

弓长岭铁浮选尾矿浮选柱再选实验

靳雁琳¹, 赵通林¹, 张明泽²

(1. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 鞍山市城市建设发展中心, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 针对弓长岭赤铁矿的浮选尾矿进行了磨矿—强磁选—中磁选预选实验, 预选获得的磁选粗精矿铁品位为 41.71%, 产率为 33.62%, 铁回收率为 84.21%; 对比了浮选柱及浮选机粗选两种浮选工艺流程对预选粗精矿提质的影响。单因素实验结果表明浮选柱较佳工作参数为给矿压力 0.08 MPa、充气量 0.05 m³/h。经过浮选柱和两台浮选机组成的一粗一精一扫流程闭路实验, 可以获得再选精矿产率为 18.89%, 品位为 65.29%, 铁回收率为 74.07% 的技术指标, 相比于单一浮选机工艺的浮选铁品位和回收率, 分别提高了 0.27 个百分点和 2.61 个百分点。

关键词: 赤铁矿; 浮选尾矿; 浮选柱

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.017

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 02-0094-06

近年来, 铁矿的价格日益增加, 铁矿资源的开发规模也在日益加大, 造成了铁尾矿的堆存量开始急剧增大。据统计, 2018 年我国的铁尾矿堆存量已经超过了 75 亿 t, 并且以 5 亿 t/a 的速度急剧增长^[1]。大量的尾矿堆存量不仅占用了土地, 而且造成了资源的浪费, 也给人类的环境造成了潜在危机。因此如果把这些尾矿综合利用起来, 不仅可以延长矿产资源使用年限, 还可以节省大量用地, 减轻环境污染, 具有较大的经济效益和社会效益^[2], 同时铁尾矿进行再利用的工艺也开始受到广泛关注^[3-4]。鞍山式铁矿石是我国最重要的铁资源, 目前, 鞍山地区铁尾矿总量已接近 10 亿 t, 年排放铁尾矿量 3280 万 t。阶段磨矿、粗细分选、重选—磁选—反浮选联合工艺是处理鞍山式铁矿石常用的流程, 经选别后得到的鞍山式铁尾矿由重选尾矿、强磁选尾矿、反浮选尾矿组成^[5], 其中浮选尾矿铁品位最高, 可达 16% 以上, 具有再选回收利用的可能性和必要性。

根据尾矿性质的不同, 再选回收利用的工艺与设备也有较大差别, 浮选尾矿常用对细粒级回收效率更高的微泡浮选柱等工艺^[6]。本文以弓长岭铁矿的浮选尾矿为原料, 研究鞍山式铁尾矿的特征和再利用工艺, 采用细磨后中、强磁选预选-浮选柱再选工艺对弓长岭铁矿浮选尾矿进行铁矿物的回收实验研究, 提出处理鞍山式铁矿石选矿厂铁尾矿的回收利用技术。

1 实验样品

实验矿样为弓长岭铁矿选矿厂“弱磁选—强磁选—阴离子反浮选”工艺中的浮选尾矿。将浮选尾矿晾晒去除水分, 采用移堆法和环堆法对浮选尾矿进行混匀、缩分、取样 (实验用样和化验用样)。实验矿样的多元素分析结果见表 1。由表 1 可以看出, 具有回收价值的元素为 Fe, 品位为 16.65%。

表 1 实验矿样的化学多元素分析结果 /%

Table 1 Multi-element analysis result of flotation tailings

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CuO	Mn	Ti	Cl	P	S	Sr
16.65	65.61	3.04	2.63	1.40	1.09	0.047	0.069	0.018	0.11	0.013	0.003

收稿日期: 2021-09-24

作者简介: 靳雁琳 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事铁矿分选工艺研究。

通信作者: 赵通林 (1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事矿物加工工艺与理论研究、磁选设备研发。

浮选尾矿的 X 射线衍射分析结果见图 1。从图 1 可以看出，弓长岭铁矿浮选尾矿的有用铁矿物主要为赤铁矿。浮选尾矿中的主要脉石矿物为石英，其次是方解石、高岭石，尽量分离出去这些脉石矿物成为浮选尾矿再选的关键。浮选尾矿的粒度分析和粒级金属分布分析见表 2。

根据表 2 中的数据可知，浮选尾矿的铁品位为 16.65%，-0.074 mm 74.02%，粒度组成较细。铁元素分布主要集中在-0.074 mm 细粒部分，表明浮选尾矿中铁矿物的损失主要是细颗粒损失。由于浮选尾矿品位低，且细粒级中金属 Fe 的分布居

多，要富集得到铁品位 65% 以上的铁精矿，需加强对细粒级铁矿物的回收。

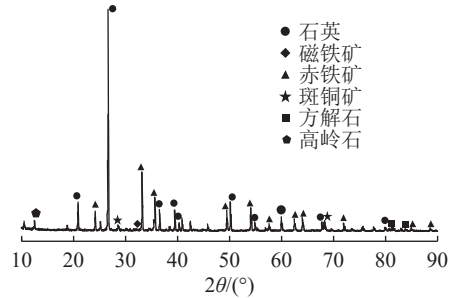


图 1 弓长岭铁矿浮选尾矿的 X 射线衍射
Fig.1 XRD spectrum of flotation tailing of hematite ore

表 2 浮选尾矿的粒度组成和金属分布分析
Table 2 Size composition and metal distribution of flotation tailing /%

粒级/mm	粒级产率	累积产率/%	粒级品位	累积品位/%	粒级回收率	累积回收率/%
+0.074	25.98	25.98	7.74	7.74	12.07	12.07
-0.074 +0.053	15.67	41.65	10.02	4.83	9.43	21.50
-0.053 +0.045	17.18	58.83	10.83	9.25	11.17	32.68
-0.045 +0.038	7.15	65.98	14.69	9.84	6.31	38.98
-0.038	34.02	100.00	29.87	16.65	61.02	100.00
总计	100.00		16.65		100.00	

2 实验研究

2.1 磁选工艺预选实验

首先对弓长岭铁矿浮选尾矿进行中、强磁选工艺预选，实验流程见图 2，中磁选作业的尾矿进行强磁扫选后抛尾，扫选精矿返回中磁选作业。强磁选作业采用 SLon-100 周期式脉动高梯度磁选机，中磁选作业采用筒式磁选机。条件实验获得的预选较佳条件为，强磁机分选区磁感应强度为 988 mT，脉动冲次为 240 次/min；中磁机滚筒表面磁感应强度为 450 mT。浮选尾矿化学分析铁品位为 16.65%，经磨矿至细度为-0.043 mm 入选。

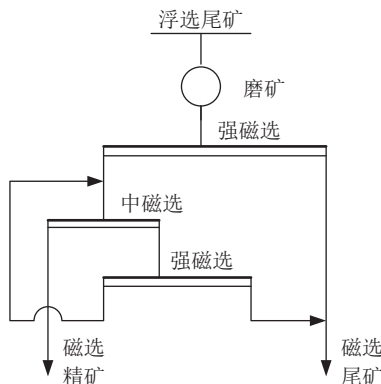


图 2 浮选尾矿磁选实验流程

Fig.2 Flowsheet of magnetic separation of flotation tailings

中、强磁选实验结果见表 3，最后获得的预选粗精矿铁品位为 41.71%，产率为 33.62%，铁回收率为 84.21%。为进一步提高精矿品位，获得最终精矿，对预选粗精矿进行反浮选富集实验，设备为 $\Phi 50 \times 2000$ mm 旋流-静态微泡浮选柱和 XFD-III 型 0.75 L 单槽浮选机。

表 3 磁选实验结果

Table 3 Test results of magnetic separation

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
浮选尾矿	100.00	16.65	100.00
磁选粗精矿	33.62	41.71	84.21
磁选尾矿	66.38	3.96	15.79

2.2 浮选柱参数实验

根据选厂浮选药剂制度，浮选柱参数实验^[7]油酸钠用量 800 g/t、NaOH 用量 1200 g/t、CaO 用量 500 g/t、淀粉用量 1200 g/t。实验采用 $\Phi 50 \times 2000$ mm 旋流-静态微泡浮选柱分选系统，矿浆制备设备采用 $\Phi 300 \times 450$ mm 搅拌桶，功率为 0.75 kW 的循环矿浆泵，给料泵和排尾泵采用两台蠕动泵。未经特殊强调，浮选柱参数实验给矿的质量分数浓度均为 30%，矿浆温度为 45 °C，初始设备操作参数为给矿压力 0.08 MPa、充气量 0.06 m³/h、

给矿速度 270 mL/min、泡沫层厚度 30 cm。

2.2.1 给矿速度

给矿速度的快慢会影响到浮选柱的浮选时间及处理量，因此，需确定合适的给矿速度^[8]。实验结果见图 3。由图 3 可知，随着给矿速度的增加，即浮选柱处理量提高，浮选柱精矿品位先升高后降低，回收率先缓慢下降后迅速下降。当给矿速度适宜时，在干涉沉降作用下，利于石英等脉石矿物排出，精矿铁品位较好；但给矿速度过高，充气量等条件没有相应调整，会导致分选过程选择性变差，及铁矿物会在泡沫中严重夹杂，造成尾矿铁品位上升，精矿铁品位下降，回收率下降。综合考虑，质量分数浓度 30% 矿浆的适宜给矿速度为 270 mL/min，对应的浮选时间为 15 min。

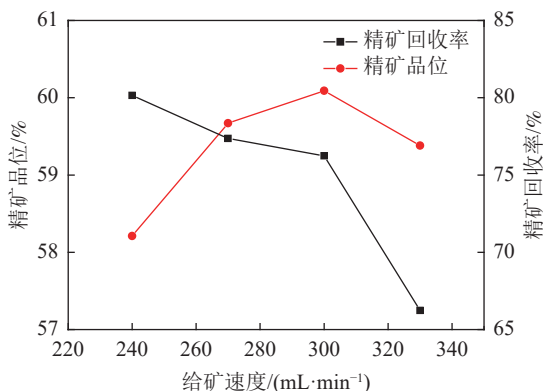


图 3 旋流-静态微泡浮选柱给矿速度实验结果
Fig.3 Test results of feed speed of cyclone-static micro-bubble flotation column

2.2.2 循环压力

循环泵是浮选柱用于引入空气的动力，对浮选柱的处理能力和精矿铁品位和回收率影响较大，其转速决定着浮选中矿的循环压力^[9]。循环压力通过以下三个方面影响分选效果，一是影响管流矿化段矿浆的紊流强度，可以改变矿粒与气泡的碰撞概率，改变矿化效果；二是决定着吸气量大小和气泡状态；三是决定旋流力场强度。实验过程中，保持浮选柱其他实验条件不变，改变循环泵给矿压力，实验结果见图 4。从图 4 中可以看出，随着循环压力的增加，中矿循环量增加，精矿铁品位和回收率逐渐升高，实验压力较大为 0.1 MPa。循环压力大会使设备磨损加重。综合考虑上述情况，选择浮选柱循环压力为 0.08 MPa。

2.2.3 充气量

气泡是矿物浮选选择性分离的界面，是待浮

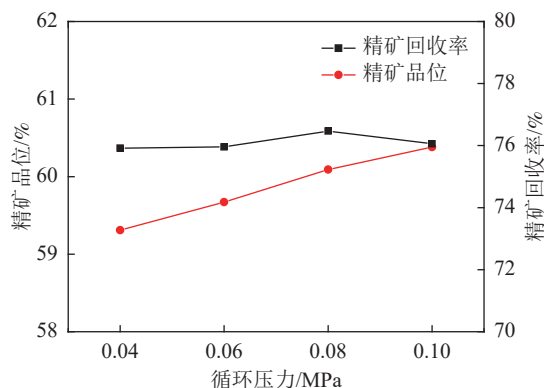


图 4 旋流-静态微泡浮选柱循环压力实验结果
Fig.4 Test results of circulating pressure of cyclone-static micro-bubble flotation column

矿物的载体，充气量的大小会直接影响浮选柱中的气泡质量，而气泡质量的好坏直接影响泡沫层矿化气泡质量的好坏^[10]，因此，要想获得良好的矿化效果，为了保证矿物颗粒有较高的的上升速率，适量的气泡才是提高分选效率的重要因素。实验中，其他实验条件保持不变，通过空气流量计改变浮选柱中矿浆的充气量，实验结果见图 5。

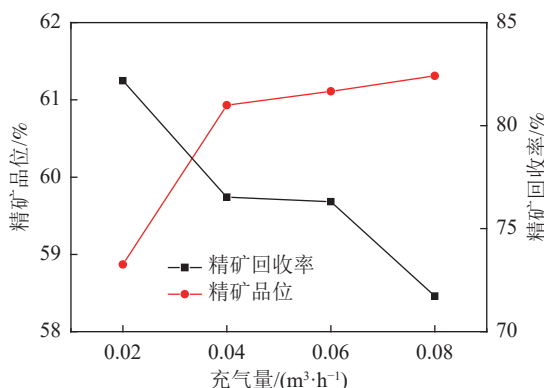


图 5 旋流-静态微泡浮选柱充气量实验结果
Fig.5 Test results of quantity of aeration of cyclone-static micro-bubble flotation column

由图 5 可以看出，浮选压力一定时，浮选柱充气量越小，上浮泡沫量越少，底流精矿的回收率越高，但精矿铁品位较低；随着充气量的增加，上浮泡沫量增多，精矿铁品位上升很快，充气量达到 0.06 m³/h 后，精矿品位仅微幅上升，而精矿回收率持续下降。综合分析实验结果，浮选柱充气量在 0.04~0.06 m³/h 时分选效果较为理想，后续的实验充气量确定为 0.05 m³/h。

2.3 浮选柱开路实验

开路实验为一粗一精一扫流程，工艺流程见图 6 (a)。粗选作业设备为浮选柱，精选与扫选

作业设备为单槽浮选机。粗选条件为给矿质量分数浓度为 30%、矿浆温度为 45℃、给矿速度 270 mL/min、循环压力 0.08 MPa、油酸钠用量 800 g/t、NaOH 用量 1200 g/t、CaO 用量 500 g/t、淀粉

用量 1200 g/t、充气量 0.05 m³/h。。精选段加入油酸钠捕收剂 200 g/t，扫选段加入淀粉抑制剂 300 g/t，开路实验结果见图 6 (b)。

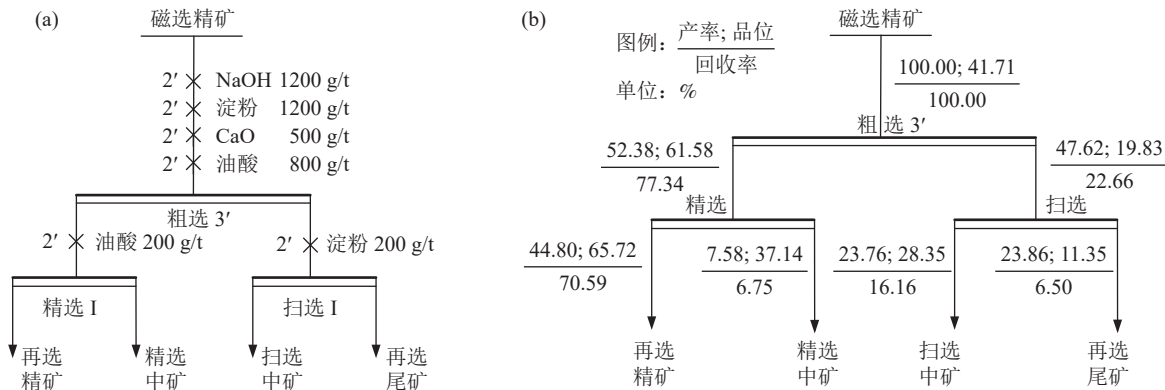


图 6 开路流程 (a) 和 数质量流程图 (b)

Fig.6 Open circuit flow (a) and numerical quality flow chart (b)

2.4 浮选柱闭路实验

浮选柱的闭路实验，将开路实验的精选作业中矿和扫选作业中矿返回粗选作业，见图 7 (a)。

经过 24 kg 矿样连续闭路循环实验达到平衡后，计算数质量流程指标。

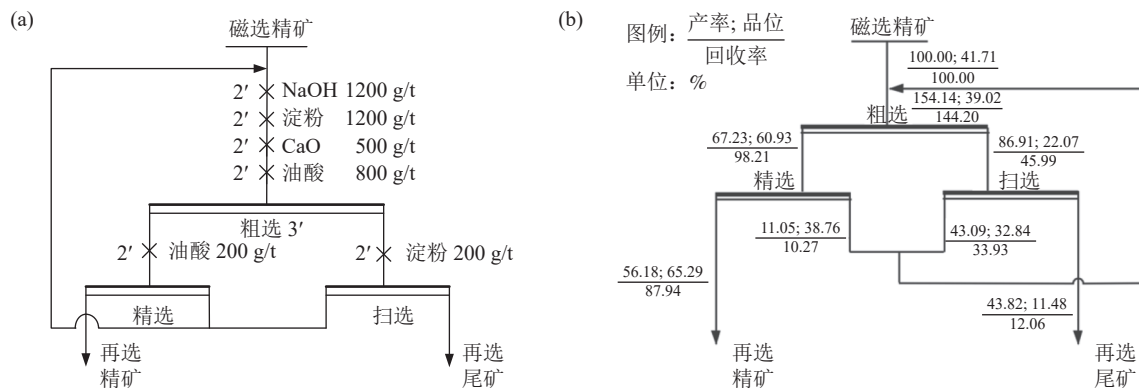


图 7 旋流-静态微泡浮选柱反浮选开路实验流程

Fig.7 Flowsheet of closed-circuit of reverse-flotation of cyclone-static micro-bubble flotation column

图 7 (b) 是以旋流静态-微泡浮选柱为粗选，两台单槽浮选机组成的一粗一精一扫闭路流程条件下得到的，最终精矿铁品位达到 65.29%，尾矿铁品位 11.48%，精矿产率 56.18%，铁回收率 87.94%。

为对比浮选柱与单槽浮选机的浮选效果，进行了与上述相同的闭路工艺实验，粗选、精选、扫选作业设备均采用实验室单槽浮选机。在较佳条件下，获得的最终精矿铁品位为 65.02%，产率为 54.74%，尾矿铁品位 13.52%，铁回收率为 85.33%。表 4 为浮选精矿指标对比结果。

表 4 闭路实验结果对比
Table 4 Results of closed-circuit flotation of flotation machine and flotation column

浮选工艺	精矿产率/%	精矿品位/%	尾矿品位/%	回收率/%
浮选柱工艺	56.18	65.29	11.48	87.94
单槽浮选机工艺	54.74	65.02	13.52	85.33

表 4 可以看出，浮选柱作为粗选作业设备获得的最终精矿产率、品位和回收率分别高于单槽浮选机作为粗选设备的 1.44、0.27 和 2.61 个百分点，浮选柱作为粗选作业设备获得的最终尾矿品位低于单一使用槽式浮选机的 2.04 个百分点，粗选使用浮选柱的工艺显著优于单槽浮选机工艺。

铁品位 16.65% 的弓长岭浮选尾矿，综合磁选预选与闭路浮选实验结果，最终铁精矿品位为 65.29%，产率为 18.89%，回收率为 74.07%。

浮选柱改善铁尾矿浮选效果可以从四个方面来阐述^[1]。第一，静态微旋流浮选柱通过水力空化原理产生气泡，气泡能在疏水颗粒表面成核析出，有利于铁矿物表面水化膜破裂，使得铁矿物表面更加疏水，提高了气泡在浮选过程中的选择性，所以精矿品位较常规浮选机精矿品位更高；第二，疏水颗粒经过气泡发生器在旋流区实现第一次矿化，而在分选区得到进一步富集，可以认为相当于精选作业；第三，静态微旋流浮选柱的矿浆循环装置可以将没有得到矿化的疏水颗粒二次矿化，可以认为相当于对中矿的扫选作业，提高了精矿产品回收率。第四，静态微泡旋流浮选柱产生的气泡尺寸小于机械搅拌式浮选机产生的气泡，根据浮选概率方程的描述，浮选气泡越小越有利于细颗粒矿物的回收，有效提高了气泡对细粒疏水颗粒的捕收概率。由于实验所用矿样为铁尾矿，粒度较细，浮选柱恰恰有效果回收了常规浮选机无法有效回收的细颗粒铁矿物，因此浮选柱精矿回收率显著高于常规浮选机精矿。

3 结 论

(1) 铁矿浮选尾矿中的有用铁矿物为赤铁矿，具有回收价值的元素为 Fe，品位为 16.65%，其余元素暂不具备回收价值。浮选尾矿中的主要脉石矿物为石英，其次是方解石、高岭石。

(2) 浮选尾矿经过“强磁—中磁—强磁”工艺预处理后，以铁品位 16.65% 的浮选尾矿为原料，最终获得磁选粗精矿的铁品位为 41.71%，产率为 33.62%，铁回收率为 84.21%。

(3) 以旋流静态-微泡浮选柱和两台实验浮选机组成一粗一精一扫流程闭路实验，可以获得产率 56.18%，精矿品位 65.29%，回收率 87.94% 的铁精矿，尾矿铁品位降至 11.48%。与单一采用槽式浮选机闭路实验相比，浮选柱作为粗选设备的闭路流程精矿产率、铁品位和流程回收率分别高 1.44、0.27 和 2.61 个百分点，粗选使用浮选柱工艺优于单一槽式浮选机工艺。综合磁选预选与闭路浮选，最终铁精矿品位为 65.29%，产率为 18.89%，回收率为 74.06%。

参考文献:

- [1] 蒋京航, 叶国华, 胡艺博, 等. 铁尾矿再选技术现状及研究进展[J]. 矿冶, 2018, 27(1):1-4.
- [2] 陈杜娟, 王志丰, 王婷霞. 某尾矿综合回收选矿实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(1):104-108.
- [3] 陈虎, 沈卫国, 单来, 等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土, 2013(2):88-92.
- [4] 王俊理. 我国金属矿山选矿技术进展及发展方向[J]. 科技创新与应用, 2014(12):295.
- [5] 岳铁兵, 周文雅, 吕良, 等. 鞍本地区选铁尾矿资源现状与利用前景[J]. 矿产保护与利用, 2007(6):52-54.
- [6] 冉银华, 张志明, 李强. 滇西某尾矿回收硫铁矿物的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(1):119-123.
- [7] 杨春, 侯英, 盖壮, 等. 弓长岭赤铁矿浮选尾矿再磨再选试验研究[C]. //第二十二届川鲁冀晋琼粤辽七省矿业学术交流会议论文集. 2015: 309-316.
- [8] 王伟之, 刘泽伟, 来有邦. 某磁赤混合铁矿的柱式阳离子反浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(6):64-67.

WANG W Z, LIU Z W, LAI Y B. Experimental study on cationic reverse flotation by flotation column of a magnetite and hematite mixed iron ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(6):64-67.

[9] 孙凤杰, 陶秀祥. “旋流”对浮选柱气含率及气泡尺寸的影响[J]. *金属矿山*, 2017(12):115-118.

SUN F J, TAO X X. Influence of “swirling flow” on gas hold up and bubble size in flotation column[J]. *Metal Mine*, 2017(12):115-118.

[10] 李城, 王伟之, 刘泽伟, 等. 钒钛磁铁矿中钛的柱机联合

全浮工艺试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):40-43+47.

LI C, WANG W Z, LIU Z W, et al. Experimental research on column-cell integration full flotation technology of titanium in vanadium titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):40-43+47.

[11] 赵敏捷, 方建军, 李国栋, 等. 旋流-静态微泡浮选柱的应用及研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2016(4):6-10.

ZHAO M J, FANG J J, LI G D, et al. State and application of cyclonic static microbubble flotation column[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(4):6-10.

Study on Re-concentration of Flotation Tailings in Gongchangling Iron Plant

Jin Yanlin¹, Zhao Tonglin¹, Zhang Mingze²

(1. School of Mining Engineering, University of Science & Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, China;
2. Anshan City Urban Development Center, Anshan, Liaoning, China)

Abstract: Pre-separation test of grinding-high intensity magnetic separation-medium magnetic separation was carried out on the flotation tailings of Gongchangling hematite. The iron grade of magnetic separation rough concentrate obtained by pre-separation is 41.71%, yield is 33.62% and iron recovery is 84.21%. The effects of two flotation processes, flotation column and flotation machine roughing, on the quality improvement of pre-concentration coarse concentrate were compared. The single factor test results show that the optimal working parameters of flotation column are feeding pressure 0.08 Mpa and aeration 0.05 m³/h. Through the closed-circuit test of one roughing, one cleaning and one scavenging process made of flotation column and two flotation units, the technical indexes of 18.89% concentrate mineral rate, 65.29% grade and 74.07% iron recovery can be obtained, which are 0.27 percentage points and 2.61 percentage points higher than that of single flotation machine process, respectively.

Keywords: Hematite; Flotation tailings; Flotation column