

# 酒钢悬浮焙烧磁铁矿选矿工艺优化研究<sup>①</sup>

高泽宾<sup>1</sup>, 王永刚<sup>1</sup>, 张丽丽<sup>2</sup>

(1.甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司,甘肃嘉峪关 735100; 2.酒钢集团技术中心,甘肃嘉峪关 735100)

**摘要:**对酒钢悬浮焙烧磁铁矿进行了磨矿-选矿工艺优化研究。采用110 mT低场强磁选机预提精、中矿再磨后采用磁选富集抛尾、富集精矿经阳离子反浮选,最终获得TFe品位60.06%、SiO<sub>2</sub>含量5.17%、金属回收率84.27%的综合精矿;与原工艺指标相比,精矿TFe品位提高了1.96个百分点,金属回收率提高了1.38个百分点, SiO<sub>2</sub>含量降低了1.06个百分点。

**关键词:**磁化焙烧;磨矿解离度;可磨度;磁选;阳离子反浮选;铁精矿;提铁降硅

中图分类号:TD92

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.015

文章编号:0253-6099(2024)03-0068-05

## Optimization of Beneficiation Process for JISCO's Magnetite from Suspension Magnetization Roasting

GAO Zebin<sup>1</sup>, WANG Yonggang<sup>1</sup>, ZHANG Lili<sup>2</sup>

(1. Hongxing Iron and Steel Co Ltd, JISCO, Jiayuguan 735100, Gansu, China; 2. Technology Center of Jiuquan Iron & Steel Group Limited Company, Jiayuguan 735100, Gansu, China)

**Abstract:** Based on the process mineralogy study, an experimental study on grinding-separation technique was performed for JISCO's magnetite obtained from its suspension magnetization roasting process. In the experiment, a 110 mT low-intensity magnetic separator was firstly adopted for pre-concentration. The middlings were reground and processed by magnetic separation for enrichment and tailings discarding, and the obtained concentrate was subjected to reverse cationic flotation. Finally, the whole process produced the comprehensive concentrate grading 60.06% TFe and containing 5.17% SiO<sub>2</sub>, with metal recovery of 84.27%. In comparison with the previous processing technique, the TFe grade of concentrate is improved by 1.96 percentage points and the metal recovery is increased by 1.38 percentage points, while the SiO<sub>2</sub> content falls by 1.06 percentage points.

**Key words:** magnetization roasting; liberation degree by grinding; grindability; magnetic separation; reverse cationic flotation; iron concentrate; iron improvement and silicon reduction

酒钢选矿厂采用一选和二选两个生产工序处理镜铁山式难选氧化铁矿石。一选工序1972年投产,规模650万吨/年;二选工序2013年投产,规模400万吨/年。两个生产工序均为块矿(15~100 mm)竖炉磁化焙烧-磁选-阳离子反浮选、粉矿(-15 mm)强磁选。2016年酒钢对二选粉矿工艺进行升级改造,建设了一条165万吨/年的悬浮磁化焙烧生产线,2018年3月开始热负荷试车,期间不断攻克“卡脖子”关键技术,生产线于2020年11月21日全线正式投入生产,取得巨大成功,悬浮磁化焙烧-磁选工艺所得精矿铁品位55.0%,精矿中SiO<sub>2</sub>含量11.5%,金属回收率90%,精

矿品位和回收率均达到设计指标。与强磁选指标相比,精矿品位提高了12个百分点、金属回收率提高了21个百分点。酒钢悬浮磁化焙烧工艺的成功研发及应用为酒钢提高资源利用效率、破解资源短板难题提供了示范。

悬浮焙烧工艺清洁环保、智能化程度及劳动生产率高、操作劳动强度低,酒钢选矿厂“十四五规划及远景目标”是以悬浮磁化焙烧工艺淘汰块矿竖炉和粉矿强磁选工艺。高炉炼铁实践表明,入炉品位每提高1个百分点,燃料比降低1.5%~2%、产量提高3%,因此精料炼铁是钢铁企业降本增效长期贯彻的基本方

① 收稿日期:2023-11-26

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QB002)

作者简介:高泽宾(1970—),男,甘肃金昌人,高级工程师,主要从事选矿经营管理及工艺技术研究工作。E-mail:gaozebin@jiugang.com

针。国内外同行业精矿铁品位一般可达到 65%, 精矿中  $\text{SiO}_2$  含量 5% 以下, 因此悬浮磁化焙烧工艺虽然解决了酒钢难选铁矿资源的高效利用, 但精矿中  $\text{SiO}_2$  含量较高, 精矿品质仍然较差, 不利于降低铁水成本及稳定高炉顺行。本文对酒钢悬浮焙烧磁铁矿开展了选矿工艺优化研究, 以期提高精矿品质。

## 1 原矿性质

酒钢悬浮焙烧矿化学多元素分析结果见表 1, 矿物组成见表 2。由表 1 可知, 悬浮磁化焙烧矿 TFe 品位 46.01%、MFe 品位 42.49%; 杂质以  $\text{SiO}_2$  为主, S 及碱金属氧化物含量较高。由表 2 可知, 原矿中主要铁矿物为磁铁矿和磁赤铁矿, 同时含有赤铁矿、褐铁矿和磁黄铁矿, 脉石矿物以石英、方解石和绢云母为主。

表 1 悬浮磁化焙烧矿化学多元素分析结果(质量分数) %

TFe	MFe	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$
46.01	42.49	18.74	4.09	1.853	3.908	0.066
$\text{K}_2\text{O}$	P	S	MnO	$\text{TiO}_2$	BaO	ZnO
0.714	0.020	0.647	1.551	0.181	1.223	0.044

表 2 悬浮磁化焙烧矿物组成(质量分数) %

磁铁矿	磁赤铁矿	赤铁矿	褐铁矿	磁黄铁矿	黄铁矿	石英	方解石	绢云母
34	27	5	2	1	微量	22	4	5

采用点测法测定磁铁矿嵌布粒度分布情况, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 磁铁矿粗细不均匀嵌布, 总体粒度偏细。要实现磁铁矿的单体解离, 理论上需细磨至  $-0.038 \text{ mm}$ 。

表 3 磁铁矿嵌布粒度分布

粒度/mm	比粒径	颗粒数	产率/%	累计产率/%
-0.140+0.105	225	6	11.92	11.92
-0.105+0.074	121	18	19.24	31.16
-0.074+0.053	49	35	15.15	46.31
-0.053+0.038	25	72	15.90	62.21
-0.038+0.015	16	180	25.43	87.64
-0.015	4	350	12.36	100.00

采用激光粒度仪分析了磨矿产品细度, 并采用偏反光显微镜观察、统计磨矿产品的单体及连生体, 计算了解离度, 结果见表 4。由表 4 可知, 磨矿细度  $-30 \mu\text{m}$  粒度含量达到 92.6% 时, 矿物单体解离度方可达到 95%。

表 4 磁铁矿单体解离度分析结果

$-30 \mu\text{m}$ 粒度含量/%	解离度/%
80.3	84.7
89.3	92.8
92.6	95.0
94.8	96.3

## 2 焙烧矿磨选工艺存在的问题

近年来, 镜铁山矿 14 线以西开采力度逐年增大, 由于西 II 矿体断层发育, 矿石中夹层增加, 有闪长岩侵入造成矿石品位降低,  $\text{SiO}_2$  含量升高, 嵌布粒度变细。工艺矿物学研究结果表明, 焙烧矿需细磨至  $-30 \mu\text{m}$  粒度占 92.6% 时矿物单体解离度方可达到 95%。而目前磨矿细度为  $-48 \mu\text{m}$  粒度含量 95%, 矿物单体解离度 85% 左右, 矿物单体解离不充分导致磁选精矿 TFe 品位仅 53%~55%, 精矿  $\text{SiO}_2$  含量高达 11%~12%, 磁选精矿反浮选后精矿 TFe 品位只能达到 58.00%、 $\text{SiO}_2$  含量约 6.25%。其次, 焙烧磁铁矿亲水性强, 矿物内孔隙、裂隙多, 过滤困难已为行业内共识。而精矿粒度变细, 过滤脱水难度进一步增大。再者, 悬浮焙烧工艺淘汰粉矿强磁选工艺后, 提精降杂若全部采用阳离子反浮选工艺, 其中泡沫带来的问题也会更加凸显。

## 3 悬浮焙烧矿选矿工艺优化研究

基于镜铁山矿粗细不均匀嵌布的禀赋特性, 为提高焙烧矿选矿工艺经济技术指标、提高资源利用率、改善细磨后焙烧精矿过滤工况, 开展了选矿工艺优化研究工作。

### 3.1 不同磨矿设备磨矿功效研究

实验室球磨机、立磨机以及艾萨磨机的容积及工作参数均不同, 为了有效对比各磨矿设备的磨矿功效, 采用绝对可磨度<sup>[1-3]</sup>来表征各磨矿设备的磨矿功效。绝对可磨度高, 说明粉磨单位质量物料至产品合格时的电耗越高。

采用 RS485 三相四线多功能电能仪表测量磨矿电耗, 采用秒表记录磨矿时间, 采用激光粒度仪检测磨矿产品粒度。依据磨机加料量、磨矿功率、磨矿时间可计算不同磨矿设备处理单位质量物料的电耗:

$$W = w \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

式中  $W$  为测得的单位耗电量,  $\text{kWh/t}$ ;  $w$  为绝对可磨度,  $\text{kWh/t}$ ;  $P$  为产品可 80% 通过的粒度, 这里  $P=20.43 \mu\text{m}$ , 相当于磨矿细度  $-30 \mu\text{m}$  粒度占 92.58%;  $F$  为给矿可 80% 通过的粒度, 这里  $F=175.21 \mu\text{m}$ 。

计算得到不同磨矿设备绝对可磨度如表 5 所示。

表5数据表明,在 $F_{80} = 175.21 \mu\text{m}$ 、 $P_{80} = 20.43 \mu\text{m}$ 条件下,细磨时艾萨磨磨矿功效最高,其次为立磨机,球磨机磨矿功效最低。

表5 不同磨矿设备的磨矿功效

磨矿设备	绝对可磨度/ ( $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ )	功率/kW		单位耗电量/ ( $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ )	磨矿效率/ [ $\text{kg} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ]
		空载	负载		
球磨机	269.74	0.4	0.59	393	2.05
立磨机	70.70	0.4	0.85	103	4.07
艾萨磨机	1.67	0.15	0.27	2.43	243.23

### 3.2 磁选预提精试验研究

#### 3.2.1 预提精磁选场强确定

生产现场使用半逆流型磁选机,磁系扫选区场强250~300 mT、精选区场强约180 mT、卸矿区场强约150 mT。试验室以TFe品位54.50%、-48  $\mu\text{m}$  粒级占95%的悬浮焙烧三磁精矿为原料,采用电磁滚筒磁选机对原料脱磁后进行三段磁选,磁场强度为180 mT、分选浓度30%,磁选提精数质量流程见图1。从图1可知,磁选提精所得精矿TFe品位55.85%,尾矿TFe品位14.18%,作业回收率99.16%。经检测,精矿中 $\text{SiO}_2$ 含量10.45%。由此可知,在入选细度-48  $\mu\text{m}$  粒级占95%时,磁选作业难以分选得到高品质精矿。

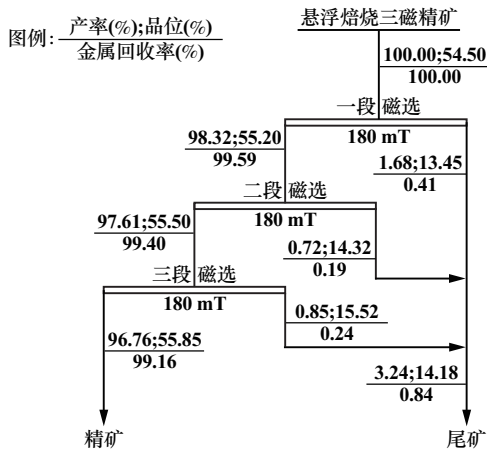


图1 磁场强度 180 mT 磁选提精试验数质量流程

磁场场强110 mT,其他条件不变,磁选提精数质量流程见图2。从图2可知,悬浮焙烧三磁精矿磁选提精所得精矿TFe品位60.20%,尾矿TFe品位42.50%,作业回收率74.89%。经检测,精矿中 $\text{SiO}_2$ 含量5.23%。可见,磁选机场强110 mT时磁选可以获得高品质精矿,但尾矿品位不合格,需对该部分尾矿(以下称中矿)进行再选。

#### 3.2.2 中矿磁选富集试验

中矿浓度很低,采用350 mT中场强磁选机浓缩后TFe品位达到43.18%,再磨至-37  $\mu\text{m}$  粒级占95%。采用

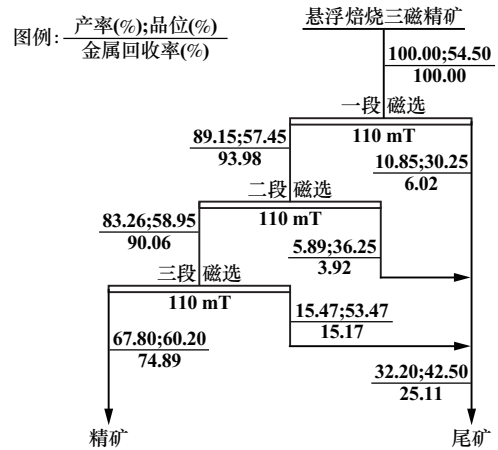


图2 磁场强度 110 mT 磁选提精试验数质量流程

电磁滚筒磁选机,在磁场强度260 mT条件下进行中矿磁选富集试验,试验数质量流程见图3。从图3可以看出,经过三段磁选,可以抛去作业产率27.57%的合格尾矿,精矿TFe品位达到54.80%。

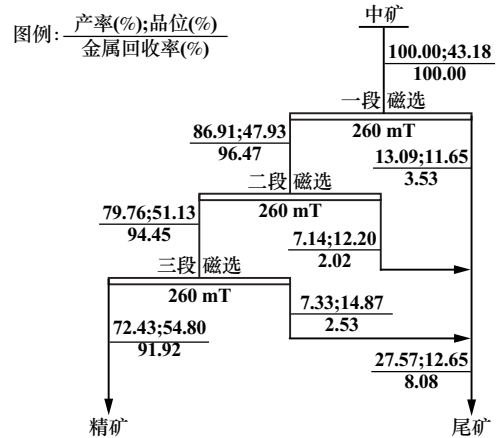


图3 中矿富集磁选试验数质量流程

#### 3.2.3 富集精矿反浮选试验

酒钢阳离子反浮选工艺于2007年投产,经过多年生产实践,确定了行之有效的药剂制度:捕收剂用量(150±50) g/t(精选段用量为粗选段的一半),玉米淀粉用量(150±100) g/t,硫酸用量1500~2500 g/t(粗选段与精选段用量相同,实际用量以确保pH值8.8~9.6为宜)。结合酒钢生产现场工艺流程及药剂制度,采用一粗一精四扫闭路浮选流程,对磁选富集精矿进行了试验室反浮选试验,试验数质量流程见图4。闭路浮选精矿TFe品位59.60%、尾矿TFe品位21.65%、作业回收率95.00%、精矿中 $\text{SiO}_2$ 含量4.98%。

### 3.3 工艺优化前后流程及指标对比

酒钢选矿厂工艺优化前后选矿流程及指标对比情况分别见图5和表6。优化前采用立式搅拌磨机对焙砂粗精矿细磨至-48  $\mu\text{m}$  粒级占95%,经三段磁选

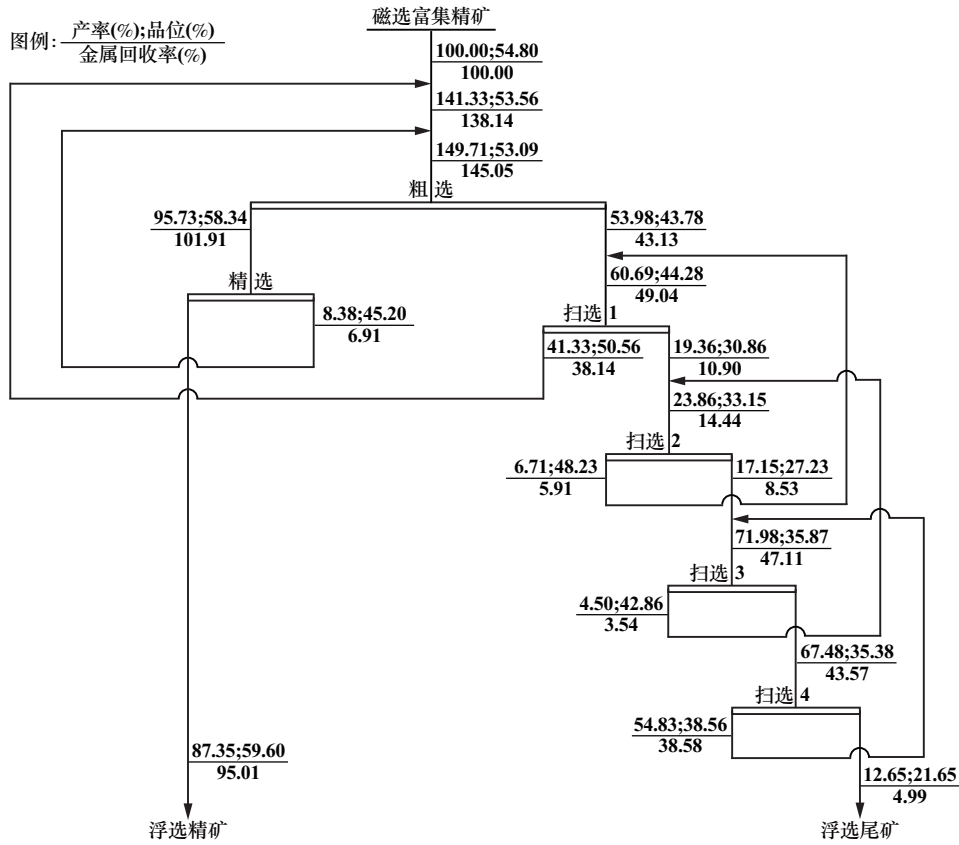
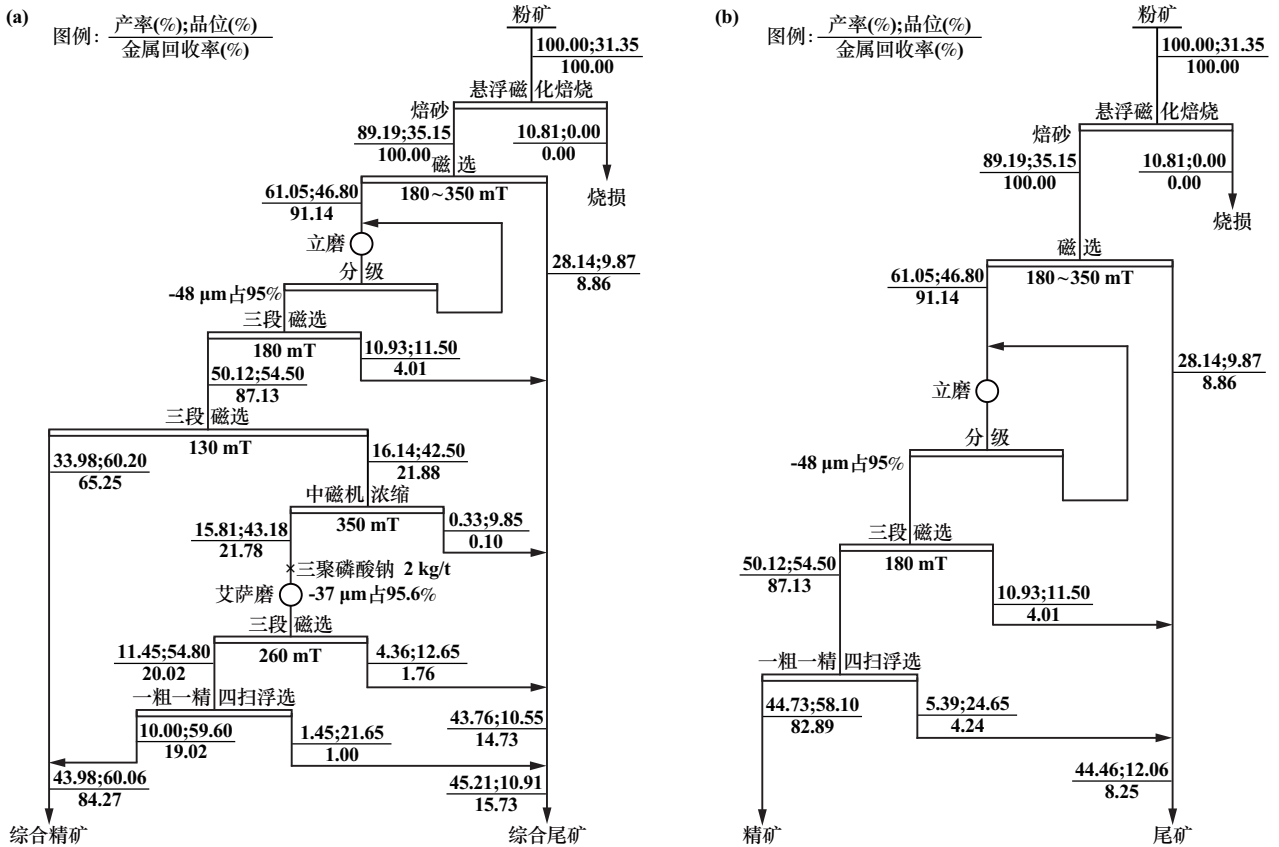


图4 浮选闭路试验数质量流程



(a) 优化后; (b) 优化前

图5 悬浮焙烧磁铁矿选矿工艺优化前后流程及指标对比

表6 工艺优化前后指标对比

工艺	精矿产率/%	精矿品位/%		金属回收率/%
		TFe	SiO <sub>2</sub>	
优化前	44.73	58.10	6.23	82.89
优化后	43.98	60.06	5.17	84.27

抛尾、磁选精矿一粗一精四扫反浮选工艺,精矿 TFe 品位 58.10%、精矿中 SiO<sub>2</sub> 含量 6.23%、金属回收率 82.89%。优化后采用 110 mT 低场强磁选机对悬浮三磁精矿进行三段磁选,提前获得合格精矿,中矿采用中场强磁选机浓缩后再磨至-37 μm 粒级占 95%,采用 260 mT 弱磁选机经三段磁选富集抛去合格尾矿,以 TFe 品位 54.80% 的粗精矿给入浮选,最终精矿 TFe 品位 60.06%、SiO<sub>2</sub> 含量 5.17%、金属回收率 84.27%。优化后精矿 TFe 品位提高了 1.96 个百分点、金属回收率提高了 1.38 个百分点、SiO<sub>2</sub> 含量降低了 1.06 个百分点。

## 4 结 论

1) 工艺矿物学研究结果表明,酒钢悬浮焙烧磁铁矿矿物嵌布粒度粗细不均,整体偏细,磨矿细度-30 μm 粒级含量达到 92.6%,矿物单体解离度方可达到 95%。

(上接第 67 页)

修正励磁电流值稳定,波动幅度±0.3 A。精准控制励磁电流后,所产生的励磁磁场强度稳定在一定范围内。由于设备为弱磁性分选设备,分选中的磁场强度大多数为 0.1~0.2 T,一旦磁场强度波动超过 0.01 T,被分选矿物中的弱磁性连生体和一部分磁性矿物会被短暂释放,导致设备运行稳定性变差,发生跑尾情况。所以精准控制励磁电流对稳定分选指标具有重要意义。

### 4.2 自动运行程序

设备运行过程中对矿石性质和矿量波动要有较好的自我修正能力,特别是低品位岩矿,因其为废弃的岩石矿物,入磨品位无法精准控制,在磨选作业后段品位和矿量常有波动情况发生。这对磁悬浮精选机控制系统提出了很高的自我调整要求。针对矿量波动,系统会通过改变设备排矿阀门和给水量,在 1 min 内迅速做出自我修复,调整给料量变化带来的系统波动。矿石性质变化时,经控制系统本身的传感器探测,经过一段时间累计叠加计算,判定矿石性质已经发生变化后,可通过改变分选水量和调整动态磁场来进行修复。

### 4.3 远程互联技术

设备的控制系统具有远程物联网技术的通讯模块单元,可以实时地将运行数据传递到公司本部的远程集控中心。远程集控中心通过收集和分析数据,定期

2) 试验室研究表明,球磨机绝对可磨度为 269.74 kWh/t,立磨机绝对可磨度为 70.70 kWh/t,艾萨磨机绝对可磨度为 1.67 kWh/t,细磨时艾萨磨磨矿功效最高,其次为立磨机。

3) 工艺优化前,精矿 TFe 品位 58.10%、SiO<sub>2</sub> 含量 6.23%、金属回收率 82.89%;工艺优化后,采用 110 mT 低场强磁选机预先提精、中矿再磨再选的提质降杂工艺,最终精矿 TFe 品位 60.06%、SiO<sub>2</sub> 含量 5.17%、金属回收率 84.27%,精矿 TFe 品位提高了 1.96 个百分点、金属回收率提高了 1.38 个百分点、SiO<sub>2</sub> 含量降低了 1.06 个百分点。

## 参考文献:

- [1] 孙传尧. 选矿工程师手册(第2册). 北京:冶金工业出版社, 2015.
- [2] 余永富,余侃萍,陈雯. 国外部分选矿厂介绍及细粒级磨机的应用对比[J]. 矿冶工程, 2011(5):26-31.
- [3] 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.

引用本文:高泽宾,王永刚,张丽丽. 酒钢悬浮焙烧磁铁矿选矿工艺优化研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):68-72.

与远程站点进行运维提醒和数据分析交流。现场实时地与远程控制中心进行互动交流,拉近了设备使用客户和设备厂家之间的沟通距离,设备可以更好地服务于客户,保持良好的运行状态。

## 5 结 论

从低品位含铁岩矿矿物分析和前期生产工艺研究两个方面着手解决生产中磨矿细度较细且无法达到精矿品位的现状,调整了工艺流程,新增全自动磁悬浮精选机进行分级和提升品位,起到了降低磨矿细度和提高品位的双重作用。根据矿石特性针对性地研发了用于分选的全自动磁悬浮精选机,调整设备分选结构,并在实际应用过程中升级和提高设备控制系统,提高设备分选性能和稳定性,适应矿石变化和矿量波动带来的影响,取得了良好的分选效果。

## 参考文献:

- [1] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2001.
- [2] 廖长初. S7-1200 PLC 编程与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2021.

引用本文:朱东方,郑德亮,徐家林. 低品位岩矿分选工艺改进研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):65-67.