doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 09. 006

光卤石反浮选试验及工艺优化研究

吴巅赟[1]，冯　勇[1]，孙正平[1]，马彦军[1]，许建伟[1]，
马生奎[1]，任红伟[1]，王靖波[2,3]，吴世鹏[2,3]
（1. 青海盐湖工业股份有限公司，青海 格尔木 816099；
2. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
3. 矿物加工科学与技术全国重点实验室，北京 102628）

摘　要：察尔汗盐湖作为我国最重要的钾肥生产基地，反浮选-冷结晶是光卤石制备氯化钾的核心工艺。随着盐湖资源持续开采，光卤石原矿性质发生改变，现有反浮选流程脱除氯化钠的效果下降，低钠光卤石产品中氯化钠杂质升高，后续冷结晶-再浆洗涤工序钾盐损失大，生产成本增加。针对该生产难题，本文以察尔汗盐湖光卤石原矿为研究对象，在查明原矿化学组成与粒度特征基础上，开展单因素浮选条件试验，系统考察调整剂种类用量、捕收剂类型及用量对光卤石反浮选脱钠效果的影响，并对比多种闭路浮选工艺流程的分选指标。条件试验结果表明，碳酸钠、氯化钠、氯化钾的添加均不利于体系内氯化钠脱除，粗选无需外加调整剂；捕收剂对比试验确定十二烷基吗啉分选选择性最优，适宜用量为 65 g/t。闭路流程对比试验显示，采用现场工艺流程，低钠光卤石中 NaCl 品位为 6. 46%，光卤石回收率为 99. 65%，NaCl 脱除率为 61. 29%；采用“两粗一扫两精”工艺流程，低钠光卤石中的 NaCl 品位降低至 1. 32%，NaCl 脱除率提高至 93. 21%，同时光卤石保持较高回收率。有效降低低钠光卤石中的氯化钠杂质，能够减少后续 KCl 生产过程钾的损耗，对于提升氯化钾生产效率、优化钾资源利用率具有重要的理论和实践意义。工艺流程的优化显著提高了 NaCl 脱除效率，为盐湖钾资源的高效利用提供重要的技术支撑。

关键词：光卤石；反浮选；脱钠；工艺流程；察尔汗盐湖
中图分类号：TD923　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-9492(2026)09-0053-08

Study on Reverse Flotation Test and Process Optimization of Carnallite

Wu Dianyun[1], Feng Yong[1], Sun Zhengping[1], Ma Yanjun[1], Xu Jianwei[1],
Ma Shengkui[1], Ren Hongwei[1], Wang Jingbo[2,3], Wu Shipeng[2,3]
(1. Qinghai Salt Lake Industry Co. , Ltd. , Golmud 816099, Qinghai, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
3. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: Qarhan Salt Lake is the most important potash fertilizer production base in China. The reverse flotation-cold crystallization process is the core technology for preparing potassium chloride from carnallite. With continuous exploitation of salt-lake resources, the properties of carnallite raw ore have changed. The sodium-chloride removal performance of the existing reverse flotation process deteriorates, the sodium chloride impurity in low-sodium carnallite increases, which leads to serious potassium loss and high production cost in the subsequent cold-crystallization and re-pulp washing process. To solve this practical problem, carnallite ore from Qarhan Salt Lake was taken as the research object. On the basis of investigating chemical composition and particle-size characteristics of raw ore, single factor flotation condition tests were carried out. The effects of type and dosage of regulators, collector type and dosage on sodium removal performance of carnallite reverse flotation were systematically studied, and separation indexes of several locked-cycle flotation flowsheets were compared. The condition test results show that the addition of sodium carbonate, sodium chloride and potassium chloride is unfavorable for sodium chloride

收稿日期：2025-07-22
基金项目：国家发展改革委重大专项(2206-632801-07-02-791735)
作者简介：吴巅赟(1998—)，男，青海湟中人，学士，工程师，主要从事盐化工技术研究。

removal, and no regulator needs to be added in roughing flotation. Among tested collectors, dodecylmorpholine presents the best selectivity, and its appropriate dosage is 65 g/t. The locked-cycle test results indicate that for the on-site process, the NaCl grade of low-sodium carnallite is 6.46%, carnallite recovery is 99.65%, and NaCl removal rate is 61.29%. By adopting the "two roughings, two cleanings, one scavenging" flowsheet, the NaCl grade of low-sodium carnallite decreases to 1.32%, and NaCl removal rate reaches 93.21%, while carnallite maintains high recovery. Effectively reducing sodium-chloride impurity of low-sodium carnallite can decrease potassium loss in subsequent KCl production, which possesses important theoretical and practical significance for improving KCl production efficiency and potassium resource utilization. Process optimization significantly improves NaCl removal efficiency, which provides important technical support for efficient utilization of salt-lake potassium resources.

Key words: carnallite; reverse flotation; sodium removal; process flowsheet; Qarhan Salt Lake

钾资源是国民经济发展的基础性战略资源，钾盐生产的肥料对农业具有极其重要的意义[1-2]。我国钾资源相对匮乏，储量仅占全球总量的9%，2022年钾肥对外依存度达53%，凸显了国内资源供给的严峻形势[3-4]。因此，提升国内钾盐资源的高效开发利用水平，已成为保障国家粮食安全和经济稳定的关键举措[5-6]。

柴达木地区的察尔汗盐湖是我国最大的钾肥生产基地，现有生产工艺主要包括冷分解—正浮选法、反浮选—冷结晶法、热溶结晶法和兑卤法等[7-10]。其中反浮选—冷结晶工艺是世界上较为先进的一种工艺[11]，青海盐湖工业集团有限公司自1997年以来采用该方法制取KCl[12]。随着资源的逐渐消耗，光卤石原矿的矿石性质发生了较大变化，采用之前的选矿工艺流程，光卤石反浮选脱钠效率有所降低，低钠光卤石中的NaCl含量有所提高。低钠光卤石经过冷结晶—再浆洗涤工序脱除其中的NaCl。在此过程中，KCl的损失量通常为NaCl脱除量的2倍以上，降低了钾盐的回收率，同时大大增加了生产成本。

因此，本研究旨在系统探讨浮选条件试验及不同工艺流程对光卤石反浮选脱钠效率的影响，为优化生产工艺提供技术支持。

1 原矿性质

1.1 原矿基本化学组成

光卤石原矿取自青海察尔汗盐湖，基本化学成分见表1。由表1可知，原矿主要组分为光卤石、NaCl、$MgCl_2$，还含有少量$CaSO_4$及$MgSO_4$，其中主要杂质组分为NaCl、$MgCl_2$。

表1 光卤石原矿基本化学组成

Table 1 Basic chemical composition of the carnallite ore /%

组分	光卤石	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	$MgSO_4$
含量	74.76	16.00	5.40	0.34	0.40

试验用饱和卤水成分见表2。由表2可知，饱和卤水由自由水和六种离子组成，离子组成为K^+、Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}。

表2 试验用饱和卤水成分

Table 2 Composition of saturated brine used in the test /%

离子	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
含量	0.15	0.23	8.13	0.001 9	22.65	1.21

1.2 原矿粒度组成

原矿各粒级质量占比见图1。由图1可知，−0.5+0.3 mm粒级占比最高，颗粒主要集中在0.1～1 mm粒级。从粒度分布结果可见，矿样粒度区间分布较宽。盐湖光卤石浮选过程中，粒度过粗矿物解离不完全，NaCl易夹杂进入光卤石产品；粒度过细颗粒比表面积大，会增加捕收剂药剂消耗，同时细泥夹带现象加重，干扰光卤石与氯化钠的分选效果。整体粒度条件具备开展反浮选脱钠的基础，但实际分选过程仍需要关注细颗粒夹带对浮选指标带来的不利影响。

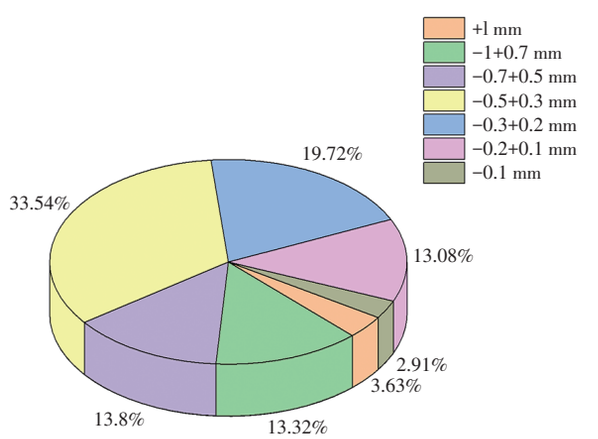


图1 光卤石原矿粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of the carnallite ore

2　浮选试验

2.1　试验仪器、试剂及试验方法

试验仪器：试验所用浮选机为XFD型单槽浮选机，粗选试验选用XFD-1.5 L规格浮选机。全部浮选试验均以饱和卤水作为浮选介质，避免光卤石矿物遇水发生分解。

试验药剂：无水碳酸钠、十二胺、氯化钾、氯化钠为分析纯试剂，购自国药集团化学试剂有限公司；十二烷基吗啉、BK431A、BK431B为工业纯药剂。其中十二烷基吗啉由现场选厂提供；BK431A、BK431B由矿冶科技集团有限公司研发并提供。

试验方法：粗选阶段矿浆浓度25%，浮选机转速1 902 r/min，充气量0.15 m^3/h，刮板转速20次/min，浮选时间4 min。试验采用反浮选工艺，泡沫产品为富集NaCl的尾盐，浮选槽底流即为低钠光卤石，粗选试验流程见图2。

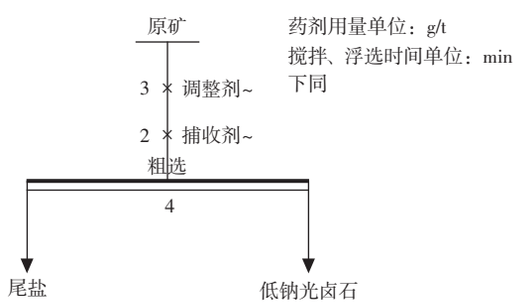


图2　粗选试验流程

Fig. 2　Flowsheet of roughing tests

2.2　浮选条件试验

2.2.1　粗选调整剂种类及用量试验

调整剂在浮选过程中起到关键作用，可通过改变矿物表面理化性质、矿浆环境以及气泡特性，实现浮选效果的优化。本研究选取Na_2CO_3、NaCl和KCl作为调整剂进行条件试验。

2.2.1.1　Na_2CO_3用量试验

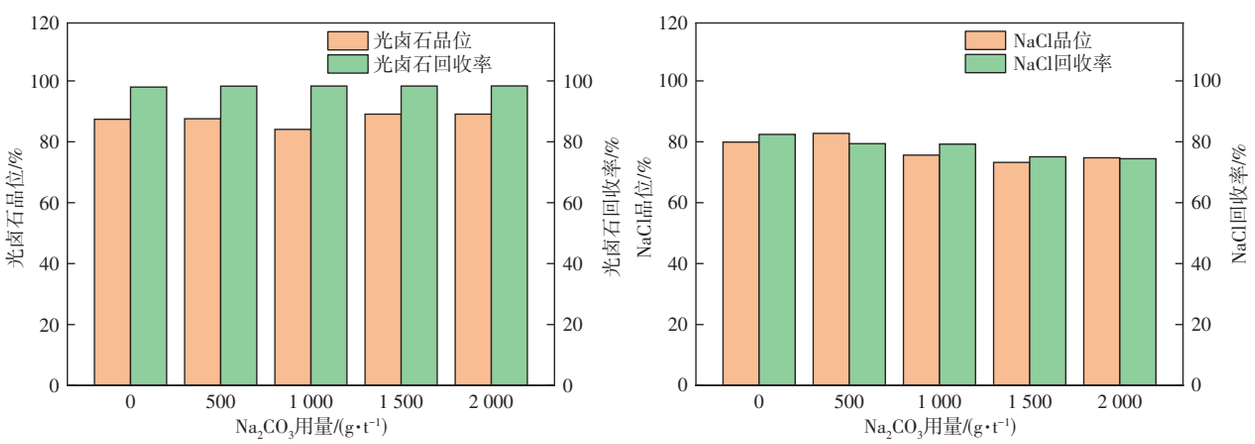
在自然pH条件下，以50 g/t十二烷基吗啉为捕收剂，考察Na_2CO_3用量对矿物可浮性的影响，试验结果见图3。

由图3可知，低钠光卤石中光卤石品位为84.06%～89.08%，回收率在97.95%～98.35%内小幅波动；Na_2CO_3的添加对光卤石回收率影响较小，但会对产品品位产生一定影响。尾盐中NaCl品位为73.24%～82.75%，回收率为74.45%～82.43%。随着Na_2CO_3用量增大，尾盐中NaCl回收率逐步降低，说明添加Na_2CO_3不利于NaCl脱除。综合考虑，粗选过程不添加Na_2CO_3。

2.2.1.2　NaCl用量试验

在自然pH条件下，以50 g/t十二烷基吗啉为捕收剂，考察NaCl用量对矿物可浮性的影响，试验结果见图4。

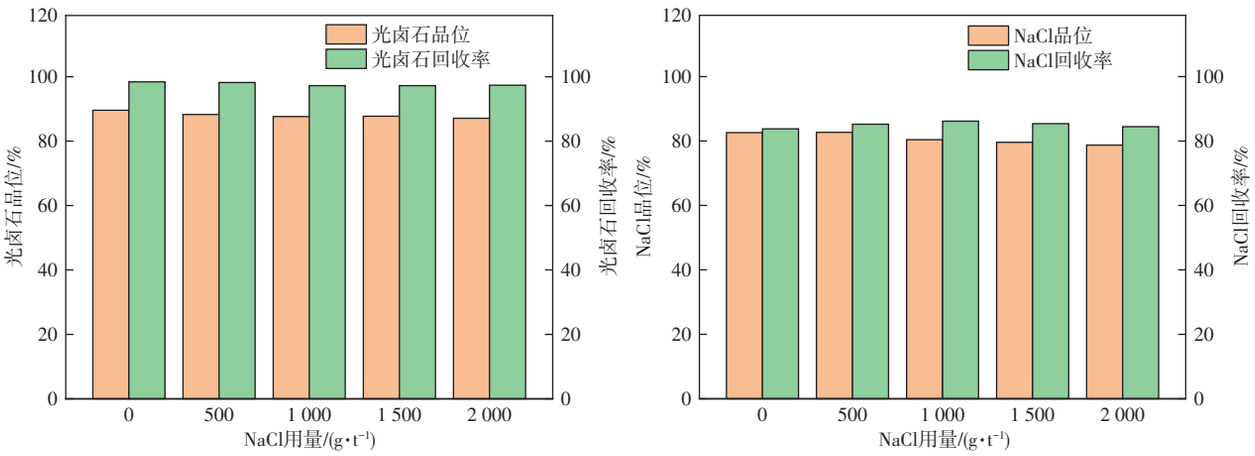
由图4可知，低钠光卤石中光卤石品位87.64%～89.57%，回收率97.22%～98.39%；添加NaCl对光卤石回收率提升作用有限，但会一定程度降低光卤石品位。尾盐中NaCl品位为79.60%～82.68%，回收率为83.77%～86.14%。综合考虑，粗选试验不添加NaCl。



(a) 低钠光卤石中光卤石品位和回收率与Na_2CO_3用量关系　　(b) 尾盐中NaCl品位和回收率与Na_2CO_3用量关系

图3　浮选产品品位、回收率与碳酸钠用量关系

Fig. 3　The relationship between grade and recovery in flotation products and Na_2CO_3 dosage



(a) 低钠光卤石中光卤石品位和回收率与NaCl用量关系　(b) 尾盐中NaCl品位和回收率与NaCl用量关系

图4　浮选产品品位、回收率与氯化钠用量关系

Fig. 4　The relationship between grade and recovery in flotation products and NaCl dosage

2.2.1.3　KCl用量试验

在自然pH条件下，以50 g/t十二烷基吗啉为捕收剂，考察KCl用量对矿物可浮性的影响，试验结果见图5。

由图5可知，低钠光卤石中光卤石品位为86.33%～89.47%，回收率为98.00%～98.39%；添加KCl对光卤石回收率改善不明显，同时会造成光卤石品位小幅下降。尾盐中NaCl品位为82.53%～88.31%，回收率为83.77%～87.85%。综合考虑，粗选试验不添加KCl。

2.2.2　捕收剂种类筛选试验

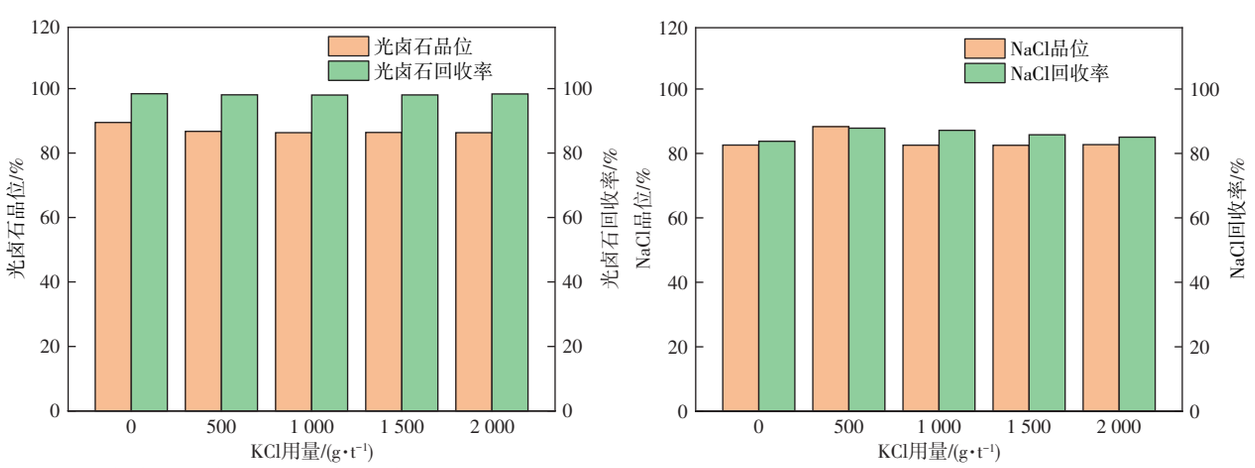
捕收剂的合理选择是浮选获得理想分选指标的重要前提[13]。在自然pH条件下，分别考察十二烷基吗啉、BK431A、BK431B以及十二烷基吗啉＋十二胺组合捕收剂4种药剂体系矿物的分选效果，试验结果见图6。

由图6可知，在相同药剂用量条件下，十二烷基吗啉的分选选择性最优，所得低钠光卤石光卤石品位为89.47%，尾矿NaCl回收率为83.77%；BK431A捕收能力最强，尾矿NaCl回收率达到85.97%，但选择性较差，低钠光卤石光卤石品位仅为87.49%；其余两种药剂的分选效果介于上述二者之间。综合考虑选择性与捕收能力，确定十二烷基吗啉作为粗选捕收剂。

2.2.3　粗选捕收剂用量试验

在自然pH条件下，以十二烷基吗啉作为捕收剂，考察捕收剂用量对分选效果的影响，试验结果见图7。

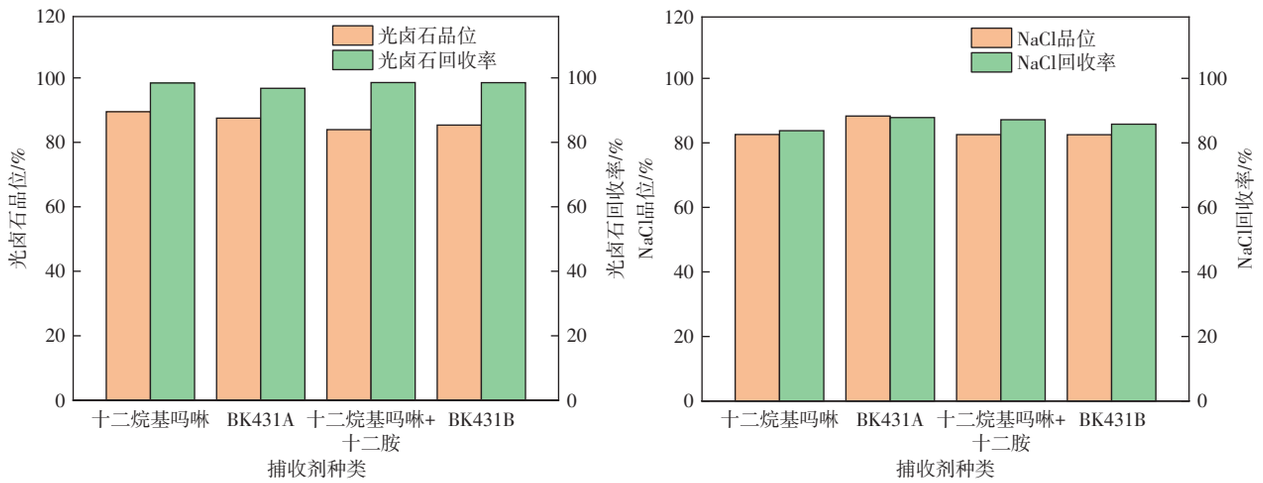
由图7可知，低钠光卤石光卤石品位为84.10%～88.19%，回收率为95.30%～98.40%；尾盐NaCl品位为72.30%～79.30%，回收率为84.41%～86.45%。随着十二烷基吗啉用量增加，尾盐NaCl品位下降、



(a) 低钠光卤石中光卤石品位和回收率与KCl用量关系　(b) 尾盐中NaCl品位和回收率与KCl用量关系

图5　浮选产品品位、回收率与氯化钾用量关系

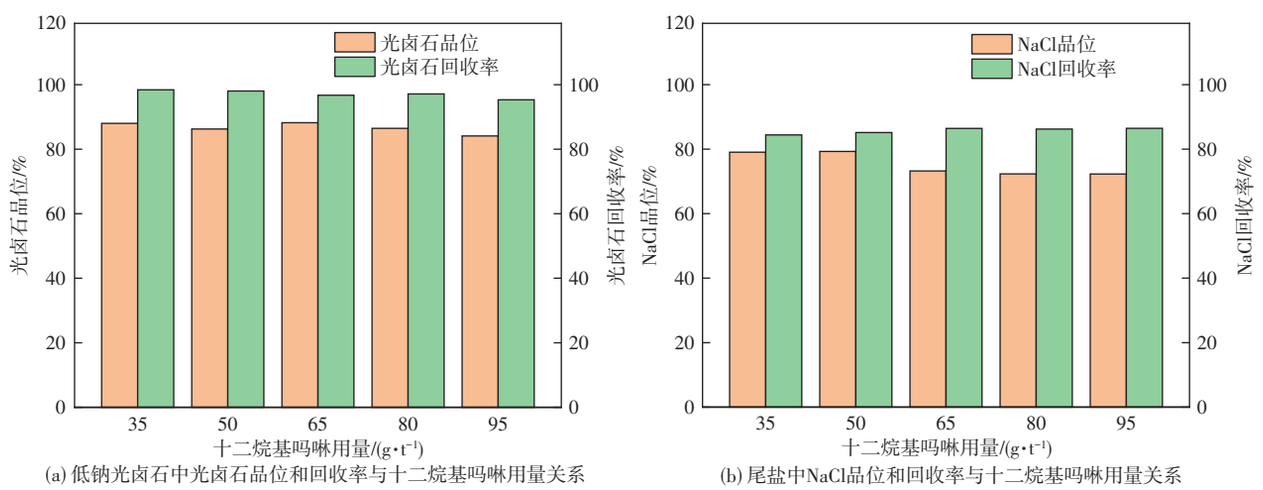
Fig. 5　The relationship between grade and recovery in flotation products and KCl dosage



(a) 低钠光卤石中光卤石品位和回收率与捕收剂种类关系　　(b) 尾盐中NaCl品位和回收率与捕收剂种类关系

图6　浮选产品品位、回收率与捕收剂种类关系

Fig. 6　The relationship between grade and recovery in flotation products and collector type



(a) 低钠光卤石中光卤石品位和回收率与十二烷基吗啉用量关系　　(b) 尾盐中NaCl品位和回收率与十二烷基吗啉用量关系

图7　浮选产品品位、回收率与捕收剂用量关系

Fig. 7　The relationship between grade and recovery in flotation products and collector dosage

回收率上升，有利于矿石中NaCl的脱除。当十二烷基吗啉用量为65 g/t时，低钠光卤石光卤石品位为88.19%，NaCl品位为2.66%，浮选指标较好，此时尾盐NaCl脱除率达到86.42%；继续增大十二烷基吗啉用量，尾盐NaCl回收率提升幅度有限。综合考虑，确定粗选试验十二烷基吗啉的适宜用量为65 g/t。

2.3　工艺流程优化试验

针对现场工艺流程脱钠效果不足的问题，逐步进行浮选工艺流程优化试验，依次考察4种不同浮选作业组合的分选效果，各流程试验结果如下。

2.3.1　现场工艺流程试验

选取现场所用十二烷基吗啉作为捕收剂进行浮选试验，现场工艺流程见图8，试验结果见表3。

采用选厂现场工艺流程，粗选Ⅰ底流NaCl品位

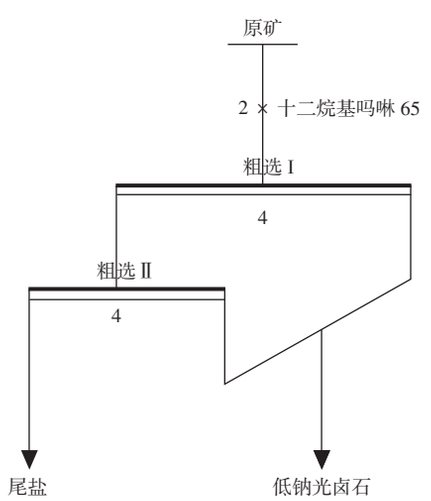


图8　现场工艺试验流程

Fig. 8　Flowsheet of on-site process tests

表3 现场工艺实验室试验结果

Table 3 Results of on-site process tests in the laboratory /%

产品名称	产率	品位		回收率	
		光卤石	NaCl	光卤石	NaCl
粗选Ⅰ底流	85.22	88.19	4.05	98.75	23.02
粗选Ⅱ底流	4.53	15.23	51.97	0.91	15.70
低钠光卤石	89.75	84.51	6.46	99.66	38.72
尾盐	10.25	2.57	89.58	0.34	61.28
原矿	100.0	76.11	14.98	100.0	100.0

为4.05%，粗选Ⅱ底流NaCl品位为51.97%，合并得到的低钠光卤石NaCl品位为6.46%，光卤石回收率为99.66%，NaCl脱除率61.28%。现场流程条件下，二次浮选底流会携带部分NaCl进入低钠光卤石产品，造成产品钠杂质含量偏高，存在优化空间。

2.3.2 “一粗一扫”闭路优化试验

由表3可知，二次浮选底流携带部分NaCl进入低钠光卤石，造成产品NaCl含量升高。针对该问题，在现场流程基础上增设扫选作业，开展“一粗一扫”闭路浮选优化试验，试验流程见图9，试验结果见表4。

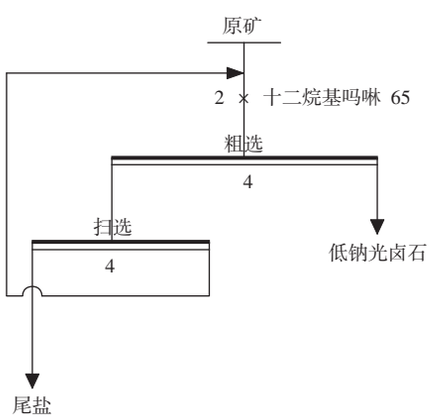


图9 一粗一扫闭路试验流程

Fig. 9 Flowsheet of the locked-cycle tests with one rougher and one scavenger

由表4可知，采用“一粗一扫”工艺流程进行闭路试验，所得低钠光卤石NaCl品位为3.32%，光卤石回收率为98.94%，NaCl脱除率为81.57%。相比于现场流程，增设扫选作业后NaCl脱除效果得到明显提升。

2.3.3 “一粗一扫两精”闭路优化试验

为进一步降低产品中NaCl杂质含量，在一粗一扫流程基础上引入两段精选作业，进行“一粗一扫两精”反浮选脱钠闭路优化试验，试验流程见图10，试验结果见表5。

表5结果表明，采用“一粗一扫两精”工艺，低钠光卤石NaCl品位降至2.90%，光卤石回收率为98.11%，NaCl脱除率为85.33%。增加两段精选作业，进一步脱除了产品中的NaCl杂质。

2.3.4 “两粗一扫两精”闭路优化试验

为继续强化NaCl脱除效果，将单段粗选调整为两段粗选，构建“两粗一扫两精”浮选工艺流程进行闭路优化试验，试验流程见图11，试验结果见表6。

由表6可知，采用“两粗一扫两精”闭路浮选工艺，可获得NaCl品位为1.32%的低钠光卤石产品，光卤石回收率为98.14%，NaCl脱除率达到93.21%。两级粗选搭配扫选、精选的组合工艺，实现了NaCl的高效脱除。

表4 一粗一扫闭路试验结果

Table 4 Results of the locked-cycle tests with one rougher and on scavenger /%

产品名称	产率	品位		回收率	
		光卤石	NaCl	光卤石	NaCl
低钠光卤石	85.20	88.08	3.32	98.94	18.43
尾盐	14.80	5.44	84.69	1.06	81.57
原矿	100.0	75.85	15.36	100.0	100.0

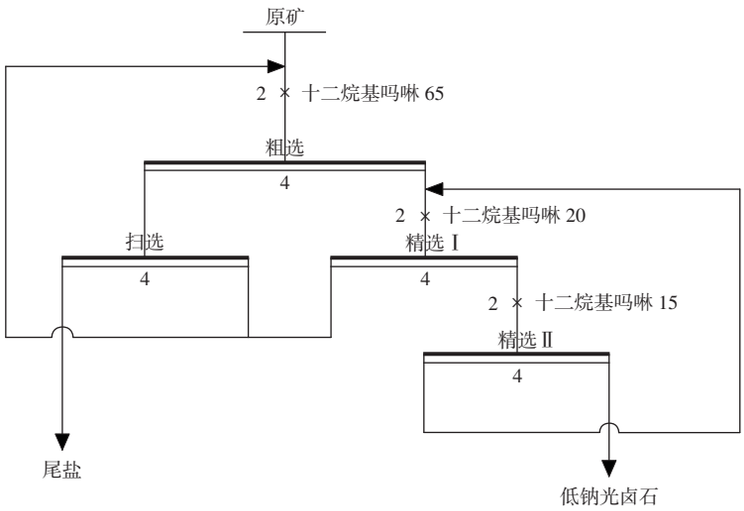


图 10　一粗一扫两精闭路试验流程

Fig. 10　Flowsheet of the locked-cycle tests with one rougher, one scavenger and two cleaners

表 5　一粗一扫两精闭路试验结果

Table 5　Results of the locked-cycle tests with one rougher, one scavenger and two cleaners　/%

产品名称	产率	品位		回收率	
		光卤石	NaCl	光卤石	NaCl
低钠光卤石	82.69	86.73	2.90	98.11	14.67
尾盐	17.31	7.98	80.58	1.89	85.33
原矿	100.0	73.09	16.35	100.0	100.0

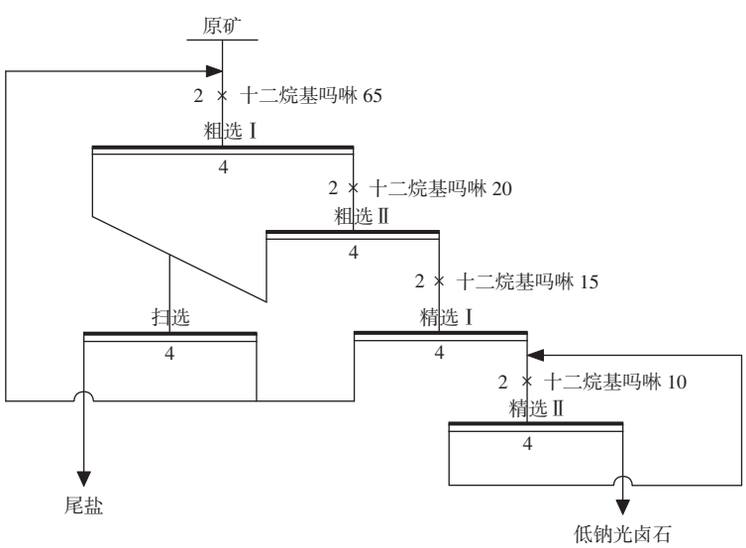


图 11　两粗一扫两精闭路试验流程

Fig. 11　Flowsheet of the locked-cycle tests with two roughers, one scavenger and two cleaners

表 6　两粗一扫两精闭路试验结果

Table 6　Results of the locked-cycle tests with two roughers, one scavenger and two cleaners　/%

产品名称	产率	品位		回收率	
		光卤石	NaCl	光卤石	NaCl
低钠光卤石	82.12	88.74	1.32	98.14	6.79
尾盐	17.88	7.71	83.19	1.86	93.21
原矿	100.0	74.25	15.95	100.0	100.0

3 结论

1)察尔汗盐湖光卤石原矿主要矿物组成为光卤石、NaCl、$MgCl_2$,伴生少量$CaSO_4$、$MgSO_4$,主要杂质为NaCl、$MgCl_2$;矿样粒度分布区间较宽,颗粒主要集中在0.1~1 mm粒级,具备进行反浮选脱钠的粒度条件,分选过程需要重视细颗粒夹带带来的不利影响。

2)调整剂条件试验结果表明,添加Na_2CO_3、NaCl和KCl均不利于光卤石体系中NaCl的脱除,因此,试验粗选过程不添加上述调整剂。捕收剂对比试验结果表明,十二烷基吗啉的分选选择性优于BK431A、BK431B以及十二烷基吗啉-十二胺组合捕收剂,因此,确定采用十二烷基吗啉作为粗选捕收剂,适宜用量为65 g/t。

3)针对现场流程脱钠效果不足的问题,逐步进行工艺流程优化试验。实验室复刻现场工艺流程,得到低钠光卤石NaCl品位为6.46%,光卤石回收率为99.65%,NaCl脱除率为61.29%;依次增设扫选、精选作业并调整粗选段数,对比多种闭路浮选流程指标。采用两粗一扫两精优化工艺,可获得NaCl品位为1.32%的低钠光卤石产品,光卤石回收率为98.14%,NaCl脱除率提升至93.21%,实现了NaCl的高效脱除。

4)经工艺优化后,低钠光卤石产品中氯化钠杂质显著降低,有利于后续KCl生产工序,可减少冷结晶—再浆洗涤过程钾盐损失,为察尔汗盐湖光卤石资源反浮选脱钠工艺升级提供试验依据。

参考文献

[1] 李成英,黄强,李成花. 浅谈察尔汗盐湖钾资源现状与存在的问题及应对措施[J]. 青海环境,2012,22(1):36-38,41.
Li Chengying, Huang Qiang, Li Chenghua. A brief discussion on the current status, existing problems, and countermeasures of potassium resources in the Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Qinghai Environmen, 2012, 22(1): 36-38, 41.

[2] 罗婷,张永庆,郑明贵,等. 中国钾盐资源安全评估与预警研究[J]. 地球科学进展,2022,37(6):575-87.
Luo Ting, Zhang Yongqing, Zheng Minggui, et al. Security assessment and early warning of potash resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(6): 575-87.

[3] 程玉刚,张忠辉,兰尧中. 我国钾盐制钾肥开发利用现状[J]. 现代矿业,2011,27(2):92-94.
Cheng Yugang, Zhang Zhonghui, Lan Yaozhong. Current status of development and utilization of potassium fertilizer from potash in China[J]. Modern Mining, 2011, 27(2): 92-94.

[4] 伊跃军,张秀峰,张利珍,等. 中国钾盐资源开发利用现状及建议[J]. 无机盐工业,2024,56(10):12-19.
Yi Yuejun, Zhang Xiufeng, Zhang Lizhen, et al. Present situation and suggestions on exploitation and utilization ofpotassium salt resources in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(10): 12-19.

[5] 王露莎. 钾资源开发利用技术及产业发展[J]. 世界有色金属,2021(21):1-2.
Wang Lusha. Development and utilization of potassium resources, technology and industrial development[J]. World Nonferrous Metals, 2021(21): 1-2.

[6] 贾菲菲,黄一鸣,陈鹏,等. 罗布泊硫酸盐型盐湖钾盐浮选捕收剂[J]. 有色金属(选矿部分),2025(2):105-111.
Jia Feifei, Huang Yiming, Chen Peng. Potassium salt flotation collectors in Lop Nur sulfate type salt lake[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(2): 105-111.

[7] 商照聪,刘刚,包剑. 我国钾资源开发技术进展与展望[J]. 化肥工业,2012,39(4):5-8,49.
Shang Zhaocong, Liu Gang, Bao Jian. Progress and prospect of technology for development of potassium resources in China[J]. Fertilizer Industry, 2012, 39(4): 5-8, 49.

[8] 苏静. 钾肥生产工艺及其发展[J]. 化学工程与装备,2012(7):138-139.
Su Jing. Production process and development of potash fertilizer[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2012(7): 138-139.

[9] 张义勇,史忠录,赵玮,等. 察尔汗盐湖钾肥的生产工艺比较[J]. 盐业与化工,2012,41(1):26-28.
Zhang Yiyong, Shi Zhonglu, Zhao Wei, et al. Comparison with the production process of potash in Chaerhan Salt Lake[J]. Salt Industry and Chemical Industry, 2012, 41(1): 26-28.

[10] 权朝明. 十二烷基吗啉与氯化钠、氯化钾及光卤石表面作用机理[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2017.
Quan Chaoming. Surface interaction mechanism of dodecylmorpholine withsodium chloride, potassium chloride and carnallite[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[11] Titkov S, Sabirov R, Panteleeva N. Investigations of alkylmorpholines-collectors for a new halite flotation process[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(11): 1161-1166.

[12] 谭欣,王福良,曾克文,等. 青海盐湖集团公司氯化钾产品预处理-反浮选纯化新工艺[J]. 有色金属,2007,59(2):50-54.
Tan Xin, Wang Fuliang, Zeng Kewen, et al. Novel purification technology of potassium chloride produet from Qinghai Salt Lake Industry Group Co., Ltd. by preprocessing-reverse flotation[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(2): 50-54.

[13] 胡岳华,冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京:科学出版社,2006.
Hu Yuehua, Feng Qiming. Mineral resource processing technology and equipment[M]. Beijing: Science Press, 2006.

(本文编辑 刘水红)