

攀西某高铬型钒钛磁铁矿选铁试验研究

蔡先炎, 陈福林*, 李 硕, 王志杰, 黄 延, 钟 祥, 吴 宁

(攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 利用 Zeiss Sigma 500 扫描电子显微镜、Bruker 能谱仪、AMICS 自动矿物分析系统和筛分、磨矿、磁选等手段对攀西某高铬型钒钛磁铁矿开展了矿物特性及实验室抛尾选铁试验。矿样主要矿物为钛磁铁矿、透辉石、橄榄石、钛铁矿和角闪石等, 脉石矿物与钛铁矿和钛磁铁矿嵌布关系复杂, 钛铁矿与钛磁铁矿紧密共生, V 和 Cr 赋存于钛磁铁矿, 钛磁铁矿内存在微米级客晶矿物, 其限制了铁精矿 TFe 品位提高和 TiO_2 含量降低。试样采用湿式强磁选抛尾, 效果良好, 抛尾精矿需在较细粒度时才能实现钛铁矿与钛磁铁矿明显解离和显著分离, 磨矿选铁时 V 和 Cr 主要进入弱磁精矿。试样采用湿式强磁选预先抛尾-三段阶段磨矿阶段选铁工艺, 在磨矿细度 $-38\ \mu\text{m}$ 占 97.58% 时, 获得了 TFe 57.06%、 TiO_2 11.07%、 V_2O_5 0.591%、Cr 1.10% 的含铬钒钛铁精矿, 相对于原矿, TFe、 TiO_2 、 V_2O_5 、Cr 的回收率分别为 67.51%、38.66%、90.95%、87.55%。

关键词: 高铬钒钛磁铁矿; 预先抛尾; 阶段磨矿-阶段选铁; 工艺矿物学

中图分类号: TD951

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)02-0090-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on iron separation test of a high chromium vanadium-titanium magnetite in Panxi

CAI Xianyan, CHEN Fulin*, LI Shuo, WANG Zhijie, HUANG Yan,
ZHONG Xiang, WU Ning

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The mineral characteristics and laboratory discarding tailings and iron separation of a high chromium vanadium-titanium magnetite from Panxi were studied by using Zeiss Sigma 500 scanning electron microscope, Bruker energy spectrometer, AMICS automatic mineral analysis system, sieving, grinding and magnetic separation. The main minerals in the ore are titanomagnetite, diopside, olivine, ilmenite and hornblende. The embedding relationship between gangue, ilmenite and titanomagnetite is complex. The ilmenite is closely coexisting with titanomagnetite, and V, Cr are occurred in titanomagnetite. There are micrometer sized guest crystal minerals within titanomagnetite, which limites the increase of TFe grade and the decrease of TiO_2 content in iron concentrates. The wet high-intensity magnetic separation used for the ore sample has a good effect on discarding tailings, and discarding tailings concentrate can only achieve significant dissociation and separation of ilmenite and titanomagnetite at a finer particle size. During iron separation process, V and Cr were mainly distributed in the iron concentrate. Using a wet high-intensity magnetic discarding tailings and three-stage stage grinding

收稿日期: 2024-12-12

基金项目: 深地国家科技重大专项“战略性矿产资源综合评价”(2024ZD1002003); 国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”重点专项(2023YFC2908303)。

作者简介: 蔡先炎, 1995 年出生, 男, 汉族, 湖北孝感人, 工学硕士, 工程师, 主要从事矿产资源综合利用及钒钛磁铁矿选矿领域科研工作, E-mail: 1131864668@qq.com; *通讯作者: 陈福林, 1982 年出生, 男, 汉族, 四川巴中人, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事矿产资源综合利用及钒钛磁铁矿选矿领域的科研工作, E-mail: 277454853@qq.com。

and stage iron selection process under the conditions of grinding fineness of $-38\text{ }\mu\text{m}$ accounting for 97.58% obtained a vanadium chromium iron concentrate containing 57.06% TFe, 11.07% TiO_2 , 0.591% V_2O_5 and 1.10% Cr. Relative to the original ore, the recovery rate of TFe, TiO_2 , V_2O_5 , and Cr were respectively 67.51%, 38.66%, 90.95% and 87.55%.

Key words: high chromium vanadium-titanium magnetite, discarding tailings in advance, stage grinding and stage iron separation, process mineralogy

0 引言

钒钛磁铁矿以富含钒、钛为特征, 主要分布于四川攀西、河北承德、甘肃大滩、陕西洋县、新疆哈密等地, 四川攀西是我国最重要的钒钛磁铁矿富集区^[1-5]。攀西钒钛磁铁矿主要分为攀枝花、太和、白马和红格四大矿区, 其中红格矿区约占攀西钒钛磁铁矿总储量的 50% 左右, 以富含铬资源为特点。攀西红格矿区包括安宁村、红格、白草、中干沟、秀水河等矿体, 共查明 TFe $\geq$ 15% 的铁矿石资源量达 48.11 亿 t, 伴生 TiO_2 氧化物 4.33 亿 t、 V_2O_5 氧化物 906.8 万 t、Cr 金属量约 1 000 万 t^[6-9]。

近年来, 诸多学者在高铬型钒钛磁铁矿综合利用方面积极开展研究, 惠博^[10]对红格高钛型钒钛磁铁矿开展了工艺矿物学研究, 查明了该类型矿石长石含量较其他矿区显著降低, 辉石含量明显增加, 是影响抛尾、铁精矿 TFe 品位、钛铁矿浮选入浮 TiO_2 品位的重要因素。丁大富等^[11]通过红格南矿的预先抛尾-两段球磨磁选半工业试验研究获得了 TFe 品位为 53.10%~53.28% 铁精矿。陈桃^[12]对红格橄榄岩型钒钛磁铁矿进行了选矿工艺试验研究, 获得了 TFe 55.62% 的铁精矿。上述研究多注重在粒度较粗时 Fe、 TiO_2 的回收, 缺乏粒度较细时 Fe、Ti 深度分离和对 Cr 及矿物在流程中的走向等方面的论述。笔者以攀西某高铬型钒钛磁铁矿为对象, 开展

了原矿、抛尾及磨矿选铁过程产品工艺矿物学和铁钛分离试验研究, 讨论了主要有价元素和矿物在全流程的走向。

1 试验原料及方法

样品采自于红格钒钛磁铁矿某矿体, 采用 Zeiss Sigma 500 扫描电子显微镜、Bruker 能谱仪和 AMICS 自动矿物分析系统、PE 100 $\times$ 125 颚式破碎机、XMB $\varnothing$ 240 $\times$ 300 型棒磨机、NLCT0506 型外磁筒式磁选机、XCRS $\varnothing$ 400 $\times$ 240 多用鼓型磁选机、CMT60 型高频脉冲脱磁器等手段进行工艺矿物学特性和实验室选矿试验研究。

2 研究结果及讨论

2.1 化学成分

矿样化学成分分析见表 1。由表 1 可知, 矿样主要有价成分为 Fe、 TiO_2 、Cr 和 V_2O_5 , 含量分别达到 22.40%、7.29%、0.336%、0.173%, 铁、钛回收价值较高, 主要脉石化学成分为 SiO_2 、MgO、CaO 和 Al_2O_3 , 累计占比达到 56.87%, 并伴生有少量的 S、Cu、Co、Ni 等有价元素。

2.2 矿物特性

矿样矿物组成见表 2, Fe、Ti 元素赋存状态分别见表 3 和表 4, 矿物嵌布特征如图 1 所示。

表 1 矿样化学成分分析结果
Table 1 Chemical composition analysis of the ore sample

TFe	TiO_2	V_2O_5	Cr	SiO_2	Al_2O_3	MgO	S	P	As
22.40	7.29	0.173	0.336	29.48	4.50	12.83	0.149	0.037	0.001
Cu	Co	Ni	Pb	Zn	Mn	CaO	K_2O	Na_2O	
0.024	0.004	0.056	0.001	0.021	0.181	10.06	0.139	0.18	

表 2 试验原料矿物组成
Table 2 The mineral composition of the test sample

钛磁铁矿	透辉石	角闪石	钛铁矿	镁橄榄石	贵橄榄石	榍石	普通辉石	黑云母	镁铝尖晶石	钙钛矿	黄铜矿
34.98	34.81	6.87	6.80	5.21	3.75	1.61	0.86	0.73	0.68	0.10	0.09
方解石	钙长石	钾长石	钙铁辉石	铁橄榄石	磷灰石	石英	磁黄铁矿	钛辉石	镍黄铁矿	其他	合计
0.67	0.61	0.44	0.39	0.36	0.25	0.24	0.20	0.16	0.11	0.08	100.00

表 3 样品 Fe 元素赋存状态分析结果
Table 3 The occurrence state of Fe in the sample %

项目	磁性铁 中Fe	钛铁矿 中Fe	赤褐铁 矿中Fe	硫化物 中Fe	硅酸盐 中Fe	碳酸盐 中Fe	TFe
含量	15.43	2.26	1.62	0.13	2.96	痕量	22.40
分布率	68.88	10.09	7.23	0.58	13.22	痕量	100.00

表 4 样品 Ti 元素赋存状态分析结果
Table 4 The occurrence state of Ti in the sample %

项目	钛磁铁矿 中TiO ₂	钛铁矿 中TiO ₂	金红石 中TiO ₂	硅酸盐 中TiO ₂	总TiO ₂
含量	2.92	3.15	0.06	1.16	7.29
分布率	40.05	43.21	0.82	15.92	100.00

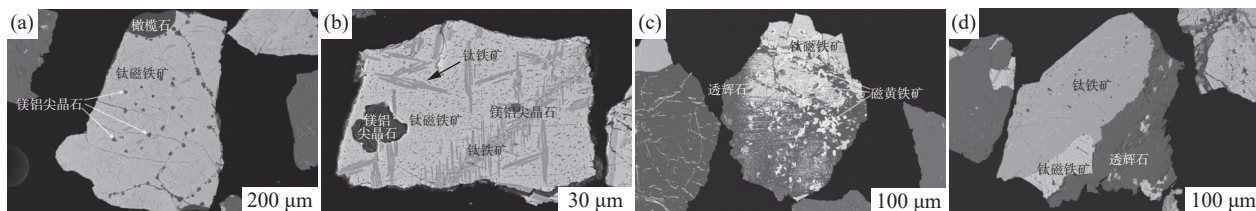


图 1 矿样中矿物嵌布特征

Fig. 1 The mineral embedding characteristic in the sample

研究表明,样品中主要金属矿物为钛磁铁矿和钛铁矿,少量磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,脉石矿物以辉石、角闪石、橄榄石为主,表明该矿石自然类型为橄辉岩型;Fe 主要赋存于钛磁铁矿、钛铁矿和硅酸盐中,磁性铁的占比达到 68.88%;Ti 元素主要分布于钛磁铁矿、钛铁矿和硅酸盐,在钛磁铁矿、钛铁矿中的占比达到 83.26%;V 和 Cr 绝大部分赋存于钛磁铁矿,未见有独立的 V 和 Cr 矿物;钛磁铁矿与钛铁矿和其他矿物紧密连生,镁铝尖晶石常呈斑点状嵌布于钛磁铁矿,见图 1(a)(b),钛铁矿与钛磁铁矿紧密共生,部分钛铁矿以粒状与钛磁铁矿连生,如图 1(d),部分钛铁矿以细脉状、条带状、针状和网格状镶嵌于钛磁铁矿基底,见图 1(a)(b),部分钛磁铁矿星散浸染于脉石中,见图 1(c)。钛磁铁矿内

存在斑点状的镁铝尖晶石和钛铁矿客晶矿物,其粒度在 10 μm 以下,通过常规的选矿手段细磨磁选难以去除这类客晶矿物,其限制了最终铁精矿 TFe 品位提高和 TiO₂ 含量降低。

2.3 抛尾及磨矿选铁试验

2.3.1 抛尾粒度对抛尾效果的影响

实验室采用破碎机将矿样破碎至-15、-10、-5、-3 mm 等 4 种不同的粒度,采用 NLCT0506 型外磁筒式磁选机进行湿式抛尾试验(磁感应强度为 0.65 T),单次处理试验样品矿量为 30 kg,扩大试验后共处理 500 kg 试验样品。矿样粒度对抛尾效果的影响如表 5 所示,-5 mm 试样抛尾尾矿 Fe 和 Ti 赋存状态见表 6、7,矿物组成及主要脉石抛除情况见表 8。

表 5 粒度对抛尾产品指标影响
Table 5 The effect of grain size on discarding tailings product index

粒度条件/mm	产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
			TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr
-15	精矿	82.18	25.33	8.62	0.202	0.392	93.33	93.09	95.96	95.88
	尾矿	17.82	8.35	2.95	<0.05	<0.05	6.67	6.91	3.67	4.12
	原矿	100.00	22.30	7.61	0.173	0.336	100.00	100.00	100.00	100.00
-10	精矿	77.91	26.40	9.00	0.213	0.413	91.91	91.63	95.92	95.76
	尾矿	22.09	8.20	2.90	<0.05	<0.05	8.09	8.37	4.08	4.24
	原矿	100.00	22.38	7.65	0.173	0.336	100.00	100.00	100.00	100.00
-5	精矿	74.15	27.42	9.24	0.222	0.435	90.77	90.08	95.15	96.00
	尾矿	25.85	8.00	2.92	<0.05	<0.05	9.23	9.92	4.85	4.00
	原矿	100.00	22.40	7.61	0.173	0.336	100.00	100.00	100.00	100.00
-3	精矿	65.57	29.62	9.91	0.248	0.475	87.44	85.74	94.00	92.70
	尾矿	34.43	8.10	3.14	<0.05	<0.05	12.56	14.26	6.00	7.30
	原矿	100.00	22.21	7.58	0.173	0.336	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 5 可知,经细碎-湿式强磁选抛尾:①随着样品粒度降低,抛尾率逐渐升高,精矿中 TFe、TiO₂、

V₂O₅ 和 Cr 品位逐渐升高,TiO₂ 和 V₂O₅ 回收率逐渐降低,抛尾粒度达到-5 mm 粒级时继续降低抛尾粒

度,抛尾精矿 TFe 和 TiO_2 回收率分别由 90.77% 降低到 87.44% 和 90.08% 降低到 85.74%,降低幅度大,为了保证抛尾流程抛尾精矿 TFe 和 TiO_2 回收率,抛尾粒度选用-5 mm,抛尾精矿 TFe 品位较原矿提

高 5.02 个百分点,抛尾率 25.85%;② V_2O_5 和 Cr 在抛尾精矿中显著富集,抛尾尾矿 V_2O_5 和 Cr 含量均小于 0.05%。对该矿样进行了磁感应强度 0.5 ~ 0.75 T 的条件试验,磁感应强度对抛尾效果的影响很小。

表 6 抛尾尾矿 Fe 化学物相分析结果
Table 6 Chemical phase analysis results of Fe in tailings

项 目	磁性铁中Fe	钛铁矿中Fe	赤褐铁矿中Fe	硫化物中Fe	硅酸盐中Fe	碳酸盐中Fe	TFe
含量	0.20	0.49	1.19	0.08	6.04	痕量	8.00
分布率	2.50	6.13	14.88	1.00	75.49	痕量	100.00

表 7 抛尾尾矿 TiO_2 化学物相分析结果
Table 7 Chemical phase analysis results of TiO_2 in tailings

项 目	钛磁铁矿中 TiO_2	钛铁矿中 TiO_2	金红石中 TiO_2	硅酸盐中 TiO_2	总 TiO_2
含量	0.01	0.87	0.02	2.02	2.92
分布率	0.34	29.79	0.68	69.19	100.00

表 8 抛尾尾矿物组成及主要脉石抛除情况
Table 8 The mineral composition of the discarding tailings and main gangue removal situation

矿物种类	钛磁铁矿	透辉石	角闪石	钛铁矿	镁橄榄石	贵橄榄石	榍石	普通辉石	方解石	钙长石	钾长石	其它	合计
含量	0.25	60.00	16.98	1.23	7.57	2.29	0.92	1.49	1.64	2.16	1.56	3.91	100.00
抛除率	0.18	44.56	63.89	4.68	37.56	15.79	14.77	44.79	63.27	91.53	91.65		

由表 6 ~ 8 可知,抛尾尾矿中 Fe 主要分布于硅酸盐相和赤褐铁矿相中,为合理损失; TiO_2 主要分布在硅酸盐矿物和钛铁矿中,但钛铁矿中的 TiO_2 含量仅 0.87%,价值较低;抛尾尾矿主要为透辉石、角闪石、橄榄石和长石等非金属矿物,钛磁铁矿和钛铁矿等金属矿物量很少;抛尾过程中长石最易抛除,其次为角闪石、方解石、辉石和镁橄榄石等,其余非金属矿物抛除率较低。抛尾尾矿的有效 Fe、 TiO_2 和有用矿物量低,说明在磨矿磁选选铁前增加预先抛尾流程是可行且有利的,其有利于提高入磨原矿 Fe 和 TiO_2 品位和降低磨选矿量,从而降低磨选成本。

2.3.2 磨矿细度对一段选铁效果的影响

试验磨矿采用 XMB $\varnothing 240 \times 300$ 型棒磨机,磁选采用 XCRS $\varnothing 400 \times 240$ 多用鼓型磁选机(磁感应强度 0.3 T),单次试验矿量为 1 kg,扩大试验处理矿量为 100 kg,给矿质量浓度为 15% ~ 20%,磨矿浓度 62.5%,试验流程如图 2 所示。-5 mm 抛尾精矿一段弱磁粗选磨矿细度条件试验结果见表 9,磨矿细度-74 μm 占 35% 的一段选铁尾矿矿物组成见表 10。

由表 9、10 可知,随着磨矿细度增加,一段铁精矿 TFe、 TiO_2 、 V_2O_5 、Cr 品位均逐渐升高,TFe、 TiO_2 回收率逐渐降低, V_2O_5 和 Cr 回收率降低幅度远小于 TFe 和 TiO_2 ,损失于一段选铁尾矿的 V_2O_5

和 Cr 极少,磨矿细度达到-74 μm 占 35% 时,继续增加磨矿细度,铁精矿 TFe 品位提升幅度小,TFe 回收率不断降低,一段磨矿磁选磨矿细度选用-74 μm 占 35%,一段磁选精矿 TFe 品位和回收率分别为 42.00% 和 85.27%;一段选铁尾矿主要为非金属矿物,钛磁铁矿和钛铁矿量较少,表明要想实现钛磁铁矿与钛铁矿的深度分离尚需进一步细磨。

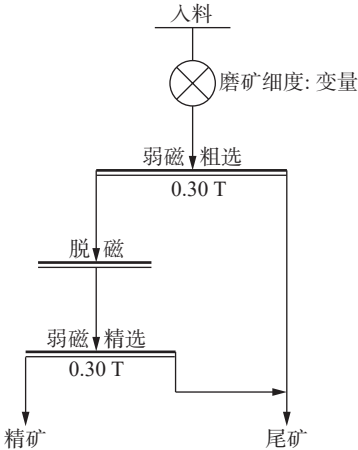


图 2 磨矿选铁试验流程
Fig. 2 The experiment process of grinding and iron separation

2.3.3 磨矿细度对二段选铁效果的影响

以磨至-74 μm 占 35% 的一段铁精矿开展二段磨矿选铁磨矿细度条件试验,单次试验矿量为 1 kg,扩大试验处理矿量为 30 kg,给矿质量浓度为 15% ~

20%, 磨矿浓度 62.5%, 试验流程如图 2 所示, 试验选铁尾矿矿物组成见表 12。
结果见表 11, 磨矿细度为-74 μm 占 74.92% 的二段

表 9 一段磨选磨矿细度条件试验结果
Table 9 The grinding fineness conditions experiment results of the first stage grinding and iron separation

磨矿细度(-74 μm占比)/%	产品名称	作业产率/%	品位/%				作业回收率/%			
			TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr
25.00	精矿	64.11	38.25	12.03	0.345	0.67	88.71	82.49	99.63	98.74
	尾矿	35.89	8.70	4.56	<0.10	<0.20	11.29	17.51	0.37	1.26
	原矿	100.00	27.64	9.35	0.222	0.435	100.00	100.00	100.00	100.00
30.00	精矿	58.82	40.50	12.44	0.376	0.73	86.73	78.87	99.62	98.71
	尾矿	41.18	8.85	4.76	<0.10	<0.20	13.27	21.13	0.38	1.29
	原矿	100.00	27.47	9.28	0.222	0.435	100.00	100.00	100.00	100.00
35.00	精矿	55.36	42.00	12.49	0.398	0.77	85.27	75.34	99.25	97.99
	尾矿	44.64	9.00	5.07	<0.10	<0.20	14.73	24.66	0.75	2.01
	原矿	100.00	27.27	9.18	0.222	0.435	100.00	100.00	100.00	100.00
40.00	精矿	54.15	42.60	12.47	0.406	0.78	84.68	73.65	99.03	97.10
	尾矿	45.85	9.10	5.27	<0.10	<0.20	15.32	26.35	0.97	2.90
	原矿	100.00	27.24	9.17	0.222	0.435	100.00	100.00	100.00	100.00
45.00	精矿	53.27	43.80	12.74	0.407	0.79	84.94	73.78	97.66	96.74
	尾矿	46.73	8.85	5.16	<0.10	<0.20	15.06	26.22	2.34	3.26
	原矿	100.00	27.47	9.20	0.222	0.435	100.00	100.00	100.00	100.00

表 10 一段磨矿选铁尾矿矿物组成
Table 10 Mineral composition of tailings of first stage grinding and iron separation %

钛磁铁矿	透辉石	角闪石	钛铁矿	镁橄榄石	贵橄榄石	榴石	普通辉石	方解石	钙长石	钾长石	其它	合计
0.43	60.32	14.75	2.63	12.44	2.96	1.36	1.49	0.54	0.35	0.21	2.52	100.00

表 11 二段磨矿磁选选铁试验结果
Table 11 The grinding fineness conditions experiment results of the second stage grinding and iron separation

磨矿细度(占比)/%		产品名称	作业产率/%	品位/%				作业回收率/%			
-74 μm占比	-43 μm占比			TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr
58.84		精矿	82.61	48.37	12.48	0.491	0.95	93.79	82.65	99.91	98.04
		尾矿	17.39	15.21	12.44	0.002	0.09	6.21	17.35	0.09	1.96
		原矿	100.00	42.60	12.47	0.406	0.78	100.00	100.00	100.00	100.00
74.92		精矿	78.65	50.62	12.39	0.510	0.96	93.46	78.15	98.83	97.30
		尾矿	21.35	13.05	12.76	0.022	0.10	6.54	21.85	1.17	2.70
		原矿	100.00	42.60	12.47	0.406	0.78	100.00	100.00	100.00	100.00
91.08		精矿	74.59	52.50	12.35	0.536	1.02	91.92	73.87	98.45	97.14
		尾矿	25.41	13.55	12.82	0.025	0.09	8.08	26.13	1.55	2.86
		原矿	100.00	42.60	12.47	0.406	0.78	100.00	100.00	100.00	100.00
99.12	82.22	精矿	72.52	53.38	12.28	0.547	1.03	90.87	71.42	97.65	96.30
		尾矿	27.48	14.15	12.58	0.035	0.11	9.13	26.57	2.35	3.70
		原矿	100.00	42.60	12.47	0.406	0.78	100.00	100.00	100.00	100.00
	90.24	精矿	70.92	54.27	12.11	0.556	1.06	90.35	68.87	97.16	96.02
		尾矿	29.08	14.14	12.77	0.040	0.11	9.65	29.79	2.84	3.98
		原矿	100.00	42.60	12.47	0.406	0.78	100.00	100.00	100.00	100.00

表 12 二段磨矿选铁尾矿矿物组成
Table 12 Mineral composition of tailings of second stage grinding and iron separation %

钛磁铁矿	透辉石	角闪石	钛铁矿	镁橄榄石	贵橄榄石	榴石	普通辉石	方解石	钙长石	钛辉石	其它	合计
2.38	36.08	11.81	14.52	15.65	9.66	3.28	1.39	0.13	0.11	2.47	2.52	100.00

由表 11 可知, 随着二段磨矿细度增加, 二段铁精矿 TFe、V₂O₅、Cr 品位逐渐升高, TiO₂ 品位和 TFe、TiO₂、V₂O₅、Cr 回收率逐渐降低, TFe、V₂O₅、Cr 回收率降低幅度远小于 TiO₂, 在磨矿细度-74 μm 占 74.92% 时, 精矿 TFe 品位和回收率分别为 50.62% 和 93.46%, 此磨矿细度下铁回收率损失相

对较低, 综合考虑二段磨矿以此细度较佳。由表 12 可知, 二段选铁尾矿的钛铁矿含量远高于一段选铁尾矿, 表明在二段磨选选铁的细度条件下, 钛铁矿开始与钛磁铁矿解离并进入选铁尾矿; 二段选铁尾矿的钛磁铁矿较一段选铁尾矿有明显增加, 表明部分 mFe 损失于二段选铁尾矿, 同时导致了部分 V_2O_5 、Cr 进入二段选铁尾矿。

2.3.4 磨矿细度对三段选铁效果的影响

以磨至 $-74\ \mu\text{m}$ 占 74.92% 的二段铁精矿开展三段磨矿选铁磨矿细度条件试验, 单次试验矿量为 500 g, 给矿质量浓度为 15% ~ 20%, 磨矿浓度 62.5%, 试验流程如图 2 所示, 试验结果见表 13, 磨矿细度为 $-38\ \mu\text{m}$ 占 97.58% 的三段选铁尾矿, 矿物组成见表 14。

表 13 三段磨矿磁选选铁试验结果

Table 13 The grinding fineness conditions experiment results of the third stage grinding and iron separation

磨矿细度($-38\ \mu\text{m}$ 占比)/%	产品名称	作业产率/%	品位/%				作业回收率/%			
			TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr
74.72	精矿	89.16	53.98	12.11	0.543	1.04	95.06	85.03	97.41	97.06
	尾矿	10.84	23.07	17.54	0.119	0.26	4.94	14.97	2.59	2.94
	原矿	100.00	50.63	12.70	0.497	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
82.84	精矿	87.87	54.75	12.02	0.552	1.05	94.35	83.07	97.00	96.50
	尾矿	12.13	23.75	17.74	0.124	0.28	5.65	16.93	3.00	3.50
	原矿	100.00	50.99	12.71	0.500	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
88.76	精矿	87.11	55.00	11.93	0.557	1.06	94.18	81.68	96.98	96.44
	尾矿	12.89	22.97	18.08	0.117	0.27	5.82	18.32	3.02	3.56
	原矿	100.00	50.87	12.72	0.500	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
91.00	精矿	85.52	56.00	11.84	0.559	1.08	93.56	79.54	96.35	95.76
	尾矿	14.48	22.77	17.99	0.125	0.28	6.44	20.46	3.65	4.24
	原矿	100.00	51.19	12.73	0.496	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
94.24	精矿	84.87	56.25	11.68	0.568	1.08	93.23	78.23	96.27	95.49
	尾矿	15.13	22.91	18.23	0.124	0.29	6.77	21.77	3.73	4.51
	原矿	100.00	51.21	12.67	0.501	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
97.58	精矿	83.25	57.06	11.07	0.591	1.10	93.32	72.90	97.45	95.65
	尾矿	16.75	20.31	20.44	0.077	0.25	6.68	27.10	2.55	4.35
	原矿	100.00	50.90	12.64	0.505	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00
99.20	精矿	81.30	56.85	10.97	0.581	1.10	90.79	71.05	94.54	92.66
	尾矿	18.70	25.06	19.44	0.146	0.38	9.21	28.95	5.46	7.34
	原矿	100.00	50.91	12.56	0.500	0.96	100.00	100.00	100.00	100.00

表 14 三段磨矿选铁尾矿矿物组成

Table 14 Mineral composition of tailings of third stage grinding and iron separation

钛磁铁矿	透辉石	角闪石	钛铁矿	镁橄榄石	贵橄榄石	榍石	普通辉石	镁铝尖晶石	钙长石	钛辉石	其它	合计
4.32	9.01	14.28	21.74	14.81	13.22	6.61	3.90	5.64	0.09	2.32	4.06	100.00

由表 13 和表 14 可知, 随着三段磨矿细度增加, 三段铁精矿 TFe、 V_2O_5 、Cr 品位逐渐升高, TiO_2 品位和 TFe、 TiO_2 、 V_2O_5 、Cr 回收率总体呈现逐渐降低的趋势, TFe、 V_2O_5 、Cr 回收率降低幅度远小于 TiO_2 ; 三段选铁尾矿的钛铁矿含量远高于一、二段选铁尾矿, 表明在三段磨选选铁的细度条件下, 钛铁矿与钛磁铁矿显著解离并进入选铁尾矿; 三段选铁尾矿的钛磁铁矿较一、二段选铁尾矿有明显增加, 表明在粒度较细时试样的 mFe 会明显损失于选铁尾矿。最佳条件下, 抛尾及三段磨矿选铁全流程获得的含铬钒钛铁精矿 TFe、 TiO_2 、 V_2O_5 、Cr 对原矿

回收率分别为 67.51%、38.66%、90.95%、87.55%。进入选铁尾矿的 TiO_2 占抛尾精矿的 57.08%。

3 结论

1) 该高铬型钒钛磁铁矿主要脉石矿物为透辉石、橄榄石和角闪石, 属橄辉岩型; 13.22% 的 Fe 和 15.92% 的 TiO_2 分布于硅酸盐矿物, V 和 Cr 主要分布于钛磁铁矿, 且无独立矿物存在。

2) 湿式强磁选抛尾可以显著提高磨选入料的 Fe 和 TiO_2 品位, 抛尾尾矿中有价元素和有用矿物含量极低, 抛尾时长石、角闪石脱除率较高, 辉石和

镁橄榄石次之,其余矿物脱除率相对偏低。

3) 试样的钛铁矿与钛磁铁矿共生关系紧密且嵌布粒度较细,钛铁矿与钛磁铁矿需在粒度较细时才能深度分离;磨矿选铁时 V_2O_5 和 Cr 主要进入铁精矿。

4) 通过预先湿式强磁选抛尾-三段阶磨阶选磁选选铁工艺,可预先抛除 22.85% 尾矿,并获得了 TFe 57.06%、 TiO_2 11.07%、 V_2O_5 0.591%、Cr 1.10% 的含铬钒钛铁精矿, TFe、 TiO_2 、 V_2O_5 、Cr 对原矿回收率分别为 67.51%、38.66%、90.95%、87.55%。

参考文献

- [1] CHEN F L, YANG X J, YANG D G, *et al.* Research on process mineralogy for a low-grade vanadium titano-magnetite in Gansu province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6): 64-68.
(陈福林, 杨晓军, 杨道广, 等. 甘肃某低品位钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6): 64-68.)
- [2] CHEN F L, YANG X J, CAI X Y, *et al.* Experimental study on iron separation of Baima gabbro-type ultra-low-grade vanadium-titanomagnetite in Panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6): 26-30.
(陈福林, 杨晓军, 蔡先炎, 等. 攀西地区白马辉长岩型超低品位钒钛磁铁矿选铁试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6): 26-30.)
- [3] ZHU J S. Beneficiation and comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite[J]. *Metal Mine*, 2000, 1: 1-11.
(朱骏士. 钒钛磁铁矿选矿及综合利用[J]. *金属矿山*, 2000, 1: 1-11.)
- [4] CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, *et al.* Characteristics of Panzhihua iron concentrate and experimental study on lifting iron and reducing impurities[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2018(3): 57-60.
(陈超, 张裕书, 张少祥, 等. 攀枝花铁精矿特性及提铁降杂试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(3): 57-60.)
- [5] ZHOU Z, ZHAO H L, LI B R, *et al.* Experimental study on a vanadium-titanium magnetite in Hongge[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2018, 1: 32-35.
(周政, 赵华伦, 李兵荣, 等. 红格某钒钛磁铁矿选矿试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018, 1: 32-35.)
- [6] LIU Y C, DING Q G, XU M. Co-associated resources and utilization of Panxi vanadium-titanium magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
(刘亚川, 丁其光, 徐明. 攀西钒钛磁铁矿共生资源及利用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.)
- [7] WANG Q, LIAO R Y Z, TIAN X L, *et al.* Vanadium-titanium magnetite in Panxi area, Sichuan province[M]. Beijing: Science Press, 2015.
(王茜, 廖阮颖子, 田小林, 等. 四川省攀西地区钒钛磁铁矿[M]. 北京: 科学出版社, 2015.)
- [8] YANG X J, CHEN F L. Special report on the overview, trial circle calculation, and sampling research of low grade vanadium-titanium magnetite resources in Panxi region[R]. Sichuan Geological and Mineral Bureau Surveying center, 2012.
(杨晓军, 陈福林. 攀西地区低品位钒钛磁铁矿资源概况、试圈试算及采样研究专题报告[R]. 四川地矿局成测中心, 2012.)
- [9] CHEN F L, CAI X Y, LI S, *et al.* Mineral characteristics research and tests of improving quality of vanadium titanium iron concentrate in Panxi area[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2023, 3: 1-13.
(陈福林, 蔡先炎, 李硕, 等. 攀西某钒钛铁精矿矿物特性及提质[J]. *矿产综合利用*, 2023, 3: 1-13.)
- [10] HUI B, YANG Y H. Study on the properties of the olivine-type vanadium-titanium magnetite ore in the Hongge mining area of Panxi and its influence on the beneficiation process[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4): 126-129.
(惠博, 杨耀辉. 攀西红格矿区橄辉岩型钒钛磁铁矿矿石性质研究及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2020(4): 126-129.)
- [11] DING D F. Study on iron separation process of Hongge vanadium titanomagnetite[J]. *Metal Mine*, 1996(3): 24-26.
(丁大富. 红格钒钛磁铁矿选铁工艺流程的研究[J]. *金属矿山*, 1996(3): 24-26.)
- [12] CHEN T, HU Z B, CHEN C, *et al.* Mineral precessing experement of Panxi Hongge olivine pyroxenne type vanadium titanium magnetite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(6): 74-80.
(陈桃, 胡志波, 陈程, 等. 攀西红格橄辉岩型钒钛磁铁矿选矿试验[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(6): 74-80.)