

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2023.03.005

含硫低品位细粒锡尾矿的回收试验研究

张 帅¹, 王桂芳², 梁光传³, 李叶涛²

- (1. 中钢矿业开发有限公司, 北京 100080;
2. 广西大学 资源环境与材料学院, 南宁 530004;
3. 广西大学 化学化工学院, 南宁 530004)

摘 要: 广西某细粒锡尾矿中锡、硫品位分别为 0.27% 和 2.05%, 具有一定的综合回收价值, 但锡石的嵌布粒度较细且共生关系较复杂, 回收难度较大。为提高该尾矿中锡的回收效果, 基于矿石性质特点, 采用脱硫—浮锡工艺对锡进行回收。试验以硫酸铜为活化剂、丁基黄药为捕收剂和松醇油为起泡剂, 采用一粗一扫一精的浮选流程对尾矿中的硫化物进行脱除; 以水玻璃和氟硅酸钠为抑制剂、苯基胂酸为捕收剂, 采用一粗一扫一精的浮选流程对锡石进行回收, 获得的锡精矿锡品位和回收率分别为 2.95% 和 55.81%。此外, 为进一步提高锡的回收率, 在脱硫—浮锡试验基础上, 添加了聚合氯化铝作为选择性絮凝剂, 可获得锡品位 3.05%、回收率为 60.66% 的锡精矿, 结果表明, 在选择性絮凝剂的作用下锡的回收效果得到了一定改善。

关键词: 细粒锡尾矿; 浮选; 絮凝剂

中图分类号: TD952; TD923

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2023)03-0040-09

Experimental Study on Recovery of Low-grade Fine Tin Tailings Containing Sulfur

ZHANG Shuai¹, WANG Guifang², LIANG Guangchuan³, LI Yetao²

- (1. Sinosteel Mining Company Limited, Sinosteel Corporation, Beijing 100080, China;
2. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;
3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The grade of tin and sulfur in a fine-grained tin tailings in Guangxi was 0.27% and 2.05%, respectively. It had a certain comprehensive recovery value, but the cassiterite dissemination size was fine and the symbiotic relationship was complex, so it was difficult to recover. In order to improve the recovery effect of tin in the tailings, based on the characteristics of the ore, the process of desulphurization and tin flotation was used to recover tin. Using copper sulfate as activator, butyl xanthate as collector and terpene oil as frother, the sulfide in the tailings was removed by the flotation flowsheet of one roughing, one scavenging and one cleaning. Using sodium silicate and sodium fluosilicate as depressants and benzyl arsonic acid as collector, the cassiterite was recovered by the flotation process of one roughing, one scavenging and one cleaning. The tin concentrate with tin grade of 2.95% and recovery of 55.81% was obtained. In addition, in order to further improve the recovery of tin, on the basis of desulphurization-floating tin test, polyaluminium chloride was added as a selective flocculant, and the tin concentrate with tin grade of 3.05% and recovery of 60.66% was obtained. The results showed that the recovery effect of tin has been improved under the action of selective flocculant.

Key words: fine-grained tin tailings; flotation; flocculant

收稿日期: 2022-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764003); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202210593015); 广西大学大学生创新创业训练计划项目(202210593857)

作者简介: 张 帅(1983-), 男, 山东曲阜人, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产资源综合利用研究。

通信作者: 王桂芳(1981-), 女, 广西桂林人, 博士, 教授, 主要从事矿物材料、难处理矿产资源利用研究。

锡是一种重要的金属原材料,主要以二氧化锡(锡石)以及各种硫化物(例如硫锡石)的形式存在于自然界中。锡金属不仅质地柔软、熔点低、延展性好,而且化学性质稳定、耐腐蚀、无毒性,还可以和很多金属形成合金。因此,锡及锡合金在日常生活中应用十分广泛^[1]。近年来,随着工业现代化进程的推进,锡资源的需求量越来越大,但其存在大量不合理利用以及滥采乱挖现象,导致我国锡矿生产处于超负荷运转状态,原生锡矿资源迅速减少,锡矿品位逐年下降。因此,我国锡尾矿资源的回收利用迫在眉睫^[2-3]。

目前,对锡尾矿中 useful 矿物的回收方法主要有重选^[4]、浮选^[5-7]、联合工艺^[8-10]和其他方法^[11-12]。重选可通过密度差对各矿物进行分选,而锡的密度为 7.28 g/cm³,远高于与其共生的脉石矿物,因此重选对锡尾矿具有良好的回收效果。董明传等^[13]采用了多种重选工艺研究某选厂尾矿中微细粒锡石的回收,结果表明,单独采用摇床回收效果最优,可获得锡品位为 6.20% 的锡粗精矿,锡回收率可达 58.58%。CONFIANCE 等^[14]采用振动台和磁选等联合重选技术,使锡、钽回收率分别提高至 81.85% 和 48.57%,锡、钽品位分别提高至 63.75% 和 35.7%。YANG 等^[15]采用离心浓缩技术从钨渣中回收锡石,在粗选转速为 850 r/min、矿浆质量浓度 15%、洗涤水流量 2 L/s、浓缩转速 550 r/min 的条件下,获得锡石品位和回收率分别为 18.63% 和 82.17% 的产品。

然而,由于锡石在尾矿中通常以微细粒级形式存在,而重选对入选矿物粒度范围有要求,对粒度小于 40 μm 的锡石回收效果、再选指标较差,往往不能达到理想效果。因此,对于这类微细粒级锡尾矿,浮选是一种更为有效的回收途径。由于细粒级锡尾矿单体解离度高,因此在浮选过程中与浮选药剂作用较为充分,从而能有效回收锡^[16]。陈珺等^[17]采用“旋流器脱粗—旋流器脱泥—除硫浮选—锡石浮选”工艺,获得了锡品位为 4.05%、回收率为 63.48% 的锡精矿,对重选尾矿的回收率指标高达 19.46%。龙海洋^[18]采用先浮选脱硫再浮选锡石的工艺流程,采用水杨羟肟酸和 P86 的组合为锡石浮选捕收剂,

获得了含锡 19.85%、回收率 88.00% 的锡精矿。LEISTNER 等^[19]采用常规浮选和团聚浮选对经过重选处理后的锡尾矿进行再处理,以磺基琥珀酸酯为捕收剂,可回收约 80% 的细粒(—50 μm)至极细粒(—20 μm)锡石。然而,在常规浮选过程中需要的浮选药剂种类较多,成本较高,对环境污染较大并且容易造成二次污染,因此需要根据锡尾矿矿样性质优化浮选工艺,提高锡尾矿的综合回收利用效率,以实现工业效益最大化。

为进一步提高广西某细粒锡尾矿中锡的回收率,基于锡尾矿的物化性质,采用先浮选脱硫后浮选回收锡的工艺对该尾矿中的锡进行回收,系统考察不同浮选药剂对锡回收效果的影响。在脱硫—浮锡工艺基础上,利用选择性絮凝剂聚合氯化铝和聚丙烯酰胺进一步优化锡尾矿浮选效果,并确定最佳的浮选工艺流程,为锡尾矿资源的回收利用提供理论依据。

1 矿石性质

试验所采用锡尾矿矿样取自广西某锡选矿厂,矿样主要化学成分分析结果见表 1,其 XRD 谱图见图 1,矿样粒度组成见表 2。由表 1、图 1 可知,尾矿样中锡的品位为 0.27%,硫的品位为 2.05%,Si、Fe 和 Al 含量分别为 18.67%、15.54% 和 6.99%。含锡矿物主要为锡石,脉石矿物主要为石英、黑云母、低钠长石和斜磷锰矿等。

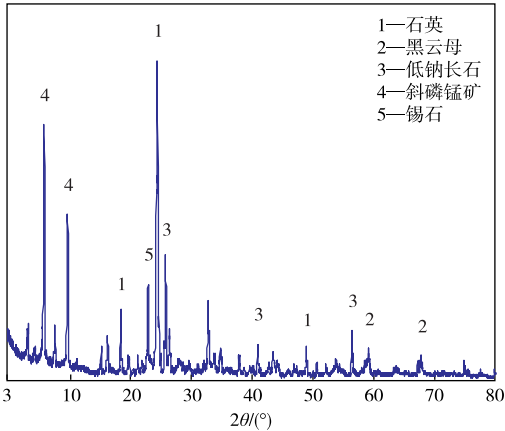


图 1 矿样的 XRD 谱

Fig 1 XRD pattern of ore sample

表 1 矿样主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of ore sample

组分	Sn	Zn	Fe	Al	S	Mg	Si	Mn	Na	Ca
含量	0.27	0.18	15.54	6.99	2.05	3.28	18.67	0.15	0.86	1.84

/%

表2 矿样粒度组成

Table 2 Particle size composition of ore sample

粒度/mm	产率	
	个别	负累计
-0.2+0.1	9.89	100.0
-0.1+0.074	10.40	90.11
-0.074+0.037	37.78	79.71
-0.037+0.019	23.57	41.93
-0.019+0.010	11.82	18.36
-0.010	6.54	6.54
合计	100.0	

由表2可知,矿样中-0.074 mm粒级占79.71%,表明该矿样的粒度组成相对较细,分布较均匀。为了使有用矿物充分单体分离,减少对浮选效果的不利影响,采用吉林省探矿机械厂的 $\Phi 240\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 锥形球磨机对尾矿样进行研磨处理,磨矿时间为2 min,获得的矿样-0.074 mm粒级含量为82.02%。

2 试验结果及讨论

2.1 脱硫浮选条件试验

锡尾矿中硫含量为2.05%,品位较高,如果直接浮选回收锡石而不进行脱硫处理,不但会增加浮选药剂的用量,还会导致锡精矿中的硫含量增加,降低锡精矿品位。因此,对研磨处理后的尾矿样进行脱硫处理是不可避免的^[20]。脱硫浮选以丁基黄药为捕收剂,松醇油为起泡剂、在粗选时二者用量为100、30 g/t,扫选时二者用量为50、15 g/t,脱硫浮选条件试验流程见图2。

2.1.1 硫酸铜用量试验

硫酸铜是硫化矿浮选中应用最广泛的一种活化剂,对闪锌矿、辉锑矿、黄铁矿以及磁黄铁矿等均具有活化作用,能够促进硫化矿与捕收剂的相互作用。由于锡尾矿中硫化矿的含量较高,且锡尾矿自然存放时间较长,使得矿石性质发生一定变化。因此,在浮选过程中,需添加硫酸铜作为活化剂促进硫化矿与捕收剂的相互作用^[21]。为考察硫酸铜对含硫矿物的活化效果,进行了硫酸铜用量试验,试验结果见图3。由图3可知,随着硫酸铜用量的增加,硫精矿中硫的品位逐渐升高,硫回收率逐渐降低,而硫精矿中损失的锡品位及回收率变化趋势不明显,锡品位低于0.3%、损失率不足7%。当硫酸

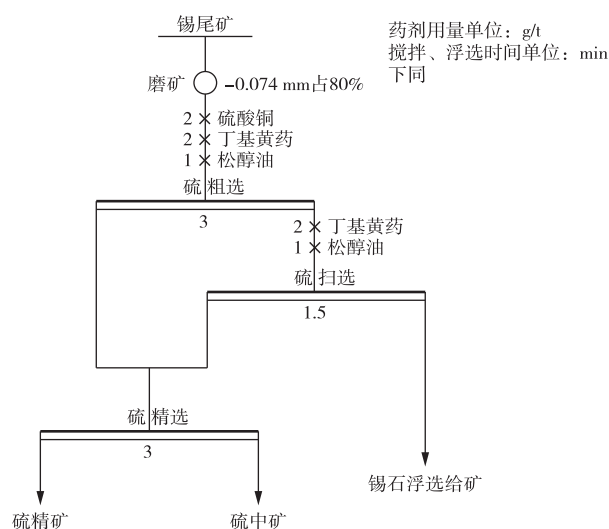


图2 脱硫条件试验流程

Fig. 2 Flowsheet of desulfurization condition tests

铜用量超过200 g/t时,硫精矿中硫品位上升、回收率下降,表明硫酸铜用量增加,硫化矿物的去除效果降低。综合考虑脱硫效果和锡的损失,确定硫酸铜的合适用量为200 g/t。

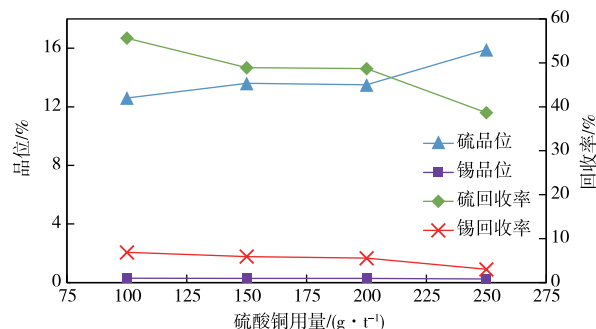


图3 硫酸铜用量试验结果

Fig. 3 Results of cupric sulfate dosage tests

2.1.2 丁基黄药用量试验

丁基黄药是典型的硫化矿捕收剂之一,捕收能力较强,可较好地回收锡尾矿中的硫矿物。固定活化剂硫酸铜用量为200 g/t,其他试验条件同2.1.1,考察丁基黄药用量对锡尾矿脱硫效果,试验结果见图4。由图4可以看出,随着丁基黄药用量增加,硫精矿中硫品位总体呈现下降趋势,但硫回收率小幅上升,当丁基黄药用量为200 g/t时,硫回收率达到最大,为49.86%,而锡的品位和回收率变化不明显。因此,为了获得更好的脱硫效果,同时减少丁基黄药用量和潜在药剂污染,确定丁基黄药的合适用量为100 g/t。

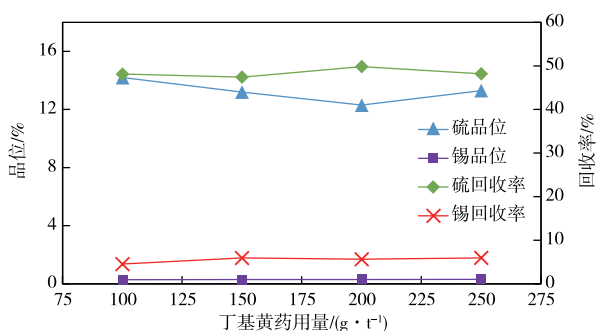


图4 丁基黄药用量试验结果

Fig. 4 Results of butyl xanthate dosage tests

2.2 浮锡条件试验

锡尾矿经过脱硫处理后,尾矿中的硫得到了初步的回收富集,但尾矿中的锡仍需要进一步浮选以最大化回收。由于矿样中含有大量的石英、硅酸盐类脉石矿物,对锡尾矿的浮选指标产生干扰,因此需添加抑制剂以降低脉石矿物对锡浮选效果的影响,同时,选择捕收性、选择性优良的捕收剂是获得理想指标的关键。试验采用水玻璃和氟硅酸钠作为抑制剂,同时对比了油酸、苯基胂酸和苯甲羟膦酸三种捕收剂对锡石浮选效果的影响,由此确定锡石浮选的最佳工艺条件。锡石浮选条件试验流程见图5。

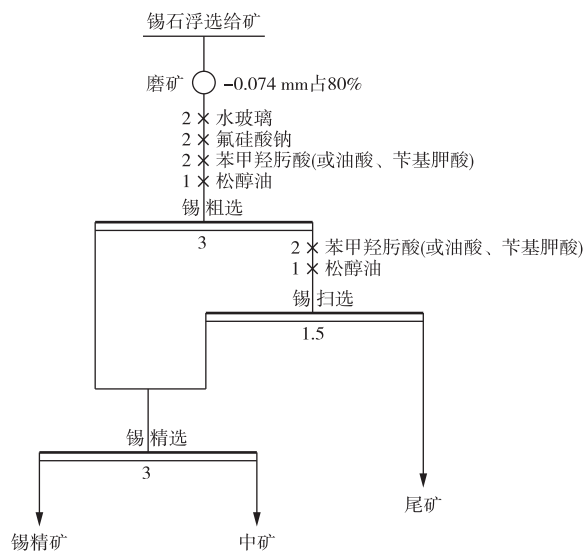


图5 浮锡条件试验流程

Fig. 5 Flowsheet of tin flotation condition tests

2.2.1 水玻璃用量试验

硅酸钠是一种水溶性的硅酸盐,水玻璃是其水溶液的俗称,常用于浮选作业中抑制石英和硅酸盐类脉石矿物,如云母、长石、石榴子石等。锡石浮选的适宜介质环境为中性或碱性,而水玻璃为强碱弱酸盐,其在溶液中呈弱碱性,有利于锡石浮选^[8]。以脱硫尾矿作为浮锡给矿,固定捕收剂苯甲羟膦酸用量为500 g/t、辅助抑制剂氟硅酸钠用量为600 g/t、

起泡剂松醇油用量为30 g/t,在矿浆pH=6的条件下,考察水玻璃用量对锡石浮选指标的影响,试验结果见图6。由图6可知,随着水玻璃用量增加,锡精矿中锡回收率逐渐升高,锡品位呈上升趋势。当水玻璃用量为800 g/t时,锡的选别指标最佳,锡品位、回收率分别为0.465%和8.61%。综合考虑,水玻璃的适宜用量为800 g/t。

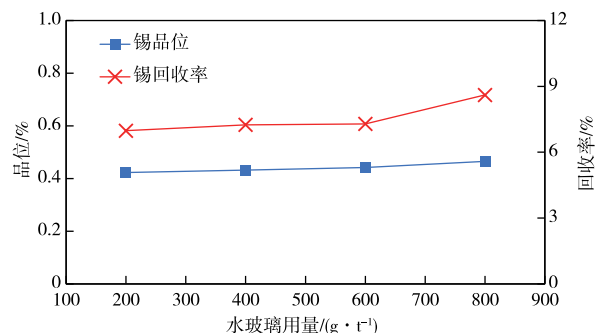


图6 水玻璃用量试验结果

Fig. 6 Results of water glass dosage tests

2.2.2 氟硅酸钠用量试验

氟硅酸钠作为一种常见的硅酸盐类矿物抑制剂,作用原理是其在溶液中形成胶束并吸附在石英、硅酸盐等脉石矿物表面,使其亲水性增强,从而降低脉石矿物的可浮性。试验固定水玻璃用量800 g/t,其他试验条件同2.2.1,考察了氟硅酸钠用量对锡石浮选指标的影响,试验结果见图7。由图7可知,随着氟硅酸钠用量的增加,锡回收率呈现先升后降的趋势,锡品位变化不明显,相较于单一水玻璃条件下略有提高。当氟硅酸钠用量为600 g/t时,锡石浮选效果较佳,锡品位和回收率分别为0.475%和12.87%。因此,氟硅酸钠的合适用量选择600 g/t。

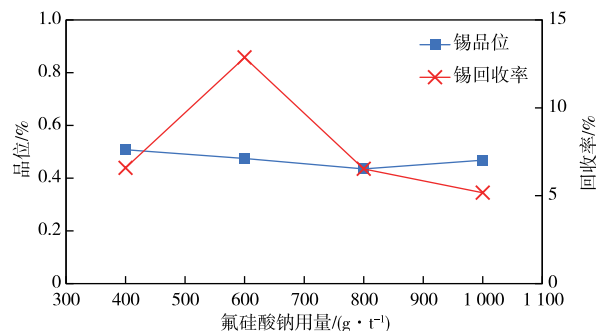


图7 氟硅酸钠用量试验结果

Fig. 7 Results of sodium fluorosilicate glass dosage tests

2.2.3 捕收剂种类及用量试验

油酸具有捕收能力强、用量少、无毒等优点,但

选择性较差,对 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 相对敏感,因此捕收含铁矿物、萤石、方解石的能力强,通常用于中性或碱性环境下锡石-石英型矿泥的浮选作业^[22]。苯甲羟肟酸属于烷基羟肟酸类捕收剂的一种,与锡石矿物之间的相互作用以化学吸附为主^[23],能与矿物中的金属阳离子发生反应并形成一种高效螯合物,并对锡石捕收能力强,而且毒性小,但价格较昂贵,成本较高^[24]。另外,苄基肟酸是属于芳香族肟酸中常见的一种肟酸类捕收剂,捕收能力强且选择性好,但有毒性,对人体有害,也常被用作锡石、黑钨矿和稀土矿浮选的捕收剂,同时也是最早应用于锡石浮选的捕收剂之一^[25]。

固定捕收剂用量为1 100 g/t,其他试验条件同2.2.1,对油酸、苯甲羟肟酸和苄基肟酸三种捕收剂进行了试验对比,考察其对锡石浮选指标的影响,试验结果见图8。由图8可知,三种捕收剂的捕收能力为:苄基肟酸>油酸>苯甲羟肟酸。因此,采用苄基肟酸作为锡石浮选捕收剂,此时获得的锡精矿指标:锡品位0.946%、锡回收率37.54%。

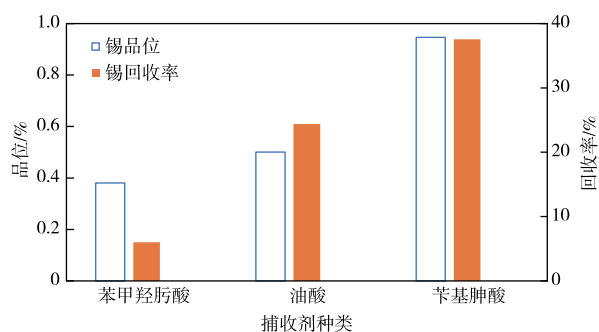


图8 捕收剂种类及用量试验结果

Fig. 8 Results of collector type and dosage tests

采用苄基肟酸作为捕收剂,固定其他试验条件同2.2.1,考察了苄基肟酸用量对锡石浮选指标的影响,试验结果见图9。由图9可知,当苄基肟酸用量小于1 100 g/t时,锡精矿中的锡品位和回收率均随着苄基肟酸用量的增加而增加,而当苄基肟酸用量继续增加时,锡精矿中锡回收率增加但品位开始下降,这可能与矿样粒度较细,捕收剂用量较大造成脉石夹带上浮导致的。

根据锡石浮选条件试验结果,最终确定浮锡试验的工艺条件为:主要抑制剂水玻璃用量800 g/t,辅助抑制剂氟硅酸钠600 g/t,捕收剂苄基肟酸1 100 g/t,起泡剂松醇油30 g/t,矿浆pH=6。

2.2.4 选择性絮凝剂种类及用量试验

选择性絮凝是将高分子絮凝剂加入到稳定分散

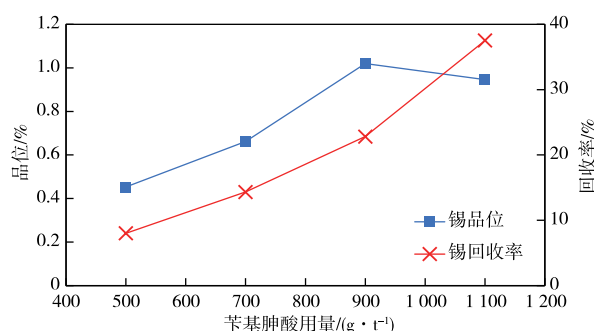


图9 苄基肟酸用量试验结果

Fig. 9 Results of benzyl arsine acid dosage tests

的矿浆中,选择性絮凝其中的某一矿物组分,从而实现与其他分散的矿物组分分离。絮凝剂通常用于细粒矿物分选,其作用机理是絮凝剂分子与目的矿粒相互碰撞,其中絮凝剂分子的疏水基团会吸附到矿粒表面上,其余亲水部分朝外伸向溶液中。同时,已吸附絮凝剂的矿粒与其他吸附或未吸附絮凝剂的矿粒进一步发生碰撞,并在矿粒表面的空位上发生“桥连”吸附,从而形成松散絮团,有利于与悬浮液中的其他非目的矿物分离,达到选择性絮凝微细粒级矿物的目的^[26]。

针对锡尾矿泥化严重、品位低的特点,在脱硫—浮锡工艺基础上,试验选择聚合氯化铝和聚丙烯酰胺作为絮凝剂,考察两种絮凝剂用量对锡尾矿回收效果的影响,旨在进一步提高锡精矿品位和回收率。

2.2.4.1 絮凝剂种类及用量试验

聚合氯化铝是一种应用广泛的无机高分子絮凝剂,能选择性作用于矿浆中的矿粒使其絮凝从而达到分选的目的。聚丙烯酰胺是一种不溶于大部分有机溶剂的水溶性高分子絮凝剂,具有良好的絮凝效果,同样能促进矿粒沉降,从而提高选矿分离效果。在最佳工艺条件基础上,锡粗选阶段添加絮凝剂,考察了絮凝剂聚合氯化铝、聚丙烯酰胺用量对锡石选别指标的影响,试验结果见图10、11。

由图10可知,随着聚合氯化铝用量增加,锡品位和锡回收率发生小幅波动,当聚合氯化铝用量为15 g/t时,锡选别指标最佳,锡精矿中锡品位、回收率分别为1.04%和46.25%。综合考虑,聚合氯化铝最佳用量为15 g/t。

由图11可知,随着聚丙烯酰胺用量增加,锡精矿中锡品位和回收率升高,当聚丙烯酰胺用量为25 g/t时,锡品位和锡回收率最佳,分别为0.793%、42.76%。综合考虑,选取聚丙烯酰胺的合适用量为25 g/t。

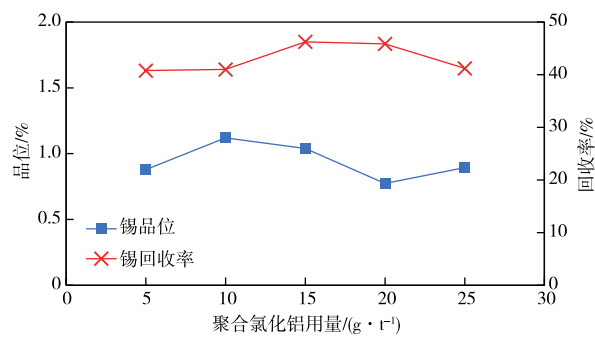


图 10 聚合氯化铝用量试验结果

Fig. 10 Results of polymeric aluminum chloride dosage tests

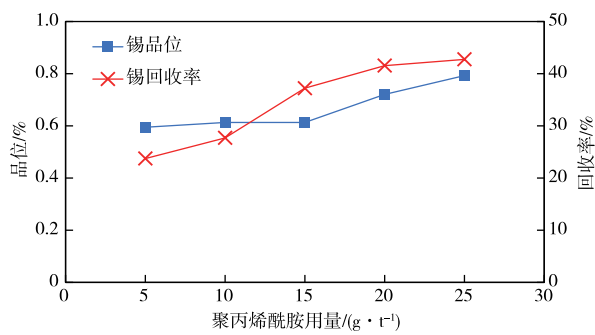


图 11 聚丙烯酰胺用量试验结果

Fig. 11 Results of polyacrylamide dosage tests

2.2.4.2 组合絮凝剂用量试验

根据聚丙烯酰胺和聚合氯化铝各自的优缺点,考虑将二者联合使用,考察组合絮凝剂对锡石的选别效果。在最佳工艺条件基础上,进行了二者的配比试验,试验结果见图 12。

由图 12(a)可知,当聚丙烯酰胺与聚合氯化铝的用量配比为 0 : 10 和 3 : 7 时,获得的锡品位、回收率均大于 0.90% 和 40%;随着组合药剂中聚丙烯酰胺的增加,锡石的捕收效果有所降低,这说明在组合絮凝剂中聚合氯化铝的絮凝效果要优于聚丙烯酰胺。此外,当总用量为 15 g/t 时,组合絮凝剂获得的最佳捕收效果与单一聚合氯化铝的最佳效果一致,锡品位和回收率分别为 1.04%、46.25%,但总体效果略差于单一聚合氯化铝;图 12(b)与图 11 对比,当

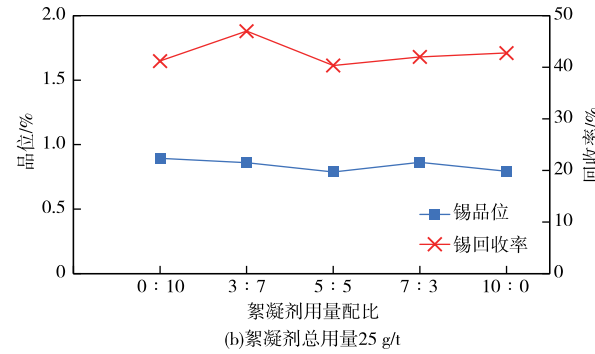
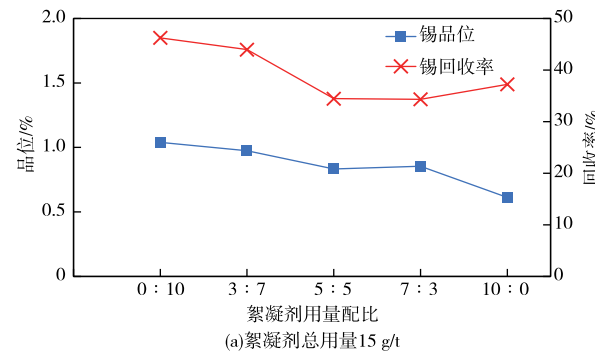


图 12 组合絮凝剂用量配比试验结果

Fig. 12 Results of combined flocculant dosage ratio tests

组合絮凝剂用量为 25 g/t,获得锡精矿中最佳指标锡品位和回收率分别为 0.86%、47.01%,而单一聚丙烯酰胺用量为 25 g/t 时获得的锡精矿锡品位和回收率分别为 0.793%、42.76%,效果不及组合絮凝剂。综合考虑药剂用量及选别指标,确定选取聚合氯化铝作为絮凝剂,合适用量为 15 g/t。

2.3 脱硫—浮锡全流程试验

2.3.1 脱硫—浮锡闭路试验

根据条件试验,确定最佳工艺参数为:矿浆 pH=6,硫酸铜用量 200 g/t、丁基黄药用量 100 g/t、水玻璃用量 800 g/t、氟硅酸钠用量 600 g/t、苄基胂酸用量 1 100 g/t,在最佳工艺参数基础上进行了脱硫—浮锡全流程闭路试验,试验流程见图 13,试验结果见表 3。由表 3 可知,脱硫—浮锡全流程闭路试验可以获得锡品位 2.95%、回收率为 55.81% 的锡精矿;硫精矿中硫品位为 5.86%、回收率为 48.73%,回收效果较好。

表 3 脱硫—浮锡闭路试验结果

Table 3 Results of desulfurization-tin flotation closed-circuit tests

产品名称	产率	品位		回收率	
		S	Sn	S	Sn
硫精矿	10.43	5.86	0.317	48.73	6.75
锡精矿	9.27	1.67	2.950	12.34	55.81
锡中矿	6.76	1.24	0.582	6.68	8.03
尾矿	73.54	0.55	0.196	32.25	29.41
锡尾矿	100.0	1.254	0.490	100.0	100.0

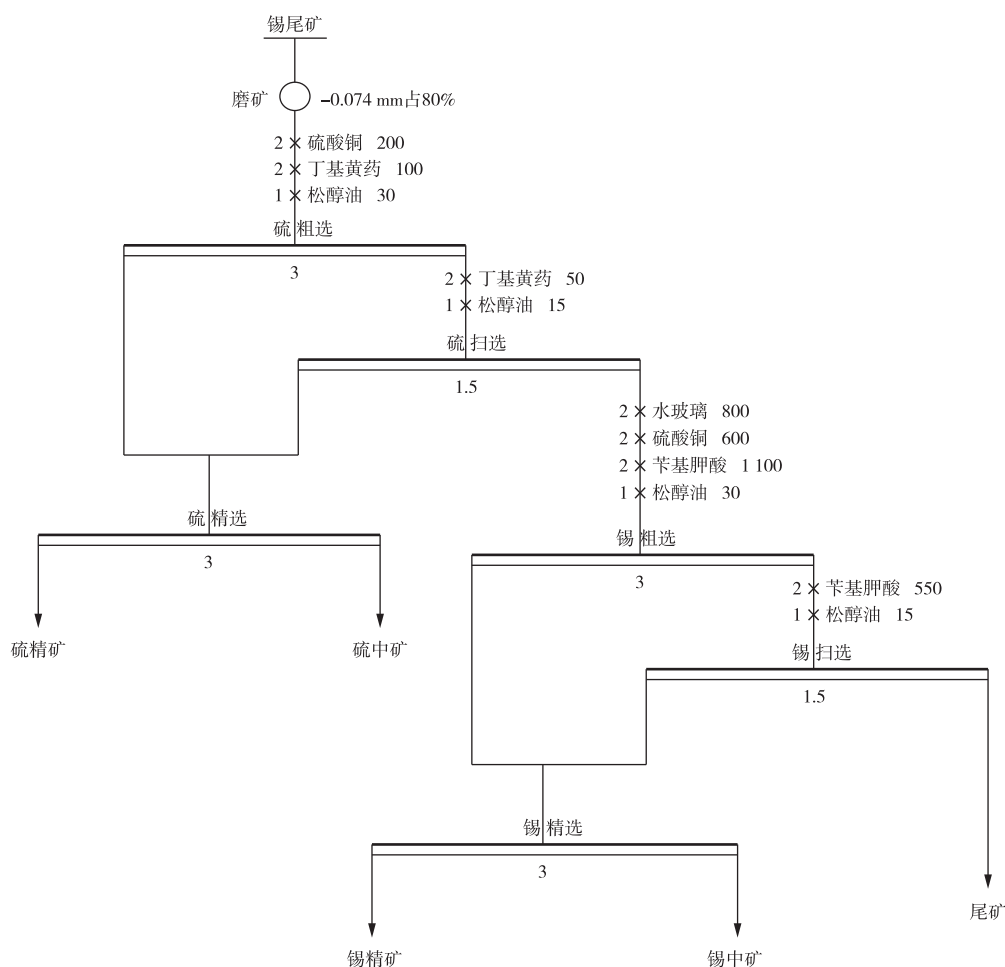


图 13 脱硫—浮锡闭路试验流程

Fig. 13 Flowsheet of desulfurization-tin flotation closed-circuit tests

2.3.2 脱硫—浮锡—选择性絮凝闭路试验

从絮凝剂试验结果发现,当单一聚合氯化铝用量为 15 g/t 时,锡石的选别效果最佳,锡品位和回收率分别为 1.04%、46.25%。因此,在 2.3.1 的试验基础上,在锡粗选作业添加 15 g/t 的聚合氯化铝作为絮凝剂进行全流程的闭路试验,试验结果见表 4。由表 4 可知,在脱硫—浮锡全流程试验的基础上,在锡粗选中加入絮凝剂聚合氯化铝,锡石选别指标更佳,锡精矿中锡品位和回收率分别为 3.05%、60.66%。结果表明,试验过程中添加絮凝剂,锡精矿锡品位和回收率均得到了一定幅度的提升。

表 4 脱硫—浮锡—选择性絮凝闭路试验结果

Table 4 Results of desulfurization-tin flotation-selective flocculation closed-circuit tests /%

产品名称	产率	Sn 品位	Sn 回收率
硫精矿	23.06	0.350	15.35
锡精矿	10.46	3.050	60.66
锡中矿	5.90	0.363	4.07
锡尾矿	60.58	0.173	19.92
锡尾矿	100.0	0.526	100.0

3 结论

1)广西某锡尾的细粒级含量较高,−0.074 mm 粒级含量为 79.71%。尾矿的主要有价元素是锡和硫,主要脉石矿物为硅酸盐类矿物。经 XRD 物相分析可知,锡尾矿中主要的脉石矿物为石英、黑云母、低钠长石和斜磷锰矿等,而含锡矿物主要为锡石。

2)脱硫、浮锡试验均采用一粗一扫一精的流程,锡尾矿全流程浮选最佳工艺条件为:硫酸铜用量 200 g/t、丁基黄药用量 100 g/t、硅酸钠用量 800 g/t、氟硅酸钠用量 600 g/t、苯基胍酸用量 1100 g/t,得到的锡精矿中锡品位和回收率分别为 2.95% 和 55.81%。

3)添加选择性絮凝剂可有效改善锡尾矿的浮选效果,采用 15 g/t 的选择性絮凝剂聚合氯化铝,脱硫—浮锡—选择性絮凝的浮选工艺流程下可获得锡品位为 3.05%、回收率为 60.66%的锡精矿。

参考文献

[1] 陈瑜. 都龙微细粒级锡石浮选试验研究[D]. 昆明:昆明

- 理工大学,2017.
- CHEN Yu. Experimental study on flotation of fine cassiterite in Dulong [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2017.
- [2] 邱丽娜,张旭,赵志强,等. 锡矿尾矿多金属联合分选综合利用试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2018(4):41-45.
- QIU Lina,ZHANG Xu,ZHAO Zhiqiang,et al. Study on comprehensive utilization of multi-metal from the tin mine tailings with a combined separation method[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(4):41-45.
- [3] 吕昊子,童雄,谢贤,等. 含硫低品位锡尾矿的综合利用[J]. 武汉工程大学学报,2015,37(5):11-17.
- LYU Haozi, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Comprehensive utilization of low grade sulfur-bearing tin-tailings [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2015,37(5):11-17.
- [4] 孙广周,王德英,曾茂青. 细粒嵌布难选锡尾矿二次资源综合回收利用[J]. 矿物学报,2011,31(增刊1):728-729.
- SUN Guangzhou, WANG Deying, ZENG Maoqing. Comprehensive recovery and utilization of secondary resources of fine grain tin tailings[J]. Acta Mineralogica Sinica,2011,31(S1):728-729.
- [5] 周德炎,韦丽广,黄闰芝. 某低品位微细泥锡石浮选新工艺研究[J]. 大众科技,2015,17(11):46-49.
- ZHOU Deyan, WEI Liguang, HUANG Runzhi. Study on new technology of a low grade fine mud flotation of cassiterite[J]. Popular Science & Technology, 2015, 17(11):46-49.
- [6] LAN Z Y, ZHOU Y C, TONG X. Recovery of fine cassiterite from tin tailings slime by froth flotation[J]. Advanced Materials Research,2013,634-638:3478-3483.
- [7] 王进明,余世磊,任明强,等. 重选-浮选工艺回收云南某硫化铅尾矿中的微细粒锡石[J]. 有色金属(选矿部分),2019(2):29-34.
- WANG Jinming, YU Shilei, REN Mingqiang, et al. Study on recovering fine cassiterite from a lead sulfide tailings in Yunnan with gravity-flotation process[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(2):29-34.
- [8] 聂庆民,李立园,艾光华. 从四川某锡尾矿中回收锡的试验研究[J]. 矿山机械,2015,43(11):108-113.
- NIE Qinming, LI Liyuan, AI Guanghua. Test study on tin recovery from a tin tailings in Sichuan[J]. Mining & Processing Equipment,2015,43(11):108-113.
- [9] 杨波,张良林,马娟,等. Knelson 离心选矿机回收锡尾矿中锡石的可行性分析[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2014,30(5):1-4.
- YANG Bo, ZHANG Genlin, MA Juan, et al. A preliminary discuss on the feasibility approach to the recovery of cassiterite from tailings using Knelson concentrator [J]. Journal of Kunming Metallurgy College,2014,30(5):1-4.
- [10] NIE Y M, DAI Q H, LU X L. Experimental research of low-grade tin-iron ore separation [J]. Advanced Materials Research,2013,641-642:377-380.
- [11] 尚衍波. 从玻利维亚某锡石尾矿中回收有价值元素的研究[J]. 现代矿业,2010,26(11):23-25,31.
- SHANG Yanbo. Research on valuable elements recovery from a cassiterite tailings of Boliviap [J]. Modern Mining,2010,26(11):23-25,31.
- [12] 胡创. 锡尾矿湿法富集实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
- HU Chuang. Study on wet concentration of tin tailings[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2011.
- [13] 董明传,黄闰芝,李泽茂. 某选矿厂尾矿中微细粒锡石的回收工艺[J]. 矿产综合利用,2015,36(4):70-72.
- DONG Mingchuan, HUANG Runzhi, LI Zemao. Recovery process for ultrafine cassiterite in the tailings of a concentrator [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2015,36(4):70-72.
- [14] CONFIANCE K C, JULES U, EDMOND R R D, et al. Evaluation of efficiency of using mechanized processing techniques to recover tin and tantalum in Gatsibo, Eastern province, Rwanda[J]. Minerals, 2022, 12(3):315-315.
- [15] YANG J Y, SONG B, WANG L J. Cassiterite recovery from tungsten residues through centrifugal gravity concentration [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019: 022133. DOI: 10.1088/1755-1315/300/2/022133.
- [16] 谢禹,叶国华,胡艺博,等. 锡尾矿的资源现状、特点与再选研究进展[J]. 矿冶,2020,29(2):91-97.
- XIE Yu, YE Guohua, HU Yibo, et al. Resources status, characteristics and reconcentration progress of tin tailings resources [J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(2):91-97.
- [17] 陈珺,吴杰,樊建林. 某含锡尾矿锡石浮选试验研究[J]. 矿冶,2022,31(1):36-40.
- CHEN Jun, WU Jie, YI Jianlin. Experimental study on flotation of cassiterite from a tin-bearing tailings [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1):36-40.
- [18] 龙海洋. 国外某含硫锡石细泥浮选试验研究[J]. 矿山机械,2016,44(12):63-66.
- LONG Haiyang. Test study on flotation of an overseas

- sulfide-bearing cassiterite slime [J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(12): 63-66.
- [19] LEISTNER T, EMBRECHTS M, LEISSNER T, et al. A study of the reprocessing of fine and ultrafine cassiterite from gravity tailing residues by using various flotation techniques [J]. Minerals Engineering, 2016, 96-97: 94-98.
- [20] 农升勤, 邓位鹏, 姚贵明, 等. 低品位细粒锡石浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014(3): 37-40.
- NONG Shengqin, DENG Weipeng, YAO Guiming, et al. Experimental study of a low grade fine-grained cassiterite flotation [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014(3): 37-40.
- [21] 邱廷省, 宋宜富, 赵冠飞, 等. 我国伴生硫铁矿浮选技术现状及进展[J]. 矿山机械, 2014, 42(11): 5-10.
- QIU Tingsheng, SONG Yifu, ZHAO Guanfei, et al. Current situation and progress on flotation technology of associated pyrite in China [J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(11): 5-10.
- [22] 吕晋芳, 童雄, 周永诚. 微细粒锡石浮选药剂研究概况[J]. 湿法冶金, 2010, 29(2): 71-74.
- LYU Jinfang, TONG Xiong, ZHOU Yongcheng. Research status on flotation reagents for fine cassiterite [J]. Hydrometallurgy of China, 2010, 29(2): 71-74.
- [23] WU X Q, ZHU Y G. Selective flotation of cassiterite with benzohydroxamic acid [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(14): 1410-1417.
- [24] 杨含蓄, 童雄, 谢贤, 等. 锡石浮选研究综述[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(6): 85-91.
- YANG Hanxu, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Research review of cassiterite flotation [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020, 11(6): 85-91.
- [25] 郑其方, 刘殿文, 李佳磊, 等. 锡石浮选捕收剂机理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 785-795.
- ZHENG Qifang, LIU Dianwen, LI Jialei, et al. A review on mechanism of flotation collector for cassiterite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(3): 785-795.
- [26] 胡法林, 曹沁波, 严文超. 锡石选矿工艺和药剂研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(3): 66-72.
- HU Falin, CAO Qinbo, YAN Wenchao. Research progress on beneficial technology and reagents of cassiterite [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(3): 66-72.
- [27] 邓春虎, 吕宏芝, 黄虎辉, 等. 云南某低品位硫化银铅锌矿选矿优化研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(2): 44-49.
- DENG Chunhu, LYU Hongzhi, HUANG Huhui, et al. Study on optimization of mineral processing index for a low grade complex silver-lead-zinc ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(2): 44-49.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 39 页)

- [15] 黄红军, 黄秋森. 采用球磨-低温热处理-浮选法回收废旧锂电池中电极材料的机理[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 878-886.
- HUANG Hongjun, HUANG Qiusen. Mechanism of recycling electrode materials spent lithium batteries by ball milling-low temperature heat treatment-flotation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 878-886.
- [16] ZHANG G W, HE Y Q, WANG H F, et al. Application of mechanical crushing combined with pyrolysis-enhanced flotation technology to recover graphite and LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1418-1427.
- [17] ZHANG G W, HE Y Q, YI F, et al. Pyrolysis-ultrasonic-assisted flotation technology for recovering graphite and LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(8): 10896-10904.
- [18] WANG D H, WEN H, CHEN H J, et al. Chemical evolution of LiCoO₂ and NaHSO₄ · H₂O mixtures with different mixing ratios during roasting process [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2016, 32(4): 674-677.
- [19] YU S, XIONG J, WU D, et al. Pyrolysis characteristics of cathode from spent lithium-ion batteries using advanced TG-FTIR-GC/MS analysis [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (32): 40205-40209.
- [20] WANG Y. Separating metal impurities from spent ternary Li-ion batteries materials based on the roasting characteristics [J]. Ionics, 2022, 28: 1833-1844.

(本文编辑 刘水红)