

引文格式:刘臣,肖建,马兰,等. 南非钒钛磁铁矿熔分钛渣酸解性能研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(1): 76–84.

LIU Chen, XIAO Jian, MA Lan, et al. Acidolysis performance of titanium slag separated from vanadium titanomagnetite in South Africa[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 76–84.

# 南非钒钛磁铁矿熔分钛渣酸解性能研究

刘 臣<sup>1</sup>, 肖 建<sup>2</sup>, 马 兰<sup>2,3,4</sup>, 杨绍利<sup>2</sup>, 胡 兵<sup>1</sup>, 郑富强<sup>1</sup>

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410000; 2. 攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000;

3. 钒钛关键战略材料四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000;

4. 国家钒钛检测重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

[摘 要] 南非钒钛磁铁矿具有“低钛高钒”特征, 钛元素主要固溶于磁铁矿晶格中, 回转窑-电炉熔分工艺产出的钛渣  $\text{TiO}_2$  含量与钛精矿品位相近, 可应用于硫酸法钛白的生产, 但其物相组成复杂, 与常规钛精矿及酸溶性钛渣的酸解行为有很大不同, 目前关于该熔分钛渣的研究较少。本研究以此熔分钛渣为对象, 考察钛渣物相组成及“盐酸酸浸除杂-硫酸酸解-水浸”工艺中各参数对其酸解性能的影响, 并分析影响其酸解性能的控制因素, 得到以下主要结论。渣样中黑钛石等活性相占比越高、 $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量越低, 酸解率效果越好; 而透辉石分解生成的硅胶与硫酸钙微晶易形成钝化层, 成为传质过程的主要限制因素。适宜的酸渣比(3.8:1)与硫酸浓度(93%)可增强反应动力, 但过量酸量或熟化过程会因体系黏稠度升高而抑制传质。适宜细化粒度( $-45\ \mu\text{m}$ )可破坏难溶物相表面结构, 但过细颗粒易引发局部团聚。当熔分钛渣主要物相为黑钛石,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较低时, 在粒度 $-45\ \mu\text{m}$ 、酸渣比 3.8:1、硫酸浓度 93% 的条件下, 不进行熟化, 熔分钛渣酸解率可达 89.96%。本研究结果可为该熔分钛渣应用于硫酸法钛白工艺提供依据与参考。

[关键词] 南非钒钛磁铁矿; 回转窑-电炉熔分; 钛渣; 酸解性能; 物相组成; 界面传质阻力; 控制因素

[中图分类号] TF823 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)01-0076-09

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.009

## 0 引言

传统高炉流程冶炼钒钛磁铁矿, 回收了铁和钒, 但放弃了钛资源的利用。尽管高钛型高炉渣提钛技术不断涌现, 但要实现大规模、经济化的工业应用, 仍面临巨大挑战。铁、钒、钛的高效协同回收, 是钒钛磁铁矿资源综合利用的未来发展方向,

这促使非高炉冶炼钒钛磁铁矿新技术得以快速发展, 其核心产物熔分钛渣的高效利用是推动新技术规模化应用的前提之一<sup>[1,2]</sup>。

南非作为全球重要的钒钛磁铁矿资源国, 其矿床禀赋独特。与我国攀西地区矿石相比, 南非矿呈现出显著的“低钛高钒”特征, 且钛元素主要固溶于磁铁矿晶格中, 而非形成独立的钛铁矿相<sup>[3,4]</sup>。这一特殊的矿物共生结构, 直接导致了其钛组分在细磨后磁选分离效率依然很低。在冶炼利用方面, 南非矿所得熔分钛渣的  $\text{TiO}_2$  含量虽与钛精矿品位相近, 应用于硫酸法钛白生产时有望减少绿矾副产, 但其物相组成复杂, 各物相在酸中的反应活性差异显著, 导致其酸解行为迥异于常规钛精矿及酸溶性钛渣<sup>[5]</sup>。

张树立等<sup>[6]</sup>探讨了攀枝花钒钛铁精矿转底炉直接还原-电炉深还原熔分工艺得到钛渣的酸解性

[收稿日期] 2025-10-26 [修订日期] 2025-12-03

[录用日期] 2025-12-06 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 刘臣(1989—), 男, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 研究方向为钢铁冶金,

[通信作者] 马兰(1972—), 女, 四川资阳人, 教授, 主要从事钒钛资源综合利用及钒钛新材料新技术研究。

[基金项目] 湖南省重点研发计划项目“低品位铁料固态选择性还原提质-电炉熔炼关键技术研究与应用”(2023SK2079)。

能,探索了酸浓度、酸渣比、温度等参数的影响;高健<sup>[7]</sup>借助MLA、XRD、SEM揭示了黑钛石、辉石等物相在酸解中的演变及Ti、Si迁移规律。李凯茂等<sup>[8]</sup>指出低品位渣酸解率低与反应过快、主反应时间短有关,优化引发温度与酸浓度可有效改善酸解率;蒋伟等<sup>[9]</sup>提出活化焙烧-酸解新方法,实现钛的预富集与高效提取;周育生等<sup>[10]</sup>则通过氧化焙烧与多段浸出从钛渣制取高品质富钛料,拓展了高值化途径。但目前针对南非钒钛磁铁矿非高炉工艺所得熔分钛渣酸解过程的研究仍较缺乏。

南非政府已将铁、钒、钛等列为关键矿产,我国目前正通过一系列政策,推动钢铁工业向绿色、低碳、高效的方向转型,其中明确鼓励发展非高炉冶炼工艺,并对传统高炉冶炼进行限制和升级,这为推行钒钛磁铁矿铁、钒、钛绿色高效综合回收工艺提供了政策支持<sup>[11]</sup>。本研究以南非钒钛磁铁矿原矿直接还原-电炉熔分钛渣为对象,采用盐酸酸浸除杂-硫酸酸解-水浸工艺研究该钛渣的酸解性能,并分析酸解的控制因素,研究结果可为南非钒钛磁铁矿熔分钛渣在硫酸法钛白中的应用提供试验依据与理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

试验选取不同条件下所得南非钒钛磁铁矿回转窑-电炉熔分钛渣为原料,编号为10-8<sup>#</sup>、10-9<sup>#</sup>、10-10<sup>#</sup>、11-2<sup>#</sup>与11-19<sup>#</sup>,其化学成分见表1。从化学组成看出,五组样品CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>等杂质含量较高,且样品间主要杂质组分存在明显差异:10-8<sup>#</sup>与11-19<sup>#</sup>的FeO含量较低,分别为3.25%和3.37%;11-19<sup>#</sup>的TiO<sub>2</sub>含量最高,达54.21%;10-10<sup>#</sup>与11-19<sup>#</sup>的CaO含量较低,分别为7.13%和7.98%;10-8<sup>#</sup>与10-9<sup>#</sup>的MgO含量较低,11-19<sup>#</sup>MgO含量为5.91%;11-2<sup>#</sup>与11-19<sup>#</sup>的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比其余三个样品低10%左右;11-19<sup>#</sup>的SiO<sub>2</sub>含量最低,为6.95%。

图1示出了五个熔分钛渣样品的XRD物相组成。样品10-8<sup>#</sup>、10-9<sup>#</sup>与10-10<sup>#</sup>物相组成基本一致,主要包括铁板钛矿(Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>)、透辉石(CaMg(Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>))、钙钛矿(CaTiO<sub>3</sub>)、镁铝尖晶石(MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)及钛磁铁矿(FeTiO<sub>3</sub>)。样品11-2<sup>#</sup>的主要物相为铁板钛矿、钙钛矿、镁铝尖晶石和透辉石。而样品11-19<sup>#</sup>则含有镁橄榄石(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)、黑钛石(MgTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钙钛

矿、镁铝尖晶石、透辉石和铁板钛矿。样品11-19<sup>#</sup>中出现了衍射峰强度较高、易于酸解的含钛物相黑钛石;而样品10-8<sup>#</sup>、10-9<sup>#</sup>和10-10<sup>#</sup>中则存在较难酸解的含钛物相,如钛磁铁矿和铁板钛矿。值得注意的是,所有五个渣样中均含有易酸解的钙钛矿相,其存在可能对整体酸解行为产生积极影响。

表1 不同熔分钛渣化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of titanium slag samples (mass fraction) %

| 熔分钛渣编号             | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | FeO   | TiO <sub>2</sub> | CaO   | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> |
|--------------------|-------------------------------|-------|------------------|-------|------|--------------------------------|------------------|
| 10-8 <sup>#</sup>  | 0.16                          | 3.25  | 40.93            | 14.03 | 2.95 | 27.95                          | 10.22            |
| 10-9 <sup>#</sup>  | 0.79                          | 6.66  | 44.59            | 9.90  | 3.42 | 27.98                          | 9.92             |
| 10-10 <sup>#</sup> | 1.70                          | 10.83 | 41.59            | 7.13  | 4.92 | 28.04                          | 9.86             |
| 11-2 <sup>#</sup>  | 1.05                          | 4.67  | 52.32            | 11.58 | 5.47 | 17.44                          | 8.44             |
| 11-19 <sup>#</sup> | 1.09                          | 3.37  | 54.21            | 7.98  | 5.91 | 18.12                          | 6.95             |

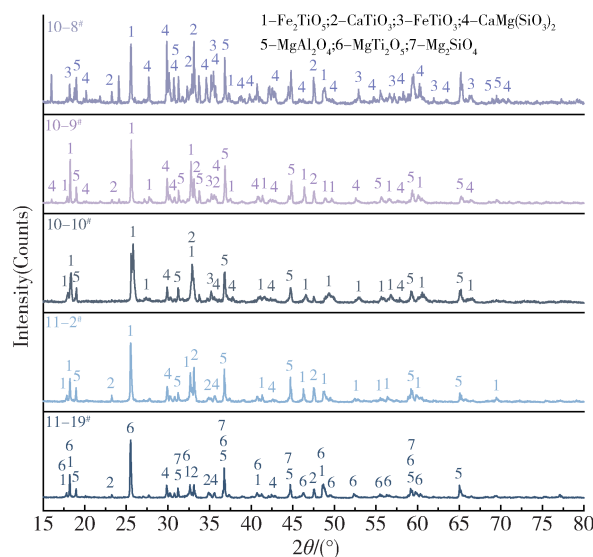


图1 五种熔分钛渣的物相组成

Fig. 1 Phase composition of five kinds of titanium slag

### 1.2 试验试剂与仪器

试验试剂为质量分数分别为98%的浓硫酸、质量分数为36.4%的浓盐酸、去离子水;试验仪器主要有CD-F10型超声清洗器、SXKW-1000ML型加热套、SN-HWS-2DJ型电热恒温磁力搅拌水浴锅、DF-3L型控速搅拌器、真空抽滤装置、干燥箱等。

### 1.3 试验方法及工艺流程

本试验流程见图2,主要可分为四阶段。

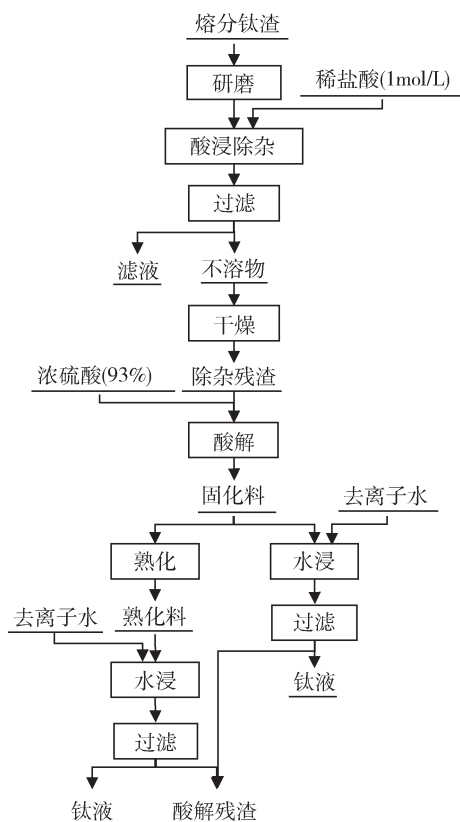


图2 试验流程

Fig. 2 Experimental process

1) 酸浸除杂阶段。称取试验原料熔分钛渣并研磨至相应粒度,配置摩尔浓度为1 mol/L的稀盐酸,根据酸渣比10:1(稀盐酸体积 mL,熔分钛渣质量 g)进行酸浸除杂,酸浸除杂温度为70℃,除杂时间为3 h,搅拌器转速为125 r/min。盐酸酸浸完成后对酸浸后不溶物进行洗涤、真空抽滤、干燥,得到除杂钛渣。

2) 酸解阶段。根据酸解酸渣比将除杂钛渣与调配浓度后的浓硫酸超声混合5 min,随后对其加热酸解,酸解温度区间在160~228℃,酸解时间范围在10~40 min。

3) 熟化阶段。快速将酸解所得固化料放入烘箱进行熟化,熟化温度选择低于酸解温度10℃,熟化3 h。

4) 水浸阶段。将熟化料或固化料按照目标酸解率95%、所得钛液浓度为100 g/L,通过式(1)配置去离子水用水量,用于水浸同时加入适宜质量的浓硫酸防止水解,水浸温度为65℃,水浸3 h,完成后对其真空抽滤干燥,得酸解残渣。

$$m_{\text{补}} = m_{\text{SOCZ}} \times a \times \beta \div (\delta \times 10^3) \quad (1)$$

式中:  $m_{\text{补}}$  为水浸补水量, mL;  $m_{\text{SOCZ}}$  为酸浸不溶物质量, g;  $a$  为酸浸不溶物中  $\text{TiO}_2$  的含量, %;  $\beta$  为目标酸解率, %;  $\delta$  为目标钛液浓度, g/L。

#### 1.4 分析及计算方法

1) 分析方法。对水浸抽滤后的钛液参照国家标准《GB/T 1706-2006 二氧化钛颜料》规定的方法进行  $\text{TiO}_2$  含量测定; 对干燥后的酸解残渣采用 X 射线衍射仪(XRD, 德国布鲁克公司 D8-Advance 型)进行物相组成分析。

2) 计算方法。通过式(2)计算试验总流程酸解率。

$$\eta_1 = (V_{\text{TY}} \times a) \div (m_{\text{RTZ}} \times b) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\eta_1$  为试验总流程酸解率, %;  $V_{\text{TY}}$  为钛液体积, L;  $m_{\text{RTZ}}$  为熔分钛渣质量, g;  $a$  为钛液中  $\text{TiO}_2$  的含量, g/L;  $b$  为熔分钛渣中  $\text{TiO}_2$  的含量, %。

## 2 结果与讨论

### 2.1 熔分钛渣粒度范围对酸解性能的影响

选取熔分钛渣 11-2<sup>#</sup> 开展酸解试验, 系统考察原料粒度对酸解行为的影响。将渣样研磨制备为以下六个粒度级别(-38  $\mu\text{m}$ , 以及+45  $\mu\text{m}$ -75  $\mu\text{m}$  范围内, 45  $\mu\text{m}$  筛余量为0%、25%、50%、75%、100%的五个分级样品), 在固定酸渣比1.7:1、硫酸浓度93%的条件下进行酸解。全流程包括酸浸除杂、酸解反应与水浸阶段, 未设置熟化环节。

图3(a)展示了不同粒度条件下11-2<sup>#</sup>的酸解率变化。结果显示, +45  $\mu\text{m}$ -75  $\mu\text{m}$  物料含量 $\geq 75\%$ 时, 酸解率 $< 41\%$ ; 当+45  $\mu\text{m}$ -75  $\mu\text{m}$  物料减少至25%时, 酸解率显著提升至57.02%, 说明细化粒度可显著缩短反应扩散路径、增加物料比表面积、极大缓解内扩散的限制, 有效强化酸解反应。然而, 随着粒度减小至-38  $\mu\text{m}$ 时, 酸解率仅增至59.48%, 提升幅度有限, 说明在粒度达到一定细度后, 内扩散阻力已降至很低, 粒度减小对酸解率的促进作用趋于饱和。结合图1物相分析可知, 渣样中存在的铁板钛矿属正交晶系, 结构致密, 其表面钝化层阻碍酸液渗透。减小粒度可增大反应比表面积, 有助于暴露被包裹的易溶物相(如钙钛矿), 从而提高反应效率。但粒度减小到一定程度后, 因团聚及物料本身溶解性能的影响, 其促进酸解效应减弱。

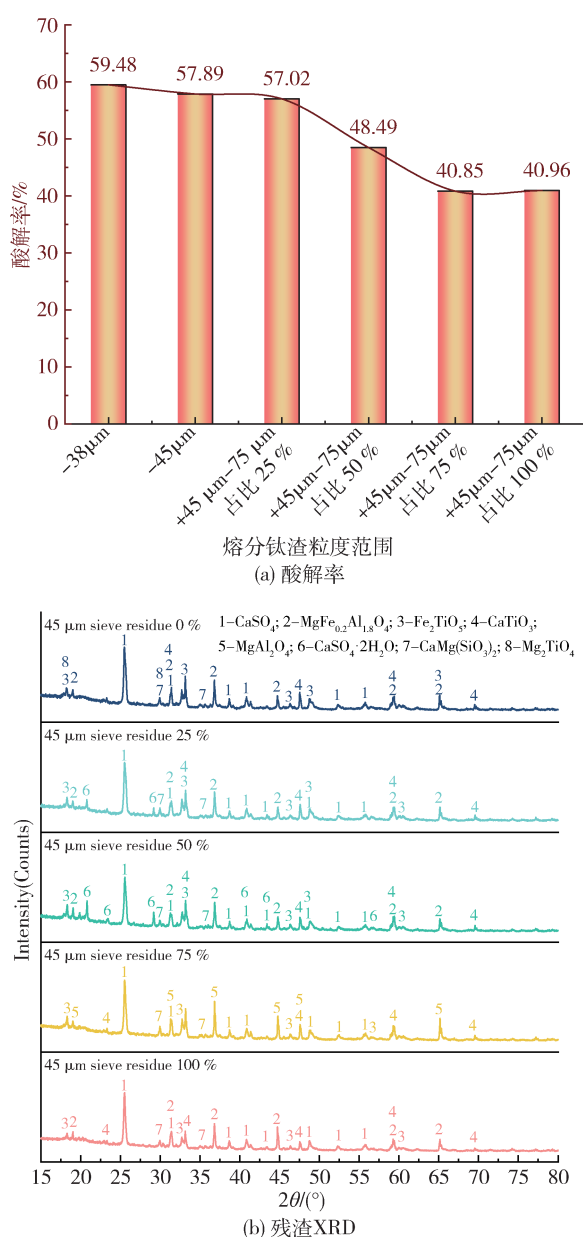


图3 11-2<sup>#</sup>不同粒度范围酸解所得酸解率及残渣物相组成

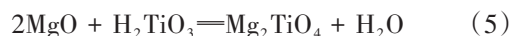
Fig. 3 11-2<sup>#</sup> sample acidolysis rate and phase composition of residue obtained by acidolysis in different particle size ranges

图3(b)展示了不同粒度条件下11-2<sup>#</sup>钛渣酸解残渣的物相组成。所有样品中均稳定存在钙钛矿、铁板钛矿、硬石膏(CaSO<sub>4</sub>)及透辉石,表明钙钛矿、铁板钛矿及透辉石物相在酸解过程中反应不完全。通过反应式(3)析出的硬石膏易包裹未反应颗粒表面,尤其在钙钛矿等难溶相外围形成致密钝化层,阻碍酸液传质,是导致残渣中钙钛矿残留与酸解率

受限的主要原因<sup>[12]</sup>。

+45 μm-75 μm物料含量为75%的样品中检出镁铝尖晶石外,其余样品中尖晶石相均以镁铁铝复合尖晶石(MgFe<sub>0.2</sub>Al<sub>1.8</sub>O<sub>4</sub>)形式存在。这表明原料中的镁铝尖晶石实为含铁固溶体,且在酸解过程中,硫酸优先溶出铝,使Fe<sup>3+</sup>富集于残留固相,转化为热力学更稳定的镁铁铝复合尖晶石结构。

+45 μm-75 μm物料含量为25%与50%的残渣中出现生石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O),其为钙钛矿酸解产物硬石膏在水浸过程中发生水合转化的结果<sup>[13]</sup>。值得注意的是,在粒度为-45 μm的样品中,出现了镁钛矿(Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>),其可能形成机制为:细颗粒反应剧烈导致局部酸度骤降,透辉石酸解释放的硅胶(SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O)包裹未反应颗粒<sup>[13]</sup>,在微区内形成高Mg<sup>2+</sup>、低酸环境,促使TiOSO<sub>4</sub>水解发生式(4)反应生成偏钛酸与Mg<sup>2+</sup>结合后,并通过式(5)沉淀反应生成稳定的镁钛矿。



## 2.2 酸渣比对酸解性能的影响

在固定熔分钛渣11-2<sup>#</sup>粒度为-45 μm、硫酸浓度为93%的条件下,系统考察了酸渣比(1.7:1~4.5:1)对酸解性能的影响。酸解流程包括酸浸除杂、酸解反应与水浸阶段,未设置熟化工艺。

图4(a)为11-2<sup>#</sup>不同酸渣比所得钛液酸解率,当酸渣比由1.7:1增至3.8:1时,酸解率从57.88%逐步上升至最高值78.56%,表明适量提高酸量有助于促进含钛物相的分解。但当酸渣比进一步增至4.5:1时,酸解率反而下降至71.86%,反映酸用量过大对反应产生了抑制效应。当酸渣比为3.8:1时,体系具备充足的酸量以有效分解活性含钛矿物,同时维持良好的反应动力学条件。当酸量不足(酸渣比<3.8:1)时,难以充分分解铁板钛矿等难溶相,且透辉石与镁铝尖晶石酸解产物易阻碍酸液传质,限制反应进行。当酸渣比过高(4.5:1)时,过量的硫酸促使透辉石加速分解,生成硅胶等黏性产物,导致体系黏度上升、固液传质恶化,并加剧硫酸钙等副产物的生成,从而包裹活性矿物,抑制酸解反应进程<sup>[13-15]</sup>。

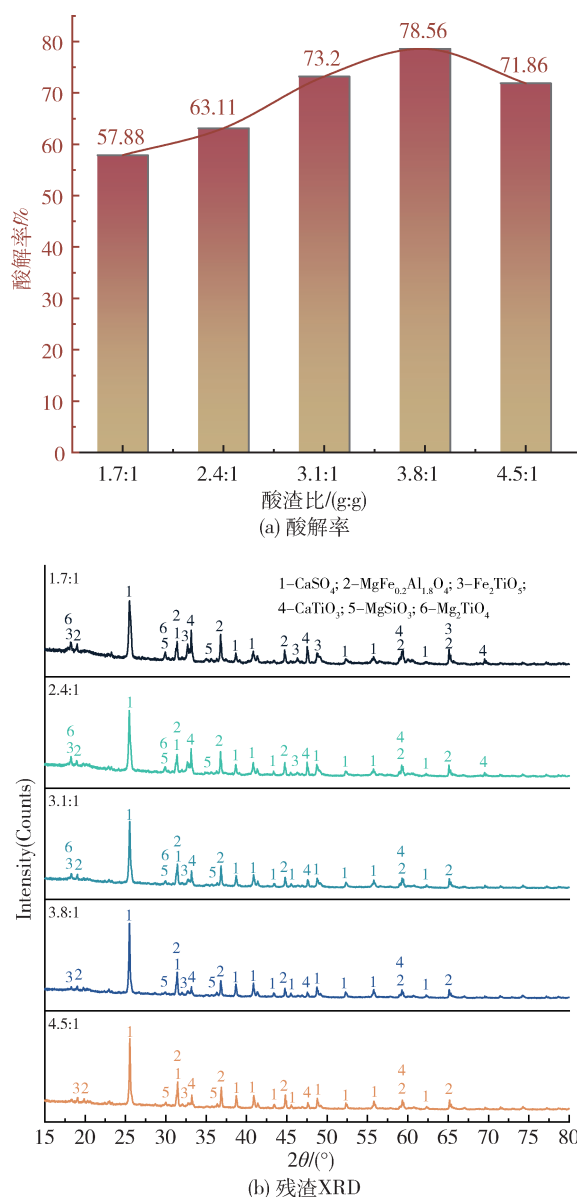


图4 11-2<sup>#</sup>不同酸渣比酸解所得酸解率及残渣物相组成

Fig. 4 11-2<sup>#</sup> sample acidolysis rate and phase composition of residue obtained by acidolysis with different acid residue ratios

图4(b)展示了不同酸渣比条件下酸解残渣的物相组成。所有样品中均检出硬石膏、镁铁铝复合尖晶石、钙钛矿、铁板钛矿及透辉石。钙钛矿的持续存在表明,其表面被硫酸钙微晶致密包裹,形成钝化层,显著抑制了酸液传质与进一步反应。铁板钛矿在高酸条件下仍残留,反映出其本征反应活性较低,或受硅胶及硫酸钙包裹而难以有效分解。

镁铁铝复合尖晶石在所有残渣中稳定存在,仅发生部分蚀变而难以被酸完全破坏。值得注意的是,镁钛矿在较低酸渣比(1.7:1~3.1:1)样品中出现,而在高酸渣比(3.8:1、4.5:1)条件下消失。这一现象说明,充足酸量不仅促进了 $Mg^{2+}$ 的充分溶出,也有效抑制了 $TiO^{2+}$ 的水解与再沉淀反应,避免了镁钛矿的生成。

### 2.3 硫酸浓度对酸解性能的影响

在熔分钛渣11-2<sup>#</sup>粒度为 $-45\ \mu m$ 、酸渣比为3.8:1的条件下,系统考察了硫酸浓度对酸解行为的影响。酸解流程包括酸浸除杂、酸解反应与水浸阶段,未设置熟化工艺。

图5(a)为熔分钛渣11-2<sup>#</sup>不同硫酸浓度酸解所得钛液的酸解率,随着酸浓度从87%增至93%时,酸解率由63.09%提升至78.56%,反映出较高氢离子活度对含钛矿物(如钙钛矿)化学键断裂的促进作用<sup>[6]</sup>。同时,高浓度硫酸放热使体系反应温度较高,增强了分子动能,克服了扩散阻力,同时促使前期形成的黏稠层流动性改善,有效恢复了传质条件,从而推动反应的进行。

图5(b)展示了不同硫酸浓度下酸解残渣的物相组成。当硫酸浓度为87%~91%时,残渣中主要物相为硬石膏、镁铁铝复合尖晶石、钙钛矿与铁板钛矿;而在93%硫酸条件下,残渣中检出了透辉石相。这可能是因为93%的硫酸具有强脱水性与氧化性,其与钛渣接触时引发剧烈反应,瞬间在颗粒表面生成大量硫酸盐与硅酸,形成致密黏稠的钝化层。该层作为扩散屏障,严重阻碍酸液向内渗透及可溶物向外迁移,导致部分透辉石被包裹于颗粒内部未能参与反应,最终以残余相形式留存在残渣中<sup>[16]</sup>。相比之下,在87%~91%硫酸浓度下,反应剧烈程度相对缓和,未形成致密包裹层,酸液得以逐步渗透并分解透辉石。然而,其分解产物硅胶与析出的硫酸钙微晶共同作用,会对未完全反应的钙钛矿与铁板钛矿颗粒产生二次包裹,同样限制了这些物相的进一步酸解。

### 2.4 熟化对酸解性能的影响

在熔分钛渣11-2<sup>#</sup>粒度为 $-45\ \mu m$ 、酸渣比3.8:1及硫酸浓度93%的条件下,系统考察熟化工艺对酸解行为的影响。

图6(a)为熔分钛渣11-2<sup>#</sup>是否进行熟化工序,酸解所得钛液的酸解率,图6(b)为是否进行熟化工

艺,酸解所得残渣物相。结果表明,引入熟化阶段后,酸解率无显著变化,且残渣物相组成也未发生改变,仍以硬石膏、镁铁铝复合尖晶石、钙钛矿、铁板钛矿和透辉石为主。熟化阶段未能促进残余含钛矿物的进一步分解,可能是因为酸解过程中透辉石分解产生的硅胶在熟化期间发生脱水固化,黏度增大,与表面析出的硫酸钙微晶共同形成致密包裹层,严重阻碍剩余硫酸向矿物颗粒内部传质,从而抑制了酸解反应的继续进行。

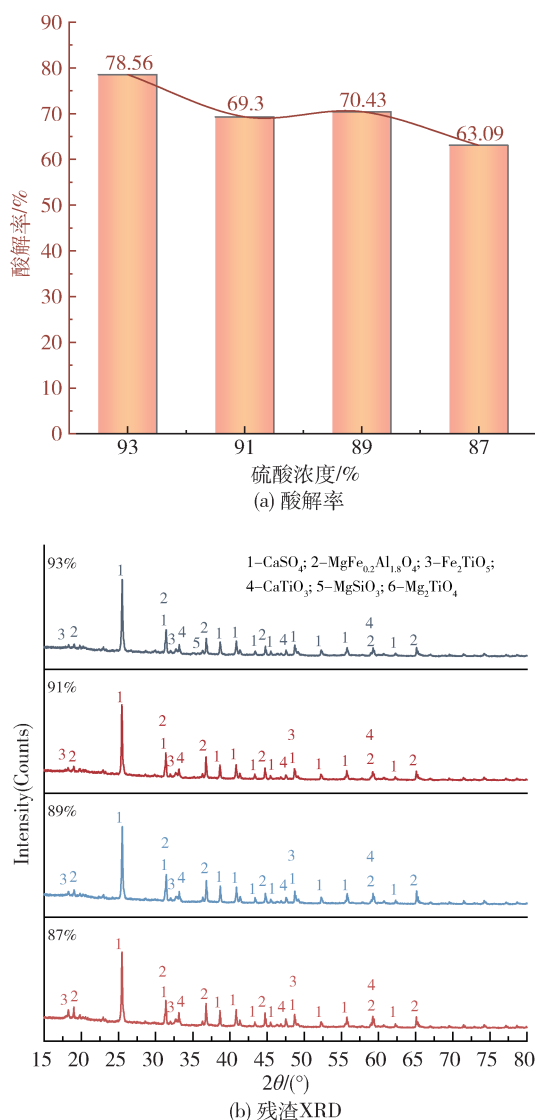


图5 11-2<sup>#</sup>不同酸浓度酸解所得酸解率及残渣物相组成

**Fig. 5** 11-2<sup>#</sup> sample acidolysis rate and phase composition of residue obtained by acid hydrolysis with different acid concentrations

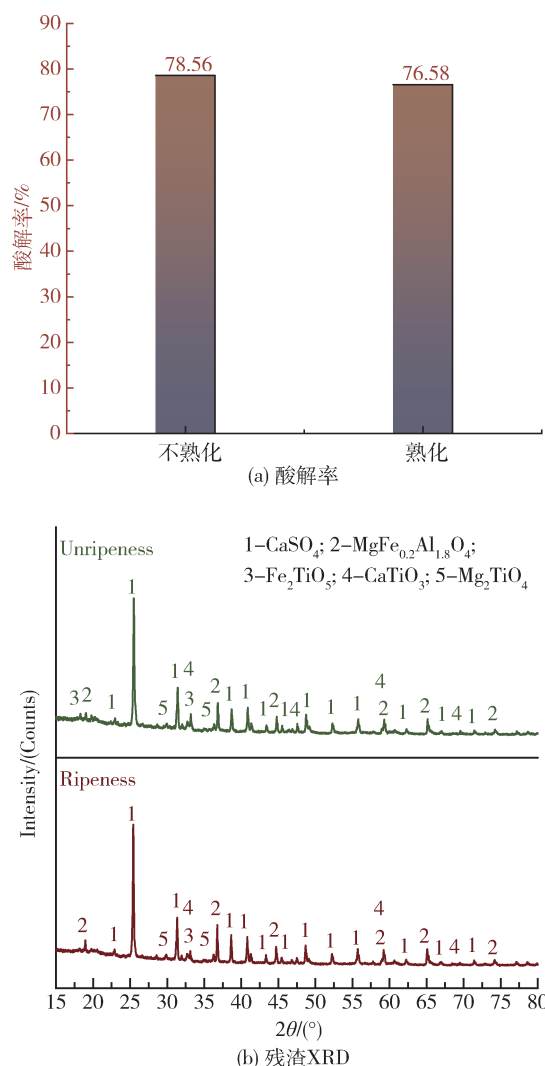


图6 11-2<sup>#</sup>酸解后是否熟化所得酸解率及残渣物相组成

**Fig. 6** The acidolysis rate and the phase composition of the residue obtained by aging or not 11-2<sup>#</sup> sample acidolysed

## 2.5 熔分钛渣原料对酸解性能的影响

在固定酸解工艺条件下(粒度-45 μm,酸渣比3.8:1,硫酸浓度93%,无熟化),系统评估了五个熔分钛渣样品的酸解性能。

图7(a)为熔分钛渣10-8<sup>#</sup>、10-9<sup>#</sup>、10-10<sup>#</sup>、11-2<sup>#</sup>及11-19<sup>#</sup>酸解所得钛液的酸解率。酸解率从高至低依次为:11-19<sup>#</sup>(89.96%)、11-2<sup>#</sup>(78.56%)、10-9<sup>#</sup>(73.20%)、10-10<sup>#</sup>(71.65%)和10-8<sup>#</sup>(68.60%)。结合表1化学组成可知,11-19<sup>#</sup>和11-2<sup>#</sup>化学组成相近,TiO<sub>2</sub>品位均>50%相对较高,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量(<18.12%)及SiO<sub>2</sub>含量(<8.44%)相对较低,酸解

率却相差较大,图1显示只有11-19#物相中存在易酸解的黑钛石,可能是其酸解率高的原因。10-8#、10-9#与10-10#的 $\text{TiO}_2$ 品位均 $<45\%$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量( $>27.95\%$ )和 $\text{SiO}_2$ 含量( $>9.86\%$ )相近且都较高,物相中难溶的镁铝尖晶石和透辉石含量高,酸解过程中生成大量硅铝胶,严重阻碍反应进行,造成酸解率偏低。

图7(b)为熔分钛渣10-8#、10-9#、10-10#、11-2#

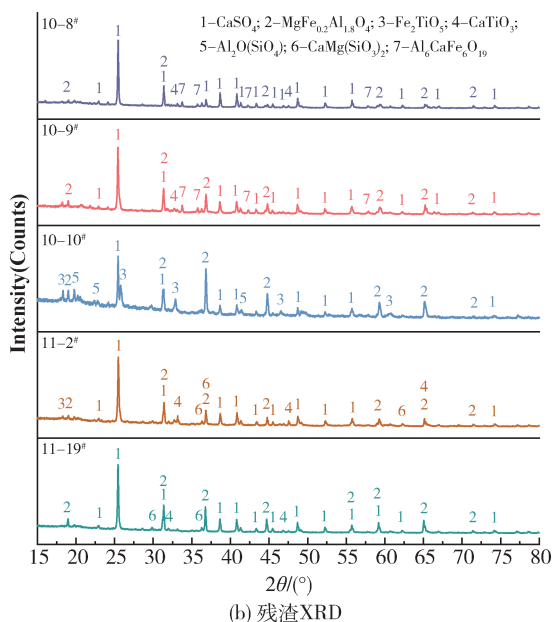
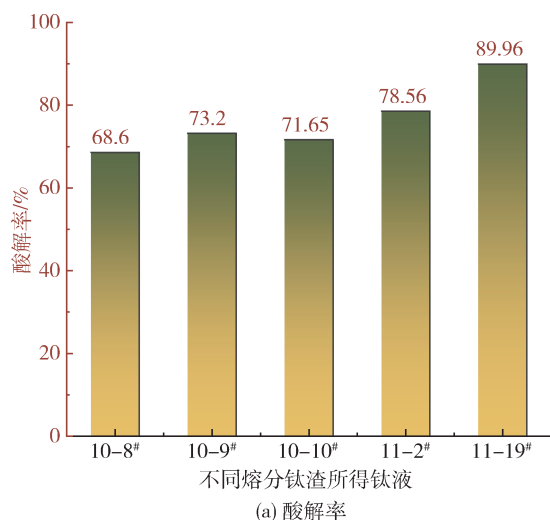


图7 不同熔分钛渣酸解所得酸解率及残渣物相组成

**Fig. 7** Acidolysis rate and phase composition of residue obtained by acid hydrolysis of molten titanium slag

及11-19#酸解所得残渣物相,该物相分析进一步揭示了酸解行为的差异。11-19#残渣中仅见硬石膏、镁铁铝尖晶石及少量钙钛矿和透辉石;10-10#残渣中出现耐酸的硅酸铝( $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{O}$ ),为镁铝尖晶石分解出的 $\text{Al}^{3+}$ 与透辉石残余结合的产物;10-9#与10-8#残渣中则生成铝钙铁复合氧化物( $\text{Al}_6\text{CaFe}_6\text{O}_{19}$ ),可能是阳离子浸出后重组形成。

### 3 结论

本研究以南非钒钛磁铁矿原矿直接还原-电炉熔分钛渣为对象,采用盐酸酸浸除杂-硫酸酸解-水浸的工艺研究熔分钛渣的酸解性能,并考察该工艺参数对酸解性能的影响,得到以下主要结论。

1)熔分钛渣的酸解性能主要受其化学成分与物相组成影响,高 $\text{TiO}_2$ 品位、低 $\text{SiO}_2$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的渣样酸解活性较佳;黑钛石、钙钛矿等物相易于酸解,而铁板钛矿、钛磁铁矿等则因表面易钝化难以有效分解;透辉石、镁铝尖晶石等物相的存在易生成硅铝胶包裹层,显著抑制反应进程。

2)酸解过程的限制环节集中于界面传质阻力,反应中形成的硅铝胶与硫酸钙微晶共同构成致密钝化层,阻碍 $\text{H}^+$ 向内扩散与可溶性硫酸盐向外迁移,是导致钙钛矿在酸解残渣残留的根本原因。

3)酸解工艺参数需与渣样特性协同优化,适当提高酸渣比与硫酸浓度可增强反应驱动力,但过量将引起体系黏稠度上升,恶化传质条件;在本研究条件下,因熟化过程促进硅铝胶固化,未表现出积极效果。

4)当熔分钛渣主要物相为黑钛石, $\text{TiO}_2$ 品位高、 $\text{SiO}_2$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较低时,在粒度 $-45\ \mu\text{m}$ 、酸渣比3.8:1、硫酸浓度93%的条件下,不进行熟化,熔分钛渣酸解率可达89.96%。

#### [参考文献]

- [1] 黄云. 钒钛磁铁矿非高炉冶炼工艺技术探讨[J]. 河北冶金, 2023(9): 29-35.  
HUANG Yun. Discussion on non-blast furnace smelting process technology of vanadium titanium macnetite [J]. Hebei Metallurgy, 2023(9): 29-35.
- [2] 李兰杰, 张彩东, 刘洋, 等. 钒钛磁铁矿非高炉冶炼与钛渣综合利用技术研究进展 [J]. 中国冶金, 2025, 35(3): 44-54, 64, 168.  
LI Lanjie, ZHANG Caidong, LIU Yang, et al. Research progress

- of direct reduction of vanadium titanium magnetite and resource utilization of titanium-bearing slag[J]. China Metallurgy, 2025, 35 (03): 44–54, 64, 168.
- [3] 杨耀辉, 惠博, 颜世强, 等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 1–11.  
YANG Yaohui, HUI Bo, YAN Shiqiang, et al. Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023, (04): 1–11.
- [4] 洪秉信, 傅文章. 钛铁矿—赤铁矿固溶体混溶度研究[J]. 矿产综合利用, 2013(2): 63–66.  
HONG Bingxin, FU Wenzhang. Research on consolute degree of the solid solution of ilmenite and hematite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(2): 63–66.
- [5] JING Jianfa, GUO Yufeng, WANG Shuai, et al. Recent progress in electric furnace molten titanium slag processing and utilization: a review [J]. Crystals, 2022, 12 (7): 958–958.
- [6] 张树立, 程晓哲, 胡鸿飞. 酸溶性钛渣酸解工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2003(1): 39–45.  
ZHANG Shuli, CHENG Xiaozhe, HU Hongfei. Study on digestion technology of acid-dissolved titanium slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2003(1): 39–45.
- [7] 高健. 钛渣酸解过程中物相变化特征探讨[J]. 冶金分析, 2021, 41 (1): 55–62.  
GAO Jian. Discussion on phase transformation characteristics of titanium slag during acidolysis [J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41 (1): 55–62.
- [8] 李凯茂, 王海波, 肖军. 低品位钛渣酸解反应试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (1): 13–18, 98.  
LI Kaimao, WANG Haibo, XIAO Jun. Experimental study on acidolysis reaction of low-grade titanium slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43 (1): 13–18, 98.
- [9] 蒋伟, 薛济来, 汪胜东, 等. 低品位钛渣提取钛的过程研究[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35 (4): 1291–1303.  
JIANG Wei, XUE Jilai, WANG Shengdong, et al. Study on the process of extracting titanium from low-grade titanium slag [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35 (4): 1291–1303.
- [10] 周育生, 邱冠周, 景建发, 等. 改性电炉钛渣矿相解构法制备富钛料新工艺研究[J]. 过程工程学报, 2022, 22(5): 651–659.  
ZHOU Yusheng, QIU Guanzhou, JING Jianfa, et al. A novel process for preparation Ti-rich material from modified electric furnace titanium slag by phase deconstruction method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22 (5): 651–659.
- [11] 工业和信息化部原材料工业司. 优化钢铁行业产业结构提高供给质效[N]. 中国电子报, 2025–09–23 (2).  
Department of Raw Materials Industry, Ministry of Industry and Information Technology. Optimizing the industrial structure of the steel industry and improving the quality and efficiency of supply[N]. China Electronic News, 2025–09–23 (2).
- [12] NIE Wenlin, WEN Shuming, LIU Dianwen, et al. Innovative application of two-stage sulfuric acid leaching for efficient recovery of Ti from titanium-bearing electric furnace slag [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(1).
- [13] NIE Wenlin, WEN Shuming, FENG Qicheng, et al. Mechanism and kinetics study of sulfuric acid leaching of titanium from titanium-bearing electric furnace slag [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (2): 1750–1758.
- [14] 吴健春, 路瑞芳, 石瑞成. 酸解残渣回收矿的酸解性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(3): 37–43.  
WU Jianchun, LU Ruifang, SHI Ruicheng. Study on acidolysis performance of Titanium ore recovered from acidolysis residue [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42 (3): 37–43.
- [15] QU Xiaoming, GUO Yufeng, ZHENG Fuqiang, et al. Performance of sulfuric acid leaching of titanium from titanium-bearing electric furnace slag [J]. Journal of Materials Science Research, 2016, 5 (4): 1.
- [16] WANG Haibo, SUN Ke, WANG Bin, et al. Effect of mineral phases on the leaching efficiency of Ti slag [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2023, 62 (2): 322–329.

## Acidolysis performance of titanium slag separated from vanadium titanomagnetite in South Africa

LIU Chen<sup>1</sup>, XIAO Jian<sup>2</sup>, MA Lan<sup>2,3,4</sup>, YANG Shaoli<sup>2</sup>, HU Bing<sup>1</sup>, ZHENG Fuqiang<sup>1</sup>

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, China;

2. Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

3. Vanadium and Titanium Critical Strategic Materials Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua 617000, China;

4. State Key Testing Laboratory of Vanadium & Titanium, Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** Vanadium-titanium magnetite in South Africa has the characteristics of ‘low titanium and high vanadium’. Titanium element is mainly dissolved in the lattice of magnetite. The content of TiO<sub>2</sub> in titanium slag produced by rotary kiln-electric furnace smelting process is similar to that of titanium concentrate, which can be

applied to the production of titanium dioxide by sulfuric acid method. However, its phase composition is complex, which is very different from the acidolysis behavior of conventional titanium concentrate and acid-soluble titanium slag. At present, there are few studies on the titanium slag. In this study, the phase composition of titanium slag and the effects of various parameters in the process of ‘hydrochloric acid leaching-sulfuric acid hydrolysis-water leaching’ on its acid hydrolysis performance were investigated, and the control factors affecting its acid hydrolysis performance were analyzed. The following main conclusions were obtained. The higher the proportion of active phases such as anosovite in the slag sample, the lower the content of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , the better the acidolysis rate. The silica gel and calcium sulfate crystallites formed by the decomposition of diopside are easy to form a passivation layer, which becomes the main limiting factor of the mass transfer process. The appropriate acid residue ratio (3.8:1) and sulfuric acid concentration (93%) can enhance the reaction kinetics, but excessive acid amount or curing process will inhibit mass transfer due to the increase of system viscosity. Appropriate refinement of particle size ( $-45\text{ }\mu\text{m}$ ) can destroy the surface structure of insoluble phase, but too fine particles are easy to cause local agglomeration. When the main phase of the titanium slag is anosovite and the content of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is low, the acid hydrolysis rate of the titanium slag can reach 89.96 % without curing under the conditions of particle size of  $-45\text{ }\mu\text{m}$ , acid-slag ratio of 3.8:1 and sulfuric acid concentration of 93%. The results of this study can provide a basis and reference for the application of the titanium slag in the sulfuric acid titanium dioxide process.

**Key words:** South African vanadium titanomagnetite; rotary kiln-electric furnace melting separation; titanium slag; acidolysis performance; phase composition; interface mass transfer resistance; control factors

## 西藏玉龙铜业公司获得有色金属工业科学技术奖一等奖

近日,西藏玉龙铜业股份有限公司联合矿冶科技集团有限公司、广西大学等多家单位申报的“青藏高原超大型斑岩型铜钼矿高效选矿关键技术与应用”项目,获有色金属工业科学技术奖一等奖,凭借全链条创新技术,破解了高海拔区域超大型复杂斑岩型铜钼矿规模化高效开发难题。

该项目在系统研究矿石基因特性的基础上,创新基于矿石基因特性与矿物可浮性的主干流程工艺,构建以浮选配位化学为基础的浮选药剂分子设计方法,开发出全新结构的绿色、低毒铜钼分离抑制剂,建立与矿石性质变化耦合的离子型与非离子型捕收剂可调控药剂制度,开发出高海拔专属大型浮选机气泡剪切分散与气体保有率智能调控技术。

该项目通过选矿工艺、选矿药剂、选矿装备的整体创新,建立具有自主知识产权的“青藏高原超大型斑岩型铜钼矿高效选矿”全链条技术体系,并在玉龙铜矿实现产业化应用,作为高原地区拟开发矿山的设计依据,实现对青藏高原已建及拟建斑岩型铜钼矿山近100%覆盖,有效支撑青藏高原超大型斑岩型铜钼矿资源开发,为国家战略性矿产资源开发提供有力支撑。

(资料来源:中国有色金属报)