

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2021.05.012

云南某含锡多金属硫化矿选锡组合捕收剂试验研究

曹 阳^{1,2}, 童 雄^{1,2}, 谢 贤^{1,2*}, 宋 强^{1,2,3}, 吴雅菡^{1,2}, 程雅芝^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 云南缘矿科技开发有限公司, 昆明 650093)

摘 要:针对云南某含锡多金属硫化矿选厂锡石浮选捕收剂的成本高、溶解性差的技术难题进行了药剂优化的选矿试验研究。工艺矿物学表明给矿含 Sn 0.301%, 主要含锡矿物为锡石, 脉石以黑云母、绿泥石和透辉石为主, 且共生致密, 属于低品位、结晶小、高泥的难选锡矿。实验室选矿试验结果表明, 采用 YK-Sn 与 SN-705 的组合捕收剂, 浮选闭路试验最终获得的锡精矿品位为 4.137%, 回收率为 75.99%。该药方具有价格便宜、易溶解、利用率高优势, 且能避免药剂管道堵塞, 降低生产成本的同时还便于现场生产和工人操作, 对后续尾水回用及处理皆有益处。为锡石浮选提供了一种高效环保型捕收剂。

关键词: 锡石; 浮选; 组合捕收剂; YK-Sn; 药剂优化

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)05-0073-07

Experimental Study on the Combined Collector for Cassiterite Flotation from a Yunnan Tin-containing Polymetallic Sulfide Ore

CAO Yang^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}, XIE Xian^{1,2*}, SONG Qiang^{1,2,3}, WU Yahan^{1,2}, CHENG Yazhi^{1,2}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Yunnan Yuankuang Technology Development Co., Ltd., Kunming 650093, China)

Abstract: The beneficiation experiment of reagent optimization was carried out for the technical problems of high cost and poor solubility of the cassiterite flotation collector in a tin-containing polymetallic sulfide ore dressing plant in Yunnan. The mineralogy results showed that the feeding contained 0.301% Sn, the main tin-containing mineral was cassiterite, and the gangue was mainly biotite, chlorite, and diopside. Moreover, these minerals are symbiotic closely. The ore was a refractory tin ore with low grade, small crystals, and high mud. The laboratory beneficiation test results revealed that the grade and recovery rate of the final tin concentrate was 4.137% and 75.99% in the flotation closed circuit test with the combined collector of YK-Sn and SN-705. The agent has the advantages of low price, easy dissolution, high utilization rate, etc., and it can avoid the blockage of the reagent pipeline. Therefore, the combined collector can not only reduce production costs but also facilitate on-site production and worker operations. It is also beneficial to subsequent tail water reuse and treatment. This study provides an efficient and environmentally friendly collector for cassiterite flotation.

Key words: cassiterite; flotation; combined collector; YK-Sn; reagent optimization

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764024, 51764025); 云南省应用基础研究计划项目(2018FB086, 2019FA021)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51764024, 51764025); Applied Basic Research Project of Yunnan Province(2018FB086, 2019FA021)

作者简介: 曹 阳(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事矿物的浮选理论与工艺研究。

通信作者: 谢 贤(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿物加工资源综合利用高效回收研究。

引用格式: 曹 阳, 童 雄, 谢 贤, 等. 云南某含锡多金属硫化矿选锡组合捕收剂试验研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(5): 73-79.

CAO Yang, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Experimental Study on the Combined Collector for Cassiterite Flotation from a Yunnan Tin-containing Polymetallic Sulfide Ore[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 73-79.

锡是我国优势矿产资源,其资源储量、采—选—冶规模的全球占比均居世界第一,是具有国家掌控力和国际话语权的战略性矿产^[1-2]。我国产锡主要集中于云、桂、湘三省,锡精矿产量合计占到了全国总产量的 90%。由于锡具有延展性、导电性、可塑性和耐腐蚀性等众多优良的物理化学性质^[3-4],广泛应用于焊接、电镀、合金、和化学等领域,是气体传感器、催化化学、电化学检测重金属离子、原子能工业、电子工业以及航空航天等高精尖产业不可或缺的金属^[5-6]。随着社会的发展进步,对锡的需求量与日俱增,推动着锡矿资源的大力开采,导致易选锡资源逐年减少,贫、细、杂的问题日益突出,即锡入选品位低、锡矿物嵌布粒度细、伴生矿物组成及与锡石矿物共生关系复杂^[7-8]。传统的重选工艺与设备受矿物粒度影响严重,难以实现对 $-38\ \mu\text{m}$ 的锡矿进行高效回收^[9]。锡石是最主要的、具有经济价值的含锡矿物,因其性脆,在磨矿过程中易过粉碎^[10-11],且针对结晶小、共生致密的锡石资源又不得不进行细磨以求其单体解离^[12],所以单一重选已难以适用于这部分难处理锡矿产^[13-14]。

浮选是根据矿物表界面的物理化学性质差异进行矿物分离纯化的方法,也是解决难处理复杂矿产资源的最有效的方法^[15-16]。随着选择性捕收剂及调整剂的发展应用使复杂矿产中的锡石回收成为可能^[17]。锡石浮选的最初实验室资料发表于 1928 年,至今研究历程已近百年^[18]。锡石的浮选捕收剂由最早使用的脂肪酸类发展到肿酸类、膦酸类、磺酸类、羟肟酸类等^[19-20]。油酸是使用最早的锡石捕收剂,其捕收能力强,回收锡石效果较好,但选择性较差,导致矿物的富集比低^[21]。其后有对甲苯肿酸、混合甲苯肿酸、苄基肿酸等新型肿酸类捕收剂表现出更好的捕锡性能^[22],也是锡石的理想捕收剂,但因其毒性,加之对环保的重视,也不得不考虑研究更多的绿色高效替代药剂^[23-24]。近年锡石捕收剂研究多以苯乙烯膦酸、苯甲羟肟酸和水杨羟肟酸等膦酸类和羟肟酸类捕收剂较多^[25-27],因其低毒性和具

有较为均衡的捕锡药效广泛应用于工业使用。但随着锡资源的入选品位逐年降低,共伴生组分复杂情况格外突出,单一的药剂应用已很难满足矿山企业的生产需求,为了提高药剂对于锡石浮选的适应性、高效性和经济性,常采用复合药剂进行浮选使用,其应用前景更为广泛^[23]。

针对云南某含锡多金属硫化矿现场的锡石捕收剂药剂成本高且难溶解,容易发生药剂管道堵塞的现象,不利于现场生产和工人配制。基于对现场锡矿的工艺矿物学分析,提出了 YK-Sn 组合 SN-705 的复合捕收剂方案,试验获得了良好的锡石浮选指标,降低了药剂成本的同时,本药剂的溶解性也较好,具有利用率高、用量小的特点。经选场经济测算(按原矿处理量计算)每吨可降低药剂成本约 1.37 元,每年可节约锡石浮选捕收剂药剂成本约 250 余万元。该项研究为同类型的锡石浮选提供了新的药方和研究基础。

1 试验

1.1 矿样性质

试验矿样取自云南某含锡多金属硫化矿现场锡给矿前的旋流器脱水脱泥后的沉砂。该旋流器给矿为浮选除硫磁选脱铁后的尾矿。将试验矿样用搅拌机搅匀后取代表样进行烘干,干矿再混匀缩分用于工艺矿物学分析。矿样化学多元素分析结果见表 1,试样中主要有价元素为 Sn 0.301%,其它元素含量较低,不考虑综合回收。但结果中 Ca、Mg、Al 和 Si 的氧化物含量较高,表明矿样中脉石占比较高且组成复杂。Sn 物相分析结果(表 2)表明含锡矿物主要为锡石。试样的主要矿物组成及含量由表 3 可知,矿物的组成复杂,锡石品位较低,脉石多以硅酸盐、碳酸盐泥质脉石形式存在,易在锡石浮选过程中干扰锡石的可浮性。试样中主要矿物嵌布关系如图 1 所示,锡石结晶小,与黑云母、绿泥石、透辉石和石英等脉石矿物致密共生,包裹结构明显。可以得出该锡矿属于低品位、结晶小、泥质脉石含量高的难选锡矿。

表 1 矿样多组分分析结果

Table 1 Multi-element analysis results of raw ore samples

Components	Sn	Cu	Zn	TFe	S
Content	0.301	0.01	0.03	8.96	0.31
Components	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	As
Content	14.74	12.13	9.64	37.49	0.25

表 2 矿样中 Sn 物相分析

Table 2 Phase analysis of Sn in raw ore samples

/%

Sn phase	Cassiterite	Acid soluble tin	Total
Content	0.295	0.007	0.301
Distribution	97.67	2.33	100.0

表 3 主要的矿物组成及含量

Table 3 Mineral composition and content of raw ore samples

/%

Mineral species	Content	Mineral species	Content
Cassiterite	0.374	Diopside	18.15
Biotite	15.51	Chlorite	16.11
Quartz	10.37	Calcite	9.79
Epidote	5.94	Garnet	9.48
Feldspar	4.73	Dolomite	4.21
Montmorillonite	2.45	Others *	2.89

Note: * Including magnetite,pyrrhotite,talc,fluorspar,tremolite,and tourmaline et al.

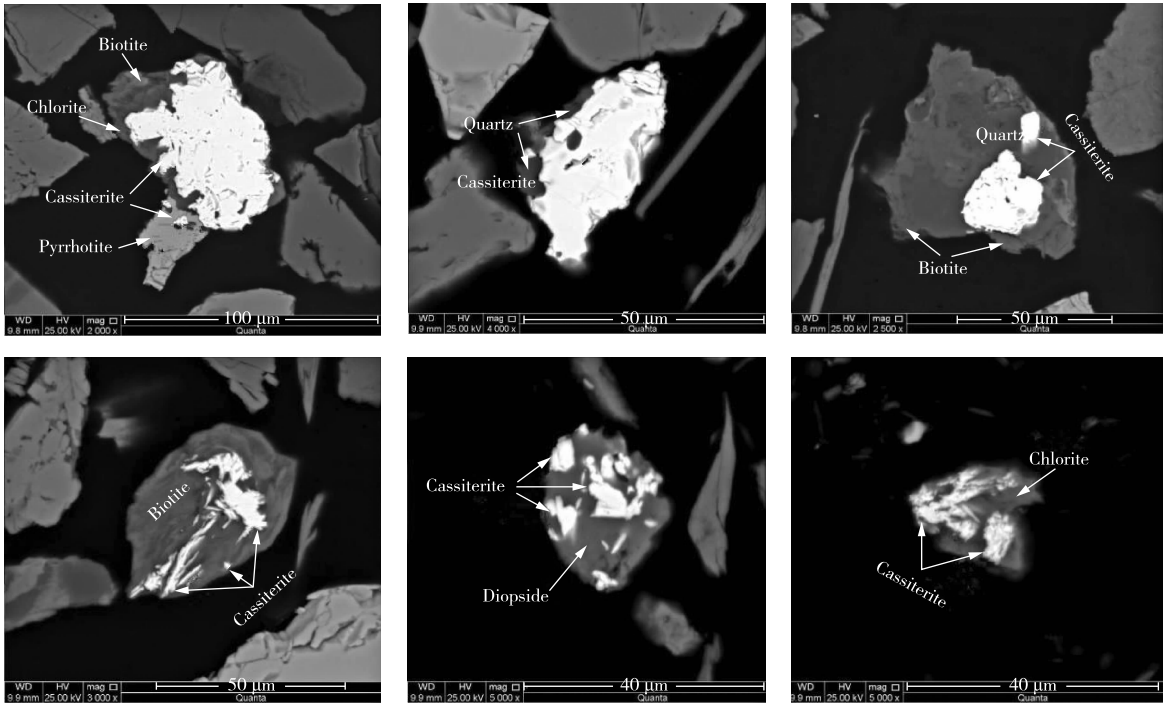


图 1 矿样中锡石的典型嵌布特征

Fig. 1 Typical dissemination characteristics of cassiterite in raw ore samples

1.2 研究方法

根据化学多组分分析可以确定试样主要回收含锡矿物,物相分析结果表明锡石为主要回收对象,由试样组分构成和嵌布关系结果可知,回收锡石难度较大,应选择适合的调整剂,最重要的是确定捕收能力与选择性均衡的捕收剂。因此,根据前期探索试验结果,确定锡石浮选粗选流程如图 2 所示。因在现场的基础上进行药剂试验,磨矿细度和浮选浓度均以现场数据为指导,而药剂优化试验则直接开展药剂用量的条件试验,分别研究了调整剂碳酸钠的用量试验、捕收剂 YK-Sn 组合 SN-705 的用量试验、

辅助捕收剂 P86 的用量试验和闭路试验。

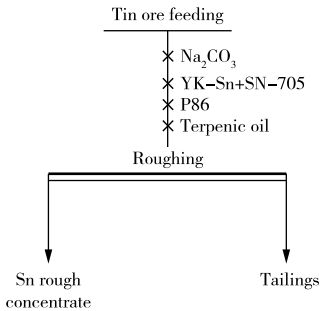


图 2 锡粗选试验流程图

Fig. 2 Experimental flowsheet of tin roughing

浮选试验研究方法是将现场取的锡石浮选给矿矿浆用搅拌器搅匀后测试矿浆浓度,根据浓度计算称量的矿浆质量,采用 1.5 L 的 XFG 型挂槽浮选机(吉林探矿机械厂)控制浮选矿浆浓度为 40%,按一定的加药顺序和时间间隔进行调浆,最后机刮浮选泡沫 4 min,刮板速度为 15 板/min。浮选后所得产品经过滤、烘干、称重、制样和化验,计算各产品的产率和回收率。

试验过程所用药剂有碳酸钠(分析纯,具有调节 pH、抑制脉石、分散矿浆等作用)、YK-Sn 和 SN-705(工业级,主要成分为羟肟酸,锡石捕收剂)、P86(工业级,磷酸三丁酯,具有一定的捕收能力,主要起消泡作用)、2[#]油(工业级,起泡剂)。

2 结果与讨论

2.1 碳酸钠用量试验

碳酸钠调整剂具有弱碱性,可改变矿浆 pH,且具有分散矿泥、抑制脉石等作用。在不同的捕收剂体系下锡石浮选受 pH 影响显著,而羟肟酸类捕收剂一般在弱酸至弱碱条件下具有较好的捕收性能。碳酸钠对锡石抑制作用较弱,其在矿浆中电离和水解可得到 Na^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{2-} 、 OH^- 等离子,因此具有一定的缓冲作用,保持矿浆 pH 在 8~10 的相对稳定(图 3)。碳酸钠可调控不同矿物表面双电层的组成和结构,进而影响矿石表界面性质及水化作用,增加矿粒间相互斥力与亲水性,促进矿粒在矿浆中的分散。 CO_3^{2-} 还可缓解 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子对锡石浮选的影响,优化锡石浮选矿浆环境。现场矿浆浮选浓度控制为 40%,YK-Sn 组合 SN-705 用量为 1 000 g/t,P86 用量为 30 g/t,2[#]油用量为 20 g/t,考察了 Na_2CO_3 用量对锡石浮选的影响试验研究,结果如图 3 所示。随着碳酸钠用量的增加,粗选锡石精矿品位随之增加,且锡的回收率也在增加,当碳酸钠用量高于 600 g/t 后,锡的回收率有下降趋势。试验现象也说明碳酸钠有抑制脉石作用,随着碳酸钠用量的增加锡粗精矿产率在减少,但过高的碳酸钠用量会影响过滤速度。综合锡的品位及回收率,最后确定碳酸钠用量为 900 g/t。

2.2 捕收剂用量试验

锡石浮选捕收剂最为关键,因为锡石天然可浮性较差,且共生矿物组分复杂,可浮性相近的脉石众多,甚至不如一些易泥化的硅酸盐和碳酸盐脉石。所以不仅要选择适合的抑制剂,还要筛选捕收能力强还兼具好的选择性的捕收剂。目前,羟肟酸是浮

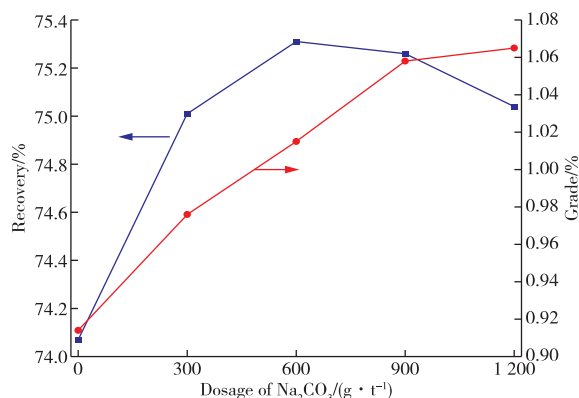


图 3 碳酸钠用量对锡石浮选的影响

Fig. 3 Effects of dosage of Na_2CO_3 on the cassiterite flotation

选锡石最常用的捕收剂,具有较好的选择性和捕收能力,但其生产成本较高,且单一捕收剂性能有局限,常考虑组合药剂来均衡药剂的捕收性能,降低选矿成本。YK-Sn 和 SN-705 的主要成分均为羟肟酸类的复合药剂,浮选锡石性能优良。本研究经大量前期探索发现,YK-Sn 组合 SN-705 以 4:1 的比例进行配制浮选,该选厂的锡石获得理想的选矿指标,且对比现场使用的锡石捕收剂具有经济成本低、溶解度高、选锡指标相当的优点。在 Na_2CO_3 用量为 900 g/t,P86 用量为 30 g/t,2[#]油用量为 20 g/t 的条件下,考察了组合捕收剂用量对锡石浮选的影响,由图 4 结果可知,锡石的回收率随着组合捕收剂用量增加而增加,在用量到 800 g/t 后增长率变小,但锡石的品位一直在降低。现场锡石浮选精矿还要保障后续锡石重选的给矿品位,故综合考虑 YK-Sn 组合 SN-705 捕收剂用量为 800 g/t。

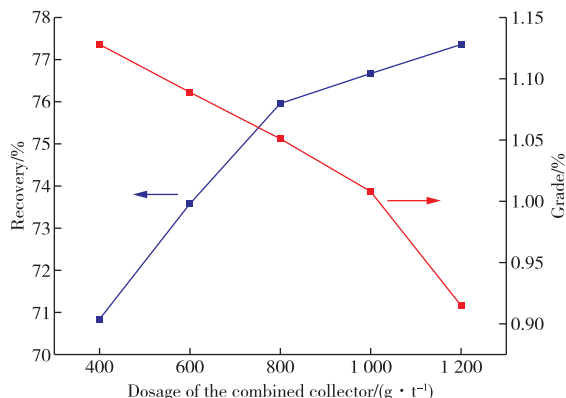


图 4 组合捕收剂用量对锡石浮选的影响

Fig. 4 Effects of dosage of the combined collector on the cassiterite flotation

2.3 P86 用量试验

P86 是锡石浮选常用的辅助捕收剂。因为氧化

矿物天然可浮性差,通常浮选氧化矿的捕收剂都具有强捕收能力,会造成浮选泡沫黏稠、流动性差,引起对脉石的夹带情况严重,干扰对目的矿物的富集比。P86在锡石浮选过程中主要起消泡作用,使泡沫流动性及兼并性更好,增加浮选泡沫的二次富集作用。但其本身具有一定的捕收能力,其用量会影响锡石浮选指标。在 Na_2CO_3 用量为900 g/t, YK-Sn组合 SN-705 捕收剂用量为800 g/t, 2[#]油用量为20 g/t的条件下,考察了P86用量对锡石浮选的影响,试验结果见图5可知,锡的回收率随P86用量的增加而增加,但锡的品位却下降趋势显著,表明锡石粗选精矿浮起了大量的脉石,证明P86对锡石具有一定的捕收能力但选择性较差。考虑保证锡石

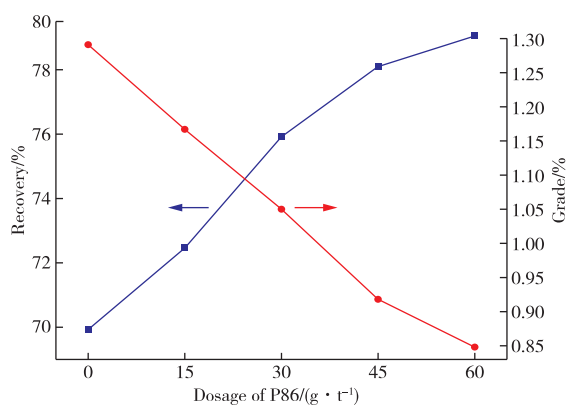


图5 P86用量对锡石浮选的影响

Fig. 5 Effects of dosage of P86 on the cassiterite flotation

的品位同时最大程度的追求回收率,最后确定P86用量为30 g/t。

2.4 闭路试验

在条件试验的结果上确定锡石浮选的药剂制度,根据选厂的流程进行了闭路试验,流程如图6所示,闭路试验所得结果见表4。锡石给矿经一粗两精两扫,在产品质量和金属量均达到平衡时,获得锡品位4.137%,回收率75.99%的锡石浮选精矿,达到后续重选给矿要求。并相对现场使用的锡石捕收剂实验室指标,保证品位的同时提高了锡石浮选作业回收率近3个百分点,实现了对锡石回收提效降本、利于生产的药剂优化试验研究目的。

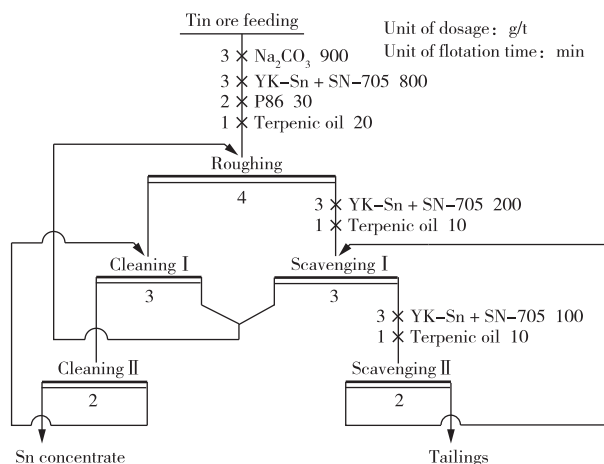


图6 闭路试验流程图

Fig. 6 Flow chart of the closed-circuit test

表4 闭路试验结果

Table 4 Results of the closed-circuit test

/%

Product	Yield	Sn grade	Sn recovery
Concentrate	5.56	4.137	75.99
Tailings	94.44	0.077	24.01
Feeding	100.0	0.303	100.0

3 结论

云南某含锡多金属硫化矿锡石原矿品位0.301%,矿石组成复杂、锡石结晶细、泥质脉石含量高,为难选锡矿石。为解决现场药剂成本高、难溶解、不方便工人操作、易堵塞药剂管道等技术问题,在实验室开展了对矿石的工艺矿物学及药剂优化试验研究,主要结论如下:

1)矿石中有价元素为Sn,主要以锡石的形式存在。该锡矿的组成复杂,锡石结晶小、品位低,与黑云母、绿泥石、透辉石和石英等硅酸盐泥质脉石致密共生,包裹结构明显。试样为品位低、结晶小、泥质脉石含量高、矿物间致密共生的难选锡矿。

2)探索试验结果表明:在浮选矿浆浓度为40%、 Na_2CO_3 用量为900 g/t、YK-Sn组合 SN-705 捕收剂用量为800 g/t、P86用量为30 g/t、2[#]油用量为20 g/t的条件下,最终获得锡石浮选精矿含锡品位4.137%,锡回收率75.99%,实现了对锡石回收提效降本、利于生产的药剂优化试验研究目的。

3)碳酸钠是锡石浮选优良的pH调整剂、抑制剂、分散剂,对锡石浮游影响较小。YK-Sn与SN-705组合捕收剂的捕收性能均衡,平衡了捕收能力和选择性,是锡石浮选的理想药方,且该药方具有价格便宜、易溶解、利用率高等优势,可降低生产成本,避免药剂管道堵塞,对后续尾水回用及处理皆有益处,利于现场生产和工人操作,是一种锡石浮选高

效环保型捕收剂。P86 主要是调整泡沫的作用,但不能忽视它的捕收能力。

参考文献:

- [1] 陈禹蒙. 锡石与方解石、斜绿泥石的浮选分离基础研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019:1-19.
CHEN Yumeng. Basic research on flotation separation of cassiterite, calcite and clinocllore [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019: 1-19.
- [2] 张周位. 锡石浮选体系中金属离子作用机理及其应用[D]. 长沙:中南大学,2013:1-9.
ZHANG Zhouwei. Study on the mechanism and application of metal ions in cassiterite flotation system[D]. Changsha: Central South University, 2013: 1-9.
- [3] 卢致明, 韩彬. 微细粒锡石选别的研究进展及思考建议[J]. 世界有色金属, 2019(7): 180-182.
LU Zhiming, HAN Bin. Research progress and thinking suggestions for the selection of fine-grained cassiterite[J]. World Nonferrous Metals, 2019 (7): 180-182.
- [4] TIAN Mengjie, LIU Runqing, GAO Zhiyong, et al. Activation mechanism of Fe (III) ions in cassiterite flotation with benzohydroxamic acid collector [J]. Minerals Engineering, 2018, 119: 31-37.
- [5] 韩广, 丰奇成, 文书明, 等. 锡石浮选工艺和药剂研究现状[J]. 矿冶, 2019, 28(2): 17-22.
HAN Guang, FENG Qicheng, WEN Shuming, et al. Development and prospects of cassiterite flotation technology and reagent [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(2): 17-22.
- [6] 杨金林, 周文涛, 蒋林伶, 等. 锡石选矿研究概述[J]. 现代矿业, 2016, 32(5): 83-85.
YANG Jinlin, ZHOU Wentao, JIANG Linling, et al. An overview of cassiterite beneficiation research [J]. Modern Mining, 2016, 32(5): 83-85.
- [7] FENG Qicheng, ZHAO Wenjuan, WEN Shuming, et al. Activation mechanism of lead ions in cassiterite flotation with salicylhydroxamic acid as collector [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 178: 193-199.
- [8] CAO Yang, XIE Xian, TONG Xiong, et al. The activation mechanism of Fe(II) ion-modified cassiterite surface to promote salicylhydroxamic acid adsorption[J]. Minerals Engineering, 2021, 160: 106707.
- [9] 韩俊伟, 肖骏, 覃文庆, 等. 云南某锡铜锌多金属矿锡石重选回收工艺研究[J]. 有色金属工程, 2016, 6(6): 67-72.
HAN Junwei, XIAO Jun, QIN Wenqing, et al. Process research on the recovery of tin from a Sn-Zn-Cu polymetallic ore of Yunnan by using gravity separation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(6): 67-72.
- [10] CHEN Yumeng, LI Hua, FENG Dongxia, et al. A recipe of surfactant for the flotation of fine cassiterite particles[J]. Minerals Engineering, 2021, 160: 106658.
- [11] 冉金城, 刘全军, 张治国, 等. 塔吉克氧化铜锡矿的选矿实验[J]. 过程工程学报, 2014, 14(6): 923-929.
RAN Jincheng, LIU Quanjun, ZHANG Zhiguo, et al. Research on concentration of Tajik copper-tin oxide ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(6): 923-929.
- [12] TIAN Mengjie, KHOSO Sultan Ahmed, WANG Li, et al. Selective separation behavior and its molecular mechanism of cassiterite from quartz using cupferron as a novel flotation collector with a lower dosage of Pb^{2+} ions [J]. Applied Surface Science, 2019, 486: 228-238.
- [13] 张晋禄, 戈保梁, 王显强, 等. 云南某含锡多金属硫化矿选矿实验研究[J]. 过程工程学报, 2015, 15(6): 945-953.
ZHANG Jinlu, GE Baoliang, WANG Xianqiang, et al. Study on beneficiation of a stanniferous multi-metallic sulphide ore in Yunnan [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(6): 945-953.
- [14] 孙爱辉, 彭志兵. 某含锡多金属硫化矿选矿工艺技术改造[J]. 有色金属工程, 2013, 3(6): 59-62.
SUN Aihui, PENG Zhibing. Technical transformation of beneficiation process for a tin-containing polymetallic sulfide ore [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2013, 3(6): 59-62.
- [15] TIAN Mengjie, HU Yuehua, SUN Wei, et al. Study on the mechanism and application of a novel collector-complexes in cassiterite flotation [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 522: 635-641.
- [16] 高跃升, 高志勇, 孙伟. 金属离子对矿物浮选行为的影响及机理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(4): 859-868.
GAO Yuesheng, GAO Zhiyong, SUN Wei. Research progress of influence of metal ions on mineral flotation behavior and underlying mechanism [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 859-868.
- [17] 刘杰, 宫贵臣, 韩跃新. 有机抑制剂对微细粒锡石可浮

- 性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 610-614.
- LIU Jie, GONG Guichen, HAN Yuexin. Influences of organic depressants on the floatability of fine cassiterite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 610-614.
- [18] 《锡的选矿》编写组. 锡的选矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 1978:109-162.
- “Tin Beneficiation” Writing Team. Tin beneficiation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1978:109-162.
- [19] GONG Guichen, WANG Pan, LIU Jie, et al. Effect and mechanism of Cu (II) on flotation separation of cassiterite from fluorite[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 238:116401.
- [20] 田忠诚. 锡石浮选[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990: 17-135.
- TIAN Zhongcheng. Cassiterite flotation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990:17-135.
- [21] 许道刚, 张雪峰, 陈伟丽, 等. 我国锡石选矿研究现状与发展趋势[J]. 矿山机械, 2015, 43(6): 8-12.
- XU Daogang, ZHANG Xuefeng, CHEN Weili, et al. Research status and development tendency of cassiterite beneficiation in China [J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(6): 8-12.
- [22] 蔺慧杰, 蓝卓越, 童雄, 等. 羟肟酸类捕收剂浮选锡石研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 174-178.
- LIN Huijie, LAN Zhuoyue, TONG Xiong, et al. The research progress of cassiterite flotation with hydroxamic acid collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 174-178.
- [23] 罗红莹, 张英, 陈荣, 等. 细粒锡石浮选组合药剂研究与应用进展[J]. 金属矿山, 2019, 48(3): 30-34.
- LUO Hongying, ZHANG Ying, CHEN Rong, et al. Review on research and application of fine cassiterite flotation with combined reagents [J]. Metal Mine, 2019, 48(3): 30-34.
- [24] 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.
- [25] 宫贵臣, 刘杰, 韩跃新, 等. 苯乙烯膦酸在锡石(100)表面吸附的密度泛函理论研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 2901-2907.
- GONG Guichen, LIU Jie, HAN Yuexin, et al. Density functional theory calculations of adsorption of SPA on cassiterite(100) surface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 2901-2907.
- [26] 任润祯, 邱航, 覃文庆, 等. 辛基羟肟酸浮选锡石的机理[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1364-1371.
- REN Liuyi, QIU Hang, QIN Wenqing, et al. Flotation mechanism of cassiterite with octanohydroxamic acid[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(6): 1364-1371.
- [27] 孙伟, 柯丽芳, 孙磊. 苯甲羟肟酸在锡石浮选中的应用及作用机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 62-68.
- SUN Wei, KE Lifang, SUN Lei. Study of the application and mechanism of benzohydroxamic acid in the flotation of cassiterite [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 62-68.