

· 工艺矿物学 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.3158

从工艺矿物学角度分析镜铁山式难选氧化铁矿石选矿工艺优缺点

张丽丽, 孙洪硕, 何跃, 张双爱, 朱霞丽, 王倩, 王彩虹

(酒泉钢铁(集团)有限责任公司, 甘肃 嘉峪关 735102; 甘肃省难选铁矿石资源利用重点实验室, 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 酒钢镜铁山铁矿属于典型的复杂难选氧化铁矿石, 原矿铁品位低, 铁矿物种类多, 共生关系复杂, 矿石极其难选。为了提高镜铁山式难选氧化铁矿石铁精矿的品位、回收率、过滤性能等指标, 从工艺矿物学角度入手, 分析酒钢镜铁山原矿与焙烧矿在嵌布粒度、硬度、密度、磁性等方面差异及其可选性特征, 诊断现有选矿流程的优缺点, 并在此基础上, 结合不同选矿工艺各自的特点、矿石特性、生产成本、精矿质量和过滤性能等因素, 推荐了智能预选-细碎-干磨-悬浮磁化焙烧-重选-磁选-细筛-反浮选的镜铁山式难选氧化铁矿石联合选矿新流程。

关键词: 难选氧化铁矿石; 工艺矿物学; 可选性特征; 联合选矿流程; 磁化焙烧

中图分类号: P618.31; TD91

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0490-11

Analysis of the advantages and disadvantages of the Jingtieshan style refractory iron oxide ore beneficiation process from the perspective of process mineralogy

ZHANG Li-li, SUN Hong-shuo, HE Yue, ZHANG Shuang-ai, ZHU Xia-li, WANG Qian and WANG Cai-hong
(Jiuquan Iron and Steel Group Co., Jiayuguan 735102, China; Key Laboratory of Refractory Iron Ore Resources Utilization in Gansu Province, Jiayuguan 735100, China)

Abstract: Jingtieshan iron mine of Jiuquan Iron and Steel Group Co. is a typical complex refractory iron oxide ore. The original ore has a low iron grade, multiple types of iron minerals, and complex symbiotic relationships, making the ore extremely difficult to select. In order to improve the grade, recovery rate, filtration performance and other indicators of concentrate, starting from the perspective of process mineralogy, the differences in disseminated particle size, hardness, density and magnetic properties between raw ore and roasted ore of Jingtieshan complex refractory iron oxide ore and their washability characteristics of JISCO were analyzed to judge the advantages and disadvantages of the current mineral processing technologies. On this basis, combined with the characteristics of different beneficiation processes, ore properties, production costs, concentrate quality, and filtration performance, a new combined beneficiation process of intelligent preselection-fine breaking-dry grinding-suspension magnetization roasting-gravity separation-magnetic separation-fine sieve-reverse flotation is recommended.

Key words: refractory iron oxide ore; process mineralogy; separability characteristics; combined beneficiation process; magnetic roasting

Fund support: The Key Special Project of National Key Research and Development Plan(2021YFC2902402)

收稿日期: 2023-12-06; 接受日期: 2024-11-29; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2021YFC2902402)。

作者简介: 张丽丽(1985-), 女, 工程师, 主要从事矿物工艺集成、矿石可选性研究、矿产资源综合利用等工作, E-mail: zhanglili@jiugang.com。

我国是铁矿资源大国,根据自然资源部中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心发布的《全球矿产资源储量评估报告2023》,2023年全球可用铁矿石储量中国位于第四。但我国同时是铁矿资源弱国,国产铁矿石平均品位34.50%,远低于世界铁矿石大国的铁矿石品位(澳大利亚63%左右,巴西58%左右,俄罗斯37%左右),且我国铁矿贫矿资源储量占总储量的80%,小型矿多,大型、特大型矿少,且矿石类型复杂,很多铁矿难以开发利用。因此我国大部分铁矿石需要进口,2023年进口铁矿石11.79亿吨,占我国铁矿石消费量的54%左右。

由于国外铁矿石铁品位高、规模大、矿物种类相对单一,直接或者经过简单处理即可达到冶炼原料标准,因此国外对铁矿选矿技术的研究较少,主要集中在传统的磁选、浮选方面(Swamy *et al.*, 2022; Safari *et al.*, 2022),另外在绿色选冶方面研究较多,例如尾矿的综合利用(de Almeida and Schneider, 2022; Almeida *et al.*, 2023)、氢气直接还原铁的研究(Naseri Seftejani and Schenk, 2018; Sabat, 2022; Dhawan *et al.*, 2022; Khani *et al.*, 2023)等,只有少数学者进行还原焙烧的相关研究(Chandio *et al.*, 2023; Baliarsingh *et al.*, 2024)。而中国为了提高铁矿资源的自给率,降低对国际市场的依赖程度,国家出台各种政策大力支持国内铁矿资源的勘探和开采利用,中国的选矿工作者对各类铁矿石的选别技术、选别工艺以及选别设备的研究屡屡创新,在还原焙烧(Yuan *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022, 2023; Zhu *et al.*, 2022; Cheng *et al.*, 2023)、强磁选别(Lin *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2024)等方面的研究均较先进,对复杂难选铁矿石的选别工艺研究更是处于国际领先水平。

选矿是根据矿石中不同矿物的物理、化学性质,把矿石破碎磨细以后,采用重选法、浮选法、磁选法、电选法等方法,将有用矿物与脉石矿物分开,并使各种共生(伴生)的有用矿物尽可能相互分离,除去或降低有害杂质,以获得冶炼或其他工业所需原料的过程(中国百科大辞典编委会,1990)。矿物硬度、密度、磁性、电性、溶解性、解理、熔点、化学活泼性等性质以及结构构造、共生关系等,在其形成的地质活动和演变过程中已基本固定(牛浩斌等,2019;熊发辉等,2022;李文韬等,2025),这些就是矿物的“基因”,研究矿物工艺矿物学特征就是给矿石进行“基因测序”,可利用研究结果,针对不同矿物间的性质

差异,制定相应选别工艺流程,策划合理的产品结构,甚至可以直接指导矿石破碎、磨矿、分级、选矿、过滤等选矿方法和选矿设备的选择以及参数的确定(印万忠等,2021;王路豪,2021)。

镜铁山式氧化铁矿属于典型的复杂难选氧化铁矿,其原矿铁品位低,铁矿物种类多,共生关系复杂(杨建民等,1999),矿石极其难选。通过对镜铁山式难选氧化铁矿石进行的多年的选矿研究和工艺改进,形成了“块矿竖炉还原焙烧-磁选-反浮选、粉矿强磁选、粉矿悬浮磁化焙烧-磁选”的选别工艺(唐晓玲等,2019;陈毅琳等,2022)。但上述各工艺目前存在磨矿量大、回收率低等不同的缺点。本文从工艺矿物学角度入手,研究镜铁山式难选氧化铁矿(以下简称镜铁山矿)可选性特征,分析现用选矿工艺流程优缺点并结合现场实际推荐了新的选矿流程。

1 原矿可选性特征

本节所用矿石为镜铁山矿生产流程原矿皮带取样点所取样品,采用截面法多次取样后合并,进行混匀、缩分、破碎至-5 mm再缩分,送至检测机构进行化学多元素、矿相、电子探针等检测。原矿主要矿物种类及部分工艺矿物学特征如表1。

从表1数据可以看出,镜铁山原矿主要铁矿物为镜铁矿、菱铁矿、褐铁矿,主要嵌布粒度为25~80 μm,但褐铁矿嵌布粒度极细,部分镜铁矿嵌布粒度也在10 μm以下,另有部分10 μm以下的镜铁矿赋存在千枚岩(在矿石中含量7%)中,因此铁矿物嵌布粒度在25~80 μm和-10 μm两个粒度区间集中分布,使得粒度分布呈“葫芦”形;主要脉石矿物为石英、碧玉、千枚岩类矿物(绢云母、绿泥石、镜铁矿、磁铁矿集合体)、重晶石、铁白云石等。

单偏光显微镜下主要矿物特征见图1。由图1结合表1可以看出,镜铁山原矿铁矿物种类复杂,赋存形式多样,性质差异大,分布不集中,共生关系复杂且结合紧密,选矿难度大。

镜铁山原矿主要铁矿物与脉石矿物的可选性特征和分选趋势如表2。从表2可以看出,常用的重选、磁选、浮选等选矿方式均不能高效分选褐铁矿和菱铁矿,而菱铁矿与铁白云石极其相似的性质也导致精矿杂质含量高,金属回收率低,另外部分细粒镜铁矿与石英以千枚岩组成矿物的形式存在,难以解离,也会导致精矿杂质含量高,金属回收率低。

表1 镜铁山原矿主要矿物种类及部分工艺矿物学特征

Table 1 Main mineral types and some process mineralogical characteristics of Jingtieshan raw ore

矿物名称	含量/%	莫氏硬度	密度/(g·cm ⁻³)	嵌布粒度/μm	主要化学成分	表面离子与化学键	磁性	集合体形状	结合关系
镜铁矿	28	5.5~6	5~5.3	25~80, 少量3~10	Fe ₂ O ₃	Fe ³⁺ 、O ²⁻	弱至中	粒、针、鳞片状	菱铁矿、石英、碧玉、千枚岩
褐铁矿	15	1~4	3~4	-	Fe ₂ O ₃ ·nH ₂ O	Fe ³⁺ 、O ²⁻ 、H ⁺ 、OH ⁻	无	土状、蜂窝状	石英
菱铁矿	15	3.75~4.25	3.7~4	25~75	FeCO ₃	Fe ²⁺ 、CO ₃ ²⁻	弱	片状	铁白云石、镜铁矿
铁白云石	5	3.5	2.9~3.1	25~75	CaMg(CO ₃) ₂ 、CaFe(CO ₃) ₂	Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、CO ₃ ²⁻ 、Fe ²⁺	微	片状	菱铁矿、镜铁矿
石英、碧玉	24	6~7	2.22~3.1	10~55, 少量10	SiO ₂	Si=O	碧玉微,石英无	粒状	镜铁矿、磁铁矿、绢云母等
重晶石	4	3~3.5	4~4.6	35~85	BaSO ₄	Ba ²⁺ 、SO ₄ ²⁻	无	粒状	镜铁矿、菱铁矿、石英

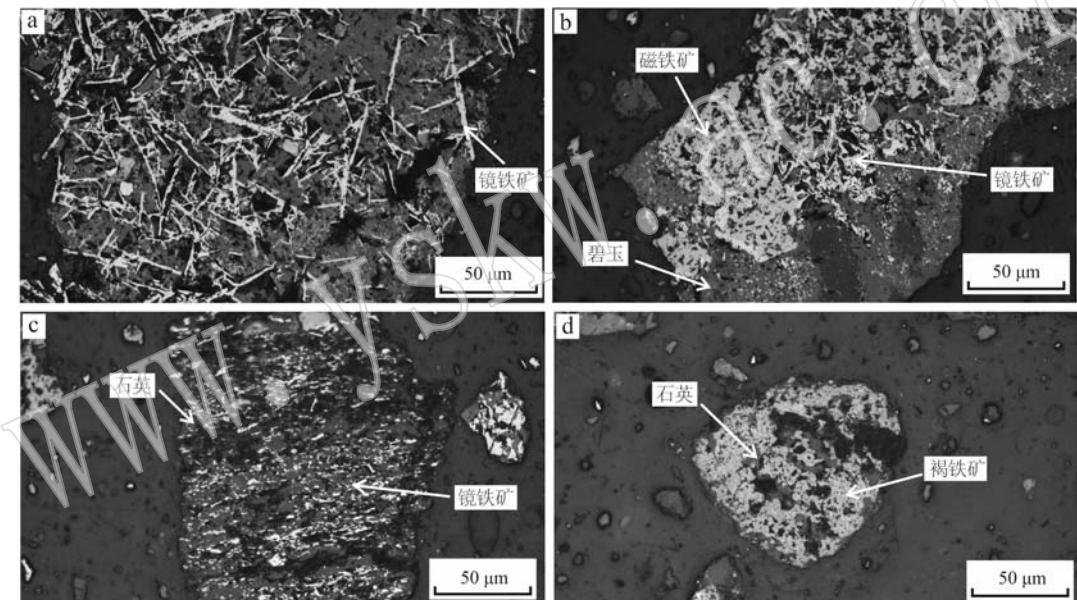
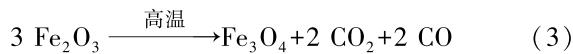
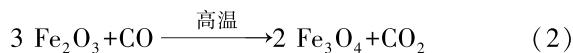


图1 镜铁山原矿主要铁矿物与脉石矿物的显微照片(单偏光)

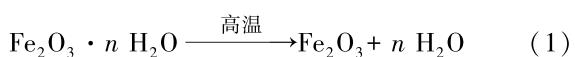
Fig. 1 Microphotos of main iron minerals and gangue minerals in Jingtieshan raw ore (single polarization)

a—与碧玉共生的针状镜铁矿；b—碧玉颗粒中包裹的镜铁矿和磁铁矿；c—被石英包裹的细小镜铁矿；d—土状褐铁矿及其包裹的石英
 a—acicular specularite associated with jasper; b—specularite and magnetite encased in jasper; c—fine specularite wrapped by quartz; d—earthy limonite and wrapped quartz



2.1 块矿竖炉还原焙烧矿可选性特征分析

为了增大铁矿物与脉石矿物磁性差异,提高铁金属回收率,将镜铁山矿中的+15 mm 块矿进行竖炉还原焙烧,铁矿物在 CO 还原作用下转化为磁铁矿,增加了与脉石矿物之间的性质差异,为选别提供了有利条件。竖炉还原焙烧主要化学反应方程式为:



本节所用焙烧矿为选矿生产线的竖炉焙烧矿皮带取样点所取矿样,采用截面法多次取样,合并后进行混匀、缩分,破碎至-5 mm 再次混匀、缩分,送至检测机构进行化学多元素、矿相、电子探针等检测。竖炉还原焙烧块矿的主要矿物种类及工艺矿物学特征如表3。

表 2 镜铁山原矿主要铁矿物与脉石矿物可选性特征及分选趋势

Table 2 Separability characteristics and separation trend of main iron minerals and gangue minerals in Jingtieshan raw ore

选矿工序	磨矿	重选	强磁选	浮选
差异特征	硬度、嵌布粒度	密度、粒度	磁性、粒度	成分、裸露化学键
镜铁矿	硬度高,难磨,粒度粗、连生体多	密度大,易进精矿	磁性中,进入精矿,细粒级易进入尾矿	易被抑制,反浮选进入精矿
褐铁矿	硬度低,易泥化,粒度极细	密度中,进入精矿,部分极细粒进入尾矿	磁性弱,大部分进入尾矿	易被抑制,反浮选进入精矿
菱铁矿	硬度中,粒度中、连生体多	密度中,单体易进入精矿	弱磁性,进入精矿,细粒级和连生体易进入尾矿	存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} , 恶化浮选
铁白云石	硬度中,粒度中、连生体多	密度居中,部分进入精矿	弱磁性,部分进入精矿	存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} , 恶化浮选
石英、碧玉	硬度高,难磨,粒度粗	密度小,进入尾矿	微弱至无磁性大部分进入尾矿	易被捕收,反浮选进入尾矿
重晶石	硬度中,性脆,粒度细	密度大,易进入精矿	无磁性,进入尾矿	存在 Ba^{2+} 恶化浮选

表 3 坚炉还原焙烧块矿主要的矿物种类及工艺
矿物学特征

Table 3 Main mineral types and main process mineralogical characteristics of shaft furnace reduction roasting ore of block ore

矿物名称	含量/%	主要化学成分	表面离子	磁性
镜铁矿	11	Fe_2O_3	Fe^{3+} 、 O^{2-}	弱
磁铁矿	36	Fe_3O_4	Fe^{3+} 、 O^{2-} 、 H^+ 、 OH	强
菱铁矿	3	FeCO_3	Fe^{2+} 、 CO_3^{2-}	弱
重晶石	3	BaSO_4	Ba^{2+} 、 SO_4^{2-}	无

从表 3 数据可以看出,经过还原焙烧,主要铁矿物类型转变为磁铁矿(36%),同时留有少量镜铁矿(11%)和菱铁矿(3%),对比表 1 的原矿成分含量,计算出镜铁矿转化率为 60.71%,菱铁矿转化率为 80%,褐铁矿转化率为 100%。显微镜下观察显示,焙烧后集合体内产生裂隙使硬度降低,铁矿物转化为磁铁矿后仍保持转化前铁矿物嵌布粒度,主要脉石矿物石英、铁白云石等基本未发生变化,重晶石在焙烧过程中分解造成含量降低。铁矿物的转化使矿物磁性增强,矿物性质也更加均一(孙洪硕等,2021)。

显微镜下坚炉还原焙烧块矿主要矿物特征见图 2。从图 2 中可以看到,焙烧后集合体内产生裂隙,造成矿石硬度降低;转化的磁铁矿大部分保留了转化前矿物集合体的结构形态和嵌布粒度,由镜铁矿转化而来的磁铁矿保持针状、鳞片状结构,由菱铁矿转化来的磁铁矿呈片状,且由于被 Mg 、 Mn 离子置换形成了表面不光滑的镁锰磁铁矿,由褐铁矿转化来

的磁铁矿结构不规则,且由于水分逸出产生较多坑洞。未转化的镜铁矿和菱铁矿基本呈被包裹的状态或星点分布状态,说明铁矿物在粒度较细被包裹的情况下还原转化效果较差;碧玉和铁白云石内部含有微量极细的磁铁矿,说明碧玉和白云石中的铁矿物也有还原现象。

块矿焙烧矿主要铁矿物与脉石矿物的可选性特征差异和分选趋势如表 4。从表 4 可以看出,镜铁山块矿经过焙烧后,铁矿物可选性特征和选矿趋势更趋于一致,通过单一的重选、磁选均可选出大部分铁矿物,但精矿中仍含有部分脉石矿物,单独浮选选别仍存在较多的影响因素。为了得到较高品质的铁精矿,可利用联合流程对其进行选别。

2.2 块矿坚炉还原焙烧矿选别流程分析

结合块矿焙烧矿可选性特征,块矿使用坚炉焙烧-磨矿-弱磁选-反浮选流程进行选别,流程图如图 3。

此流程优点在于,将多种铁矿物还原成磁铁矿,增加了铁矿物与脉石矿物之间的磁性差异和表面性质差异;铁矿物在焙烧过程中发生脱水、成分、晶体等变化,集合体硬度降低,更易磨矿;焙烧后磁滑轮预选抛尾,减少磨矿量;阶段磨矿阶段磁选,及时抛除脉石矿物,降低后续选别成本;通过反浮选进一步脱除进入磁选精矿的碧玉、石英等含硅矿物,精矿铁品位相对较高,可以达到 57%~59.8%, SiO_2 、P、S、碱金属等有害元素含量低,金属回收率相对较高,能达到 84%~88.13%(唐晓玲等,2008, 2019; 朱霞丽等,2021)。

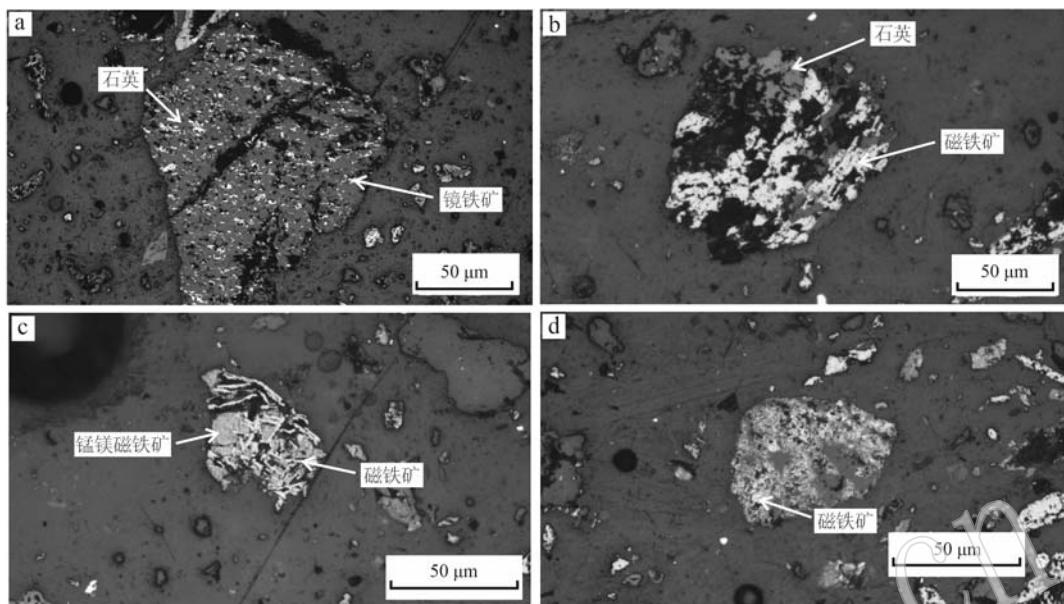


图2 竖炉还原焙烧块矿主要矿物的显微照片(单偏光)

Fig. 2 Microphotos of main mineral types of shaft furnace reduction roasting ore of block ore (single polarization)

a—散布在石英中的星点状镜铁矿；b—片状镜铁矿转化的磁铁矿；c—菱铁矿转化的锰镁磁铁矿和镜铁矿转化的磁铁矿；d—褐铁矿转化的磁铁矿

a—spotted specularite dispersed in quartz; b—magnetite transformed from flaky specularite; c—Mn-Mg magnetite transformed from siderite and magnetite transformed from specularite; d—magnetite transformed from limonite

表4 块矿焙烧矿主要铁矿物与脉石矿物可选性特征差异及分选趋势(孙洪硕等, 2021)

Table 4 Differences in separability characteristics and separation trend of main iron minerals and gangue minerals in lump ore roasting reduction ore (Sun Hongshuo et al., 2021)

选矿工序	磨矿	重选	弱磁选	浮选
差异特征	硬度、嵌布粒度	密度、粒度	磁性	成分、表面离子与化学键
镜铁矿	硬度高,连生体多	密度大,易进精矿	磁性中,连生体易进入尾矿	易被抑制,反浮选进入精矿
菱铁矿	硬度中,连生体多	密度中,单体易进入精矿	磁性弱,易进入尾矿	易被抑制,反浮选进入精矿
磁铁矿	内部裂隙较多,易磨,部分易泥化	密度大,进入精矿,少量细粒级进入中矿	磁性强,进入精矿	易被抑制,反浮选进入精矿
石英、碧玉	硬度高,难磨,粒度粗	密度小,进入尾矿	少量碧玉进入精矿,石英进入尾矿	易被捕收,反浮选进尾矿
铁白云石	硬度中,连生体多	密度中,部分进精矿	少量进入精矿	部分进入精矿
重晶石	硬度低,粒度细	密度大,粒度极细,易进入中矿	无磁性,进入尾矿	不被捕收,反浮选易进精矿

此流程缺点在于,转化成的磁铁矿密度大、硬度较低,在磨矿和旋流器分级闭路中更易过磨,矿粒表面能增大、受水流曳力影响增大,更易在磁选、浮选过程中流失;还原焙烧转化来的磁铁矿矫顽力大,磁团聚现象明显,磁选过程磁夹杂严重;碧玉、铁白云石略带磁性的脉石矿物脱除效果差,由于其硬度较大、密度相对较小,在三段磨矿后的旋流器分级过程中,容易以较粗颗粒形式进入溢流(褚良银等, 2002),从而增加反浮选流程脱除难度;入浮选前所有磁选精矿都需要进行细磨,磨矿成本偏高;反浮

选精矿粒度细、含有药剂,过滤性能差(陈毅琳等, 2014);使用化学药剂,安全环保压力大;-15 mm 粉矿不能焙烧。

3 粉矿强磁选流程分析

强磁选是回收镜铁山粉矿设备最简单的工艺,但铁矿物回收率过低。镜铁山粉矿的矿石可选性特征与镜铁山原矿一致,此处不再赘述。粉矿选别流程如图4。

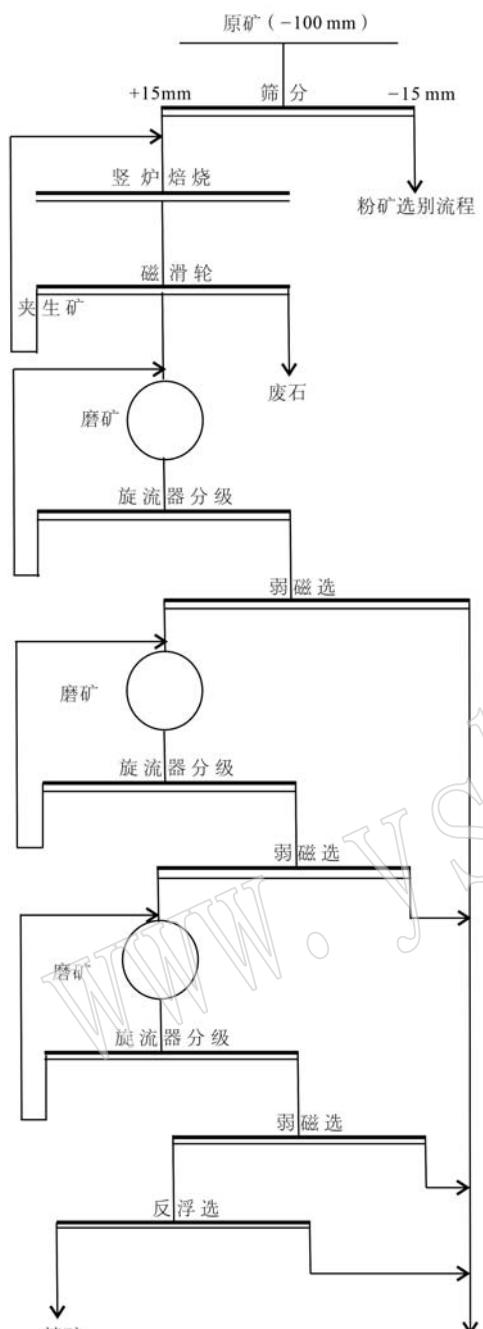


图3 镜铁山块矿选别流程图
Fig. 3 Selection flow chart of Jingtieshan lump ore

该流程优点在于，设备和流程相对简单，污染少，能耗低，成本低；精矿中 CaO、MgO 含量高，利于后续烧结配矿；精矿粒度相对较粗，过滤性能好。

流程缺点在于，选别磁场强度高，耗电量大；碧玉、铁白云石等脉石无法有效抛除，褐铁矿、菱铁矿等铁矿物回收效果较差，精矿铁品位一般为 42%~45%，金属回收率只有 60%~64% (唐晓玲等, 2019)；

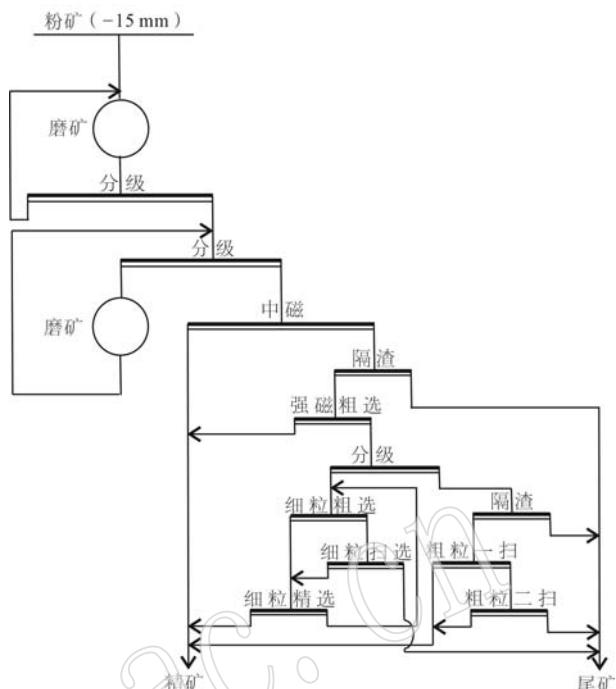
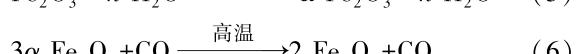
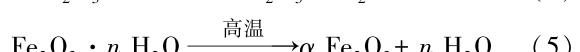
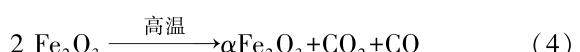


图4 镜铁山粉矿强磁选别流程图
Fig. 4 Flow chart of high intensity magnetic separation of Jingtieshan powder ore

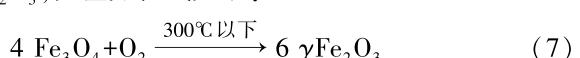
限于难免离子影响、泡沫流动性差等问题，浮选选别可行性差。

4 粉矿悬浮磁化焙烧矿可选性特征及选矿流程分析

悬浮磁化焙烧解决了镜铁山矿粉矿回收率低的问题。粉矿悬浮磁化焙烧过程中发生的主要化学反应方程式(孙永升等, 2018; 祝昕冉等, 2019; 唐晓玲等, 2019; 秦彩霞等, 2019a, 2019b; 孙洪硕等, 2022; 张强等, 2022)为：



在矿石冷却阶段，为了降低磁铁矿的矫顽力，减少后续磁选过程中的磁性杂质，对矿石进行控制氧化，经穆斯堡尔谱检测，生成了部分磁赤铁矿，即 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，反应方程式如下：



从反应方程式可以看出，悬浮磁化焙烧铁矿物

的主要转化产物为磁铁矿和磁赤铁矿。磁赤铁矿由于磁化系数较磁铁矿小,因此具有磁性较强、矫顽力小的特点,利于后续磁选提纯(孙永升等,2018;唐晓玲等,2019;秦彩霞等,2019a,2019b;祝昕冉等,2019;孙洪硕等,2022;张强等,2022)。

4.1 粉矿悬浮磁化焙烧矿可选性特征

本节使用的矿石为悬浮磁化焙烧矿取样机所取的矿浆样,多次取样合并后进行过滤、烘干、混匀、缩

分,送至检测机构进行化学多元素、矿相、电子探针、穆斯堡尔谱等检测。

粉矿悬浮磁化焙烧矿的主要矿物种类及部分工艺矿物学特征如表5。

从表5数据可以看出,镜铁山粉矿悬浮磁化焙烧矿主要铁矿物为磁铁矿和磁赤铁矿,主要脉石矿物石英、碧玉、铁白云石、重晶石等未发生变化,与镜铁山原矿基本一致。

表5 粉矿悬浮磁化焙烧矿主要矿物种类及工艺矿物学特征

Table 5 Main mineral types and main process mineralogical characteristics of suspension magnetization roasted ore of powder ore

矿物名称	含量/%	在铁矿物中占比/%	莫氏硬度	主要化学成分	表面离子	磁性
镜铁矿	8	17.02	5.5~6	Fe_2O_3	$\text{Fe}^{3+}, \text{O}^{2-}$	中
磁铁矿和磁赤铁矿	36	76.60		$\text{Fe}_3\text{O}_4, \gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}^{3+}, \text{O}^{2-}, \text{H}^+, \text{OH}^-$	强
菱铁矿	3	6.38	3.75~4.25	FeCO_3	$\text{Fe}^{2+}, \text{CO}_3^{2-}$	弱

与镜铁山原矿和块矿竖炉还原焙烧矿相比,粉矿悬浮磁化焙烧矿中的磁性产品在铁矿物中占比高,镜铁矿和菱铁矿含量更低,铁矿物转化率更高。产生上述差异的主要原因是粉矿悬浮磁化焙烧的粒度细(悬浮磁化焙烧粉矿焙烧粒度为-74 μm含量60%左右,竖炉焙烧块矿粒度为+15 mm),因此还原反应速率更快,转化更彻底,挥发组分更易逸出,使铁矿物组分和性质更均一(孙永升等,2018;祝昕冉等,2019;秦彩霞等,2019a,2019b;唐晓玲等,2019;孙洪硕等,2022;张强等,2022)。

悬浮磁化焙烧粉矿单偏光显微镜下主要矿物特

征见图5。从图5中可以看到,粉矿悬浮磁化焙烧矿矿物集合体内部裂隙较多。

4.2 镜铁山粉矿悬浮磁化焙烧矿选矿流程分析

粉矿悬浮焙烧矿使用单一弱磁选流程进行选别,流程图如图6。

流程优点在于,设备不存在粉矿“淌炉”风险,还原反应时矿物粒度细,还原反应时间短,速率快,转化率更高;使用高压辊磨机细碎增加了矿石内部裂隙,焙烧还原反应进一步增加了矿粒内部裂隙,使矿粒容易磨细,同时使还原气体与铁矿物接触几率变大,加快了反应速率;焙烧后转化成的磁性铁矿物

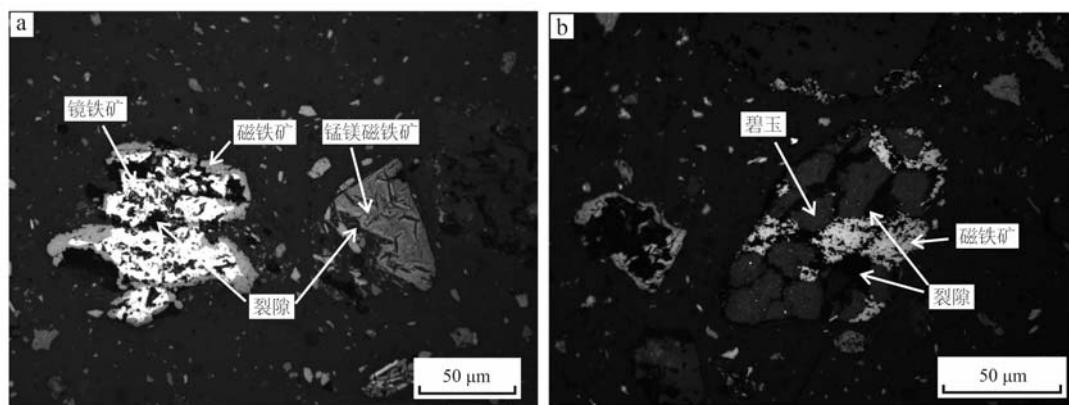


图5 悬浮磁化焙烧粉矿主要矿物的显微照片(单偏光)

Fig. 5 Microphotos of main mineral types of suspension magnetization roasted ore of powder ore (single polarization)

a—磁铁矿和镜铁矿连生体; b—磁铁矿和碧玉连生体

a—intergrowth of magnetite and specularite; b—intergrowth of magnetite and jasper

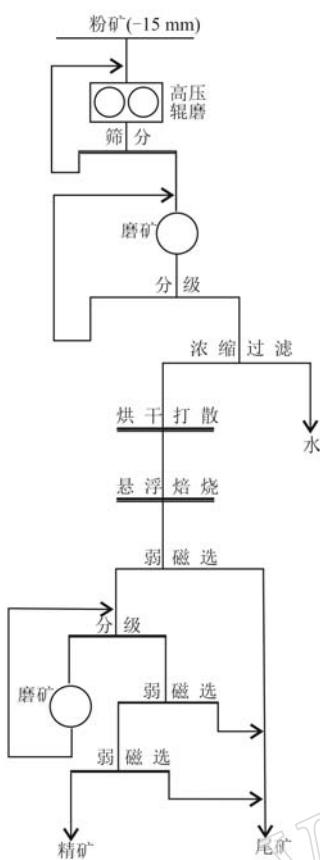


图 6 镜铁山粉矿悬浮磁化焙烧矿磁选别流程图
Fig. 6 Flow chart of magnetic separation of suspension magnetization roasted ore from Jingtieshan powder ore

矫顽力小,磁选过程中磁性夹杂少;选别指标好,磁选精矿铁品位能达到 54.33%,金属回收率达 89.1%,尾矿铁品位降低至 10%以下(杨悦,2023)。

流程缺点在于,粉矿没有进行预选,全部进行细碎、磨矿和焙烧作业,破碎、磨矿、焙烧成本较高;焙烧前使用湿式磨矿,需要对磨矿产品进行过滤、烘干打散,成本大幅度增加;焙烧矿使用单一弱磁选选别,选别场强偏高,贫连生体进入精矿,影响精矿铁品位;矿物焙烧后只进行一段磨矿(-50 μm 含量 90%左右),粗粒铁矿物过磨,容易流失,硬度大的石英、碧玉等磨不细;精矿粒度细,过滤困难。

5 高效选别工艺研究

镜铁山矿铁矿物和脉石矿物间存在明显的形貌、嵌布粒度和密度差异,焙烧后铁矿物和脉石矿物增大了磁性差异和硬度差异,但镜铁山矿现用的选矿流程只利用了磁性差异,因此该矿选别流程有进

一步优化的空间。笔者重点研究了原矿预选工艺和焙烧矿重选预提精工艺。

5.1 原矿预选工艺研究

在矿石选别过程中,越早抛除脉石矿物,越能降低后续选别难度和选别成本。预选是选别段中最早能抛除脉石矿物的工序。酒钢选矿技术人员针对镜铁山矿,进行了多种预选工艺探索,其中电磁感应辊式强磁选机预选试验取得成功并得到工业应用。该工艺是将镜铁山矿石破碎至 50 mm 以下,通过一粗二扫预选,粉矿(-15 mm)和块矿(15~50 mm)可以得到铁品位高于 34%、回收率高于 95% 的精矿,预选精矿铁品位较原矿提高 1.6%以上(安清峰,2011)。

另一个预选研究成果是智能预选试验研究,镜铁山矿在 15~50 mm 和 50~100 mm 两个粒级条件下,通过智能预选机选别,均能得到抛废率 13%左右、铁回收率 96%左右、铁品位提高 3.6%以上的实验指标(郭忆等,2021)。近年来,随着智能分选技术的发展,铁矿石的有效选别粒度下限已降低至 3~10 mm,但入选粒度越细,设备处理量越小。

5.2 焙烧矿重选预提精工艺探索

为了解决焙烧矿选别精矿粒度细(-50 μm 含量 90%左右)、过滤难的问题,根据镜铁山矿铁矿物存在部分粗粒嵌布的特点,研究在较粗粒度条件下预提精,选出粗粒铁精矿,用以调整综合精矿粒度。

取块矿竖炉还原焙烧矿磨矿磁选后再磨分级的旋流器沉砂(-74 μm 含量 40%左右)样品,多次取样合并、混匀后,使用螺旋溜槽进行选别,一段粗选能够得到铁品位 59%以上、综合产率和回收率均在 25%以上的铁精矿,粒度-74 μm 含量 60%左右。螺旋溜槽的尾矿再磨后按照磁选-反浮选流程选别,也得到了合格铁精矿。使用螺旋溜槽预提精,可以减少后续磁选、反浮选矿量,降低综合成本,改善精矿过滤性能。

5.3 高效选别工艺推荐

基于镜铁山矿铁矿物与脉石矿物的工艺矿物学特征以及前期选别工艺研究结果,依据尽量少的改动现场流程的原则,综合考虑生产成本、精矿质量、金属回收率、过滤性能以及选矿装备的先进性等因素,推荐中碎后智能预选-细碎-干磨-悬浮磁化焙烧-重选-磁选-细筛-反浮选联合选矿流程。该工艺利用的主要工艺矿物学特征及矿物选别趋势如表 6,选矿流程图如图 7。

表 6 主要铁矿物与脉石矿物可选性特征差异及分选趋势

Table 6 Differences in separability characteristics and separation trend of main iron minerals and gangue minerals

选矿工序	智能预选	高压辊磨	悬浮焙烧	弱磁选	细筛	重选	浮选
差异特征	成分、密度、集合体形态	硬度	成分	磁性	粒度	密度、嵌布粒度	成分、裸露化学键
镜铁矿	铁含量高,进精矿	与脉石矿物硬度差异大,易沿界面断裂	大部分转化为磁性矿物	磁性中,部分进入精矿	粒度细,进入筛下	密度大,进精矿	被抑制,反浮选进精矿
菱铁矿	铁含量高,进精矿	与脉石矿物硬度差异大,易沿界面断裂	大部分转化为磁性矿物	磁性弱,进入尾矿	粒度中,部分进筛下	密度中,进尾矿	被抑制,反浮选进精矿
褐铁矿	铁含量高,进精矿	与脉石矿物硬度差异大,易沿界面断裂	全部转化为磁性矿物	-	-	-	-
磁铁矿、磁赤铁矿	原矿中含量极低	-	-	磁性强,进入精矿	粒度细,进入筛下	密度大,进精矿	被抑制,反浮选进精矿
石英、碧玉	铁含量低,进尾矿	与铁矿物硬度差异大,易沿界面断裂	石英不转化,碧玉微量转化	石英进尾矿,少量碧玉进精矿	粒度粗,留在筛上	密度小,进入尾矿	被捕收,反浮选进尾矿
铁白云石	铁含量低,进尾矿	与铁矿物硬度差异大,易沿界面断裂	微量转化为磁性矿物	少量进入精矿	粒度中,部分进筛下	密度中,进尾矿	不被捕收,进精矿
重晶石	不含铁,进尾矿	与铁矿物硬度差异大,易沿界面断裂	不转化	无磁性,进入尾矿	粒度细,进入筛下	密度大,进精矿	不被捕收,进精矿

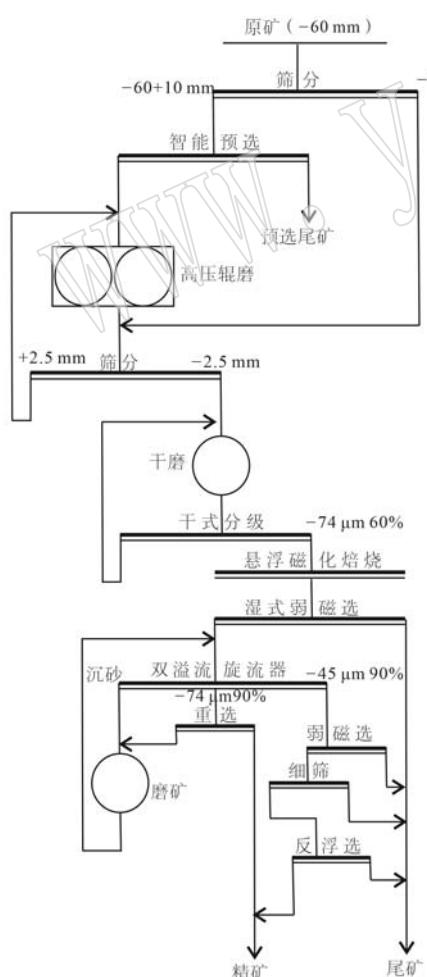


图 7 推荐选矿流程图
Fig. 7 Recommended beneficiation flow chart

6 结论

(1) 镜铁山式难选氧化铁矿石原矿矿物种类多、性质复杂,极其难选;镜铁山矿焙烧后铁矿物与脉石矿物磁性差异、硬度差异、表面性质差异增大,利于后续的选别,因此焙烧是镜铁山式难选氧化铁矿石的有效预处理方法。

(2) 目前镜铁山式难选氧化铁矿石的选别工艺中,块矿竖炉磁化焙烧、粉矿悬浮磁化焙烧都能够增加铁矿物和脉石矿物间的性质差异、选别精矿指标均较高等优点,但均具有磁性脉石难抛除、能耗高、成本高、精矿过滤性能差、环保压力大等缺点;粉矿强磁选工艺具有精矿铁品位和回收率双低的重大缺陷。

(3) 根据镜铁山式难选氧化铁矿石焙烧中铁矿物与脉石矿物的性质差异和选矿工艺特点,综合考虑现用流程、生产成本、精矿质量、金属回收率、过滤性能以及选矿装备的先进性等因素,推荐中碎后智能预选-细碎-干磨-悬浮磁化焙烧-重选-磁选-细筛-反浮选联合工艺流程。

References

- Almeida V O, Lima N and Schneider I A H. 2023. Simplified hydrometallurgical route for the synthesis of silica-free hematite from iron ore tailings[J]. Minerals Engineering, 200: 108140.

- An Qingfeng. 2011. Research of iron ore pre-concentration technique in JISCO's Huashugou pit[J]. Gansu Metallurgy, 33(3): 48~50 (in Chinese).
- Baliarsingh M, Mahanta J, Mishra S, et al. 2024. Influence of feed mineralogical characteristics on the reduction behavior of low-grade iron ores[J]. Powder Technology, 434: 119253.
- Chandio A D, Channa I A, Shaikh A A, et al. 2023. Beneficiation of low-grade dilband iron ore by reduction roasting[J]. Metals, 13(2): 296.
- Chen Yilin, et al. 2022. Study on Efficient Utilization of Jingtieshan Refractory Iron Oxide Ore[R]. Science and Technology Bureau of Gansu Province, 2022-04-13 (in Chinese).
- Chen Yilin, Li Ming, Tang Xiaoling, et al. 2014. Practice of treating iron concentrate by pressure filter in JISCO[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 34(5): 39~42 (in Chinese).
- Cheng S K, Han Y X, Tang Z D, et al. 2023. Producing magnetite concentrate from iron tailings via suspension magnetization roasting: A pilot-scale study [J]. Separation Science and Technology, 58 (7): 1 372~1 382.
- Chu Liangyin and Chen Wenmei. 2002. Rotating Flow Separation Theory [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~253 (in Chinese).
- de Almeida V O and Schneider I A H. 2022. Hydrometallurgical processing of Brazilian iron ore tailings for the synthesis of pigments[J]. Geomaterials, 12(2): 30~36.
- Dhawan N, Manzoor U and Agrawal S. 2022. Hydrogen reduction of low-grade banded iron ore[J]. Minerals Engineering, 187: 107794.
- Editorial Committee of Chinese Encyclopedia Dictionary. 1990. Chinese Encyclopedia Dictionary [M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 1~151 (in Chinese).
- Guo Yi, Bian Liguo and Zhan Renli. 2021. Application of intelligent sorter to preconcentration for waste rock discarding of JISCO Huashugou iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 41(3): 61~63 (in Chinese).
- Hu Z C, Lu D F, Wang Y H, et al. 2024. A novel pneumatic dry high-intensity magnetic separator for the beneficiation of fine-grained hematite[J]. Powder Technology, 433: 119216.
- Khani M, Ale Ebrahim H and Habibzadeh S. 2023. A comprehensive random pore model kinetic study of hematite to iron reduction by hydrogen[J]. Chemical Engineering Science, 281: 119116.
- Li Wentao, Dong Guoming, Ding Feng, et al. 2025. Mineralogical characteristics of typical ore from the BIF-type iron deposit at Sijiyang north mining district in eastern Hebei Province and their constraints on the metallogenetic evolution[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 44(1): 68~86 (in Chinese with English abstract).
- Lin H Y, Li X, Lei Z Y, et al. 2023. Developing high gradient magnetic separators for greener production: Principles, design, and optimization [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 587: 171260.
- Naseri Seftejani M and Schenk J. 2018. Thermodynamic of liquid iron ore reduction by hydrogen thermal plasma[J]. Metals, 8(12): 1 051.
- Niu Haobin, Ding Jun, Li Jun, et al. 2019. Ore-forming process of the beiya Fe-Au-polymetallic deposit in western Yunnan: Constraints from geochemical characteristics of siderite[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 38(4): 553~569 (in Chinese with English abstract).
- Qin Caixia, Sun Yongsheng, Chen Yilin, et al. 2019a. Study on phase transition behavior of siderite magnetized roasting products during cooling and oxidation[J]. Metal Mine, (12): 79~83 (in Chinese with English abstract).
- Qin Caixia, Wang Yousheng, Zhu Xiali, et al. 2019b. Analysis of differences in the beneficiation of roasted products of refractory iron oxide from JISCO's jingtieshan mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 39(6): 97~100 (in Chinese).
- Sabat K C. 2022. Hematite reduction by hydrogen plasma: Where are we now? [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 29(10): 1 932~1 945.
- Safari M, Hoseimian F S, Deglon D, et al. 2022. Impact of flotation operational parameters on the optimization of fine and coarse Itabirite iron ore beneficiation[J]. Powder Technology, 408: 117772.
- Sun Hongshuo, Chen Yilin, Han Yuexin, et al. 2022. Study on suspension magnetization roasting test and mechanism of iron ore from JISCO [J]. Metal Mine, (4): 96~101 (in Chinese).
- Sun Hongshuo, Zhang Lili, Qi Shengliang, et al. 2021. Study on influence law of CaO content on low-intensity magnetic system of Heigou Mine of Jiuquan iron & steel corporation (JISCO)[J]. Mining Engineering, 19(2): 33~37 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yongsheng, Cao Yue, Han Yuexin, et al. 2018. Oxidation kinetics of magnetite during the cooling process of magnetization roasting[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 39(12): 1 759~1 763 (in Chinese with English abstract).
- Swamy A K, Nikkam S and Palthur S K. 2022. Recovery of hematite from banded hematite quartzite of southern India by magnetic separation and reverse flotation[J]. Minerals, 12(9): 1 095.
- Tang Xiaoling, Chen Yilin, Gao Zebin, et al. 2008. Practice on the cationic inverse flotation of roasting-magnetic separation of iron concentrates in dressing plant of jiusteel[J]. Metal Mine, (11): 43~45, 70 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xiaoling, Chen Yilin, Han Yuexin, et al. 2019. Expansion experimental study for suspension magnetization roasting in Jiugang Powder ore[J]. Metal Mine, (2): 29~33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Luhao. 2021. Research and Design of Iron Ore Flotation Prediction

- and Process Decision System Based on Mineral Genes [D]. Shenyang: Northeastern University (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Xu Xiangzhen, Yang Shengbiao, et al. 2022. Genesis and significance of different types of mineral inclusions in podiform chromitite[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(2): 413~436 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianmin, Wang DENGHONG, Mao Jingwen, et al. 1999. The petrochemical research method for silicalite and its application to the "jingtieshan type" iron deposits[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 18(2): 108~120 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yue. 2023. Gao Zebin; Jiugang Scheme was Provided for The Development and Utilization of Complex Refractory Oxidized Iron Ore [N]. China Metallurgical Journal, 2023-03-23(002) (in Chinese).
- Yin Wanzhong and Tang Yuan. 2021. Current status in study of genetic flotation of minerals[J]. Metal Mine, (1): 42~54 (in Chinese with English abstract).
- Yuan S, Xiao H X, Wang R F, et al. 2022. Improved iron recovery from low-grade iron ore by efficient suspension magnetization roasting and magnetic separation[J]. Minerals Engineering, 186: 107761.
- Zhang Qiang, Sun Yongsheng, Han Yuexin, et al. 2022. Formation of maghemite in suspension magnetization roasting-oxidation-cooling process[J]. Metal Mine, (2): 102~109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Sun Y S, Han Y X, et al. 2023. Reaction behavior and non-isothermal kinetics of suspension magnetization roasting of limonite and siderite [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 30(5): 824~833.
- Zhang Q, Sun Y S, Wang S, et al. 2022. Growth behavior and kinetics of magnetite during magnetization roasting[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 116: 400~410.
- Zhu Xiaoli and Li Jinglun. 2021. Comparative analysis on reverse flotation of JISCO weak magnetic concentrate with cationic collectors[J]. JISCO Technology, (1): 11~15 (in Chinese).
- Zhu Xinran, Sun Yongsheng, Han Yuexin, et al. 2019. Effect of cooling mode on magnetic properties of cooling product [J]. Metal Mine, (2): 66~70 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X R, Zhang Q, Sun Y S, et al. 2022. Fluidization roasting technology of jingtieshan iron ore in the absence of carbon additives[J]. Sustainability, 14(20): 13629.
- 滤铁精矿生产实践[J]. 矿冶工程, 34(5): 39~42.
- 褚良银, 陈文梅. 2002. 旋转流分离理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~253.
- 郭 忆, 边立国, 展仁礼. 2021. 酒钢桦树沟铁矿石智能分选机预选抛废试验研究[J]. 矿冶工程, 41(3): 61~63.
- 李文韬, 董国明, 丁 枫, 等. 2025. 冀东司家营BIF型铁矿北矿区典型矿石矿物特征及其对成矿演化的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 44(1): 68~86.
- 牛浩斌, 丁 俊, 李 俊, 等. 2019. 滇西北衡铁金多金属矿床的成矿作用过程——来自菱铁矿元素地球化学特征的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 38(4): 553~569.
- 秦彩霞, 孙永升, 陈毅琳, 等. 2019a. 磁化焙烧产品冷却氧化过程中相变行为研究——菱铁矿[J]. 金属矿山, (12): 79~83.
- 秦彩霞, 王友胜, 朱霞丽, 等. 2019b. 浅析酒钢镜铁山难选氧化铁矿焙烧产品选别指标差异[J]. 矿冶工程, 39(6): 97~100.
- 孙洪硕, 陈毅琳, 韩跃新, 等. 2022. 酒钢铁矿石悬浮磁化焙烧试验及机理研究[J]. 金属矿山, (4): 96~101.
- 孙洪硕, 张丽丽, 祁生亮, 等. 2021. 酒钢黑沟矿CaO含量对弱磁系统的影响规律研究[J]. 矿业工程, 19(2): 33~37.
- 孙永升, 曹 越, 韩跃新, 等. 2018. 磁化焙烧冷却过程中磁铁矿氧化动力学[J]. 东北大学学报(自然科学版), 39(12): 1759~1763.
- 唐晓玲, 陈毅琳, 高泽宾, 等. 2008. 酒钢选矿厂焙烧磁选铁精矿阳离子反浮选生产实践[J]. 金属矿山, (11): 43~45, 70.
- 唐晓玲, 陈毅琳, 韩跃新, 等. 2019. 酒钢粉矿悬浮磁化焙烧扩大试验研究[J]. 金属矿山, (2): 29~33.
- 王路豪. 2021. 基于矿物基因的铁矿浮选预测及流程决策系统研究与设计[D]. 沈阳: 东北大学.
- 熊发挥, 徐向珍, 杨胜标, 等. 2022. 豆箕状铬铁矿中不同类型矿物包裹体成因及指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 413~436.
- 杨建民, 王登红, 毛景文, 等. 1999. 硅质岩岩石学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. 岩石矿物学杂志, 18(2): 108~120.
- 杨 悅. 2023. 高泽宾: 为开发利用复杂难选氧化铁矿提供酒钢方案[N]. 中国冶金报, 2023-03-23(002).
- 印万忠, 唐 远. 2021. 矿物基因浮选的研究现状[J]. 金属矿山, (1): 42~54.
- 张 强, 孙永升, 韩跃新, 等. 2022. 悬浮磁化焙烧——氧化冷却过程中磁赤铁矿生成规律[J]. 金属矿山, (2): 102~109.
- 中国百科大辞典编委会. 1990. 中国百科大辞典[M]. 北京: 华夏出版社, 1~151.
- 朱霞丽, 李京伦. 2021. 阳离子捕收剂反浮选酒钢弱磁精矿对比分析[J]. 酒钢科技, (1): 11~15.
- 祝忻冉, 孙永升, 韩跃新, 等. 2019. 冷却方式对磁铁矿冷却产物的磁性影响研究[J]. 金属矿山, (2): 66~70.

附中文参考文献

- 安清峰. 2011. 酒钢桦树沟铁矿石预选工艺探索[J]. 甘肃冶金, 33(3): 48~50.
- 陈毅琳, 等. 2022. 镜铁山式难选氧化铁矿石高效利用研究[R]. 甘肃省科学技术厅, 2022-04-13.
- 陈毅琳, 李 明, 唐晓玲, 等. 2014. 采用加压过滤机处理酒钢难过