

CCT-A永磁筒式高梯度磁选机在李楼铁矿的 试验研究与应用^①

常文利

(五矿矿业(安徽)工程设计有限公司, 安徽 合肥 230091)

摘要: 针对安徽李楼铁矿生产现场存在的一段强磁选尾矿铁品位偏高、金属量流失严重的问题,开展 CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机试验研究,现场采用 CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机代替原一段强磁选前的弱磁选机,将一粗一扫强磁选流程优化为一粗两扫强磁选流程,项目实施后,强磁性矿物和弱磁性矿物均得到有效回收,一段扫选尾矿铁品位降低约 1 个百分点,年多回收铁精矿近 4 万 t,经济效益显著。

关键词: 镜铁矿; 磁选; 永磁筒式高梯度磁选机; 磁场强度; 流程优化; 品位; 铁尾矿

中图分类号: TD924

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.017

文章编号: 0253-6099(2025)05-0098-06

Experimental Research and Application of CCT-A High-Gradient Permanent Magnetic Drum Separator in Lilou Iron Mine

CHANG Wenli

(Minmetals Mining (Anhui) Engineering Design Co., Ltd., Hefei 230091, Anhui, China)

Abstract: An experimental study was carried out to address problems of higher grade of iron in the tailings from 1st-stage high intensity magnetic separation (HIMS) and higher metal losses in the production of Lilou Iron Mine in Anhui Province. In the study, the low-intensity magnetic separator (LIMS) used before 1st-stage HIMS was replaced with a CCT-A high-gradient permanent magnetic drum separator, and the HIMS process consisting of one roughing and one scavenging was optimized to a HIMS process consisting of one roughing and two scavenging. With these measures, both strongly and weakly magnetic minerals can be effectively recovered. The 1st-stage scavenging tailings have the iron grade decreased by around 1 percentage point, and nearly 40 000 tons of iron concentrate can be recovered annually, which can bring remarkable economic benefits to the mine.

Key words: specularite; magnetic separation; high-gradient permanent magnetic drum separator; magnetic field intensity; process optimization; grade; iron tailings

李楼铁矿位于安徽省西部霍邱县冯井镇,隶属中国五矿旗下五矿矿业控股有限公司。矿山设计规模 500 万 t/a,于 2012 年 12 月通过国家相关部门组织的安全设施竣工验收,正式投入生产。2022 年度期末保有地质资源储量 26 432 万 t,平均地质品位(TFe) 35.31%,矿物主要成分为镜铁矿。

多年来,经过不断优化选矿工艺流程和技术指标^[1],综合尾矿铁品位仍在 10.8%左右,高于设计指标 10.37%。在实际生产中,一段强磁选扫选尾矿占总尾

矿产率的 70%以上,该部分尾矿铁品位偏高,尾矿中金属量流失大,导致综合尾矿品位偏高。为降低一段强磁选尾矿铁品位、提高铁金属回收率,开展新型高效磁选设备研究与应用十分必要。

1 原矿性质

李楼铁矿矿石的矿物种类较简单,以镜铁矿为主^[2],次为假象赤铁矿,此外还可见少量磁铁矿及褐铁矿,其中镜铁矿常呈板片状或针状以中等稠密、稀

① 收稿日期: 2025-04-11

作者简介: 常文利(1975—),男,内蒙古呼和浩特人,高级工程师,主要从事选矿技术和选矿设计工作。E-mail:627488426@qq.com

疏~星散浸染条带状嵌布在石英和铁白云石的边缘、粒间,且普遍以铁矿物的贫连生体形式产出,粒度 0.05~0.6 mm,少数细小者粒度小于 0.02 mm。脉石矿物以石英为主,次为白云石、绿泥石和云母等。

对生产现场一段磨矿溢流样品进行铁物相分析和粒度分析,结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 铁物相分析结果

Table 1 Iron phase analysis results

铁物相	含量/%	分布率/%
磁铁矿中铁	0.12	0.37
赤(褐)铁矿中铁	31.33	96.82
碳酸盐中铁	0.50	1.55
硫化物中铁	痕量	痕量
硅酸盐中铁	0.41	1.27
合计	32.36	100.00

表 2 粒度分析结果

Table 2 Particle size analysis results

粒级/mm	产率/%		铁品位/%		分布率/%	
	个别	累计	个别	累计	个别	累计
+0.18	18.92	100.00	18.59	32.14	10.94	100.00
-0.18+0.075	32.57	81.08	34.89	35.30	35.36	89.06
-0.075+0.045	16.29	48.51	37.54	35.57	19.02	53.70
-0.045+0.025	8.45	32.22	37.56	34.58	9.89	34.67
-0.025	23.77	23.77	33.52	33.52	24.79	24.79
合计	100.00		32.14		100.00	

由表 1~2 可以看出:样品中铁矿物大部分为弱磁性的赤(褐)铁矿,分布率为 96.82%,磁性铁分布率为 0.37%,碳酸盐、硅酸盐中铁含量均较低,需要通过强磁选回收弱磁性铁矿物;样品粒度分布不均,0.045~0.18 mm 粒级产率为 48.86%,适合强磁选回收;而 -0.025 mm 粒级产率高达 23.77%,分布率为 24.79%,这部分铁矿物很难通过强磁选工艺完全回收。

2 存在的问题及改造方案

2.1 原选矿工艺介绍

目前,选矿厂入选矿石量为 540 万 t/a,入选原矿品位 32.8%,铁精矿品位 64.50%,尾矿品位 10.8%,铁回收率 80%~81%。

选矿厂原选矿工艺包括以下几个部分。

破碎:三段一闭路破碎流程,其中粗碎布置在井下。

磨矿分级:两段阶段磨矿-闭路分级流程。

选矿:弱磁选-强磁选、重选、反浮选流程。其中磁选设置在磨矿分级之后,每段均为弱磁选+强磁选粗选+强磁选扫选;重选作业包括一段强磁选粗选精矿

重选和二段磨矿排矿产品分级沉砂重选;中矿给入二段磨矿分级系统后进入反浮选作业,反浮选包括一粗一精三扫作业。

选矿厂原选矿工艺流程见图 1,综合尾矿指标见表 3。

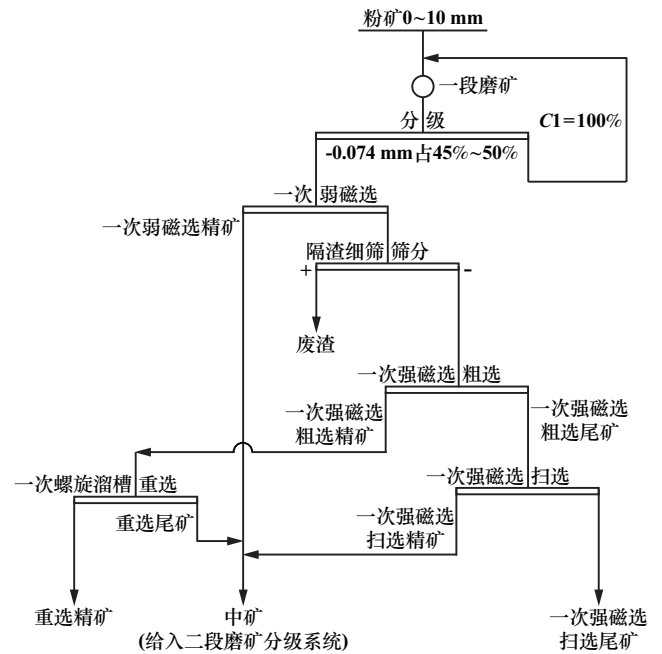


图 1 选矿厂原选矿工艺流程

Fig. 1 Existing mineral processing flowchart for concentrator

表 3 综合尾矿指标

Table 3 Comprehensive tailings indicators

产品名称	产率/%	TFe 品位/%	分配率/%
强磁选粗选尾矿	42.6	9.0	70.0
强磁选扫选尾矿	12.5	11.0	20.5
浮选尾矿	5.8	23.6	9.5
综合尾矿	60.8	10.8	100.0

2.2 原选别系统存在的问题

一段磨矿分级溢流矿浆泵送至选别工序,生产现场采用弱磁选-强磁选-重选提精-强磁选扫选工艺流程,主要工艺设备配置共 12 个系列,其中弱磁选作业采用 CTB1230 永磁筒式弱磁选机,强磁选均采用 $\Phi 2$ m 电磁立环脉动高梯度磁选机。弱磁选的目的是提前分出强磁性矿物、减少强磁性矿物对后续强磁选的影响。

自生产以来,弱磁选作业选别效果差,同时镜铁矿原矿中磁性铁含量不足 0.5%,弱磁选作业精矿产率极低,弱磁选精矿卸矿困难,跟随滚筒重复选别,造成弱磁选机槽体及卸矿挡板处强磁性矿物淤积板结,进一步恶化选别效果。因强磁性矿物得不到有效分选,进入后续强磁选作业,造成强磁选机磁团聚现象加剧,强

磁选机精矿斗、精矿斜斗、给矿轭铁淤堵频繁,介质盒堵塞严重,影响选矿指标。另一方面,随着选矿厂入选矿石总量增加,强磁选机长期处于高负荷运行状态,在磁性矿物的不利影响下,设备选别效率难以保持良好状态。目前,一段强磁选粗选及一段强磁选扫选使用的 $\Phi 2$ m 电磁立环脉动高梯度磁选机实际磁场强度均为最高值 1.0 T,但一段强磁选扫选尾矿品位仍高达 9% 左右,金属量流失严重,造成综合尾矿品位居高不下。

2.3 改造方案

李楼铁矿入选原矿中主要含铁矿物为镜铁矿,强磁性矿物磁铁矿含量很低,想要提高现场强磁选的选别效率,需提前分选出强磁性的磁铁矿和部分弱磁性的镜铁矿,降低进入一段立环强磁选的给矿量,同时减少强磁性矿物对强磁选作业的影响。拟采用永磁高梯度磁选机^[3-5]来实现这一目标。

3 CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机工作原理

CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机结构示意图见图 2。它采用导磁不锈钢棒为聚磁介质,扇形磁系,设备工作磁场强度 0.8~1.2 T。

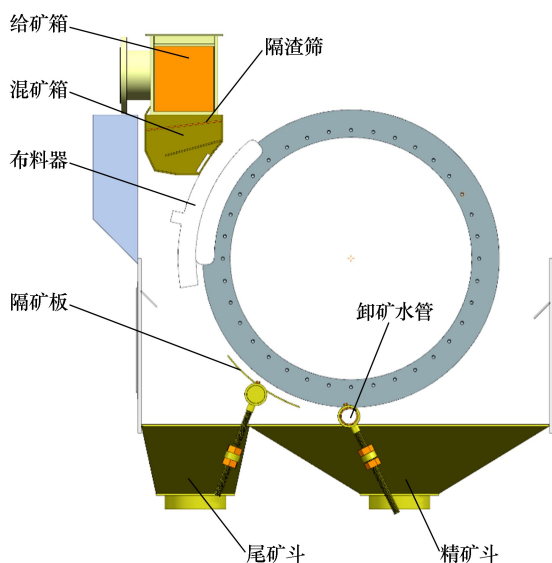


图 2 CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of CCT-A high-gradient permanent magnetic drum separator

CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机选别原理为:矿浆进入给矿箱后流进均匀布料器,经布料器均匀三段给矿后进入分选滚筒表面介质中,弱磁性矿物及强磁性矿物被强磁性介质收集箱吸附,非磁性矿物和磁性很弱的矿物及贫连生体尾矿自然下落进入尾矿斗;被介

质收集箱吸附的磁性矿物随着筒体的转动移至无磁区,在卸矿冲洗水及矿物重力的双重作用下,将粘在筒体表面介质上的精矿冲刷下来进入精矿斗,实现目的矿物的有效回收。

4 试验研究

4.1 实验室试验

2020 年 12 月,李楼铁矿委托相关设备研究单位开展了永磁高梯度磁选机实验室试验研究,给矿浓度 30%,不同磁场强度条件下的试验结果见表 4。实验室试验结果表明,在试验的磁场强度范围内,永磁高梯度磁选可获得 TFe 品位 48.15%~60.88%、产率 23.50%~52.93%,回收率 45.16%~80.45%的精矿指标,分选效果较好。

表 4 高梯度磁选试验结果

Table 4 High-gradient magnetic separation test results

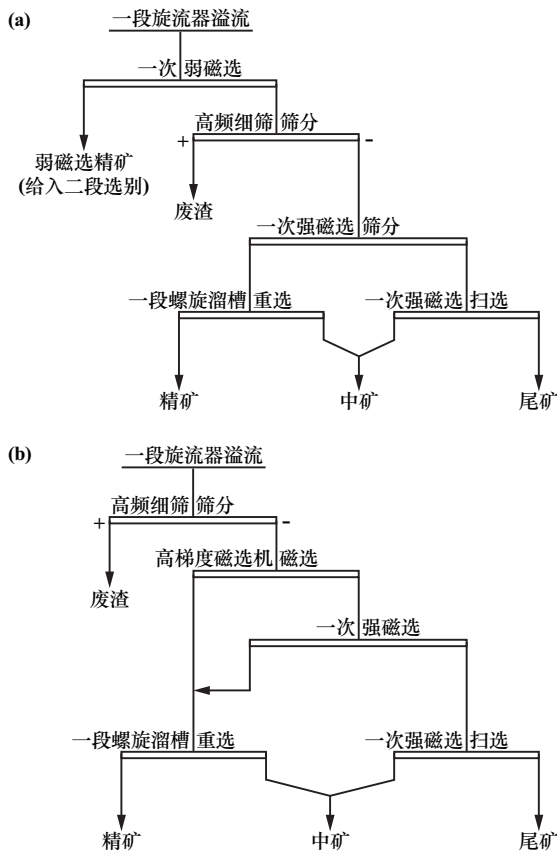
磁场强度/mT	产品名称	产率/%	TFe 品位/%	TFe 回收率/%
900	精矿	23.50	60.88	45.16
	尾矿	76.50	22.71	54.84
	给矿	100.00	31.68	100.00
1 000	精矿	30.04	55.22	52.37
	尾矿	26.11	21.57	47.63
	给矿	100.00	31.68	100.00
1 100	精矿	48.01	51.90	78.65
	尾矿	26.11	13.01	21.35
	给矿	100.00	31.68	100.00
1 200	精矿	52.93	48.15	80.45
	尾矿	26.11	13.16	19.55
	给矿	100.00	31.68	100.00

4.2 现场工业试验

4.2.1 试验设备及流程

在实验室试验基础上,进行了现场工业试验。结合现场工艺设备布置情况,一段弱磁选采用 CCT-A-1230 永磁筒式高梯度磁选机(以下简称 CCT-A-1230),设备滚筒直径 1 200 mm、长 3 000 mm,并在给矿处增加振动筛除杂设施,聚磁介质采用直径 3 mm 的不锈钢棒,呈网格状分布,介质网厚度约 50 mm,介质网格间隙约 10 mm,设备工作场强可达 1.2 T。

原选别流程为一段弱磁选—一段立环强磁选粗选—重选螺旋溜槽提精+一段立环强磁选扫选,工业试验流程为高梯度磁选机粗选—一段立环强磁选—重选螺旋溜槽提精+一段立环强磁选扫选。改造前后的工艺流程见图 3。



(a) 改造前; (b) 改造后

图 3 改造前后工艺流程

Fig. 3 Process flowcharts before and after upgrading

4.2.2 工业试验结果

工业试验主要收集 CCT-A-1230 设备本体的运行数据、强磁选扫选尾矿运行数据和重选选别数据。

CCT-A-1230 稳定运行后,该作业工序选矿技术指标详见表 5。CCT-A-1230 精矿品位达 56.29%,尾矿品位 22.32%,精矿作业产率 30.29%,金属回收率 52.13%。

表 5 高梯度磁选机设备本体的运行数据

Table 5 Operation data of high-gradient magnetic separator

序号	精矿作业产率/%	品位/%			金属回收率/%
		精矿	尾矿	原矿	
1	29.81	57.36	22.98	33.23	51.46
2	22.98	56.73	22.31	30.22	43.14
3	29.52	55.38	22.99	32.55	50.22
4	33.02	55.36	22.35	33.25	54.98
5	29.60	57.32	21.95	32.42	52.34
6	34.97	55.36	21.36	33.25	58.22
7	32.14	56.51	22.32	33.31	54.53
平均	30.29	56.29	22.32	32.60	52.13

CCT-A-1230 稳定运行后的强磁选扫选尾矿品位与未进行改造的弱磁选机对应强磁选扫选尾矿品位对

比结果见表 6。CCT-A-1230 对应的强磁选扫选尾矿品位较其他未进行改造的弱磁选机扫选尾矿品位降低约 1 百分点,降幅约 11.8%,实现了降低一段强磁选扫选尾矿品位的目的。

表 6 一段强磁选扫选尾矿运行数据

Table 6 Operation data of scavenging tailings from 1st-stage HIMS

一段强磁选扫选尾矿品位/%		
CCT-A-1230	其他弱磁选机	
7.17	8.74	
7.52	9.15	
7.94	8.70	
7.59	8.88	
8.86	9.19	
8.49	8.84	
7.52	8.70	
8.31	9.83	
7.65	8.66	
8.45	9.35	
8.31	9.38	
8.86	9.69	
7.75	9.04	
7.75	8.93	
8.01	9.08	

CCT-A-1230 稳定运行后,对应的强磁选、螺旋溜槽重选等选矿指标详见表 7。以高梯度磁选原矿品位 32.50%为例,CCT-A-1230 精矿与立环强磁选机精矿混合进入螺旋溜槽重选,此部分混合矿量对原矿的产率达 47.06%,螺旋溜槽重选精矿品位达到了 63.99%,满足提前提精的要求。螺旋溜槽重选作业稳定,一段重选精矿产率高达 19%,较原流程重选精矿产率(16%)提升 3 百分点,获得了较为理想的试验结果。

由于高梯度磁选机精矿需给入后续一段螺旋溜槽重选作业,重选作业对给矿矿浆浓度要求严格。实验过程中对 CCT-A-1230 精矿浓度和螺旋溜槽混合给矿浓度进行监测,结果见表 8。CCT-A-1230 精矿浓度 32.75%,螺旋溜槽综合给矿浓度 31.91%,此浓度符合现场重选需求。

4.2.3 对后续磨选系统的影响

使用 CCT-A-1230 后,一段扫选尾矿品位降低了约 1 百分点,一段扫选尾矿对原矿产率降低约 2 百分点,而一段重选精矿产率提高约 3 百分点,高于一段扫选尾矿降低量,故进入后续二段磨矿分级系统的矿量有所下降,对后续磨矿选别作业无负面影响。

4.2.4 现场工业试验小结

1) CCT-A-1230 整体上运行稳定、操作简单、能耗较低,用于替代一段弱磁选,可稳定获得产率 30.29%、

表7 强磁选、重选选矿指标

Table 7 HIMS and gravity separation indicators

高梯度磁选品位/%			高梯度磁选 精矿产率(对原矿)/%	强磁选品位/%		强磁选 精矿产率(对原矿)/%	重选品位/%			重选 精矿产率(对原矿)/%
原矿	精矿	尾矿		精矿	尾矿		综合给矿	精矿	尾矿	
31.83	56.89	23.65	24.61	52.93	13.86	18.89	55.71	63.58	46.68	21
32.24	55.85	21.23	31.80	51.25	14.07	13.13	53.83	63.23	46.58	20
31.13	55.99	21.93	27.01	51.32	13.02	16.98	54.74	63.51	47.22	20
31.62	56.97	22.07	27.36	52.89	14.07	14.97	55.57	63.37	49.17	19
35.17	57.62	23.26	34.66	52.34	11.90	18.35	55.72	63.44	47.20	28
33.68	56.26	23.80	30.44	50.72	11.50	21.82	51.53	64.24	46.53	15
32.19	58.49	20.26	31.21	47.87	10.82	17.53	51.39	64.72	43.14	19
31.78	58.16	21.12	28.78	50.31	13.25	15.12	55.18	65.19	49.23	16
32.87	56.13	20.75	34.26	49.77	11.63	15.72	52.75	64.65	48.55	13
32.50	56.93	22.01	30.04	51.04	12.68	17.02	54.05	63.99	47.37	19

表8 给矿浓度监测结果

Table 8 Monitoring results of feed concentration

序号	给矿浓度/%	
	CCT-A-1230	螺旋溜槽(综合)
1	31.45	31.00
2	31.72	29.95
3	33.71	32.00
4	34.10	34.69
平均	32.75	31.91

品位 56.29%、金属回收率 52.13% 的粗选精矿,有效降低后续一段立环强磁选作业负荷,同时避免强磁性矿物进入后续选别,缓解立环强磁机介质盒堵塞现象,提高分选效率。高梯度磁选精矿与一段强磁选精矿混合进入螺旋溜槽重选,可提高一段重选精矿产率,对后续磨选流程更有利。一段扫选尾矿品位可以降低 1 百分点,估算镜铁矿总尾矿品位可降低 0.7 百分点,年可多回收铁精矿 4 万 t,经济效益可观。

2) CCT-A-1230 使用后,中矿产率降低约 1 百分点,对后续二段磨矿选别作业有益。

3) CCT-A-1230 整体运行平稳可靠,设备整体密封性能好,作业区域附近干净整洁环保。

4) CCT-A-1230 替代原 CTB 弱磁选机后,整个选矿系统适应性良好,未产生负面影响。

5 生产现场改造

5.1 生产现场工艺优化

结合现场工艺配置情况,以 CCT-A-1230 替换原一段弱磁选机的方式进行改造,将 CCT-A-1230 安装在原 28.5 m 高频振动筛平台,高频振动筛移至原 31.5 m 一段弱磁选机平台。改造后一段旋流器溢流泵送至 36.0 m 平台原一段弱磁选分矿箱,经缓冲后给至上移后的高频振动筛除渣(31.5 m 平台),筛上粗粒废渣进入现有废渣处理系统进行后续处理;筛下矿浆自

流至新增的 CCT-A-1230(28.5 m 平台),高梯度磁选尾矿自流到下方一段强磁选机,高梯度磁选精矿与一段强磁选精矿一并给至螺旋溜槽,一段强磁选粗选尾矿给至一段强磁选扫选,强磁选扫选精矿与重选尾矿一起作为中矿进入二段选别,强磁选扫选尾矿作为总尾矿的一部分进入最终尾矿系统,重选精矿作为最终精矿的一部分进入精矿系统。图 4 为现场实体工程改造立面图。

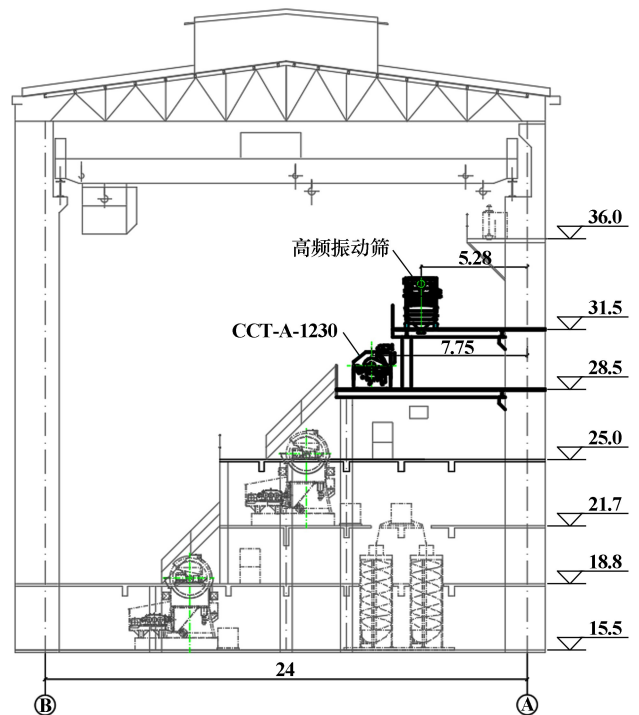


图4 现场实体工程改造立面图(单位:m)

Fig. 4 Elevation of upgraded processing plant on site

5.2 改造后生产运行技术指标

CCT-A-1230 改造工程在 2024 年 8 月底完成,系统设备运转正常后,在 2024 年 9 月中下旬对各产品取样检测,改造后的选矿主要技术指标见表 9,尾矿指标

见表10。CCT-A-1230 替代原 CTB 弱磁选机后,一段强磁选扫选尾矿品位由改造前的 9.00% 降低到了

7.95%,降低了1.05 百分点;同时综合尾矿品位由改造前的 10.80% 降低到 10.36%,实现了预期目标。

表9 改造后选矿主要技术指标

Table 9 Main technical indicators of mineral processing after upgrading

日期	高梯度磁选精矿产率/%	品位/%						高梯度磁选回收率/%
		原矿	综合精矿	综合尾矿	高梯度磁选精矿	高梯度磁选尾矿	一段强磁选扫选尾矿	
2025-09-18	31.53	33.34	64.30	10.61	56.68	22.59	8.05	53.61
2025-09-19	28.62	32.31	64.38	10.78	57.23	22.32	8.11	50.69
2025-09-20	28.83	32.60	64.10	10.78	58.64	22.05	8.12	51.86
2025-09-21	28.00	30.82	64.20	10.32	56.89	20.68	7.97	51.69
2025-09-26	25.92	30.77	64.34	9.91	57.41	21.45	7.75	48.36
2025-09-29	26.55	31.20	64.16	9.75	57.62	21.65	7.67	49.03
平均	28.21	31.84	64.25	10.36	57.41	21.79	7.95	50.87

表10 改造后尾矿指标

Table 10 Tailings indicators after upgrading

产品名称	产率/%	TFe 品位/%	分配率/%
强磁选粗选尾矿	40.9	7.95	68.2
强磁选扫选尾矿	12.3	11.00	20.5
浮选尾矿	6.8	23.60	11.3
综合尾矿	60.0	10.36	100.0

6 结论

1) CCT-A-1230 替代现场镜铁矿一段弱磁选机,有效解决了现场一段弱磁选分选效率低、选别设备堵塞等问题。

2) 应用 CCT-A-1230 后,获得了粗选精矿品位 57.41%、尾矿品位 21.79%、精矿产率 28.21%、金属回收率 50.87% 的指标,能够有效降低后续强磁选机的负荷,同时避免强磁性矿物进入后续选别流程,提高现场立环脉动高梯度磁选机选别效率,还可以适当降低后续强磁选机激磁电流,有利于强磁选机稳定运行。

3) 将目前一段弱磁选-一段强磁选粗选-一段强磁选扫选工艺优化为一段强磁选粗选-两段强磁选扫选工艺,可以有效降低一段强磁选尾矿品位,从而降低镜铁矿综合尾矿品位,提高金属回收率,增加精矿产量,提高企业的经济效益。

4) 采用永磁高梯度磁选机粗选+立环强磁选机扫选工艺处理李楼铁矿镜铁矿石是适宜的,生产实践中选矿技术指标较好,对同类矿石选别具有参考借鉴作用。

参考文献(References):

- [1] 王涛. 安徽开发矿业镜铁矿选矿工艺技术改造[J]. 现代矿业, 2020(3):139-143.
WANG Tao. Transformation of dressing technology of specularite mine in the Development Mining of Anhui[J]. Modern Mining, 2020(3): 139-143.
 - [2] 严小虎,杨计军. 李楼镜铁矿采用强磁选-螺旋溜槽重选早收铁精矿的研究与实践[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):51-54.
YAN Xiaohu, YANG Jijun. Application of high intensity magnetic separation and spiral chute gravity separation for pre-recovering iron concentrate from Lilou specularite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):51-54.
 - [3] 沈海榕,高利坤,饶兵,等. 永磁磁选设备的研究现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(5):103-110.
SHEN Hairong, GAO Likun, RAO Bing, et al. Research status and development tendency of permanent magnetic separation equipment[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(5):103-110.
 - [4] 张鑫宇,程绍凯,李文博. 高梯度磁选装备及其磁介质的研究现状[J]. 绿色矿山, 2024,2(4):424-435.
ZHANG Xinyu, CHENG Shaokai, LI Wenbo. Research progress of high gradient magnetic separator and its magnetic media[J]. Journal of Green Mine, 2024,2(4):424-435.
 - [5] 梁治安,夏青,伍红强. 我国几种磁选设备的发展和应[J]. 金属矿山, 2017(2):128-134.
LIANG Zhi'an, XIA Qing, WU Hongqiang. Development and application of several magnetic equipments[J]. Metal Mine, 2017(2): 128-134.
- 引用本文:常文利. CCT-A 永磁筒式高梯度磁选机在李楼铁矿的试验研究与应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):98-103.
CHANG Wenli. Experimental research and application of CCT-A high-gradient permanent magnetic drum separator in Lilou Iron Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):98-103.