

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2025.03.006

引用格式: 陈杰江, 谢贤, 王翔, 童雄, 吕晋芳. 离心重选—浮选联合工艺回收细粒锡尾矿中的锡[J]. 矿冶, 2025, 34(3): 400-404.

CHEN Jiejiang, XIE Xian, WANG Xiang, TONG Xiong, LYU Jinfang. Recovery of tin from fine-grained tin tailings using combined centrifugal gravity-flotation process[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(3): 400-404.

离心重选—浮选联合工艺回收细粒锡尾矿中的锡

陈杰江^{1,2,3} 谢贤^{1,2,3} 王翔^{1,2,3} 童雄^{1,2,3} 吕晋芳^{1,2,3}

(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. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093)

摘 要: 针对云南某锡尾矿中锡石嵌布粒度细、矿泥含量高、直接浮选效果差的问题, 开展了离心重选—浮选联合工艺回收锡的试验研究。结果表明, 采用离心重选可有效脱除 53.98% 的矿泥 (Sn 品位 0.065%), 显著改善了后续浮选效果。经浮选可获得品位 3.121%、回收率 42.85% 的锡精矿, 富集比高达 20.31。相较于直接浮选和摇床重选—浮选工艺, 离心重选—浮选联合工艺在脱泥效率、锡回收率和富集比等方面均表现出明显优势, 为该类难选锡尾矿的高效回收提供了可行的技术方案。

关键词: 锡尾矿; 离心重选; 浮选; 矿泥脱除; 富集比

中图分类号: TD95; TD98

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2025)03-0400-05

Recovery of tin from fine-grained tin tailings using combined centrifugal gravity-flotation process

CHEN Jiejiang^{1,2,3} XIE Xian^{1,2,3} WANG Xiang^{1,2,3} TONG Xiong^{1,2,3} LYU Jinfang^{1,2,3}

(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 650093, China;

3. National and Regional Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Tailings Resources from Metal Minerals, Kunming 650093, China)

Abstract: To address the challenges of fine cassiterite dissemination, high slime content, and poor direct flotation performance in Yunnan tin tailings, experimental studies were conducted using a combined centrifugal gravity-flotation process for tin recovery. The results demonstrate that centrifugal gravity separation effectively removed 53.98% of slime (with Sn grade of 0.065%), significantly improving subsequent flotation performance. Through flotation, a tin concentrate with grade of 3.121% and recovery rate of 42.85% was obtained, achieving a high enrichment ratio of 20.31. Compared with direct flotation and shaking table-flotation processes, the combined centrifugal gravity-flotation process shows distinct advantages in slime removal efficiency, tin recovery rate, and enrichment ratio, providing a viable technical solution for efficient recovery of such refractory tin tailings.

Key words: tin tailings; centrifugal gravity separation; flotation; slime removal; enrichment ratio

锡作为一种重要的战略金属, 因其化学性质稳定、延展性好、熔点低、耐腐蚀且毒性低等特性, 已在

冶金、机械制造、航空航天等领域得到广泛应用^[1]。我国是全球锡资源储量最丰富的国家之一, 约占世界总储量的三分之一, 同时也是全球最大的锡生产国和消费国^[2]。随着国民经济持续发展和工业化进程加速推进, 锡资源的需求量与开采量逐年攀升, 导致优质锡矿资源日趋枯竭, 现有可利用资源普遍呈现贫、

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 云南省重大科技项目 (202202AG050010)

第一作者: 陈杰江, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与工艺。E-mail: 1229281773@qq.com

通信作者: 谢贤, 博士, 教授; E-mail: kgxianxie@126.com

细、杂等特征，极大增加了锡资源开发利用的技术难度^[3-5]。自然界中锡主要以二氧化锡(锡石)和各类硫化物形式存在，其中锡石是最主要的工业矿物，占全球锡储量的75%以上^[6]。当前锡石选矿过程中产生大量尾矿的品位偏高，不仅造成锡资源的严重浪费，其长期堆存还占用大量土地资源，并对生态环境构成潜在威胁^[7,8]。因此，实现锡尾矿的资源化利用具有重要的战略意义和环保价值。

云南某锡尾矿锡品位较高、锡石嵌布粒度细，伴生大量方解石和白云石等轻质矿泥，采用单一浮选工艺回收效果不佳^[9-11]，为充分高效回收该尾矿资源，本文系统开展了直接浮选、脱泥预处理—浮选联合工艺的可选性试验，成功优化了选矿工艺流程，显著提高了锡的回收指标，可为该类复杂锡尾矿资源的高效回收利用提供可靠的技术参考。

1 尾矿性质

试验矿样取自云南某锡选矿厂的重选尾矿，主要有价元素为Sn(0.16%)、Fe(9.28%)和Cu(0.114%)，其中Sn品位达到工业回收标准；Ca、Si和Al含量较

高，S含量较低(0.10%)，均无回收价值。矿样中金属矿物主要为赤铁矿和针铁矿，脉石矿物以方解石、白云石、绿泥石、石英、白云母和滑石为主。矿样整体粒度较细，锡石主要赋存于-0.038 mm细粒级。矿样化学组成见表1，矿物组成见表2，粒度分布(淘析沉降—筛分联合分析法)见表3。

表1 矿样的化学组成

Table 1 Chemical compositions of tailings							/%
成分	Sn	S	CaO	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cu
含量	0.161	0.10	37.01	9.28	2.86	2.18	0.114

表2 矿样的矿物组成

Table 2 Mineral composition of tailings	
矿物名称	占比/%
方解石	52.17
白云石	26.91
赤铁矿	6.38
针铁矿	2.19
石英	1.68
白云母	2.05
绿泥石	1.98
滑石	0.93
其它	5.70
合计	100.0

表3 矿样的粒度分布

Table 3 Particle size distribution of tailings									
粒级/mm	产率/%			Sn品位/%			Sn分布率/%		
	个别	正累计	负累计	个别	正累计	负累计	个别	正累计	负累计
0.15	1.03	1.03	100.0	0.060	0.060	0.163	0.38	0.38	100.0
-0.150+0.074	7.24	8.27	98.97	0.073	0.071	0.164	3.24	3.62	99.62
-0.074+0.045	10.09	18.36	91.73	0.061	0.066	0.171	3.77	7.39	96.38
-0.045+0.038	16.18	34.54	81.64	0.148	0.104	0.185	14.67	22.06	92.61
-0.038+0.023	16.68	51.22	65.46	0.156	0.121	0.194	15.95	38.01	77.94
-0.023+0.019	14.73	65.95	48.78	0.206	0.140	0.207	18.59	56.60	61.99
-0.019	34.05	100.0	34.05	0.208	0.163	0.208	43.40	100.0	43.40
合计	100.0	/	/	0.163	/	/	100.0	/	/

2 试验方案比较与工艺优化

为简化工艺流程并降低投资成本，同时考虑矿样整体粒度较细、锡石主要赋存于细粒级导致直接浮选难度较大，以及虽然锡石与脉石密度差异显著(具备重选预富集条件)但方解石、白云石等轻质脉石易产生矿泥干扰等因素，本研究分别开展了直接浮选和预脱泥—浮选联合工艺处理该细粒锡尾矿的试验研究。

2.1 直接浮选工艺

采用六偏磷酸钠作为矿泥抑制剂、碳酸钠为调整剂、硝酸铅作活化剂、YK-Zn为锡石捕收剂、松醇油作起泡剂，通过一粗一精一扫的浮选流程开展锡

石直接浮选试验^[12-15]。试验流程见图1，经过浮选，锡富集比达6.16，其他指标见表4。

由表4可知，未经预处理的矿样直接浮选可获得品位0.966%、回收率36.17%的锡精矿，锡富集比6.16。该方案虽获得了较好的富集效果，但回收率偏低。结合矿石特性及浮选现象分析，认为矿样中大量矿泥导致药剂消耗增加、分选体系选择性降低，从而影响了最终浮选指标。

2.2 预脱泥—浮选联合工艺

2.2.1 浮选法预脱泥—浮选

浮选法预脱泥—浮选试验流程图见图2，试验结果见表5。

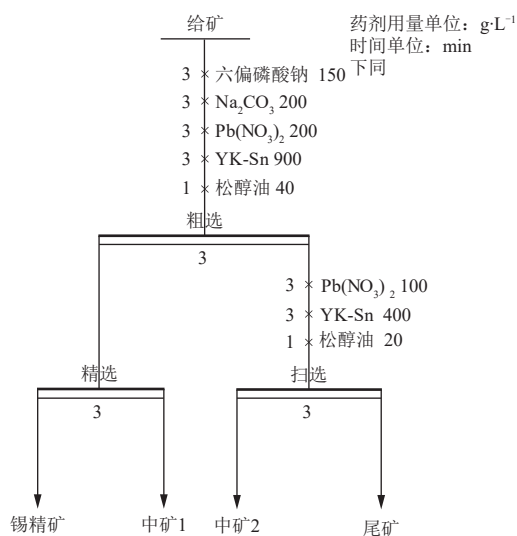


图1 直接锡石浮选试验流程图

Fig. 1 Flowsheet of direct cassiterite flotation test

表4 直接锡石浮选试验结果

Table 4 Results of direct cassiterite flotation test

项目	产率/%	Sn品位/%	Sn回收率/%	锡富集比
锡精矿	5.87	0.966	36.17	6.16
中矿1	5.13	0.426	13.94	
中矿2	6.78	0.256	11.07	
尾矿	82.22	0.074	38.81	
合计	100.0	0.157	100.0	

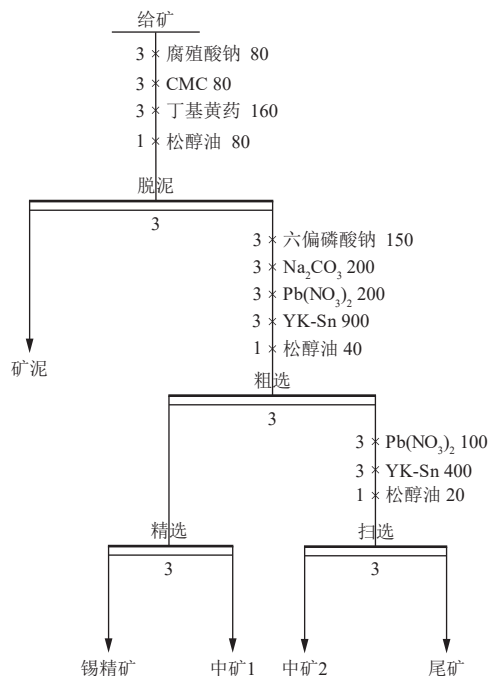


图2 浮选脱泥选锡试验流程图

Fig. 2 Flowsheet of flotation desliming and tin separation test

表5 浮选脱泥选锡试验结果

Table 5 Results of flotation desliming and tin separation test

产品	产率/%	Sn品位/%	Sn回收率/%	锡富集比
矿泥	11.12	0.124	8.72	6.46
锡精矿	6.31	1.021	40.76	
中矿1	6.99	0.301	13.32	
中矿2	10.57	0.304	20.33	
尾矿	65.01	0.041	16.87	
合计	100.0	0.158	100.0	

由表5可知,预先脱泥作业可脱除产率11.12%的矿泥,其中Sn品位0.124%,Sn损失率8.72%;脱泥后锡浮选指标显著改善,在相同药剂制度下可获得品位1.021%、回收率40.76%的锡精矿,富集比由未脱泥时的6.16提升至6.46,说明预先脱泥工艺可有效提高锡石浮选指标。

2.2.2 重选法预脱泥—浮选

2.2.2.1 预脱泥工艺比较

由于锡石密度显著高于方解石、白云石等脉石矿物,具备重选脱泥条件。本研究分别采用摇床重选和离心重选进行脱泥试验。其中,摇床重选试验设备采用武汉探矿机械厂LYN(S)—1 100×500型摇床(刻槽床条),给矿浓度20%,冲程10 mm,冲次340次·min⁻¹。离心重选试验设备用赣州金环磁选LS—400手动离心选矿机,给矿浓度20%,转鼓转速800 r·min⁻¹。试验流程见图3,结果见表6(含浮选脱泥数据对比)。

由表6可知,摇床重选脱泥产率较高(77.92%),但矿泥中Sn品位(0.158%)和损失率(78.41%)均偏高,不符合脱泥的初衷;离心重选脱泥产率54.36%,矿泥Sn品位仅0.066%,显著低于摇床重选(0.158%)和浮选脱泥(0.124%)。

比较表6数据,离心重选在脱泥量、Sn品位和回收率等指标上均优于其他两种方法。因此,确定采用离心重选作为最佳脱泥方式。

2.2.2.2 重-浮联合工艺优化

采用离心重选—浮选的重-浮联合工艺处理锡尾矿,试验流程见图3,结果见表7。

由表7可知,离心重选可有效脱除53.98%的矿泥(Sn品位0.065%),脱泥后锡石浮选指标显著提升,获得品位3.578%、回收率34.74%的锡精矿,锡富集比达22.56,选别效果良好。

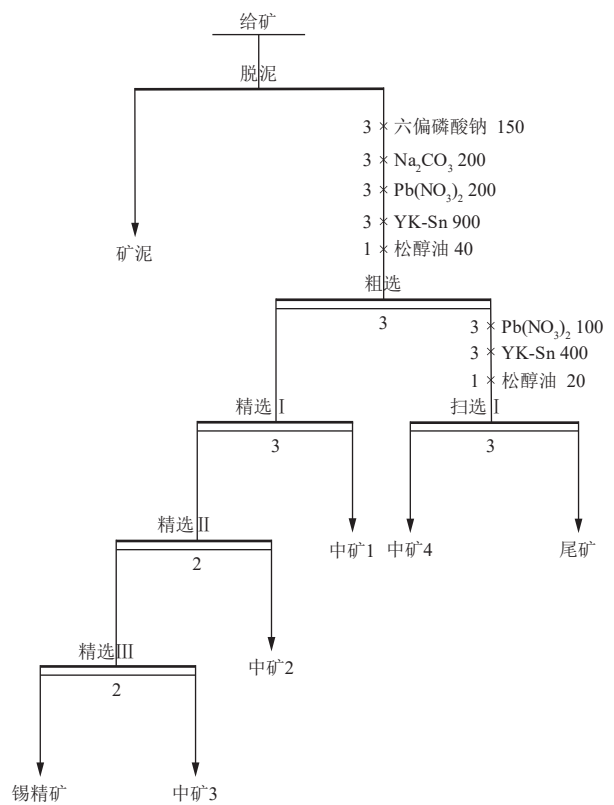


图3 重-浮联合脱泥浮选试验流程图

Fig. 3 Flowsheet of gravity flotation combined desliming flotation test

表6 试验结果对照表

Table 6 Comparison of test results					
脱泥试验	产品	产率 /%	Sn 品位 /%	Sn 回收率 %	锡富集比
摇床重选	矿泥	77.92	0.158	78.41	2.08
	精矿	3.04	0.326	6.31	
	中矿	19.04	0.126	15.28	
	合计	100.0	0.157	100.0	
离心重选	矿泥	54.36	0.066	22.25	1.69
	精矿	45.64	0.264	77.75	
	合计	100.0	0.156	100.0	
浮选脱泥	矿泥	11.12	0.124	8.74	1.03
	精矿	88.88	0.162	91.26	
	合计	100.0	0.158	100.0	

表7 重-浮联合脱泥浮选试验结果

Table 7 Results of gravity flotation combined desliming flotation test				
产品	产率 /%	Sn 品位 /%	Sn 回收率 /%	锡富集比
矿泥	53.98	0.065	22.12	22.56
锡精矿	1.54	3.578	34.74	
中矿 1	2.52	0.351	5.58	
中矿 2	2.14	0.545	7.35	
中矿 3	1.14	0.724	5.21	
中矿 4	2.21	0.589	8.21	
尾矿	36.47	0.073	16.79	
合计	100.0	0.159	100.0	

在同等条件下，开展重-浮联合脱泥浮选闭路试验，试验流程图见图4，结果见表8。

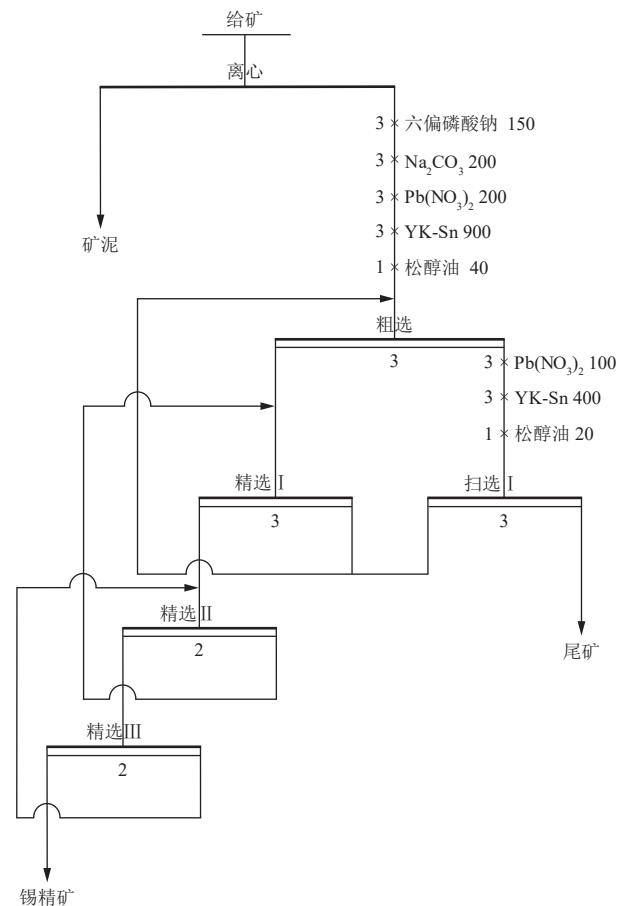


图4 闭路试验流程图

Fig. 4 Flowsheet of closed-circuit test

表8 闭路试验结果

Table 8 Results of closed-circuit test				
产品	产率 /%	Sn 品位 /%	Sn 回收率 /%	锡富集比
矿泥	54.68	0.065	23.13	20.31
锡精矿	2.11	3.121	42.85	
尾矿	43.21	0.121	34.02	
合计	100.0	0.154	100.0	

由表8可知，闭路试验可获得锡精矿品位3.121%、回收率42.85%、锡富集比20.31的较佳指标。

3 结论

1)云南某锡选矿厂重选尾矿中锡品位为0.161%，具有较高的回收价值。锡石的嵌布粒度较细，主要赋存在-0.038 mm的粒度。采用离心重选可有效脱除细粒锡尾矿中的轻质矿泥(脱泥率53.98%)，且矿泥中Sn损失率低(品位仅0.065%)，采用离心重选—浮选联合工艺最终闭路试验可获得品位3.121%、回

收率42.85%的锡精矿,富集比达20.31,远优于直接浮选工艺(富集比6.16),选别指标好。

2)与摇床重选相比,离心重选在脱泥选择性和锡回收率方面具有明显优势,是该类细粒锡尾矿资源化利用的优选工艺。

3)研究结果可为高矿泥含量、细粒嵌布锡尾矿的高效回收提供技术参考,对实现锡资源的二次利用具有重要意义。

参考文献

- [1] 丁学全,王中奎.我国锡产业现状及未来发展思路[J].中国有色金属,2016(4):46-47.
DING X Q, WANG Z K. China's tin industry status and future development ideas[J]. China Nonferrous Metals, 2016(4): 46-47.
- [2] 王修,刘冲昊.“优势矿产”变“忧虑矿产”:中国锡资源供应风险评价[J].中国矿业,2021,30(7):37-43.
WANG X, LIU C H. "Dominant minerals" to "worried minerals": risk assessment of tin resource supply in China[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(7): 37-43.
- [3] 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 Y, YE G H, HU Y B, et al. Resource status, characteristics and reprocessing research progress of tin tailings[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(2): 91-97.
- [4] 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 J, WU J, YI J L. Experimental study on flotation of cassiterite from a tin-bearing tailings[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 36-40.
- [5] 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 J M, YU S L, REN M Q, 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.
- [6] 陈郑辉,王登红,盛继福,等.中国锡矿成矿规律概要[J].地质学报,2015,89(6):1026-1037.
CHEN Z H, WANG D H, SHENG J F, et al. Summary of metallogenic regularity of tin deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 1026-1037.
- [7] 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 H Z, TONG X, XIE X, et al. Comprehensive utilization of sulfur-containing low-grade tin tailings[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37(5): 11-17.
- [8] 符海桃,莫峰,兰希雄.锡尾矿综合利用研究进展[J].世界有色金属,2018(6):221-224.
FU H T, MO F, LAN X X. Research progress on comprehensive utilization of tin tailings[J]. World Nonferrous Metals, 2018(6): 221-224.
- [9] 曹阳,童雄,谢贤,等.锡石选别中的影响因素和工艺药剂研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(9):2512-2529.
CAO Y, TONG X, XIE X, et al. Research progress on influencing factors and process agents in cassiterite separation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2512-2529.
- [10] 杨凯志,李汉文,李沛伦,等.云南某选锡尾矿中锡回收选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2024(2):42-48.
YANG K Z, LI H W, LI P L, et al. Experimental study on cassiterite recovery from a tin tailings in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(2): 42-48.
- [11] 黄翔,李小娜,王祥丁,等.内蒙某多金属选厂微细粒锡富中矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2023(1):110-115.
HUANG X, LI X N, WANG X D, et al. Experimental study on beneficiation of fine-grained tin-rich medium ore in a polymetallic dressing plant in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1): 110-115.
- [12] 黄翔,郑永兴,王振兴.微细粒级锡矿选矿试验研究[J].矿冶,2023,32(1):51-59.
HUANG X, ZHENG Y X, WANG Z X. Experimental study on beneficiation of a fine cassiterite[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(1): 51-59.
- [13] 冯其明,周清波,张国范,等.六偏磷酸钠对方解石的抑制机理[J].中国有色金属学报,2011,21(2):436-441.
FENG Q M, ZHOU Q B, ZHANG G F, et al. Inhibition mechanism of sodium hexametaphosphate on calcite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 436-441.
- [14] 过建光,肖文工,凌石生.湖南某尾矿选锡新工艺试验研究[J].矿冶,2023,32(3):41-46.
GUO J G, XIAO W G, LING S S. Study on new technology of cassiterite beneficiation from a tailings in Hunan province[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(3): 41-46.
- [15] 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 Y, TONG X, XIE X, et al. Experimental study on combined collector for tin separation of a tin-containing polymetallic sulfide ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 73-79.