

国外某难选钛铁矿选矿试验研究

谢宝华^{1,2,3}, 罗云波^{1,2,3*}, 王丰雨^{1,2,3}, 梁焘茂^{1,2,3}, 杨招君^{1,2,3}

(1. 广州粤有研矿物资源科技有限公司, 广东广州 510651; 2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东广州 510651; 3. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东广州 510651)

摘要: 针对国外某钛铁矿矿物组成复杂, 有价矿物之间共生关系密切, 且钛铁矿嵌布粒度细等问题, 采用阶段磨矿—阶段选别的磁选—浮选工艺流程对该难选钛铁矿矿石进行了选矿工艺试验研究。结果表明, 对含 TFe 55.36%、TiO₂ 9.91% 的原矿, 采用该工艺后, 可获得 TFe 品位 64.50%, 回收率 81.70% 的铁精矿和 TiO₂ 品位为 47.22%、回收率为 50.55% 的钛精矿。该工艺为开发利用该矿产资源提供了技术支撑。

关键词: 钛铁矿; 钛磁铁矿; 阶段磨矿; 阶段选别; 磁选; 浮选

中图分类号: TD951, TD952

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0036-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.006

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 beneficiation of a foreign refractory ilmenite ore

Xie Baohua^{1,2,3}, Luo Yunbo^{1,2,3*}, Wang Fengyu^{1,2,3}, Liang Taomao^{1,2,3}, Yang Zhaojun^{1,2,3}

(1. Guangzhou Yueyouyan Mineral Resources Technology Co., Ltd., Guangzhou 510651, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metal, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 3. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, Guangdong, China)

Abstract: In view of the complex mineral composition of a ilmenite from overseas, the close symbiotic relationship between valuable minerals and the fine particle size of ilmenite, the experimental study on the beneficiation process of the refractory ilmenite ore was carried out using the stage grinding-stage separation magnetic separation-flotation process flow. The results show that the iron concentrate with TFe grade of 64.50% and recovery rate of 81.70%, the titanium concentrate with TiO₂ grade of 47.22% and recovery rate of 50.55% can be obtained from the run-of-mine with TFe grade of 55.36% and TiO₂ grade of 9.91%. This process provides a technical support for the open utilization of the mineral resources.

Key words: ilmenite, titanomagnetite, stage-grinding, stage-separation, magnetic separation, flotation

0 引言

世界上具有开采价值的钛矿有原生矿(岩浆钛矿)和钛砂矿两种, 原生矿主要有钛铁矿、钛磁铁矿和

钛赤铁矿等不同类型的共生矿^[1], 砂钛矿主要为海滨砂矿, 其次为内陆砂矿。砂钛矿具有易采、易选、生产成本低、产品质量好及开采价值高等特点; 而原生钛铁矿由于有价矿物组成复杂, 不同矿物间共生

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2022GDASZH-2022010104)。

作者简介: 谢宝华, 1989 年出生, 男, 江西瑞金人, 工程师, 主要从事矿物加工工程及资源综合利用方面的研究, E-mail: xie19890411@qq.com; * 通讯作者: 罗云波, 1989 年出生, 男, 湖南东安人, 工程师, 主要从事选矿工艺、选矿药剂及资源综合利用方面的研究, E-mail: 635921756@qq.com。

密切, 比较海滨砂钛铁矿, 其选矿工艺流程相对复杂^[2]。

原生钛铁矿普遍采用磁选—浮选联合工艺^[3]、重选—磁选—电选联合流程^[4]、重选—磁选联合流程^[5]、磁选流程^[6]、重选—强磁—浮选流程^[7], 国外某矿石主要可回收矿物为磁铁矿、钛铁矿, 脉石矿物主要为角闪石、长石和辉石, 属原生矿。笔者针对该钛铁矿石开展了多元素分析、矿物组成分析工艺矿物学研究, 在此基础上展开多种试验方案、多种试验流程的试验对比研究, 最终采用阶段磨矿—弱磁选—强磁选—浮选联合流程。

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

开展矿石性质研究对选矿试验具有基础性作用, 试验前对原矿进行多元素分析, 结果如表 1 所示; 钛铁物相分析测定结果如表 2、3 所示。

表 1 原矿多元素分析
Table 1 Multi-element results of run-of-mine %

TiO ₂	TFe	Al ₂ O ₃	Cu	Zn	Pb	Bi	CaF ₂	SiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	V ₂ O ₃	P	S	烧失量
9.91	55.36	10.87	0.011	0.006	0.012	0.004 7	0.32	8.79	5.59	6.21	1.92	0.47	0.026	0.090	0.21	0.202

表 2 铁物相分析结果
Table 2 Mineral composition of iron in run-of-mine %

铁物相	含量	分布率
硫化矿中的铁	0.07	0.13
赤铁矿中的铁	2.42	4.37
褐铁矿中的铁	3.44	6.20
钛磁铁矿中的铁	45.41	82.03
钛铁矿中的铁	3.14	5.67
硅酸铁中的铁	0.27	0.11
碳酸铁中的铁	0.61	1.48
合计	55.36	100.00

表 3 钛物相分析结果
Table 3 Mineral composition of titanium in run-of-mine %

钛物相	含量	分布率
钛磁铁矿中的钛	2.65	26.74
钛铁矿中的钛	5.66	57.11
金红石中的钛	0.72	7.27
辉石中的钛	0.06	0.61
榍石中的钛	0.27	2.72
角闪石中的钛	0.06	0.61
褐铁矿中的钛	0.07	0.70
金云母中的钛	0.42	4.24
合计	9.91	100.00

由表 1~3 可见, 该矿中铁主要赋存于钛磁铁矿中, 其次为褐铁矿、赤铁矿和钛铁矿中, 少量在碳酸铁中赋存, 铁理论回收率为 82.03%; 钛主要赋存于钛铁矿中, 其次为钛磁铁矿中, 少量在金云母中, 钛理论回收率为 57.11%。

1.2 试验方法

试验主要回收磁铁矿和钛铁矿, 分选磁铁矿易于钛铁矿, 考虑先选别磁铁矿后分选钛铁矿。矿石中相当部分脉石为非磁性矿物, 为减少磨矿量, 分选富集磁铁矿时先粗磨进行磁选粗选试验, 以抛去部

分脉石矿物, 分别进行了磨矿细度、磁场强度条件试验。为获得铁精矿产品, 对粗精矿进行再磨矿再选的开路试验。钛铁矿分选考虑分别进行强磁选和浮选试验, 磁选进行了磁场强度和冲程条件试验, 浮选精选试验进行了捕收剂用量和调整剂用量条件试验以及闭路试验。

2 试验结果与讨论

2.1 选铁试验

该矿石中主要金属矿物钛磁铁矿的比磁化系数为 0.08 g/cm³; 脉石中辉石和角闪石的比磁化系数分别为 (0.15~1.03)×10⁻⁶ g/cm³ 和 (0.2~0.85)×10⁻⁶ g/cm³, 主要金属矿物与脉石矿物的磁性差异大, 可采用弱磁选进行分离与富集钛磁铁矿^[8]。磁铁矿原矿经磨矿后采用广州粤有研矿物资源科技有限公司生产的 ZCTN 型磁选机进行磁选试验, 分别进行了磨矿细度、磁场强度条件试验^[9]。

2.1.1 磁选粗选磨矿细度试验

磨矿产品粒度直接影响着选别指标, 磨矿粒度过粗, 有用矿物与脉石无法充分解离, 过细又引起严重过粉碎, 两种情况都会降低选别指标。同时磨矿粒度过细, 引起现场能耗和钢球量增加, 故考察磨矿细度对磁选指标的影响具有重要意义。将原矿磨矿至不同细度后, 在 96 kA/m 磁场强度条件下磨矿细度试验, 试验结果如图 1 所示。

由试验结果可知, 随着磨矿细度增加, 磁选精矿铁品位略有提高, 但回收率随之降低, 并且在磨矿细度-0.074 mm 含量超过 75% 后, 铁精矿回收率略有降低, 变化较小, 而钛精矿回收率快速下降。选择-0.074 mm 占 75% 为最佳磨矿细度。

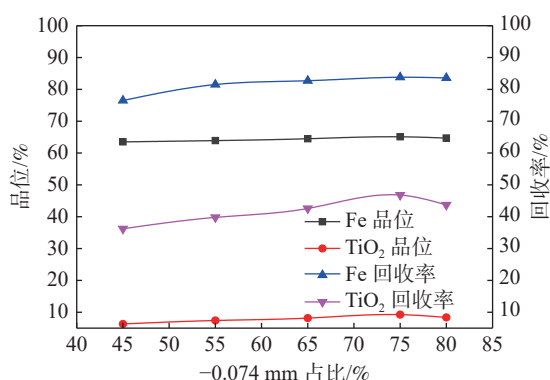


图1 磁选粗选磨矿细度条件试验结果

Fig. 1 Results of grinding fineness condition test in rough magnetic separation

2.1.2 磁选粗选磁场强度条件试验

在-0.074 mm占75%的磨矿细度下进行磁场强度条件试验,试验结果见图2。

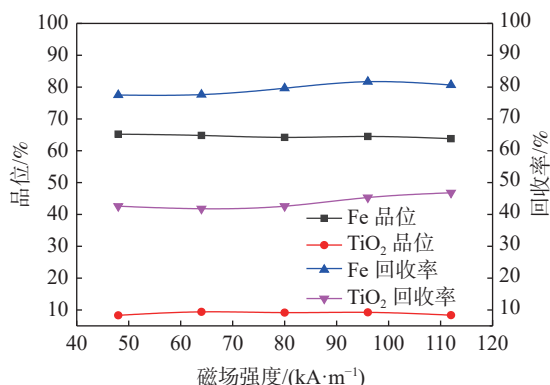


图2 粗选磁场强度条件试验结果

Fig. 2 Results of magnetic intensity condition test in rough magnetic separation

由试验结果可知,随着磁场强度的升高,铁精矿 TFe 回收率逐渐升高,品位逐渐降低,综合考虑精矿品位和回收率,选用 96 kA/m 为磁选粗选最佳磁场强度。

2.1.3 铁回收开路试验

为获得合格铁精矿品位,对粗精矿进行再磨再选试验,开路试验流程见图3,结果见表4。从表4试验结果可知,原矿球磨机粗磨后经弱磁选取得粗精矿,粗精矿经再磨再选弱磁选开路试验,可以获得产率 70.12%,TFe 品位 64.50%,回收率 81.70% 的钛精矿。

2.2 选钛试验

钛铁矿的比磁化系数为 $(115 \sim 399) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$,脉石中辉石和角闪石的比磁化系数分别为 $(0.15 \sim 1.03) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ 和 $(0.2 \sim 0.85) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$,可采用强磁选进行分离与富集钛铁矿。广州粤有研矿物科技有限公司研制生产的实验室高效分选微细

粒磁选设备-SSS-I-145 高梯度磁选机具有对给矿粒度、浓度和品位波动适应性强,富集比大,操作简单和工作可靠等优点^[9]。

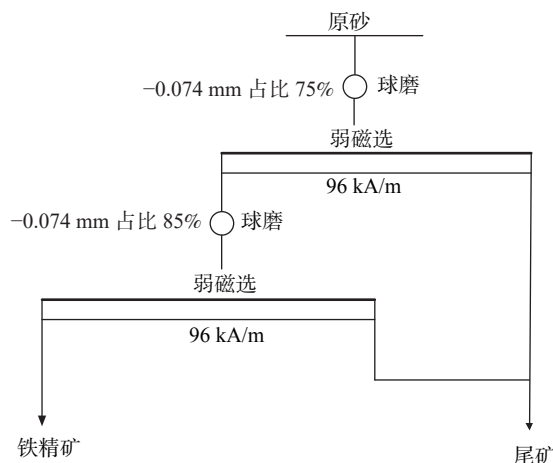


图3 回收铁开路试验流程

Fig. 3 Open circuit flow chart of iron concentrate recovery

表4 回收铁开路试验结果

产品名称	产率	TFe品位	TFe回收率
铁精矿	70.12	64.50	81.70
磁选尾矿	29.88	14.56	18.30
原矿	100.00	55.36	100.00

2.2.1 磁场强度条件试验

采用强磁磁选抛尾富集钛,可减少进入浮选的人选量,避免后续大量矿泥罩盖在有用矿物上,节约浮选药剂用量,从而明显节约选矿成本和降低功耗。进一步将粗精矿再磨至-0.074 mm占85%细度下进行磁场强度条件试验,试验结果见图4,由图4可知,随着磁场强度的提高,磁性产品的TiO₂品位有明显降低趋势;当精选磁场强度为400 kA/m时,精矿TiO₂品位为25.60%,回收率为51.78%。

2.2.2 冲程条件试验

为寻求适用于分选钛铁矿的矿浆分散状态,固定磁选场强为400 kA/m,考察脉动冲程条件对磁选效果的影响,试验结果见图5。由图5可知,随着脉动冲程的提高,磁性产品的TiO₂品位有逐渐上升趋势,而回收率逐渐降低,综合考虑,选用脉动冲程为20 mm为最佳选矿条件。

2.3 浮选精选试验

浮选试验给矿为粗选精矿,采用硫酸和六偏磷酸钠为调整剂,自研阳离子胺类捕收剂MTH,该捕收剂靠分子间作用力的胺分子吸附与靠氢键作用的胺分子吸附及静电吸附。对磁选粗精矿进行浮选精

选试验, 分别考察 MTH 和六偏磷酸钠用量对浮选效果的影响。

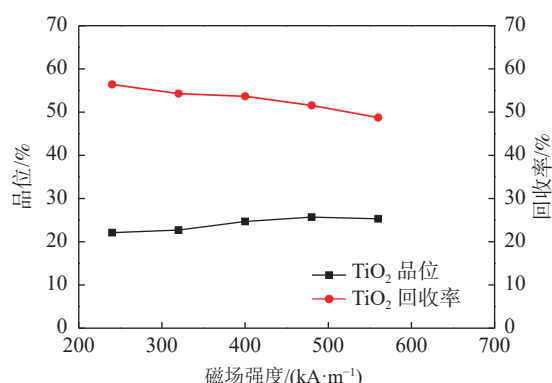


图4 粗选磁场强度试验结果

Fig. 4 Results of background magnetic field intensity test in rough magnetic separation

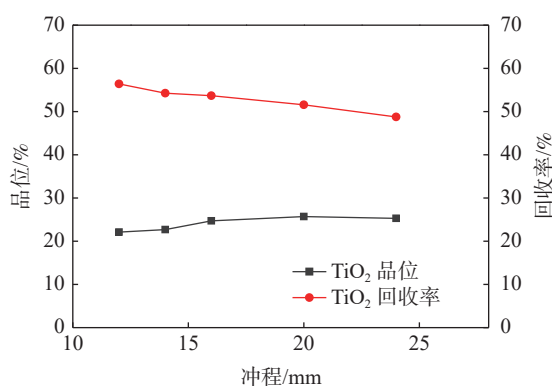


图5 冲程条件试验结果

Fig. 5 Stroke length condition test result

2.3.1 捕收剂 MTH 用量试验

为确定合适的捕收剂 MTH 用量, 在硫酸用量 1 500 g/t, 六偏磷酸钠用量 600 g/t 条件下进行了 MTH 用量条件试验, 试验结果见图 6。

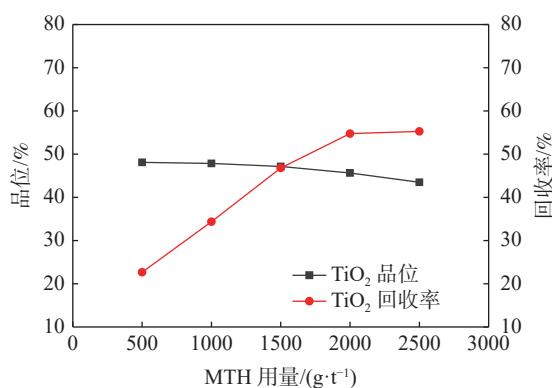


图6 捕收剂用量试验结果

Fig. 6 Test results of MTH collector dosage

由图 6 可知, 随着捕收剂用量增加, 粗选钛精矿回收率增加, 而品位一直下降, 当 MTH 用量达到

1 500 g/t 后, 回收率增加较少, 确定 MTH 最佳用量为 1 500 g/t。

2.3.2 六偏磷酸钠用量试验

六偏磷酸钠有利于矿浆的分散, 同时对脉石矿物有较好抑制作用, 硫酸用量为 1 500 g/t, MTH 用量 1 500 g/t 的条件下进行六偏磷酸钠用量条件试验, 试验结果见图 7。由图 7 可知, 随着六偏磷酸钠用量增加, 粗选钛精矿品位逐步增加, 而回收率逐步下降, 综合考虑, 选择 600 g/t 为六偏磷酸钠最佳用量条件。

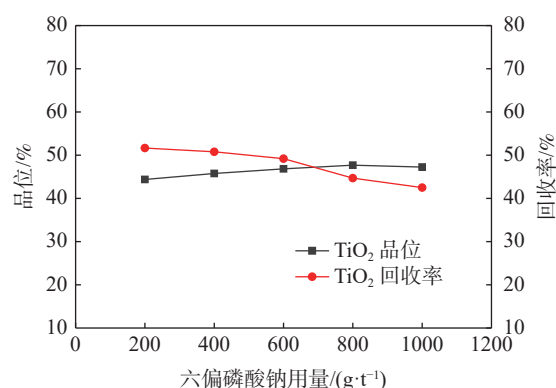


图7 六偏磷酸钠用量试验结果

Fig. 7 Test results of SHMP dosage

2.3.3 浮选闭路试验

在条件试验确定捕收剂和水玻璃用量的基础上开展实验室小型闭路试验, 试验流程图见图 8, 试验结果见表 5。

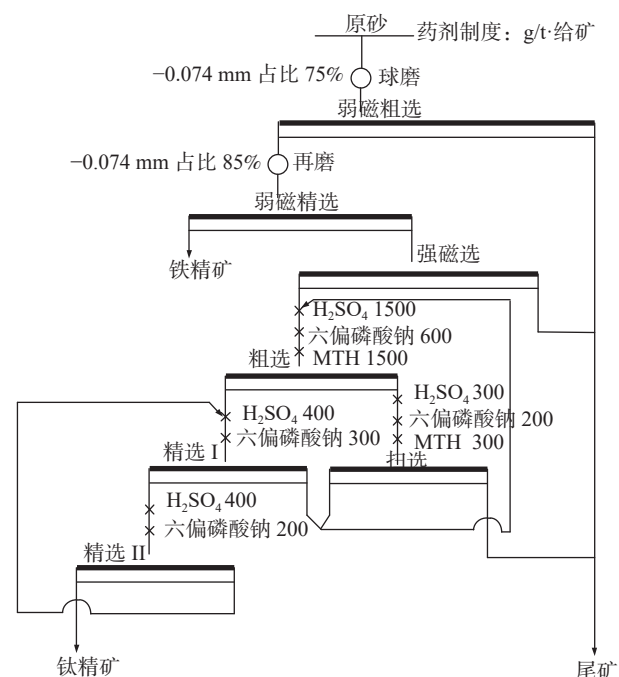


图8 全流程闭路试验流程

Fig. 8 Flow chart of closed-circuit flotation test

表 5 全流程闭路试验结果
Table 5 Results of closed-circuit flotation test %

产品名称	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 回收率
精矿	8.45	47.22	50.55
尾矿	91.55	3.43	49.45
原矿	100.00	9.91	100.00

从表 5 试验结果可知,经强磁选取得粗精矿,粗精矿经一粗一扫两精选浮选闭路试验,可以获得产率 8.45%, TiO₂ 品位 47.22%, 回收率 50.55% 的钛精矿。

3 结论

1) 该矿中铁主要赋存于钛磁铁矿中,其次为褐铁矿、赤铁矿和钛铁矿中,少量在碳酸铁中赋存,铁理论回收率为 82.03%; 钛主要赋存于钛铁矿中,其次为钛磁铁矿中,少量在金云母中,钛理论回收率

为 57.11%。角闪石中含钛铁矿或磁铁矿包裹体,这些包裹体包含于角闪石中,引起角闪石磁性增强,并与钛铁矿磁性相近或相同,影响磁选分离富集钛铁矿。

2) 在磨矿细度为-0.074 mm 占 85%, 磁场强度为 96 kA/m 条件下,弱磁选精选获得铁精矿品位 64.50%, 回收率 81.70% 的铁精矿。

3) 经强磁选取得粗精矿,粗精矿经一粗一扫两精选浮选闭路试验,可以获得产率 8.45%, TiO₂ 品位 47.22%, 回收率 50.55% 的钛精矿。

4) 采用该选矿工艺,最终结果表明,对含 TFe 55.36%、TiO₂ 9.91% 的原矿,可获得 TFe 品位 64.50%, 回收率 81.70% 的铁精矿和 TiO₂ 品位为 47.22%, 回收率为 50.55% 的钛精矿,为开发利用该矿产资源提供了技术支撑。

参考文献

- [1] Dai Xinyu. Progress in beneficiation technology of primary ilmenite[J]. *China Mining*, 2002, (2): 40-42.
(戴新宇. 原生钛铁矿选矿技术的进展[J]. *中国矿业*, 2002, (2): 40-42.)
- [2] Yi Yunlai, Wei Qian, Liu Zhongrong. Experimental study on beneficiation of a complex ilmenite abroad[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2014, 34(1): 41-43.
(易运来, 魏茜, 刘忠荣. 国外某复杂钛铁矿的选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2014, 34(1): 41-43.)
- [3] Zhong Senlin, Xie Baohua, Wang Fengyu, et al. Experimental study on the beneficiation process of a foreign primary ilmenite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(3): 98-103.
(钟森林, 谢宝华, 王丰雨, 等. 国外某原生钛铁矿选矿工艺试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(3): 98-103.)
- [4] Zhang Song, Wen Shuming, Liu Jian, et al. Research progress in mineral processing technology of fine ilmenite[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2019, 39(1): 131-137.
(张松, 文书明, 刘建, 等. 微细粒钛铁矿选矿技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(1): 131-137.)
- [5] Liu Zhenhui, Zhang Chonghui, Bu Xianzong, et al. Experimental study on titanium separation from an iron tailings in Xinjiang[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2012, (4): 37-40.
(刘振辉, 张崇辉, 卜显宗, 等. 新疆某选铁尾矿选钛试验研究[J]. *矿冶工程*, 2012, (4): 37-40.)
- [6] Wang Fengyu, Xu Xiaoyi, Liang Taomao, et al. Magnetic separation enrichment method for panzhihua ultra-fine ilmenite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2): 79-85.
(王丰雨, 徐晓衣, 梁焱茂, 等. 攀枝花超细粒级钛铁矿磁选富集方法[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2): 79-85.)
- [7] Liu Jianguo, Zhang Jun, Tang Yuhe. Application of gravity and magnetic preconcentration process in several typical ilmenite beneficiation processes[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2018, (1): 96-100.
(刘建国, 张军, 汤玉和. 重、磁预选工艺在几种典型钛铁矿选矿工艺中的应用[J]. *矿产保护与利用*, 2018, (1): 96-100.)
- [8] Cao Yuchuan, Li Huiyue, Li Luhong, et al. Research on titanium separation process of a vanadium-titanium magnetite in Panxi region[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2): 91-98.
(曹玉川, 李辉跃, 李禄宏, 等. 攀西地区某钒钛磁铁矿选钛工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2): 91-98.)
- [9] Xie Baohua, Wu Chengcai, Wang Fengyu, et al. Research on the application of vertical ring high gradient magnetic separator to separate hematite[J]. *Material Research and Application*, 2018, 12(2): 143-147.
(谢宝华, 吴城材, 王丰雨, 等. 立环高梯度磁选机分选赤铁矿应用研究[J]. *材料研究与应用*, 2018, 12(2): 143-147.)