都龙矿区磁铁矿和磁黄铁矿高效分离降低锡损失试验研究*

陈华萍[1]，兰希雄[1]，谢贤[2]，符海桃[1]，黄渝芝[1]，王丛正[1]

（1.云南华联锌铟股份有限公司， 云南 马关县 663701；
2.昆明理工大学 国土资源工程学院， 云南 昆明 650039）

摘要：华联锌铟选矿厂产出的铁精矿的主要成分是磁铁矿和磁黄铁矿，存在含硫超标、品质差、销售价格低，铁精矿中锡金属损失率偏高等问题。采用铁粗精矿＋弱磁＋预先脱磁＋分级再磨＋预先脱磁＋浮选脱硫＋磁选的工艺流程，实现了磁黄铁矿和磁铁矿高效分离。最终得到铁品位为66.62%，含硫0.65%的高品质铁精矿，产出含硫25.61%，硫回收率96.06%，含铁59.52%的高铁硫精矿，同时降低了铁精矿中锡的损失率，产出锡富集比为3.69倍的硫中矿，从而降低了锡金属的损失。

关键词：磁铁矿；磁黄铁矿；预分级再磨；脱磁；浮选脱硫

中图分类号：TD92 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)01-0253-09

Experimental Study on Efficient Separation of Magnetite and Pyrrhotite to Reduce Tin Loss in Dulong Mining Area

CHEN Huaping[1], *LAN Xixiong*[1], *XIE Xian*[2], *FU Haitao*[1], *HUANG Yuzhi*[1], *WANG Congzheng*[1]

(1.Yunnan Hualian Zinc Indium Co., Ltd., Maguan County, Yunnan 663701, China;
2.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650039, China)

Abstract: The main components of iron concentrate produced by Hualian Zinc Indium Concentrator are magnetite and pyrrhotite. There are some problems such as excessive sulfur content, poor quality, low sales price and high loss rate of tin metal in this iron concentrate. The efficient separation of pyrrhotite and magnetite was realized by the process of iron rough concentrate＋low-intensity magnetic separation＋pre-demagnetization＋grading regrinding＋pre-demagnetization＋flotation desulfurization＋magnetic separation. Finally, a high-quality iron concentrate with iron grade of 66.62% and sulfur content of 0.65% was obtained, and a high-iron sulfur concentrate with sulfur content of 25.61%, sulfur recovery rate of 96.06% and iron content of 59.52% was produced. At the same time, the loss rate of tin in iron concentrate was reduced, and a sulfur ore with a tin enrichment ratio of 3.69 times was produced, thereby reducing the loss of tin metal.

Key words: Magnetite, Pyrrhotite, Pre-grading regrinding, Demagnetization, Flotation desulfurization

0 引言

我国是世界上铁矿产资源总量丰富，也是开发利用铁矿产资源历史最为悠久的矿业生产大国和矿产品消费大国之一[1-4]。但经历数十年的开发，目前铁矿资源整体呈现贫、细、杂的特点，且铁矿石中硫含量高，降低铁矿石的硫含量是迫切需要解决的问题[5]。近年来在含硫磁铁矿石脱硫方面，国内外学者做了大量的研究，在工艺技术流程、磁选、反浮选药剂的研究上取得了较好的进展，并在生产中取得了显著的经济效益[6-9]。在资源日益趋于枯竭的今天，开发高效、低能、环保的脱硫新工艺、新型药剂仍是硫铁矿选矿研究的重点和发展方向。

自然界中磁铁矿是矿石中含量最高的铁矿物，也是主要目的矿物。磁黄铁矿是矿石中主要的硫化矿物，也是自然界中仅次于磁铁矿的最常见的磁性矿物，常与铜、锌、铅和锡等金属矿物共生。对于不同程度含黄铁矿和磁黄铁矿的铁矿石，由磁选得到的精矿都不同程度地含硫，通过弱磁选能分离出部分黄铁矿，但很难把磁黄铁矿分离出来，对于这类含硫铁精矿的脱硫一般采用浮选法[10-12]。对含硫化铁高的金属矿物通常采用浮选法，先对硫化铁矿物进行抑制，优先浮选回收主要有价金属后，再对硫化铁矿物进行回收。对浮选中被抑制的硫化铁矿物需

* **收稿日期**：2024-01-29
作者简介：陈华萍(1979—)，女，云南曲靖人，高级工程师，主要从事矿物加工技术及选矿生产服务工作。E-mail:565638980@qq.com
通信作者：兰希雄(1969—)，男，江西南康人，正高级工程师，主要从事选矿技术研究开发及生产管理工作。E-mail:jxlanxx@126.com

进行活化改善其可浮性才能更好地回收利用。目前常用的硫化铁矿物活化剂有硫酸铜和硫酸,但因硫酸铜价格高,选矿成本较高,且硫酸铜活化被石灰抑制的硫化铁矿物效果不佳,选择性差,药剂用量大。浓硫酸稀释存在极大的安全隐患,直接添加原液会产生大量硫化氢气体,恶化生产操作环境[13]。在铁冶炼生产中,对铁精矿的硫含量有严格的要求,因此在选矿厂必须分选出磁铁矿和磁黄铁矿。

都龙矿区的矿石复杂难选,是含有锌、锡、铜、铟等的多金属矿石,矿物组成复杂,金属矿物主要有黄铜矿、铁闪锌矿、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、锡石等[13-14]。自 2020 年以来,随着 1# 矿体原矿配矿比例的提高,原矿中硫、铁矿物的含量分别由原来的 5%、16%上升到了 6.5%和 18.5%以上,且原矿中锡石的嵌布粒度较细,并与磁铁矿、磁黄铁矿共生关系密切,选矿厂目前产出的铁粗精矿含铁 54%~58%、含硫 8%~12%,含锡 0.20%~0.25%,夹杂多种有害物质,铁精矿品质不高,制约了铁精矿的销售价格。云南华联锌铟股份有限公司[10]发明了一种磁铁矿、磁黄铁矿分离并综合回收锡金属的工艺,采用磁浮重联合法进行铁精矿提质降杂,并综合回收锡石和硫矿物,通过使用高效活化剂 XW-102,捕收剂 YK-8,成功地将铁精矿中的硫降到 1%以下,同时获得了产率 49.56%、铁品位 65.80%、硫品位 0.82%、锡品位0.23%的铁精矿,和产率 31.81%、铁品位 60.09%、硫品位 23.20%、锡品位 0.21%的高铁硫精矿,从而实现了磁黄铁矿和磁铁矿的高效分离。本研究对都龙矿区的矿石开展磁铁矿与磁黄铁矿分离试验研究,进一步提铁降杂,以期获得高品质铁精矿,提高企业经济效益。

1 矿物性质及试验方法

1.1 化学成分含量分析

为了解原矿、铁精矿的性质,对原矿、铁精矿进行了原矿多元素分析、原矿铁物相分析、铁精矿粒级分析,对原矿、铁粗精矿中的锡石进行了锡石解离度、锡石共生关系研究。多元素分析结果见表 1,铁物相分析结果见表 2,铁精矿粒级分析结果见表 3。

表 1 原矿、铁粗精矿、铁精矿多元素分析结果

Table 1 Multielement analysis results of raw ore, iron coarse concentrate and iron concentrate %

产品	Zn	Cu	Sn	Fe	S	As	Ag*	In*	Pb	MgO
原矿	3.150	0.128	0.205	22.25	7.25	0.586	17.85	33.68	0.058	7.650
铁粗精矿	0.354	0.078	0.210	56.35	11.19	0.092	15.86	19.77	0.020	1.694
铁精矿	0.238	0.062	0.220	61.66	10.09	0.027	11.22	17.52	0.028	1.475

注:* 单位为 g/t。

由表 1 可知,原矿中铁、硫含量偏高,特别是铁的含量高达 22.25%;铁粗精矿中含锡 0.21%,含硫 11.19%;铁精矿中含锡 0.22%,含硫高达 10.09%,远远超出了产品销售的要求。

表 2 原矿的铁化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of iron in raw ore %

相别	含量	分布率
磁铁矿中铁	5.69	25.57
磁黄铁矿中铁	6.97	31.33
硫化物中铁	2.04	9.17
硅酸盐中铁	7.55	33.93
总铁	22.25	100.00

由表 2 可知,都龙矿区原矿中的铁主要赋存在硫矿物中,其次赋存在硅酸盐矿物和磁铁矿中,硫矿物中铁的占有率为 40.50% 。矿石中的硫化铁矿物主要是磁黄铁矿和黄铁矿,矿物含量分别为 6.97%和 2.04%。

表 3 铁精矿粒度分析结果

Table 3 Particle size analysis results of iron concentrate

粒级/mm	产率/%	品位/%			金属分布率/%		
		Sn	Fe	S	Sn	Fe	S
+0.074	24.78	0.286	51.00	8.12	31.62	20.94	21.51
−0.074~+0.038	32.10	0.221	63.06	9.09	31.65	33.54	31.20
−0.038	43.11	0.191	63.73	10.26	36.73	45.52	47.29
合计	100.00	0.224	60.36	9.35	100.00	100.00	100.00

由表 3 可知,随着细颗粒含量增高,铁精矿中的铁品位、分布率呈逐渐升高的趋势,锡品位逐渐降低、分布率逐渐升高。铁精矿中铁主要分布在−0.038 mm 粒级中,铁品位为 63.73%,分布率为 45.52%,且与磁铁矿包裹、连生。而在−0.038 mm 粒级中锡品位最低,为 0.191%,分布率最高,为 36.73%;在+0.074 mm 粒级中锡的分布率最低,为 31.62%,品位最高,为 0.286%。

1.2 原矿中锡石的解离度及嵌布特征

当前磨矿细度条件下(−0.074 mm 含量占

70%)原矿中锡石的单体解离度较低,其中完全解离(100%解离)的颗粒占 41.20%。锡石嵌布粒度细,单体解离度低,需提高磨矿细度,使锡石单体进一步解离。原矿中锡石与滑石、黑云母、磁黄铁矿的共生关系最为紧密,与其共有表面积比例分别为 7.66%、6.88%、5.48%。其次,锡石与钙铁辉石、闪锌矿、绿泥石、石英的共生关系较为紧密。锡石的自由表面积比例为 66.62%。

1.3 铁精矿中锡石的解离度及嵌布特征

铁精矿中锡石的单体解离度偏低,仅有 36.54%的锡石完全解离(100%解离),说明铁精矿对锡石的机械夹带较为严重,可考虑增加预先脱磁作业,减少磁团聚现象对锡石的夹带。锡石与磁铁矿、滑石、绿泥石、磁黄铁矿的共生关系最为紧密,与其共有表面积比例分别为 14.15%、9.99%、6.69%、5.38%;其次为赤铁矿(褐铁矿)、钙铁辉石、白云石等;其他少量。锡石的自由表面积比例为 47.11%。

工艺矿物学研究表明,铁粗精矿的主要成分为磁铁矿和磁黄铁矿等,硫在铁精矿中主要以磁黄铁矿、黄铁矿以及其他多金属硫化矿物的形式存在。铁粗精矿中锡石嵌布粒度细,锡石与磁铁矿、滑石、绿泥石、磁黄铁矿的共生关系最为紧密,解离度低。未单体解离的磁黄铁矿与磁铁矿形成紧密包裹连生的微细颗粒,需要充分细磨才能单体解离。但是,磁黄铁矿性脆,表面易氧化,容易被亲水性薄膜覆盖,磨矿过程中容易泥化,导致可浮性大幅下降,影响浮选分离效果[15]。因此,适宜的磨矿细度,合理的浮选脱硫药剂条件对铁精矿脱硫尤为重要[16-17]。同时锡石性脆,提高磨矿细度虽有利于提高锡石的单体解离度,但同样会增加锡石的过粉碎现象,导致锡石损失率过高。

1.4 试验方法

试验样品取自选矿车间具有代表性的铁粗精矿。在取样过程中由于矿样的浓度较低,所取矿浆都经静置后抽出部分上清液,使矿样的浓度控制在 80%左右,以确保样品缩分后具有代表性。试验过程中脱硫尾矿的磁选使用永久磁铁手工磁选。脱磁试验磨矿工序采用球磨机,预先分级后使用棒磨机再磨。浮选中研磨使用陶瓷研磨钵。中矿静置沉淀后倒出上清液,将矿浆再研磨至-0.074 mm 后返回粗选流程。通过正交试验来确定浮选药剂的最佳用量。磨矿试验流程为一段开路磨矿,磁选试验为一次粗选流程。

2 选矿试验

2.1 铁粗精矿选矿试验

2.1.1 铁粗精矿磨矿试验

高硫铁精矿中的含硫矿物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、白铁矿和黄铜矿等,其中黄铁矿、黄铜矿、白铁矿相对容易脱除。磁铁矿和黄铁矿因磁性差异较大,利用磁选即可有效分离,而磁黄铁矿与磁铁矿均属强磁性矿物,磁性相近,且比重相近,采用传统的磁选方法难以实现两者的有效分离[18-19],此外,采用磁选分离时磁性颗粒间会因剩磁而产生“磁团聚”现象,增大两者的分离难度。

在相同外磁场条件下,磁铁矿单体和富连生体之间的磁团聚力随着磨矿粒度的降低逐渐减小,随着磁化磁场强度的增加迅速增大。随着磨矿粒度降低,磁铁矿单体之间、磁铁矿单体和富连生体之间的磁团聚力差异逐渐减小,磁铁矿单体和连生体之间分离难度增大[20]。

通过磨矿细度试验,探索了铁粗精矿中锡石最佳解离的磨矿细度及锡金属在各粒级中的分布情况,试验结果见图 1。试验结果表明,当-0.038 mm 级颗粒含量从 36.61%上升到 72.84%时,锡在-0.038 mm 粒级中的分布率从 27.32%上升到 71.44%,说明提高磨矿细度可有效提高铁粗精矿中锡石的单体解离度,从而降低铁粗精矿中锡石的损失。

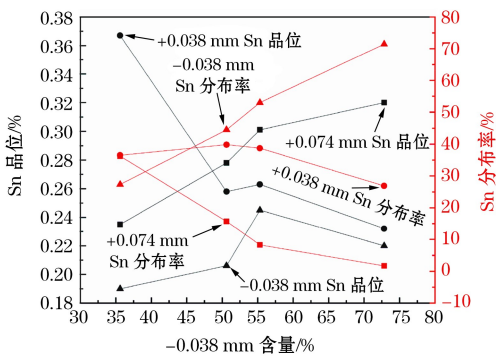


图 1 铁粗精矿磨矿细度试验结果

Fig.1 Results of grinding fineness test for coarse iron concentrate

2.1.2 铁粗精矿磁场强度、脱磁试验

为探索磁团聚对铁粗精矿磁选作业各指标的影响,进行了预先脱磁磁选和未脱磁磁选对比试验。在铁粗精矿-0.038 mm 级含量为 72.84%的磨矿细

度条件下进行磁场强度试验,试验结果见表 4。由表 4 可知,随着磁场强度从 2 000 Oe 增加到 3 600 Oe 时,铁精矿中铁的品位从 59.48%上升到 60.37%,铁精矿中含硫从 13.64%上升到 14.28%,铁的回收率从 95.83%上升到 97.09%,变化都不大。确定磁场度强为 3 000 Oe 时,未脱磁磁选对比脱磁后磁选铁精矿中锡的损失从 89.83%下降到 63.19%,下降了26.64个百分点。说明脱磁磁选能有效降低铁精矿中锡的损失率,铁精矿中磁铁矿与磁黄铁的性质复杂,且与锡石紧密共生,通过磁选难以分离。

表 4 铁粗精矿磁场强度、脱磁试验结果

Table 4 Test results of magnetic field strength and demagnetization for coarse iron concentrate

试验条件	磁场强度/Oe	样品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
				Sn	Fe	S	Sn	Fe	S
未脱磁	2 000	铁精矿	96.12	0.241	57.580	12.860	85.86	98.16	96.33
		尾矿	3.88	0.984	26.760	12.130	14.14	1.84	3.67
		合计	100.00	0.270	56.385	12.832	100.00	100.00	100.00
	3 000	铁精矿	96.93	0.225	56.040	13.060	89.83	98.52	97.04
		尾矿	3.07	0.806	26.650	12.610	10.17	1.48	2.96
		合计	100.00	0.243	55.140	13.050	100.00	100.00	100.00
	3 600	铁精矿	96.59	0.246	54.790	13.120	89.35	98.47	97.38
		尾矿	3.41	0.830	24.090	9.980	10.65	1.53	2.62
		合计	100.00	0.266	53.740	13.010	100.00	100.00	100.00
脱磁	2 000	铁精矿	87.61	0.189	59.480	13.640	62.41	95.83	93.3
		尾矿	12.39	0.805	18.300	6.930	37.59	4.17	6.70
		合计	100.00	0.265	54.380	12.810	100.00	100.00	100.00
	3 000	铁精矿	88.62	0.191	61.730	14.470	63.19	96.36	94.61
		尾矿	11.38	0.867	18.160	6.420	36.81	3.64	5.39
		合计	100.00	0.268	56.770	13.550	100.00	100.00	100.00
	3 600	铁精矿	90.42	0.188	60.370	14.280	68.26	97.09	95.76
		尾矿	9.58	0.825	17.080	5.960	31.74	2.91	4.24
		合计	100.00	0.249	56.220	13.480	100.00	100.00	100.00

2.2 铁精矿选矿试验

2.2.1 铁精矿磨矿试验

为探索磨矿细度对铁精矿中锡石解离的影响,对铁精矿进行再磨试验。试验样品为取自选矿车间铁粗精矿磁选工艺流程的精矿,试验结果见图 2。

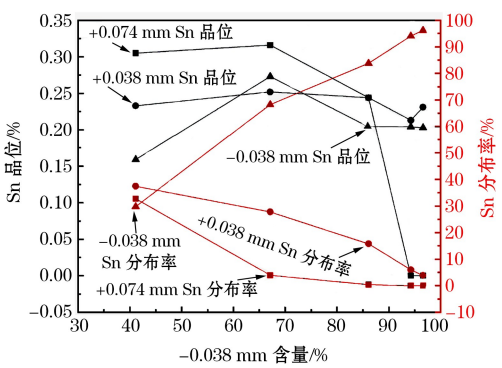


图 2 铁精矿磨矿细度试验结果

Fig.2 Results of grinding fineness test of iron concentrate

由图 2 可知,随着磨矿细度的提高,锡在-0.038 mm 粒级中的分布率逐渐增大,当-0.038 mm 级颗粒含量从 41.14%上升到 94.26%时,锡在-0.038 mm 粒级中的分布率从 29.79%上升到 94.02%,说明提高磨矿细度可有效提高铁精矿中锡石的单体解离度,降低铁精矿中锡的损失率。

2.2.2 铁精矿磁场强度、脱磁试验

为探索磁团聚对铁精矿磁选作业指标的影响,对铁精矿进行了预先脱磁磁选和未脱磁磁选对比试验。铁精矿-0.038 mm 级颗粒含量为 94.26%的条件下进行磁场强度试验,试验结果见表 5。从表 5 可以看出,随着磁场强度从 2 000 Oe 增加到 3 600 Oe 时,铁精矿中铁的品位从 63.03%上升到 64.21%,硫品位从 13.41%上升到 13.48%,铁的回收率从 94.32%上升到 95.91%,变化都不大。磁场强度为 3 000 Oe 时,与未脱磁磁选相对比,脱磁后磁选铁精矿中锡的损失从 74.63%下降到 57.72%,下降了 16.91 个百分点。这说明脱磁磁选能有效降低铁精矿中锡的损失率,而铁精矿中磁铁矿与磁黄铁性质复杂,且与锡石紧密共生,通过磁选难以分离。

表 5 铁精矿磁场强度、脱磁试验结果

Table 5 Test results of magnetic field strength and demagnetization for iron concentrate

试验条件	磁场强度/Oe	样品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
				Sn	Fe	S	Sn	Fe	S
未脱磁	2 000	精矿	88.20	0.234	61.02	13.380	76.58	96.35	95.24
		尾矿	11.80	0.535	17.29	5.000	23.42	3.65	4.76
		合计	100.00	0.270	55.86	12.390	100.00	100.00	100.00
	3 000	精矿	86.98	0.246	59.81	13.170	74.63	95.86	94.49
		尾矿	13.02	0.559	17.25	5.130	25.37	4.14	5.51
		合计	100.00	0.287	54.27	12.124	100.00	100.00	100.00
	3 600	精矿	89.67	0.270	59.40	13.220	82.72	96.95	96.37
		尾矿	10.33	0.490	16.23	4.320	17.28	3.05	3.63
		合计	100.00	0.293	54.94	12.300	100.00	100.00	100.00
脱磁	2 000	精矿	79.67	0.195	63.03	13.410	55.25	94.32	93.04
		尾矿	20.33	0.619	14.89	3.930	44.75	5.68	6.96
		合计	100.00	0.281	53.25	11.483	100.00	100.0	100.00
	3 000	精矿	81.88	0.193	64.93	13.870	57.72	95.08	93.85
		尾矿	18.12	0.639	15.20	4.110	42.28	4.92	6.15
		合计	100.00	0.274	55.92	12.102	100.00	100.00	100.00
	3 600	精矿	82.60	0.220	64.21	13.480	63.78	95.91	93.94
		尾矿	17.40	0.593	13.01	4.130	36.22	4.09	6.06
		合计	100.00	0.285	55.30	11.850	100.00	100.00	100.00

2.2.3 铁精矿浮选脱硫药剂优化试验

以上试验结果表明,磁选难以将铁粗精矿和铁精矿中的含硫矿物脱除干净,因此考虑采用浮选法脱硫。由物相分析可知,硫在铁精矿中主要以磁黄铁矿、黄铁矿以及其他多金属硫化矿物的形式存在,黄铁矿与磁铁矿物理化学性质差异较大,二者分离相对容易,而磁铁矿中夹杂的磁黄铁矿和其他伴生含硫矿物的分离富集则难度较大,采用弱磁选难以将磁黄铁矿与磁铁矿分离[12]。对于高硫铁精矿,必须通过磁选浮选联合工艺才能达到高效脱硫的目的。被石灰抑制的硫化铁矿物的活化方式目前主要有两种,一是采用酸类活化剂清洗硫化铁矿物表面的 CaO、$Ca(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、$CaSO_4$、$Fe(OH)_2$ 等亲水性薄膜而达到活化的目的;二是采用无机盐类活化剂吸附在硫化铁矿物表面,使其生成新的疏水表面[21-22]。结合选厂的生产实际情况,对铁精矿再磨后,选择具有代表性的硫酸、硫酸铜、X-43 以及新型活化剂 FS 开展活化剂种类探索试验,采用一次粗选、两次扫选、一次磁选的工艺流程对铁精矿进行脱硫。粗选的捕收剂用量为 200 g/t,活化剂 FS 的用量为 4 000 g/t,起泡剂 2# 油的用量为 40 g/t。扫选一的捕收剂用量为 50 g/t,起泡剂 2# 油的用量为 20 g/t。扫选二的捕收剂用量为 30 g/t,起泡剂 2# 油的用量为 10 g/t。试验结果见表 6。

表 6 活化剂种类试验结果

Table 6 Test results of different types of activator

活化剂种类及用量/(g/t)	样品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Sn	Fe	S	Sn	Fe	S
H_2SO_4,5 000	硫粗精矿	24.53	0.169	56.69	23.86	18.24	23.52	62.08
	铁精精矿	67.20	0.239	62.06	3.66	70.66	70.53	26.09
	合计	100.00	0.230	59.13	9.43	100.00	100.00	100.00
$CuSO_4$,300	硫粗精矿	29.25	0.183	55.78	21.89	23.57	28.02	68.07
	铁精精矿	63.59	0.241	60.90	3.54	67.46	66.49	23.93
	合计	100.00	0.230	58.24	9.41	100.00	100.00	100.00
X-43,300	硫粗精矿	22.51	0.164	58.02	26.12	15.81	21.41	56.55
	铁精精矿	65.60	0.266	62.69	3.60	74.74	67.42	22.71
	合计	100.00	0.230	58.91	9.64	100.00	100.00	100.00
FS,4 000	硫粗精矿	34.40	0.194	56.77	24.10	28.94	33.18	86.15
	铁精精矿	58.79	0.241	62.06	75.00	61.45	62.00	4.58
	合计	100.00	0.230	58.84	9.62	100.00	100.00	100.00

由表 6 可知,在除硫效果方面,硫活化剂 FS 明显优于 X-43、硫酸、硫酸铜。采用 FS 时,铁精精矿的硫

含量降低至 0.749%,硫精矿的硫品位为 24.10%,硫的回收率为 86.15%。而使用其他三种活化剂时,铁精精矿的硫含量均在 3%以上,且采用 FS 时,硫精矿的硫回收率比采用硫酸铜时的高出 18.08 个百分点。

活化剂 FS 用量试验结果见图 3 和图 4。从图 3 和图 4 可以看出,随着活化剂 FS 用量的增加,硫精矿的硫品位和硫的回收率都呈现先升后降的趋势,铁精精矿的锡含量呈现先降后升高的趋势,而铁精精矿的铁品位则波动不大。当 FS 用量为 4 000 g/t 时,浮选脱硫后可得到铁品位 64.88%、铁回收率65.76%的铁精精矿,铁精精矿的硫含量降至 0.38%,硫精矿的硫品位为 27.60%,硫回收率为 95.84%。综合考虑铁精精矿、高铁硫精矿的回收,同时最大限度地减少锡金属的夹带损失,以及浮选药剂成本的控制,确定活化剂 FS 的最佳用量为 4 000 g/t。

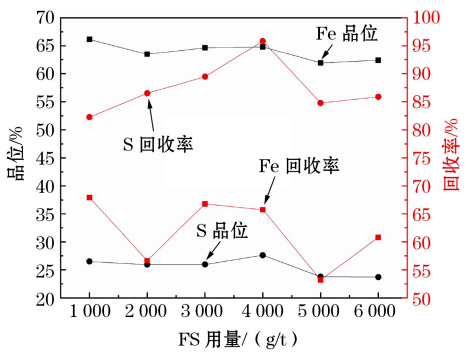


图 3 FS 用量试验结果

Fig.3 Test results of FS dosage

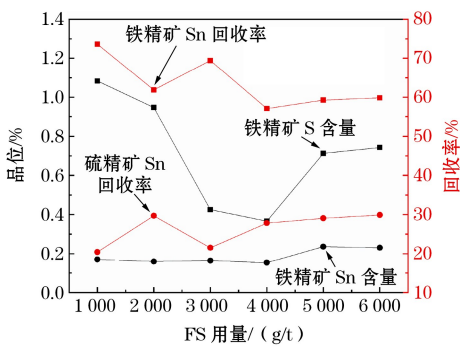


图 4 FS 用量对铁精矿含硫、锡量的影响

Fig.4 Effect of FS dosage on sulfur and tin content of iron concentrate

2.2.4 铁精矿预先分级再磨浮选脱硫试验

(1) 铁精矿预先分级再磨磨矿细度试验。

根据前期试验结果,铁精矿再磨后脱硫效果大幅提升,但在活化剂 FS 用量为 4 000 g/t 时,硫精矿、铁精精矿中锡的回收率分别是 27.83%、57.07%,锡金属损失依然很高。为提高锡金属的回收,采用 0.074 mm 筛子预先分级,对筛上产物再磨,进一步提高锡石的解离度后,再与筛下产物合并一起进行浮选脱硫试验。浮选脱硫试验采用一次粗选两次扫选一次磁选一次精选的试验流程。浮选流程及药剂用量见图 5,试验结果见图 6 和图 7。

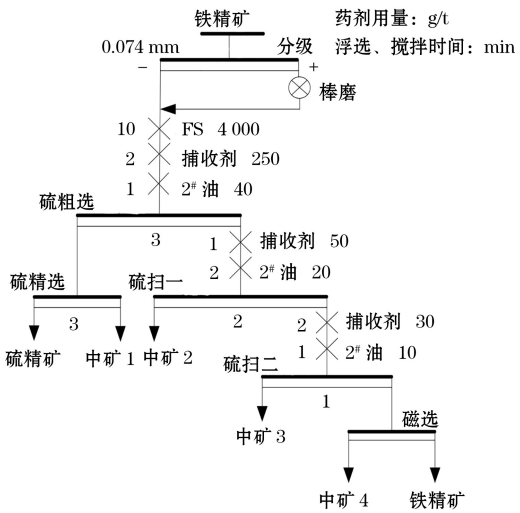


图 5 铁精矿预先分级再磨试验流程

Fig.5 Flow chart of pre-grading and regrinding test of the iron concentrate

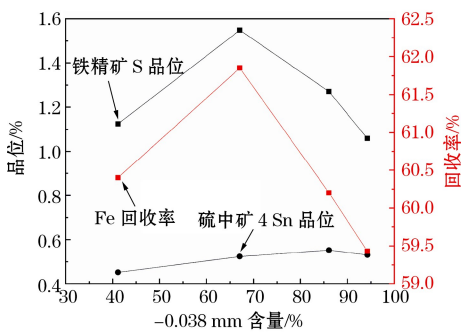


图 6 预先分级磨矿细度试验结果

Fig.6 Results of pre-graded grinding fineness test

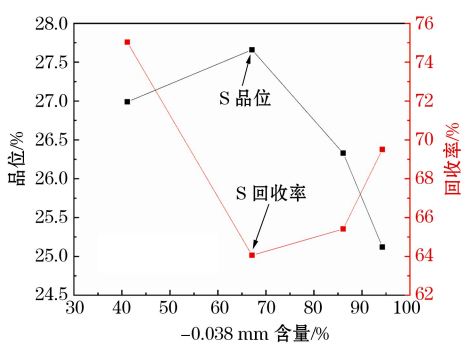


图 7 磨矿细度对硫精矿指标的影响

Fig.7 Effect of grinding fineness on the indicators of sulfur concentrate

从图 6 可以看出，通过铁精矿的预先分级再磨，当磨矿细度由－0.038 mm 含量由 41.14%上升到 94.26%时，浮选脱硫后的铁精矿含硫量由 1.124%降到 1.059%，硫中矿 4 的含锡量由 0.452%富集到 0.531%，说明预先筛分再磨后锡石得到了一定的富集。从图 7 可以看出，随着磨矿细度的提高，硫精矿的硫品位先提高后降低，而硫精矿的硫回收率先降低后提高。

(2) 铁精矿预先分级再磨捕收剂用量试验。

铁精矿预先分级再磨捕收剂用量试验结果见图 8 和图 9。由图 8 可知，在相同的磨矿细度条件下，随着捕收剂用量的增加，硫精矿的硫品位呈现下降趋势，回收率呈现上升趋势，铁精精矿的锡品位呈现下降趋势。当捕收剂用量为 250 g/t 时，硫精矿的硫品位为 25.12%，硫回收率为 70.71%，铁精精矿含硫 0.485%，达到了预期的脱硫效果。

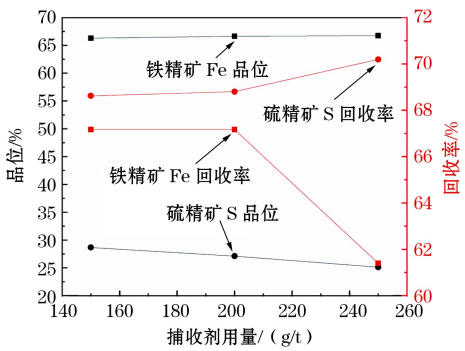


图 8　捕收剂用量试验结果

Fig.8　Test results of collector dosage

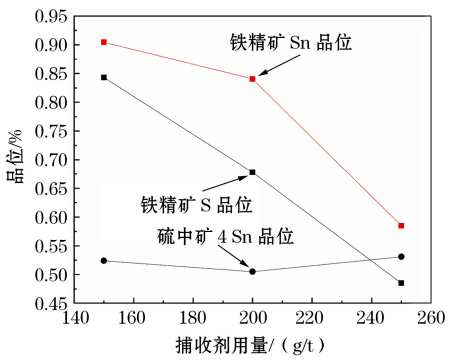


图 9　捕收剂用量对锡富集的影响

Fig.9　Effect of collector dosage on tin enrichment

(3) 铁精矿预先分级再磨闭路试验。

为进一步提高脱硫效果及中矿中锡石的富集比，考虑预先分级和中矿再磨后冲洗磨机时导致的药剂流失，并对中矿用陶瓷研磨至－0.074 mm 后，再返回粗选进行脱硫捕收剂用量试验。在单因素开路试验得出的最佳药剂条件的基础上进行闭路试验，试验流程见图 10，试验结果见表 7。由表 7 可知，铁精矿经过预先分级再磨＋浮选脱硫＋磁选后，得到含铁 66.62%，含硫 0.65%，铁回收率 63.49%的铁精精矿，该部分铁精精矿经浓缩过滤后，可作为高品质铁精矿销售。硫精矿含硫 25.61%，含铁 59.52%，硫回收率 96.06%，该部分硫精矿经浓缩过滤后，可作为高品质硫铁精矿销售，同时得到锡金属富集比 3.69 倍的磁选尾矿(即中矿 4)返回主流程通过摇床重选进一步回收锡金属。

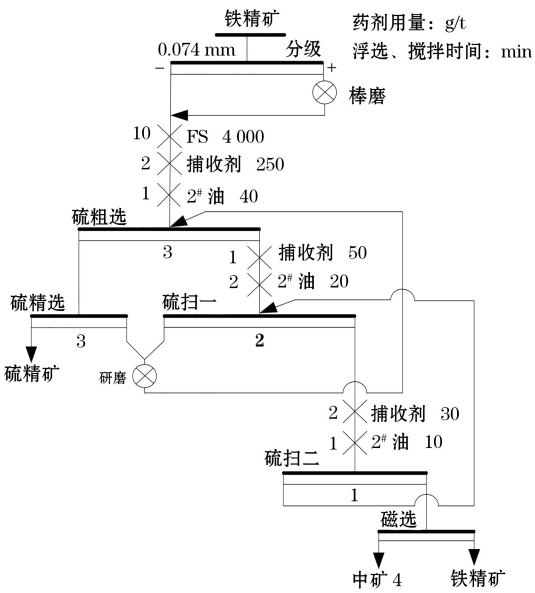


图 10　预先分级再磨浮选脱硫闭路试验流程

Fig.10　Flow chart of closed circuit test of pre-grading, regrinding and flotation desulfurization

表 7　预先分级再磨浮选脱硫闭路试验结果

Table 7　The results of closed circuit test of pre-grading, regrinding and flotation desulfurization

产品	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Sn	Fe	S	Sn	Fe	S
硫精矿	38.14	0.141	59.52	25.61	32.78	36.12	96.06
硫中矿 4	1.96	0.595	12.50	0.59	7.14	0.39	0.11
铁精精矿	59.90	0.164	66.62	0.65	60.08	63.49	3.83
合计	100.00	0.164	62.85	10.17	100.00	100.00	100.00

3　结论

(1) 都龙矿区原矿中锡石的单体解离度较低，仅 41.2%，锡石嵌布粒度较细，与滑石、黑云母、磁黄铁矿的共生关系最为紧密；铁主要赋存在硫矿物中，其次赋存在硅酸盐矿物和磁铁矿中，硫矿物中铁的占有率为 41.77%。矿石中硫化铁矿物主要是磁黄

铁矿和黄铁矿,其含量分别为 6.97%和 2.04%。选厂铁精矿产品中的铁主要分布在较细的粒级中,-0.038 mm 粒级中的分布率为 45.52%,未单体解离的磁黄铁矿与磁铁矿形成紧密包裹连生的微细颗粒。铁精矿中锡与磁铁矿紧密共生,嵌布粒级较细,在-0.038 mm 粒级中的分布率为 36.73%,需要细磨到-0.038 mm 占 95%以上才能充分单体解离。

(2) 预先脱磁可有效降低铁粗精矿中锡的损失率。

(3) 采用铁粗精矿+弱磁+预先脱磁+分级再磨+预先脱磁+浮选脱硫+磁选的工艺流程,在活化剂 FS 用量为 4 000 g/t 的条件下,可将都龙矿区含硫 10.09%的铁粗精矿中的硫降至 0.65%,产出铁品位 66.62%、铁回收率 63.49%的优质铁精矿;可获得硫品位 25.61%、硫回收率 96.06%、含铁品位 59.62%的优质高铁硫精矿。采用试验流程成功地实现磁铁矿和磁黄铁矿的高效分离。此外,可有效降低铁精矿中锡的损失率,同时产出锡富集比为 3.69倍的中矿。

(4) 新型活化剂 FS 对硫铁矿具有较好的活化作用。与硫酸相比,新型活化剂 FS 具有活化后浮选速率快、脱硫后铁精矿品质高、硫精矿回收率高,对设备设施腐蚀度低,不会产生有毒有害气体等优点。

参考文献(References):

[1] 李颉.磁铁矿与石英选择性浮选分离的机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
LI Jie. Mechanism study on selective flotation separation of magnetite and quartz[D].Kunming:Kunming University of Science and Technology,2023.

[2] 周耀文.都龙高硫铁精矿脱硫工艺试验[D].昆明:昆明理工大学,2018.
ZHOU Yaowen. Desulfurization process experiment of Dulong high sulfur iron concentrate[D].Kunming:Kunming University of Science and Technology,2018.

[3] 郑威,王忠强,姚灯磊,等.安徽某高硫铁矿石工艺矿物学研究[J].金属矿山,2020(12):130-135.
JIA Wei, WANG Zhongqiang, YAO Denglei, et al. Study on process mineralogy of a high sulfur iron ore in Anhui Province[J]. Metal Mine,2020(12):130-135.

[4] 马崇振.国外某高硫铁矿提铁降硫试验研究[J].矿冶工程,2022,42(3):76-79.
MA Chongzhen. Experimental research on desulfurization of overseas high-sulfur iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(3): 76-79.

[5] 李孝龙.某微细粒嵌布磁铁矿选矿工艺研究[J].矿冶工程,2021,41(4):57-60.
LI Xiaolong. Processing flowsheet optimization for fine-grained magnetite ore beneficiation [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2021,41(4):57-60.

[6] 符海桃,童雄,谢贤,等.高硫磁铁精矿反浮选脱硫工艺研究现状[J].中国金属通报,2023(5):7-9.
FU Haitao, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Research status of reverse flotation desulfurization process for high sulfur magnetite concentrate[J].China Metal Bulletin,2023(5):7-9.

[7] 岳涛.新疆某高硫磁选铁精矿反浮选降硫试验研究[J].现代矿业,2023,39(12):133-136.
YUE Tao. Experimental study on sulfur reduction by reverse flotation of a high sulfur magnetic iron concentrate in Xinjiang[J].Modern Mining,2023,39(12):133-136.

[8] 韩彬,刘亚伟,牛珊,等.高硫锡粗精矿新型活化剂脱硫试验研究[J].有色金属(选矿部分),2017(1):91-94.
HAN Bin, LIU Yawei, NIU Shan, et al. Experimental study on high-sulfur crude tin concentrates novel desulfurization activator [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2017(1):91-94.

[9] 何庆浪,兰希雄,李品福,等.都龙矿区硫铁矿综合回收利用技术[R].文山州:云南华联锌铟股份有限公司,2008.
HE Qinglang, LAN Xixiong, LI Pinfu, et al. Comprehensive recycling and utilization technology of pyrite in Dulong mining area[R]. Wenshan: Yunnan Hualian Zinc Indium Co., Ltd., 2008.

[10] 云南华联锌铟股份有限公司.一种磁铁矿、磁黄铁矿分离并综合回收锡金属的工艺:202311612050.0[P].2024-02-27.
Yunnan Hualian Zinc Indium Co., Ltd. A process for separating and comprehensively recovering tin metal from magnetite and pyrrhotite: 202311612050.0[P].2024-02-27.

[11] 刘兴华,廖振鸿,严小虎,等.磁铁矿与磁黄铁矿综合回收试验研究[J].矿冶工程,2014,34(4):47-51.
LIU Xinghua, LIAO Zhenhong, YAN Xiaohu, et al. Comprehensive recovery of magnetite and pyrrhotite from a low-grade iron ore[J].Mining and Metallurgy Engineering, 2014,34(4):47-51.

[12] 李博琦,谢贤,纪翠翠,等.吉林某选厂铁精矿脱硫试验研究[J].有色金属工程,2021,11(4):88-95.
LI Boqi, XIE Xian, JI Cuicui, et al. Experimental research on desulfurization of iron concentrate in a concentrator of Jilin[J].Nonferrous Metals Engineering,2021,11(4):88-95.

[13] 莫峰,谢贤,兰希雄,等.某选厂硫精矿提质降砷工艺试验研究[J].矿冶工程,2019,39(6):47-49+53.
MO Feng, XIE Xian, LAN Xixiong, et al. Flowsheet optimization for upgrading and arsenic-reducing of sulfur concentrate[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2019, 39(6):47-49+53.

[14] 王靖,崔毅琦,张洋,等.云南文山多金属含锡硫化矿中含硫矿物的工艺矿物学研究及回收工艺[J].矿冶,2023,32(6):121-130.
WANG Jing, CUI Yiqi, ZHANG Yang, et al. Process mineralogical research and recovery process of sulfur-containing minerals in polymetallic tin-containing sulfide ore in Wenshan, Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32 (6):121-130.

[15] 杨晖,于蕾,魏明安.高硫磁铁矿脱硫的意义及脱除法研究现状[J].矿冶,2022,31(2):35-39.

YANG Hui, YU Lei, WEI Ming'an. Significance of desulfurization of high sulfur magnetite and research status of desulfurization methods[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(2):35-39.

[16] 龙冰,谢加文,黄伟生,等.柿竹园磁铁矿粗精矿提质选矿实验[J].矿产综合利用,2022(4):41-47.
LONG Bing, XIE Jiawen, HUANG Weisheng, et al. Experimental study on beneficiation of coarse concentrate from Shizhuyuan magnetite mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(4):41-47.

[17] 王芳,胡铁鸣,朱丹,等.湖北某铁矿石的工艺矿物学研究[J].现代矿业,2023,39(12):155-158+162.
WANG Fang, HU Tieming, ZHU Dan, et al. Study on process mineralogy of an iron ore in Hubei[J]. Modern Mining,2023,39(12):155-158+162.

[18] 曹洋,王润,段金刚,等.黑龙江某难选锌铁矿浮选-磁选联合选别工艺研究[J].金属矿山,2021(10):100-107.
CAO Yang, WANG Run, DUAN Jingang, et al. Study on flotation-magnetic separation combined beneficiation of certain Zn-Fe ore in Heilongjiang[J]. Metal Mine, 2021(10):100-107.

[19] 张鹏羽,喻明军,魏进超,等.某微细粒嵌布铁矿石磁选工艺研究[J].工程建设,2023,55(9):1-5+12.
ZHANG Pengyu, YU Mingjun, WEI Jinchao, et al. Research on magnetic separation process of a micro-fine embedded iron ore[J]. Engineering Construction,2023,55(9):1-5+12.

[20] 郭小飞,任伟杰,张洺睿,等.磨矿粒度对磁铁矿磁性特征及磁团聚的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(9):2373-2378.
GUO Xiaofei, REN Weijie, ZHANG Mingrui, et al. Effects of grinding fineness on magnetism and agglomeration of magnetite[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2020,51(9):2373-2378.

[21] 胡岳华,章顺力,邱冠周,等.石灰抑制黄铁矿的活化机理研究[J].中南工业大学学报,1995(2):176-180.
HU Yuehua, ZHANG Shunli, QIU Guanzhou, et al. The mechanism of activation flotation of pyrite depressed by lime[J]. Journal of Central South University of Technology, 1995(2):176-180.

[22] 张小普,艾光华,严华山.磁黄铁矿选矿研究进展与发展趋势[J].矿产综合利用,2022(5):102-107.
ZHANG Xiaopu, AI Guanghua, YAN Huashan. Research progress and development trend of pyrrhotite beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5):102-107.