

澳大利亚某铁矿工艺矿物学及选矿试验研究

杨招君^{1,2,3}, 谢宝华^{1,2,3}, 钟森林^{1,2,3*}, 王丰雨^{1,2,3}, 梁焘茂^{1,2,3}, 李波^{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: 澳大利亚拥有原矿品位高、有害元素含量低、开采后不经选矿可直接进入冶炼的丰富的优质铁矿石资源, 但优质铁矿石资源不可再生, 开发利用较低品位铁矿石资源对于铁矿石资源的可持续开采具有重要意义。澳大利亚某铁矿中 Fe 品位 57.93%, 主要含铁矿物为赤铁矿和褐铁矿、少量硬锰矿, 脉石矿物主要是高岭土、石英, 少量的长石、黑云母、方解石、白钛石、金红石等。有价矿物之间嵌布关系复杂, 且铁矿嵌布粒度细, 同时赤铁矿和褐铁矿包裹体包含于高岭土、石英或交代连生, 铁矿磁选不易分离。试验采用磁选-浮选工艺流程获得 Fe 品位为 68.57%、回收率为 76.45% 的铁精矿。

关键词: 赤铁矿; 褐铁矿; 磁选; 浮选; 回收率

中图分类号: TD92

文献标志码: A

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.017

文章编号: 1004-7638(2022)06-0115-06

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Experimental study on mineralogy and beneficiation of an iron ore from Australia

Yang Zhaojun^{1,2,3}, Xie Baohua^{1,2,3}, Zhong Senlin^{1,2,3*}, Wang Fengyu^{1,2,3}, Liang Taomao^{1,2,3}, Li Bo^{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: Australia is rich in high-quality iron ore resources with high raw ore grade and low content of harmful elements, which can be directly smelted without beneficiation after mining. However, high-quality iron ore resources are not renewable. The development and utilization of lower grade iron ore resources is of great significance for the sustainable mining. An iron ore from Australia has a Fe grade of 57.93%. The mainly iron-containing minerals contain hematite, limonite, and a small amount of pyrolusite. The gangue minerals are mainly kaolinite and silica, followed by feldspar, biotite, calcite, white titanium, and rutile. The complex embedded relationship among the valuable mineral, the fine disseminated grain size of hematite as well as limonite inclusion were contained in kaolinite, silica which is not conducive to the magnetic separation of the iron ore. In this paper, a flow chart of magnetic separation-flotation was adopted to obtain iron ore concentrate with Fe grade of 68.57% as well as Fe recovery of 76.45%.

Key words: hematite, limonite, magnetic separation, flotation, recovery rate

收稿日期: 2022-08-22

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

作者简介: 杨招君, 1971 年出生, 女, 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: mimiyzj@163.com; * 通讯作者: 钟森林, 1984 年出生, 男, 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: 13316129197@qq.com。

0 引言

资料表明,世界铁矿石储量约1 900亿t,铁金属储量在900亿t左右,其中澳大利亚的储量超过世界的1/4,约530亿t,并且70%是可直接装船的高品位矿石^[1]。近几年铁矿石价格持续走高,澳大利亚的铁矿行业出现了空前繁荣;从2008年开始,澳大利亚超越巴西成为我国的第一大铁矿石进口国,澳大利亚的铁矿石品位、质量的改变将直接影响我国钢铁生产中炉料的配比情况。由于常年大量开采,高品位资源逐渐减少,铁矿石品位逐渐降低,澳大利亚已经开始开采和利用低品位、质量相对差的矿石,以减缓高品位优质铁矿石的枯竭速度^[2]。

目前,铁矿主要采用重力选矿、磁化焙烧-磁选、磁选-浮选等方法处理^[3]。澳大利亚某矿石主要可回收矿物为赤铁矿和褐铁矿,脉石矿物主要为硬锰矿、高岭石和石英,为了有效开发和利用该铁矿,笔者所

在项目组针对性地对其开展了多元素分析、矿物组成分析和铁的粒度分布情况等一系列工艺矿物学研究,在此基础上进行单一磁选、重选和磁-浮联合流程试验研究,最终结果表明,对含Fe57.93%的原矿,采用磁选-浮选工艺流程获得Fe品位为68.57%、回收率为76.45%的铁精矿。

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

原矿多元素分析结果见表1,X射线衍射谱见图1,采用MLA自动矿物定量测定该样品各矿物含量,测定结果见表2。分析可知,样品主要由赤铁矿和针铁矿(褐铁矿)为主,矿石中铁基本上呈三价铁(Fe_2O_3)状态产出,氧化亚铁(FeO)含量很低。脉石矿物为少量高岭石和石英,其次为黑云母和长石,有害元素磷和硫含量很低,对矿石的质量基本不构成影响,且矿石矿物组成较为简单。

表1 原矿多元素分析
Table 1 Spectral analysis results of run-of-mine

%

Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Cu	Co	K_2O	Na_2O	CaO
84.88	2.92	6.96	0.005	0.001	0.05	0.005	0.08
MgO	MnO	P_2O_5	SO_3	Cr_2O_3	TiO_2	ZrO_2	Ba
0.03	0.83	0.06	0.10	0.03	0.20	0.002	0.03

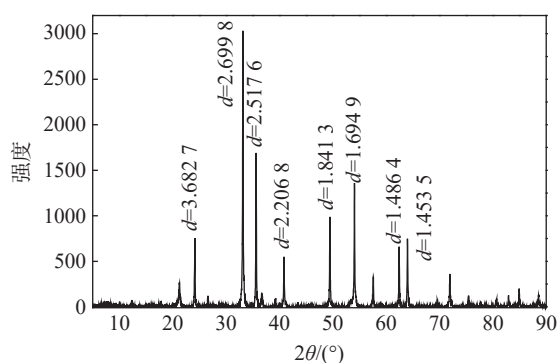


图1 原矿X射线衍射图谱
Fig. 1 X-ray diffraction pattern of run-of-mine

采用MLA测定原矿筛分产品中铁矿物的解离度,结果如表3和表4所示。可以看出,赤铁矿的总解离度相对较高,为95.54%,主要与褐铁矿、高岭土连生,部分与石英连生(图2);褐铁矿样品总解离度为94.01%,除与赤铁矿共生外,主要与高岭土连生,部分可见与石英、硬锰矿连生(图3、4)。

表2 原砂的矿物组成及含量

Table 2 Mineral compositions and content in run-of-mine

%

矿物	含量	矿物	含量
赤铁矿	60.950	褐铁矿	31.098
硬锰矿	1.344	白钛石	0.076
高岭石	4.015	假金红石	0.058
石英	1.845	水铝石	0.007
长石	0.144	方解石	0.074
黑云母	0.031	白云石	0.007
古铜辉石	0.004	重晶石	0.025
锆石	0.015	磷铝钙石	0.018
铬铁矿	0.003	其他	0.226
金红石	0.056		
自然铜	0.005	合计	100.00

表 3 主要有用矿物的解离度结果
Table 3 Dissociation results of main valuable mineral

粒级/mm	产率/%	解离度/%	
		赤铁矿	褐铁矿
+0.04	57.66	94.24	91.90
-0.04+0.02	31.57	97.31	94.73
-0.02	10.77	98.26	99.02
合计	100.00	95.54	94.01

表 4 原矿筛分分析
Table 4 Sieving analysis of run-of-mine

粒度组成/mm	产率/%	负累计产率/%	Fe品位/%	Fe分布率/%
+0.16	0.18	100.00	46.49	0.14
-0.16~+0.074	15.66	99.82	56.10	15.17
-0.074~+0.038	44.45	84.16	61.45	47.15
-0.038~+0.019	23.86	39.72	62.47	25.73
-0.019~+0.010	4.28	15.86	53.29	3.94
-0.010~+0.005	2.74	11.58	50.21	2.37
-0.005	8.84	8.84	36.08	5.51
合计	100.00		57.93	100.00

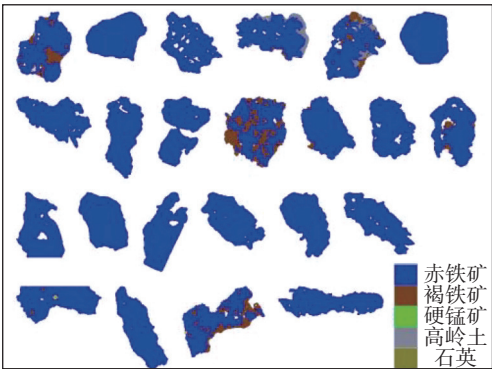


图 2 原矿中赤铁矿的连生状态
Fig. 2 Interlock of hematite in run-of-mine

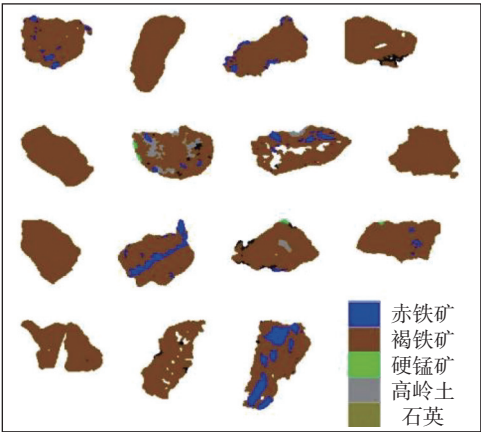


图 3 原矿中褐铁矿的连生状态
Fig. 3 Interlock of limonite in run-of-mine

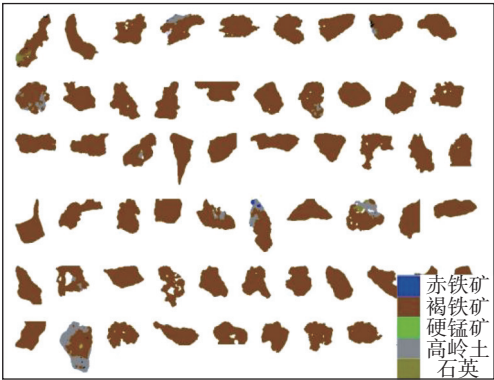


图 4 原矿中褐铁矿的连生状态
Fig. 4 Interlock of limonite in run-of-mine

表 4 结果表明, 原矿中-0.010 mm 粒级的含量占 11.58%, 品位低且较难回收, 最终精矿产率会受影响。

1.2 主要矿物的物化性质

1.2.1 赤铁矿 Fe_2O_3

赤铁矿含 Fe 69.94%, 有时含钛、硅和铝等混入物。三方晶系, 单晶体呈板状习性的菱面体, 集合体常见, 有片状、鳞片状、鲕状、具放射状构造的肾状、块状或粉末状; 结晶质的赤铁矿呈铁黑至钢灰色, 隐晶质的鲕状或肾状呈暗红色, 块状或粉末状呈褐黄色; 金属至半金属光泽, 或土状光泽, 不透明; 硬度 5.5 ~ 6, 密度 5.0 ~ 5.3 g/cm³。该样品中赤铁矿的化学成分能谱分析结果如表 5 所示。

表 5 赤铁矿化学成分能谱分析结果
Table 5 Chemical composition of hematite by energy spectrum analysis %

Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	V_2O_5	Cr_2O_3	MnO
98.34	0.17	1.24	0.03	0.05	0.10	0.01	0.07

注: 为 20 个测点平均成分。

1.2.2 褐铁矿 $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$

褐铁矿是以含水氧化铁为主要成分的、褐色的天然多矿物混合物, 以隐晶质针铁矿为主, 可混有纤铁矿、赤铁矿、石英、粘土等。通常呈黄褐至褐黑色, 条痕为黄褐色, 半金属光泽, 块状、钟乳状、葡萄状、疏松多孔状或粉末状, 也常呈结核状或黄铁矿晶形的假象出现, 硬度随矿物形态而异。该样品中褐铁矿的化学成分能谱分析结果如表 6 所示。

1.3 试验方法

赤铁矿、褐铁矿与石英、高岭土的粒度相同时, 赤铁矿、褐铁矿的比重为 4.2 ~ 5.3 g/cm³, 而石英、高岭土的比重为 2.65 g/cm³, 有用矿物与脉石矿物

的密度差大于 1.5 g/cm^3 , 具备较好的重力分选条件^[3]。先期试验表明采用广州粤有研矿物科技有限公司生产的螺旋溜槽具有设备结构简单、处理量大、生产成本低、效率高等优点^[4]。

该矿石中主要金属矿物赤铁矿和褐铁矿的比磁化系数分别为 $(240\sim 320) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ 和 $(60\sim 80) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$; 脉石中石英和高岭土的比磁化系数分别为 $(0.15\sim 1.03) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ 和 $(0.2\sim 0.85) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$, 主要金属矿物与脉石矿物的磁性差异可采用磁选方法进行分离与富集。先期试验表明采用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 高梯度磁选机具有富集比大, 对给矿粒度、浓度和品位波动适应性强, 工作可靠和操作简单等优点^[5]。

本试验主要回收赤铁矿和褐铁矿, 矿石中相当部分脉石为非磁性矿物, 为提高有用矿物品位, 降低部分脉石矿物的含量, 分别进行了螺旋溜槽、磁选设备对比、磁场强度条件试验; 为获得合格铁精矿产品, 对粗精矿分别进行磁选精选和浮选试验, 磁选精选进行了磁场强度条件试验, 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。

表 6 褐铁矿化学成分能谱分析结果
Table 6 Chemical composition of limonite by energy spectrum analysis

%

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	Cl ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂
85.84	4.92	7.92	0.13	0.14	0.09	0.08	0.56	0.02	0.08	0.02	0.08	0.12

注: 为20个测点平均成分。

2 试验结果与讨论

2.1 不同型号螺旋溜槽对比试验

考察不同型号螺旋溜槽条件试验, 试验结果见表 7。

表 7 不同型号螺旋溜槽试验对比结果
Table 7 Comparison results of variable model of spiral chute test

%

设备名称	产品名称	产率	Fe品位	Fe回收率
GL600	精矿	55.34	64.70	61.82
	尾矿	44.66	49.52	38.18
	给矿	100.00	57.92	100.00
GL900	精矿	52.70	65.40	59.51
	尾矿	47.30	49.59	40.49
	给矿	100.00	57.92	100.00
LP900	精矿	54.20	65.50	61.29
	尾矿	45.80	48.95	38.71
	给矿	100.00	57.92	100.00
GL1200	精矿	51.15	66.30	58.55
	尾矿	48.85	49.15	41.45
	给矿	100.00	57.92	100.00

由试验结果可知, 随着螺旋溜槽螺距增加, 铁精矿 Fe 品位逐渐上升, 回收率逐渐降低; 但回收率相对于磁选较低, 采用螺旋溜槽对该矿石难以进行有效分选。

2.2 磁选粗选试验

采用 SSS-I-145 高梯度磁选机进行磁选粗选试验, 分别进行了磁选设备对比和磁场强度条件试验。

2.2.1 磁选设备对比试验

目前, 市场应用较多的强磁设备除了粤有研公司生产的 SSS-I 型立环高梯度磁选机外, 还有平环 ZH 强磁选机, 在 0.5 T 磁场强度条件下进行 SSS-I 型立环与 ZH 平环对比试验, 试验结果见表 8。

表 8 磁选设备对比试验结果
Table 8 Comparison of SSS-I WHIMS and ZH HIMS magnetic separator

%

设备名称	产品名称	产率	Fe品位	回收率
SSS-I型立环高梯度磁选机	精矿	83.62	63.20	91.24
	尾矿	16.38	30.96	8.76
	给矿	100.00	57.93	100.00
ZH强磁选机	精矿	80.75	62.47	87.09
	尾矿	19.25	38.83	12.91
	给矿	100.00	57.92	100.00

由试验结果可知, SSS-I 立环磁选机磁选效果优于平环 ZH 强磁选机, 其精矿 Fe 品位和回收率均明显高于平环 ZH 强磁选机。

2.2.2 磁选粗选磁场强度条件试验

磁场强度是影响磁选效果的关键因素, 在矿浆浓度为 30%, 冲次为 250 次/min 条件下考察磁场强度条件试验, 试验结果见图 5。

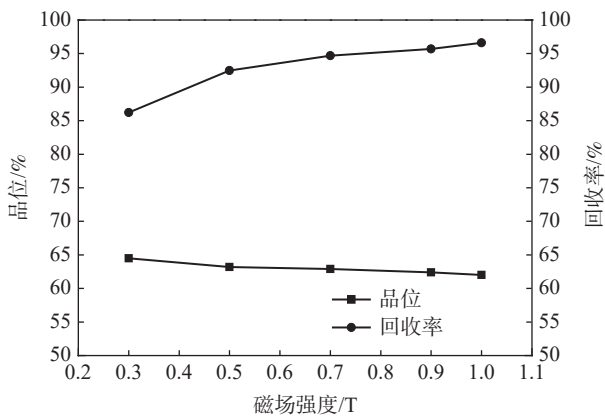


图5 粗选磁场强度条件试验结果

Fig. 5 Result of magnetic field intensity condition test for rough magnetic separation

由试验结果可知,随着磁场强度的升高,铁精矿回收率升高,品位逐渐降低,综合考虑精矿品位和回收率,选用 1.0 T 为磁选粗选最佳磁场强度。

2.2.3 磁选粗选冲次条件试验

脉动流体力可保持分选腔内矿粒群分散,有助于防止介质盒堵塞,同时矿浆曲线运动可增加有用矿物颗粒的捕获机率,而脉动冲次是影响脉动流体力的主要因素。故考察了冲次条件试验,试验结果见图 6。

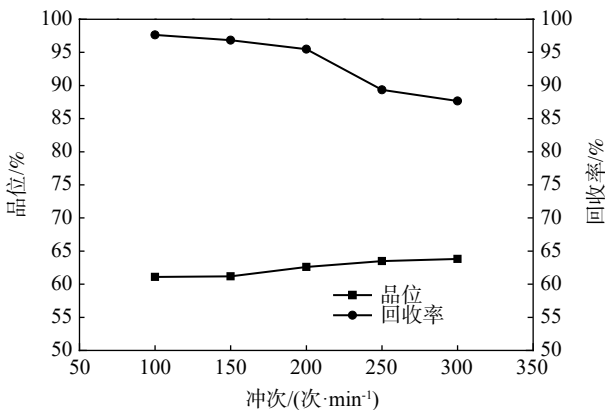


图6 冲次条件试验结果

Fig. 6 Results of stroke frequency test

由试验结果可知,随着冲次的增大,铁精矿回收率逐渐降低,品位逐渐升高,当冲次为 200 次/min 时,铁精矿品位为 62.6%,回收率为 82.03%,铁精矿品位和回收率较合理,故选用 200 次/min 为磁选粗选最佳冲次。

2.3 磁选精选试验

为获得合格铁精矿产品,对粗精矿进行磁选精选试验,考察了精选磁场强度试验,试验结果见图 7。

由试验结果可知,随着磁场强度的升高,铁精矿回收率升高,品位逐渐降低,综合考虑精矿品位和回收率,选用 0.5 T 为磁选粗选最佳磁场强度。

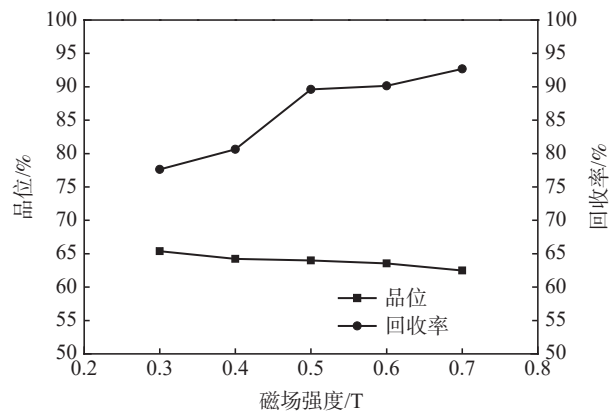


图7 粗精矿精选场强条件试验结果

Fig. 7 Results of rough concentrate cleaner magnetic intensity test

2.4 浮选试验

浮选试验给矿为磁选粗精矿,采用淀粉为絮凝剂, MTH 为自研阳离子胺类捕收剂,该捕收剂靠静电吸附、分子间缔合力作用的胺分子吸附与靠氢键作用的胺分子吸附。对磁选精矿进行浮选精选试验,并分别考察 MTH 和淀粉用量对浮选效果的影响。

2.4.1 捕收剂 MTH 用量试验

在硫酸用量 1 000 g/t, 淀粉用量 600 g/t 条件下,考察捕收剂 MTH 用量条件试验,试验结果见图 8。

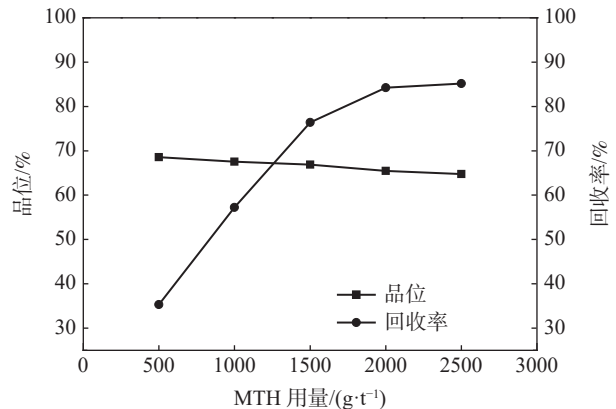


图8 捕收剂用量试验结果

Fig. 8 Results of collector dosage test

由图 8 可知,随着捕收剂用量增加,铁精矿回收率急剧上升后保持平稳,而品位逐渐下降,因此,确定 MTH 最佳用量为 2 000 g/t。

2.4.2 淀粉用量试验

赤铁矿、褐铁矿的莫氏硬度为 2~6.5,导致其在磨矿过程中易产生“过粉碎”现象,产生大量含铁高的矿泥,这些矿泥罩盖在有用矿物表面,降低铁矿物的回收率,缩小不同种类矿物间的可浮性差异,导致浮选效果恶化^[6-7]。为解决该问题,相应地使用淀粉进行絮凝剂浮选条件试验,试验结果见图 9。

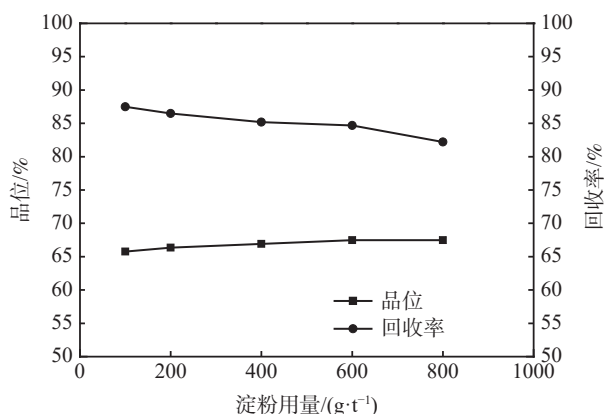


图9 淀粉用量试验结果

Fig. 9 Results of starch dosage test

由试验结果可知,随着淀粉用量增加,磁性产品的Fe品位有逐渐上升趋势,回收率逐渐下降;综合考虑,当淀粉用量为600 g/t时,精矿Fe品位为67.46%,对原矿回收率为81.24%,为最佳条件。

2.4.3 浮选闭路试验

在条件试验确定捕收剂和淀粉用量的基础上开展实验室小型闭路试验,试验流程见图10,试验结果见表9。

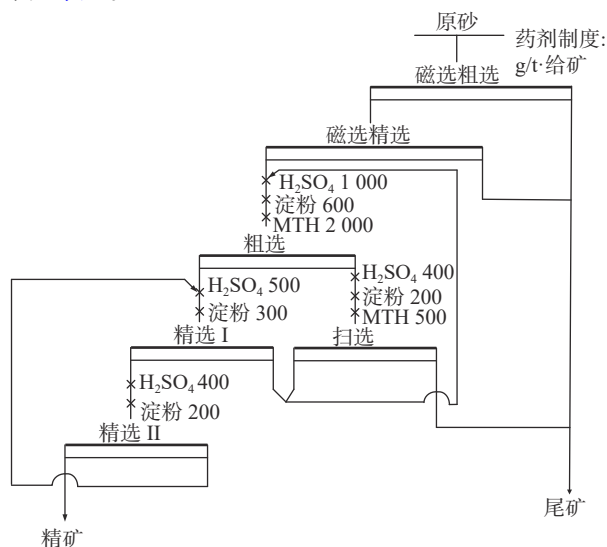


图10 全流程闭路试验流程

Fig. 10 Flow chart of closed-circuit test

表9 全流程闭路试验结果

Table 9 Results of closed-circuit test

产品名称	产率	Fe品位	Fe回收率
精矿	64.58	68.57	76.45
尾矿	35.42	38.51	23.55
原矿	100.00	57.92	100.00

从以上试验结果可知,原矿经一粗一精磁选取得粗精矿,粗精矿经一粗两精一扫选浮选闭路试验,可以获得产率64.58%,Fe品位68.57%,回收率76.45%的铁精矿。

3 结论

1) 澳大利亚某矿原矿中主要含铁矿物为赤铁矿和褐铁矿、少量硬锰矿;脉石矿物主要是高岭土、石英,少量的长石、黑云母、方解石、白钛石、金红石等;有害元素磷和硫含量很低,对矿石的质量基本不构成影响。

2) 赤铁矿的解离度相对较高,样品总解离度为95.54%;原矿中赤铁矿常呈集合体,可见片状、鲕状、块状或土状;可见与褐铁矿交代共生,与之连生的矿物以高岭土为主,少数石英和硬锰矿等;褐铁矿样品总解离度为94.01%,褐铁矿可见呈块状、葡萄状、疏松状或土状等,部分交代赤铁矿,连生矿物以高岭土为主,少数为石英和硬锰矿。

3) 在冲次为200次/min,磁场强度为1.0 T+0.5 T条件下,磁选一粗一精获得Fe品位63.98%,回收率89.62%的粗精矿。

4) 对粗精矿采用两段磁选精选无法获得高于目标Fe品位68%的铁精矿;采用磁选一粗一精-浮选一粗二精一扫工艺流程,可以获得产率为64.58%,Fe品位68.57%,回收率76.45%的铁精矿。

5) 下一步将采用粤有研公司设备和捕收剂进行半工业试验以验证小型试验结果。

参考文献

- [1] Wu Yuxiang. The status quo of iron ore resources in Australia and the analysis of new projects[J]. *Modern Mining*, 2016, 32(6): 62-64,68.
(巫宇翔. 澳大利亚铁矿资源现状及新项目分析[J]. *现代矿业*, 2016, 32(6): 62-64,68.)
- [2] Chen Hong. General situation of world iron ore resources and production[J]. *Iron & Steel*, 2001, (11): 69-73.
(陈宏. 世界铁矿石资源和生产概况[J]. *钢铁*, 2001, (11): 69-73.)

(下转第137页)