山东某低品位微细粒铁矿选矿试验

欧阳林莉
(长沙矿山研究院有限责任公司,湖南 长沙 410012)

摘要:为给山东某低品位微细粒铁矿的开发利用提供合理的选矿工艺,本文针对矿石性质特点,进行磁滑轮抛尾、高压辊磨、阶段磨矿阶段磁选、反浮选等工艺试验。结果表明:采用"破碎抛废—阶段磨选(淘洗)—反浮选"流程,即-30 mm粒级原矿先在0.45 T磁场强度、2 m/s带速条件下进行磁滑轮抛尾,将所得-30 mm磁性产品再破碎至-12 mm,在0.30 T磁场强度、100 r/min转速条件下进行干式磁选;将所得-12 mm磁性产品再高压辊磨破碎至-2 mm,在0.30 T场强下进行湿式弱磁选;将所得-2 mm磁性产品细磨至-0.075 mm粒级质量分数为70%,在0.15 T磁场强度下进行湿式弱磁选;将所得-0.075 mm粒级质量分数为70%的磁性产品再磨至-0.045 mm粒级质量分数为95%,在0.14 T磁场强度下进行湿式弱磁选;最后对所得-0.045 mm粒级质量分数为95%的磁性产品进行反浮选提品位试验,最终闭路试验可获得TFe质量分数为59.14%的铁精粉,工艺Fe回收率为45.86%。

关键词:低品位微细粒铁矿石; 阶段磨选; 反浮选
中图分类号:TD924.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8764(2022)02-0081-07
doi:10.13403/j.sjqt.2022.02.028

Mineral processing test of a low-grade fine-grained iron ore in Shandong

OUYANG Linli
(*Changsha Institute of Mining Research Co.,Ltd.,Changsha* 410012,*Hunan*,*China*)

Abstract: In order to provide a reasonable mineral process technique for the development and utilization of a low-grade fine-grained iron ore in Shandong, such process tests as magnetic pulley discarding tailings, high-pressure roller mill, stage grinding stage magnetic separation and reverse flotation are conducted according to the characteristics of the ore. The results show that the process of "crushing and throwing-stage grinding (panning)-reverse flotation" is adopted, i.e. the -30 mm particle size raw ore is firstly subjected to magnetic pulley discarding tailings at 0.45 T magnetic field strength and 2 m/s belt speed, the obtained -30 mm magnetic product is crushed to -12 mm, and dry magnetic separation is carried out under the conditions of 0.30 T magnetic field strength and 100 r/min rotation speed; the obtained -12 mm magnetic product is then crushed to -2 mm by high pressure roller mill to perform wet weak magnetic separation under the field strength of 0.30 T; the obtained -2 mm magnetic product is finely ground to -0.075 mm particle size with a mass fraction of 70%, and wet weak magnetic separation is carried out under the magnetic field strength of 0.15 T; the obtained -0.075 mm magnetic products with a mass fraction of 70% mm grain size are re-ground to a mass fraction of -0.045 mm grain size of 95%, and are subjected to wet weak magnetic separation under a magnetic field strength of 0.14 T; the magnetic products obtained from the product are subjected to reverse flotation grade test, and the final closed circuit test can obtain iron powder with a total iron grade of 59.14%, and the total iron recovery rate of the process is 45.86%.

Key words: low-grade fine-grained iron ore; stage grinding; reverse flotation

收稿日期:2021-08-19; **修回日期**:2021-12-10
作者简介:欧阳林莉(1984—),女,工程师,从事选矿技术和药剂方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随着国民经济的快速发展，我国易选铁矿资源日益减少，而国外优质铁矿的价格却不断上涨，因此，寻找新的或可替代资源并攻克难选冶技术难关显得愈发重要[1]。我国已开发利用的磁铁矿主要产自西昌－滇中、冀东－密云、包头白云鄂博等十大矿区，而鄂西北、山东、河北等地的低品位赤铁矿资源，由于全铁质量分数低于50%，且SiO_2、Al_2O_3和P质量分数高，矿粉晶粒微细，其较难分选[2]。这类铁矿资源选矿的难点主要体现在“贫、细、杂”三个方面[3]：“贫”，即矿石铁品位低，其普遍在20%~30%，磁性铁的质量分数更低，在10%左右；“细”，体现在铁矿物赋存粒度细，磁铁矿呈微细粒浸染状分布，晶粒尺寸多数为0.015~0.045 mm，该类矿石需细磨到－0.045 mm粒度占比达95%以上才能达到单体解离；“杂”，矿石成分复杂、共生关系密切、有用矿物与脉石矿物可选性差异小等。

目前已有部分研究人员针对微细粒低品位铁矿进行了选矿试验研究。孙炳泉等[4]针对某国外微细粒酸性磁铁矿，采用“两段阶段磨矿—弱磁选—反浮选—尾矿脱水后再磨再选”的流程选别，可实现该类矿石的高效分选；此外，其采用该工艺，针对国内某低品位微细粒铁矿开展了实验室小型选矿试验和现场扩大试验[5]，结果表明，中矿再磨后的单独再选方案的选别指标最优。吴师金等[6]分析了江西某低品位铁矿的有益有害化学元素、矿石成分和主要矿物赋存状态等工艺矿物学特征，通过选矿试验确定了选矿流程：将磨矿细度为－0.074 mm占比为90%的粗粉进过一次磁选，然后将－0.038 mm粒级占比为91.3%的粗精粉再进过2次精选，可获得较好的选矿指标。刘兴华等[7]针对新疆某低品位细粒磁铁矿进行了选矿工艺试验，结果表明：阶段磨矿、阶段弱磁选、阳离子反浮选工艺流程节能高效，在流程产率(最后一段磨矿量)下降22.99%的条件下，最终铁矿品位提高了3.28%。唐雪峰等[8]分析了某典型极微细磁铁矿的嵌布粒度特性，采用“弱磁选—强磁选—絮凝脱泥—反浮选”联合工艺流程，可获得TFe质量分数为61.77%，Fe回收率为62.55%的铁精矿。高平[9]针对巴基斯坦某铁矿中脉石矿物质量分数高、磁铁矿嵌布粒度细等特点，通过“阶段磨矿—阶段选别”的选矿工艺流程明显提高了精矿品位。此外，阳离子反浮选工艺由于捕收剂合成技术的不断发展和工艺的逐渐完善，其也越来越多地运用在我国难选铁矿的提铁降硅选矿工艺流程中[10]。

难选铁矿的问题众多，导致选矿回收困难，采用单一的“弱磁选－强磁选”、“磁选－反浮选”等工艺后选矿指标仍不理想。为此，本文通过研究“破碎抛废—阶段磨选—反浮选”的选矿回收流程，针对山东某低品位微细粒铁矿进行选矿试验，以期可为有效回收该微细铁矿提供技术支撑，并为类似铁矿的选别和回收提供借鉴与参考。

1 矿石性质

山东某铁矿的铁品位低，磁性铁的质量分数为12.24%，目的矿物磁铁矿嵌布粒度微细且与脉石矿物紧密共生。该铁矿的主要化学成分、主要矿物组成和铁物相分析结果分别如表1~3所示。由表1、3可知：该铁矿中可供选矿回收的有价元素是铁，TFe质量分数为23.48%，赋存在磁铁矿中的铁占52.13%。为达到富集回收铁矿物的目的，需要选矿排除或降低的脉石组分主要是SiO_2，其质量分数高达49.55%，其次为Al_2O_3、MgO和CaO，其合计质量分数为59.95%。此外，铁矿中杂质S、P的质量分数较低。由表2可知：该铁矿的矿物组成较为简

表1 山东某铁矿的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of a certain iron mine in Shandong %

TFe	MFe	SiO_2	S	P	Mn	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
23.48	12.24	49.55	0.25	0.079	0.18	3.35	4.43	2.62	0.57	0.28

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　山东某铁矿的铁物相分析(质量分数)

Table 2　Iron phase analysis of a certain iron mine in Shandong　%

项目	磁铁矿中铁	赤褐铁矿中铁	硅酸铁中铁	假象赤铁矿中铁	硫化铁中铁	碳酸铁中铁	总铁
质量分数	12. 24	0. 65	8. 70	0. 13	0. 20	1. 56	23. 48
分布率	52. 13	2. 77	37. 05	0. 55	0. 85	6. 65	100. 00

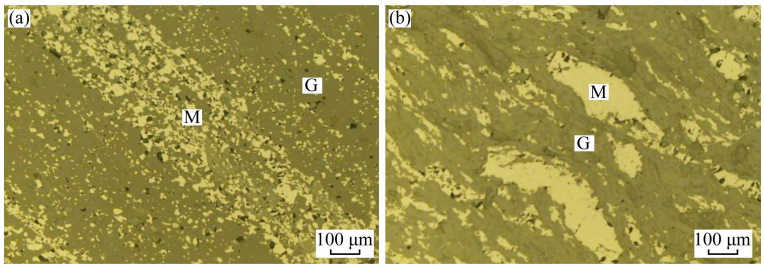
表 3　山东某铁矿的主要矿物组成(质量分数)

Table 3　Main mineral content of an iron mine in Shandong　%

磁铁矿	褐铁矿	菱铁矿	黄铁矿	石英、长石	云母	方解石、白云石	绿泥石	铁闪石、铁透闪石	辉石	磷灰石
20. 05	1. 05	1. 12	0. 45	30. 95	5. 28	3. 73	4. 25	31. 82	0. 64	0. 36

单，铁矿物主要是磁铁矿，少量为褐铁矿和菱铁矿；脉石矿物以石英和铁闪石为主，其次是云母、铁透闪石、绿泥石、方解石等；金属硫化物多为黄铁矿，但其质量分数较低。

该铁矿中磁铁矿与脉石的嵌布关系如图 1 所示。图 1(a)为微细粒磁铁矿呈稀疏浸染条带状嵌布在脉石中，图 1(b)为粒度不均匀的不规则状、长条状磁铁矿呈稀疏浸染状嵌布在脉石中。该铁矿粒度分布如表 4 所示。由图 1、表 4 可知，该铁矿石中磁铁矿多具有不均匀细粒或微细粒嵌布的特征，部分磁铁矿粒度十分细小，有的甚至与石英、铁闪石等构成极为复杂镶嵌关系；磁铁矿形态较不规则，与脉石接触边界通常为港湾状或锯齿状，交生关系较为复杂。



M—磁铁矿；G—脉石。

图 1　磁铁矿与脉石的嵌布关系

Fig. 1　Embedded relationship between magnetite and gangue

表 4　山东某铁矿中磁铁矿的粒度分布(质量分数)

Table 4　The dissemination size of magnetite of a certain iron mine in Shandong　%

+0. 30 mm	0. 15 ~ 0. 30 mm	0. 074 ~ 0. 15 mm	0. 037 ~ 0. 074 mm	0. 019 ~ 0. 037 mm	0. 010 ~ 0. 019 mm	-0. 010 mm
6. 34	18. 08	26. 28	24. 58	13. 36	6. 56	4. 80

由矿石性质可知，目的矿物中磁铁矿多具不均匀细粒或微细粒嵌布的特征，因此应首先采用预先抛废工艺及时脱除废石，这既可提高入选品位，又能避免这部分废石对磁铁矿选矿过程的影响；然后采用“阶段磨矿-阶段选别”工艺来减少过磨现象，利于精矿品位的提高。

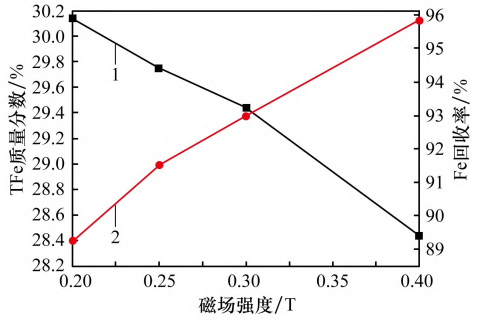
2　选矿试验

2. 1　破碎抛废试验

先将原矿破碎至 -30 mm，在磁场强度为 0. 45 T、带速为 2 m/s 的条件下进行磁滑轮抛废；所得磁性产品再破碎至 -12 mm，在磁场强度为 0. 3 T、滚筒转速为 100 r/min 的条件下进行干选抛废；所得 -12 mm 磁性产品再用高压辊磨机破碎至 -2 mm 进行湿选抛废，改变磁场强度，考察其对选铁指标的影响，试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知，随磁场强度的增加，Fe 回收率呈上升趋势，磁性产品的 TFe 质量分数呈下降趋势。分析原因认为：微细颗粒铁矿物在高

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 2 －2 mm 磁性产品湿式磁选抛废试验结果

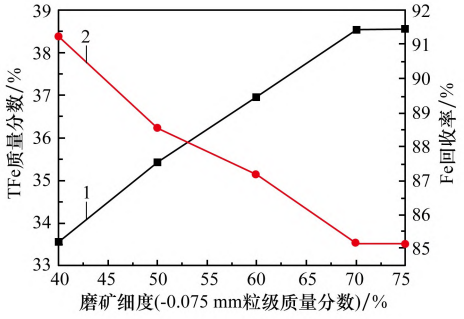
Fig. 2 The results of magnetic separation test of －2 mm magnetic products

磁场强度下的回收效率提升，但由于夹杂的脉石颗粒增多，导致进一步提高磁场强度后，磁性产品的 TFe 质量分数下降并趋于稳定，且回收率增幅不大。在磁场强度为 0.3 T 时，磁性产品的 TFe 质量分数为 29.44%，Fe 回收率 92.97%，指标较好。综合考虑，选定 －2 mm 磁性产品湿式磁选抛废的磁场强度为 0.3 T。

2.2 阶段磨选试验

2.2.1 一段磨选试验

（1）一段磨矿细度（－0.075 mm 粒级质量分数）。将 0.3 T 磁场强度条件下湿式磁选所产生的 －2 mm 磁性产品湿磨至不同的细度进行弱磁选试验，结果如图 3 所示。由图 3 可知，随着磨矿细度的增加，磁性产品的 TFe 质量分数呈上升趋势，Fe 回收率呈下降趋势；当磨矿细度上升到 70% 时，TFe 质量分数为 38.54%，Fe 回收率为85.16%，且变化趋缓。这说明铁矿物



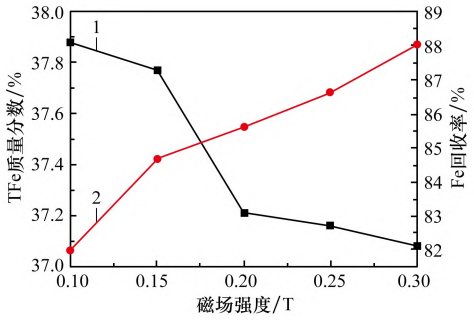
1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 3 一段磨选磨矿细度试验结果

Fig. 3 The results of grinding fineness test of first stage grinding-stage separation

嵌布粒度较小，在磨矿细度为 70% 时，铁矿物仍未充分单体解离。综合考虑湿式弱磁选的高效早抛效应及磨机的磨矿效率，将一段磨选的最佳细度设置为 70%。

（2）一段磨选磁场强度。将 0.3 T 磁场强度下湿式磁选所产生的 －2 mm 磁性产品湿磨至最佳磨矿细度（－0.075 mm 粒级质量分数为 70%），变换不同的磁场强度进行弱磁选试验，结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着磁场强度的增加，TFe 质量分数逐渐下降，Fe 回收率逐渐上升。当磁场强度为 0.15 T 时，磁性产品的 TFe 质量分数和 Fe 回收率均较好，分别为 37.77%、84.67%。充分考虑磁性产品 TFe 质量分数与 Fe 回收率的双重因素，选定一段磨选的磁场强度为 0.15 T。



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 4 一段磨选磁场强度试验结果

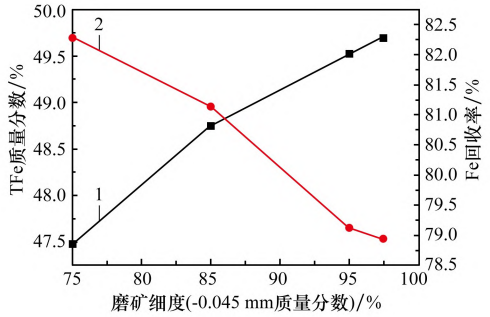
Fig. 4 The results of magnetic field strength test of first stage grinding-stage separation

2.2.2 二段磨选试验

（1）二段磨矿细度（－0.045 mm 粒级质量分数）。将 0.15 T 磁场强度下湿式磁选所产生的 －0.075 mm 粒级质量分数为 70% 的磁性产品湿磨至不同的细度进行二段磁选试验，结果如图 5 所示。由图 5 可知，随着磨矿细度的增加，磁性产品的 TFe 质量分数呈上升趋势，Fe 回收率呈下降趋势。当磨矿细度上升到 95% 时，数据变化趋缓（TFe 质量分数和 Fe 回收率分别为 49.53%、79.12%），因此将二段磨矿细度定为 95%。

（2）二段磨选磁场强度。将 0.15 T 磁场强度下湿式磁选所产生的 －0.075 mm 质量分数为 70% 的磁性产品湿磨至二段最佳磨矿细度

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

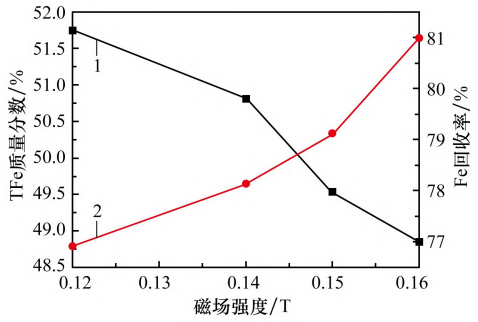


1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 5　二段磨选磨矿细度试验结果

Fig. 5　The results of grinding fineness test of second stage grinding-stage separation

(95%)，变换不同的磁场强度进行二段磁选试验，结果如图 6 所示。由图 6 可知，随着磁场强度的增加，磁性产品的 TFe 质量分数呈下降趋势，Fe 回收率呈上升趋势。当磁场强度为 0. 14 T 时，磁性产品的 TFe 质量分数和 Fe 回收率较好(分别为 50. 81%、78. 12%)，但仍然没有达到最理想指标。综合考虑磁性产品的 TFe 质量分数和 Fe 回收率等质量因数和磨矿电耗，将二段磨选磁场强度定为 0. 14 T。



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

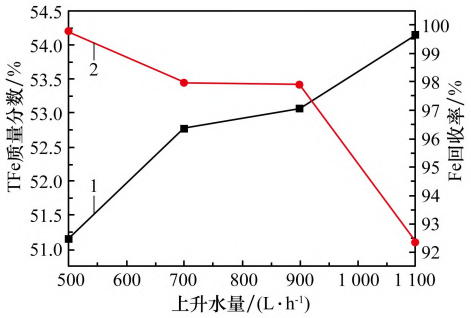
图 6　二段磨选磁场强度试验结果

Fig. 6　The results of magnetic field strength test of second stage grinding-stage separation

2. 3　淘洗机精选试验

(1) 上升水量试验。淘洗磁选机主要用于磁铁矿精选作业，具备脉石和贫连生体夹杂少、磨矿细度可放粗、富集比高等特点。而上升水量、磁场强度、选别浓度(磁性产品掺水质量分数)是影响选别效果的主要因素，本文主要考察上升水量对提高铁精矿 TFe 质量分数的影响。

在固定磁场强度为 0. 135 T、循环磁场强度为 0. 115 T、补偿磁场强度为 0. 115 T 的条件下，将二段磨选所产生的 -0. 045 mm 粒级质量分数为 95% 的磁性产品，按 35% 质量分数掺入水并搅拌均匀后，通过泵输送至淘洗机(∅100 cm 试验机)进行上升水量淘洗选别试验，结果如图 7 所示。由图 7 可知，二段磨选所产生的 -0. 045 mm 粒级质量分数为 95% 的磁性产品经淘洗机选别后，铁精矿的 TFe 质量分数由 50. 81% 提升到 54. 16%(上升水量达 1 100 L/h 时，铁粉和尾矿能够较好分离)，这说明淘洗机针对此矿样具有很好的分选效果。



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 7　淘洗机上升水量试验结果

Fig. 7　The results of rising water test of washing machine

(2) 两段淘洗串联试验。按前述试验条件(上升水量试验)将二段磨选后的磁性产品进行一次淘洗，然后将所产生的精矿再搅拌均匀，在固定磁场强度为 0. 13 T、循环磁场强度为 0. 11 T、补偿磁场强度为 0. 11 T 的条件下进行二次淘洗，试验结果如表 5 所示。由表 5 可知，二段磨选所产生的 -0. 045 mm 粒级质量分数为 95% 的磁性产品经两次淘洗机淘洗后，TFe 质量分数由 50. 81% 提高至 55. 31%。

表 5　两段淘洗串联试验结果(质量分数)

Table 5　The results of two-stage series washing test

%

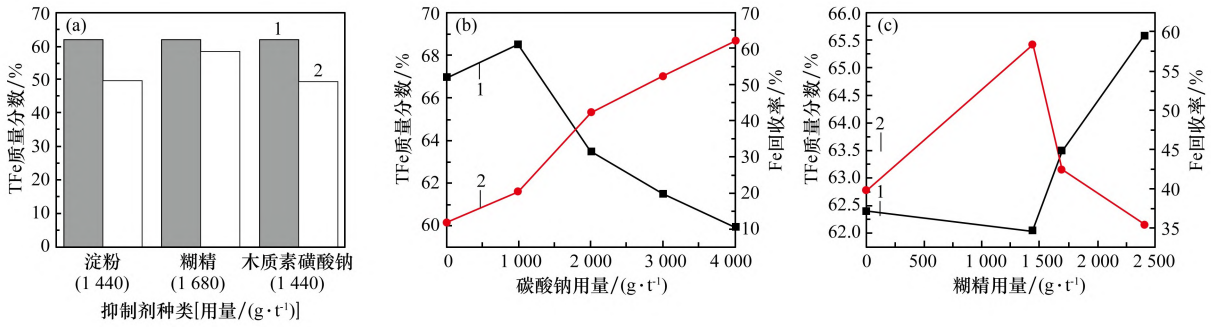
项目	产率	TFe	Fe 回收率
精矿	86. 52	55. 31	94. 18
二段淘洗尾矿	7. 11	26. 46	3. 71
一段淘洗尾矿	6. 37	16. 86	2. 11
尾矿合计	13. 48	21. 92	5. 82
合计	100. 00	50. 81	100. 00

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.4 反浮选试验

原矿经破碎抛废—两段湿磨湿选—两段淘洗后，只能得到 TFe 质量分数为 55.31% 的铁精矿，难以直接销售，故又对该铁精粉进行反浮选试验。

本文主要从抑制剂种类、碳酸钠和糊精用量来考察最优工艺条件。通过改变抑制剂的种类、改变碳酸钠用量(固定抑制剂为糊精)、改变糊精用量(固定碳酸钠用量为 3 000 g/t)，对上述 TFe 质量分数为 55.31% 的铁精粉进行反浮选试验，结果如图 8 所示。淀粉、糊精、木质素磺酸钠均为有机抑制剂，其由于分子量相对较大，且亲水基团容易吸附在矿物表面从而对铁矿物产生抑制作用。由这 3 种抑制剂的单一浮选试验结果[图 8(a)]可知，当糊精用量为 1 680 g/t 时，该铁精粉的 TFe 质量分数和 Fe 回收率分别达到 62.04%、58.41%，指标最优，故采用糊精作反浮选时铁矿物的抑制剂。由图 8(b)可知，随着碳酸钠用量的增加，铁精矿的 TFe 质量分数呈先上升后下降趋势，Fe 回收率呈上升趋势。当碳酸钠用量为 3 000 g/t 时，铁精矿的 TFe 质量分数和 Fe 回收率均相对较好(分别为 61.50%、52.19%)，故碳酸钠用量选 3 000 g/t 较为适宜。由图 8(c)可知，随着糊精用量的增加，铁精矿 TFe 质量分数呈现增加趋势，但 Fe 回收率先升高后降低。当糊精用量为 1 440 g/t 时，铁精矿的 TFe 质量分数大于 60% 且 Fe 回收率最高。综合考虑，确定糊精用量为 1 440 g/t。



(a) 抑制剂种类；(b) 碳酸钠用量；(c) 糊精用量

1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 8 反浮选试验结果

Fig. 7 The test results of reverse flotation

3 全流程闭路试验

在选定最佳参数的基础上进行“破碎抛废—阶段磨选(淘洗)—反浮选”的全流程闭路试验，试验流程如图 9 所示。由图 9 可知：－30 mm 粒级原矿先在 0.45 T 磁场强度、2 m/s 带速条件下进行磁滑轮抛尾，将所得－30 mm 磁性产品再破碎至－12 mm，在 0.30 T 磁场强度、100 r/min 的条件下进行干式磁选；将所得－12 mm 磁性产品再高压辊磨破碎至－2 mm，在 0.30 T 场强下进行湿式弱磁选；将所得－2 mm 磁性产品细磨至－0.075 mm 粒级质量分数为 70%，在 0.15 T 磁场强度下进行湿式弱磁选；将所得－0.075 mm 粒级质量分数为 70% 的磁性产品再磨至－0.045 mm 粒级质量分数为 95%，在 0.14 T 磁场强度下进行湿式弱磁选；最后对所得－0.045 mm 粒级质量分数为 95% 的磁性产品进行反浮选提品位试验，试验结果如表 6 所示。由表 6 可知：全流程闭路试验最终可以获得 TFe 质量分数为 59.14%、Fe 回收率为 45.86% 的铁精粉。

表 6 全流程闭路试验结果(质量分数)

Table 6 The results of complete process closed circuit test **%**

项目	产率	TFe	Fe 回收率
精矿	18.20	59.14	45.86
尾矿	81.80	15.54	54.14
合计	100.00	23.48	100.00

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

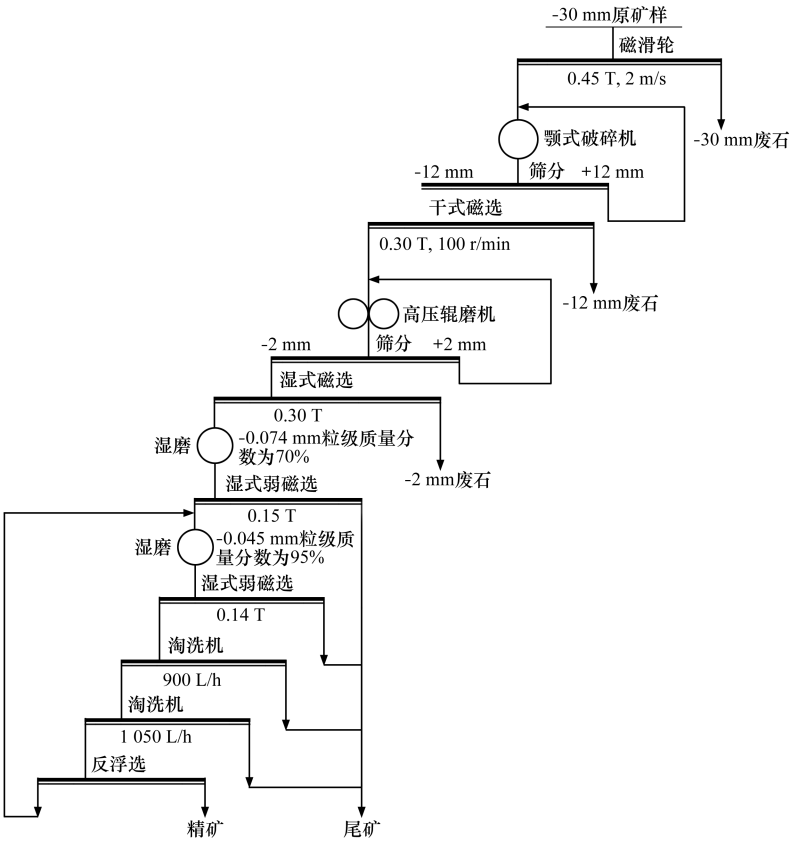


图 9　全流程闭路试验流程

Fig. 9　Flowsheet of complete process closed circuit test

4　结　论

（1）该铁矿属低磷含硫的低品位原生磁铁矿，其中可供选矿回收的元素是 Fe，品位为 23.48%，赋存在磁铁矿中的 Fe 占 52.13%，脉石组分主要是 SiO_2，其质量分数高达 49.55%。为达到富集回收铁矿物的目的，需要选矿排除或降低脉石质量分数。

（2）－30 mm 原矿经“破碎抛废—两段磨选—两段淘洗—反浮选”后，可以获得 Fe 质量分数为 59.14% 的铁精粉，Fe 回收率为 45.86%。

（3）影响选矿效果的主要矿物学因素有两点：一是部分磁铁矿粒度十分细小，有的甚至与石英、铁闪石等构成极为复杂的镶嵌关系，即使通过细磨部分仍将不可避免地以连生体的形式进入铁精矿中，这是导致弱磁铁精矿中铁品位偏低、SiO_2 质量分数偏高的最主要原因；二是磁铁矿形态较不规则，与脉石接触边界通常为港湾状或锯齿状，交生关系较为复杂。

（4）结合当地市场经济现状，磁选过程中所产生的－30、－12、－2 mm 废石可以当作砂石骨料出售，磨选作业所产生的尾矿也可以当作细砂或矿粉出售。

参考文献：

[1] 王海军，殷俐娟．我国铁矿资源的全球配置[J]．中国矿业，2011(2)：6－9.
WANG Haijun，YIN Lijuan. China’s iron ore resource in the global configuration[J]. China Mining Magazine，2011(2)：6－9.

[2] 许满兴．中国鲕状赤铁矿资源的特征与开发利用[J]．烧结球团，2011，36(3)：24－27.
XU Manxing. Characteristics of oolitic hematite resources in China and its development and utilization[J]. Sintering and Pelletizing，2011，36(3)：24－27.

[3] 孙炳泉．超贫铁矿资源化利用技术现状及发展趋势[J]．金属矿山，2009(1)：9－11.
SUN Bingquan. Status quo of utilization technology for extremely lean iron ore resources and its development trends[J]. Metal Mine，2009(1)：9－11.

（下转第 95 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHAO Yiwei, ZUO Haibin, SHE Xuefeng. Case study on calculation method of carbon dioxide emission in iron and steel industry[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(1): 34 – 40.

[12] BULLE C, MARGNI M, PATOUILLARD L, et al. IMPACT World + : A globally regionalized life cycle impact assessment method[J]. The international journal of life cycle assessment, 2019, 24(9): 1653 – 1674.

[13] 康建刚，李俊杰，魏进超. 基于生命周期评价的烧结烟气净化工艺碳足迹分析[J]. 烧结球团，2017，42(6)：11 – 15.
KANG Jiangang, LI Junjie, WEI Jinchao. Research on carbon footprint assessment of sintering flue gas purification process based on life cycle assessment[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(6): 11 – 15.

[14] 刘宏强，付建勋，刘思雨，等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁，2016，51(4)：74 – 82.
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steelmaking process[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 74 – 82.

[15] 裴元东，廖继勇，张俊杰，等. 铁矿粉烧结过程 CO 减排探讨[J]. 烧结球团，2019，44(1)：69 – 73.
PEI Yuandong, LIAO Jiyong, ZHANG Junjie, et al. Discussion on CO emission reduction in iron ore fines sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(1): 69 – 73.

[16] 李玉红，廖学品，王安，等. 基于 LCA 方法对毛皮加工过程的环境影响评价[J]. 皮革科学与工程，2020，30(2)：6 – 11.
LI Yuhong, LIAO Xuepin, WANG An, et al. The Environmental Impact Assessment of Fur Making Process Using LCA Methodology[J]. Leather Science and Engineering, 2020, 30(2): 6 – 11.

[17] 王海风，秦松，姜曦，等. 钢铁工业烧结过程 VOCs 减排研究进展[J]. 钢铁，2018，53(1)：1 – 7.
WANG Haifeng, QIN Song, JIANG Xi, et al. Research development of VOCs emission reduction during iron ore sintering in steel industry[J]. Iron and Steel, 2018, 53(1): 1 – 7.

[18] 叶恒棣，王兆才，刘前，等. 烧结烟气及污染物减量化技术研究[J]. 烧结球团，2019，44(6)：60 – 67.
YE Hengdai, WANG Zhaocai, LIU Qian, et al. Study on reduction technology of sintering flue gas and pollutants[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(6): 60 – 67.

(上接第 87 页)

[4] 孙炳泉，高春庆. 国外某低品位微细粒磁铁矿石选矿工艺研究[J]. 金属矿山，2015(11)：57 – 61.
SUN Bingquan, GAO Chunqing. Study on beneficiation process of a fine low-grade magnetite ore from abroad[J]. Metal Mine, 2015(11): 57 – 61.

[5] 孙炳泉. 国内某低品位微细粒铁矿石选矿工艺研究[J]. 矿冶工程，2014，34(8)：52 – 56.
SUN Bingquan. Beneficiation process of a fine low-grade magnetite from inland[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(8): 52 – 56.

[6] 吴师金，潘峰岗，陈昊庆. 江西某低品位铁矿主要矿物特征和选矿试验研究[J]. 中国金属通报，2019(10)：65 – 66.
WU Shijin, PAN Fenggang, CHEN Haoqing. Study on main mineral characteristics and beneficiation test of a low-grade iron ore from Jiangxi[J]. China Metal Bulletin, 2019(10): 65 – 66.

[7] 刘兴华，陈雯. 新疆某低品位细粒磁铁矿选矿工艺研究[J]. 金属矿山，2014(5)：64 – 69.
LIU Xinghua, CHEN Wen. Beneficiation process of a fine low-grade magnetite from Xinjiang[J]. Metal Mine, 2014(5): 64 – 69.

[8] 唐雪峰，余永富，陈雯. 某微细粒嵌布贫铁矿合理选矿工艺研究[J]. 矿冶工程，2010(1)：41 – 43.
TANG Xuefeng, YU Yongfu, CHEN Wen. Study on rational beneficiation technology of a lean iron ore with finely disseminated minerals[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010(1): 41 – 43.

[9] 高平. 巴基斯坦某铁矿反浮选试验研究[J]. 烧结球团，2020，45(4)：65 – 70.
GAO Ping. Experimental research on reverse flotation of an iron ore in Pakistan[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(4): 65 – 70.

[10] 邱廷省，张卫星，方夕辉，等. 铁矿石阳离子反浮选技术研究进展及应用现状[J]. 金属矿山，2012(2)：89 – 93.
QIU Tingsheng, ZHANG Weixing, FANG Xihui, et al. Research progress and application status on cationic reverse flotation technology for iron ore[J]. Metal Mine, 2012(2): 89 – 93.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net