

攀枝花某细粒嵌布铁矿石分选工艺

唐昊^{1,2}, 赵通林¹

(1. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051;
2. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司, 辽宁 鞍山 114002)

摘要: 攀枝花某铁矿原矿石中有用矿物为磁铁矿, 其磁性铁分布率为 79.53%, 有少量的赤铁矿、褐铁矿, 钒钛含量极低无法进行物理选别, 脉石矿物主要为云母、长石等硅酸盐矿物, 矿石中的有用矿物因嵌布粒度细导致极难回收利用。为了高效开发利用该类矿石资源, 经磨矿、磁选条件实验及重选探索实验, 确定了单作业较佳工艺参数, 经工艺流程实验, 确定采用阶段磨矿、阶段选别、单一磁选工艺处理该矿石。工艺流程实验结果表明, 在原矿石中铁品位 36.78%, 经三次磨矿、五次磁选, 在-43 μm 含量 98% 的最终磨矿粒度条件下, 最终获得铁精矿品位为 65.50%, 产率 41.77%, 金属回收率为 74.39% 的铁精矿, 为有效利用细粒嵌布类型攀枝花铁矿提供了新的参考工艺。

关键词: 磁铁矿; 细粒嵌布; 阶段磨矿; 单一磁选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.022

中图分类号: TD924 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0131-07

我国铁矿资源储量虽然丰富, 但优质资源匮乏^[1], 加上近些年的矿山开采逐步推进, 入选矿石嵌布粒度逐渐变细^[2]。针对微细粒难选铁矿石开展技术攻关, 具有重要意义^[3-5]。

攀枝花铁矿资源中主要赋存的铁矿物为磁铁矿; 脉石矿物主要为黑云母、斜长石等硅酸盐矿物。针对攀枝花铁矿资源的赋存特点, 汪云华^[6]对攀枝花某钒钛磁铁矿经弱磁选一次粗选、一次扫选, 再将中矿筛分以获得铁精矿的工艺流程, 最终获得精矿中铁品位为 52.99%、回收率 77.38% 的指标; 鉴于攀枝花钒钛磁铁矿选矿工艺中磁选粗精矿存在较为严重的磁团聚现象, 王国生等^[7]利用重选-磁选分离工艺流程成功解决了该技术难题, 使精矿中铁品位提高到 51.79%, 回收率达到 85.76%; 李军^[8]对磨矿产品进行微波预处理后发现, 当微波功率达到 3 kW 时, 磁选铁精矿产率由 44% 提高到 72%, 精矿品位与原矿相比 (50.2%) 提高了 6%~8%。近年来, 随着攀枝花铁矿资源的日益开采, 矿石的铁品位显著降低, 且铁矿物的

结晶粒度更细, 现有选别工艺已无法实现矿石中铁资源的充分有效回收。为实现对嵌布粒度更细的钒钛磁铁矿原矿的利用, 本文通过对攀枝花某细粒嵌布铁矿石进行阶段磨矿-阶段磁选条件实验, 以获得攀枝花地区细粒浸染型矿石的较佳选别工艺, 从而实现该类型铁矿石的高效开发利用。

1 矿石性质

1.1 矿石物质组成

将原矿石经对辊破碎机粉碎, 获得粒度 0~2 mm 筛分产品, 混匀并缩分后, 装袋作为实验样品。对矿样进行偏光矿相显微镜分析、化学法物相分析 (表 1) 和化学多元素分析 (表 2) 等工艺矿物学性质分析, 结果表明, 该矿样主要铁矿物为磁铁矿, 有少量的赤铁矿、褐铁矿, 假象、半假象赤铁矿、镍磁铁矿、黄钾铁矾、菱铁矿; 脉石矿物主要有黑云母、斜长石、正长石、含铁尖晶石、褐帘石, 还含有少量的黝帘石、绢云母

收稿日期: 2020-11-07

作者简介: 唐昊 (1991-), 女, 硕士研究生, 工程师。

通信作者: 赵通林 (1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事矿物加工教学及选矿工艺与设备研究工作。

等。可回收金属元素铁主要以磁铁矿形式存在，其分布率为 79.53%，原矿的 TiO_2 含量为 0.042%、

V_2O_5 含量为 0.014%，由于含量极低，不作为物理选矿过程的目标矿物考虑。

表 1 矿样铁物相分析结果
Table 1 Iron phase analysis of the sample

名称	总铁	磁铁矿	碳酸铁	硅酸铁	假象、半假赤铁矿	赤褐铁矿
含量/%	36.78	29.25	0.91	1.52	1.08	4.03
分布率/%	100.00	79.53	2.45	4.08	2.99	10.96

表 2 矿样主要化学成分分析结果/%
Table 2 Chemical composition analysis results of the sample

TFe	FeO	TiO_2	V_2O_5	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	S	P	烧失
36.78	19.04	0.042	0.014	31.2	5.47	2.26	1.91	0.064	0.21	0.13	<0.010	0.065	2.72

多元素分析结果表明，原矿含铁 36.78%，亚铁含量 19.04%，有害元素 S、P 含量较低，脉石以硅酸盐类为主。

1.2 矿石结构构造及嵌布特征

经偏光矿相显微镜镜下分析可知，矿石以细粒致密块状构造为主，有少量的浸染构造、风化淋滤构造等。矿样中大部分磁铁矿及脉石矿物发育较好，结晶粒度较细，矿物结构主要为自形-半自形晶结构、包裹体结构及氧化交代结构，它形结构较少。有少部分磁铁矿、假象赤铁矿及含铁尖晶石嵌镶关系相对较复杂，其中铁矿物中粗粒部分自形较差，与脉石矿物呈不规则港湾状接触，对铁矿物及脉石矿物的单体解离有一定影响，含铁尖晶石将会与磁铁矿形成富连生体。矿样中还存在部分微细粒磁铁矿包裹体及褐铁矿的浸染现象，对矿石选别也将造成一定影响。脉石矿物中有部分黑云母、少量褐帘石等矿物均属酸性可溶性含铁硅酸盐，经选别后会进入尾矿产品而影响铁金属回收率。铁矿物与脉石矿物嵌布粒度分布图见图 1，正累积曲线见图 2。

由图 1、图 2 可知，铁矿物粒度在 $-74\ \mu\text{m}$ 82.66%， $-15\ \mu\text{m}$ 15.72%，细粒级铁矿物含量偏高，铁矿物达到单体解离必须细磨。脉石矿物的分布范围较宽，在 $35\sim 601\ \mu\text{m}$ 区间均有分布，且较为均匀。因此，应考虑粗磨抛尾作业，尽早抛掉合格尾矿，以提高入选品位，降低后续磨矿工艺的成本。

2 实验方案

根据该矿石性质分析结果，该矿样由于铁矿物嵌布粒度极细，若想有效选别其中的铁矿物，

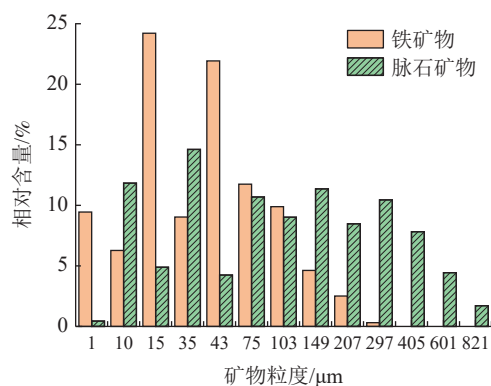


图 1 原矿中铁矿物与脉石矿物嵌布粒度分布
Fig.1 Dissemination size of the sample

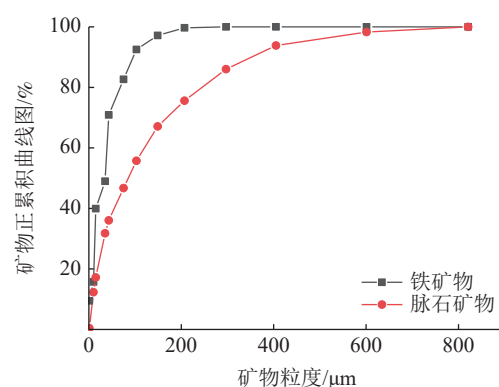


图 2 矿物嵌布粒度正累积曲线
Fig.2 Positive cumulative curve of mineral size distribution

首先要实现该矿石中不同矿物的单体解离。考虑到选矿的成本，确定采用阶段磨矿、阶段选别流程来处理该矿石。

2.1 不同磨矿细度产品的磁选管实验

首先采用实验室 $\Phi 200\times 250\ \text{mm}$ 球磨机将原矿磨至不同粒度并进行磁选管实验，磁选管激磁电流 $I=1.25\ \text{A}$ ，磁感应强度为 $121\ \text{mT}$ ，实验结果见图 3。

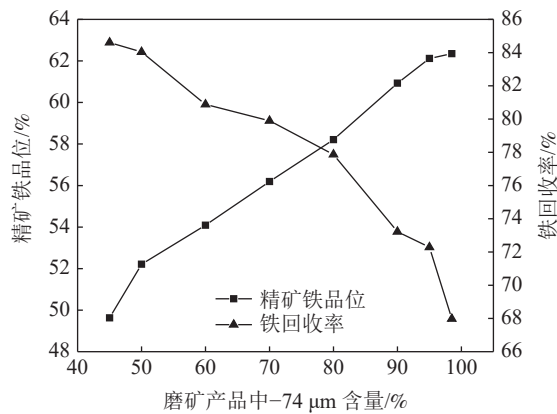


图3 不同磨矿产品磁选管实验结果
Fig.3 Test results of different size sample of the magnetic tube

由图3可知,随着磨矿细度的提高,磁选管精矿品位逐步提高,铁回收率逐渐降低。在磨矿粒度为-74 μm 含量达到90%之后,精矿品位增幅逐步减缓,在磨矿粒度达到-74 μm 95%时,精矿品位为62.12%。继续提高磨矿产品细度,可以看出在-74 μm 98.5%的条件下,磁选管精矿铁回收率降低较多,但品位相差不大,均在62.2%左右。说明该矿石铁矿物的嵌布粒度较细,要想获得较高品位的精矿,必须对矿石进行细磨处理。

综合分析可知,在磨矿产品粒度为-74 μm 60%左右时,可以获得铁品位约为50%的粗精矿,同时可以回收近80%的铁,有效降低后续磨选成本。为进一步确定粗磨粒度,选取-74 μm 55%、60%、65%、70%、75%五个粒度,进行实验室磁选机选别实验。

2.2 粗磨产品小型磁选机实验

在矿浆浓度为35%~40%的条件下,将五个粒度的产品分别给入实验室Φ400×300 mm半逆流湿式筒式弱磁机,磁感应强度156 mT,选别结果见图4。

结果显示,随着磨矿细度增加,精矿中的铁品位逐渐增加。实验当磨矿粒度为-74 μm 60%时,经一段选别可以获得铁回收率为87.41%的铁精矿,且此时铁品位已达到51.40%,尾矿铁品位为12.36%,所以综合考虑确定一段磨矿较佳粒度

为-74 μm 60%。

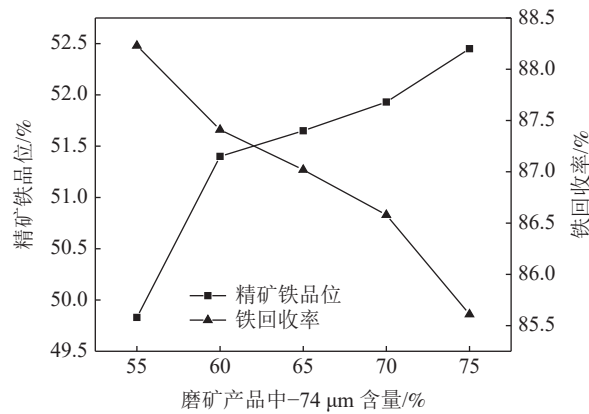


图4 不同粒度产品一段磁选选别实验结果
Fig.4 Test results of different grinding fineness for primary magnetic separation

2.3 一段弱磁选尾矿再选实验

为考察弱磁尾矿中铁矿物的回收利用可行性,将一段弱磁选尾矿给入Φ750 mm立环强磁机,磁感应强度为500 mT进行选别,得到铁品位为16.08%,作业回收率为57.39%的强磁精矿。由于一段强磁精矿品位较低,将强磁精矿继续给入Φ750 mm立环强磁机进行再次精选,磁感应强度为300 mT进行选别,得到品位为18.56%,回收率为39.28%的强磁精矿。经两段强磁选别后,一段弱磁尾矿品位仅提高了6个百分点,回收率仅仅接近40%,考虑再用重选工艺继续选别二段强磁尾矿。

将二段强磁尾矿经搅拌槽搅拌配制成浓度为40%左右的矿浆后,给入实验室Φ400 mm螺旋溜槽进行粗选,粗选精矿给入Φ300 mm螺旋溜槽进行精选,精选中矿自循环,得到铁品位为28.90%,回收率为5.22%的重选精矿。可以看到,强磁精与重选精矿品位均较低,且总回收率仅为44.50%。

为分析精矿指标不达标的原因,对一段弱磁选尾矿进行铁物相分析(见表3),结果表明,尾矿中损失最多的赤褐铁矿含量为6.98%,占一磁尾铁矿物的56.47%。采用上述选别作业无法回收,可以采用悬浮焙烧-磁选工艺,但技术经济上没有选别利用价值,建议作为最终尾矿抛弃。

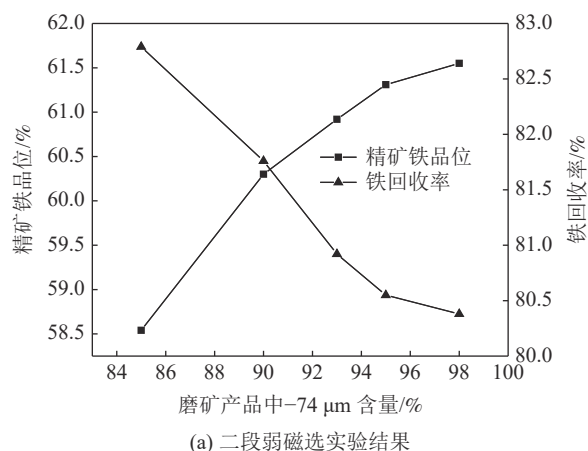
表3 一段弱磁尾矿铁物相分析结果
Table 3 Iron phase analysis of primary magnetic tailings

名称	总铁	磁铁矿	碳酸铁	硅酸铁	假象、半假赤铁矿	赤褐铁矿
含量/%	12.36	0.62	1.33	2.97	0.46	6.98
分布率/%	100.00	5.02	10.76	24.03	3.72	56.47

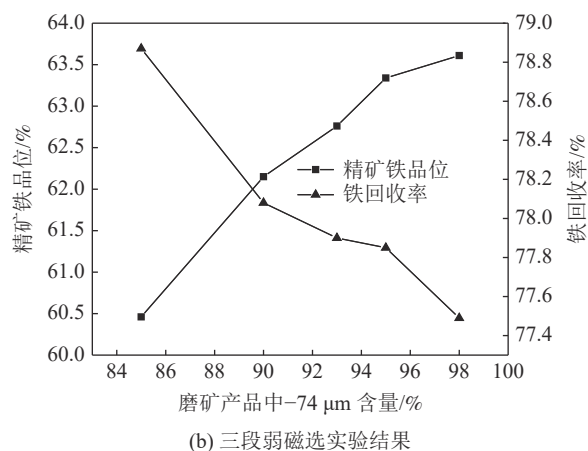
2.4 一段弱磁精矿的再磨再选实验研究

根据原矿不同磨矿产品磁选管实验结果,在磨矿产品粒度在 $-74\ \mu\text{m}$ 90%左右时,可以获得铁品位约为 60% 的精矿,所以二段磨矿选取 $-74\ \mu\text{m}$ 85%、90%、93%、95%、98% 五个粒度,进行实验室磁选机选别实验。

采用实验室 $\Phi 200 \times 250\ \text{mm}$ 球磨机将一段磁选精矿分别磨至 $-74\ \mu\text{m}$ 85%、90%、93%、95%、98% 五个粒度级别,分别进行两段弱磁选别实验研究。在矿浆浓度为 35%~40% 的条件下,给入二段实验室 $\Phi 400 \times 300\ \text{mm}$ 半逆流湿式筒式弱磁机,磁感应强度为 146 mT,将二段弱磁精矿给入三段实验室 $\Phi 400 \times 300\ \text{mm}$ 半逆流湿式筒式弱磁机,磁感应强度为 136 mT,二段、三段弱磁尾矿与一段磁选尾矿混合后作为综合尾矿,选别结果见图 5。



(a) 二段弱磁选实验结果



(b) 三段弱磁选实验结果

图 5 不同粒度产品磁选实验结果

Fig.5 Magnetic separation results of products with various particle size

由图 5 可知,当磨矿粒度达到 $-74\ \mu\text{m}$ 含量

90% 以上时,经两段磁选选别所得三段磁选精矿铁品位及回收率相差不大,出于降低磨矿成本考虑,二段磨矿粒度确定采用 $-74\ \mu\text{m}$ 含量为 90%。该磨矿粒度下获得的三段磁选精矿铁品位为 62.15%,为了进一步提高精矿的指标,再探索加入细筛工艺进行选别。

2.5 三段弱磁精矿细筛提质实验研究

将三段弱磁选精矿给入筛孔尺寸为 $74\ \mu\text{m}$ 的高频振网筛进行选别实验,实验结果见表 4。

由表 4 可以看出,筛下铁品位 63.35%,较细筛给矿品位仅提高了 1.2 个百分点,且筛上铁品位也较高,细筛分离提质作用不明显,为分析其原因,对磁选精矿进行了粒度分析,分析结果见图 6。

表 4 三段弱磁选精矿高频振网筛选选别实验结果

Table 4 Test result of high frequency vibrating screen of the concentrate sample

给矿品位/%	筛上		筛下	
	铁品位/%	产率/%	铁品位/%	产率/%
62.15	59.86	34.38	63.35	65.62

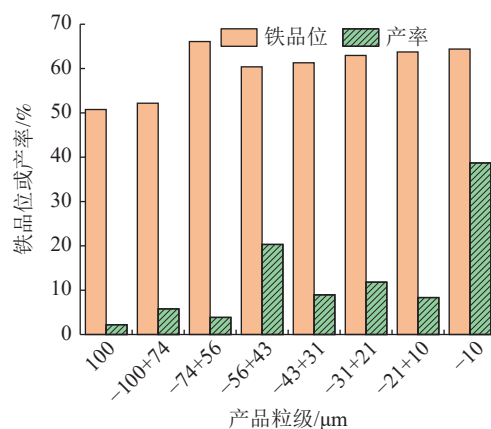


图 6 三段弱磁选精矿不同粒级的品位、产率及回收率
Fig.6 Grade, yield and recovery at different grain sizes of the concentrate sample

由图 6 可知三段弱磁精矿中粒度在 $+74\ \mu\text{m}$ 的粗粒级铁品位在 50% 左右, $-74\ \mu\text{m}$ 部分粒级的铁品位 60% 左右,只有 56~ $74\ \mu\text{m}$ 粒级的铁品位能够达到 65%。由此可以看出,三段弱磁精矿中由于存在有大量连生体,导致高频振网筛无法大幅度提高精矿的铁品位,故仍需将三段弱磁精矿进行细磨处理。

2.6 三段弱磁精矿的再磨再选实验研究

将一磁精磨至-74 μm 90%时获得的三磁精用实验室塔磨机分别磨至-43 μm 90%、93%、95%、98%、99%五个粒度，分别进行两段弱磁选别实验研究。在矿浆浓度为35%~40%的条件下，给入四段实验室 $\Phi 400 \times 300$ mm半逆流湿式筒式弱磁机，磁感应强度为146 mT，将四段弱磁精矿给入五段实验室 $\Phi 400 \times 300$ mm半逆流湿式筒式弱磁机，磁感应强度为136 mT，四段、五段弱磁尾矿与前三段尾矿混合后作为综合尾矿，选别结果见图7。

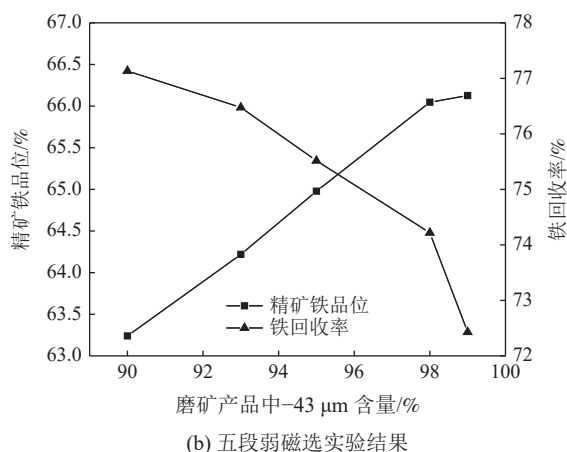
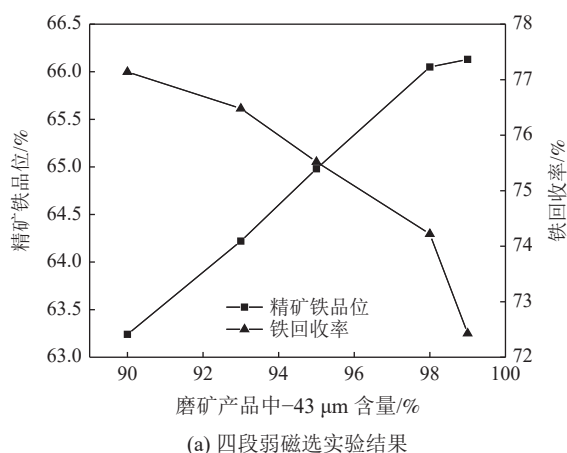


图7 不同粒度产品磁选实验结果

Fig.7 Magnetic separation results of products with various particle size

由图7可以看出三磁精再磨粒度达到-43 μm 98%时，经过两段磁选可得到铁品位66.05%的铁精矿，继续增加磨矿细度精矿品位几乎没有改变，综合考虑选取-43 μm 98%作为三段磨矿粒度。研究表明，针对该类矿石进行阶段磨矿阶段选别的作业流程，可以实现该类细粒嵌布铁

矿石的高效分选。

3 阶段磨矿、阶段选别单一磁选全流程实验

在上述条件实验的基础上，进行了全流程闭路实验，所用实验设备见表5，实验流程和实验结果见图8。由图中可知，铁品位为36.78%的原矿，经三段磨矿、五段磁选工艺流程，最终获得铁品位为65.50%，产率为41.77%的精矿，铁金属回收率为74.39%。

表5 全流程闭路实验采用实验设备情况
Table 5 Equipment usage profile of total process

工艺流程	设备名称
一段磨矿	$\Phi 900 \times 1\,800$ mm溢流型球磨机
二段磨矿	$\Phi 900 \times 1\,800$ mm溢流型球磨机
三段磨矿	JM-600立式磨机
一次分级	$\Phi 500 \times 5\,500$ mm螺旋分级机
二次分级	$\Phi 75$ mm旋流器
三次分级	$\Phi 75$ mm旋流器
一段磁选	永磁筒式磁选机156 mT($\Phi 400 \times 600$ mm)
二段磁选	永磁筒式磁选机146 mT($\Phi 400 \times 600$ mm)
过滤	BY60圆盘真空过滤机

4 结 语

(1) 攀枝花某铁矿矿石以细粒致密块状构造为主，矿物结构主要为微细粒自形-半自形晶结构，有部分包裹体结构、交代溶蚀结构。该矿样主要铁矿物为磁铁矿，有少量赤铁矿、褐铁矿，脉石矿物主要有黑云母、斜长石、正长石等。

(2) 该攀枝花铁矿矿石中铁矿物和脉石矿物的嵌布粒度极细，且分布范围较大，铁矿物粒度在-74 μm 82.66%，-15 μm 15.72%。因此需采用阶段磨矿阶段选别工艺，以充分回收矿石中的细粒含铁矿物。

(3) 针对该攀枝花细粒嵌布铁矿石，采用三段磨矿、五段磁选的阶磨阶选全磁工艺流程，可以获得铁品位为65.50%，产率41.77%的铁精矿，铁金属回收率为74.39%的实验指标。

(4) 采用阶段磨矿阶段选别的流程，可以及时抛出合格尾矿，大大降低后续入磨矿量，提高入磨产品品位，有效降低能耗，节约选矿成本，实现该类型铁矿石的高效开发利用。

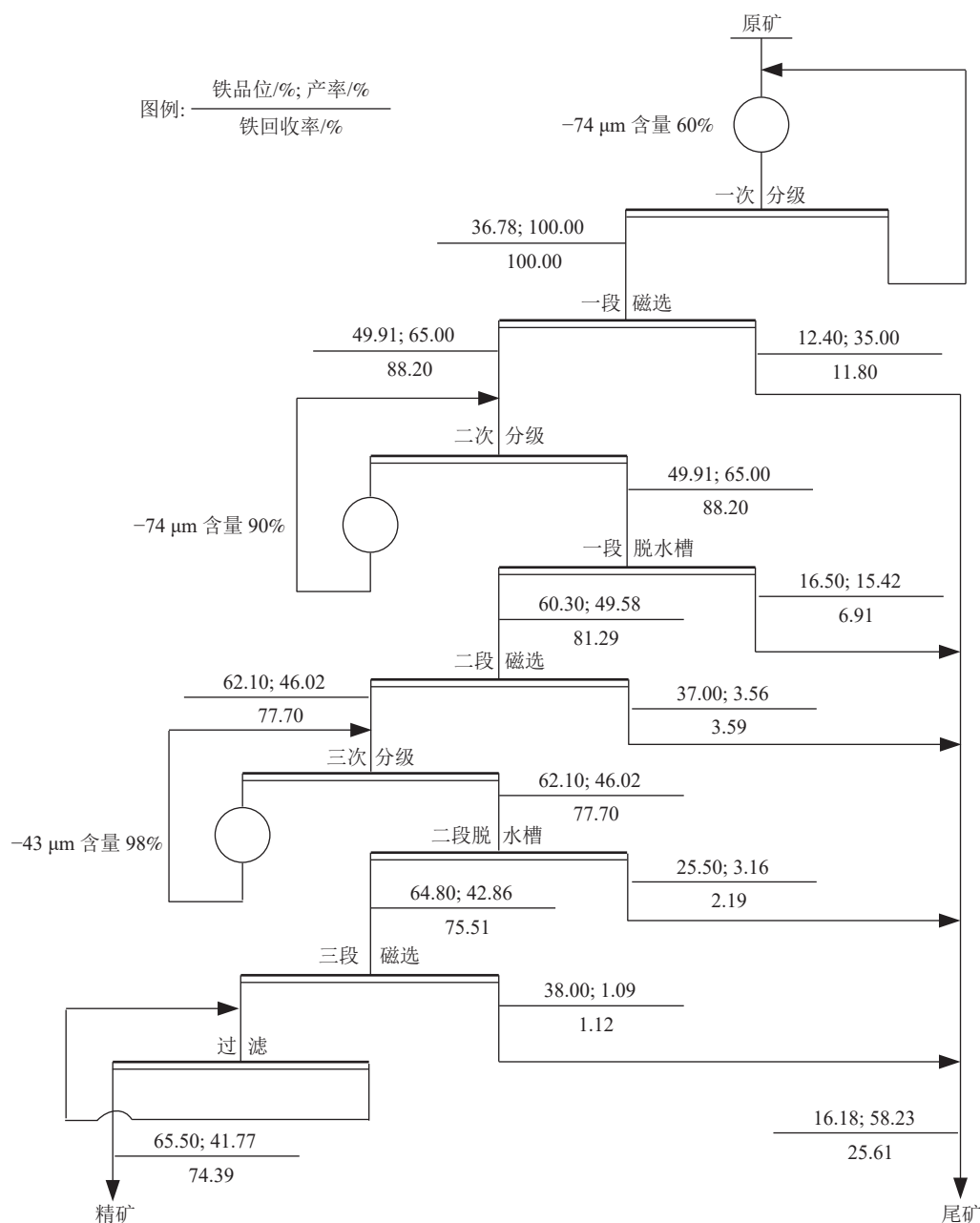


图 8 三段磨矿-五段磁选全流程数质量流程

Fig.8 Flowsheet of three stage grinding-five stage magnetic separation

参考文献:

[1] 韩跃新, 孙永升, 李艳军, 等. 我国铁矿选矿技术最新进展[J]. 金属矿山, 2015(2):1-11.

HAN Y X, SUN Y S, LI Y J, et al. New development on mineral processing technology of iron ore resources in China[J]. Metal Mine, 2015(2):1-11.

[2] 李博琦, 谢贤, 纪翠翠, 等. 鞍山地区贫磁铁矿选矿工艺试验[J]. 矿产综合利用, 2020(4):93-99.

Li B Q, XIE X, JI C C, et al. Experimental study on ore

dressings of lean magnetite in Anshan Area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):93-99.

[3] 宫贵臣, 韩跃新, 李艳军. 辽宁某铁矿石工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2018(2):77-80.

GONG G C, HAN Y X, LI Y J. Study on process mineralogy for an iron ore from Liaoning Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(2):77-80.

[4] 张超达, 吴城材, 钟森林, 等. 四川某微细嵌布铁矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2014(6):60-64.

ZHANG C D, WU C C, ZHONG S L, et al. Mineral processing

test on a fine disseminated iron ore from Sichuan[J]. Metal Mine, 2014(6):60-64.

[5] 王录锋, 张高庆. 攀枝花低品位钒铁磁铁矿钛组合捕收剂研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2):65-70.

WANG L F, ZHANG G Q. Study on the titanium combination capture agent for low-grade vanadium titanium magnetite of Panzhihua[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):65-70.

[6] 汪云华. 攀枝花钒钛磁铁矿合理磁选工艺研究[J]. 金属矿山, 1999(1):20-24.

WANG Y H. Study on the rational magnetic separation technology for treating Panzhihua vanadium-titanium magnetite

ore[J]. Metal Mine, 1999(1):20-24.

[7] 王国生, 靳玉荣. 攀枝花钒钛磁铁矿选矿新工艺流程的研究[J]. 矿产综合利用, 1994(2):8-11.

WANG G S, JIN Y R. Study on the innovative separation technology for treating Panzhihua vanadium-titanium magnetite ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1994(2):8-11.

[8] 李军. 攀枝花钛铁矿微波辅助磨细试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.

LI J. Testing investigation on microwave assisted grinding of ilmenite [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.

Study on Separation Process of a Fine-disseminated Iron Ore in Panzhihua

Tang Hao^{1,2}, Zhao Tonglin¹

(1.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, China; 2.Angang Mining Engineering Corporation, Anshan, Liaoning, China)

Abstract: Valuable minerals in the raw iron ore in Panzhihua is magnetite, in which the ratio of magnetic iron ore is 79.53%, followed by hematite and limonite, with extreme low content of vanadium and titanium that unable to concentrate, the gangue minerals are silicate minerals such as mica, feldspar, etc. Due to its fine-disseminated particle size, the raw iron ore is difficult to recycle. In order to develop and utilize this kind of ore resources efficiently, a combined flow sheet of stage grinding-stage separation-certain magnetic separation is finally determined to treat this ore after several grinding and magnetic separation condition tests and gravity election investigated test. The beneficiation process results show that the final concentrate with iron grade of 65.50%, yield of 41.77% and metal recovery of 74.39% can be obtained when the iron grade of raw ore is 36.78% and the content of -43 μm is 98% of the final grinding particle size. It provides a new reference process for the Panzhihua fine disseminated iron ore.

Keywords: Magnetite; Fine-disseminated; Stage grinding; Certain magnetic separation