

# 铜矿传感预选技术探索试验研究

郑银珠

(大冶有色金属集团控股有限公司)

**摘要:**随着入选原矿品位逐渐下降,大冶有色下属铜矿山都面临着资源、环境和效益相互协调发展的问題。为了提高低品位铜矿的利用率及入磨品位,降低磨机能耗,引入了预选抛尾技术及装备用于矿物分选。研究采用STEINERT KSS组合式拣选机,利用双能量X射线透射(DE-XRT)和3D激光组合传感技术对大冶有色下属铜矿山铜矿石进行预抛废探索试验。试验结果表明,组合式拣选机对丰山铜矿矿石具有较好的预抛选效果,矿石在抛废率为12%的条件下,精矿产品铜回收率可达到98%,铜品位由0.669%提升至0.746%,品位提升幅度为11.51%,分选指标良好。

**关键词:**光电选矿;预选抛废;铜矿;X射线;传感拣选技术;低品位

中图分类号:TD952

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)09-0115-06

doi:10.11792/hj20250914

## 引言

近年来,随着国内矿产资源开发利用步伐加快,矿山采矿作业逐步向地下深部延伸,高品位、易开采矿产资源储量日益减少,低品位和复杂难选资源开发利用比例明显上升<sup>[1-2]</sup>。在这个变化过程中,矿山生产经营也开始面临一些新问题:一是入选原矿品位降低后,若要产出相同数量的金属,需要大幅增加开采、运输、提升和分选的矿石量,导致企业生产成本上升,经济效益下降<sup>[3]</sup>;二是进入磨矿分选的矿石量增加后,细粒尾砂的排出量也将大幅增加,提高了尾砂的堆存和处理成本<sup>[4-6]</sup>;三是近年来中国对安全环保工作越来越重视,管理要求越来越严厉,尾矿库建设和尾砂合规处理审批难度增大,若尾砂无法合理排放或处理,将会制约企业正常生产工作的开展<sup>[7]</sup>。

尽管资源禀赋状况无法改变,但若能在矿石入磨前,将混入其中的围岩及脉石矿物尽早剔除,势必能大幅减少磨矿及分选矿石量,进而减少细粒尾砂排放量<sup>[8]</sup>。因此,矿石预选抛尾工艺技术与装备的研究及应用,已成为选矿技术革新的重要方向之一<sup>[9]</sup>。其中,光电拣选技术因其工艺系统简单、投资少、运行成本低,尤其是可用于井下或缺水地区,并易于实现生产的连续化、自动化等特点,而被很多企业 and 科技工作者进行了大量研究,使得该技术得到快速发展与进步<sup>[10-12]</sup>。

大冶有色金属集团控股有限公司(下称“大冶有色”)下属的铜绿山铜矿、丰山铜矿和铜山口铜矿3家

矿山目前入选矿石铜品位分别为0.7%、0.7%、0.6%左右,随着矿山逐步对薄、小、残及边端部等矿体的综合回收及机械化开采技术的生产应用,矿石入选品位有进一步降低的趋势,同时铜绿山铜矿、丰山铜矿2家矿山尾矿库已闭库,铜山口铜矿尾矿库可供服务年限也不足,3家矿山都面临着矿石地质品位持续下降,矿山尾砂堆存管理压力大,矿石分选及尾砂处理成本持续升高等问题。为此,大冶有色引入双能量X射线传感拣选技术对3家矿山矿石开展预选探索试验,以期通过对预抛新技术及装备的研究,为破解矿山当前面临的技术及发展难题提供新思路。

## 1 矿石性质

铜绿山铜矿床是以铜、铁为主的多金属接触交代矽卡岩型矿床。金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿,其次为斑铜矿、辉铜矿、自然金、自然银等。脉石矿物以方解石、斜长石、石英及矽卡岩矿物组合(透辉石、金云母和石榴石)为主。黄铜矿与斑铜矿、辉铜矿、黄铁矿共生关系密切,以粒状集合体的形式分散嵌布在脉石矿物中,或在相互间边缘及裂隙进行交代,形成包裹或网脉状结构。

丰山铜矿床属中高温矽卡岩-斑岩型矿床。主要有3种矿石类型:斑岩型铜钼矿石、矽卡岩型铜金矿石和热液脉型多金属矿石。矿石中组成矿物种类较为复杂,铜矿物主要为黄铜矿,少量斑铜矿和黝铜矿等,构成不规则状复合铜矿物集合体,或呈不规则状浸染分布于脉石矿物中,或呈不规则细脉状集合体沿

黄铁矿、磁黄铁矿等金属硫化物的边缘、粒间、孔洞及裂隙充填交代。钼矿物含量较低,大部分为辉钼矿。其他金属矿物以黄铁矿居多,其次为磁铁矿和磁黄铁矿,主要呈他形粒状或不规则状嵌布在脉石矿物中。脉石矿物组成复杂,具明显的钙质矽卡岩矿物组合特征,主要为钙铁榴石,其次是方解石、斜长石、钾长石、石膏、硬石膏、石英、钙铁辉石和透辉石等,少量透闪石、白云石、黑云母、绢云母、蛇纹石、绿泥石、硅灰石和高岭石等。

铜山口铜矿床为以矽卡岩型为主的矽卡岩-斑岩复合型矿床。金属矿物以硫化铜、硫化钼和硫化铁为主,有少量次生硫化物和氧化物矿物。脉石矿物以碳酸盐、硅酸盐和硅氧矿物为主。铜主要以黄铜矿和斑铜矿、辉铜矿存在。大部分黄铜矿呈团块状、不规则状或短脉状集合体或他形粒状浸染嵌布在脉石矿物中,多沿石榴石、方解石、长石、石英、石膏、辉石和蛇纹石等脉石矿物的粒间、裂隙充填产出,少量黄铜矿

呈不规则状或断续脉状沿以黄铁矿为主的金属硫化物的粒间、边缘、裂隙及孔洞充填交代,与黄铁矿的伴生关系较为复杂,接触面常呈不规则港湾状或锯齿状,部分呈微细粒状包裹在黄铁矿或闪锌矿内部,部分则表现为不规则状黄铁矿残余包裹在团块状黄铜矿中。脉石矿物主要有方解石、白云石、石英、长石、绿泥石、石榴子石、透辉石、金云母等。

从3家矿山矿石的工艺矿物学特征来看,铜绿山铜矿和铜山口铜矿矿石中主要金属矿物以集合体的形式分散嵌布在脉石矿物中或呈浸染状嵌布在脉石矿物中,这增加了矿石预选抛尾的难度<sup>[13-14]</sup>。

## 2 试验设备参数及特点

### 2.1 试验设备参数

本研究选择使用成都澳泰克矿业技术有限公司的STEINERT KSS组合式拣选机,开展矿石预选抛尾探索试验。试验设备参数见表1。

表1 组合式拣选机设备参数

Table 1 Equipment parameters of combined sorting machine

设备名称	型号	最高电流/A	压缩空气气压/kPa	额外辅助气压/kPa	空压机功率/kW	传感器类型
STEINERT KSS	KSS LXTT100 (带宽1 m)	18	1 000	200	45 ~ 75	DE-XRT传感器和3D激光传感器组合技术

### 2.2 试验设备特点

STEINERT KSS组合式拣选机采用双能量X射线透射(DE-XRT)技术,根据矿石内不同元素成分的X射线衰减系数不同,利用X射线穿透矿石时会被吸收和反射的原理<sup>[15-16]</sup>,以及不同矿物所含成分的相对原子序数差异,实现对矿石按品位进行采样和识别,进而达到选别的目的<sup>[17]</sup>。DE-XRT技术克服了原有X射线荧光分选法不能对矿石内部成分进行综合分析检测,以及容易受矿石表面污染而影响分选效果的问题。拣选设备中高分辨率3D激光传感器可测量矿石的形状、尺寸、厚度等数据信息,并通过对数据的组合分析得出矿石的密度,再利用传感器系统记录X射线穿透矿石后的信息,将其转换成数字图像数据(见图1)。这些经处理后的X射线图像能将高品位矿石和废石分别标记出来,再借助外力区分开来,从而达到分选的目的<sup>[18-20]</sup>(见图2)。

## 3 试验方案

试验首先分别对3家矿山的矿石样品进行组合式拣选机可选性试验,明确矿石分选效果,再在可选性试验结果的基础上,进一步开展扩大工业试验和生

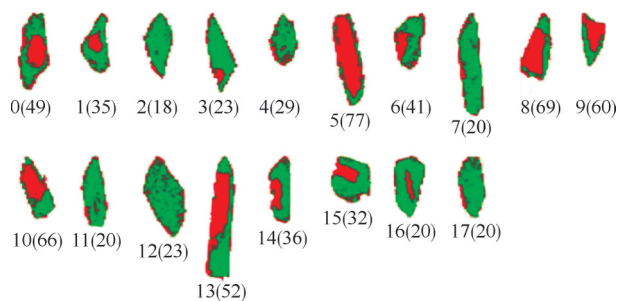


图1 双能量X射线透射技术模拟矿石图像

Fig. 1 Simulated ore image by dual-energy X-ray transmission technology

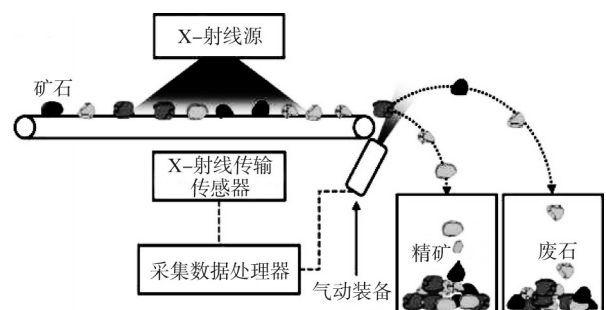


图2 传感拣选设备工作过程

Fig. 2 Working process of sensor-based sorting equipment

产能力试验,以探索相关工艺技术参数,优化生产技术指标。鉴于各矿山矿石物质组成较复杂,矿物学特

征及嵌布形式等均存在差异,试验中组合式拣选机设备参数的选定将参照矿石性质研究结果,针对性设定目标矿物的特征信息。

#### 4 可选性试验

##### 4.1 试验矿样及流程

试验矿样选自选矿车间中细碎闭路筛分流程的筛上返回产品中+15~-50 mm 粒级。同时为探索不同粒度范围内矿石的分选参数,提升细粒级分选指标,可选性试验中将各矿山矿样筛分成+15~-30 mm 和+30~-50 mm 2 种粒级并分别进行拣选试验。具体试验流程见图 3。

##### 4.2 试验结果

3 家矿山样品按照上述试验流程分选后,试验指标结果见表 2。

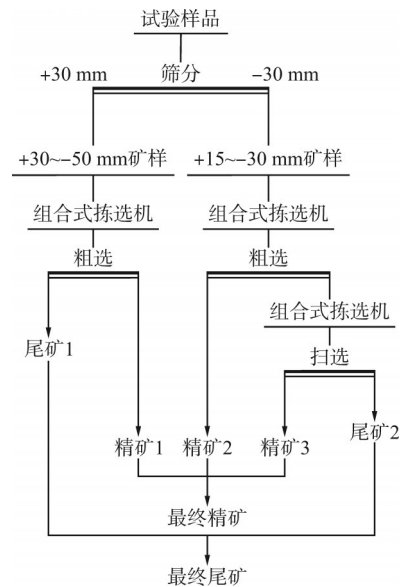


图 3 可选性试验流程图

Fig. 3 Flowsheet of separability test

表 2 可选性试验结果

Table 2 Results of separability test

试验样品	原矿铜品位/%	精矿铜品位/%	尾矿铜品位/%	品位提升幅度/%	抛废率/%	精矿铜回收率/%
铜绿山铜矿	0.619	0.742	0.149	19.9	20.60	95.06
丰山铜矿	0.882	1.090	0.076	23.6	20.48	98.22
铜山口铜矿	0.324	0.385	0.058	18.8	18.77	96.63

综合考虑分选成本 and 经济效益等因素,试验前确定组合式拣选机预选抛尾的预期指标为:精矿铜回收率在 98 % 以上,抛废率在 11 % 以上。

由表 2 可知:铜绿山铜矿样品预选精矿铜回收率偏低,尾矿品位偏高,预抛选效果不理想;丰山铜矿样品预选抛废后精矿铜回收率、抛废率、矿石品位提升幅度等各项指标均较好;铜山口铜矿样品预选抛废率偏低,预选精矿品位提升幅度小,尾矿品位也略偏高,预选抛尾效果略低于预期指标。这一试验结果与 3 家矿山矿石的工艺矿物学特征分析结果比较吻合。

#### 5 扩大工业试验

##### 5.1 试验矿样及流程

根据可选性试验结果,选取丰山铜矿和铜山口铜矿矿样进行扩大工业试验。试验矿样选取选矿车间中细碎闭路筛分筛上返回产品,为比较不同粒度矿石分选效果,丰山铜矿矿样采集+15~-50 mm 和+25~-70 mm 2 种粒级矿石,铜山口铜矿矿样只采集+15~-50 mm 粒级矿石。试验矿样在拣选机标准生产能力 20 t/h 条件下,将抛废率分别设置为 10 %、20 % 和 30 % 3 个不同阈值进行试验,试验流程见图 4。

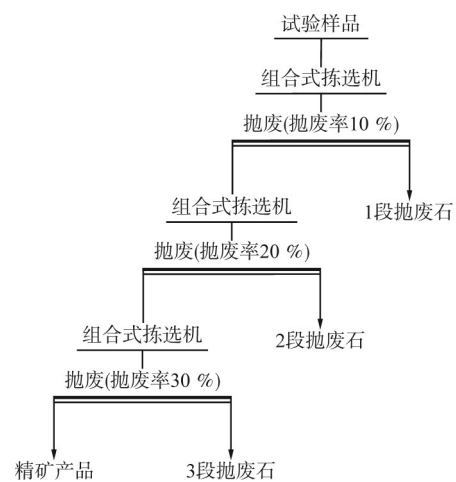


图 4 扩大工业试验流程图

Fig. 4 Flowsheet of enlarged industrial test

##### 5.2 试验结果

试验中对每段抛废试验结果进行产率计算和铜品位化验分析,再根据试验结果绘制产率与铜品位及铜回收率变化关系曲线,相关试验指标结果见表 3,产率与铜品位及铜回收率变化关系曲线见图 5、图 6。

由表 3 可知:丰山铜矿样品经过 2 段抛废后,+15~-50 mm 粒度样品的抛废率为 19.80 %,抛出废石品位

表3 扩大工业试验结果

Table 3 Results of enlarged industrial test

试验矿样	粒度/mm	产物	产率/%	累积产率/%	铜品位/%	累积品位/%	铜回收率/%
丰山铜矿	+15 ~ -50	1段抛废石	10.60	10.60	0.110	0.110	1.74
		2段抛废石	9.20	19.80	0.136	0.122	1.87
		3段抛废石	8.50	28.30	0.240	0.157	3.04
		精矿产品	71.70	100.00	0.870	0.669	93.35
		试验样品	100.00		0.669		100.00
丰山铜矿	+25 ~ -70	1段抛废石	8.70	8.70	0.110	0.110	1.52
		2段抛废石	7.40	16.10	0.180	0.142	2.10
		3段抛废石	6.00	22.10	0.174	0.151	1.67
		精矿产品	77.90	100.00	0.768	0.631	94.71
		试验样品	100.00		0.631		100.00
铜山口铜矿	+15 ~ -50	1段抛废石	10.74	10.74	0.120	0.120	3.25
		2段抛废石	10.25	20.99	0.160	0.140	4.15
		3段抛废石	10.66	31.65	0.234	0.171	6.30
		精矿产品	68.35	100.00	0.500	0.396	86.30
		试验样品	100.00		0.396		100.00

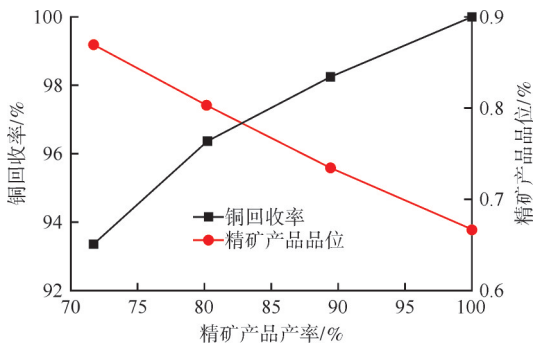


图5 丰山铜矿+15 ~ -50 mm 矿样分选指标关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between separation indexes and +15 ~ -50 mm ore samples from the Fengshan Copper Mine

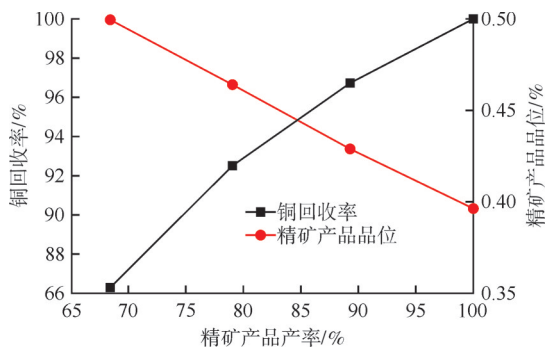


图6 铜山口铜矿+15 ~ -50 mm 矿样指标关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between separation indexes and +15 ~ -50 mm ore samples from the Tongshankou Copper Mine

0.122%, 精矿产品铜回收率 93.35%; +25 ~ -70 mm 粒度样品的抛废率为 16.1%, 抛出废石铜品位 0.142%, 精矿产品铜回收率 94.71%, 这表明样品粒度越粗, 实际抛废率越低, 抛出废石铜品位越高, 预选

抛废效果越差, 说明矿石解离度对组合式拣选机分选效果影响较明显。同时, 丰山铜矿和铜山口铜矿矿样试验结果对比可知, 丰山铜矿矿样的预选抛废试验结果更好, 说明丰山铜矿矿石更适合用 STEINERT KSS 组合式拣选机开展预选抛废生产。

由图 5 可知: 丰山铜矿 +15 ~ -50 mm 矿样在 88% 精矿产品产率 (即抛废率为 12%) 的条件下, 精矿产品铜回收率达到 98%, 铜品位为 0.746%, 品位提升幅度为 11.51%, 此时拣选机预选抛尾效果较好。由图 6 可知: 铜山口铜矿 +15 ~ -50 mm 矿样在精矿产品铜回收率为 98% 时, 精矿产品产率为 93.5% (即抛废率为 6.5%), 精矿铜品位为 0.418%, 品位提升幅度为 5.56%, 预选抛尾效果较好, 但相比预期目标仍有差距。

## 6 生产能力试验

### 6.1 试验矿样及流程

试验矿样选取丰山铜矿和铜山口铜矿选矿车间中细碎闭路筛分筛上返回产品中 +15 ~ -50 mm 粒级。为验证设备生产能力波动对预选抛废指标的影响, 试验将各矿山矿样分成 3 份, 以拣选设备标准生产能力 20 t/h 为基准, 采用 3 种不同的给料速度 (即 3 种不同生产能力) 进行预选抛尾试验, 得到精矿产品和废石, 试验流程见图 7。试验中设备参数设定参考扩大工业试验中相关作业条件, 抛废率设置为 20%。

### 6.2 试验结果

生产能力试验中, 试验样品在 3 种不同给料速度

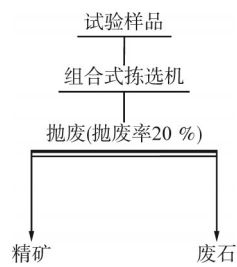


图7 生产能力试验流程图

Fig. 7 Flowsheet of production capacity test

表4 生产能力试验结果

Table 4 Test results of production capacity

试验样品	给料速度/(t·h <sup>-1</sup> )	抛废率/%	铜回收率/%	原矿铜品位/%	精矿铜品位/%	品位提升幅度/%	尾矿铜品位/%
丰山铜矿	21	16.69	96.55	0.78	0.904	15.9	0.160
	26	18.00	95.58	0.64	0.746	16.6	0.136
	33	17.65	95.11	0.71	0.820	15.5	0.210
铜山口铜矿	20	20.40	91.18	0.44	0.504	14.5	0.215
	30	21.35	88.76	0.56	0.632	12.9	0.286
	41	23.56	86.85	0.47	0.534	13.6	0.250

增大后,输送带上的矿石更密集,增大了X射线透射分析难度和气动分离难度,导致部分品位较低且金属矿物呈分散嵌布的矿石颗粒易被当作废石清理,且气动分离废石时也更容易夹带矿石颗粒,从而出现抛废率增大,铜回收率下降趋势。因此,综合以上2组不同矿样的试验结果得出:针对金属矿物集中分布且破碎解离效果好的矿石,当组合式拣选机生产能力在X射线透射分析精度和气动分离精度范围内波动时,其对分选效果影响较小,若此时的分选指标能够达到预定目标,则组合式拣选机的生产能力还有进一步提升的空间。

## 7 结论

1) STEINERT KSS组合式拣选机对大冶有色3家矿山矿石均具有预选抛废效果,但各矿山矿样预选抛废指标存在差异。其中,铜绿山铜矿矿样预选抛废效果不理想;丰山铜矿矿样预选抛废各项指标均较好;铜山口铜矿矿样预选抛废指标略低于预期目标。

2) 矿石的矿物学特征及解离情况对组合式拣选机分选效果影响比较明显。

3) 在扩大工业试验中,丰山铜矿样品预抛选效果最好,其中,+15~-50 mm矿样在抛废率为12%的条件下,精矿产品铜回收率达到98%,铜品位由0.669%提升至0.746%,品位提升幅度为11.51%;铜山口铜矿+15~-50 mm样品在抛废率为6.5%的条件下,精矿产品铜回收率为98%,铜品位由0.396%提升至0.418%,品位提升幅度为5.56%,相比预期指标

条件下预选抛尾得到的相关试验指标见表4。

由表4可知:丰山铜矿矿样在不同生产能力条件下,随着给料速度(即生产能力)逐渐增加,抛废率有变大趋势,但增加幅度不大,精矿铜回收率呈下降趋势,但下降趋势比较平缓;铜山口铜矿矿样在不同生产能力条件下,随着给料速度逐渐增加,抛废率和精矿产品变化趋势与丰山铜矿矿样一样,但2项指标变化幅度均比丰山铜矿矿样稍大。这主要是生产能力

仍有差距,还需进一步探索优化。

4) 组合式拣选机生产能力变化对矿石分选有一定影响,随生产能力变大,抛废率有增大趋势,铜回收率呈下降趋势。但其针对金属矿物集中分布且破碎解离效果好的矿石,当组合式拣选机生产能力在X射线透射分析精度和气动分离精度范围内波动时,其对分选效果影响较小。

### [参考文献]

- [1] 章恒兴,邱廷省,江领培,等.艾砂磨在某铜矿选矿厂再磨中的应用[J].金属矿山,2020(3):90-94.
- [2] 张铃,路永森,薛晨,等.中国贫细杂难选铁矿分选技术研究进展[J].现代矿业,2024,40(3):13-17,32.
- [3] 雷力,曹欣,徐建伟,等.四川某低品位难选铜镍硫化矿石选矿试验研究[J].黄金,2023,44(1):53-57.
- [4] 迟崇哲,翟菊彬,兰馨辉,等.黄金尾矿综合利用分析[J].黄金,2022,43(2):100-103.
- [5] 胡亚军,陈彦亭,赖伟,等.超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J].黄金,2023,44(5):12-15,20.
- [6] 刘娟红,周在波.细粒级金属尾砂的综合利用及在矿山充填中存在的问题和对策[J].金属矿山,2022(7):240-249.
- [7] 韩伟,邓文敏.光电预选在湖北某铜矿石的试验研究及展望[J].铜业工程,2021(3):40-43.
- [8] 马崇振.光电色选机在石英砂选矿中的工艺研究[J].湖南有色金属,2021,37(5):12-14,48.
- [9] 朱智超,袁康,兰舟,等.海南某选矿厂跳汰选矿工艺优化研究[J].黄金,2024,45(4):44-47.
- [10] 敖顺福,朱家锐,徐峰,等.预选抛尾技术应用进展[J].矿产保护与利用,2021,41(4):157-163.
- [11] 罗主平,刘建华,孙业长,等.中国XRT智能预选抛废技术应用研究与实践[J].金属矿山,2024(8):79-92.

- [12] 冯梦菲,谢海云,宋紫欣,等.预选抛废技术发展现状[J].矿冶,2024,33(3):329-338.
- [13] 何晋勇,陆长龙,肖骏.某细粒浸染铜锌矿选矿工艺研究[J].云南冶金,2016,45(5):22-29.
- [14] 顾恒光,范宛惠,谢蕾,等.某高硫铜矿预选铜尾矿活化浮硫试验研究[J].中国矿业,2024,33(7):234-244.
- [15] 刘显华,张建强.X射线智能矿石分选机入选粒级优化试验研究与应用实践[J].湖南有色金属,2022,38(4):14-17.
- [16] 耿志强,吴启明,江国华,等.XRT智能预选技术在有色金属矿山中的应用进展[J].铜业工程,2023(5):119-126.
- [17] 苏振华,谈承忠,张笃,等.光电智能抛废技术在低品位铅锌矿的试验研究[J].材料研究与应用,2021,15(2):159-164.
- [18] 成磊,尚红亮,朱道瑶.基于传感器的矿石拣选技术研究现状与发展趋势[J].有色金属(选矿部分),2017(增刊1):160-163.
- [19] 李建政,肖健锋,王军强,等.X射线荧光分选机及其应用[J].黄金,2022,43(2):81-84.
- [20] 杨双福,李希明,潘冬泽,等.X射线智能分选机预选新疆某低品位铜矿[J].矿冶工程,2022,42(5):86-87.

## Exploratory experimental study on sensor-based preconcentration technology for copper ores

Zheng Yinzhu

(Daye Nonferrous Metals Group Holdings Co., Ltd.)

**Abstract:** With the gradual decline in the head grade of run-of-mine ore, copper mines under Daye Nonferrous Metals Group are facing the challenge of coordinating resource, environmental, and economic benefits. To improve the utilization of low-grade copper ores, increase the feed grade to the grinding circuit, and reduce mill energy consumption, it is necessary to introduce preconcentration technology for waste rejection and equipment for ore sorting. In this study, a STEINERT KSS combined sorting machine, integrating dual-energy X-ray transmission (DE-XRT) and 3D laser sensor technologies, was used to carry out exploratory preconcentration tests for waste rejection on copper ores from the company's mines. The test results show that the combined sorting machine achieves good preconcentration performance for ores from the Fengshan Copper Mine. Under a waste rejection rate of 12 %, the copper recovery in the concentrate reached 98 %, the copper grade of the concentrate increased from 0.669 % to 0.746 %, representing an 11.51 % increase in grade, and the separation indexes were satisfactory.

**Keywords:** optoelectronic ore sorting; preconcentration for waste rejection; copper ore; X ray; sensor-based sorting technology; low grade