



昌宁含铁低品位高泥锡石矿重-磁选工艺研究

王普蓉¹, 徐国印^{1,2}, 苏刚¹

(1. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000;

2. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 云南昌宁锡矿石主要有用金属矿物为锡石, 其次为褐铁矿等, 主要脉石矿物为石英, 锡主要以锡石及酸溶锡形式存在。原矿 Sn 品位为 0.166%, -0.074 mm 矿泥含量为 24.61% (其中 -0.019 mm 矿泥含量为 14.27%), 属低品位、高泥、含铁难选锡石矿。本文在对该矿石进行原矿性质研究的基础上, 开展了该矿的重-磁选工艺研究。结果表明: 原矿破碎至 -12 mm 按 0.212 mm 粒度洗矿分级, 洗矿 +0.212 mm 粗粒破碎至 -3 mm 后磨矿至 -0.074 mm 55.85% 与洗矿细粒 -0.212 mm 合并, 采用螺旋溜槽预先抛尾-溜槽精矿摇床分选-摇床精矿强磁选除铁的选矿工艺流程, 可以获得产率为 0.21%、Sn 品位为 41.32%、Sn 回收率为 52.27% 的锡精矿, 及产率为 0.75%、Sn 品位为 4.750%、Sn 回收率为 21.46% 的锡富中矿, 锡精矿与锡富中矿 Sn 累计回收率为 73.73%, 锡精矿质量达到了 YS/T339-2011 标准中一类 VII 品级精矿质量要求, 较好地实现了该锡矿的分选。

关键词: 难选锡矿; 洗矿分级; 螺旋溜槽抛尾; 摇床; 强磁选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.017

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0136-06

锡石作为重要的载锡矿物, 其性脆, 在破碎和磨矿过程中易产生过粉碎现象, 给锡石的分选工艺带来较大困难, 易造成锡金属在尾矿中的流失^[1-2]。由于锡石密度较大, 锡石矿存在着贫、细、杂及多金属共伴生的特点, 因此锡石矿最主要的选矿方法为重选法, 同时将重选与磁选、电选、浮选和化学选矿法适当联合, 以获得良好的锡精矿指标, 并兼顾其它有价值组分的回收。锡石重选的方法主要有重介质选矿、跳汰选矿、摇床选矿、螺旋选矿、离心选矿和皮带溜槽等^[3]。其中, 因摇床具有设备操作简单、选矿富集比高、能够使锡在精矿中得到有效富集、分选效果易观察、产品易收集等突出特点, 而成为锡石重选的最主要方法。摇床有效回收锡的粒度范围一般为 0.019 ~ 2 mm, 是中细粒锡石重选回收的理想方法, 对于 -0.019 mm 的细粒锡矿物回收效果不佳, 且过细粒对锡石矿磨矿后全粒级摇床重选效果影响较大^[4], 因此, 原矿本身含泥情况及磨矿产品的粒度对锡石摇床重选有着重要影响。

含铁锡石矿中, 锡石往往与 (磁) 黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿、磁铁矿等铁矿物伴生^[5-6], 单一重选法可丢弃大部分尾矿, 但由于这些铁矿物的密度与锡石较接近, 单一重选法难以实现锡石与它们的分离, 而导致难以获得合格锡精矿。因此, 对于低品位高泥含铁锡石矿的分选, 应重视其它选矿方法与重选法的联合使用, 同时尽量减少物料过磨、在正式分选前增加预先脱泥抛尾作业。其中, 减少物料过磨的方法主要有: 磨矿前预先洗矿分级、阶段磨矿阶段选别和精确化装补钢球等^[7]; 正式分选前增加预先脱泥抛尾作业有助于提高下一步正式分选的给矿品位、改善正式分选过程、提高正式分选的精矿指标, 重选预先脱泥抛尾的方法主要有: 旋流器预先抛尾、螺旋溜槽预先抛尾等。随着世界各国对锡资源需求的日益增加及锡富矿的不断开采与不足, 贫、细、杂难选锡矿的开发利用具有重要的现实意义。

云南昌宁锡石矿主要有用金属矿物为锡石, 其次为褐铁矿等, Sn 品位为 0.166%, -0.074 mm

收稿日期: 2020-03-24; 改回日期: 2021-03-10

作者简介: 王普蓉 (1982-), 女, 讲师, 研究方向为资源综合利用。

矿泥含量为 23.25%（其中-0.019 mm 矿泥含量为 12.74 %），含 TFe 4.74%,属含铁低品位高泥难选锡石矿，储量大，可露天开采。长期以来由于经济技术不可行，该矿石一直未得到开发利用，本文旨在对该矿样进行试样性质研究的基础上，开展该锡石矿重-磁选工艺研究，为该矿的开发利用提供技术方案与依据。

1 试样性质

试样主要金属矿物为锡石及褐铁矿；主要脉石矿物为石英。锡石：无色带淡黄色，半自形锥柱状、板状，横切面八边形近圆形，正突起很高，糙面显著，具一组解理，但裂纹十分发育，正交下干涉色很高，具近似珍珠晕彩，聚片双晶发育，平行消光，在具双晶的切面上斜消光,主要

分布于晚期石英脉中，亦有少量充填于褐铁矿之孔隙中，嵌布粒最大为 2.5 mm，最小为 0.003 mm，一般为 0.06~0.20 mm。褐铁矿：褐红色，脉状、胶状，正突起很高，反光下具褐红色金属光泽，多沿次生裂隙充填，其中可包裹石英、电气石、绢云母，主要为次生，嵌布粒最大为 1.8 mm，最小为 0.005 mm，一般 0.03~0.25 mm。石英：一般粒度为 0.2~2 mm。试样化学多元素分析结果见表 1、锡物相分析结果见表 2、3，试样破碎至 -12 mm 后的粒度组成分析结果见表 4。

表 4 表明，原矿矿泥含量较高，各个粒级锡含量不均，-0.037 mm 细粒级的锡品位远低于+0.037 mm 粗粒级的锡品位，可考虑对原矿进行洗矿分级与预先脱泥抛尾。

表 1 试样化学多元素分析结果/%

Table 1 Multi-element analysis results of test samples															
Sn	TFe	Zn	Pb	WO ₃	Bi	ZrO ₂	Cu	Ni	Sb	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	S	As
0.166	4.74	0.34	0.02	0.002	0.0024	0.039	0.02	0.007	0.001	0.69	66.74	18.36	3.05	0.024	0.206

表 2 试样锡物相分析结果

Table 2 Analysis results of tin phases				
项目	锡石	酸溶锡	硅酸盐	合计
Sn含量/%	0.133	0.032	0.001	0.166
Sn分布率/%	80.12	19.28	0.60	100.00

表 3 试样铁物相分析结果

Table 3 Analysis results of iron phases				
项目	褐铁矿	黄铁矿	硅酸铁及其他	合计
Fe含量/%	4.06	0.50	0.18	4.74
Fe分布率/%	85.65	10.55	3.80	100.00

旋溜槽等设备对低品位、高泥锡矿有较好脱泥抛尾作用的设备^[7]，对原矿进行预先抛尾，以提高下一步正式分选的给矿品位、改善正式分选过程、提高正式分选的精矿指标，因此，首先对原矿进行了洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级螺旋溜槽抛尾实验研究。然后，在原矿洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级螺旋溜槽抛尾实验的基础上，以摇

表 4 试样粒度组成分析结果

Table 4 Particle size analysis of test samples					
粒级/mm	部分产率/%	负累计产率/%	品位/Sn%	部分金属分布率/%	负累计金属分布率/%
-12+3	31.06	100	0.245	45.84	100.00
-3+1	9.57	68.94	0.319	18.39	54.16
-1+0.5	10.15	59.37	0.137	8.38	35.77
-0.5+0.212	13.11	49.22	0.135	10.66	27.39
-0.212+0.15	4.68	36.11	0.142	4.00	16.73
-0.15+0.074	6.82	31.43	0.111	4.56	12.73
-0.074+0.044	3.65	24.61	0.119	2.62	8.17
-0.044+0.037	2.25	20.96	0.119	1.61	5.55
-0.037+0.019	4.44	18.71	0.058	1.55	3.94
-0.019+0.01	4.25	14.27	0.032	0.82	2.39
-0.01+0.005	5.03	10.02	0.035	1.06	1.57
-0.005	4.99	4.99	0.017	0.51	0.51
合计	100.00		0.166	100.00	

2 实验仪器、设备及方法

2.1 主要仪器与设备

泰勒标准套筛、实验室自制水析仪、XP-132 简易双目偏光显微镜、XMQ-2（40×90）mm 锥形球磨机、5LL-600 螺旋溜槽、XCY-73 型（1100×500）mm 摇床、TN535-A4523 高梯度磁选机、JBTF（120×50）mm 搅拌桶。

2.2 实验原理与方法

该矿为锡石矿，细粒级含量较高，从节约投资，降低过磨，减少实际生产中粉矿仓的堵塞和提高磨矿给矿的稳定性等方面考虑，可以对原矿进行洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级重选选锡；另外，试样本身锡品位很低、可以考虑采用螺

床这种简单、常用、选矿富集比高的的重选方法，对溜槽锡精矿进行了摇床分选实验研究。由于试样中有一定量褐铁矿，因其比重亦较高，重选过程中会部分进入重选锡精矿中，因此，其次，根据褐铁矿与锡石间的磁性差异，对摇床锡精矿视其含铁情况进行了强磁选除铁研究；最后，在以上实验研究的基础上，开展了选矿全流程扩大实验研究。

3 实验

3.1 原矿洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级螺旋溜槽抛尾实验

3.1.1 洗矿分级-粗粒磨矿实验

洗矿分级-粗粒磨矿实验流程见图 1，实验条件为：固定螺旋溜槽给矿矿浆浓度 30%、给矿矿浆量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、螺旋溜槽截矿器精矿端宽度 70 mm，洗矿分级粒度和洗矿粗粒磨矿细度依次变化，实验结果见图 2。由图 2 可知，洗矿分级粒度以 0.212 mm 为宜、洗矿粗粒磨矿细度以 -0.074 mm 56% 左右为宜，此时获得的溜槽锡精矿产率为 35.19%，锡品位为 0.393%，锡回收率为 83.35%。

3.1.2 全粒级螺旋溜槽抛尾实验

(1) 截矿器精矿端宽度实验

螺旋溜槽抛尾的产品由截矿器截取，截矿器精矿端宽度对溜槽锡精矿产率有较大影响，从而影响溜槽锡精矿其他指标。截矿器精矿端宽度实验采用的流程见图 1，实验条件为：固定洗矿分级粒度 0.212 mm、 $+0.212 \text{ mm}$ 洗矿粗粒磨矿细度 -0.074 mm 55.85%、螺旋溜槽给矿矿浆浓度 30%、给矿矿浆量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，螺旋溜槽截矿器精矿端宽度变化，实验结果见图 3。由图 3 可知，随着截矿器精矿端宽度的增加，溜槽锡精矿锡品位不断降低，锡回收率先增加后增幅不大，综合考虑锡精矿指标，螺旋溜槽截矿器精矿端宽度以 55 mm 左右为宜。

(2) 给矿矿浆浓度实验

实验条件为固定洗矿分级粒度 0.212 mm、 $+0.212 \text{ mm}$ 洗矿粗粒磨矿细度 -0.074 mm 55.85%、螺旋溜槽截矿器精矿端宽度 55 mm、给矿矿浆量 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，螺旋溜槽给矿矿浆浓度变化，实验结果见图 4。由图 4 可知，随着给矿矿浆浓度的增加，溜槽锡精矿锡品位与锡回收率均先增加后降低，

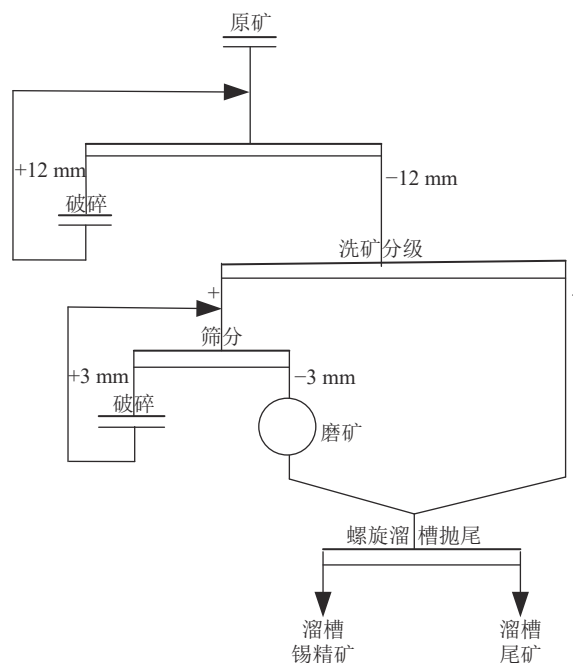


图 1 原矿洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级螺旋溜槽抛尾实验流程

Fig.1 Flowsheet of ore washing classification - coarse grinding-pre-discarding tailings by spiral chute

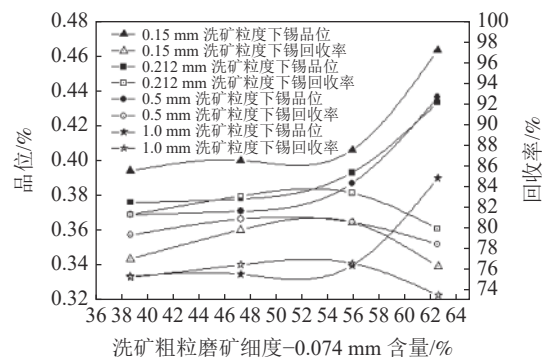


图 2 洗矿分级-粗粒磨矿实验结果

Fig.2 Test results of ore washing classification - coarse grinding

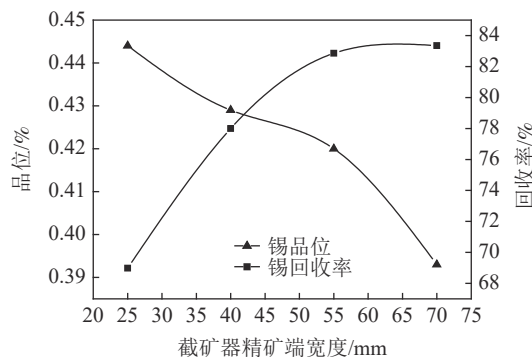


图 3 螺旋溜槽截矿器精矿端宽度实验结果

Fig.3 Test results of cutter width for concentrate end of spiral chute

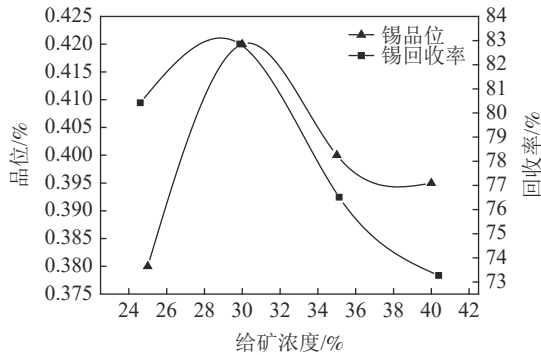


图4 螺旋溜槽给矿矿浆浓度实验结果
Fig.4 Test results of pulp density for spiral feed

综合考虑锡精矿指标，螺旋溜槽给矿矿浆浓度以30%左右为宜。

(3) 给矿矿浆量实验

实验实验条件为：固定洗矿分级粒度0.212 mm、+0.212 mm 洗矿粗粒磨矿细度-0.074 mm 55.85%、螺旋溜槽截矿器精矿端宽度55 mm、螺旋溜槽给矿矿浆浓度30%，给矿矿浆量变化，实验结果见图5。由图5可知，随着给矿矿浆量的增加，溜槽锡精矿锡品位与锡回收率先增加后降低，综合考虑锡精矿指标，螺旋溜槽给矿矿浆速率以3.0 m³/h左右为宜，此时获得的溜槽锡精矿产率为32.91%、锡品位为0.424%、锡回收率为84.06%。

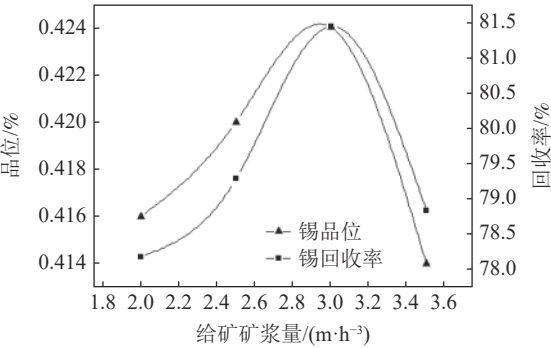


图5 螺旋溜槽给矿矿浆量实验结果
Fig.5 Test results of pulp quantity for spiral feed

3.2 溜槽锡精矿摇床分选实验

原矿洗矿分级后经螺旋溜槽抛尾，锡在溜槽精矿中得到一定富集，同时抛弃了大量细粒尾矿，经螺旋溜槽预先富集的溜槽锡精矿锡品位尚不高，需要进一步进行摇床分选，以获得Sn品位较高的锡精矿。溜槽锡精矿摇床分选采用的实验流程见图6、实验结果见表5。由表5可知，摇床分选获得的摇床锡精矿Sn品位较高，且尾矿中锡损失较低、锡精矿对原矿Sn回收率较高。现有结

果初步表明，对于该锡石矿原矿洗矿分级-粗粒磨矿-全粒级螺旋溜槽抛尾-摇床分选方案能够获得相对较好的选别指标，但所获得摇床锡精矿锡品位尚不达标。经显微镜镜下观察，摇床锡精矿中含有大量单体解离情况较好的褐铁矿，因此，为进一步获得合格锡精矿，有必要对摇床锡精矿进行强磁选除铁。

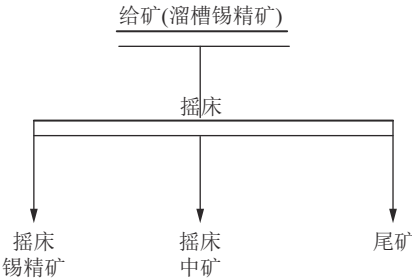


图6 溜槽精矿摇床分选实验流程
Fig.6 Test flowsheet of shaking table separation of spiral chute concentrate

表5 溜槽精矿摇床分选实验结果
Table 5 Test results of shaking table separation of chute concentrate

产品名称	作业产率/%	对原矿产率/%	Sn品位/%	作业Sn回收率/%	对原矿Sn回收率/%
摇床锡精矿	1.08	0.36	22.82	58.13	48.86
摇床中矿	24.86	8.18	0.580	34.01	28.59
尾矿	74.06	24.37	0.045	7.86	6.61
给矿	100.00	32.91	0.424	100.00	84.06

3.3 摇床锡精矿强磁选除铁实验

摇床锡精矿强磁选除铁实验流程见图7、实验结果见表6。由表6可知，强磁选除铁实验可获得Sn品位为51.96%、对原矿产率为0.14%、对原矿回收率为42.23%的较好强磁选锡精矿指标。

3.4 全流程扩大实验

根据以上研究结果，对原矿进行了全流程扩大实验研究，最终推荐的选矿工艺流程见图8，

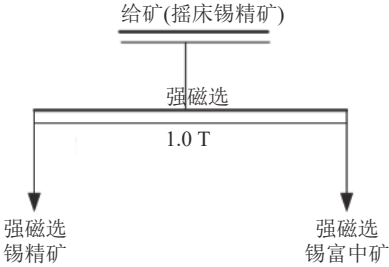


图7 摇床精矿强磁选除铁实验流程
Fig.7 Test flowsheet of iron removal from shaker concentrate by high-intensity magnetic separation

表 6 摇床精矿强磁选除铁实验结果
Table 6 Test results of iron removal from shaker concentrate by high-intensity magnetic separation

产品名称	作业产率/%	对原矿产率/%	Sn品位/%	作业Sn回收率/%	对原矿Sn回收率/%
强磁选锡精矿	37.93	0.14	51.96	86.44	42.23
强磁选锡富中矿	62.07	0.22	4.980	13.56	6.63
合计	100.00	0.36	22.80	100.00	48.86

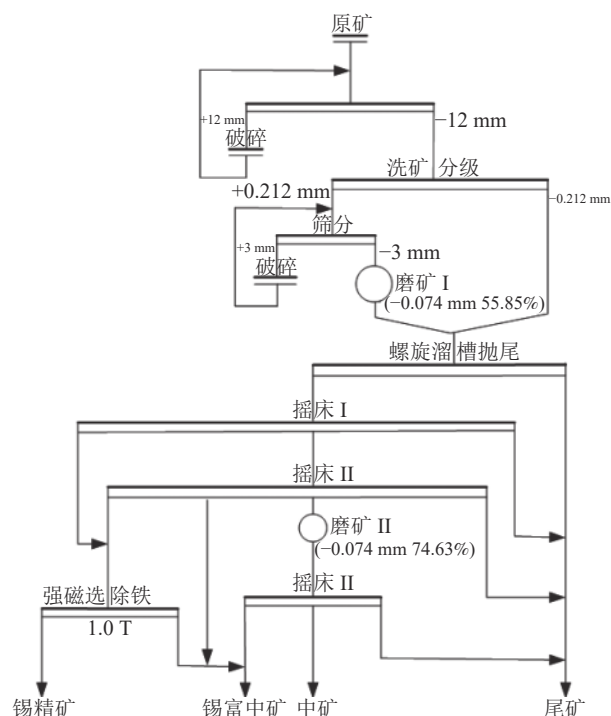


图 8 最终推荐的选矿工艺流程

Fig.8 Recommended mineral processing process

获得的实验结果见表 7，选矿产品多元素分析结果见表 8。由表 7、表 8 可知，全流程扩大实验可

获得产率为 0.21%、锡品位 41.32%、锡回收率为 52.27% 的合格锡精矿，及产率为 0.75%、锡品位 4.750%、锡回收率为 21.46% 的锡富中矿，锡精矿与锡富中矿累计回收率为 73.73%。锡精矿质量达到了 YS/T339-2011 标准中一类 VII 品级精矿质量要求。

表 7 全流程扩大实验结果

Table 7 Expanded test results of the whole process

产品名称	产率/%	Sn品位/%	Sn回收率/%
锡精矿	0.21	41.32	52.27
锡富中矿	0.75	4.750	21.46
中矿	2.39	0.211	3.04
尾矿	96.65	0.040	23.23
原矿	100	0.166	100.00

4 结 论

(1) 云南昌宁锡矿含 Sn 0.166%，含 TFe 4.74%，泥化现象严重，锡主要以锡石及酸溶锡形式存在，属含铁、低品位、高泥难选锡石矿。

(2) 对该锡石矿开展了重-磁选工艺研究，最终采用原矿洗矿分级后螺旋溜槽预先抛尾-摇床精选-强磁选除铁的选矿工艺流程，获得了产率为 0.21%，Sn 品位 41.32%，Sn 回收率为 52.27% 的合格锡精矿，及产率为 0.75%，Sn 品位 4.750%，Sn 回收率为 21.46% 的锡富中矿；锡精矿与锡富中矿 Sn 累计回收率为 73.73%。锡精矿质量达到了 YS/T 339-2011 标准中一类 VII 品级精矿质量要求，较好地实现了该锡石矿的分选。

表 8 选矿产品化学分析结果/%

Table 8 Chemical analysis results of mineral processing products

名称	Sn	S	As	Bi	Zn	Sb	TFe	F	Cu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Pb	WO ₃
锡精矿	41.32	0.708	0.749	0.11	0.553	0.05	7.01	—	0.010	15.36	2.71	0.252	0.28
锡富中矿	4.75	0.085	0.519	0.07	0.066	0.003	35.49	—	0.015	26.41	5.62	0.078	0.046

参考文献:

[1] 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(4):76-79.

LU Z M, HAN B. Research progress and thinking suggestions for the selection of sine-grained cassiterite[J]. World Nonferrous Metals, 2019(4):76-79.

[2] 汪泰, 胡真, 李汉文. 微细粒锡石浮选药剂筛选及选矿工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2): 96-101.

WANG T, HU Z, LI H W. Research on flotation agent

screening and mineral processing technology for fine-grained cassiterite J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2): 96-101.

[3] 王灿霞. 新型盘式流膜选矿机分选广西凤凰山矿细泥锡尾矿试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.

WANG C X. Experimental study on the separation of fine muddled tin tailings from Fenghuangshan Mine in Guangxi by a new type of disc flow film concentrator [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.

- [4] 黄位森. 锡 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
HUANG W S. Tin [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [5] 丛龙斐, 王霄鹏, 周长春, 等. 双涡耦合-导向平底旋流器在锡矿分选中的应用[J]. 矿产综合利用, 2020(2):177-181.
CONG L F, WANG X P, ZHOU C C, et al. Dual vortex coupling - guide flat-bottom cyclone application in tin ore separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):177-181.
- [6] 吕超. 某锡石多金属硫化矿锌高效回收工艺研究[J]. 矿

产综合利用, 2021(1):77-82.

LV C. Study on efficient recovery process of zinc from cassiterite polymetallic sulfide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):77-82.

[7] 宋建文. 腾冲高镁微细粒级铁锡矿选矿试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.

SONG J W. Experimental Study on the Beneficiation of Tengchong High Magnesium Fine Fe-tin Ore [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.

Study on Gravity and Magnetic Separation Process of an Iron-containing Low-grade and High Slime Tin Ore in Changning

Wang Purong¹, Xu Guoyin^{1,2}, Su Gang¹

(1.Faculty of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan, China; 2.Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua, Sichuan, China)

Abstract: The main useful metal mineral in the tin ore from Changning is cassiterite, followed by limonite, the main gangue mineral is quartz, and tin mainly exists in the form of cassiterite and acid soluble tin. The tin ore with tin grade of 0.166% and yield of -0.074 mm fine slime of 24.61% (-0.019 mm fine slime of 14.27%) belongs to an iron-containing, low grade, high slime and refractory tin ore. Based on the study of the properties of a refractory tin ore from Yunnan, the beneficiation process of the ore was studied. Test results showed that: the raw ore was crushed to -12 mm and classified by washing with 0.212 mm particle size. After the + 0.212 mm coarse grains were crushed to -3 mm and ground to -0.074 mm occupying 55.85% and then merged with -0.212 mm fine grains as raw ore, separation flowsheet of pre-discarding tailings by spiral chute - separation of chute concentrate by shaking table -iron removal from shaker concentrate by high intensity magnetic separator was adopted to separate the raw ore. Tin concentrate with yield of 0.21%, tin grade of 41.32%, tin recovery of 52.27%, tin rich middling with yield of 0.75%, tin grade of 4.750%, tin recovery of 21.46%, and cumulative recovery of tin concentrate and tin rich middling of 73.73% was obtained. The quality of tin concentrate, which realized separation of tin from the raw ore, meets the concentrate level of grade VII category I of YS/T 339-2011 standard.

Keywords: Refractory tin ore; Washing classification; Pre-discarding tailings by spiral chutes; Shaking table; High- intensity magnetic separation