青海某榴辉岩型金红石矿全粒级短流程浮选回收工艺试验研究*

严伟平[1,2]，张博远[1,2]，李伦[1,2]，杨耀辉[1,2]，李维斯[1,2]

（1.中国地质科学院矿产综合利用研究所， 四川 成都 610041；
2.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）

摘要：我国榴辉岩型金红石矿资源分布广泛、储量丰富。然而金红石矿大部分属原生矿，因其品位低、嵌布粒度细、矿石性质复杂、与脉石表面性质差异较小，为矿物的选别带来难题。目前，金红石选矿工艺流程复杂、生产成本较高、回收周期长，致使我国的金红石资源难以得到有效的开发利用。针对青海某低品位榴辉岩型金红石矿，开展了全粒级浮选回收短流程工艺试验研究。结果表明："全粒级短流程浮选回收"工艺对该矿石具有良好的适应性。通过"二粗四精"的浮选流程对筛分脱泥原矿进行分选，可以得到产率3.21%，TiO_2品位61.70%、回收率63.14%的良好指标，金红石矿得到了充分的回收利用。该工艺实现了金红石矿物的短期回收，可以简化选矿流程，节省该矿的生产成本，亦有利于后续的再选提质。

关键词：榴辉岩型金红石；全粒级浮选；短流程选矿工艺；钛回收

中图分类号：TD923　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0248-09

Experimental Study on Short Process Technology for Full Particle Flotation Recovery of a Eclogite-Type Rutile Ore in Qinghai Province

YAN Weiping[1,2], *ZHANG Boyuan*[1,2], *LI Lun*[1,2], *YANG Yaohui*[1,2], *LI Weisi*[1,2]

(1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2.Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The eclogite-type rutile ore resources in China are widely distributed and abundant in reserves. However, most of the rutile ore belongs to primary ore, with low grade, fine embedded particle size, complex ore properties and small difference in surface properties between the rutile and gangue, which brings many challenges to mineral selection. At present, the process of rutile beneficiation is complex, with high production costs and long recovery cycles, resulting in difficulty in effectively developing and utilizing China's rutile resources. Regarding a low-grade eclogite-type rutile ore in Qinghai Province, an experimental study on short process technology for full particle flotation recovery was carried out. The results indicate that the short process technology for full particle flotation recovery has good adaptability to this mine. Under the conditions that the grinding fineness of −0.074 mm accounts for 59.52%, screening particle size of −0.013 mm, the dosage of sodium fluosilicate 700 g/t, the dosage of lead nitrate 300 g/t and the dosage of EM-OL 600 g/t, rutile concentrate with yield of 3.21%, TiO_2 grade of 61.70% and TiO_2 recovery rate of 63.14% can be obtained by the flotation process of two roughing and four cleaning to separate the screened desliming raw ore, and rutile can be fully recovered and utilized. This process realizes the short-term recovery of rutile minerals, which can simplify the beneficiation process, save production costs, and be also conducive to subsequent re-election and upgrading.

Key words: Eclogite-type rutile ore, Full particle flotation, Short process beneficiation technology, Titanium recovery

---

* **收稿日期**：2024-07-10
基金项目：中国地质调查局地质调查项目（〔2024〕02-41-03）；铁铜铝等大宗及紧缺矿产综合利用技术攻关与评价项目（DD20242129）
作者简介：严伟平（1984—），男，江西宜春人，硕士，副研究员，主要从事战略性矿产资源的高效开发与利用研究。E-mail：365884473@qq.com
通信作者：张博远（1997—），男，新疆库尔勒人，硕士，助理工程师，主要研究方向为矿物加工理论与工艺。E-mail：1198603586@qq.com

0 引言

钛矿是我国的战略性矿产资源之一,因其具有良好的物化性能,被广泛应用于国防军事、冶金化工、航空航天、电子技术以及材料科学等领域[1-2]。我国的钛资源储量较大,主要以钒钛磁铁矿的形式存在,其次为金红石矿[3]。由于钒钛磁铁矿的特性,钒钛磁铁矿中钛的综合利用率仅为29%左右[4]。而我国的天然金红石矿大部分属原生矿,具有品位低、嵌布粒度细、矿石性质复杂、与脉石表面性质差异较小的特点,难以得到有效的开发利用[5-6],导致我国对金红石高质钛精矿等高端钛原料的进口依赖度较高。因此,实现金红石矿的高效开发利用具有重要意义。

我国的榴辉岩型金红石矿较为丰富,其中的主要矿物为金红石、石榴石以及绿辉石等[7]。然而,在榴辉岩型金红石矿中,金红石的 TiO_2 品位较低,一般为2%~4%,有一部分甚至低于2%[8-9];并且,金红石、石榴石和绿辉石等矿物的密度和磁性差异较小,难以分离[10];同时,铁常以类质同象的形式在金红石晶格中发生取代,微细粒金红石常被石榴石包裹,从而进一步增大了金红石和石榴石之间的分离难度[11];此外,金红石与其他矿物的嵌布关系复杂,而且粒度区间大[12]。因此,相比于其他种类的金红石矿而言,榴辉岩型金红石矿更是属于难选矿种。

榴辉岩型金红石嵌布粒度较细,多在10 μm左右,嵌布关系复杂,与主要脉石矿物界面性质接近,导致选别时微细粒部分难以有效回收利用[13],特别是当矿石中含有大量泥质矿物或者金红石呈细粒状态嵌布时,一方面需要细磨才能使有用矿物金红石单体解离,另一方面次生细泥吸附罩盖在矿物表面的同时,还会无选择性地消耗药剂,从而导致精矿的品位和回收率大大降低[14]。因此金红石选别难度较大,单一选别工艺指标较差,需采用联合选别工艺流程[15]。针对江苏某榴辉岩型金红石矿,张裕书等[16]采用"磁选—重选—磁选"联合工艺流程,可获得 TiO_2 品位90.09%、回收率63.07%的金红石精矿;张海青等[17]采用"重选(脱泥)—浮选—磁选—电选"联合工艺对乌兰县丁叉叉南坡榴辉岩型金红石矿进行选别,可明显提高该矿的回收率与利用率;余生根[18]开展了榴辉岩型金红石矿综合利用试验研究,发现"重-磁-浮"联合工艺结构合理,矿产综合利用率较高。针对榴辉岩型金红石矿的选矿方法大都比较复杂,在实际生产中,通常需要采用多种工艺相结合的方式回收金红石,根据金红石与脉石在密度、磁性等方面的差异,一般首先采用分级或重选抛尾进行预处理,脱去泥质轻矿物,之后使用磁选提质,最后通过浮选得到金红石[19-20],工艺流程复杂,生产成本较高,回收周期长,为金红石资源的回收利用带来阻碍。

本文以青海某榴辉岩型金红石矿为研究对象,开展了实验室浮选试验研究,开发出金红石全粒级短流程浮选回收工艺。通过明确各作业的工艺参数,确定了选矿技术指标,可以实现金红石矿物的短期回收,也有利于后续金红石的进一步再选提质。该工艺可以简化榴辉岩型金红石的选矿流程,节省生产成本,为合理开发利用该类矿石提供了技术依据。

1 矿石性质

1.1 矿石化学成分分析

选取具有代表性的原矿综合样进行了化学多元素分析,研究矿石元素组成,分析结果见表1,对原矿综合样钛元素进行了物相分析,分析结果见表2。

表1 原矿综合样化学多元素分析结果

Table 1 Chemical multi-element analysis results of comprehensive samples of raw ore %

TiO_2	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	Na_2O
3.364	5.159	13.359	46.186	0.279	0.061	0.369	2.297
V_2O_5	Cr_2O_3	MnO	Fe_2O_3	NiO	CuO	CaO	SrO
0.07	0.043	0.253	16.98	0.016	0.031	9.835	0.021

表2 原矿中钛元素化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of titanium element in raw ore %

物相	含量	分布率
金红石中钛	2.05	61.75
钛磁铁矿中钛	0.05	1.51
钛铁矿中钛	0.19	5.72
硅酸岩与榍石中钛	1.03	31.02
总二氧化钛	3.32	100.00

本矿石为低品位榴辉岩型金红石矿,原矿中有用元素 TiO_2 占比3.364%,其余主要元素为 SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3、CaO、MgO、Na_2O,分别占比46.186%、16.98%、13.359%、9.835%、2.297%。矿石的主要矿物组成为石榴子石、绿辉石、长石、石英等,含少量的金红石、榍石,微量的钛铁矿、磁黄铁矿、铬铁矿、黄铜矿等。其中钛为矿石的主要回收组分,以金红

石为主,少量分布于钛铁矿、硅酸盐与榍石中,矿石中主要回收的有价钛工业矿物为金红石。金红石中 TiO_2 的分布率为 61.75%,其次分布于硅酸盐与榍石(分布率为 31.02%)和钛铁矿(分布率 5.72%)中。

1.2 金红石嵌布粒度及特征

金红石样品单偏光显微镜检测结果见图 1。

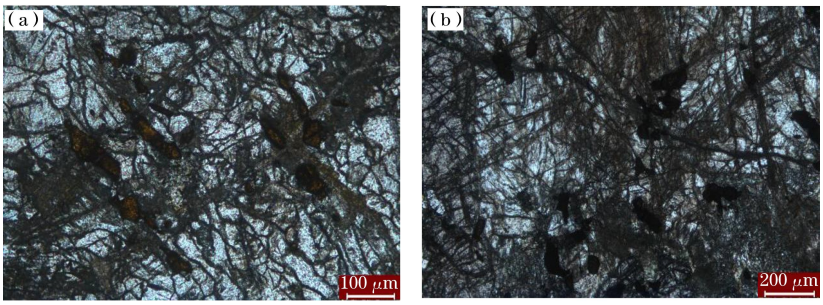


图 1 金红石单偏光显微镜照片

Fig.1 Single polarization microscope photos of rutile

金红石在矿石中含量不高,单偏光下呈红棕色,正极高突起。一般呈它形粒状,分散嵌布于石榴子石、绿辉石等矿物粒间,与榍石、钛铁矿等钛的独立矿物嵌布较为密切,可互相包裹或毗邻相嵌。金红石的粒度一般为 0.02~0.15 mm,属于细粒,主要呈稀疏浸染状分布在脉石粒间,部分颗粒可包裹于石榴子石中,被包裹的这部分金红石的回收利用会受影响。

1.3 钛的赋存状态

对金红石样品的典型微区能谱面进行扫描电镜分析,分析结果见图 2。

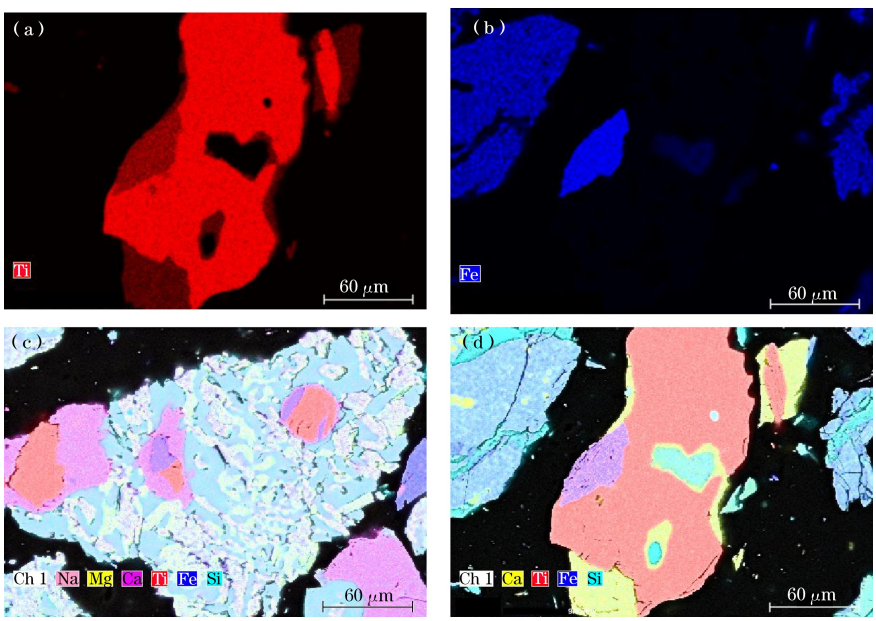


图 2 典型微区能谱面扫描分析结果

Fig.2 Scan analysis results of typical micro area energy spectrum surface

以上微区能谱面扫描分析结果显示:钛主要分布于金红石、榍石、钛铁矿等钛的独立矿物中。根据能谱点分析和电子探针分析,金红石中 TiO_2 含量平均为 97.26%;钛铁矿中 TiO_2 含量平均为 51.73%;榍石中 TiO_2 含量平均为 35.26%。以类质同象替代形式赋存在部分脉石中,如黑云母、绿泥石、透辉石,TiO_2 含量为 1%~2%;在主要-次要矿物石榴子石、绿辉石、角闪石中含微量 TiO_2,含量一般低于 0.5%。金红石中除 97.26% 的 TiO_2 以外,还有少量的 FeO,平均含量为 0.25%,使金红石具有弱磁性,影响金红石的回收。

2 金红石全粒级短流程选矿工艺试验研究

2.1 脱泥方式对比试验

考察了筛分脱泥、离心脱泥和浮选脱泥 3 种不同脱泥方式对金红石回收效果的影响。筛分脱泥粒

度固定为 0.023 mm；离心脱泥采用离心选矿机，固定转速为 850 r/min；浮选脱泥采用 $Al_2(SO_4)_3$ 1 000 g/t、油酸钠 100 g/t、2# 油 29 g/t 进行反浮选脱泥。脱泥后进行一段粗选作业，考察脱泥方式对选矿指标的影响。试验流程见图 3，试验结果见图 4。

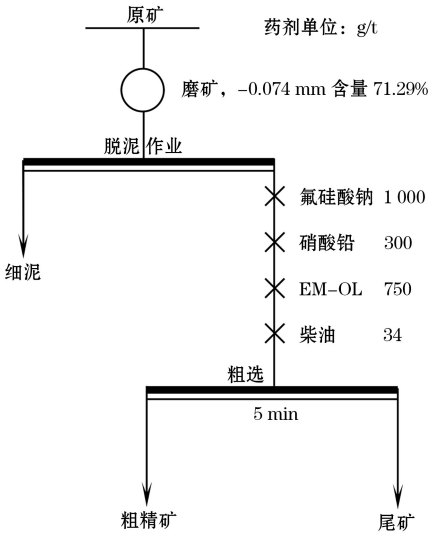


图 3　脱泥方式对比试验流程

Fig.3　Process of comparison test on desliming methods

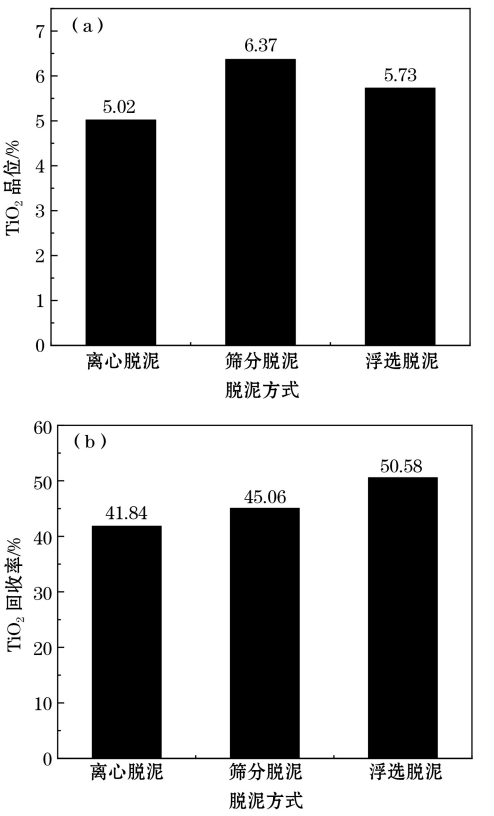


图 4　脱泥方式对比试验结果

Fig.4　Comparison test results of desliming methods

同条件下浮选试验结果如图 4 所示，在 3 种脱泥方式中，离心脱泥脱去的细泥产率低，因脱泥而流失的钛较少；浮选过程中矿泥对浮选的影响仍然较大，致使精矿 TiO_2 品位、回收率较低，浮选回收效果较差；筛分脱泥方式可以得到的精矿 TiO_2 品位最高，为 6.37%，同时仍然可以保证较高的回收率，因此选择筛分脱泥方式进行后续条件对比试验。

2.2　浮选条件对比试验

在金红石全粒级短流程浮选回收条件对比试验中采取两段粗选回收方案，试验流程见图 5。第一段浮选作业的捕收剂用量对金红石浮选指标有较大影响，金红石基本在第一段浮选作业中回收，合适的捕收剂用量可以使较粗粒的金红石优先浮出，从而提高总精矿产品的 TiO_2 品位，有利于提高金红石分选指标。因此试验固定第二段药剂用量为第一段的 50%，考察了第一段浮选作业药剂用量等条件对金红石浮选指标的影响。

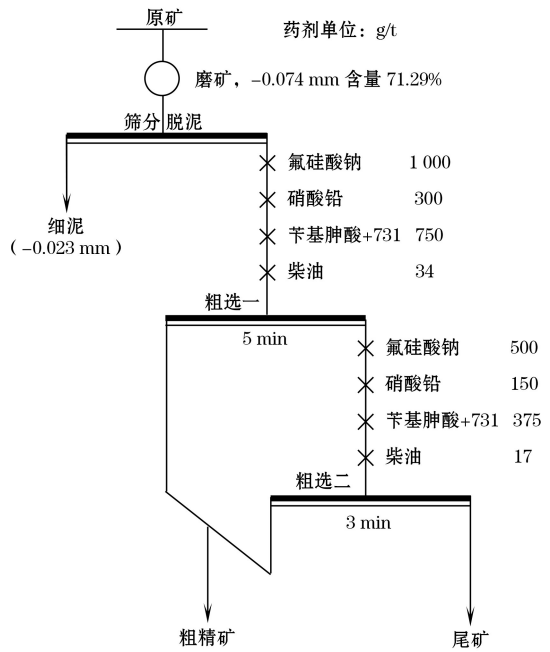


图 5　金红石浮选试验流程

Fig.5　Test process of rutile flotation

2.2.1　磨矿细度对比试验

磨矿细度的选择不仅决定了金红石矿物单体解离的程度，也影响着矿浆中次生细泥的含量，以及在浮选给矿中捕收剂对金红石及脉石矿物的选择性。金红石与脉石矿物可磨度存在差异，磨矿细度过高会增加矿石中的次生细泥含量，影响浮选分离效果，而磨矿细度过低又会影响金红石矿石的选择性单体解离效果，增加金红石与脉石浮选分离的难度，同时易造成矿浆中大粒径矿物含量增加，在浮选过程中

难以上浮,出现沉槽现象。因此考察了磨矿细度对金红石回收效果的影响,试验结果见图 6。

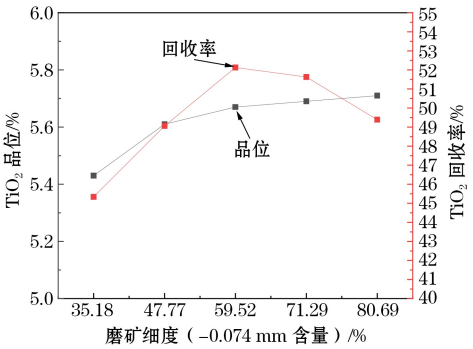


图 6 磨矿细度对比试验结果

Fig.6 Comparison test results of grinding fineness

由图 6 可知,随着磨矿细度的增加,精矿中 TiO_2 品位逐渐升高,金红石矿物解离度也随之增加,但同时矿浆中细粒脉石矿物含量升高,致使精矿中 TiO_2 回收率先升高后降低,当磨矿细度达到 59.52%左右时浮选回收率达到最高点。因此,确定磨矿细度-0.074 mm 含量为 59.52%进行后续条件对比试验。

2.2.2 筛分粒度对比试验

本矿石中金红石矿物嵌布粒度较细,与脉石矿物嵌布关系复杂,为使矿物充分单体解离而选择细磨,往往会造成严重的泥化问题。矿物颗粒之间因为范德华力与水化作用力而互相吸引,使得细泥吸附罩盖在金红石的表面,削弱了浮选药剂的作用效果,在浮选过程中,次生细泥还易与金红石发生竞争吸附,增加药剂的消耗量。通过脱泥可以缓解上述问题,但脱泥筛分粒度过细,对浮选指标的改善能力有限;脱泥筛分粒度过大,又会使得金红石随着细泥大量损失,影响钛回收率。试验考察了筛分粒度对金红石回收效果的影响,试验结果见图 7。

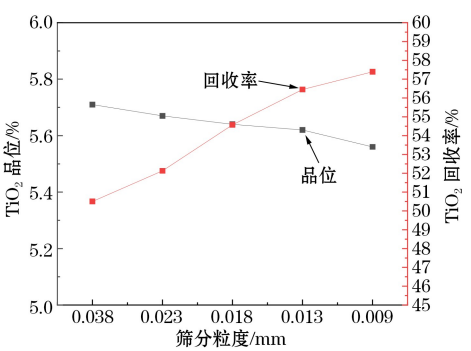


图 7 筛分粒度对比试验结果

Fig.7 Comparison test results of screening particle size

由图 7 可知,随着筛分粒度的减小,矿浆中微细粒脉石矿物比例增加,细泥的吸附罩盖现象加剧,与金红石竞争吸附作用增强,表现为精矿的 TiO_2 回收率逐渐上升,金红石损失减少,但所得金红石精矿中 TiO_2 品位逐渐降低。当筛分粒度小于 0.013 mm 时,精矿 TiO_2 品位降低幅度增加,TiO_2 回收率提升效果降低。因此,确定筛分粒度为 0.013 mm 进行后续条件对比试验。

2.2.3 捕收剂种类及用量对比试验

浮选中捕收剂性能高低直接影响浮选效果。金红石浮选中常用的捕收剂有:羧酸类及其皂、膦酸类、肿酸类以及羟肟酸类捕收剂。试验考察了多种组合捕收剂对金红石浮选指标的影响,以筛选出最佳捕收剂类型及用量,试验结果如图 8、图 9 所示。

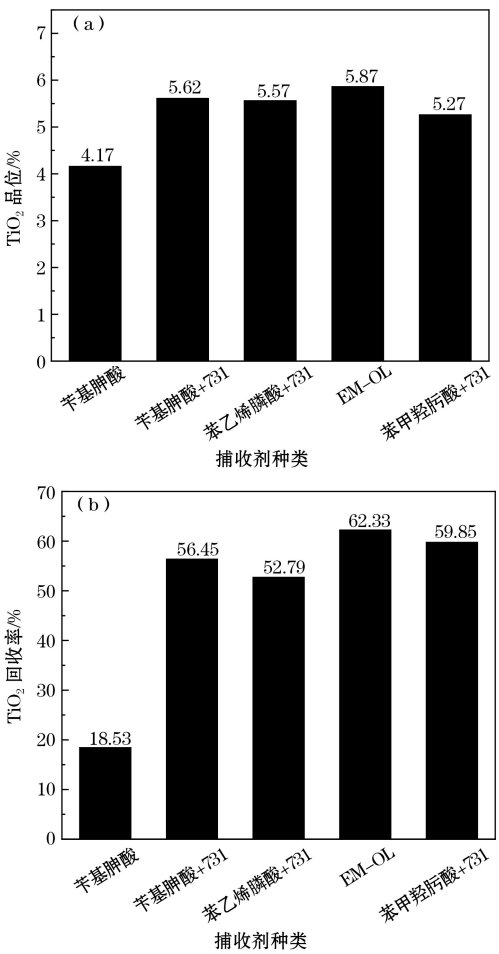


图 8 捕收剂种类对比试验结果

Fig.8 Comparison test results of collector types

由图 8 可知,在苄基肿酸作单一捕收剂时,金红石精矿 TiO_2 品位与回收率都远低于其他捕收剂组合,与 731 作组合捕收剂后,浮选指标大大提升。EM-OL 型混合捕收剂捕收性能较强,且对该矿有

明显选择性，精矿 TiO_2 品位与回收率均优于其他捕收剂，因此最佳捕收剂类型为 EM-OL。

由图 9 可知，随着 EM-OL 用量由 300 g/t 增加至 900 g/t，精矿 TiO_2 品位逐渐降低，由 6.17%降低至 5.81%，精矿 TiO_2 回收率逐渐升高，由 53.43%增加至 63.11%。当 EM-OL 用量超过 600 g/t 时，精矿 TiO_2 品位的下降幅度开始增加，TiO_2 回收率提升效果减弱，因此确定 EM-OL 用量为 600 g/t 进行后续条件对比试验。

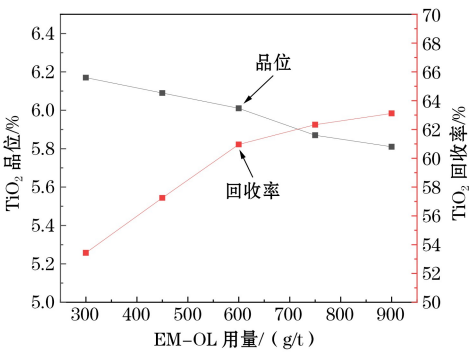


图 9　捕收剂用量对比试验结果

Fig.9　Comparison test results of collector dosage

2.2.4　活化剂用量对比试验

浮选金红石时，矿浆中的铅离子能够在一定程度上提升捕收剂与钛质点之间的作用，从而对金红石的浮选产生明显的活化作用。试验考察了活化剂硝酸铅用量对金红石回收效果的影响，试验结果如图 10 所示。

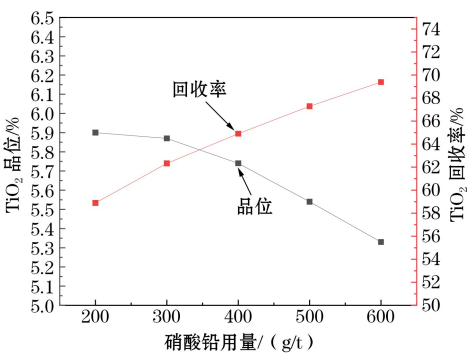


图 10　硝酸铅用量对比试验结果

Fig.10　Comparison test results of lead nitrate dosage

由图 10 可知，随着硝酸铅用量由 200 g/t 增加至 600 g/t，精矿 TiO_2 品位逐渐降低，由 5.90%降低至 5.33%，当硝酸铅用量超过 300 g/t 时下降幅度明显增加，而精矿 TiO_2 回收率逐渐升高，由 58.89%增加至 69.39%。为保证较高精矿 TiO_2 品位的同时，减少药剂用量，因此确定硝酸铅用量为 300 g/t 进行后续条件对比试验。

2.2.5　抑制剂用量对比试验

氟硅酸钠在金红石浮选中常被用作抑制剂，能够有效抑制硅酸盐矿物的上浮，尤其适用于抑制石榴石、绿泥石、角闪石、长石、石英等。试验考察了氟硅酸钠用量对金红石回收效果的影响，试验结果如图 11 所示。

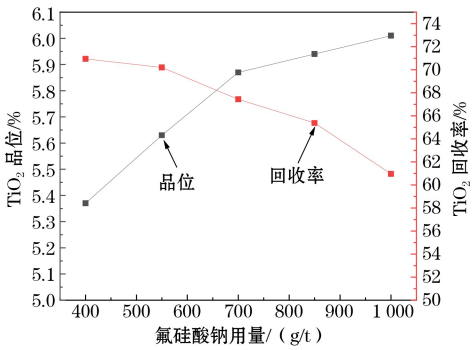


图 11　抑制剂用量对比试验结果

Fig.11　Comparison test results of inhibitor dosage

由图 11 可知，随着氟硅酸钠用量由 400 g/t 增加至 1 000 g/t，精矿 TiO_2 品位逐渐升高，由 5.37%增大至 6.01%，当氟硅酸钠用量超过 700 g/t 时上升幅度减小，而精矿 TiO_2 回收率逐渐降低，由 70.94%降低至 60.96%。为保证精矿的 TiO_2 回收率，因此确定氟硅酸钠用量为 700 g/t 进行后续试验。

2.3　金红石全粒级短流程浮选回收闭路试验

金红石全粒级短流程浮选回收闭路试验流程见图 12，试验结果见表 3。

表 3　金红石全粒级短流程浮选回收闭路试验结果

Table 3　Closed circuit test results of short process technology for full particle flotation recovery　%

产品名称	产率	TiO_2 品位	TiO_2 回收率
金红石精矿	3.21	61.70	63.14
细泥	17.36	2.72	15.04
浮选尾矿	79.43	0.86	21.82
原矿	100.00	3.14	100.00

由表 3 可知，各作业药剂在矿浆闭路循环、矿浆环境动态变化复杂体系中具有较强适应性，采用筛分脱泥效果较佳，钛损失率较低，混合捕收剂 EM-OL 选择性和捕收能力较优。最终在“二粗四精”的浮选闭路流程下，获得了产率为 3.21%、TiO_2 品位为 61.70%、回收率为 63.14%的金红石精矿。

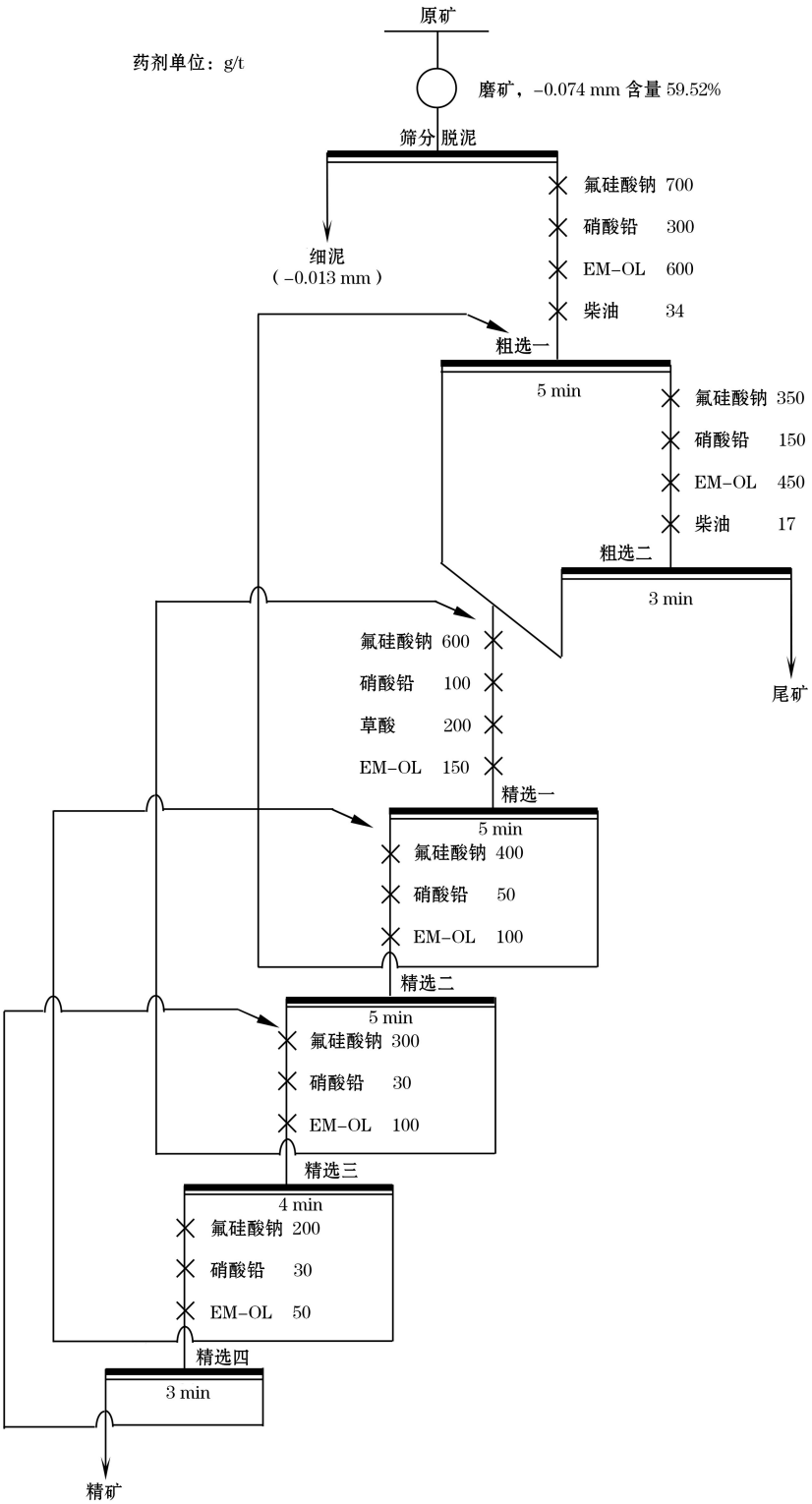


图 12 金红石全粒级短流程浮选回收闭路试验流程

Fig.12 Closed circuit test process of short process technology for full particle flotation recovery

3 结论

(1) 青海某榴辉岩型金红石矿主要矿物组成为金红石、石榴子石、绿辉石、长石、石英等，其中钛为矿石的主要回收组分，主要分布于金红石、榍石、钛铁矿等钛的独立矿物中。金红石一般呈它形粒状，分散嵌布于石榴子石、绿辉石等矿物粒间。金红石的粒度一般为 0.02～0.15 mm，属于细粒，主要呈稀

疏浸染状分布在脉石粒间，部分颗粒可包裹于石榴子石中，被包裹的这部分金红石的回收利用会受影响。金红石中除97.26%的TiO_2以外，还有少量的FeO，平均含量为0.25%，将使金红石具有弱磁性，影响金红石的回收。

(2) 全粒级短流程浮选回收工艺试验研究结果表明：针对TiO_2品位3.14%的金红石原矿，通过固定磨矿细度－0.074 mm含量为59.52%、筛分粒度为－0.013 mm，在一段粗选抑制剂氟硅酸钠用量为700 g/t，活化剂硝酸铅用量为300 g/t，捕收剂EM-OL用量为600 g/t的条件下，最终在“二粗四精”的浮选闭路流程下，获得了产率为3.21%、TiO_2品位为61.70%、回收率为63.14%的金红石精矿，实现了矿物的预选目标，也利于后续再选提质。

(3) 针对青海某榴辉岩型金红石矿，采用筛分脱泥效果较佳，钛损失率较低。混合捕收剂EM-OL型混合捕收剂捕收性能较强，且对该矿有明显选择性。金红石矿全粒级浮选回收短流程工艺仅通过浮选手段进行金红石的分选，获得了较为优秀的精矿指标，实现了矿物的短期回收，简化了选矿流程，节省了该矿的生产成本，易于控制，便于推广应用。

参考文献(References)：

[1] 宝明月.关于青海省某榴辉岩型金红石矿的资源综合利用浅析[J].有色矿冶，2018，34(4)：65-68.
BAO Mingyue. Analysis of comprehensive utilization of eclogite-type rutile in Qinghai Province [J]. Nonferrous Mining and Metallurgy，2018，34(4)：65-68.

[2] 郭万中.组合药剂对金红石浮选的影响及协同作用机理研究[D].沈阳：东北大学，2021.
GUO Wanzhong. Study on the effect of combination medicament on rutile flotation and the mechanism of synergistic action[D]. Shenyang：Northeastern University，2021.

[3] 张革利，李洪强，陈迎新，等.江苏某原生金红石矿选矿试验研究[J].化工矿物与加工，2024，53(3)：22-29.
ZHANG Geli，LI Hongqiang，CHEN Yingxin，et al. Experimental study on mineral processing of a primary rutile ore in Jiangsu Province [J]. Industrial Minerals & Processing，2024，53(3)：22-29.

[4] 中国地质科学院矿产综合利用研究所.从榴辉岩矿石中回收金红石的选矿方法：202410050339.6[P].2024-05-24.
Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources，Chinese Academy of Geological Sciences. Mineral processing method for recovering rutile from eclogite ore：202410050339.6[P].2024-05-24.

[5] 华中宝，童雄，谢贤，等.金红石浮选药剂研究进展[J].金属矿山，2018(9)：28-32.
HUA Zhongbao，TONG Xiong，XIE Xian，et al. Review of rutile flotation reagents and their mechanisms[J]. Metal Mine，2018(9)：28-32.

[6] 肖巍，余俊甫，杨玮，等.原生金红石矿浮选药剂研究进展[J].矿产保护与利用，2022，42(3)：82-90.
XIAO Wei，YU Junfu，YANG Wei，et al. Research progress on flotation reagents for primary rutile ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2022，42(3)：82-90.

[7] 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].矿产保护与利用，2016(1)：28-31＋58.
ZHANG Xiaonian，LI Jiazhen，ZHU Fajun，et al. Experimental study on new mineral processing technology of rutile ore in Hubei [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2016(1)：28-31＋58.

[8] 常田仓，章晓林，赵文迪，等.金红石选矿技术研究综述[J].矿产保护与利用，2019，39(5)：167-173.
CHANG Tiancang，ZHANG Xiaolin，ZHAO Wendi，et al. Research progress on the mineral processing technology of rutile ore [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2019，39(5)：167-173.

[9] 陈骞.榴辉岩型金红石浮选药剂制度及作用机理研究[D].武汉：武汉理工大学，2020.
CHEN Qian. Study on flotation separation scheme of rutile eclogite ore and adsorption mechanism of agents on mineral surface[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2020.

[10] 孙小俊，曾祥龙，李建华，等.基于磁选预富集的湖北枣阳金红石矿石选矿试验[J].金属矿山，2016(1)：89-92.
SUN Xiaojun，ZENG Xianglong，LI Jianhua，et al. Rutile ore pre-concentration tests based on magnetic processing in Zaoyang，Hubei[J]. Metal Mine，2016(1)：89-92.

[11] 黄余，曹沁波.辛基羟肟酸对金红石的浮选行为[J].矿业研究与开发，2019，39(1)：91-95.
HUANG Yu，CAO Qinbo. Flotation behavior of octyl hydroxamic acid on rutile [J]. Mining Research and Development，2019，39(1)：91-95.

[12] 程宏伟，董栋，何兰军.金红石选矿技术研究进展[J].矿产保护与利用，2016(3)：57-61.
CHENG Hongwei，DONG Dong，HE Lanjun. Research progress on the mineral processing technology of rutile[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2016(3)：57-61.

[13] 刘芳芳.复杂难处理金红石矿高效选矿新工艺研究[D].长沙：中南大学，2022.
LIU Fangfang. Study on new high efficiency beneficiation process for complex and refractory rutile ore[D]. Changsha：Central South University，2022.

[14] 高利坤.细粒难选金红石矿分步浮选工艺及理论研究[D].昆明:昆明理工大学,2009.
GAO Likun. Study on the stepwise flotation process and theory of fine-grained refractory rutile ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2009.

[15] 黄俊玮,李洪潮,郭珍旭,等.榴辉岩型金红石矿选矿现状与发展趋势[J].现代矿业,2016,32(4):78-81.
HUANG Junwei, LI Hongchao, GUO Zhenxu, et al. Beneficiation research status and development trend of eclogite-type rutile ore[J]. Modern Mining, 2016, 32(4): 78-81.

[16] 张裕书,杨耀辉,张少翔,等.江苏某榴辉岩型金红石矿综合利用研究[J].化工矿物与加工,2012,41(6):4-7.
ZHANG Yushu, YANG Yaohui, ZHANG Shaoxiang, et al. Comprehensive utilization of eclogite-type rutile ore in Jiangsu[J]. Industrial Minerals & Processing, 2012, 41(6): 4-7.

[17] 张海青,王军,晁海德,等.青海乌兰榴辉岩型金红石矿选矿工艺对比研究[J].青海大学学报,2019,37(5):66-72.
ZHANG Haiqing, WANG Jun, CHAO Haide, et al. Comparative study on beneficiation process of eclogite-type rutile ore in Wulan county, Qinghai[J]. Journal of Qinghai University, 2019, 37(5): 66-72.

[18] 余生根.榴辉岩型金红石矿综合利用试验研究[J].矿产综合利用,2012(1):24-28.
YU Shenggen. Experimental study on comprehensive utilization of eclogite type rutile ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2012(1): 24-28.

[19] 孙晓华,霸慧文,赵玉卿,等.榴辉岩型金红石矿综合利用途径研究[J].化工矿物与加工,2016,45(8):37-39.
SUN Xiaohua, BA Huiwen, ZHAO Yuqing, et al. Research on the comprehensive utilization of eclogite type rutile ore [J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(8): 37-39.

[20] 王勇海.榴辉岩型金红石矿选矿工艺研究[D].长沙:中南大学,2010.
WANG Yonghai. Research on mineral processing technology of eclogite type rutile ore[D]. Changsha: Central South University, 2010.