

攀西某钒钛铁精矿提质降杂试验研究

李 硕^{1,2}, 陈福林^{1,2*}, 蔡先炎^{1,2}, 黄立雨³, 王志杰^{1,2}, 吴 宁^{1,2}, 黄 延^{1,2}

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团新白马矿业有限责任公司, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:攀西某钒钛铁精矿 TFe 为 55.88%, 主要杂质元素化学成分为 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO , 粒状钛铁矿及脉石矿物等杂质组分占比达 14.26%, 钛铁矿主要以客晶形式嵌布于钛磁铁矿基底中, 粗、细粒铁精矿中杂质组分及嵌布特征差异显著。针对该样品, 在实验室开展了“预先分级—粗粒再磨磁选”“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”“深度磁选—分级—粗粒再磨磁选”3 种工艺对比试验, 以及电磁湿法鼓式磁选机、高频谐波磁选机、磁选柱 3 种磁选设备对比试验, 并对提质前后铁精矿的主要化学成分及矿物组分进行了对比分析。研究表明, 以电磁湿法鼓式磁选机为选别设备, 采用“预先分级(0.074 mm)-粗粒再磨(-0.074 mm 占 96.50%)磁选—细粒直接磁选”工艺的提质效果最优, 该钒钛铁精矿经提质后 TFe 提升 3.36 个百分点, 杂质组分占比累计降低了 6.92 个百分点, TFe/ TiO_2 提高了 3.44 个百分点。

关键词:钒钛铁精矿; 提质; 高频谐波磁选机; 磁选柱

中图分类号: TD951

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0105-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Experimental study on quality improvement and impurity reduction of a vanadium-titanium iron concentrate in Panxi

Li Shuo^{1,2}, Chen Fulin^{1,2*}, Cai Xianyan^{1,2}, Huang Liyu³, Wang Zhijie^{1,2}, Wu Ning^{1,2}, Huang Yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Pangang Group New Baima Mining Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The TFe grade of a vanadium-titanium-iron concentrate in Panxi is 55.88%. The chemical composition of the main impurity elements in the sample include TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO and CaO , the proportion of impurities such as granular ilmenite and gangue minerals accounts for 14.26%. Ilmenite is mainly embedded in the titanium magnetite base in the form of guest crystals, and there are significant differences in impurity components and distribution characteristics between coarse and fine grained ferrotitanium vanadium concentrates. Three comparative experiments were conducted on the vanadium titanium iron concentrate, including "preliminary classification - coarse particle regrinding magnetic separation", "preliminary classification - coarse particle regrinding magnetic separation - fine particle magnetic separation", and "deep magnetic separation - classification - coarse particle regrinding magnet-

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 攀枝花市科技计划项目(2021 CY-G-8)。

作者简介:李硕, 1992 年出生, 男, 四川攀枝花人, 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: lishuo0903@163.com; *通讯作者: 陈福林, 1982 年出生, 男, 四川巴中人, 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。

ic separation". Meanwhile, magnetic separation equipment comparative tests were carried out by using electromagnetic wet drum magnetic separator, high-frequency harmonic magnetic separator and magnetic separation column. In addition, a comparative analysis was conducted on the main chemical and mineral components of the iron concentrate before and after upgrading. Research results show that using an electromagnetic wet drum magnetic separator as the sorting equipment, the process of "preliminary grading (0.074mm) - coarse particle regrinding (-0.074 mm accounting for 96.50%) magnetic separation - direct magnetic separation with fine particle" has the best quality improvement effect. After the quality improvement, the TFe grade of the vanadium titanium iron concentrate increases by 3.36 percentage points, the proportion of impurities decreases by 6.92 percentage points, and the TFe/TiO₂ increases by 3.44 percentage points.

Key words: vanadium-titanium iron concentrate, quality improvement, high-frequency harmonic magnetic separator, magnetic separation column

0 引言

钒钛磁铁矿是一种富含铁、钛、钒的典型铁矿资源,目前已被列为我国重要的战略矿产资源。采用钒钛磁铁矿炼铁的主要途径与我国钢铁工业生产生铁的主体流程相同,均为采矿—选矿—烧结(球团)-高炉工艺^[1-5]。钒钛磁铁矿经选矿获得的钒钛铁精矿由于 TiO₂ 含量高,在烧结与高炉冶炼过程中受硅钙比和炉渣 TiO₂ 含量要求限制,在炼铁过程中高炉入炉 TFe 品位仅为 50.5%~51.5%,炼铁过程燃料比为 540~570 kg/t,远高于普通铁矿炼铁水平^[5-7]。在国家大力发展低碳经济的大环境下,随着国内煤炭和进口铁矿石价格居高不下,世界钢铁价格大幅下跌,倒逼钢铁企业必须采取有效措施降低生铁成本。攀钢几十年的实践已证明,在高炉冶炼钒钛铁精矿的过程中,提高钒钛铁精矿 TFe 品位是提升高炉入炉 TFe 品位、降低高炉炼铁燃料比的一项重要手段^[8],可有效降低企业生铁生产成本,推动实现低碳发展。

近年来,各地的专家学者^[9]在钒钛铁精矿提质降杂方面积极开展学术研究。在提质工艺研究方面,吴雪红^[10]开展了七段阶磨阶选研究,陈超等^[11-12]探索了细磨深选、粗细粒级分别分选、复合力场分选以及磨矿—磁选—浮选的提铁降杂工艺,谢美芳^[13]、刘志雄^[14]等分别研究了磁浮联合提质工艺;在提质设备研究方面,陈超等^[11]研究了新型提铁降杂磁选机、磁选柱、磁场筛等新型设备,李国平等^[15]研究了 SXCT 湿式高频谐波磁场磁选机的提铁降杂能力,池冬瑞等^[16]开展了新型复合力场精选机(浮电磁精选机)的提质研究。以上研究虽在一定程度上提高了钒钛铁精矿的品位,但提质的幅度并不大,且

未说明提质降杂的实质。笔者在总结分析不同提质方法及设备优劣势的基础上,以攀西某典型钒钛铁精矿为研究对象,着重研究并介绍了三种不同提质新工艺和磁选设备对钒钛铁精矿提质降杂效果的影响,为攀西钒钛铁精矿实现 TFe 品位较大幅度的提升提供了新的思路。

1 矿样性质

本研究所用钒钛铁精矿样品来自于攀西某典型钒钛磁铁矿采选企业,该企业将采回的 TFe 品位为 27% 左右的钒钛磁铁矿矿石先经破碎和弱磁抛尾,再经半自磨磨矿和直线筛筛分,筛下产品进行一段弱磁粗选,粗选精矿再由球磨机磨矿后进行两段弱磁精选,最终得到 TFe 品位约为 55.5% 的钒钛铁精矿,即本研究试验所用样品。试样经自然晾晒、低温烘干混匀后,再用 Zeiss Sigma 500 扫描电子显微镜+Bruker 能谱仪+AMICS 自动矿物分析系统、Zeiss Axio Imager M2 m 矿物光学显微自动分析系统、WH II 多层振筛机以及化学分析设备对其化学成分、矿物组成、粒度组成及主要化学成分沿粒度分布规律等性质进行了研究,分析结果见表 1~3,矿物嵌布特征见图 1。矿样中的 Ti 元素主要分布于钛磁铁矿中,占比 90.37%,其余分布于粒状钛铁矿和榍石中,占比分别为 7.47% 和 2.16%。

表 1 矿样主要化学成分分析结果
Table 1 Chemical composition analysis results of the sample %

TFe	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Co	S	Cu	Ni
55.88	32.89	9.68	0.715	0.017	0.47	0.029	0.021
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	Na ₂ O	K ₂ O	
4.01	3.60	0.53	3.18	0.304	0.078	0.018	

表 2 矿物组成及含量

Table 2 The mineral composition and contents of the sample %

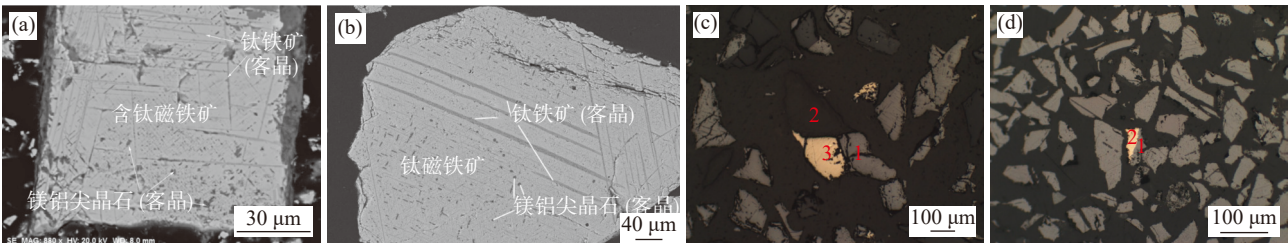
钛磁铁矿	磁黄铁矿	粒状钛铁矿	绿泥石	蛇纹石	镁铝尖晶石
84.41	1.33	1.35	3.54	3.47	1.47
钙长石	榍石	透闪石—阳起石	钠长石	其它脉石	合计
1.44	0.51	0.44	0.37	1.67	100.00

由表 1~3 及图 1 可知, 样品中 TFe 品位达到了 55.88%, 且 Fe 含量随颗粒粒度的降低而逐渐升高, 当颗粒粒度 $<0.074\text{ mm}$ 时, 粒级 TFe 品位达到了 56.5% 以上, 提质过程中可按 0.074 mm 进行分

表 3 矿样粒度分析及主要化学成分沿粒度分布规律

Table 3 Particle size analysis and distribution of main chemical components along particle size

粒级/mm	产率/%	品位/%						
		TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
+0.25	1.93	34.25	6.65	0.362	0.444	22.14	7.18	10.86
-0.25~+0.15	5.78	46.06	8.96	0.562	0.484	11.05	5.09	6.88
-0.15~+0.10	8.48	51.50	9.78	0.638	0.479	7.02	4.51	5.09
-0.10~+0.074	9.89	54.69	10.13	0.696	0.476	4.58	4.05	3.89
-0.074~+0.043	16.52	56.50	10.26	0.721	0.485	3.14	3.67	3.07
-0.043~+0.038	6.96	57.50	10.14	0.734	0.492	2.67	3.56	2.83
-0.038	50.44	58.38	9.52	0.731	0.476	2.23	3.20	2.35
合计	100.00	55.88	9.68	0.701	0.478	3.94	3.68	3.31



1-钛磁铁矿; 2-脉石; 3-磁黄铁矿

图 1 矿物嵌布特征照片

Fig. 1 Photographs of mineral embedding characteristics

以上研究结果表明, 若要提升铁精矿样品的 TFe 品位, 需要采用合理的分级磨矿工艺, 先降低样品颗粒粒度, 提升有用矿物与脉石矿物、杂质矿物的单体解离度, 再采用磁选设备对铁精矿样品进行提质降杂研究。因此, 笔者结合前期研究成果, 分别开展了三种不同提质工艺流程试验和提质磁选设备种类试验, 并对提质前后铁精矿中主要化学成分和主要矿物的变化情况进行了对比研究。

2 提质试验及结果讨论

2.1 提质工艺试验

在实验室采用 GMT-6 型高频脉冲脱磁器、KM-

级; 样品中主要杂质元素的化学成分为 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO ; 主要脉石矿物为绿泥石、蛇纹石、镁铝尖晶石, 主要杂质矿物为粒状钛铁矿; 大部分钛铁矿及镁铝尖晶石以网格状、针状、絮状(图 1(a))、细脉状和条带状(图 1(b))镶嵌于钛磁铁矿基底形成客晶矿物, 粒度普遍小于 $5\text{ }\mu\text{m}$, 磨矿解离难度较大; 矿样中 90.37% 的 Ti 元素分布于钛磁铁矿中, 其余分布于粒状钛铁矿和榍石中; 粗粒级脉石多且多以连生体存在($+0.10\text{ mm}$, 图 1(c)), 细粒级脉石少且多以单体形式存在(-0.10 mm , 图 1(d))。

800-4 S 型高频旋振筛、XCRS- $\Phi 400\times 300$ 型电磁湿法鼓式磁选机等主要设备, 将钒钛铁精矿按图 2~4 所示的流程分别开展了“预先分级—粗粒再磨磁选”“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”“深度磁选—分级—粗粒再磨磁选”3 种不同提质工艺的对比试验, 结合铁精矿样品工艺矿物学分析结果和生产实际, 在筛分时按 0.074 mm 进行分级, 筛上产品磨矿细度控制在 $-200\text{ 目}(0.074\text{ mm})>95\%$, 粗选磁场强度定为 0.2 T 确保提质回收率, 精选磁场强度定为 0.16 T 提升提质精矿品位, 试验结果见表 4。

由表 4 可知, 三种工艺流程皆可获得 TFe 品位显著提高的混合铁精矿(铁精矿 1+铁精矿 2, 下同):

①“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”的分磨分选工艺提质效果最佳,混合铁精矿 TFe 品位提升了 3.36 个百分点,其 Fe 金属损失也最高(为 2.37%);②“预先分级—粗粒再磨磁选”工艺最简单,Fe 金属损失最小(为 1.51%),但混合铁精矿 TFe 品位提高幅度最小(提高 2.3 个百分点);③“深度磁选—分级—粗粒再磨磁选”工艺的混合铁精矿 TFe 品位提升幅度(提高 2.79 个百分点)和 Fe 金属损失(为 1.93%)均较适中。鉴于“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”工艺的尾矿 1 和尾矿 2 中 TFe 品位皆较低,且尾矿磁性铁含量极少,综合考虑认为该工艺提质效果最佳。

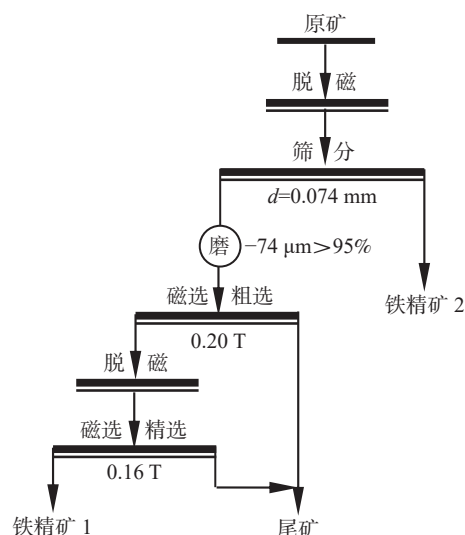


图 2 “预先分级—粗粒再磨磁选”工艺流程

Fig. 2 "Preliminary classification-coarse grain grinding magnetic separation" process

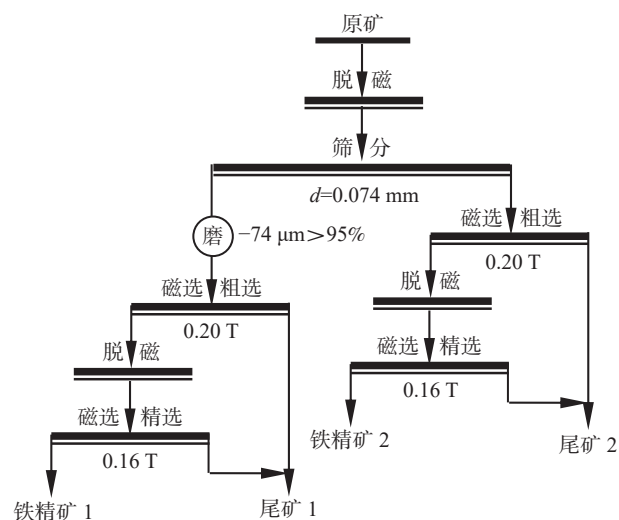


图 3 “预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”工艺流程

Fig. 3 "Preliminary classification-coarse grain grinding magnetic separation-fine magnetic separation" process

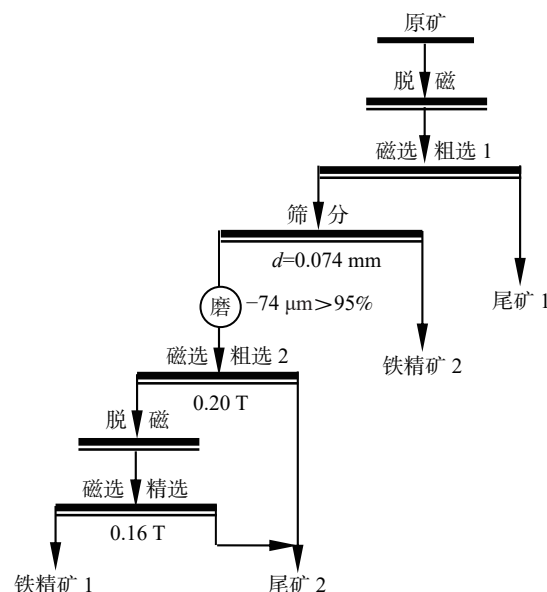


图 4 “深度磁选—分级—粗粒再磨磁选”工艺流程

Fig. 4 "Deep magnetic separation-classification-coarse particle grinding magnetic separation" process

表 4 提质工艺试验结果

Table 4 The results of improving processes test

工艺流程	产品名称	产率 /%	TFe品位 /%	TFe回收率 /%
预先分级—粗粒 再磨磁选	铁精矿 1	20.68	59.00	21.85
	铁精矿 2	73.92	57.88	76.64
	混合铁精矿	94.60	58.13	98.49
	尾矿	5.40	15.62	1.51
	原矿	100.00	55.83	100.00
预先分级—粗粒再磨 磁选—细粒磁选	铁精矿 1	20.68	59.00	21.83
	铁精矿 2	71.42	59.31	75.80
	混合铁精矿	92.10	59.24	97.63
	尾矿 1	5.40	15.62	1.51
	尾矿 2	2.27	21.17	0.86
	尾矿合计	7.67	17.27	2.37
	原矿	100.00	55.88	100.00
深度磁选—分级—粗粒 再磨磁选	铁精矿 1	19.15	59.12	20.27
	铁精矿 2	74.26	58.50	77.80
	混合铁精矿	93.41	58.63	98.07
	尾矿 1	1.34	19.50	0.47
	尾矿 2	5.25	15.53	1.46
	尾矿合计	6.59	16.35	1.93
	原矿	100.00	55.84	100.00

2.2 磁选设备种类试验

按“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”工艺流程开展了试样的磁选设备种类试验,磁选设备采用电磁湿法鼓式磁选机、SXCT0503 型高频谐波磁场磁选机(150 mT 和 250 mT 各 1 台)及 JYF-CXZ10 型磁选柱,试验结果见表 5。

由表 5 可知,实验室条件下,三种磁选设备对钒钛铁精矿矿样 TFe 品位提升能力排序为电磁湿法

鼓式磁选机~高频谐波磁选机>磁选柱,尾矿 TFe 品位高低排序为电磁湿法鼓式磁选机~高频谐波磁选机<磁选柱。三种磁选设备均不能有效降低混合铁精矿中 TiO₂ 含量,与图 1 中钛铁矿客晶因嵌布于钛磁铁矿中难以通过再磨使其解离,无法通过磁选分离达到降低 TiO₂ 含量的结果相符。

2.3 提质过程主要成分变化规律

按“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”工艺流程,对以电磁湿法鼓式磁选机为磁选设备所得混合铁精矿和原矿(提质前钒钛铁精矿)的主要化学成分和矿物组成进行了对比分析,结果分别见表 6、7。

由表 6、7 可知:①混合铁精矿中 TiO₂ 和 V₂O₅ 随 TFe 品位的升高分别升高了 0.24 和 0.028 个百分点, S 降低 0.1 个百分点,主要脉石组分降幅 SiO₂>CaO>MgO>Al₂O₃,不利于高炉炼铁的碱金属 Na₂O 和 K₂O 均降低 50% 左右;②经提质后混合铁精矿中钛磁铁矿含量大幅增加,磁黄铁矿小幅降低,粒状钛铁矿与脉石矿物的含量显著下降(累计降低 6.92 个百分点);③提质后混合铁精矿中 TiO₂ 品位虽有提升,但 TFe/TiO₂ 较提质原矿提高了 0.20 个百分点(增幅 3.44%),且碱金属含量显著降低,表明该铁精矿提质降杂效果较佳。

表 5 磁选设备种类试验结果
Table 5 The results of magnetic separation equipment type tests

磁选设备种类	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
电磁湿法鼓式磁选机	铁精矿1	20.68	59.00	10.15	21.83	21.81
	铁精矿2	71.42	59.31	9.78	75.80	72.58
	混合铁精矿	92.10	59.24	9.86	97.63	94.39
	尾矿1	5.40	15.62	6.53	1.51	3.66
	尾矿2	2.27	21.17	8.25	0.86	1.95
	尾矿合计	7.67	17.27	7.04	2.37	5.61
	原矿	100.00	55.88	9.62	100.00	100.00
高频谐波磁选机	铁精矿1	20.70	59.07	10.17	21.88	21.88
	铁精矿2	71.35	59.22	9.74	75.61	72.23
	混合铁精矿	92.05	59.19	9.84	97.49	94.10
	尾矿1	5.32	15.25	6.62	1.45	3.66
	尾矿2	2.63	22.38	8.18	1.05	2.24
	尾矿合计	7.95	17.61	7.14	2.51	5.90
	原矿	100.00	55.88	9.62	100.00	100.00
磁选柱	铁精矿1	21.01	58.69	10.12	22.06	21.97
	铁精矿2	71.17	59.05	9.81	75.18	72.13
	混合铁精矿	92.18	58.97	9.88	97.24	94.09
	尾矿1	5.44	17.88	6.87	1.74	3.86
	尾矿2	2.38	24.00	8.33	1.02	2.05
	尾矿合计	7.82	19.74	7.31	2.76	5.91
	原矿	100.00	55.90	9.68	100.00	100.00

表 6 提质前后铁精矿主要化学成分变化
Table 6 Changes of main chemical compositions of iron concentrate before and after improving quality %

	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	S	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TFe/TiO ₂
原矿	55.88	9.62	0.715	0.47	4.01	0.53	3.18	3.60	0.078	0.018	5.81
混合铁精矿	59.24	9.86	0.743	0.37	1.84	0.25	2.18	3.23	0.036	0.009	6.01
差值(百分点)	+3.36	+0.24	+0.028	-0.10	-2.17	-0.28	-1.00	-0.37	-0.042	-0.009	+0.20

表 7 提质前后铁精矿主要矿物成分变化
Table 7 Changes of main mineral compositions of iron concentrate before and after improving quality %

	钛磁铁矿	磁黄铁矿	粒状钛铁矿	绿泥石	蛇纹石	镁铝尖晶石	钙长石	榍石	透闪石—阳起石	钠长石	其他
原矿	84.41	1.33	1.35	3.54	3.47	1.47	1.44	0.51	0.44	0.37	1.67
混合铁精矿	91.54	1.14	0.72	1.63	2.09	0.79	0.63	0.28	0.21	0.18	0.79
差值(百分点)	+7.13	-0.19	-0.63	-1.91	-1.38	-0.68	-0.81	-0.23	-0.23	-0.19	-0.88

3 结论

1)影响该钒钛铁精矿 TFe 品位的主要杂质元素化学成分为 TiO₂、SiO₂、Al₂O₃、MgO 和 CaO,粒状钛铁矿及脉石组分占比高达 14.26%,具有较大的提质降杂空间;TFe 和主要脉石化学成分沿粒度分布差异较大,粗粒级脉石多与钛磁铁矿连生,细粒级脉石少且以单体为主;Ti 元素主要分布于钛磁铁矿,提质过程铁精矿 TiO₂ 降低困难。

2)针对该矿样开展了“预先分级—粗粒再磨磁

选”“预先分级—粗粒再磨磁选—细粒磁选”“深度磁选—分级—粗粒再磨磁选”3 种提质工艺对比试验,以及电磁湿法鼓式磁选机、高频谐波磁选机、磁选柱 3 种设备对比试验。以电磁湿法鼓式磁选机为主要磁选设备,采用“预先分级(0.074 mm)-粗粒再磨(-0.074 mm 占 96.50%)磁选—细粒磁选”工艺的提质效果最优,获得的提质混合铁精矿中 TFe 品位为 59.24%、回收率为 97.63%,提质使铁精矿的 TFe 品位提高了 3.36 个百分点,效果较佳。

3)该钒钛铁精矿经提质后 TiO_2 和 V_2O_5 品位小幅升高, S 小幅降低, SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 显著降低, 钛磁铁矿含量显著提升, 粒状钛铁矿以及绿泥石、蛇纹石、钙长石、镁铝尖晶石等脉石组分显著降低(累计降低 6.92 个百分点), TFe/TiO_2 较提质原

矿提高了 0.2 个百分点(增幅 3.44%)。

4)钒钛铁精矿提质的本质为通过磨矿和磁选, 降低铁精矿中的粒状钛铁矿以及脉石矿物的含量, 提升钛磁铁矿在精矿中的占比, 从而实现铁精矿中 TFe 品位的提升。

参考文献

- [1] Special Research Group on the Strategy of Strengthening the Country with Ferrous Metal Mineral Resources. Research on the strategy of strengthening the country with ferrous metal mineral resources[M]. Beijing: Science Press, 2019.
(黑色金属矿产资源强国战略研究专题组. 黑色金属矿产资源强国战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.)
- [2] Ma Hualing. Modern mineral processing of iron ores[M]. Hefei: China University of science and Technology Press, 2009.
(马华麟. 现代铁矿石选矿[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.)
- [3] Chen Fulin, Yang Xiaojun, Yang Daoguang, *et al.* Research on process mineralogy for a low-grade vanadium titanomagnetite 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.)
- [4] Chen Fulin, Yang Xiaojun, Cai Xianyan, *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.)
- [5] Du Hegui. Principle of blast furnace smelting vanadium titanium magnetite[M]. Beijing: Science Press, 1996.
(杜鹤桂. 高炉冶炼钒钛磁铁矿原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.)
- [6] Ma Jiayuan, Sun Xiwen, Sheng Shixiong. Strengthening of blast furnace smelting of vanadium-titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2000, 35(1): 1–12.
(马家源, 孙希文, 盛世雄. 钒钛磁铁矿高炉冶炼的强化[J]. 钢铁钒钛, 2000, 35(1): 1–12.)
- [7] Lv Yanan. Study on efficient utilization of vanadium-titanium magnetite solid reducing agent[D]. Changsha: Central South University, 2009.
(吕亚男. 钒钛磁铁矿固态还原剂高效利用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.)
- [8] Rao Jiating, Wang Dunxun, Kang Bin, *et al.* Current situation and proposals of low cost iron-making of Pangang[J]. Sichuan Metallurgy, 2013, 35(1): 7–13.
(饶家庭, 王敦旭, 康斌, 等. 攀钢低成本炼铁技术现状与建议[J]. 四川冶金, 2013, 35(1): 7–13.)
- [9] Chen Chao, Zhang Yushu, Li Xiaoyu, *et al.* Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021, (3): 99–105.
(陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. 矿产综合利用, 2021, (3): 99–105.)
- [10] Wu Xuehong. Experimental study on improving TFe grade of iron concentrate in Midi concentrator[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(6): 38–41.
(吴雪红. 提高密地选矿厂铁精矿品位的试验研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(6): 38–41.)
- [11] Chen Chao, Zhang Yushu, Zhang Shaoxiang, *et al.* Improving quality of Panzhihua iron concentrate by magnetic separation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, (2): 69–73, 79.
(陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿磁选提铁降杂工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 2018, (2): 69–73, 79.)
- [12] Chen Chao, Zhang Yushu, Zhang Shaoxiang, *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, 张少翔, 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.)
- [13] Xie Meifang, Wen Shuming, Zheng Hailei, *et al.* Experimental study on iron improvement and desulphurization of vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Metal Mine, 2010, (7): 44–46, 82.
(谢美芳, 文书明, 郑海雷, 等. 钒钛磁铁矿精矿提铁降硫工艺试验研究[J]. 金属矿山, 2010, (7): 44–46, 82.)
- [14] Liu Zhixiong. Research and industrial practice on improving quality and reducing impurities of Baima vanadium-titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3): 104–110.
(刘志雄. 白马钒钛磁铁矿提质降杂研究及工业实践[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(3): 104–110.)
- [15] Li Guoping, Zhao Hailiang, Shang Hongliang, *et al.* Application of the SXCT wet type high frequency harmonic magnetic separator in the separation of Panxi V-Ti magnetite[J]. Non Ferrous Metals (Beneficiation Part), 2019, (1): 95–99.
(李国平, 赵海亮, 尚红亮, 等. SXCT型湿式高频谐波磁场磁选机在攀西钒钛磁铁矿中的应用[J]. 有色金属: 选矿部分, 2019, (1): 95–99.)
- [16] Chi Dongrui, Gu Pan, Yan Weiping, *et al.* Study on quality improvement and impurities reduction new technology of vanadium-iron concentrate in Hongge[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020, (6): 91–95.
(池冬瑞, 顾畔, 严伟平, 等. 红格钒铁精矿提质降杂新技术研究[J]. 矿产综合利用, 2020, (6): 91–95.)