

印尼海滨砂矿与攀西钒钛磁铁矿选铁差异性研究

王洪彬^{1,2}, 刘志雄^{1*}, 祝勇涛^{1,2}, 陈碧^{1,2}, 张旺¹

(1. 攀钢集团矿业有限公司设计研究院, 四川 攀枝花 617063; 2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要:以攀西某钒钛磁铁矿干抛尾矿作对比样,开展印尼海滨砂矿和攀西钒钛磁铁矿的选铁试验研究。结果表明:获得 TFe 品位相当铁精矿时,印尼海滨砂矿选铁工艺流程较攀西钒钛磁铁矿简单,估算印尼铁精矿选矿成本较攀西铁精矿的低约 80 元/t,印尼铁精矿 S 含量 0.042%,能降低冶炼脱硫成本;印尼海滨砂矿选铁尾矿中钛无利用价值,印尼铁精矿 Cl 含量 0.012%,需特别关注其对高炉的腐蚀。研究成果为今后印尼海滨砂矿资源的利用提供数据支撑和技术支持。

关键词:印尼海滨砂矿;攀西钒钛磁铁矿;选铁;差异性

中图分类号:TD924

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2022)03-0084-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the difference of iron separation between Indonesian beach placer and Panxi vanadium-titanium magnetite

Wang Hongbin^{1,2}, Liu Zhixiong^{1*}, Zhu Yongtao^{1,2}, Chen Bi^{1,2}, Zhang Wang¹

(1. Design and Research Institute of Mining Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617063, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: An experimental study on iron separation of Indonesian beach placer and Panxi vanadium titanomagnetite was carried out by comparing the dry-cast tailings of a vanadium titanomagnetite from Panxi. The results show that the technological process of iron separation for Indonesian beach placer is simpler than that for Panxi vanadium titanomagnetite, and the processing cost of Indonesian iron concentrate is estimated to be about 80 yuan/t lower than that of Panxi concentrate. The S content of Indonesian iron concentrate is 0.042%, which can reduce the cost of smelting and desulfurizing. The titanium is of no use in the tailings of the Indonesian seashore placer, and the Cl content of Indonesian iron concentrate is 0.012%, so the corrosion of the blast furnace should be paid special attention to. The research results will provide data support and technical support for the future utilization of the coastal placer resources in Indonesia.

Key words: Indonesian littoral placer, Panxi vanadium-titanium magnetite, beneficiation iron, difference

收稿日期:2021-10-20

作者简介:王洪彬(1979—),男,四川仁寿人,教授级高工,主要从事钒钛磁铁矿选矿设计研究, E-mail:41666722@qq.com;

*通讯作者:刘志雄(1966—),男,四川泸州人,高级工程师,主要从事钒钛磁铁矿选矿设计研究, E-mail:2152035205@qq.com。

0 引言

钒钛磁铁矿是一种由铁、钒、钛和多种有价金属元素共生组成的复合型矿产资源^[1], 主要分为原生岩矿型和次生砂矿型两种矿床类型。岩矿型钒钛磁铁矿主要分布于俄罗斯、南非和中国等; 砂矿型钒钛磁铁矿主要为海滨砂矿, 在印度尼西亚、马来西亚、澳大利亚、新西兰等近海国家分布广泛^[2], 海滨砂矿是指在海滨地带由河流、海浪、潮汐及海流共同作用下, 由砂质沉积物中的重矿物碎屑富集而形成的矿床^[3]。国内钒钛磁铁矿主要分布在攀西的攀枝花、红格、白马、西昌太和四大矿区^[4], 攀西钒钛磁铁矿利用普遍采用“先选铁后选钛”的原则流程^[5], 并已逐步形成“两段阶段磨选”选铁和“强磁-强磁-浮选”选钛的成熟工艺流程^[6]。除新西兰北海岸的含钒钛海滨砂矿通过重选获得含钒钛的铁精矿后, 采用回转窑预还原-电炉法得到小规模利用外, 其他尚未得到利用^[7]。

近年来我国钒、钛、铁等矿产进口量居高不下^[8],

伴随着我国“一带一路”国际合作的深入开展^[9], 许多钢铁生产企业越来越关注国外的铁矿资源, 特别是与我国邻近的印度尼西亚海滨砂矿成为关注的重点。印尼海滨砂矿主要分布在爪哇岛南部沿海, 西苏门答腊、南加里曼丹和南苏拉威西, 探明储量约21亿t, 但开发利用较少。笔者以 TFe 品位接近的攀西某钒钛磁铁矿干抛尾矿作为对比样, 进行印尼海滨砂矿和攀西钒钛磁铁矿的选铁对比试验研究, 从选铁流程指标、选铁成本和精矿质量上分析其差异性, 以便为今后利用印尼海滨砂矿资源提供数据支撑和技术支持。

1 试样性质研究

1.1 试样元素分析

试样为印尼某海滨砂矿(以下简称“印尼矿”), 属细砂状; 对比样为攀西某钒钛磁铁矿干抛尾矿(以下简称“攀西矿”), 属大块状, 将其破碎至-3 mm, 其化学多元素分析结果见表1。

表1 试样化学多元素分析结果
Table 1 Results of chemical multi-element analysis of samples

矿种	TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S
印尼矿	18.36	11.32	14.94	3.18	0.186	8.02	18.34	3.80	37.96	0.016
攀西矿	15.48	12.65	8.06	6.13	0.124	9.77	6.22	12.85	37.91	0.320

从表1可看出, 印尼矿和攀西矿中有价元素均为铁和钛, 其中印尼矿 TFe 含量 18.36%、TiO₂ 含量 3.18%, 攀西矿 TFe 含量 15.48%、TiO₂ 含量 6.13%; 印尼矿的 V₂O₅ 含量 0.186%, 高出攀西矿约 1/2; 印尼矿的 MgO 含量 18.34%, 为攀西矿的 3 倍, 而 Al₂O₃ 含量 3.80%, 约为攀西矿的四分之一; 印尼矿有害元素 S 含量 0.016%, 较攀西矿低很多。

1.2 试样粒度筛析

从表2可看出, 印尼矿细且较均匀, 0.4 mm 以上粒级产率 4.21%; 攀西矿粗且不均匀, 2 mm 以上粒级产率 18.97%。印尼矿 TFe 和 TiO₂ 品位都随粒度变细呈逐渐提高的趋势; 攀西矿 TFe 和 TiO₂ 品位都随粒度变细呈逐渐提高然后下降的趋势。印尼矿 TFe 和 TiO₂ 金属主要分布在 0.125~0.25 mm 的中间粒级, 其分布率分别为 92.74%、91.64%; 攀西矿 TFe 和 TiO₂ 金属主要分布在 0.4~2 mm 的较粗与 0.074 mm 以下的较细粒级, 其分布率分别为

66.20%、65.01%。

1.3 矿物组成赋存

试样矿物组成及单体解离度测定结果如表3所示。从表3可看出, 印尼矿中钛磁铁矿含量 22.42%, 较攀西矿的 9.53% 高 12.89 个百分点; 印尼矿中钛铁矿、硫化物、脉石含量都较攀西矿低, 分别低 4.24、1.53 和 5.42 个百分点。印尼矿中钛磁铁矿、钛铁矿、脉石的单体解离度分别为 82.92%、60.89%、84.27%, 较攀西矿分别高 51.66、33.97、5.08 个百分点, 表明攀西矿下步选铁试验需要加大磨矿。

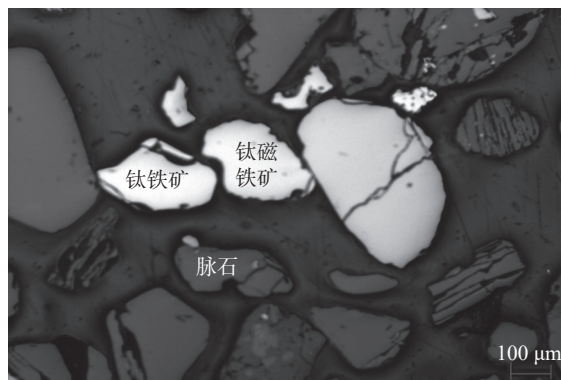
镜鉴结果表明, 印尼矿中钛磁铁矿以圆粒状为主, 嵌布粒度 0.003~0.31 mm, 大部分以单体呈现(见图1(a)), 部分呈圆粒状稀疏嵌布于脉石中(见图1(c))。攀西矿中钛磁铁矿以半自形晶与钛铁矿连生, 嵌布粒度 0.03~0.70 mm, 单体很少(见图1(b)), 大部分的钛磁铁矿品质不高, 含杂质较多, 微细粒级的与钛铁矿一起嵌布在脉石中形成包裹体(见图1(d))。

表 2 试样全粒级筛析结果
Table 2 Results of full size sieve analysis

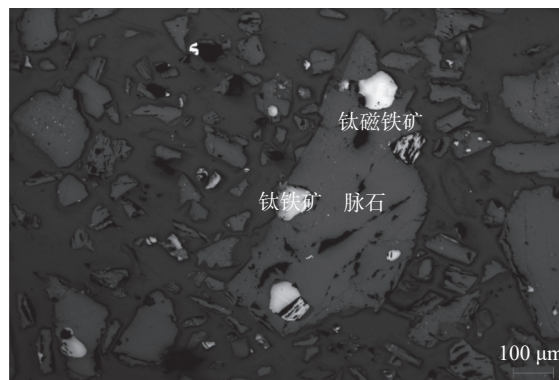
粒级/mm	产率/%		TFe品位/%		TiO ₂ 品位/%		TFe分布率/%		TiO ₂ 分布率/%	
	印尼矿	攀西矿	印尼矿	攀西矿	印尼矿	攀西矿	印尼矿	攀西矿	印尼矿	攀西矿
+2		18.97		13.61		4.89		16.58		15.26
-2 ~ +0.90		14.83		14.51		5.67		13.82		13.84
-0.90 ~ +0.40	4.21	18.72	9.79	14.65	1.03	5.75	2.27	17.61	1.38	17.72
-0.40 ~ +0.25	30.37	8.87	12.50	15.92	1.39	6.31	20.90	9.07	13.39	9.21
-0.25 ~ +0.18	45.35	7.00	15.92	16.56	2.39	6.69	39.75	7.44	34.38	7.70
-0.18 ~ +0.154	11.30	2.51	30.19	16.95	7.04	7.05	18.79	2.74	25.24	2.92
-0.154 ~ +0.125	6.56	6.75	36.84	17.45	8.96	7.11	13.30	7.56	18.63	7.90
-0.125 ~ +0.10	2.21	1.23	41.03	17.79	9.99	7.47	4.99	1.41	6.99	1.51
-0.10 ~ +0.074		4.93		17.65		7.09		5.58		5.75
-0.074		16.21		17.47		6.82		18.19		18.19
合计	100.00	100.00	18.16	15.57	3.15	6.08	100.00	100.00	100.00	100.00

表 3 主要矿物含量及单体解离度测定结果
Table 3 Determination results of main mineral content and monomer dissociation degree

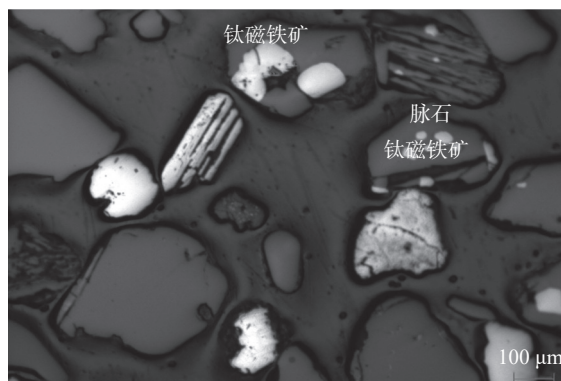
矿种	质量分数/%				单体解离度/%			
	钛磁铁矿	钛铁矿	硫化物	脉石	钛磁铁矿	钛铁矿	硫化物	脉石
印尼矿	22.42	2.47	0.34	76.47	82.92	60.89	7.36	84.27
攀西矿	9.53	6.71	1.87	81.89	31.26	26.92	48.78	79.19



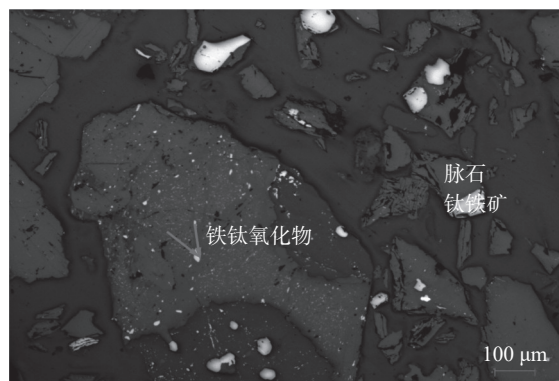
(a) 圆粒状的钛磁铁矿、钛铁矿反光, ×100



(b) 钛磁铁矿、钛铁矿沿脉石边缘嵌布反光, ×100



(c) 圆粒状钛磁铁矿包裹于脉石中反光, ×100



(d) 铁钛氧化物呈小粒状、点状嵌布在脉石中反光, ×100

图 1 印尼矿、攀西矿中钛磁铁矿赋存状态

Fig. 1 Occurrence of titanomagnetite in Indonesian and Panxi ores

2 试验方案

印尼矿粒度 0.9 mm 以下, 其钛磁铁矿嵌布粒度 0.003 ~ 0.31 mm, 大部分以单体呈现, 部分以圆粒状包裹于脉石中; 攀西矿粒度 3 mm 以下, 其钛磁铁矿嵌布粒度 0.03 ~ 0.70 mm, 单体较少。因此, 本着“能抛早抛、能收早收”的原则, 拟在实验室对印尼矿和攀西矿分别采用“一段磨选”、“两段阶磨阶选”原则流程进行钛磁铁矿的高效回收^[10], 其设备为 XMQ350×160 mm 锥形球磨机、XCRS-Ø400×240 mm

电磁湿法多用鼓形磁选机。

3 试验结果及分析

3.1 流程指标差异

3.1.1 磨选试验

根据攀西钒钛磁铁矿选铁经验及条件试验确定两种矿石的磨选试验参数: 磨矿浓度 75%, 印尼矿磁场强度 96 kA/m, 攀西矿一段、二段磁场强度分别为 240 kA/m 与 96 kA/m。试验结果见表 4 ~ 6。

表 4 印尼矿磨选试验结果
Table 4 Test results of Indonesian mine grinding

磨矿时间/min	-0.074 mm含量/%	产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
				TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
0	0	精矿	17.84	43.51	8.86	43.11	51.12
		尾矿	82.16	12.47	1.84	56.89	48.88
		给矿	100.00	18.39	3.13	100.00	100.00
10	80.60	精矿	13.84	54.27	10.64	40.84	47.05
		尾矿	86.16	12.63	1.92	59.16	52.95
		给矿	100.00	18.39	3.13	100.00	100.00
15	95.40	精矿	13.18	55.48	10.66	39.76	44.89
		尾矿	86.82	12.76	1.99	60.24	55.03
		给矿	100.00	18.39	3.13	100.00	100.00
20	99.40	精矿	12.51	56.40	10.68	38.37	42.69
		尾矿	87.49	12.96	2.05	61.63	58.11
		给矿	100.00	18.39	3.13	100.00	100.00

表 5 攀西矿一段磨选试验结果
Table 5 Test results of primary grinding in Panxi mine

磨矿时间/min	-0.074 mm含量/%	产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
				TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
0	16.21	精矿	37.00	23.53	7.81	56.24	47.14
		尾矿	63.00	10.75	5.14	43.76	52.86
		给矿	100.00	15.48	6.13	100.00	100.00
3	35.40	精矿	21.12	36.39	9.42	49.65	32.46
		尾矿	78.88	9.88	5.25	50.34	67.54
		给矿	100.00	15.48	6.13	100.00	100.00
5	50.10	精矿	18.81	40.17	9.57	48.81	29.37
		尾矿	81.19	9.76	5.33	51.19	70.63
		给矿	100.00	15.48	6.13	100.00	100.00
7	64.00	精矿	16.19	44.50	9.82	46.54	25.94
		尾矿	83.81	9.87	5.42	53.46	74.06
		给矿	100.00	15.48	6.13	100.00	100.00

表 6 攀西矿二段磨选试验结果
Table 6 Test results of secondary grinding in Panxi mine

磨矿时间/min	-0.074 mm 含量/%	产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
				TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
3	76.50	精矿	57.62	52.48	10.33	83.10	63.19
		尾矿	42.38	14.51	8.18	16.90	36.81
		给矿	100.00	36.39	9.42	100.00	100.00
5	83.70	精矿	55.85	53.27	10.34	81.75	61.30
		尾矿	44.15	15.04	8.26	18.25	38.70
		给矿	100.00	36.39	9.42	100.00	100.00
7	90.00	精矿	54.08	54.15	10.35	80.47	59.42
		尾矿	45.92	15.47	8.32	19.53	40.58
		给矿	100.00	36.39	9.42	100.00	100.00
9	93.60	精矿	53.54	54.26	10.37	79.83	58.94
		尾矿	46.46	15.80	8.33	20.17	41.06
		给矿	100.00	36.39	9.42	100.00	100.00

从表 4 可看出,随着磨矿细度-0.074 mm 含量增加,精矿产率和回收率逐渐降低,精矿中 TFe 和 TiO₂ 品位逐渐提高;当磨矿细度-0.074 mm 含量 80.60% 时,可获得产率 13.84%、TFe 品位 54.27%、TiO₂ 品位 10.64%、TFe 回收率 40.84% 的精矿,此时尾矿 TFe 品位 12.76%;综合考虑成本、精矿品位和回收率等,确定印尼矿磨矿细度为-0.074 mm 含量 80.60%。

从表 5 可看出,随着磨矿细度-0.074 mm 含量增加,精矿产率和回收率逐渐降低,精矿中 TFe 和 TiO₂ 品位逐渐提高;当磨矿细度-0.074 mm 含量 35.40% 时,可获得产率 21.12%、TFe 品位 36.39%、TiO₂ 品位 9.42%、TFe 回收率 49.65% 的精矿,此时尾矿 TFe 品位 9.88%;综合考虑成本、精矿产率和

回收率,确定攀西矿一段磨矿细度为-0.074 mm 含量 35.40%。

从表 6 可看出,随着磨矿细度-0.074 mm 含量增加,精矿产率和回收率逐渐降低,精矿中 TFe 和 TiO₂ 品位逐渐提高;当磨矿细度-0.074 mm 含量 90.00% 时,可获得产率 54.08%、TFe 品位 54.15%、TiO₂ 品位 10.35%、TFe 回收率 80.47% 的精矿,此时尾矿 TFe 品位 15.47%;综合考虑成本、精矿产率和回收率,确定攀西矿二段磨矿细度为-0.074 mm 含量 90.00%。

3.1.2 差异性分析

将攀西矿较佳磨矿细度下的一段磨选和二段磨选指标计算汇总,并与印尼矿进行流程与指标的比较,比较结果见表 7。

表 7 流程与指标比较结果
Table 7 Comparison of processes and indicators

%

流程	指标					磨矿细度(-0.074 mm 含量)
	产品	产率	TFe 品位	TiO ₂ 品位	TFe 回收率	
印尼矿一段磨选	精矿	13.84	54.27	10.64	40.84	80.60
	尾矿	86.16	12.59	1.98	59.16	
攀西矿“破碎+两段阶磨阶选”	精矿	11.42	54.15	10.35	39.95	90.00
	尾矿	88.58	10.49	5.59	60.05	

从表 7 可看出,印尼矿采用一段磨选流程,在磨矿细度-0.074 mm 含量 80.60% 时获得 TFe 品位

54.27% 的精矿,而攀西矿需要“破碎+两段阶磨阶选”流程、在二段磨矿细度-0.074 mm 含量 90.00%

时获得 TFe 品位 54.15% 的精矿, 印尼海滨砂矿不破碎、少磨矿的特点体现明显。在精矿 TFe 品位基本相同的情况下, 印尼矿尾矿 TFe 品位 12.59%, 较攀西矿的 10.49% 高 1.10 个百分点, 分析认为是呈圆粒状稀疏嵌布于脉石中的少部分铁矿物在选别时进入尾矿导致; 印尼矿尾矿 TiO₂ 品位 1.98%, 较攀西矿的 5.59% 低 3.61 个百分点, 从历来的钛精矿市

场行情看无回收钛铁矿价值。

3.2 选铁成本差异

根据印尼矿与攀西矿的选铁流程指标, 结合两矿尾矿处理实际情况及攀西矿选铁工序成本价格, 对印尼矿和攀西矿进行了选铁成本估算对比, 结果见表 8。

表 8 选铁成本估算结果
Table 8 Estimated results of iron selection cost

工序	印尼矿			攀西矿		
	单位成本/(元·t ⁻¹)	给矿/t	工序成本/元	单位成本/(元·t ⁻¹)	给矿/t	工序成本/元
破碎	0	0	0	5	1	5
一段磨选	18	1	18	12	1	12
二段磨选	0	0	0	15	0.211 2	3.168 0
尾矿处理	2	0.861 6	1.723 2	6	0.885 8	5.314 8
过滤	5	0.138 4	0.692 0	5	0.114 2	0.571 0
单位原矿成本			20.42			26.05
单位精矿成本			147.51			228.14

从表 8 可看出, 因印尼矿较攀西矿不需要破碎、二段磨矿及尾矿处理单位成本低等原因, 导致印尼矿单位原矿成本较攀西矿低 5.63 元, 同时因选比的差异加剧印尼矿单位精矿成本较攀西矿低 80.63 元。因此, 不考虑原料采运成本的前提下, 在原矿品位接

近、精矿 TFe 品位相当的情况下, 印尼矿的选铁成本低于攀西矿。

3.3 精矿质量差异

为掌握铁精矿中元素含量情况, 对印尼铁精矿和攀西铁精矿进行了化学多元素分析, 结果见表 9。

表 9 精矿化学多元素分析结果
Table 9 Results of chemical multi-element analysis of concentrate

矿种	TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	CaO
印尼精矿	54.27	29.08	45.27	10.64	0.68	0.72
攀西精矿	54.15	31.47	43.34	10.35	0.61	1.16
差值	0.12	-2.39	1.93	0.29	0.07	-0.44
矿种	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	P	Cl
印尼精矿	3.72	3.67	4.60	0.042	0.027	0.012
攀西精矿	2.24	3.70	4.53	0.260	0.004	0
差值	1.48	-0.03	0.07	-0.218	0.023	0.012

从表 9 可看出, 印尼精矿和攀西精矿中有价元素铁、钛、钒的含量相当; 印尼精矿的造渣元素 (CaO+MgO+Al₂O₃+SiO₂)=12.71%, 较攀西精矿的 11.63% 高 1.08 个百分点; 印尼精矿有害元素 S 含量 0.042% 较攀西精矿低 0.218 个百分点, 但 Cl 含量较攀西精矿高 0.012 个百分点, 能降低冶炼脱硫成本, 同时需特别关注 Cl 元素对高炉的腐蚀。

4 结论

1) 印尼海砂矿属均匀细砂状, 粒度在 0.9 mm 以下, TFe 和 TiO₂ 品位都随粒度变细呈逐渐提高的趋势, 钛磁铁矿大部分以单体呈现; 攀西钒钛磁铁矿属于大块状, 实验室需破碎处理, TFe 和 TiO₂ 品位都随粒度变细呈逐渐提高然后下降的趋势, 钛磁铁

矿单体很少。

2) 获得 TFe 品位相当的精矿时, 印尼海砂矿选铁工艺流程较攀西钒钛磁铁矿简单, 仅需要一段磨选流程, 印尼海砂矿选矿成本较攀西钒钛磁铁矿低约 80 元/t, 但其选铁尾矿 TFe 品位稍高于攀西矿,

同时其尾矿中 TiO_2 品位较低, 从历来的钛精矿市场行情看无回收钛铁矿价值。

3) 印尼铁精矿 S 含量 0.042%, 能降低冶炼脱硫成本, 但 Cl 含量 0.012%, 需特别关注其对高炉的腐蚀。

参考文献

- [1] Ou Yang, Sun Yongsheng, Yu Jianwen, *et al.* Research status and development prospect of utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(4): 267.
(欧杨, 孙永升, 余建文, 等. 钒钛磁铁矿加工利用研究现状及发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 267.)
- [2] Qian Youjun, Pei Xiaodong. Experimental study on beneficiation of a beach placer iron ore in the Philippines[J]. *Modern Mining*, 2014, (5): 40.
(钱有军, 裴晓东. 菲律宾某海滨砂铁矿石选矿试验研究[J]. 现代矿业, 2014, (5): 40.)
- [3] Liao Qian, Gong Wenyong, Zhang Jianwen, *et al.* Experimental study on pre-enrichment by gravity separation in a beach placer[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2020, 36(1): 15.
(廖乾, 龚文勇, 张建文, 等. 某海滨砂矿重选预富集试验研究[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 15.)
- [4] Wen Xiaolian, Guo Mingbin, Ran Dingwei. Present situation, problems and countermeasures of titanium resources utilization in Panzhihua region[J]. Metal Mine, 2008, (10): 5-8.
(文孝廉, 郭明彬, 冉定伟. 攀枝花地区钛资源利用现状、存在问题及对策[J]. 金属矿山, 2008, (10): 5-8.)
- [5] Wang Hongbin, Li Jin, Zhang Guohua. Efficient recovery of ilmenite from vanadium bearing titanomagnetite in Panxi[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23-29.
(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.)
- [6] Wang Hongbin. Study on efficient recovery process of fine grained ilmenite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(1): 27-30.
(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.)
- [7] Yang Tao, Chen Hanyu, Song Fumei, *et al.* Research on developing and utilizing an Indonesia beach iron sand[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2016, (2): 29.
(杨涛, 陈汉宇, 宋复梅, 等. 对印尼某海滨砂矿的开发利用研究[J]. 矿产综合利用, 2016, (2): 29.)
- [8] Gao Yongzhang. Vanadium resources and it's supply and demand situation in China[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 5-10.
(高永璋. 中国钒矿资源及供需形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 5-10.)
- [9] Liu Chao, Chen Zhiqiang, Lv Haozi, *et al.* Experimental study on beneficiation of a weathered V-Ti iron ore from abroad[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2): 118.
(刘超, 陈志强, 吕昊子, 等. 国外某风化型钒钛磁铁矿选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(2): 118.)
- [10] Wang Hongbin, Wang Yong, Wang Yong, *et al.* Separation production line of vanadium-titanium magnetite and separation method of vanadium-titanium magnetite, Chinese patent: 201610549937.3 [P]. 2018-04-13.
(王洪彬, 王勇, 王勇, 等. 钒钛磁铁矿选别生产线及钒钛磁铁矿选别方法, 中国专利: 201610549937.3[P]. 2018-04-13)

编辑 杨冬梅