新型膦酸型捕收剂对锆英石与金红石的捕收性能及机理研究①

任浏祎[1,2,3]，楼思迪[1]，张越博[1]，马钰婷[1]，张新宇[1,2,3]
(1.武汉理工大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430070；2.武汉理工大学 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室，湖北 武汉 430070；3.武汉理工大学 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室，湖北 武汉 430070)

摘　要：针对锆英石与金红石分离难题，自主合成了 1-羟基乙烷-1,1-二膦酸(GS)，并研究了 GS、依替膦酸钠(ETD)、氨基三亚甲基膦酸(ATMP)对锆英石与金红石的浮选效果；通过微浮选试验、接触角测量、Zeta 电位测试和红外光谱测试等研究和分析捕收剂对锆英石和金红石的捕收性能及机理。结果表明，GS 在中性条件下表现出优异的捕收性能和分离选择性，显著提升了金红石与锆英石的分离效果；GS 的磷酸基团通过多点吸附作用增强矿物表面电负性和疏水性实现对矿物的有效捕收，红外光谱分析结果进一步证实了磷酸基团的化学吸附作用。

关键词：海滨砂矿；金红石；锆英石；选择性分离；浮选；捕收剂；捕收性能；捕收机理
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.014
文章编号：0253-6099(2026)01-0085-06

Collecting Performance and Mechanism of Novel Phosphonic Acid Type Collectors for Zircon and Rutile

REN Liuyi[1,2,3], LOU Sidi[1], ZHANG Yuebo[1], MA Yuting[1], ZHANG Xinyu[1,2,3]
(1.*School of Resources and Environmental Engineering*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*; 2.*Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*; 3.*Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources*, *Ministry of Education*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*)

Abstract: For solving the difficulty in separation between zircon and rutile, 1-hydroxyethane-1,1-diphosphonic acid (GS) was independently synthesized, and effects of GS, etedronate sodium (ETD) and amino-trimethylphosphonic acid (ATMP) on flotation of zircon and rutile were also explored. Based on micro-flotation tests, the collecting performance and corresponding mechanism of collectors were analyzed by contact angle measurement, Zeta potential measurement and FTIR spectroscopy. It is found that GS exhibits excellent collection performance and selectivity in separation under neutral conditions, bringing in significant improvement in separation between rutile and zircon. Phosphonic acid group of GS enhances the electronegativity and hydrophobicity by multi-point adsorption, resulting in effective collection. The FTIR analysis has further approved chemical adsorption of phosphonic acid group.

Key words: coastal placer; rutile; zircon; selective separation; flotation; collector; collection performance; collection mechanism

海滨砂矿矿物组成复杂，主要包括金红石、锆英石、钛铁矿、独居石以及少量石英、长石等脉石矿物，其中金红石和锆英石因其高经济价值而备受关注。目前海滨砂矿的分选以重选-磁选-电选联合工艺为主。重选通过密度差初步富集有用矿物，磁选则分离钛铁矿等磁性矿物，最后通过电选回收非磁性矿物中的金红石和锆英石。尽管该联合工艺能有效回收多种矿物，但因金红石与锆英石物理性质相似，电选分离效率较

① **收稿日期**：2025-08-28
基金项目：国家自然科学基金(52274270)；国家大学生创新创业训练计划项目(20240100095)；中原关键金属实验室开放基金(GJJSKFZD202403)
作者简介：任浏祎(1983—)，女，河南周口人，博士，教授，博士研究生导师，主要研究方向为复杂微细矿物分选。E-mail：rly1015@whut.edu.cn
通信作者：楼思迪(2004—)，男，浙江绍兴人，主要研究方向为复杂矿物分选。E-mail：lousidiii@qq.com

低,容易导致产品混杂;此外,电选对矿物粒度要求严格,工艺操作复杂且能耗较高,增加了处理成本。这些不足限制了其在细粒矿石分选中的应用[1-3]。金红石是高档钛白粉及金属钛的主要原料,广泛应用于航空航天、化工和冶金领域;锆英石则是核工业、耐火材料和陶瓷生产的关键材料。优化分离技术,提高金红石和锆英石的回收效率,对实现海滨砂矿资源的高效开发和综合利用具有重要意义[4-6]。

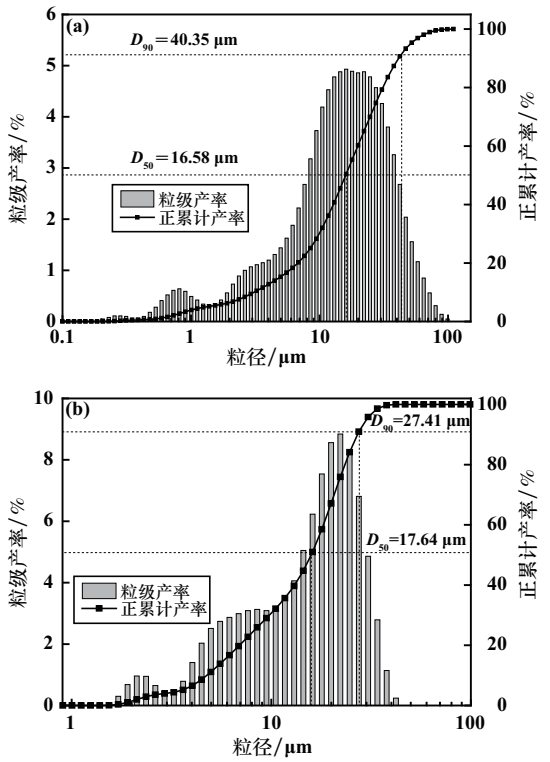
浮选是一种经济高效的分选手段,目前已被广泛应用于金红石和锆英石的分离。通过浮选不仅可以降低传统分选方法的成本,还能有效提高分离效率。目前,困扰金红石和锆英石分离的主要难点在于捕收剂的选择和优化。理想的捕收剂需要具备良好的捕收性能和高分离选择性,但在实际应用中,金红石与锆英石物理化学性质相似,导致现有捕收剂难以兼顾这两方面的性能要求[7-10]。现有的单一捕收剂往往在提高金红石捕收效率的同时,也对锆英石产生较强的吸附作用,削弱了分离效果。因此,开发能够精准调控界面作用的新型捕收剂,或通过复配药剂实现多层次选择性调控,是目前研究的关键方向[11-12]。

本文采用自主合成的1-羟基乙烷-1,1-二膦酸(GS)作为捕收剂,并与氨基三亚甲基膦酸(ATMP)和依替膦酸钠(ETD)进行对比试验,旨在探究以磷酸基团为特征的捕收剂对金红石和锆英石浮选性能的影响,以筛选出一种捕收性能优异、分离选择性良好、对金红石和锆英石分离效果显著的新型捕收剂。通过微浮选试验、Zeta电位测试、红外光谱分析和接触角测量等方法,系统研究了新型捕收剂对金红石和锆英石的选择性分离机制,可为优化捕收剂设计及推动微细粒难选资源的绿色高效开发利用提供理论指导和技术支持。

1 试验

1.1 试验原料

试验原料金红石以及锆英石均来自山东省的海滨砂矿。金红石和锆英石纯度分别为91.583%和92.536%,满足纯矿物浮选要求。金红石和锆英石粒度分布曲线如图1所示。从图1可以看出,金红石和锆英石在细粒级部分的粒度分布情况较为相似,表明两者在细粒级范围内可能存在一定的共生关系或相似的物理化学性质。金红石的粗粒级产率明显高于锆英石的粗粒级产率,这可能与金红石在成矿过程中更容易形成较大颗粒有关。从浮选分离的角度来看,这种粒度分布的差异为两者的分离提供了潜在的可能性。



(a) 金红石;(b) 锆英石

图1 矿物粒度分布曲线

Fig.1 Size distribution curve of minerals

试验药剂包括起泡剂2号油(ROH,复合高级醇)、pH值调整剂氢氧化钠和硫酸,均为分析纯,购自上海极智生化科技有限公司。捕收剂包括1-羟基乙烷-1,1-二膦酸(GS),依替磷酸钠(ETD)以及氨基三亚甲基膦酸(ATMP),其中GS为自主合成的捕收剂。试验用水为去离子水。

1.2 试验方法

1.2.1 微浮选试验

金红石与锆英石单矿物浮选试验在实验室XFGC浮选槽(50 mL)中进行。浮选槽搅拌速度1 900 r/min。每次浮选试验称取样品3.0 g置于浮选槽中,加入去离子水50 mL,加入盐酸或氢氧化钠溶液调节矿浆pH值,搅拌2 min后,加入捕收剂作用3 min,然后加入起泡剂作用3 min,充气刮泡3 min。最后将泡沫产品和槽内产品分别抽滤、80 ℃烘箱干燥6 h,称重,计算回收率。试验流程如图2所示。

1.2.2 分析与检测

利用MS130K高速摄影机及计算机对锆英石经浮选后的精、尾矿物样品与纯水的相互作用过程进行宏观观察和研究;采用JC2000C1型接触角测定仪测量锆英石样品接触角,并记录数据。采用Nano-ZS90 Zeta电位测试仪测量超纯水、ATMP溶液、GS溶液、

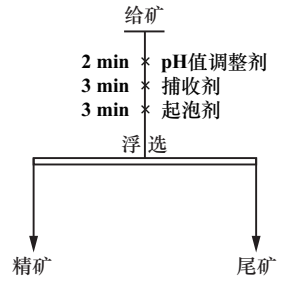


图 2　浮选试验流程

Fig. 2　Flotation process flowchart for test

ETD 溶液中的锆英石 Zeta 电位,每个条件测试3 次,取平均值。

2　试验结果与讨论

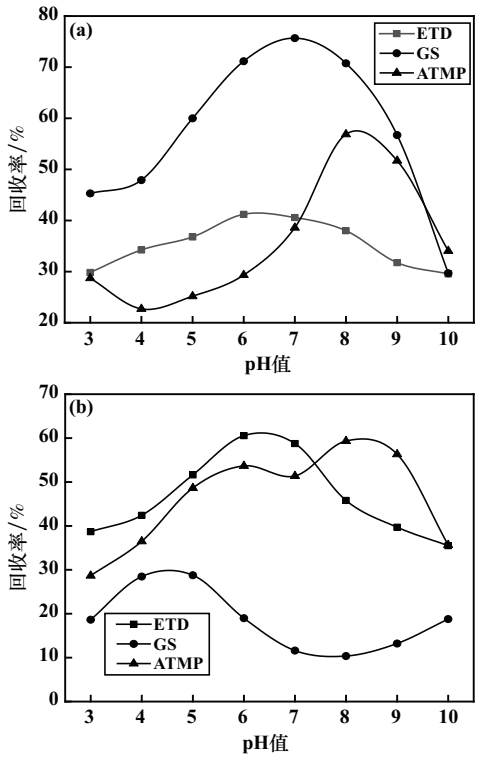
2.1　微浮选试验结果

2.1.1　溶液 pH 值对捕收剂性能的影响

采用图 2 所示流程,在捕收剂质量浓度均为 1.5 mg/L 条件下,研究了不同捕收剂体系下 pH 值对锆英石、金红石浮选的影响,结果如图 3 所示。图 3 结果显示,ETD、GS、ATMP 分别在 pH = 6、pH = 7、pH = 8 时对锆英石的捕收效果最佳,其中 GS 对锆英石的回收率可达 75%左右,捕收效果极佳,ETD 的回收率均低于 45%,捕收效果差;GS 对金红石的捕收效果差,可以达到反浮选的要求,其余捕收剂对金红石捕收性较强,不利于反浮选。

2.1.2　捕收剂质量浓度对矿物回收率的影响

采用图 2 所示流程,在各捕收剂的最佳 pH 值环境中,研究了捕收剂质量浓度对锆英石、金红石浮选的影响,结果如图 4 所示。图 4 结果显示,在一定范围内,随着 ETD 质量浓度增大,锆英石与金红石回收率均上升,但仅在 ETD 质量浓度小于 1.5 mg/L 时,锆英石回收率略大于金红石回收率,且 ETD 质量浓度越小,两者差距越大,但回收率也越低;在一定范围内,锆英石与金红石回收率均随着 ATMP 质量浓度增大而上升,也是仅在 ATMP 质量浓度小于 1.5 mg/L 时,锆英石回收率大于金红石回收率,ATMP 质量浓度 1.0 mg/L 左右时,两者回收率差值最大,分离效果较好;GS 质量浓度 0.3~1.0 mg/L 范围内,其对锆英石与金红石回收率的影响较小,且锆英石回收率远大于金红石回收率,分离效果极佳,GS 质量浓度 0.8 mg/L 左右时,两者回收率差值最大,分离效果最佳。在各自的最佳 pH 值环境下,ETD、GS、ATMP 的最佳质量浓度分别为 1.0、0.8、1.0 mg/L。



(a) 锆英石; (b) 金红石

图 3　pH 值对锆英石和金红石回收率的影响

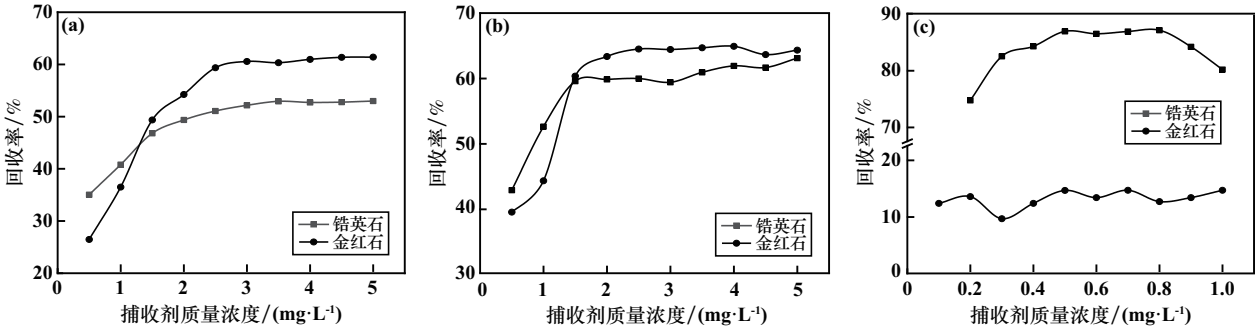
Fig. 3　Effect of pH on recoveries of zircon and rutile

2.2　pH 值对锆英石接触角的影响

在 3 种捕收剂对应的最佳质量浓度环境中,锆英石接触角与 pH 值的关系如图 5 所示。由图 5 可知,经捕收剂处理前后的锆英石接触角均存在峰值,其中经 GS 作用后的锆英石接触角可达 91.70°,疏水性极强,经另外两种捕收剂作用后的锆英石接触角峰值也能达到 80°左右。结合浮选试验结果可知,捕收剂作用后的锆英石疏水性得到了很大程度增强,说明捕收剂有效改变了锆英石粉末表面的润湿性质,进而影响浮选过程中矿物与浮选药剂的相互作用。

2.3　pH 值对锆英石 Zeta 电位的影响

在各捕收剂的最佳质量浓度条件下,锆英石与捕收剂作用前后的 Zeta 电位如图 6 所示。未添加捕收剂时,锆英石表面 Zeta 电位随着 pH 值升高而降低,零电点为 pH = 4,这与锆英石表面逐渐吸附 OH^- 有关,表面带负电的趋势增强。加入 ETD 后,锆英石表面 Zeta 电位整体呈现负移趋势,表明 ETD 能够吸附在锆英石表面,并通过其磷酸基团与锆英石表面活性位点发生化学作用,从而使表面带更多负电荷;pH = 6 时,ETD 作用后的锆英石表面 Zeta 电位负移程度最大,结合浮选数据可知,ETD 可增强颗粒疏水性,促进颗粒间的团聚,从而降低悬浮体系的稳定性。加入GS后,锆英



(a) ETD; (b) ATMP; (c) GS

图 4 捕收剂质量浓度对锆英石和金红石回收率的影响

Fig. 4 Effect of collector concentration on recoveries of zircon and rutile

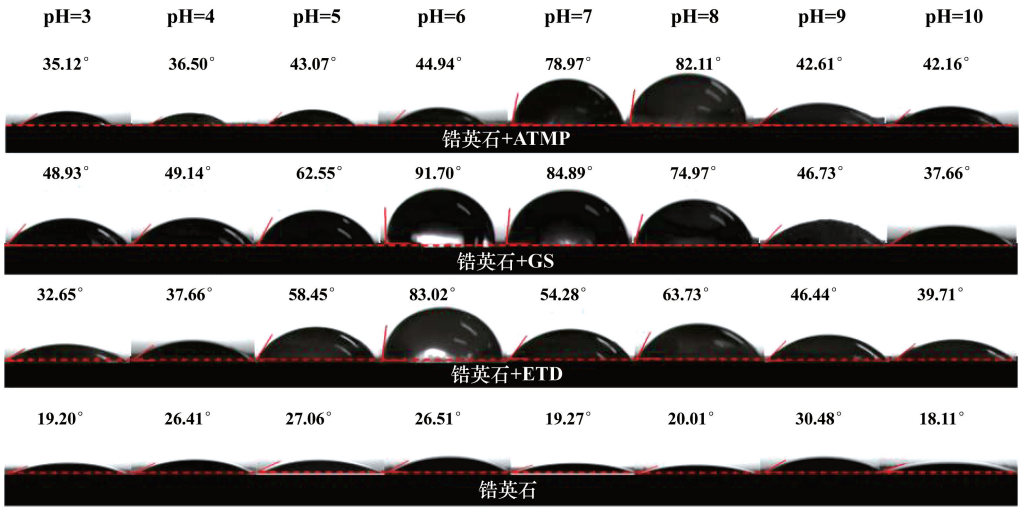


图 5 不同捕收剂体系下锆英石接触角与 pH 值的关系

Fig. 5 Relationship between contact angle of zircon and pH in different collector systems

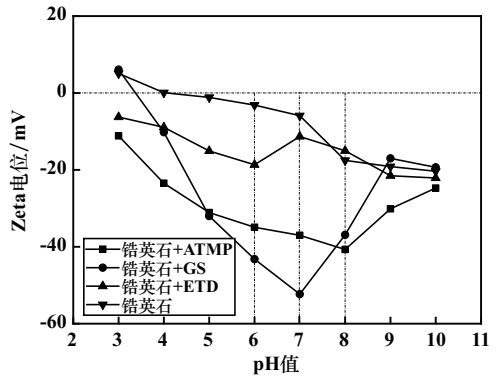


图 6 锆英石与捕收剂作用前后的 Zeta 电位

Fig. 6 Zeta potential of zircon before and after reaction with collectors

石表面 Zeta 电位的负移趋势更为显著,特别是在中性和碱性条件下,这可能是由于 GS 具有更强的多磷酸基团,与锆英石表面发生多点吸附作用,显著增加了表面负电荷的密度,同时,捕收剂的作用也可能增强锆英石的疏水性,导致颗粒之间相互作用更强,进一步降低 Zeta 电位。加入 ATMP 后,锆英石表面 Zeta 电位在整个 pH 值范围内均表现出显著的负移。这是因为 ATMP 具有多个磷酸基团,同时其氨基可能通过氢键或静电相互作用与锆英石表面结合,这种强吸附作用可能导致锆英石颗粒的 Zeta 电位在宽 pH 值范围内明显降低。

综上,GS 和 ATMP 对锆英石表面 Zeta 电位的调控作用更显著,表现为更大的负移。这表明自主合成的捕收剂 GS 和 ATMP 在锆英石分离中可能具有更好的捕收效果和选择性,而 ETD 的调控能力相对较弱。捕收剂的加入显著增强了锆英石表面的负电性,进一步影响矿浆体系的稳定性和颗粒间的作用,为后续浮选分离提供了必备条件。

2.4 红外光谱分析

锆英石与捕收剂作用前后的红外光谱如图 7 所示。单一锆英石纯矿物在 400~4 000 cm^{-1}范围内没有

特征吸收峰。3 440 cm^{-1}处是由试样表面吸附水引起的,是 H_2O 分子的伸缩振动峰,且经捕收剂作用后,该吸收峰都发生了偏移,这是试样表面吸附水以及捕收剂中—OH 基团的伸缩振动。880 cm^{-1}、884 cm^{-1}处的吸收峰是—CH—的弯曲振动,这表明 3 种捕收剂都与锆英石表面发生了物理吸附;1 791 cm^{-1}、1 789 cm^{-1}、1 793 cm^{-1}处的吸收峰是—P ═ O 的伸缩振动,这表明捕收剂中的—P ═ O 组分可能与锆英石表面发生了化学吸附。

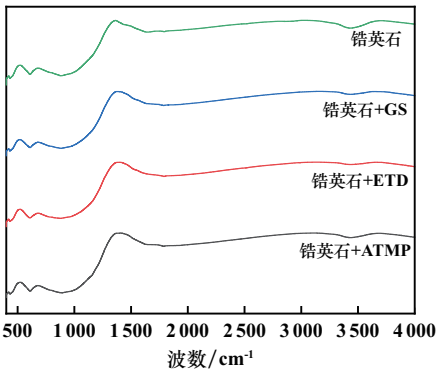


图 7　锆英石与不同捕收剂作用前后的红外光谱

Fig. 7　FTIR spectra of zircon before and after reaction with collectors

综上,3 种捕收剂与锆英石表面均发生了化学吸附和物理吸附:化学吸附表现为—P ═ O 或—OH 基团的振动峰偏移,可以推测药剂分子的磷酸基团、—OH 基团分别通过共价键、氢键与矿物表面相互作用;物理吸附表现为—CH—的弯曲振动峰变化,可以推测药剂分子可能也通过范德华力、疏水相互作用等非共价方式吸附至矿物表面。

2.5　捕收机理综合分析与讨论

基于 Zeta 电位、接触角及红外光谱分析结果,系统阐释了 3 种磷酸基捕收剂 GS、ATMP 及 ETD 在锆英石表面的吸附机理。试验数据表明,GS 对锆英石的捕收性能显著优于 ATMP 和 ETD,其优势机理可归结为三方面的协同作用:疏水基团构效优势、吸附构型稳定性差异以及空间位阻与电荷匹配效应。

从疏水基团构效优势来看,GS 分子中长碳链R 基作为疏水基团,通过空间延伸形成致密的疏水缔合层,其碳链长度较 ETD 的甲基显著增强了矿物表面的疏水能力(对应的接触角分别为 91.70°和 83.02°)。相较于 ATMP 的第三磷酸基团,非极性长链可有效避免极性基团间的电荷排斥效应,促使矿粒间疏水团聚更为充分。在吸附构型稳定性方面,GS 可在锆英石表面形成双磷酸基-金属络合物的吸附构型,较 ETD 的单齿吸附模式具有更高的吸附稳定性。ATMP 虽同样具备双磷酸基团,但其分子内双负电荷中心产生的静电排斥会导致吸附构型易发生扭曲,吸附强度不如 GS。这一结论可以由 Zeta 电位测试结果进一步验证:pH 值为 7 时,GS 吸附后,锆英石 Zeta 电位由-5.91 mV 降至-52.32 mV,电荷反转程度较 ATMP(-37.01 mV)更显著,证实其吸附密度更高。最后,从空间位阻与电荷匹配效应分析,ATMP 分子中第三磷酸基团与另二磷酸基团产生的空间位阻效应限制了分子在矿物表面的紧密排布。而 ETD 的短链甲基虽减小了位阻,但疏水能力不足导致有效吸附层覆盖率仍显著低于 GS。这种空间位阻与电荷匹配效应的差异进一步解释了 GS 在锆英石表面吸附性能的优越性[13]。

3　结论

1) 针对海滨砂矿中金红石和锆英石的分离问题,进行了浮选试验、接触角分析以及 Zeta 电位分析,结果表明,GS 是分离金红石与锆英石的最优捕收剂。GS 对锆英石的反浮选回收率可达 88%左右,对金红石的回收率低于 20%。GS、ETD、ATMP 捕收剂的最佳 pH 值和质量浓度分别为:7、6、8 和 0.8、1.0、1.0 mg/L。

2) GS 比 ETD 与 ATMP 更具优异的选择性捕收性能,这源于其独特的分子设计:双磷酸基团通过螯合作用实现强键合吸附,长碳链疏水基团构建稳定的疏水界面层,而适中的分子尺寸平衡了吸附密度与空间位阻效应。

参考文献(References):

[1] 韦艳玲,郭静涟. 金红石的研究现状及地质学意义[J]. 世界有色金属, 2020,31(24):169-170.
WEI Yanling, GUO Jinglian. Research status and geological significance of rutile[J]. World Nonferrous Metals, 2020,31(24):169-170.

[2] 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.
ZHU Shiman, LI Yifei, ZHANG Zheyi, et al. Flotation characteristics and mechanism of rutile with hydroxamic acid collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(4):59-63.

[3] ZHANG X Y, REN L Y, BAO S X, et al. Effect of Iron(III) ions on rutile flotation: Surface properties and adsorption mechanism[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024,697:134343.

[4] 唐勇,明崇伦,周高明,等. 低品位天然金红石选矿提质新工艺研究[J]. 铁合金, 2020,51(1):18-24.
TANG Yong, MING Chonglun, ZHOU Gaoming, et al. New technology study on beneficiation and extraction of low-grade natural rutile[J]. Ferro-Alloys, 2020,51(1):18-24.

[5] SONG P F, REN L Y, BAO S X, et al. Influence of SHMP concentration on rutile flotation in BHA system: Guiding the separation of rutile and hornblende[J]. Langmuir, 2024,40(45):23930-23938.
[6] 肖巍,杨娟,胡聪,等. 正辛醇对苯乙烯膦酸浮选金红石过程的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):35-38.
XIAO Wei, YANG Juan, HU Cong, et al. Influence of octanol on performance of styryl phosphoric acid in collecting rutile[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):35-38.
[7] 张立刚,欧阳崇钟,李文风. 新型捕收剂浮选山东某伴生铜矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):70-72.
ZHANG Ligang, OUYANG Chongzhong, LI Wenfeng. New flotation collector CYC-20 for beneficiation of associated copper minerals from a Shandong iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):70-72.
[8] ZHANG Z Y, REN L Y, ZHANG Y M. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles[J]. Minerals Engineering, 2021,172:107140.
[9] 苟浩然,曾海鹏,黄红军,等. 湖北某复杂低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):85-88.
GOU Haoran, ZENG Haipeng, HUANG Hongjun, et al. Experimental study on flotation separation of low-grade copper ore from Hubei[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):85-88.
[10] 崔振坤,汪泰,李汉文,等. 新型高效浮选捕收剂在伟晶岩锂矿浮选中的应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):47-51.
CUI Zhenkun, WANG Tai, LI Hanwen, et al. Application of new high-efficient collector in flotation of pegmatite lithium ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):47-51.
[11] GONG P, REN L Y, BAO S X, et al. Flotation separation mechanism of rutile and chlorite using CMC as depressant[J]. Minerals Engineering, 2024,217:108957.
[12] ZHANG X Y, REN L Y, ZHANG Y M, et al. Effect of aluminum ion on rutile flotation[J]. Minerals Engineering, 2023,198:108083.
[13] 任浏祎,巩鹏,包申旭,等. 一种金红石与锆英石的浮选分离方法:CN202410919534.8[P]. 2024-09-24.
REN Liuyi, GONG Peng, BAO Shenxu, et al. A flotation separation method for rutile and zircon: CN202410919534.8[P]. 2024-09-24.

引用本文:任浏祎,楼思迪,张越博,等. 新型膦酸型捕收剂对锆英石与金红石的捕收性能及机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):85-90.
REN Liuyi, LOU Sidi, ZHANG Yuebo, et al. Collecting performance and mechanism of novel phosphonic acid type collectors for zircon and rutile[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):85-90.

(上接第84页)

[2] 翁孝卿,刘丹章,李洪强,等. 胺类阳离子捕收剂表面物理化学性能研究的综合实验[J]. 实验技术与管理, 2021,38(6):208-211.
WENG Xiaoqing, LIU Danzhang, LI Hongqiang, et al. Comprehensive experiment on surface physicochemical properties of amine cationic collector[J]. Experimental Technology and Management, 2021,38(6):208-211.
[3] 周永锋,罗溪梅,宋水祥,等. 四种阳离子捕收剂对赤铁矿和石英浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(2):56-61.
ZHOU Yongfeng, LUO Ximei, SONG Shuixiang, et al. Effect of four kinds of cationic collectors on flotation of hematite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(2):56-61.
[4] 温全宝,滕青,杨志超,等. 苛化淀粉对磁铁矿和金云母浮选分离的影响及机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(2):62-69.
WEN Quanbao, TENG Qing, YANG Zhichao, et al. Effect and mechanism of causticized starch on flotation separation of magnetite and phlogopite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(2):62-69.
[5] 杨山龙,罗溪梅,周永锋,等. 阴离子捕收剂与DTAC浮选分离赤铁矿和石英研究[J]. 非金属矿, 2024,47(3):10-12.
YANG Shanlong, LUO Ximei, ZHOU Yongfeng, et al. Research on flotation separation of hematite and quartz using anionic collector and DTAC[J]. Non-Metallic Mines, 2024,47(3):10-12.
[6] 魏邦其,李解,曹钊,等. 酯化淀粉对方解石的抑制机理[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):46-50.
WEI Bangqi, LI Jie, CAO Zhao, et al. Mechanism for depressing calcite with esterified starch[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):46-50.
[7] 李孝龙. 某微细粒嵌布磁铁矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):57-60.
LI Xiaolong. Processing flowsheet optimization for fine-grained magnetite ore beneficiation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):57-60.
[8] 汤家焰. 高钙云母型钒页岩钒的焙烧-浮选预富集工艺及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
TANG Jiayan. Pre-enrichment process and mechanism of vanadium from high calcium mica-type vanadium-bearing shale by roasting-flotation process[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

引用本文:郝佳乐,汤家焰,赵芳,等. Fe^{3+}对磁铁矿反浮选脱除黑云母的作用及机理[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):80-84.
HAO Jiale, TANG Jiayan, ZHAO Fang, et al. Role and mechanism of Fe^{3+} in removal of biotite by reverse flotation of magnetite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):80-84.