

# 氧化改性钛渣含钛物相赋存状态及分选试验研究

费之奎\*, 张士举, 王录峰, 费娟, 曹佳译

攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花

收稿日期: 2025年10月31日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月17日

## 摘要

钛渣是生产钛白粉的核心原料, 但其含有的Ca、Mg等杂质元素严重影响钛白粉产品纯度。本文以钛渣为研究对象, 采用正交试验法, 结合成分解析、氧化特性研究等手段, 系统探究氧化法提纯钛渣的可行性。通过X射线衍射(XRD)等精密检测技术, 对比分析氧化处理前后钛渣中钛组分的变化, 并进一步研究氧化改性钛渣含钛物相的物理冶金分选方法。结果显示: 氧化处理对钛渣化学成分影响微弱, 但显著改变其物相结构; 钛元素主要富集于金红石相, Ca、Mg等杂质则集中在硅酸盐与板钛矿中, 该物相转变为物理冶金除杂提供了理论支撑。磁选-浮选联合工艺研究表明: 直接浮选除杂后精矿 $TiO_2$ 品位达75.25%; 磁选可有效脱除Fe氧化物等磁性杂质, 其尾矿再经浮选能去除Ca、Mg等杂质, 最终浮选精矿 $TiO_2$ 品位提升至79.33%。

## 关键词

改性钛渣, 高温焙烧, 氧化, 浮选

# Study on the Occurrence State and Separation Test of Titanium-Bearing Phases of Oxidation-Modified Titanium Slag

Zhikui Fei\*, Shiju Zhang, Lufeng Wang, Juan Fei, Jiayi Cao

School of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan

Received: October 31, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 17, 2025

## Abstract

Titanium slag is the core raw material for titanium dioxide production, but its inherent impurity

\*通讯作者。

文章引用: 费之奎, 张士举, 王录峰, 费娟, 曹佳译. 氧化改性钛渣含钛物相赋存状态及分选试验研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(4): 199-207. DOI: 10.12677/meng.2025.124025

elements such as Ca and Mg severely affect the purity of titanium dioxide products. Taking titanium slag as the research object, this paper systematically explores the feasibility of purifying titanium slag by oxidation method using orthogonal test, combined with component analysis, oxidation characteristics research and other means. Through precise detection technologies such as X-ray diffraction (XRD), the changes of titanium components in titanium slag before and after oxidation treatment are compared and analyzed, and the physical metallurgical separation method for titanium-bearing phases in oxidation-modified titanium slag is further studied. The results show that oxidation treatment has a negligible effect on the chemical composition of titanium slag but significantly changes its phase structure; titanium is mainly enriched in rutile phase, while impurities such as Ca and Mg are concentrated in silicates and anatase, and this phase transformation provides theoretical support for physical metallurgical impurity removal. The research on the magnetic separation-flotation combined process indicates that the  $\text{TiO}_2$  grade of concentrate reaches 75.25% after direct flotation for impurity removal; magnetic separation can effectively remove magnetic impurities such as Fe oxides, and the tailings after magnetic separation can further remove impurities such as Ca and Mg through flotation, with the final  $\text{TiO}_2$  grade of flotation concentrate increased to 79.33%.

## Keywords

Modified Titanium Slag, High-Temperature Roasting, Oxidation, Flotation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钛金属是一种具有重要战略意义的金属材料，熔点高达  $1668^\circ\text{C}$ ，且在超低温下仍能保持韧性，因其具有耐腐蚀、生物融合性好等优异的物理和化学性质，被广泛应用于化工、医疗、航空航天、食品、材料等行业[1]-[3]。钛渣主要来源于钒钛磁铁矿的冶炼过程，钛元素主要以  $\text{TiO}_2$  的形式进入炉渣，形成钛含量高、矿物相结构复杂的含钛高炉渣[4]。然而因其矿相结构复杂，常规选矿方法难以处理，致使大量钛资源闲置浪费。随着我国对环境保护和资源节约的日益重视，如何科学合理地有效利用钛渣，实现其减量化、无害化与资源化，已成为亟待解决的关键问题。因此，开发绿色高效的钛渣资源化利用技术，对解决环境污染、提升资源利用效率意义深远[5] [6]。

由于钛渣中  $\text{TiO}_2$  品位高，适合作为钛白粉的生产原料，但因 Ca、Mg 等杂质元素含量高，制约了钛白粉生产过程中的纯度，因此，如何有效去除杂质元素，是亟待解决的首要难题。国内外在湿法和火法冶金提取钛金属上均做了大量研究[7] [8]。国外在利用钛渣回收钛金属上有所研究，通过特定工艺把钛渣转化成钛合金粉末等高附加值产品且重视铁钢渣循环利用。多种冶金渣综合利用技术持续发展，欧洲等部分国家也在探寻更高效环保的钛渣回收技术，改进传统冶金工艺并结合先进分离提纯技术以提高钛回收率与纯度，降低能耗和减少环境污染以利于可持续发展[9]。含钛高炉渣经酸浸处理，在合适条件下钛浸出率达 95%，但此方法会用到高腐蚀性试剂，有较大环境污染风险[10]。火法冶金方面，含钛高炉渣高温碳化处理时，提钛最佳温度是  $1450^\circ\text{C}$ ，此时碳化钛在碳化渣中比例能达 38.35%，并且用铝热法和硅热法从含钛高炉渣制备钛合金也有一定进展，只是合金颗粒溅入残余炉渣会使提取效率降低[11]。国内还开发了新的钛铁矿和含钛高炉渣冶金工艺，钛铁矿或者含钛高炉渣在常压下被浓 KOH 溶液分解，形成高钛低铁中间产物，进一步处理能转化为颜料级二氧化钛，然而此工艺中大量使用 KOH 溶液，导致回收能耗高[12] [13]。有些研究聚焦钛渣综合利用，如利用钛渣生产微晶玻璃、泡沫玻璃、免烧免蒸砖等建筑材料，

或把它用作光催化降解的催化剂等，但利用价值低，钛元素高效提取和利用程度有限[14] [15]。

本文以钛渣为研究对象，采用正交试验法，结合成分解析、氧化特性研究等手段，系统探究氧化法提纯钛渣的可行性。通过 X 射线衍射(XRD)等精密检测技术，对比分析氧化处理前后钛渣中钛组分的变化，并进一步研究氧化改性钛渣含钛物相的物理冶金分选方法[16]-[18]。

2. 试验

2.1. 试验原料的主要成分

原料钛渣的主要成分及含量如表 1 所示。

Table 1. Main chemical components of caw materials  
表 1. 原料钛渣主要化学成分

化学成分	TiO <sub>2</sub>	TFe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	FeO
含量(%)	73.13	5.85	4.42	2.02	7.16	6.55	7.46

根据成分表 1 可知，该样品的 TiO<sub>2</sub> 含量为 73.13%，而 TFe、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、SiO<sub>2</sub>、FeO 等杂质元素的含量分别为 5.85%、4.42%、2.02%、7.16%、6.55%、7.46%。其中，CaO 与 MgO 的总含量达到 9.18%，不符合产品对富钛料的品质要求(CaO + MgO 含量需低于 1.50%)。同时，杂质元素在物相中与钛存在着伴生共存的分布现象，使得传统的物理冶金方法在分离去除杂质时面临着较大的挑战[19]。

2.2. 正交实验设计

为了去除原材料钛渣中的铁元素，本实验采用磁选方法对其进行处理，将处理后的钛渣进行烘干并研磨成粉末。

Table 2. Various influencing factors and levels  
表 2. 各影响因素及水平

因素	水平 1	水平 2	水平 3
A. 反应温度/℃	1000	1100	1200
B. 保温时间/min	30	60	90
C. 通氧流速/(L/min)	2	3	5

利用精密节能电炉开展正交试验，设定的试验参数如表 2 所示，包括三种不同的温度(1000℃、1100℃、1200℃)、三种保温时间(30 min、60 min、90 min)以及三种通氧流速(2 L/min、3 L/min、5 L/min)，每次通氧时间为 5 min。具体操作为：称取 100 g 钛渣粉末，在 1000℃下保温 30 min，通氧流速为 2 L/min，得到相应的氧化物。按照此方法依次进行其他组合试验，分别为 1000℃、60 min、3 L/min；1000℃、90 min、5 L/min；1100℃、30 min、5 L/min；1100℃、60 min、3 L/min；1100℃、90 min、2 L/min；1200℃、30 min、3 L/min；1200℃、60 min、5 L/min；1200℃、90 min、2 L/min。试验完成后，分析各组结果，选取效果最佳的一组参数进行后续的分选处理。各实验组的分类如表 3 所示。

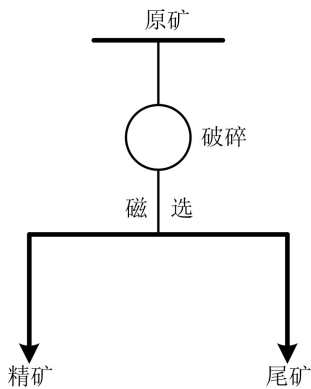
2.3. 分选试验方法

2.3.1. 磁选

磁选是一种将磁性材料与非磁性材料分离的物理方法[20]，其步骤图 1 所示。

**Table 3.** Experimental groups  
**表 3.** 实验分组

实验组	温度/°C	保温时间/min	通氧流速/(L/min)
1	1000	30	2
2	1000	60	3
3	1000	90	5
4	1100	30	5
5	1100	60	3
6	1100	90	2
7	1200	30	3
8	1200	60	5
9	1200	90	2



**Figure 1.** Magnetic separation flow chart  
**图 1.** 磁选流程图

矿石破碎与分级：首先对原始矿石进行破碎处理，随后通过筛网分级，分离出粗矿与细矿，为后续磁选作业提供粒度适宜的原料。

磁选分离作业：将分级后的粗矿送入磁选设备，实现磁性物质与非磁性物质的分离。工业中常用的磁选设备包括干式磁选机、湿式磁选机及高强度磁选机等，可根据原料特性与分离需求选择使用。

磁选尾矿处理：磁选后产生的尾矿中仍可能残留少量磁性成分。为提高资源回收率并降低环境污染，需对尾矿进一步处理，通常采用强磁场选别技术回收其中的磁性物质[21]。

清洗与干燥处理：将磁选分离得到的精矿与处理后的尾矿，分别通过抽滤机进行清洗除杂，再经烘干机干燥，得到符合后续加工要求的产物。

根据矿物工艺学研究分析，氧化改性后的钛渣，其物相主要由铁板钛矿、金红石相及硅酸盐相构成。其中含  $\text{Fe}^{3+}$  的矿物主要包括  $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ 、 $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等，均具备磁性；值得注意的是， $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$  属于板钛矿型矿物，可能伴随 Al、Ca 等杂质，但仍可通过磁选工艺去除。由于该物相为弱磁性，需采用高强度磁场进行磁选作业，以有效分离部分含 Fe 磁性物质，为后续选矿除杂工序提供纯度更优的原料，进而实现钛渣中非含钛物相的高效分离。

磁选工艺的可行性核心取决于各物相的比磁化系数 - 比磁化系数是表征材料磁化性质的关键物理量，定义为材料在外部磁场作用下，磁化强度  $M$  与外部磁场强度  $H$  的比值，直接反映材料对外部磁场的响应

程度。比磁化系数越大，材料在外部磁场中产生的磁化强度越强，越易被磁选分离；反之则分离难度越大[22]。钛渣中主要矿物的比磁化系数数据详见表 4。

**Table 4.** Specific magnetic susceptibility of main minerals in titanium slag

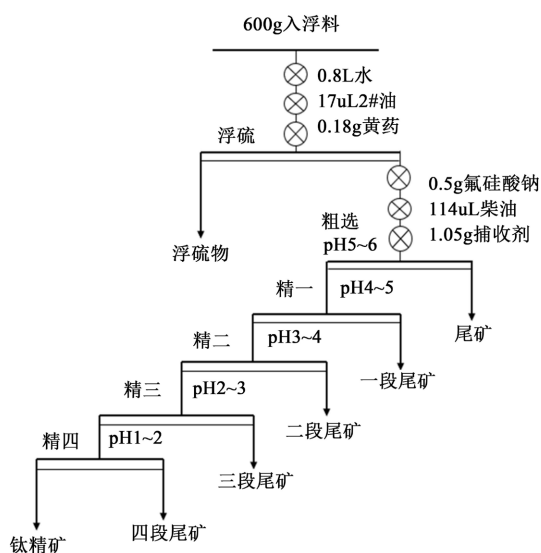
**表 4.** 钛渣中主要矿物比磁化系数

矿物	金红石	赤铁矿	橄榄石	钛铁矿	磁铁矿
比磁化率( $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	12.3	230.18	13.24	315.60	92000.00

由表 4 可知，金红石、橄榄石等物质因比磁化系数过小而被认为无磁性，赤铁矿、钛铁矿磁性较金红石大，为弱磁性矿物，可通过强磁选非含钛物相与金红石分离。因此对改性后钛渣在高磁场强度下进行磁选，可以实现非含钛物相的分离，从而实现初步除杂，因此，利用磁选对实现氧化钛渣中非钛的分离是可行的[23]。

### 2.3.2. 浮选

取磁选尾矿 600 g，作为入浮料备用，浮选工艺流程图如图 2 所示[24] [25]。



**Figure 2.** Flotation process flow chart

**图 2.** 浮选工艺流程图

#### 1) 粗选流程

脱硫预处理：将 600 g 矿样与 0.8 L 自来水加入 1 L 浮选槽，依次加入 17  $\mu\text{L}$  2#油(起泡剂)、0.18 g 黄药(脱硫药剂)，搅拌 2 分钟后充气浮硫 3 分钟，收集浮硫产物。

粗选操作：向脱硫后的矿浆中加入 0.5 g 氟硅酸钠(抑制剂)、114  $\mu\text{L}$  柴油(辅助捕收剂)及 1.05 g 浮选捕收剂，搅拌 2 分钟后充气进行粗选，浮选时间 5~10 分钟，收集粗选精矿和粗选尾矿。

#### 2) 精选流程

粗选精矿依次进行四段精选，每段精选均采用 0.5 L 浮选槽，具体步骤如下[26] [27]。

精选一段：粗选精矿调浆至矿浆浓度 58%，用稀硫酸调节 pH 值至 4~5，充气浮选 5~6 分钟，收集精矿及尾矿。

精选二段至四段：逐段降低 pH 值(精选二段：3~4；精选三段：2~3；精选四段：1~2)，每段浮选时间逐步缩短(精选二段：5 分钟；精选三段：3~5 分钟；精选四段：3 分钟)，最终获得钛精矿。

3) 尾矿处理

各阶段尾矿经浓缩、过滤后测定其钛精矿中 TiO<sub>2</sub> 品位，评估浮选效果。

3. 试验结果与讨论

正交实验结果分析，如下表 5 所示。

Table 5. Orthogonal experiment result analysis  
表 5. 正交实验结果分析

实验组	反应温度(℃)	保温时间(min)	通氧流速(L/min)	TiO <sub>2</sub> 含量(%)
1	1000	30	2	72.23
2	1000	60	3	72.62
3	1000	90	5	72.68
4	1100	30	5	72.65
5	1100	60	3	72.75
6	1100	90	2	72.50
7	1200	30	3	70.79
8	1200	60	5	72.20
9	1200	90	2	72.83
K <sub>1</sub>	72.51	71.89	72.52	
K <sub>2</sub>	72.63	72.52	72.05	
K <sub>3</sub>	71.94	72.67	72.51	
R	0.69	0.78	0.47	

经过正交 9 组试验并检测分析知，各因素对 TiO<sub>2</sub> 含量都有影响，由极差 R 分析结果得出因素顺序为：保温时间 > 反应温度 > 通氧流速。最佳试验条件组合为：反应温度 1100℃、保温时间 60 分钟、通氧流速 3 L/min，表明该组合条件能够最大程度地促进钛的富集，形成更多的金红石相。

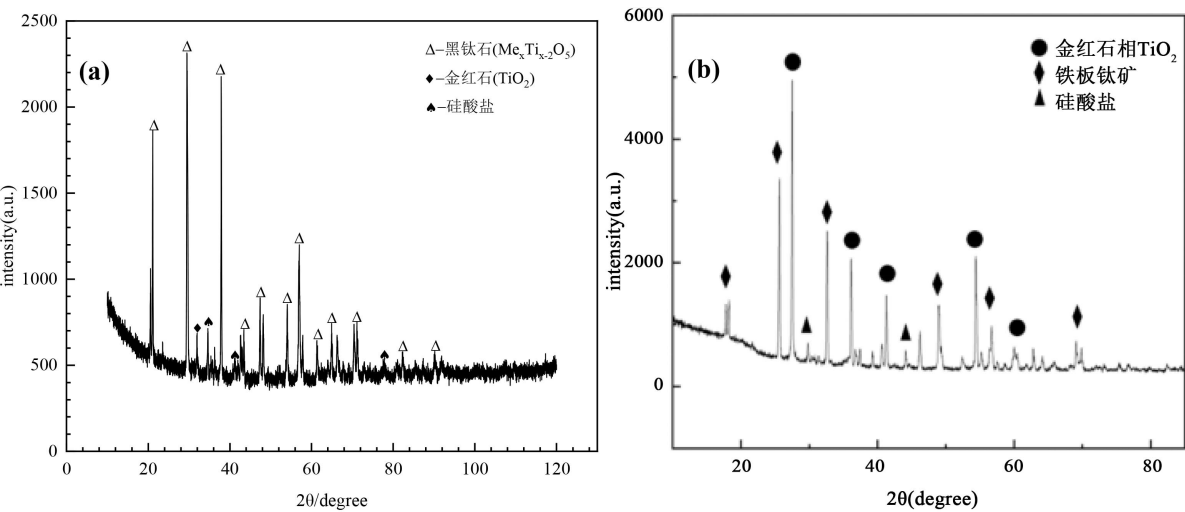
3.1. 氧化改性处理前钛渣物相组成

氧化改性前、后(取最优实验条件)钛渣的 XRD 衍射图谱如图 3 所示。

从图 3(a)可以看出，黑钛石：化学式可表示为 MexTix-2O<sub>5</sub>，是氧化改性前钛渣的主要物相，同时也是结晶最早的物相。该钛渣中主要成分为 FeTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>、CoTiO<sub>3</sub>。该物相中二氧化钛含量一般小于 85%。从 XRD 能谱分析中可以看出，黑钛石的相对含量最高，其在 1000℃能被氧化为 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 和金红石相 TiO<sub>2</sub>。硅酸盐：钛渣中的硅酸盐矿物主要包括顽火辉石、橄榄石、玻璃体。顽火辉石表面较为平整，与黑钛石交叉分布；橄榄石主要分布在黑钛石的边缘部分；硅质玻璃体中主要含 Si、Ca、Al 等杂质，矿物形状不规则。钛铁晶石：钛铁晶石在钛渣中含量很少，通过 XRD 衍射不能有效检测出该矿相。图 3(b)中金红石相(TiO<sub>2</sub>)的衍射峰强度显著增强，尤其是在 2θ=27.6°、53.8°等位置。铁板钛矿(FeTiO<sub>3</sub>)的衍射峰强度有所减弱，尤其是在 2θ=24.7°、33.8°等位置。而硅酸盐相的衍射峰强度相对减弱，尤其是在



$2\theta = 17.8^\circ$ 、 $29.75^\circ$ 、 $44.9^\circ$ 等位置。发生此种变化的原因是，保温时间增加到 60 分钟，使得氧化反应更充分， $\text{TiO}_2$  进一步富集形成更多的金红石相。同时，通氧流速降低到 3 L/min，氧化反应对铁板钛矿的影响减小，导致铁板钛矿的衍射峰强度减弱。而较低的通氧流速使得氧化反应对硅酸盐相的影响减小，部分硅酸盐相保持稳定，但整体衍射峰强度仍有所减弱。分析金红石相、铁板钛矿相和玻璃相中元素成分及含量可以发现氧化改性使钛渣中大部分的钛富集到金红石相中，有利于选择性分离[28]。



**Figure 3.** XRD Diffraction pattern of titanium slag before oxidative modification: (a) Unoxidized; (b) Oxidize  
**图 3.** 氧化改性前钛渣的 XRD 衍射图谱: (a) 未氧化前; (b) 氧化

3.2. 分选试验结果

取正交试验最优条件下的结果作为样品，先进行磁选，去除部分磁性物，再根据图 2 中的工艺流程对样品进行浮选试验[29]，可得试验结果如表 6 所示。

**Table 6.** Data comparison of direct flotation and magnetic separation-flotation processes  
**表 6.** 直接浮选及磁选-浮选工艺数据对比

工艺	项目	浮选入料	精矿
直接浮选	$\text{TiO}_2$ 品位/%	72.75	75.25
	质量/g	46.00	35.90
磁选 - 浮选联合	$\text{TiO}_2$ 品位/%	75.98	79.33
	质量/g	46.00	30.20

实验数据对比表明，磁选 - 浮选联合工艺处理效果更优：原矿质量相同时，其精矿  $\text{TiO}_2$  品位更高 79.33%，证实该工艺能有效提升钛回收率与品位。核心优势在于：磁选先高效去除磁性杂质，虽伴随少量钛损失，但实现钛的初步富集；浮选再通过优化药剂与工艺参数，精准脱除硅酸盐相中的 Al、Si 等非磁性杂质，显著提高  $\text{TiO}_2$  品位。两者有机结合，使钛渣分离提纯更高效，为钛渣资源化利用提供可行技术方案，兼具资源高效利用与环境保护意义[30]。

4. 结论

1) 对钛渣原料氧化焙烧进行热力学分析以及对正交实验进行极差分析，可以得出从热力学理论上看

通过氧化钛渣改变其物相的方式是可行的, 得出反应温度 1100℃、保温时间 60 min、通氧流速 3 L/min 的条件下进行钛渣氧化效果最好。

2) 对比氧化前后钛渣的成分及物相组成发现, 氧化后钛渣的成分变化并不显著, 物相却发生了明显改变。大部分的钛富集于金红石相中, 而 Mg、Al、Fe 等杂质则富集在硅酸盐及板钛矿中。这一物相变化为采用物理冶金方式除杂提供了理论依据, 明确了氧化改性是实现钛渣中钛富集和杂质分离的关键步骤, 为后续的分选工艺设计指明了方向。

3) 直接浮选探究实验里通过浮选金红石来分离含钛相和非含钛物相, 实验结果显示改性钛渣直接浮选除杂后精矿 TiO<sub>2</sub> 品位能达 75.25%, 可见浮选法去除钛渣中非含钛杂质效果显著, 能有效提升钛回收率和品位, 给钛渣资源化利用提供了可行路径。磁选-浮选联合工艺能够有效去除 Fe 氧化物等磁性杂质, TiO<sub>2</sub> 品位由此提升到 79.33%, 并且磁选后的尾矿接着被用作原料进行浮选, Al、Si 等杂质被进一步去除, 磁选和浮选的优势在这一联合工艺里得以充分发挥, 克服了单一方法的局限性, 使钛渣分离提纯更加高效, 钛的回收率和品位显著提高。

## 基金项目

四川省自然科学基金(青年基金)项目(2022NSFSC1021); 四川省自然科学基金(面上)项目(2025ZNSFSC0375); 钒钛关键战略材料四川省重点实验室项目(2019FTSZ07)资助。

## 参考文献

- [1] 赵秦阳, 陈永楠, 徐义库, 等. 钛合金材料低成本化制备技术进展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3127-3140.
- [2] 胡克俊. 钛资源开发及产品利用状况[J]. 中国金属通报, 2007, 30(16): 6-10.
- [3] 王文皓. T 钛材公司财务风险评价体系的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [4] 李政, 陈从喜, 葛振华, 等. 中国钛矿资源开发利用形势探讨[J]. 国土资源情报, 2020, 238(10): 75-80.
- [5] Murty, C., Upadhyay, R. and Asokan, S. (2007) Electro Smelting of Ilmenite for Production of TiO<sub>2</sub> Slag-Potential of India as a Global Player. *Proceeding of INFACON XI-India*, Deli, 18-21.
- [6] 胡凯. 高钛渣高温物理化学性质和结构研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [7] Samal, S., Rao, K.K., Mukherjee, P.S. and Mukherjee, T.K. (2008) Statistical Modelling Studies on Leachability of Titania-Rich Slag Obtained from Plasma Melt Separation of Metallized Ilmenite. *Chemical Engineering Research and Design*, **86**, 187-191. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2007.10.018>
- [8] Gueguin, M. (1990) Method of Preparing a Synthetic Rutile from a Titaniferous Slag Containing Magnesium Values. US Patent: 4933153.
- [9] Zou, H., Cao, Q.B., Chen, X.M., et al. (2019) Adsorption of Lead Ion on the Hydrated Rutile (110) Surface: A DFT Calculation Study. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **55**, 951-959.
- [10] Lasheen, T.A. (2008) Soda Ash Roasting of Titania Slag Product from Rosetta Ilmenite. *Hydrometallurgy*, **93**, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.020>
- [11] 全启杰, 刘玉民, 齐涛, 等. 由钛铁矿或高钛渣亚熔盐法清洁生产二氧化钛和六钛酸钾晶须的方法[P]. 中国专利, CN100460331C. 2009-02-11.
- [12] 周林, 徐涛, 方树铭, 等. 一种降低高钙镁钛渣中钙镁含量的方法[P]. 中国专利, CN103014362A. 2013-04-03.
- [13] Merk, R. and Pickles, C.A. (1988) Reduction of Ilmenite by Carbon Monoxide. *Canadian Metallurgical Quarterly*, **27**, 179-185. <https://doi.org/10.1179/000844388795401955>
- [14] US Interior (1978) Process for Purifying a Titanium-Bearing Material and Upgrading Ilmenite to Synthetic Rutile with Sulfur Trioxide. US8305237A.
- [15] 刘水石, 郭宇峰, 邱冠周, 等. 钛渣活化焙烧酸浸制备富钛料[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2013, 23(4): 1174-1178.
- [16] 邓勇, 甄常亮, 李俊国, 等. 含钛高炉渣钛富集工艺及钛资源利用[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 25-31.



- 
- [17] 蒋祉刚, 徐亚飞, 王昭云, 等. 人造金红石的制造方法[P]. 中国专利, CN1164497C. 2004-09-01.
- [18] Borowiec, K., Grau, A.E., Gueguin, M., *et al.* (1999) Method to Upgrade Titania Slag and Resulting Product. AU710701B2.
- [19] 李毅恒. 微波加热攀枝花钛渣制备金红石型二氧化钛的研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南民族大学, 2018.
- [20] Ye, F., Deng, H., Guo, Z., Wei, B. and Ren, X. (2023) Separation Mechanism and Experimental Investigation of Pulsating High Gradient Magnetic Separation. *Results in Physics*, **49**, Article ID: 106482. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.106482>
- [21] 成磊. 开放磁系永磁强磁选机用于钛铁矿分选研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 100-103.
- [22] 张鹏, 施建平, 孟祥伟, 等. 氧化改性钛渣的磁选研究[J]. 中国钛业, 2013(2): 19-22.
- [23] 胡志波, 陈桃, 张子浩, 等. 攀西地区含钛高炉渣中钛的分选研究[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(10): 18-21.
- [24] 纪苏, 何起, 李秋菊, 等. 含钛渣中黑钛石相的重选分离试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(3): 63-68.
- [25] 于雪峰, 孟浩, 包永义, 等. 反浮选氯化钾工艺关键控制探讨[J]. 盐科学与化工, 2022, 51(9): 35-37.
- [26] 朱诗曼, 李怡霏, 张喆怡, 等. 羟肟酸类捕收剂浮选金红石特性及其机理[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 59-63.
- [27] 张晓年, 李家珍, 朱发军, 等. 湖北某地金红石选矿新工艺试验[J]. 矿产综合利用, 2016(1): 28-31, 58.
- [28] 杨成洁. 改性高钛渣中金红石相的分离研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [29] 张耿语. 钛渣氧化还原过程中物相和微观结构演变及其对钛渣浸出过程的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2017.
- [30] Liang, Y.H., Wang, J., Fei, Z.K., *et al.* (2025) Effect of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  Solution Concentration on Bound Water Content in Ion Adsorption Rare-Earth Raw Ore. *Metals*, **15**, 1254. <https://doi.org/10.3390/met15111254>