

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.04.006

攀西钒钛磁铁矿粗、细粒钛铁矿混合浮选的可行性研究

胡厚勤¹ 谢海云² 罗荣飞³

(1. 攀钢集团矿业有限公司设计研究院, 四川 攀枝花 617063;

2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

3. 攀钢集团矿业有限公司选钛厂, 四川 攀枝花 617063)

摘 要:攀西地区钒钛磁铁矿中的钛铁矿主要采用粗、细粒分级分选工艺, 存在流程复杂及能耗较高的问题。首先对攀西某选厂粗、细粒钛铁矿性质进行了分析, 其次开展了粗粒钛铁矿、细粒钛铁矿单一浮选试验及混合浮选试验研究。结果表明, 粗、细粒钛铁矿混合浮选指标较好, 工艺可行。对简化钛浮选流程、降低生产成本和提升钛铁矿选矿水平提供了一定借鉴。

关键词:粗粒钛铁矿; 细粒钛铁矿; 分级浮选; 混合浮选

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2023)04-0033-07

Feasibility study on mixed flotation of coarse and fine ilmenite in the west of Panzhihua area

HU Houqin¹ XIE Haiyun² LUO Rongfei³

(1. Design and Research Institute of Panzhihua Group Mining Co. Ltd., Panzhihua 617063, Sichuan, China;

2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. Titanium Plant of Panzhihua Group Mining Co. Ltd., Panzhihua 617063, Sichuan, China)

Abstract: Ilmenite in the west of Panzhihua area is mainly used in coarse-grained and fine-grained classification and separation process, but there are some problems such as complicated process and high energy consumption. In this paper, the properties of coarse-grained and fine-grained ilmenite were firstly analyzed, and then the flotation indexes of coarse-grained and fine-grained ilmenite were separately analyzed. On this basis, the mixed flotation experiment of coarse-grained and fine-grained ilmenite was carried out. The results show that the mixed flotation process of coarse-grained ilmenite is feasible. The research results of this paper provide some reference for simplifying titanium flotation process, reducing production cost and improving ilmenite beneficiation level.

Key words: coarse-grained ilmenite; fine-grained ilmenite; fractional flotation; mixed flotation

攀枝花钛铁矿资源赋存于基性岩-超基性岩(辉长岩)岩体中, 采用浮选工艺回收钛铁矿一直是世界公认的选矿难题^[1,2]。究其原因主要有两方面: 一方面, 该资源中除钛磁铁矿、钛铁矿及少量硫化

物等有用矿物外, 主要脉石矿物为钛辉石与斜长石, 其中钛辉石与钛铁矿表面活性质点相似, 使捕收剂吸附选择性下降^[3-5]; 另一方面, 攀西地区钒钛磁铁矿综合利用的原则流程为先选铁后选钛^[6-9], 为得到高品质的铁精矿, 对原矿进行了细磨, 导致选铁尾矿(即选钛原矿)中-0.038 mm 含量达到 30% 左右, 这部分微细粒级矿物质量小、动量低, 在常规浮选体系中与气泡碰撞黏附概率小, 浮选速率与回收率低, 且易引起细粒混杂而降低精矿品位, 同时由于微细粒级矿物比表

收稿日期: 2022-12-26

基金项目: 攀钢集团矿业有限公司钛精矿提质项目(2022-P6-D1-03)

第一作者: 胡厚勤, 高级工程师, 主要从事选矿科研及设计工作。E-mail: 653364133@qq.com

通信作者: 谢海云, 教授; E-mail: xie-haiyun@163.com

面积大,对药剂的非选择性吸附严重,导致药剂消耗量大^[10-12]。因此,目前采用分级脱泥等预处理方法规避该部分矿物带来的不利影响,以降低钛铁矿浮选作业难度,但这是以损失大量微细粒钛铁矿回收率为代价的;此外,通过预处理的矿物分别进入粗、细粒浮选线进行钛铁矿分选,工艺流程较复杂,能耗较高。

本文在对攀枝花某选钛厂钛铁矿分级分选流程分析的基础上,分析了粗粒、细粒两条浮选线中粗粒钛铁矿和细粒钛铁矿的粒度组成和金属分布,对比研究了粗、细粒钛铁矿分级浮选和粗、细粒钛铁

矿混合浮选的分选指标,探讨了粗、细粒混合浮选的可行性,目的是简化钛铁矿浮选工艺并提升钛铁矿选矿水平。

1 攀枝花某地选钛厂粗粒、细粒钛铁矿分级分选流程的特点

攀枝花某选钛厂在长期生产实践积累的基础上,形成了“分级+强磁+强磁+浮选”工艺流程^[13,14],该工艺极大地提高了攀西地区钛资源综合利用效率,其选别流程见图1。

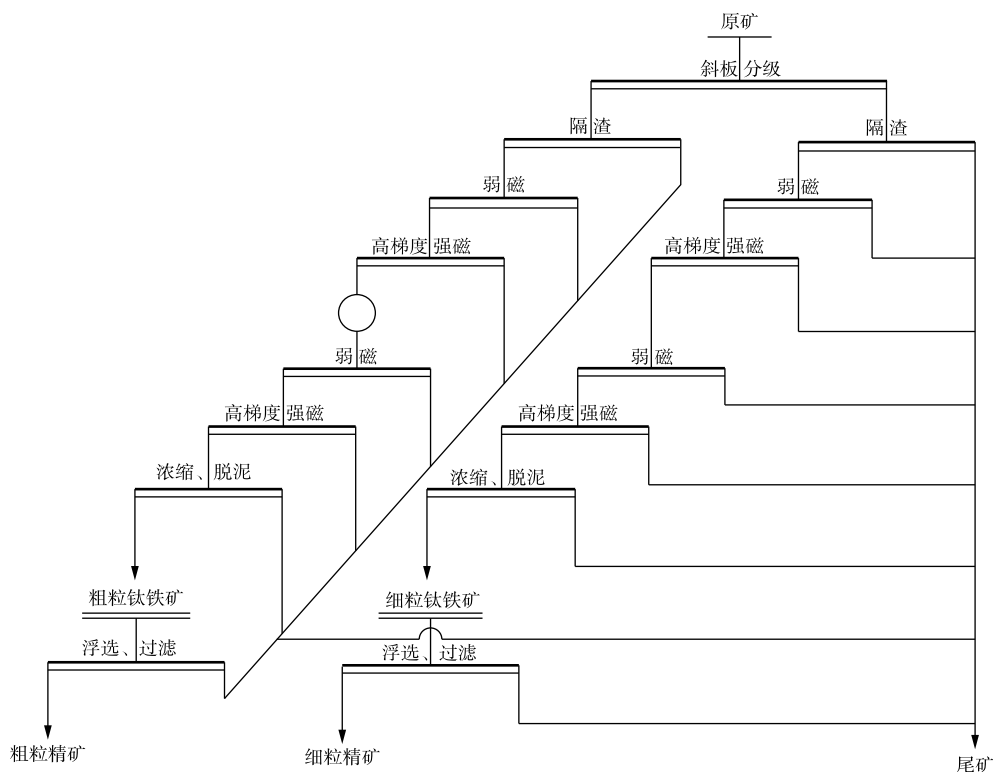


图1 攀枝花某选钛厂钛铁矿分级分选流程

Fig.1 Classification and separation process of ilmenite in a titanium separation plant in Panzhihua

如图1所示,原矿经斜板分级后形成粗粒、细粒和微细粒(尾矿)三种物料,其中粗粒物料进入粗粒生产线“强磁+磨矿+强磁+浮选”流程进行钛铁矿分选;细粒物料进入细粒生产线“强磁+强磁+浮选”流程进行钛铁矿分选;微细粒物料则进入尾矿处理系统。在粗、细粒物料分选过程中,为提高浮选原料入选品位,有效脱除细粒脉石矿物,降低浮选作业难度,两条生产线分别采用了适应粗、细粒矿物性质的两段高梯度强磁作业,并在强磁精矿(分别为粗粒钛铁矿和细粒钛铁矿)进入浮选作业前采用斜板进行浓缩和脱泥,再分别进入粗、细粒

浮选线后采用不同的浮选机进行选别。粗、细粒级分级分选具有针对性强、防止跑粗、强化细粒回收等优势,但存在流程复杂、能耗高、备件组织繁琐及管理难度大等问题。

2 粗、细粒浮选线入选原料分析

通过上述对攀枝花某选钛厂钛铁矿分级分选流程的分析,对进入两条不同浮选线入选原料,即粗粒钛铁矿和细粒钛铁矿进行分析,结果见表1,目的是查明粗、细粒入浮原料的粒度组成及金属分布率,为下一步粗、细粒混合浮选提供研究基础。

表 1 粗粒、细粒钛铁矿粒级筛析结果

Table 1 Sieve analysis results of coarse and fine ilmenite

/%

粒级/mm	粗粒钛铁矿			细粒钛铁矿		
	产率	TiO ₂ 品位	金属分布率	产率	TiO ₂ 品位	金属分布率
+0.18	6.67	8.71	2.87	0.80	5.55	0.21
-0.18~+0.154	20.71	18.57	18.98	3.00	10.28	1.49
-0.154~+0.10	25.86	20.14	25.71	12.45	14.11	8.50
-0.10~+0.074	20.30	21.93	21.97	12.80	15.58	9.65
-0.074~+0.045	18.99	23.16	21.71	28.90	21.50	30.08
-0.045~+0.038	3.43	24.86	4.21	20.45	23.70	23.46
-0.038	4.04	22.82	4.55	21.60	25.43	26.59
合计	100.0	20.26	100.0	100.0	20.66	100.0

由表 1 可知,粗粒钛铁矿中-0.154~+0.038 mm (即常规浮选粒级)的粒级产率约为 69%,金属分布率约为 74%,细粒钛铁矿中-0.154~+0.038 mm 粒级产率约为 75%,金属分布率约为 72%;粗粒钛铁矿中+0.154 mm 粒级产率为 27.38%,细粒钛铁矿中该粒级产率仅为 3.8%;粗粒钛铁矿中-0.038 mm 粒级产率仅为 4.04%,而细粒钛铁矿中该粒级产率为 21.60%。由此可见,进入粗、细粒浮选线入浮原料的常规浮选粒级产率和金属分布率差异不大,具有混合浮选的工艺基础。

3 结果与讨论

3.1 粗粒、细粒钛铁矿浮选探索试验流程

针对该选钛厂的粗粒浮钛原料、细粒浮钛原料和粗、细粒浮钛混合原料(粗粒:细粒为 3:1)三种矿样,在粗粒钛铁矿浮选试验、细粒钛铁矿浮选试验的基础上,探索研究粗、细粒钛铁矿混合浮选工艺的可行性。试验采用 XDF 0.5L 挂槽式浮选机,浮选捕收剂为钛捕收剂,调整剂为硫酸,试验流程为一次粗选两次精选开路流程(见图 2)。

3.2 粗粒钛铁矿浮选试验

采用图 2 的流程,粗粒钛铁矿浮选时药剂制度为:粗选硫酸用量 600 g/t、钛捕收剂用量 2 350 g/t;精选 I 硫酸用量 200 g/t;精选 II 硫酸用量 200 g/t。试验结果见图 3,产品筛析结果见表 2。

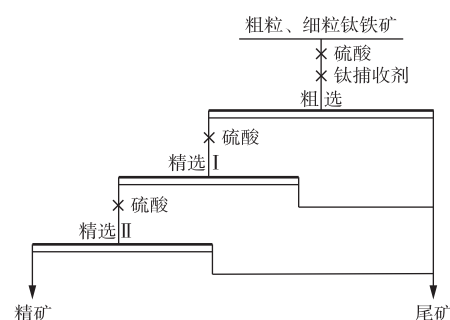


图 2 粗粒、细粒钛铁矿浮选试验流程

Fig. 2 Flotation test flow of coarse and fine ilmenite

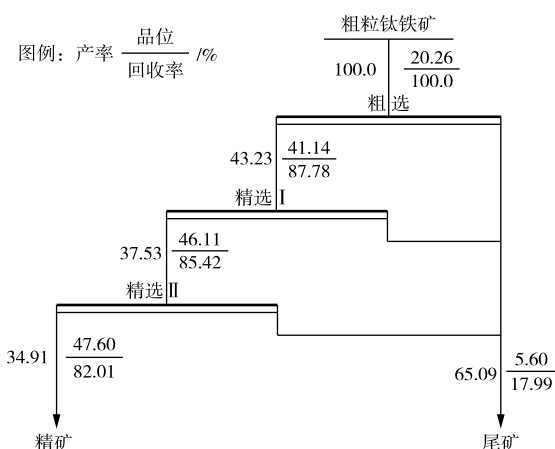


图 3 粗粒钛铁矿浮选试验数质量流程图

Fig. 3 Quality flowsheet of coarse-grained ilmenite flotation test

表 2 粗粒钛铁矿浮选试验产品筛析结果

Table 2 Sieve analysis results of flotation test products of coarse ilmenite

粒级/mm	原矿/%			精矿/%				尾矿/%		
	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 分布率	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 分布率	TiO ₂ 回收率	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 分布率
+0.18	6.67	8.71	2.87	/	/	/	/	3.70	3.50	2.31
-0.18~+0.154	20.71	18.57	18.98	4.80	44.67	4.50	85.49	11.20	4.18	8.36
-0.154~+0.10	25.86	20.14	25.71	10.20	47.75	10.23	80.52	16.20	5.94	17.18
-0.10~+0.074	20.30	21.93	21.97	30.80	48.94	31.67	82.40	43.00	6.12	46.99
-0.074~+0.045	18.99	23.16	21.71	34.80	48.40	35.39	85.51	21.40	5.68	21.70
-0.045~+0.038	3.43	24.86	4.21	7.40	46.53	7.23	90.37	2.10	4.63	1.74
-0.038	4.04	22.82	4.55	12.00	43.52	10.97	90.79	2.40	4.01	1.72
合计	100.0	20.26	100.0	100.0	47.60	100.0	82.01	100.0	5.60	100.0

从图 3 和表 2 结果可知,粗粒钛铁矿浮选获得精矿中 TiO_2 品位 47.60%, TiO_2 回收率为 82.01% 的浮选指标。

3.3 细粒钛铁矿浮选试验

采用图 2 流程,细粒钛铁矿浮选时药剂制度为:粗选硫酸用量 750 g/t、钛捕收剂用量 2 350 g/t;精选 I 硫酸用量 250 g/t;精选 II 硫酸用量 200 g/t。试验结果见图 4,产品筛析结果见表 3。

从图 4 和表 3 中结果可知,细粒钛铁矿浮选获得钛精矿 TiO_2 品位 47.87%, TiO_2 回收率 78.11% 的浮选指标。

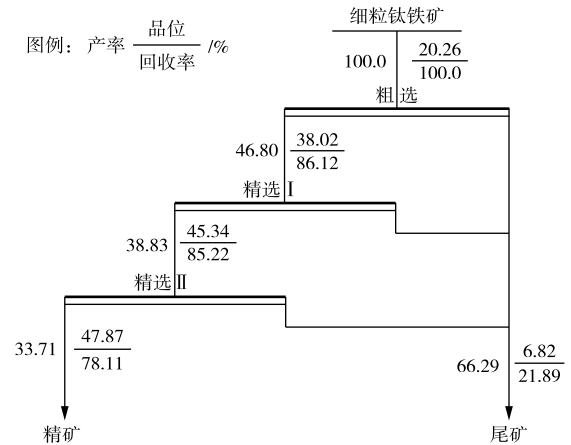


图 4 细粒浮选试验数质量流程图
Fig. 4 Quality flowsheet of fine-grained flotation test

表 3 细粒钛铁矿浮选试验产品筛析结果

Table 3 Sieve analysis results of fine ilmenite flotation test products /%

粒级/mm	原矿			精矿				尾矿		
	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率	TiO_2 回收率	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率
+0.18	0.80	5.55	0.21					3.90	4.63	2.65
-0.18~+0.154	3.00	10.28	1.49					7.50	8.29	9.11
-0.154~+0.10	12.45	14.11	8.50	3.40	48.88	3.47	51.34	10.00	8.06	11.81
-0.10~+0.074	12.80	15.58	9.65	21.10	49.82	21.96	60.56	38.00	7.58	42.22
-0.074~+0.045	28.90	21.50	30.08	38.90	49.53	40.25	80.41	29.40	6.47	27.88
-0.045~+0.038	20.45	23.70	23.46	10.50	48.85	10.71	89.89	4.80	4.25	2.99
-0.038	21.60	25.43	26.59	26.10	43.31	23.61	93.70	6.40	3.56	3.34
合计	100.0	20.66	100.0	100.0	47.87	100.0	78.11	100.0	6.82	100.0

3.4 粗粒、细粒钛铁矿混合浮选试验

采用图 2 流程,粗粒、细粒钛铁矿混合浮选时药剂制度为:粗选硫酸用量 650 g/t、钛捕收剂用量 2 350 g/t;精选 I 硫酸用量 250 g/t;精选 II 硫酸用量 200 g/t。试验结果见图 5,产品筛析结果见表 4。

从图 5 和表 4 试验结果可知,粗、细粒钛铁矿混合浮选可获得钛精矿 TiO_2 品位 47.82%、 TiO_2 回收率为 81.15% 的良好指标。混合浮选较粗粒钛铁矿单独浮选,钛精矿 TiO_2 回收率低 0.86 个百分点;较细粒钛铁矿单独浮选,钛精矿 TiO_2 回收率高 3.04 个百分点。混合浮选的指标介于粗、细粒钛铁矿单独浮选之间,但更趋近于粗粒钛铁矿单独浮选指标。

从钛精矿中各粒级的 TiO_2 回收率看,混合浮选时 -0.074 mm 粒级中 TiO_2 回收率为 85%~95%, +0.074 mm 粒级中 TiO_2 回收率为 70%~80%;粗粒单独浮选时 -0.074 mm 粒级中 TiO_2 回收率为 85%~90%, +0.074 mm 粒级中 TiO_2 回收

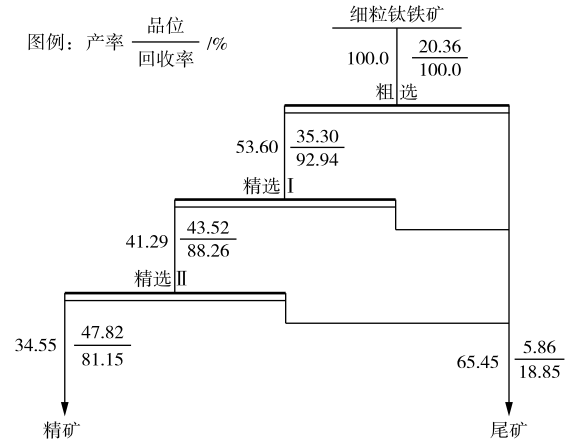


图 5 粗、细粒钛铁矿混合浮选数质量流程图
Fig. 5 Quality flowsheet of mixed flotation of coarse and fine grained ilmenite

率为 80%~85%;细粒单独浮选对 +0.074 mm 粒级回收较差。从浮选常规粒级 -0.154~+0.038 mm 来看,粗粒单独浮选钛精矿 TiO_2 的回收率为 82.88%,细粒单独浮选钛精矿 TiO_2 的回收率为

75.22%，混合浮选时钛精矿 TiO_2 的回收率为 82.28%。由此可见，混合浮选指标趋近于粗粒单

独浮选，较细粒单独浮选指标更优，因此，粗、细粒钛铁矿混合浮选工艺可行。

表 4 粗、细粒钛铁矿混合浮选产品筛析结果

Table 4 Sieve analysis results of mixed flotation products of coarse and fine ilmenite

/%

粒级/mm	原矿			精矿				尾矿		
	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率	TiO_2 回收率	产率	TiO_2 品位	TiO_2 分布率
+0.18	5.20	8.59	2.19					4.30	6.40	4.69
-0.18~+0.154	16.28	18.19	14.55	1.40	47.24	1.38	68.80	11.80	7.72	13.52
-0.154~+0.10	22.51	19.31	21.34	14.60	48.57	14.83	77.21	34.80	6.35	43.74
-0.10~+0.074	18.43	20.83	18.85	11.50	49.65	11.94	82.30	15.20	5.63	17.19
-0.074~+0.045	21.47	22.60	23.83	43.30	49.72	45.02	86.64	27.80	4.98	17.45
-0.045~+0.038	7.69	24.09	9.09	5.50	46.34	5.23	91.39	2.40	3.95	1.44
-0.038	8.43	24.49	10.14	23.70	43.39	21.50	93.40	3.70	3.42	1.97
合计	100.0	20.36	100.0	100.0	47.82	100.0	81.15	100.0	5.86	100.0

3.4.1 粗、细粒钛铁矿混合浮选推荐选别流程
对粗、细粒钛铁矿混合浮选后，可将图 1 中原

有的两条浮选线合并为一条浮选线，简化了流程，如图 6 所示。

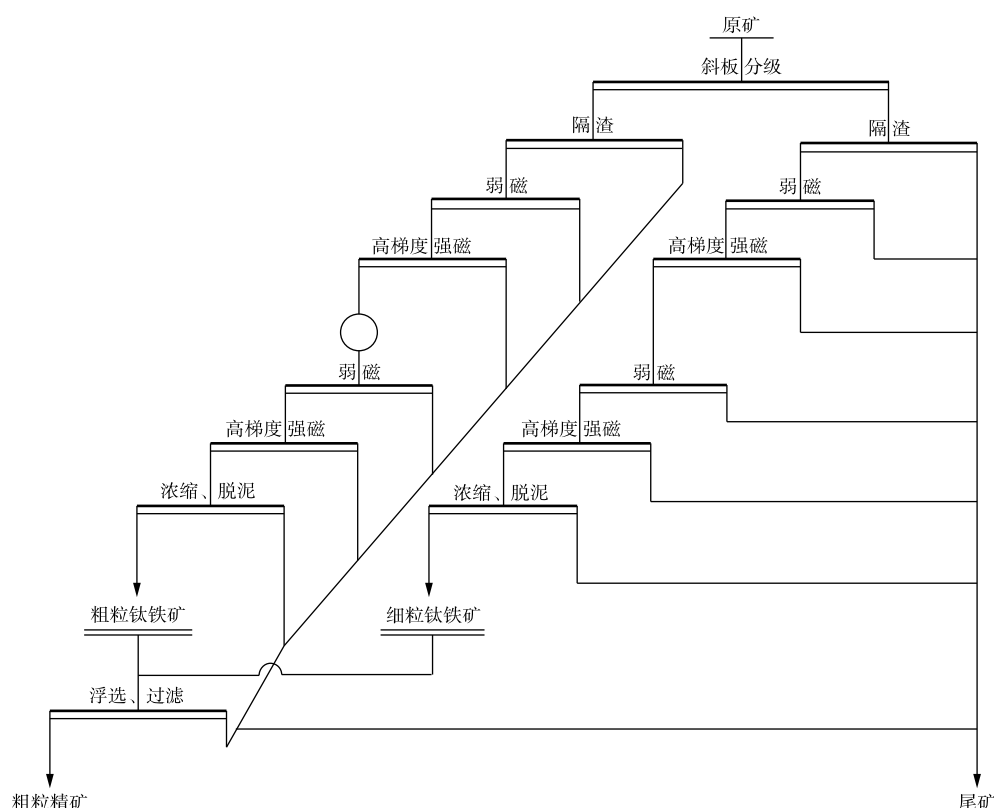


图 6 粗、细粒钛铁矿混合浮选推荐流程

Fig. 6 Recommended process for mixed flotation of coarse and fine ilmenite

3.4.2 粗、细粒钛铁矿混合浮选工艺经济效益预测
若采用粗、细粒钛铁矿混合浮选工艺，预计钛精矿 TiO_2 回收率与粗、细粒单独浮选生产线指标相当；但因采用混合浮选工艺，随着细粒浮选线弃用，粗粒浮选线浮选机大型化(装机功率预计较现

有粗粒生产线上浮 1.5%，见表 5、6)，钛精矿耗电单位成本预计下降约 1.5 元/t，按年产 50 万 t 钛精矿计算，年将创效约 75 万元；此外，因两条浮选线合并，流程简化，人员精简，进一步降低生产成本的空间较大。

表 5 攀枝花某选钛厂现有粗粒浮选线浮选机配置及装机功率

Table 5 Existing coarse flotation line flotation machine configuration and installed power of a titanium concentrator in Panzhihua

工序名称		吸浆浮选机			直流浮选机			合计	
		规格/m ³	数量/台	功率/(kW·台 ⁻¹)	规格/m ³	数量/台	功率/(kW·台 ⁻¹)	数量/台	功率/kW
浮硫	粗选	16	1	75	16	1	30	2	105
	扫选 1	16	1	75	16	—	—	1	75
	扫选 2	16	1	75	16	—	—	1	75
	扫选 3	16	1	75	16	—	—	1	75
浮钛	粗选	16	2	75	16	2	30	4	210
	扫选 1	16	1	75	16	2	30	3	135
	扫选 2	16	1	37	16	1	30	2	67
	精选 1	16	2	45	16	1	30	3	120
	精选 2	16	1	37	16	1	30	2	67
合计		—	11	—	—	8	—	19	929

表 6 粗、细粒钛铁矿混合浮选建议浮选机配置及装机功率

Table 6 Recommended flotation machine configuration and installed power for mixed flotation of coarse and fine grained ilmenite

工序名称		吸浆浮选机			直流浮选机			合计	
		规格/m ³	数量/台	功率/(kW·台 ⁻¹)	规格/m ³	数量/台	功率/(kW·台 ⁻¹)	数量/台	功率/(kW·台 ⁻¹)
浮硫	粗选	24	1	75	24	1	37	2	112
	扫选 1	24	1	75	—	—	—	1	75
	扫选 2	24	1	75	—	—	—	1	75
	扫选 3	24	1	75	—	—	—	1	75
浮钛	粗选	30	1	75	30	2	45	3	165
	扫选 1	30	1	75	30	1	45	2	120
	扫选 2	30	1	55	30	1	45	2	100
	精选 1	24	1	55	24	2	37	3	129
	精选 2	24	1	55	24	1	37	2	92
合计		—	9	—	—	8	—	17	943
较现有		—	-2	—	—	0	—	-2	14

4 结论

1) 攀枝花钒钛磁铁矿中粗粒钛铁矿中-0.154~+0.038 mm(即常规浮选粒级)的粒级产率约为 69%，金属分布率约为 74%，细粒钛铁矿中-0.154~+0.038 mm 粒级产率约为 75%，金属分布率约为 72%，具有粗、细粒混合浮选的工艺基础。

2) 粗粒钛铁矿单独浮选获得精矿 TiO₂ 品位 47.60%、TiO₂ 回收率为 82.01%；细粒钛铁矿单独浮选获得钛精矿 TiO₂ 品位 47.87%、TiO₂ 回收率 78.11%；粗、细粒钛铁矿混合浮选获得精矿 TiO₂ 品位 47.82%、TiO₂ 回收率为 81.15%。混合浮选指标接近于粗粒钛铁矿单独浮选指标，较细粒钛铁矿单独浮选指标更优，粗、细粒钛铁矿混合浮选工艺可行。

3) 粗、细粒钛铁矿的混合浮选工艺具有单位生产成本下降、流程系统简化、管理操作方便等优点。

参考文献

- [1] 朱阳戈. 微细粒钛铁矿浮选理论与技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
ZHU Y G. Research on theory and technology of micro-fine ilmenite flotation[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [2] OMID S N, MEHDI I, AKBAR M. Effect of surface dissolution on kinetic parameters of flotation separation of ilmenite from different gangue minerals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(12): 2615-2626.
- [3] 朱俊士. 中国钒钛磁铁矿选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
ZHU J S. Beneficiation of vanado-titanomagnetite from China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [4] 沈政昌. 浮选机理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 1-249.
SHEN Z C. Flotation machine theory and technology [M].

- Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 1-249.
- [5] 胡岳华. 矿物浮选 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
HU Y H, Mineral flotation [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [6] 王洪彬, 张国华, 肖良初, 等. 攀钢矿业公司选钛厂流程考察报告[R]. 攀枝花: 攀钢矿业公司设计研究院, 2013.
WANG H B, ZHANG G H, XIAO L C, et al. Investigation report of titanium concentrator process of Panzhihua iron and steel mining company [R]. Panzhihua: Design and Research Institute of Panzhihua Iron and Steel Mining Company, 2013.
- [7] 吴本羨. 攀西地区钛铁矿的工艺特征[J]. 矿产综合利用, 1987(1): 74-79.
WU B X. Technological characteristics of ilmenite in Panxi Area[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1987(1): 74-79.
- [8] 陈树民. 攀枝花钒钛磁铁矿钛铁矿回收工艺流程优化探讨[J]. 矿产综合利用, 2009(5): 7-10.
CHEN S M. Research on the technological flowsheet for recovering ilmenite from Panzhihua vanadious titanomagnetite ore and its optimization [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009(5): 7-10.
- [9] 王洪彬, 李金, 张国华. 攀西钒钛磁铁矿中钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 23-29.
WANG H B, LI J, ZHANG G H. Efficient recovery of ilmenite from vanadium bearing titanomagnetite in Panxi area [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23-29.
- [10] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(2): 83-86, 93.
DENG J, XUE X, LIU G G. Current situation and development of comprehensive utilization of vanadium titanomagnetite at Pangang. Journal of Materials and Metallurgy, 2007, 6(2): 83-86, 93.
- [11] PARISA S P, MEHDI I, AKBAR M. Modification of ilmenite surface properties by superficial dissolution method[J]. Minerals Engineering, 2016, 92: 160-167.
- [12] 王洪彬. 攀西细粒级钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(1): 27-30.
WANG H B. Study on efficient recovery process of fine grained ilmenite in Panxi area [J]. Vanadium Titanium Iron & Steel, 2017, 38(1): 27-30.
- [13] 李金, 罗荣飞, 王洪彬, 等. 原生钛铁矿石选矿装备的应用进展与优化建议[J]. 现代矿业, 2021, 37(6): 166-168.
LI J, LUO R F, WANG H B, et al. Application progress and optimization suggestions of primary titanium mineral processing equipment [J]. Modern Mining, 2021, 37(6): 166-168.
- [14] HOU Y L, QING S, WANG H, et al. Mixture of ilmenite and high phosphorus iron ore smelted by oxygen-enriched top-blown smelting reduction [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(10): 2760-2763.

(编辑: 汪东芳)