilmenite flotation reagents[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(5): 160-167.

[12] PAN Y, ZHAN D, YUNXIAO B, et al. Surface modification of ilmenite by introducing copper-ammonia ion and its response to flotation in H_2SO_4-H_2O_2 system[J]. Minerals Engineering, 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107102.

[13] HU Y, YE G, ZUO Q, et al. Activation of ilmenite flotation by sodium chlorite in the sodium oleate system[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 305. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122506.

[14] 李苏琦，郭秀兰，龚祥，等. 攀枝花某含钛铁尾矿工艺矿物学及钛回收工艺探索[J]. 矿冶, 2024, 33(1): 103-109, 130.
LI S Q, GUO X L, GONG X, et al. Study on process mineralogy and the beneficiation of the titanium-contained iron tailings in Panzhihua[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 103-109, 130.