

# 澳洲某铁矿石可磨可选性研究<sup>①</sup>

肖 硕, 黄自力, 黄 涛, 郑洁森, 刘晓峰

(武汉科技大学 资源与环境工程学院 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

**摘 要:** 研究了澳洲某铁矿石的工艺矿物学性质、可磨性, 并进行了可选性探索试验。结果表明, 该矿石 TFe 品位 34.90%, 含铁矿物主要为磁铁矿和赤褐铁矿, 主要脉石矿物为石英。矿石普氏硬度系数为 3.13, 属于中等坚固矿石; 邦德球磨功指数为 13.27 kW · h/t, 属于较难磨矿石。矿石经一段磨矿-弱磁粗选-二段磨矿-弱磁精选, 可获得 TFe 品位 65.45%、TFe 回收率 65.98%、mFe 回收率 95.69% 的铁精矿; 铁精矿深度磨矿后经磁选可得到 TFe 品位 71.90%、回收率 60.20% 的超纯铁精矿, 中矿扫选后可得到 TFe 品位 69.87%、回收率 35.21% 的超级铁精矿, 矿石可选性较好。

**关键词:** 铁矿石; 工艺矿物学; 可选性; 超级铁精矿; 磁选; 磨矿

中图分类号: TD92

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.016

文章编号: 0253-6099(2023)03-0072-03

## Grindability and Beneficiability of Iron Ore from Australia

XIAO Shuo, HUANG Zili, HUANG Tao, ZHENG Jiemiao, LIU Xiaofeng

(Hubei Provincial Key Laboratory of Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgical Mineral Resources, School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** Based on the study of process mineralogical properties and grindability of an iron ore from Australia, experiments were carried out to explore its beneficiability. The results show that this kind of ore has a TFe grade of 34.90%, with magnetite and hematite as the dominant Fe-containing minerals, and quartz as its dominant gangue mineral. The ore is medium hard, with a protodyakonov coefficient of 3.13, and also comparatively hard to mill, with a Bond ball milling work index of 13.27 kW · h/t. On this basis, a flowsheet consisting of sequentially primary grinding, a roughing process of low-intensity magnetic separation (LIMS), secondary grinding and a cleaning process of LIMS was adopted in an experiment, producing an iron concentrate grading 65.45% TFe at 65.98% recovery, with mFe recovery of 95.69%. After intensified grinding, the iron concentrate was subjected to further magnetic separation, resulting in ultrapure iron concentrate grading 71.90% TFe at 60.20% recovery. Meanwhile, the middlings was subjected to a scavenging, and a super-high grade iron concentrate with TFe grade of 69.87% was obtained with recovery of 35.21%, indicating that this ore has a good beneficiability.

**Key words:** iron ore; process mineralogy; beneficiability; super-high grade iron concentrate; magnetic separation; grinding

随着钢铁行业的快速发展,我国对铁矿石的需求量不断增加。目前国内钢铁行业依靠进口铁矿石的局面仍然难以改变,对外依存度仍保持在 80% 以上,因此,开发利用好国外资源至关重要<sup>[1-2]</sup>。我国某企业欲开发澳洲某低品位铁矿石,本文研究了该矿石工艺矿

物学性质,并进行了可磨、可选性探索试验,可为该铁矿石的可选性评价提供重要的技术依据。

### 1 矿石性质

澳洲某低品位铁矿石原矿化学多元素分析结果如

① 收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51872210)

作者简介: 肖 硕(1997—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事矿物加工研究。

通信作者: 黄自力(1965—),男,湖南祁阳人,博士,教授,主要从事矿物加工与资源综合利用研究。

表1所示。矿石 TFe 品位 34.90%、mFe 品位 23.85%，磁性率(mFe/TFe)为 68.34%，属于混合铁矿石；(CaO+MgO)/(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)比为 0.071，属于酸性矿石；矿石中主要杂质元素为硅，有害组分元素磷含量较高。

表1 铁矿石化学多元素分析结果(质量分数) %

|       |       |       |       |       |       |       |                  |                                |                  |                   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|
| TFe   | FeO   | mFe   | S     | P     | CaO   | MgO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
| 34.90 | 12.87 | 23.85 | 0.086 | 0.280 | 1.435 | 1.920 | 46.61            | 0.635                          | 0.510            | 0.616             |

矿石铁化学物相分析结果如表2所示。铁矿石中含铁矿物以磁铁矿为主，其次为赤、褐铁矿，菱铁矿、硫化铁、硅酸铁含量较少。根据该铁矿石中铁物相组成特点，应采用弱磁选回收磁铁矿产品、再采用高梯度磁选回收赤铁矿产品。

表2 矿石铁物相分析结果

| 铁物相   | 含量/%  | 分布率/%  |
|-------|-------|--------|
| 磁铁矿   | 23.85 | 68.34  |
| 菱铁矿   | 0.89  | 2.55   |
| 赤、褐铁矿 | 9.19  | 26.33  |
| 硫化铁   | 0.08  | 0.23   |
| 硅酸铁   | 0.89  | 2.55   |
| 合计    | 34.90 | 100.00 |

矿石 X 射线衍射分析结果表明，该矿石主要成分是磁铁矿、赤铁矿与石英，与化学多元素分析结果一致。

矿石成分较为单一，主要金属矿物为磁铁矿和赤铁矿，主要脉石矿物为石英。磁铁矿嵌布粒度较赤铁矿粗。铁矿石主要呈自形、半自形结构，矿石呈条带状构造，不同的条带中磁铁矿、赤铁矿和脉石含量不同，不同条带间渐变过渡，大体可分为以下4种：①金属含量相对较少，磁铁矿(平均0.04~0.08 mm)和赤铁矿(平均0.02~0.04 mm)颗粒较小，大部分为单颗粒存在，晶形相对较好。②金属含量中等，以磁铁矿(平均0.05~0.12 mm)为主，多为集合体，颗粒较大；赤铁矿(平均0.02~0.05 mm)含量较少，且颗粒较小，常被磁铁矿包裹。③金属含量较多，几乎全部为磁铁矿(平均0.1~0.3 mm)，在磁铁矿间隙中可见赤铁矿(0.01~0.04 mm)，多为板状晶形，粒度相对较小。④金属含量较多，绝大部分为赤铁矿(0.02~0.04 mm)，板状晶形，多为集合体，围绕或包裹磁铁矿；磁铁矿(0.03~0.07 mm)为立方体晶形。矿石中可见含铁矿物与石英嵌布关系紧密，且有部分细粒铁矿物包含于石英中，这部分铁矿物单体解离难度较大，需要对矿石进行细磨。

## 2 可磨性实验

矿样经粗碎、中碎后采用辊式破碎筛分机破碎至-4 mm，将破碎后的矿样给入球磨机，每次给矿 200 g，矿浆浓度 75%，测定不同磨矿时间下-38.5 μm 粒级含量，并绘制磨矿曲线，如图1所示。由图1可以看出，磨矿的前6 min，-38.5 μm 粒级含量快速增加，磨矿7 min时-38.5 μm 粒级含量达到 89.90%，之后磨矿曲线变化趋缓。因矿石铁矿物嵌布粒度整体较细，必须细磨才能达到理想的选别指标。

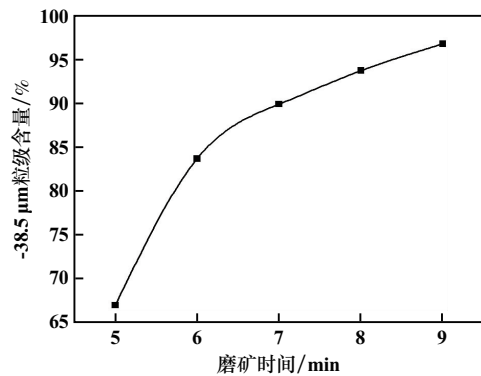


图1 磨矿曲线

测得该矿石抗压强度为 312.82 MPa，换算成普氏硬度系数为 3.13，属于中等坚固矿石<sup>[3-4]</sup>。测得矿石邦德球磨功指数  $W_{200} = 13.27 \text{ kW} \cdot \text{h/t}$ ，为较难磨矿石<sup>[5-7]</sup>。

## 3 可选性实验

### 3.1 一段磨矿-磁选实验

采用圆筒磁选机对不同细度球磨产品进行了弱磁选实验，磁场强度 0.18 T，磨矿细度与精矿品位和回收率的关系如图2所示。并对-38.5 μm 粒级占 96.75%样品的磁选尾矿进行了铁物相分析，结果如表3所示。

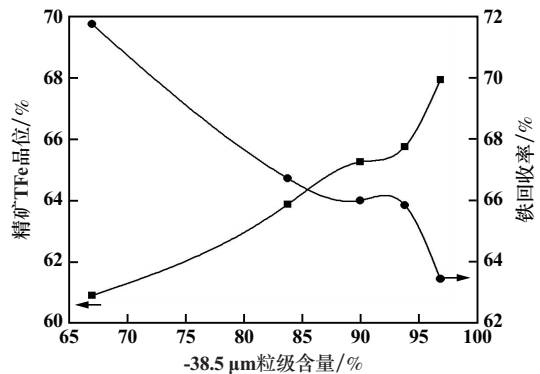


图2 磨矿细度与精矿品位和回收率的关系

表3 磁选尾矿铁物相分析结果

| 铁物相   | 含量/%  | 分布率/%  |
|-------|-------|--------|
| 磁铁矿   | 1.08  | 5.71   |
| 菱铁矿   | 1.24  | 6.55   |
| 赤、褐铁矿 | 14.55 | 76.90  |
| 硫化铁   | 0.16  | 0.85   |
| 硅酸铁   | 1.89  | 9.99   |
| 合计    | 18.92 | 100.00 |

由图2可知,随着磨矿细度增加,精矿 TFe 品位升高,但铁回收率逐渐降低;  $-38.5\ \mu\text{m}$  粒级占 89.90% 以上时精矿 TFe 品位达到 65.00% 以上,回收率达到 63.00% 以上。由表3可以看出,尾矿中的铁主要以赤、褐铁矿为主,常规弱磁选较难回收,暂不对其进行处理,且一段磨矿-磁选尾矿量较大,建议采用阶段磨矿-阶段选别工艺,以降低磨矿功耗。

### 3.2 阶段磨矿-阶段选别实验

阶段磨矿-阶段选别实验流程如图3所示。矿样经一段球磨至  $-38.5\ \mu\text{m}$  粒级占 46.75%,采用 FJ-DSJ-04-C×1000 平板带式粗选机粗选,磁场强度 0.2 T;粗精矿再磨至  $-38.5\ \mu\text{m}$  粒级占 75.37%,采用 FJ-DSJ-04-C×800 平板带式精选机精选,磁场强度 0.12 T。结果如表4所示。

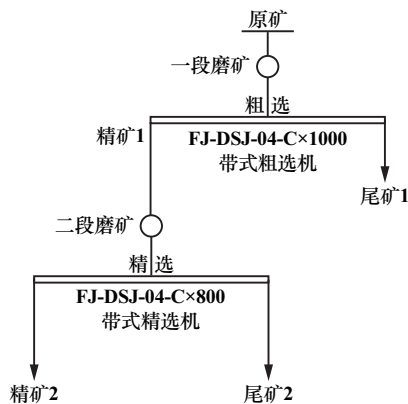


图3 阶段磨矿-阶段选别实验流程

表4 阶段磨矿-阶段选别实验结果

| 产品名称 | 产率/%   | TFe 品位/% | TFe 回收率/% | mFe 回收率/% |
|------|--------|----------|-----------|-----------|
| 精矿1  | 61.61  | 47.65    | 84.41     | 99.17     |
| 尾矿1  | 38.39  | 14.13    | 15.59     | 0.83      |
| 精矿2  | 35.06  | 65.45    | 65.98     | 95.69     |
| 尾矿2  | 26.55  | 24.14    | 18.43     | 3.48      |
| 原矿   | 100.00 | 34.78    | 100.00    | 100.00    |

表4结果表明,一段磨矿细度达到  $-38.5\ \mu\text{m}$  粒级占 46.75% 时,精矿1的 TFe 品位提高到了 47.65%, TFe 回收率 84.41%、mFe 回收率 99.17%;尾矿1产率

38.39%、TFe 品位 14.13%,其中 mFe 回收率仅 0.83%,大量的尾矿在粗磨条件下被预先抛除,降低了二段球磨的磨矿量。二段磨矿细度达到  $-38.5\ \mu\text{m}$  粒级占 75.37% 时,精矿2的 TFe 品位 65.45%、TFe 回收率 65.98%、mFe 回收率 95.69%,指标较好。

### 3.3 深度磨矿制备超级铁精矿

深度磨矿制备超级铁精矿实验流程如图4所示。给矿为阶段磨矿-阶段选别实验所得精矿2。采用立式搅拌磨对给矿细磨至  $-30.8\ \mu\text{m}$  粒级占 97.59% 后,采用 FJ-DSJ-04-C×800 平板带式精选机弱磁选制备超级铁精矿<sup>[8]</sup>,磁场强度 0.1 T;尾矿3采用圆筒磁选机扫选,磁场强度 0.18 T。实验结果如表5所示。

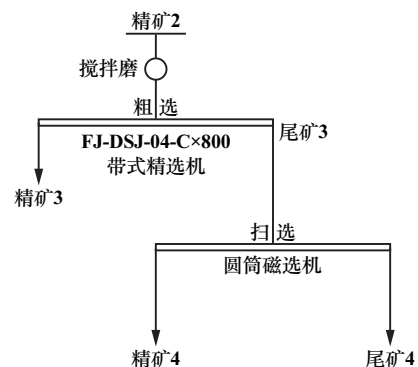


图4 深度磨矿制备超级铁精矿实验流程

表5 深度磨矿制备超级铁精矿实验结果

| 产品名称 | 产率/%   | TFe 品位/% | 回收率/%  |
|------|--------|----------|--------|
| 精矿3  | 54.80  | 71.90    | 60.20  |
| 尾矿3  | 45.20  | 57.63    | 39.80  |
| 精矿4  | 36.23  | 69.87    | 35.21  |
| 尾矿4  | 8.97   | 8.20     | 4.59   |
| 精矿2  | 100.00 | 65.45    | 100.00 |

由表5可知,磨矿细度达到  $-30.8\ \mu\text{m}$  粒级占 97.59% 时,可得到 TFe 品位 71.90%、回收率 60.20% 的超纯铁精矿;中矿扫选后可得到 TFe 品位 69.87%、回收率 35.21% 的超级铁精矿。表明该矿石可选性较好。

## 4 结 论

1) 澳洲某铁矿石 TFe 品位 34.90%,含铁矿物主要为磁铁矿、赤褐铁矿,脉石矿物主要为石英。含铁矿物中磁铁矿分布率为 68.34%、赤、褐铁矿分布率为 26.33%。含铁矿物嵌布不均匀,磁铁矿嵌布粒度相对较粗,普遍在  $50\ \mu\text{m}$  以上;赤铁矿嵌布粒度较细,普遍在  $40\ \mu\text{m}$  以下。

2) 矿石普氏硬度系数为 3.13,属于中等坚固矿石;邦德球磨功指数为  $13.27\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,属于较难磨矿石。

(下转第83页)

79.09%; 锌精矿品位 50.05%、锌回收率 87.51%; 硫精矿品位 42.09%、硫回收率 58.45%。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓,张宇,王楠,等.我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J].中国矿业,2015(S1):6-9.
- [2] 孙明俊.我国铜铅锌多金属硫化矿选矿工艺研究现状[J].中国矿山工程,2022,51(1):98-100.
- [3] 罗仙平,杨思琦,何坤忠,等.“十三五”期间我国铅锌硫化矿选矿技术进展[J].有色金属科学与工程,2022,13(3):117-129.
- [4] 方荣,杨森,英亚歌,等.陕县宽平金银铅锌多金属矿石优先浮选技术探讨[J].湖南师范大学学报(自然科学版),2021,44(5):128-135.

- [5] 杨宏焱.锡铁山铅锌矿提高伴生金银经济效益研究[J].现代矿业,2021,37(7):165-166.
- [6] 毛志丹,谢克强,孔德全,等.云南某复杂硫、氧混合铅锌矿浮选实验研究[J].矿冶工程,2021,41(6):34-37.
- [7] 王妍,王旭,薛凯,等.内蒙古某含银多金属硫化矿强化选别试验研究[J].矿冶工程,2021,41(5):49-52.
- [8] 颜顺德,黄安平.某含金银铅锌矿石选矿试验研究[J].黄金,2022,43(9):68-72.
- [9] 陈章鸿,刘四清,陈思雨,等.基于硫酸调浆的铜铅锌多金属矿浮选分离工艺研究[J].矿产综合利用,2022(2):79-85.

引用本文:聂世华.某铅锌矿床伴生金银在精矿产品中的分布及药剂制度优化试验[J].矿冶工程,2023,43(3):79-83.

(上接第74页)

3) 采用阶段磨矿-阶段选别工艺,经两段磨矿及一粗一精磁选,所得精矿(精矿2)TFE品位65.45%、TFE回收率65.98%、mFe回收率95.69%,产品指标较好。精矿2细磨至-30.8 μm粒级占97.59%,经弱磁选可得到TFE品位71.90%、回收率60.20%的超纯铁精矿;中矿扫选后可得到TFE品位69.87%、回收率35.21%的超级铁精矿。矿石可选性较好。

#### 参考文献:

- [1] 温子龙.2019年中国铁矿供需现状及未来发展建议[J].冶金经济与管理,2020(1):28-31.
- [2] 常艳,杜晓慧,张百忍.国外低品位铁矿发展现状分析[C]//第二届地学文献学术研讨会论文集.2013:297-300.

- [3] 段希祥,宦秉炼,曹亦俊.自然矿块抗压强度测定研究[J].有色金属,2000,52(3):11-14.
- [4] 刘瑜.柿竹园多金属矿1500吨/日选矿厂磨矿过程优化试验研究[D].江西:江西理工大学资源与环境工程学院,2015.
- [5] 黄晓毅,杨平伟,陈晓博,等.青海某低品位金矿邦德球磨功指数测定研究[J].有色金属设计,2020,47(4):28-30.
- [6] 罗帆.哈氏易磨性与邦德功指数的换算验证及其评价[J].水泥,2007(10):34-36.
- [7] 胡芳,陈泽宗.某微细粒难选铁矿尾矿选矿工艺研究[J].矿冶工程,2021,41(6):81-83.
- [8] 徐彪,李肖,胡敏捷,等.本溪某铁矿制备超级铁精矿试验研究[J].矿冶工程,2019,39(3):67-69.

引用本文:肖硕,黄自力,黄涛,等.澳洲某铁矿石可磨可选性研究[J].矿冶工程,2023,43(3):72-74.

(上接第78页)

- [5] 周杰强,严峥,梅光军,等.重庆某铝土矿反浮选脱硫脱硅工艺技术研究[J].矿冶工程,2022,42(1):61-63.
- [6] 马智敏,陈兴华,王玉才,等.铝土矿选矿脱硅技术研究现状及前景展望[J].矿产综合利用,2015(1):1-6.
- [7] 吴边华,周长春.铝土矿浮选脱硅捕收剂研究现状与发展前景[J].矿业研究与开发,2009,29(2):41-44.
- [8] 凌石生,张文彬.铝土矿反浮选脱硅药剂研究概述[J].国外金属选矿,2008(2):20-24.
- [9] 胡岳华.铝硅矿物浮选化学与铝土矿脱硅[M].北京:科学出版社,2004.

- [10] 范晓慧,姜涛,邱冠周,等.铝土矿焙烧-碱浸脱硅新工艺[J].矿冶工程,2002,22(3):83-85.
- [11] 周培富,潘碟,杨成.微生物对低品位铝土矿生物浸矿的应用潜力[J].生物技术,2019,29(1):96-99.

引用本文:杨林,张锦仙,阚赛琼,等.云南某堆积型高铁铝土矿铝、硅、铁分离工艺试验研究[J].矿冶工程,2023,43(3):75-78.