鲁中地区某铁尾矿综合利用研究*

高春庆[1,2]，赛明雨[2]，杨慧芬[1]

（1.北京科技大学， 北京 100083；
2.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司， 安徽 马鞍山市 243000）

摘要：针对大量铁尾矿存在有用矿物含量少、磁性弱、结晶粒度细、复杂难选而不能得以充分有效利用的问题，对山东鲁中地区某选厂中的低品位矿石尾矿开展了综合利用研究。首先对原矿矿石性质进行了分析检测并筛析化验，得出原矿中主要的含铁矿物为磁铁矿。根据该矿石的性质特点，对原矿分别展开了3种工艺流程方案试验，分别为：筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺方案（方案Ⅰ）、筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺方案（方案Ⅱ）及筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺方案（方案Ⅲ）。最终结果表明，方案Ⅱ的分选效果最佳，可获得精矿产率为20.46%、铁品位为50.93%、铁回收率为44.10%的选别指标；这些矿石中有用铁矿物嵌布粒度细且与磁性相对较强的硅酸铁矿物紧密共生，欲获取较高品位的铁精矿，重选或浮选比磁选显示出明显的分选优势，所以可以根据实际情况选择方案Ⅱ或方案Ⅲ。

关键词：磁铁矿；低品位矿石；重选；浮选；磁选

中图分类号：TD951 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)12-0283-11

Study on Comprehensive Utilization of Iron Tailings in Central Shandong Region

GAO Chunqing[1,2], *SAI Mingyu*[2], *YANG Huifen*[1]

(1.University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China)

Abstract: A large number of iron tailings can not be fully and effectively utilized due to their low content of useful minerals, weak magnetism, fine crystal particle size and complex and difficult separation. Therefore, in order to solve this problem, a comprehensive utilization study was conducted on low-grade ore tailings from a beneficiation plant in the central Shandong region. Firstly, the properties of the original ore were analyzed, tested, and screened for analysis, and it was found that the main iron containing mineral in the original ore is magnetite. Based on the properties and characteristics of the ore, three process schemes were tested on the raw ore, namely screening-gravity concentration-medium magnetic separation-grinding-medium magnetic separation-gravity concentration process scheme (Scheme Ⅰ), screening-gravity concentration-medium magnetic separation-grinding-medium magnetic separation-flotation concentration process scheme (Scheme Ⅱ) and screening-gravity concentration-medium magnetic separation-grinding-medium magnetic separation-gravity concentration-gravity concentration-gravity tailings flotation concentration process scheme (Scheme Ⅲ). The final results show that Scheme Ⅱ has the best sorting effect, achieving a concentrate with yield of 20.46%, iron grade of 50.93%, and iron recovery rate of 44.10%. Among these ores, there are iron minerals embedded with fine particle size and closely coexisting with silicate iron minerals with relatively strong magnetism. To obtain higher grade iron concentrates, gravity separation or flotation shows obvious sorting advantages compared to magnetic separation. Therefore, Scheme Ⅱ or Scheme Ⅲ can be selected according to the actual situation.

Key words: Magnetite, Low grade ore, Gravity concentration, Flotation, Magnetic separation

---

* **收稿日期**：2024-11-07
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2904501，2022YFC2904502)
作者简介：高春庆(1982—)，男，山东潍坊人，正高级工程师，主要从事矿物加工工艺优化、新材料研发等方面的工作。E-mail：gcq1234567@163.com

0 引言

铁矿石作为工业发展的主要原料之一,不仅是一种储量较多且分布广泛的矿产资源,更是一种直接影响经济发展的战略资源。中国铁矿石资源具有贫、细、杂且嵌布粒度不均匀的特点,铁矿石平均品位仅32%~34%,其中铁品位在50%以下的铁矿占总量的95%[1-2]。由于中国铁矿资源呈现贫铁矿多、富铁矿少的特点,过去粗放开采、选富弃贫的方式,大量中低品位矿石(部分铁品位可达30%以上)未被利用,造成了极大的资源浪费[3]。作为世界上最大的钢铁生产国,中国对铁矿资源的需求量极大,铁尾矿持续堆积所带来的问题日益严重[4-7]。堆积的铁尾矿不仅占用大量土地资源[8-9],甚至还对生态环境造成严重污染,铁尾矿的大量堆积,已成为中国乃至全世界亟待解决的问题[10-12]。"十三五"期间,为加快推动绿色低碳发展,中国颁布了相关法律法规,鼓励钢铁行业节能减排,提高对铁尾矿的综合利用率[13]。

尾矿综合利用的主要途径包括有益组分再选、农用材料制备、建筑材料加工、采空区充填、土地复垦或造田、海底处置等[14-21]。国内外诸多研究机构和矿山企业已经开展了尾矿综合利用的相关研究工作,并取得了一系列重要进展[22-29]。其中,铁尾矿中铁矿物的高效再选可在一定程度上缓解尾矿的堆积问题[30-32]。

本文研究矿石取自山东鲁中地区某铁矿厂,对其矿物组成及矿石性质进行充分研究,并以其矿石性质为基础进行磁选、重选、浮选,最终获得铁精矿及尾矿,其中尾矿铁品位较高,可以作为水泥铁质校正剂使用,最终实现无尾排放。研究通过比较不同选别方法对最终选别效果的影响,可为铁尾矿高效再选工艺进展提供新的思路。

1 矿石性质及矿物组成

1.1 化学多元素分析

试验所用原矿矿样进行化学多元素分析,分析结果见表1。

表1 化学多元素分析结果

Table 1 Results of the chemical multielement analysis %

TFe	S	P	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	MnO
23.78	0.044	0.064	1.77	1.15	51.59	0.46	0.12
K_2O	Na_2O	TiO_2	ZnO	Cr_2O_3	NiO	V_2O_5	烧损
0.058	0.20	0.015	0.009	—	0.001	0.006	0.83

1.2 铁物相分析

将试样进行铁物相分析,其结果见表2。分析结果表明,原矿主要铁矿物为磁铁矿,分布率为50.25%,其次为硅酸铁、赤褐铁矿和碳酸铁。

表2 铁物相分析结果

Table 2 Results of the iron-phase analysis

铁物相	含量/%	分布率/%
磁铁矿	11.95	50.25
赤、褐铁矿	4.87	20.48
黄铁矿	0.10	0.42
碳酸铁	1.90	7.99
硅酸铁	4.96	20.86
全铁	23.78	100.00

1.3 矿样粒度组成分析

对原矿进行粒度筛析,其分析结果见表3。分析结果表明,粗粒级(+0.10 mm或+0.15 mm)的铁品位普遍较低,如要在不磨矿的条件下提前获得部分合格精矿,则有必要经过筛分隔粗进行筛选。

表3 粒度筛析结果

Table 3 Granularity screening results

粒级/mm	产率/%		全铁品位/%		铁分布率/%
	个别	累积	个别	累积	
+0.154	7.31	100.00	17.53	23.78	5.39
−0.154~+0.10	19.15	92.69	18.77	24.33	15.11
−0.10~+0.074	15.08	73.54	20.88	25.75	13.24
−0.074~+0.043	26.87	58.46	23.85	27.01	26.94
−0.043~+0.038	5.54	31.59	24.71	29.61	5.76
−0.038~+0.030	7.08	26.05	28.54	30.64	8.49
−0.030	18.97	18.97	31.43	31.43	25.07
合计	100.00		23.78		100.00

1.4 原矿矿物组成

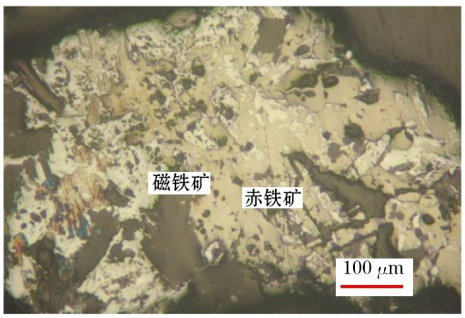
经研究,该矿石原矿物质组成如下。

(1) 金属矿物:磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿。

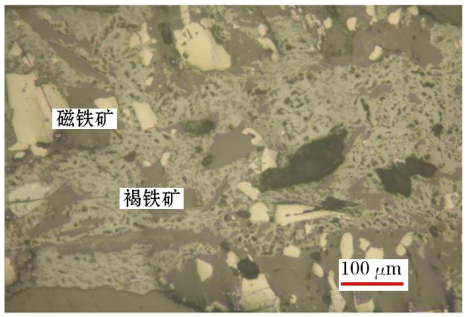
(2) 脉石矿物:石英、斜长石、普通角闪石、阳起石、黑云母、金云母、绿泥石、绿帘石、碳酸盐、黏土。

主要矿物嵌布特征见图1。铁尾矿具有颗粒较细的特点,易形成扬尘等环境问题,影响空气质量。若空气中颗粒物的浓度较大,将导致能见度降低,增加雾霾发生概率[33],对生态环境产生恶劣影响。此外,由于铁尾矿品位较低且选别困难,大量尾矿堆存在尾矿库或尾矿坝中,占用了大量土地资源。尾矿库的建设投资及定期修缮管理占用社会资源且消耗人力资源。同时,尾矿长期堆存在尾矿库与尾矿坝,

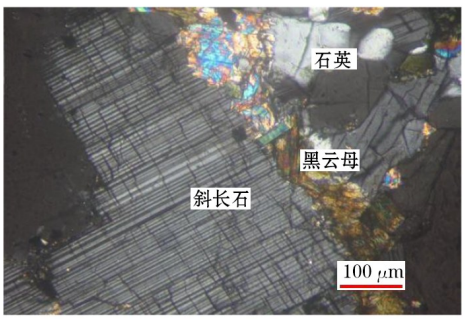
易造成溃坝等灾害,存在安全隐患,对周边居民的生命与财产安全造成威胁[34]。因此,本研究最终产生的尾矿可以作为水泥铁质校正剂使用,实现无尾排放。



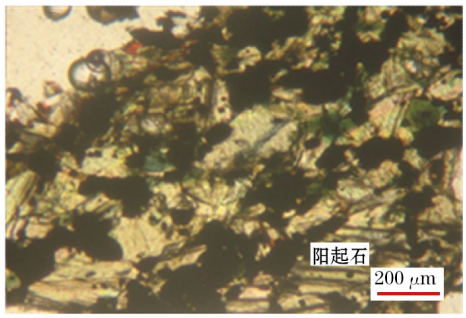
(a)磁铁矿与赤铁矿紧密连晶



(b)褐铁矿呈柱状与磁铁矿共生



(c)斜长石呈自形晶柱状与黑云母、石英等矿物共生



(d)阳起石呈自形晶柱状与铁矿物(黑色)紧密交生

图 1 原矿主要矿物嵌布特征

Fig.1 The main mineral dissemination characteristics of the raw ore

2 试验结果与讨论

根据该矿石的性质特点,本次试验对原矿分别进行筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺方案(方案Ⅰ)、筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺方案(方案Ⅱ)及筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺方案(方案Ⅲ)三个方案试验研究。

2.1 试验设备

试验所用主要设备为:LK-MVS 型振动筛、Φ400 mm×300 mm 圆筒中磁选机、Φ400 mm×300 mm 圆筒弱磁选机、XMQ 型 Φ350 mm×160 mm 锥型球磨机、XMQ-67 型 Φ240 mm×90 mm 锥型球磨机、Φ700 型螺旋溜槽、XCY-73 型 1 100 mm×500 mm 摇床、SLON 离心选矿机等。

2.2 筛分-选别试验

以 0.15 mm 筛孔尺寸筛下产品为对象,进行重选(螺旋溜槽)试验,试验矿浆质量浓度为 20%,试验流程为一次粗选、一次精选,中矿合并至尾矿,试验结果见表 4。

2.3 筛下产品重选(螺旋溜槽)试验

筛下产品进行重选(螺旋溜槽)验证试验,试验矿浆质量浓度为 20%,试验流程为一次粗选、一次精选,试验结果见表 5。

表 4 0.15 mm 筛孔尺寸筛下产品螺旋溜槽试验结果

Table 4 Results of spiral groove test under 0.15 mm sieve screen

筛孔尺寸/mm	产品名称	产率/%	全铁品位/%	铁回收率/%
0.15	精矿	8.72(对原矿 7.12%)	52.02	19.08
	尾矿	91.28	21.08	80.92
	给矿	100.00	23.78	100.00

表 5 筛下产品重选(螺旋溜槽)得精试验结果

Table 5 Reselection test results of the screening product (spiral chute)

产品名称	产率/%	全铁品位/%	铁回收率/%
精选精矿	8.63	52.08	18.90
精选尾矿	37.63	25.28	40.00
粗选精矿	46.26	30.28	58.90
粗选尾矿	53.74	18.19	41.10
给矿	100.00	23.78	100.00

由表5试验结果可知:筛下产品通过螺旋溜槽一粗一精可以获得产率8.63%(对原矿7.14%),铁品位52.08%的精矿。

2.4 筛上产品及筛下螺旋溜槽粗选尾矿磁选抛尾试验

将筛上产品及筛下螺旋溜槽粗选尾矿合并进行中磁抛尾验证试验,试验条件:磁场强度为318.47 kA/m,上升水量15 mL/s,试验结果见表6。

将筛上产品与螺旋粗选尾矿中磁抛尾后所得的精矿与螺旋精选所得中矿混合配样可以得到产率75.56%,铁品位22.78%的混合中矿。

表6 中磁抛尾验证试验结果

Table 6 Verification test results of medium magnetic tailings

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	mFe	TFe	mFe
精矿	71.98	20.69	12.67	77.31	97.13
尾矿	28.02	15.60	0.98	22.69	2.87
给矿	100.00	19.26	9.39	100.00	100.00

将上述数据计算得出筛分-筛下重选得精-筛上及螺粗尾中磁抛尾数质量流程(如图2所示)。

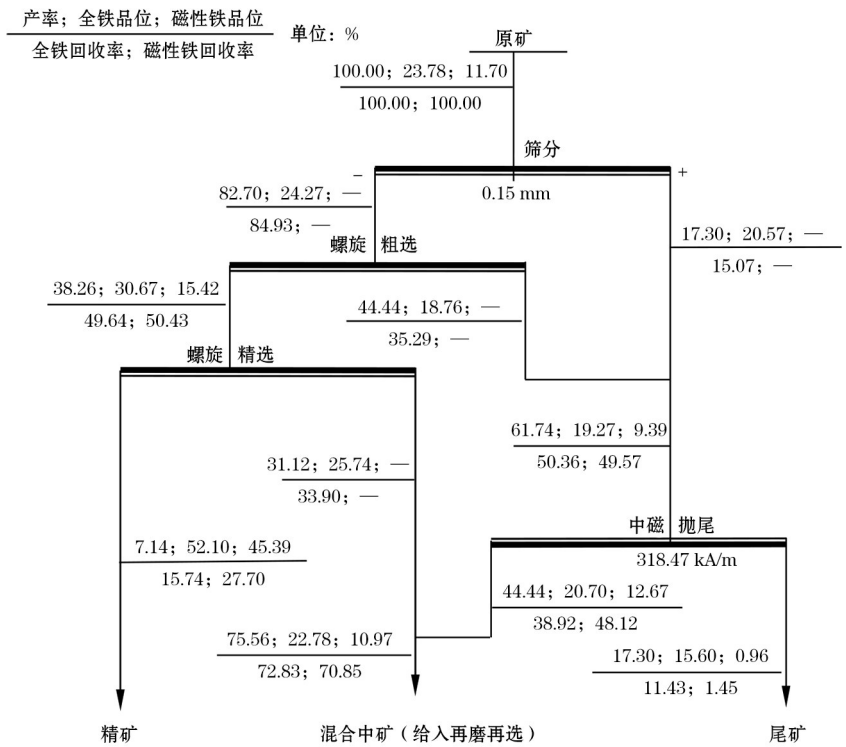


图2 筛分-筛下重选得精-筛上及螺粗尾中磁抛尾数质量流程

Fig.2 Number and quality process of screening-screening reselection-sieve and screw thick tailings in the magnetic tailings

3 不同试验方案讨论及分析

3.1 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺(方案Ⅰ)

3.1.1 中矿再磨度弱磁选得精试验

将图2混合中矿磨至不同粒度,进行弱磁选试验,弱磁选试验流程为一次粗选、一次精选,试验条件为粗选磁场强度159.24 kA/m;精选磁场强度95.54 kA/m;中矿并入尾矿,试验结果见图3。

图3试验结果得知,当磨矿细度达到-0.074 mm占99%(-0.043 mm占82%)时弱磁精矿铁品位只能达到44.79%,由此可见,该矿石再磨后采用弱磁选得精效果并不好。

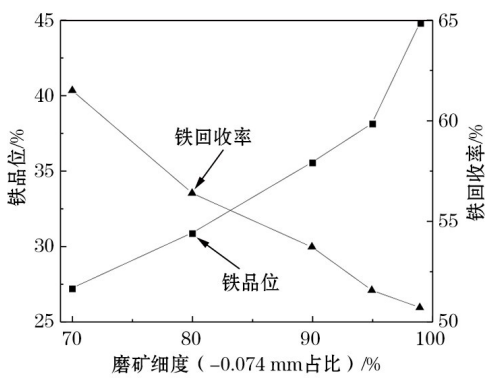


图3 不同磨矿细度弱磁选得精试验结果

Fig.3 Fine test results of weak magnetic separation with different grinding fineness

3.1.2 中矿再磨中磁抛尾试验

将磨矿细度为-0.074 mm 占 90%的混合中矿进行中磁抛尾验证试验,试验磁场强度为 318.47 kA/m,上升水量为 15 mL/s。试验结果见表 7。

表 7 混合中矿中磁抛尾验证试验结果

Table 7 Verification test results of magnetic tailings in mixed mine

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
精矿	56.03	29.63	72.88
尾矿	43.97	14.05	27.12
给矿	100.00	22.78	100.00

从表 7 可知,中矿再磨后经中磁抛尾可以获得产率 56.03%(对原矿样 42.34%),铁品位 29.63%的中磁精矿。

3.1.3 中磁精矿螺旋得精试验

将表 7 所得中磁精矿进行螺旋得精试验,试验流程为一粗一精,给矿浓度为 20%,试验结果见表 8。

表 8 再磨中磁精矿螺旋溜槽得精试验结果

Table 8 Refine test results of magnetic concentrate spiral chute

产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
精矿	15.33	48.83	25.38
精选尾矿	68.86	26.28	61.35
粗选精矿	84.19	30.39	86.73
粗选尾矿	15.81	24.76	13.27
给矿	100.00	29.50	100.00

表 8 表明,中磁精矿经螺旋溜槽一粗一精后可以获得产率 15.33%,铁品位 48.83%的重选精矿。

3.1.4 方案Ⅰ数质量流程

结合上述试验结果,计算得出筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺(方案Ⅰ)数质量流程,见图 4。

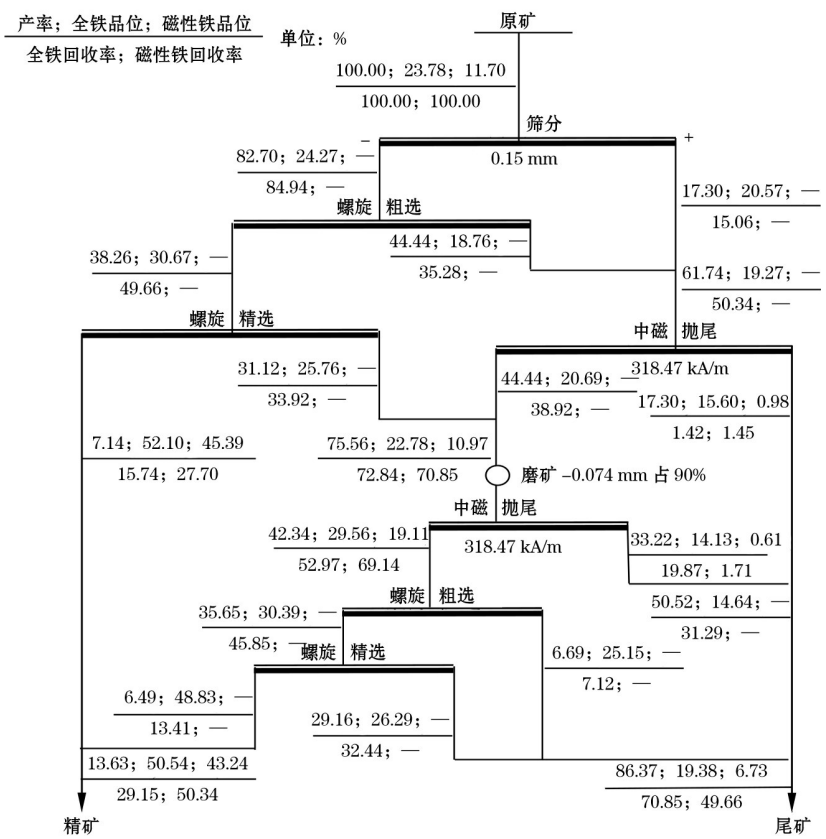


图 4 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺(方案Ⅰ)数质量流程

Fig.4 Number and quality process of screening-reseparation process-medium magnetic separation-grinding-medium magnetic separation-reseparation process (scheme Ⅰ)

3.2 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺(方案Ⅱ)

3.2.1 浮选药剂种类试验

以方案Ⅰ(表 7)中磁抛尾所得精矿进行捕收剂药剂种类试验。试验流程为一次粗选、一次精选,中矿并入尾矿,浮选粗选浓度为 25%,浮选时间为粗选 2.5 min,一次精选 2 min,试验条件及试验结果见表 9。

表 9 中磁精矿不同浮选捕收剂比较试验结果

Table 9 Comparative test results of different flotation traps in medium magnetic concentrate

药剂种类及用量	产品名称	产率/%	铁品位/%	铁回收率/%
粗选:NaOH 1 500 g/t,DF 1 000 g/t,CaO 300 g/t,MD 500 g/t;精选Ⅰ:MD 150 g/t;pH:10.1	浮选精矿	26.24	46.36	41.47
	浮选尾矿	73.76	23.28	58.53
	给矿	100.00	29.34	100.00
粗选:NaOH 1 500 g/t,DF 1 000 g/t,十二胺 600 g/t;精选Ⅰ:十二胺 200 g/t,pH:10.1	浮选精矿	26.98	47.31	43.21
	浮选尾矿	73.02	22.97	56.79
	给矿	100.00	29.54	100.00
粗选:430-1# 1 050 g/t;H_2SO_4 1 000 g/t;pH:6.4	浮选精矿	26.45	50.35	44.91
	浮选尾矿	73.55	22.21	55.09
	给矿	100.00	29.65	100.00

由表 9 可知,采用捕收剂 430-1# 酸性正浮选分选效果最好,可以获得精矿产率 26.45%、铁品位 50.35%的铁精矿,因此选择正浮选捕收剂 430-1# 作为磁选精矿浮选的捕收剂。

3.2.2 不同磨矿细度中磁精矿浮选试验

以表 6 试验所得中磁精矿为对象,进行不同磨矿细度浮选试验,固定试验条件为粗选(H_2SO_4 1 000 g/t),试验流程为一次粗选、一次精选,中矿并入尾矿,浮选粗选浓度为 25%,温度 30 ℃,浮选时间为粗选 2.5 min,精选 2 min,试验结果见图 5。

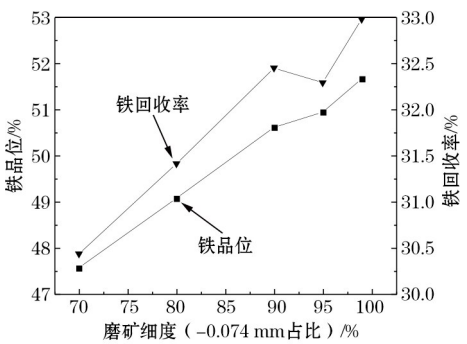


图 5 不同磨矿粒度中磁精矿浮选试验结果

Fig.5 Results of magnetic concentrate flotation under different grinding sizes

由图 5 可以看出:在浮选精矿产率相近的情况下,随着磨矿细度的增加,浮选精矿铁品位升高,铁回收率先增高,在磨矿细度为-0.074 mm 占 90%至 95%阶段降低。综合试验结果和磨矿成本,选择磨矿粒度为-0.074 mm 占 90%进行下一步选矿试验。

3.2.3 捕收剂用量试验

固定浮选浓度 25%、浮选温度 30 ℃、硫酸用量 1 000 g/t,改变捕收剂用量分别为 600 g/t、800 g/t、1 000 g/t、1 200 g/t 进行用量试验,试验流程为一次粗选、一次精选,试验结果见图 6。

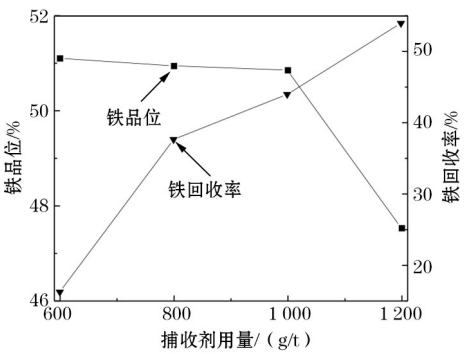


图 6 方案Ⅱ捕收剂用量试验结果

Fig.6 Test results of the capture dosage for scheme Ⅱ

图 6 表明,随着捕收剂用量的增加,铁品位降低。当捕收剂用量由 1 000 g/t 增加到 1 200 g/t 时,精矿铁品位迅速下降;当捕收剂用量降低至 1 000 g/t 以下时,精选掉槽现象加剧而铁品位上升不明显,因此选择捕收剂用量为 1 000 g/t。

3.2.4 硫酸用量试验

固定浮选浓度 25%、浮选温度 30 ℃、捕收剂用量 1 000 g/t,改变硫酸用量分别为 0 g/t、500 g/t、1 000 g/t、1 500 g/t 进行用量试验,试验流程为一次粗选、一次精选,试验结果见图 7。

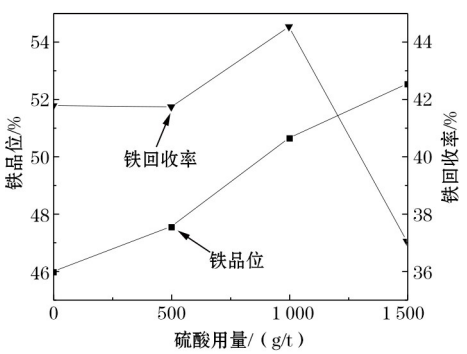


图 7 方案Ⅱ硫酸用量试验结果

Fig.7 Test results of sulfuric acid dosage for scheme Ⅱ

图 7 试验结果表明,随着硫酸用量的增加,铁品位升高。当硫酸用量高于 1 000 g/t 时,铁回收率骤降,并且当硫酸用量降低至 500 g/t 及以下时,分选效果变差,根据试验结果选择硫酸用量 1 000 g/t。

3.2.5 浮选浓度试验

固定浮选温度 30 ℃、捕收剂用量 1 000 g/t、硫酸用量 1 000 g/t,改变浮选浓度分别为 20%、25%、30%、35%进行试验,试验流程为一次粗选、一次精选,试验结果见图 8。

由图 8 可知,随着浮选浓度的升高,精矿品位下降而回收率上升,分选效果变差,但变化不明显。

3.2.6 方案Ⅱ数质量流程

由浮选闭路试验结果和前述试验结果综合计算得出筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺(方案Ⅱ)数质量流程,见图 9。

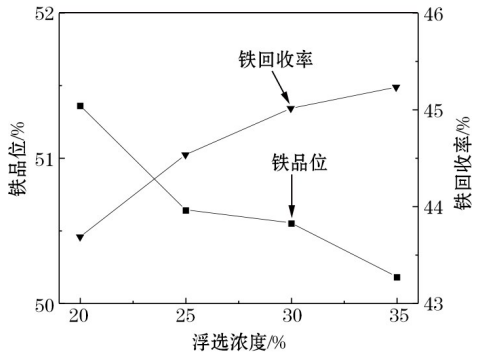


图 8 方案Ⅱ浮选浓度试验结果

Fig.8 Test results of the flotation concentration for scheme Ⅱ

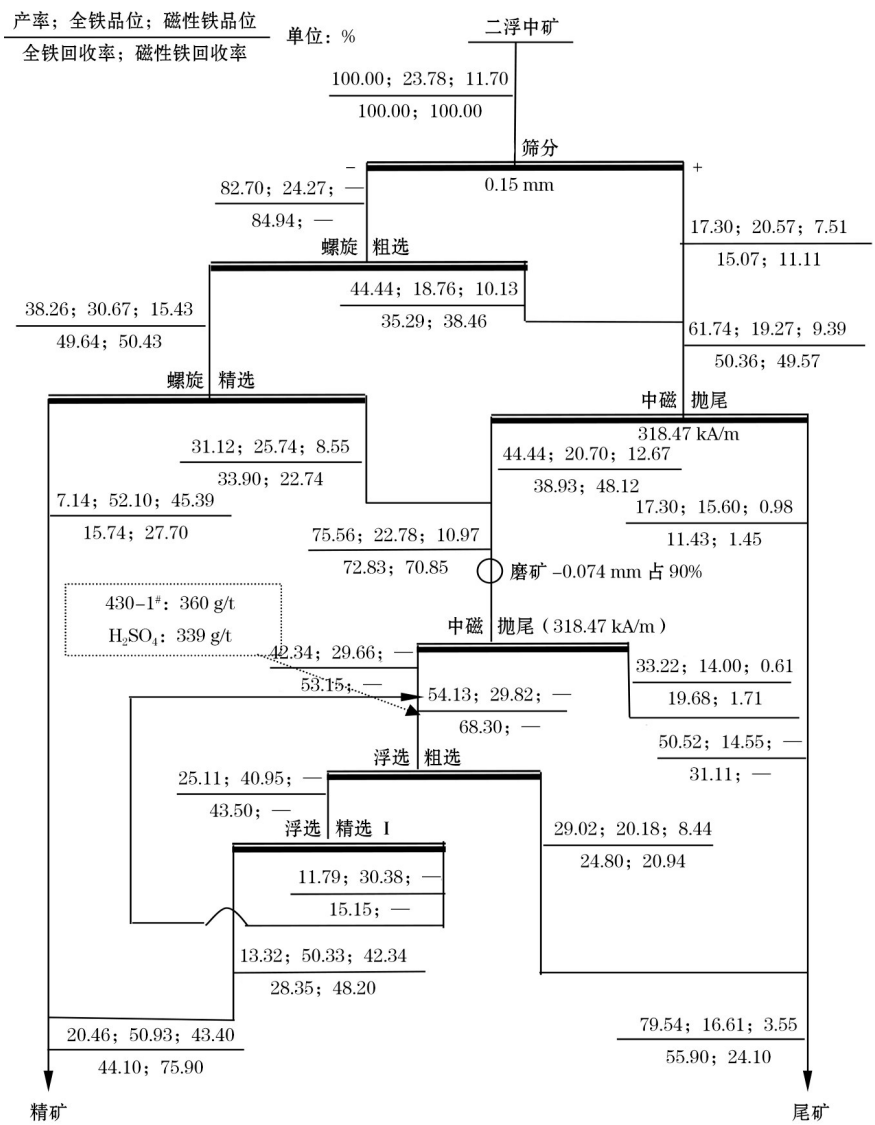


图 9 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺(方案Ⅱ)数质量流程

Fig.9 Number and quality process of screening-redressing refinement-mid-magnetic dressing-grinding-mid-magnetic dressing-flotation refinement process (Scheme Ⅱ)

3.3 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺(方案Ⅲ)

本试验方案在方案Ⅰ和方案Ⅱ的基础上进行,以方案Ⅰ再磨-中磁-螺旋溜槽尾矿为研究对象进行试验研究。

3.3.1 药剂用量试验

药剂用量试验在方案Ⅱ用量的基础上主要进行捕收剂用量试验,固定浮选浓度 25%、浮选温度 30 ℃、硫酸用量 1 000 g/t,改变捕收剂用量分别为 600 g/t、700 g/t、800 g/t、900 g/t 进行用量试验,试验流程为一次粗选、一次精选,试验结果见图 10。

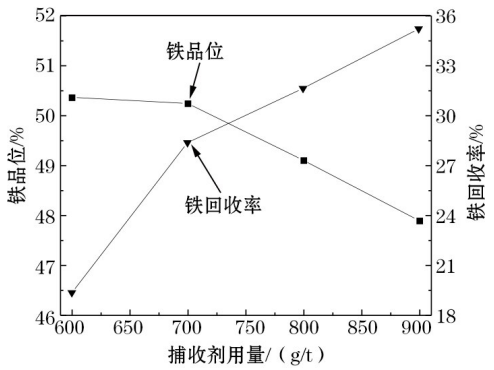


图 10 方案Ⅲ捕收剂用量试验结果

Fig.10 Test results of collector dosage for scheme Ⅲ

捕收用量试验结果表明,随着捕收剂用量的增加,精矿产率增加,铁品位降低,当捕收剂用量由 700 g/t 增加到 800 g/t 时,精矿铁品位下降速度加快;当捕收剂用量由 700 g/t 降低至 600 g/t 时,精选掉槽现象加剧而铁品位上升不明显,根据试验结果选择捕收剂用量为 700 g/t。

3.3.2 浮选闭路流程试验

闭路流程试验药剂用量及试验条件参照开路流程试验结果并进行了适当调整。由于开路试验第二次精选精矿铁品位提高幅度不大,所以在闭路试验中将第二次精选作业去掉;扫选降尾效果不明显,回收的扫选精矿品位也较低,因此在闭路试验时去掉扫选作业。闭路流程试验条件为捕收剂用量 600 g/t、硫酸用量 800 g/t,闭路试验结果与方案Ⅰ试验结果综合计算得出筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺(方案Ⅲ)数质量流程见图 11。

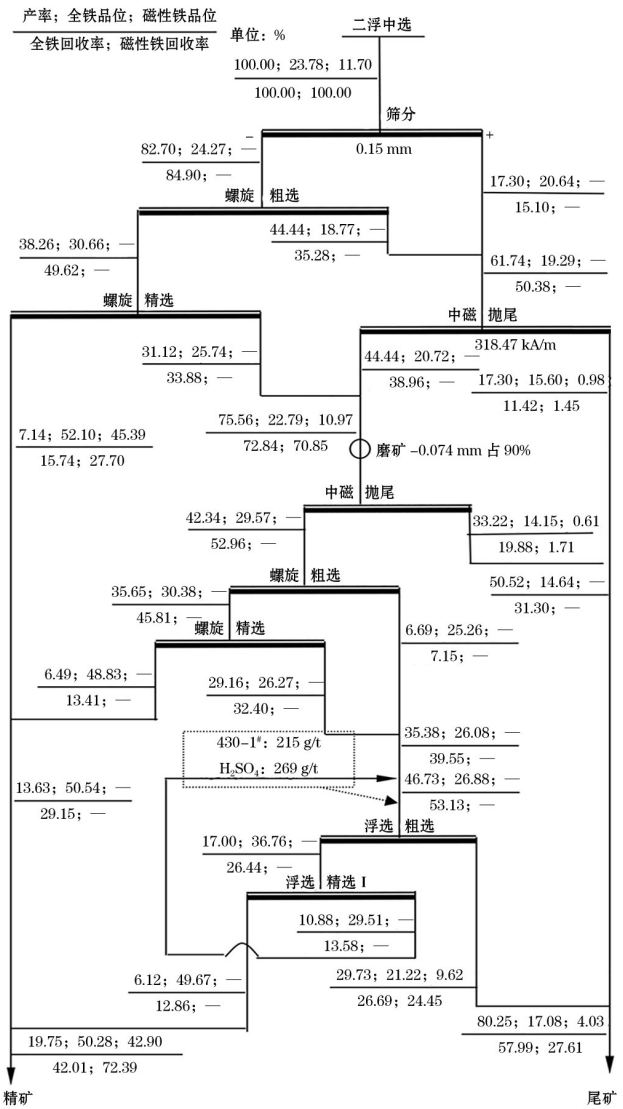


图 11 筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺(方案Ⅲ)数质量流程

Fig.11 Number and quality process of screening-reseparation precision-medium magnetic separation-grinding-medium magnetic separation-reseparation-heavy tail flotation precision process (Scheme Ⅲ)

3.4 小结

本研究对矿样主要展开了以下 3 种工艺流程方案的试验,包括筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺方案(方案Ⅰ);筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺方案(方案Ⅱ);筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺方案(方案Ⅲ)。

从试验结果可以看出:采用方案Ⅰ进行选别可以获得精矿产率为 13.63%、铁品位为 50.54%(mFe

为 43.24%)、铁回收率为 29.15%(mFe 为 50.34%)的选别指标;采用方案Ⅱ进行选别,可以获得精矿产率为 20.46%、铁品位为 50.93%(mFe 为 43.40%)、铁回收率为 44.10%(mFe 为 75.90%)的选别指标;采用方案Ⅲ进行选别,可以获得精矿产率为 19.75%、铁品位为 50.28%(mFe 为 42.90%)、铁回收率为 42.01%(mFe 为 72.39%)的选别指标。其中方案Ⅱ的选别指标最佳。

4 结论

(1) 本次试验给矿样为尾矿回收过程中产生的难选中矿,其解离度差,粗粒级铁品位低,因此通过细筛控制入选粒度是提前获得部分目标产品的前提条件。矿石性质研究结果表明:二浮中矿铁品位为 23.78%,主要可回收铁矿物为磁铁矿与假象赤铁矿,磁性铁含量为 11.70%;主要杂质为 SiO_2,含量达 51.59%。由于这些矿石中有用铁矿物嵌布粒度细且与磁性相对较强的硅酸铁矿物紧密共生,为获取较高品位的铁精矿,重选或浮选比磁选显示出明显的分选优势。

(2) 在磨矿前都能提前获得部分合格精矿,矿石经细筛、重选可以得到产率为 7.14%、铁品位为 52.08%的铁精矿。原矿的螺旋溜槽尾矿和筛上产品经中磁抛尾后磁性铁损失较小为 1.45%,在磨后采用中磁抛尾后磁性铁损失亦较小为 1.71%。

(3) 对试验矿样主要进行了筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精工艺(方案Ⅰ)、筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-浮选得精工艺(方案Ⅱ)及筛分-重选得精-中磁选-磨矿-中磁选-重选得精-重尾浮选得精工艺(方案Ⅲ)三个方案试验研究。其中方案Ⅱ的分选效果最佳,可以获得精矿产率为 20.46%、铁品位为 50.93%(mFe 为 43.40%)、铁回收率为 44.10%(mFe 为 75.90%)的选别指标。

(4) 最终结果表明,重选或浮选比磁选显示出明显的分选优势,可根据实际情况选择方案Ⅱ或方案Ⅲ。最终尾矿铁品位较高,可以作为水泥铁质校正剂使用,最终实现无尾排放。

参考文献(References):

[1] 冯永馨,陈雷超.中国西部地区铁矿资源状况及其主要特点[J].低碳世界,2016(23):84-85.
FENG Yongxin, CHEN Leichao. Iron ore resources in western China and their main characteristics[J]. Low Carbon World,2016(23):84-85.

[2] 韩跃新,高鹏,李艳军,等.我国铁矿资源"劣质能用、优质优用"发展战略研究[J].金属矿山,2016(12):2-8.
HAN Yuexin, GAO Peng, LI Yanjun, et al. Development strategies of available use of inferior quality and optimal use of high quality for domestic iron ore resources[J]. Metal Mine,2016(12):2-8.

[3] 张韶敏.承德地区某钒钛磁铁矿选铁尾矿回收铁、钛试验[J].现代矿业,2013(10):108-109.
ZHANG Shaomin. Test on recovery of iron and titanium from iron tailings of a vanadium-titanium magnetite ore in Chengde area[J]. Modern Mining,2013(10):108-109.

[4] 常凤,王来信.近十年中国生铁产量数据统计分析[J].天津冶金,2022(1):74-78.
CHANG Feng, WANG Laixin. Statistical analysis of pig iron production data in China in recent ten years[J]. Tianjin Metallurgy,2022(1):74-78.

[5] 梁艳涛,赵振兴.铁尾矿资源综合利用现状及意义[J].现代矿业,2020(11):156-157+162.
LIANG Yantao, ZHAO Zhenxing. Status and significance of comprehensive utilization of iron tailings resources[J]. Modern Mining,2020(11):156-157+162.

[6] 张杰西,赵斌,房彬.我国铁尾矿排放现状及综合利用研究[J].再生资源与循环经济,2015,8(9):29-32+44.
ZHANG Jiexi, ZHAO Bin, FANG Bin. Research on current situation and comprehensive utilization of iron ore tailings emissions in China[J]. Recyclable Resources and Circular Economy,2015,8(9):29-32+44.

[7] 杨亚东,刘新亮,张冰,等.铁尾矿资源综合利用现状研究[J].化工矿物与加工,2021,50(1):28-32.
YANG Yadong, LIU Xinliang, ZHANG Bing, et al. Research on status of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Industrial Minerals & Processing,2021,50(1):28-32.

[8] 刘俊杰,梁钰,曾宇,等.利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J].矿产综合利用,2020(5):136-141.
LIU Junjie, LIANG Yu, ZENG Yu, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2020(5):136-141.

[9] 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.
JIANG Jinghang, YE Guohua, HU Yibo, et al. The technology status and research progress of iron tailings re-beneficiation[J]. Mining and Metallurgy,2018,27(1):1-4.

[10] SAKTHIVEL R, VASU MATHI N, SAHU D, et al. Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings[J]. Powder Technology,2010,201(2):187-190.

[11] IRKECI A A, GUL A, BULUT G, et al. Recovery of Co, Ni, and Cu from the tailings of Divrigi iron ore concentrator [J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, 2006,27(2):131-141.

[12] LOTTERMOSER B G, ASHLETY P M. Trace element uptake by eleocharis equisetina(spike rush)in an abandoned acid mine tailings pond,northeastern Australia: implications for land and water reclamation in tropical regions [J]. Environmental Pollution,2011,159(10):3028-3035.

[13] 王海军,王伊杰,李文超,等.全国矿产资源节约与综合利用报告(2019)[M].北京:地质出版社,2020.
WANG Haijun, WANG Yijie, LI Wenchao, et al. The report of mineral resources saving & comprehensive utilization in China (2019) [M]. Beijing : Geological Publishing House,2020.

[14] 张锦瑞,王伟之,李富平,等.金属矿山尾矿资源化[M].北京:冶金工业出版社,2014.
ZHANG Jinrui, WANG Weizhi, LI Fuping, et al. Recycling of tailings from metal mines [M]. Beijing : Metallurgical Industry Press,2014.

[15] 卢宏建,王奕仁,李成合,等.金属矿露天坑与地下空区尾矿协同充填清洁生产[J].金属矿山,2020(5):137-143.
LU Hongjian, WANG Yiren, LI Chenghe, et al. Tailings synergetic filling cleaner production of open pit and underground goaf in metal mine[J]. Metal Mine,2020(5):137-143.

[16] 李峰,崔孝炜,胡哲哲,等.钼尾矿制备胶结充填材料的研究[J].非金属矿,2021,44(6):49-52.
LI Feng, CUI Xiaowei, HU Zhezhe, et al. Research on preparation of cemented backfilling materials using molybdenum tailings[J]. Non-Metallic Mines,2021,44(6):49-52.

[17] 杨玮,常东,龙涛,等.金尾矿资源化利用研究进展[J].矿产保护与利用,2023,43(3):168-178.
YANG Wei, CHANG Dong, LONG Tao, et al. Research progress on the resource utilization of gold tailings [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2023,43(3):168-178.

[18] 郭万进,吴明海,王阳,等.我国铜矿尾矿资源化利用技术现状及进展[J].矿产综合利用,2023,44(5):127-134.
GUO Wanjin, WU Minghai, WANG Yang, et al. Present situation and progress of resource utilization technology of copper tailings in China [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023,44(5):127-134.

[19] 陈燕清,雷满奇,廖幸锦.广西某含镉铅锌尾矿综合回收利用研究[J].矿产综合利用,2024,45(4):111-117.
CHEN Yanqing, LEI Manqi, LIAO Xingjin. Comprehensive recovery and utilization of a lead-zinc tailing containing cadmium in Guangxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(4):111-117.

[20] OKEWALE I A, GROBLER H. Mechanical behaviour and liquefaction susceptibility of tailings: a case of gold tailings [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(3): 1447-1456.

[21] YILMAZ E. Use of submarine tailings disposal as alternative tailings management system[J]. Minerals,2024,14(7):674.

[22] AKINYEMI B A, ALABA P A, RASHEDI A. Selected performance of alkali-activated mine tailings as cementitious composites: a review[J]. Journal of Building Engineering, 2022,50:104154.

[23] ALFONSO P, TOMASA O, GARCIA-VALLES M, et al. Glass-ceramic crystallization from tailings of the Morille tungsten deposit, Spain [J]. Materials Letters, 2022, 312:131694.

[24] SHAFOROSTOVA E N, KOSAREVA-VOLOD'KO O V, BELYANKINA O V, et al. A tailing dump as industrial deposit: study of the mineralogical composition of tailing dump of the Southern Urals and the possibility of tailings re-development[J]. Resources,2023,12(2):28.

[25] PELEVIN A. Assessment of the feasibility of additional processing of tailings obtained in the processing of ores of the Gusevogorskoye deposit[J]. Obogashchenie Rud,2023(1):38-45.

[26] KOUCHAM M, AIT-KHOUIA Y, SOULAIMANI S, et al. 3D geostatistical modeling and metallurgical investigation of Cu in tailings deposit: characterization and assessment of potential resources[J]. Minerals,2024,14(9):893.

[27] POCHITALKINA I A, TURAEV D Y. Integrated processing of phosphates and tailings[J]. Gornyi Zhurnal, 2024(4):45-50.

[28] 易龙生,米宏成,吴倩,等.中国尾矿资源综合利用现状[J].矿产保护与利用,2020,40(3):79-84.
YI Longsheng, MI Hongcheng, WU Qian, et al. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(3):79-84.

[29] 赵旭珍,尹丽丽,李纯乾,等.国外尾矿库生态恢复过程研究进展[J].水土保持应用技术,2021(5):40-42.
ZHAO Xuzhen, YIN Lili, LI Chunqian, et al. Research progress on ecological restoration process of tailings ponds in foreign countries [J]. Technology of Soil and Water Conservation,2021(5):40-42.

[30] 姚志鹏.双碳目标下钢铁企业发展面临的挑战与对策[J].企业改革与管理,2022(5):165-167.
YAO Zhipeng. Challenges and countermeasures for the development of iron and steel enterprises under the dual carbon target[J]. Enterprise Reform and Management,2022(5):165-167.

[31] 刘伟,陈铁军,展仁礼,等.酒钢尾矿铁及重晶石综合回收试验研究[J].矿产综合利用,2020(5):120-124.
LIU Wei, CHEN Tiejun, ZHAN Renli, et al. Experimental study on comprehensive recovery of iron and barite from tailings of Jiugang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2020(5):120-124.

[32] 王海霞,来有邦,张朔.某选矿厂铁尾矿综合利用试验研究[J].现代矿业,2022(1):176-178.
WANG Haixia, LAI Youbang, ZHANG Shuo. Experimental study on comprehensive utilization of iron tailings in a concentrator[J]. Modern Mining,2022(1):176-178.

[33] 王洪波,单晓刚,张柏进.辽宁省鞍本地区铁尾矿资源现状及其开发利用[J].地质找矿论丛,2005(增刊1):145-148.
WANG Hongbo, SHAN Xiaogang, ZHANG Baijin. Iron ore tailing resource situation and development in Anshan and Benxi of Liaoning province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005 (Suppl.1):145-148.

[34] 金家康,孙宝臣.浅谈铁尾矿综合利用的现状和问题[J].山西建筑,2008(14):26-27.
JIN Jiakang, SUN Baochen. Discussion on the current situation and problems of comprehensive utilization of iron ore tailings[J]. Shanxi Architecture,2008(14):26-27.