

铜绿山铜铁矿深部矿体采矿方法优化与应用

尹东升¹, 刘鹏鹏², 张 鹏¹, 毕 成², 熊国雄¹, 王贻明², 曹文钢¹

(1. 大冶有色金属有限责任公司; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

摘要:针对铜绿山铜铁矿深部矿体采用点柱式上向水平分层充填采矿法开采存在的采矿损失贫化大、人员劳动强度大、机械化程度低、采充循环效率低等问题,结合铜绿山铜铁矿机械化设备与膏体充填系统提出开展盘区化上向进路式膏体充填采矿法试验研究。该方法利用近年来铜绿山铜铁矿采购的诸多机械化采矿设备及改造升级的膏体充填系统,去除了采场点柱,提高了矿石回收率,降低了井下操作人员劳动强度,提高了采场充填效率。本次研究成果可为类似矿山提供高效采矿的新思路。

关键词:铜绿山铜铁矿;采矿方法优化;进路式;膏体充填;机械化;盘区

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)03-0035-05

doi:10.11792/hj20250306

引言

铜矿资源^[1]的开采对于世界各国工业发展有着至关重要的意义^[2]。随着中国式现代化建设的不断推进,国内的铜矿资源储量也在不断下降,因此在铜矿资源开发时要尽量做到提高回收率^[3]。目前,国内诸多大型铜矿山已经逐步由露天开采转入地下开采^[4],并且伴随着地下开采深度的增加^[5]及矿山无轨机械化装备^[6-7]的不断发展,对于采矿方法的工艺要求也更为严格。

曹国华等^[8]针对山东某金矿采用浅孔房柱采矿法回采存在的问题,提出缓倾斜薄矿体机械化干式充填采矿法,基于机械化开采方式,使得矿山生产效益得到提高。石大庆等^[9]结合丰山铜矿矿体开采技术与引进的矿山机械设备,以机械化盘区开采为特点,提出了上向进路充填采矿法,有效提高了矿山的生产能力。肖柏林等^[10]通过对大量文献的查阅与总结,结合诸多矿山的实地调研,介绍了目前金属矿充填胶凝材料的现状。黎维平^[11]对膏体充填在金属矿山生产中的应用现状进行分析、调研,表明了膏体充填对于未来金属矿山安全生产的意义。孙希奎等^[12]通过理论分析、数值模拟等手段说明了膏体充填技术对于浅层煤矿开采地表沉陷问题的良好控制,使得地表移动变形量均在Ⅰ级设防指标范围内。

大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿(下称“铜绿山铜铁矿”)有着几十年的矿山开采历史,目前由于矿山不断的开采作业,浅部资源已基本开采完

毕,矿体开采逐步进入地下深部。因此,原有多种采矿方法^[13-14]需要不断进行优化更新来适应深部开采。根据铜绿山铜铁矿井下多种采矿方法的应用现状^[15]及工艺改良现状^[16],结合近五年来先进机械化采矿设备的引进及原有充填系统的改造升级,最终确定采用盘区化上向进路式膏体充填采矿法代替点柱式上向水平分层充填采矿法^[17-18],以期实现安全高效回采。

1 机械化采矿设备和充填系统现状

1.1 矿体开采技术条件

铜绿山铜铁矿生产能力为132万t/a。根据2021年6月末保有资源储量,铜绿山铜铁矿保有资源储量1526.49万t,综合品位1.12%,金属量170968t,服务年限11a。铜矿石岩性主要为含铜矽卡岩或含铜大理岩,矿体上、下盘多为大理岩与矽卡岩。采用Q系统分级方法与RMR分级体系对矿岩进行分级。其中,矿体大多稳固性良好,基本为Ⅱ级岩体,小部分含铜矽卡岩为Ⅲ—Ⅳ级岩体,这是由于结构面发育及地下水侵蚀导致岩体破碎;上盘大理岩稳定,岩体等级基本为Ⅱ—Ⅰ级,下盘矽卡岩质量较差,岩体等级基本为Ⅳ—Ⅲ级。

1.2 机械化采矿设备

铜绿山铜铁矿自2021年以来,引进了大批无轨机械化设备,其类型主要为:柴油铲运机、中深孔台车、切割槽钻机、掘进台车、锚杆台车、撬毛台车。原有和新增设备具体情况如表1~4所示。

由表1和表2可知:2021年以前,铜绿山铜铁矿

表 1 2021 年前井下配备铲运机统计

Table 1 Statistics of underground LHDs equipped before 2021

序号	设备名称	型号规格	制造厂家	数量/台	装载能力/m ³
1	电动铲运机	CYE-2	中钢衡重	10	2
2		XYWJD-2	烟台兴业	2	2
3		CYE-1.5	中钢衡重	10	1.5
4		WJD-2F	南昌凯马	3	2
5		WJD-1.5	南昌凯马	12	1.5
6		WJD-2	南昌凯马	1	2

表 2 2021 年后新增井下配备铲运机统计

Table 2 Statistics of newly equipped underground LHDs after 2021

序号	设备名称	型号规格	制造厂家	数量/台	装载能力/m ³
1	柴油铲运机	UL50	临工矿山	5	3.5
2		WJ-1.5	山东德瑞	1	1.5
3		WJD-2	南昌凯马	1	2
3		DRWJ-1	山东德瑞	1	1

表 3 2021 年前井下配备各类台车统计

Table 3 Statistics of various underground jumbos equipped before 2021

序号	设备名称	型号规格	制造厂家	数量/台
1	凿岩台车	K41X	阿特拉斯·科普柯	1
2	采矿台车	DL331	山特维克	1
3	凿岩台车	ZY41D	铁建重工	1

表 4 2021 年后新增井下配备各类台车统计

Table 4 Statistics of newly equipped underground jumbos after 2021

序号	设备名称	型号规格	制造厂家	数量/台
1	中深孔台车	CYTC70	华泰矿冶机械	1
2	切割槽钻机		湖南创远高新	1
3	掘进台车	UD391	临工矿山	6
4	锚杆台车	CYTM41-2	江西鑫通	2
5	撬毛台车	XMPYT-45/450	湖北天腾重机	5

井下原有各类铲运机最大装载能力为 2 m³,而新增的 UL50 型铲运机最大装载能力为 3.5 m³,并且铲运机总量从原来的 38 台增加到了 46 台,总装载能力从原来的 65 m³ 增加到了 87 m³;这极大地提高了井下采场回采效率。

由表 3 和表 4 可知:2021 年以前,井下原有各类台车共计 3 台(巷道掘进和支护主要采用手持式凿岩钻机,巷道撬毛采用人工撬毛的方式);2021 年后,新增台车 15 台。新增的撬毛台车和锚杆台车可以代替原有的人工撬毛和手持式凿岩钻机钻孔支护,这不仅可以降低采场的回采周期,也可以提高采场支护强度,从而极大提高矿山井下安全。新增其他的中深孔台车、切割槽钻机及掘进台车配合原有台车设备也在

很大程度上提高了井下采场的回采效率。

1.3 充填系统

目前,铜绿山铜铁矿选矿厂矿石处理量为 4 500 t/d,尾矿平均产率为 76.78 %,尾矿产量为 3 455 t/d,尾矿密度为 3.02 g/cm³。选矿厂尾矿排放浓度为 15 %~18 %,排料流量为 700~860 m³/h。

铜绿山铜铁矿充填系统经过升级改造^[19]后,对其全尾砂输送工艺,以及微粉秤、搅拌桶、充填柱塞泵等老旧设备及浓度计、流量计等各类监测仪器进行了更新换代。并且新建造 2 条充填钻孔,为铜绿山铜铁矿深部矿体采场充填提供服务。现基本可以在保证充填质量的同时,实现对选矿厂排放尾矿的高效处理。充填系统正常工作时,深锥底流浓度可以保持在 66 %~67 %,底流排量 120 m³/h 左右,添加胶凝材料搅拌后,其充填料浆浓度可达 68 %,且充填料浆各项参数均可以达到形成膏体的标准^[20]。

2 采矿工艺优化及现场试验

2.1 现有采矿工艺及存在问题

2.1.1 点柱式上向水平分层充填采矿法

1)矿块布置。矿块布置根据矿体厚度分 2 种情况:矿体厚度小于 30 m,沿走向布置;矿体厚度大于 30 m,垂直走向布置。矿块长 50~100 m,每分层回采高度为 3 m,采场间保留点柱,采用掘天井后刷大的方式回采。

2)采准、切割。采场内设 1 条充填回风井、2 条顺路溢水人行井、1 条顺路溜井,上中段设回风巷道。千吨采切比为 340 m³/kt。

3)回采、出矿。采场凿岩设备选用 YT-28 型气腿式凿岩机与 YSP-45 型凿岩机,采场出矿选用 WJD-1.5 型电动铲运机。必要时采用锚杆护顶。

4)充填。除第一分层以外,每分层分 2 次充填,第一次打底充填层高 2.5 m,采用全尾砂胶结充填;第二次铺面充填层高 0.5 m,采用全尾砂铺面胶结充填,从而保证铲运机在充填体上作业时的安全。一分层充填采用全面铺面胶结充填,厚 6 m,并铺设钢筋,保证其作为下一中段矿体开采假顶的稳定。

2.1.2 存在问题

铜绿山铜铁矿点柱式上向水平分层充填采矿法(如图 1 所示)采用浅孔落矿(YT-27 或 YT-28 型气腿式凿岩机),工人劳动强度大,生产能力低;保留点柱导致该部分矿石无法回收,使得采矿损失率过大;采场采用分层胶结充填,充填体强度较差,并且采—充循环效率差。此外,由于人员和设备直接进入采空区作业,安全性差,易出现片帮、冒顶类事故。

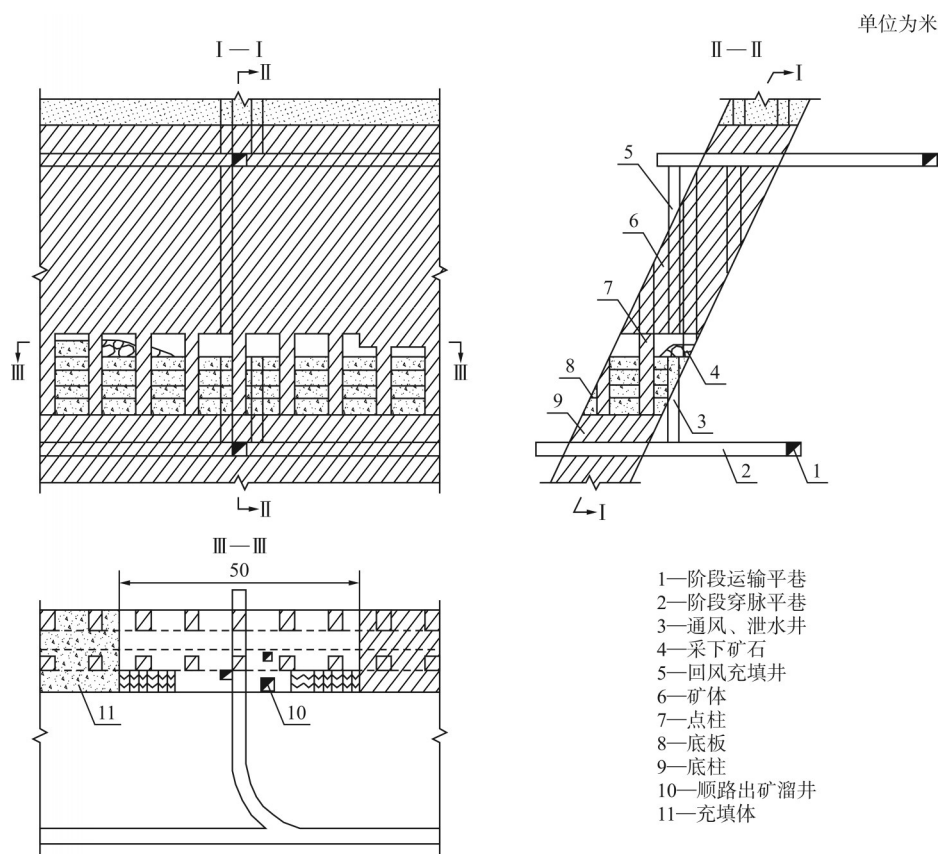


图1 点柱式上向水平分层充填采矿法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of point pillar upward horizontal layered filling mining method

2.2 采矿方法优化

2.2.1 优化原则

采矿方法优化应遵循以下几项原则:

- 1)适应无轨设备运行及膏体充填应用。
- 2)相比原采矿方法,优化后的采矿方法要求对矿体适应性强,采准切割工程量少,开拓建设时间短,投入生产快。
- 3)要求所选用的采矿方法能降低采矿损失贫化。
- 4)适用于可连续化机械开采,采场生产能力大,出矿效率高,能满足矿山的产能需要。
- 5)充分利用开采产生的废石和尾砂,降低开采成本,尽量不留或少留永久性矿柱。

2.2.2 回采工艺优化

- 1)矿块布置。矿块沿走向布置,盘区长100~200 m,进路规格为3.5 m×4 m(高×宽)。盘区内不留点柱,顶板岩性较差时,采用锚杆+锚网进行局部支护或全断面支护。
- 2)采准切割。利用斜坡道沿矿体走向掘进分段巷道,通过分段巷道掘进采场联络道(通过垂直矿体走向脉内采场联络道将其划分为2个采区,矿体沿走向长度大于200 m时,则可根据实际矿体长度布置多条采场联络道)。尽量靠近各个分段巷道上的采场联络道布置溜井。充填回风井布置在各条采场联络道

中部。

- 3)凿岩爆破。采用UD391型掘进台车完成钻孔作业,采用BQF-100型装药器完成抛空装药。
- 4)出矿。出矿采用1台3.5 m³柴油铲运机和1台2 m³电动铲运机,1用1备。
- 5)撬毛、支护。采用XMPYT-45/450型撬毛台车完成撬毛工作(每次爆破撬毛时间20 min)。采用CYTM41-2型锚杆台车进行采场支护(每次爆破支护时间4 h)。
- 6)充填。采用浓度为68%的膏体完成采场充填。具体充填要求为:一步骤采场回采完成后,对一步骤采场进行封闭充填,灰砂比为1:7,充填要求接顶,保证二步骤采场的回采安全性;一步骤采场充填体强度达到要求(3 d强度≥0.8 MPa,28 d强度≥3 MPa)后,再对二步骤采场进行回采作业;二步骤采场回采完成后,在采场口子堵坝,对采场进行整体充填接顶,灰砂比为1:13。

2.3 优化前后采场技术指标对比

经过采矿方法优化,采场技术指标对比如表5所示。

结合铜绿山铜铁矿最新引进的机械化设备与改造后的膏体充填系统对采矿方法进行优化,其采场的采矿损失率、矿石贫化率、千吨采切比及采场生产能力

表5 采矿工艺优化前后采场技术经济指标对比
Table 5 Comparison of technical and economic indicators before and after mining process optimization

指标	优化前	优化后
采矿损失率/%	7.7	6.8
矿石贫化率/%	10.8	9.3
千吨采切比/(m ³ ·kt ⁻¹)	340	333
采场/盘区生产能力/(t·d ⁻¹)	100	372
采场回采周期(一个分段)/a	0.92	0.5

都有一定提升。其中,最为显著的是采场/盘区生产能力,相比优化前提升了约2.7倍;采场回采周期也降低了5个月。

3 现场试验

结合优化后的采矿工艺,对铜绿山铜铁矿-485 m中段9443大盘区采场进行回采。

3.1 矿体开采技术条件

9443大盘区采场围岩产状与矿体产状基本相同,岩性主要是矽卡岩,上盘围岩中等稳固,采场岩性不稳固,下盘围岩稳固性较差,矿房开采不会发生不良地质问题。岩石性质:采场为大理岩含铜磁铁矿石;上盘围岩为大理岩;下盘围岩为矽卡岩和部分风化火成岩。该采场上盘围岩稳固,采场岩性较稳固,下盘围岩较差。

3.2 采场布置及回采顺序

-485 m中段9443大盘区采场三分段采场回采示意图如图4所示,该分段地质矿量约为8万t。采场面积 $S_{南}=660.8\text{ m}^2$, $H_{底}=-448.8\text{ m}$; $S_{北}=837.3\text{ m}^2$, $H_{底}=-448.6\text{ m}$ 。9443大盘区采场三分段第一个分层南部、北部总共划分14个采场,均采用两步骤盘区化上向进路式膏体充填采矿法回采。其中,一步骤采场:南部(S1、S3、S5、S7)、北部(N1、N3、N5、N7)共8个;二步骤采场:南部(S2、S4、S6)、北部(N2、N4、N6)共6个。进路断面均为4.0 m×3.5 m,其中,南部采区长度为28.83~37.10 m,分为7个采场;北部采区长度为35.75~80.46 m,分为7个采场。

分别完成9443大盘区采场三分段南、北部采区采场联络道及溜井联络道后,开始进路掘进。一步骤进路采场回采顺序为:先回采南部(S1、S3、S5、S7),再回采北部(N1、N3、N5、N7)。

3.3 试验采场技术经济指标

综合-485 m中段9443大盘区采场三分段实际回采情况,对其技术经济指标进行统计,结果如表6所示。

根据9443大盘区采场三分段试验采场的实际回采现状,采场关键综合指标分别为:矿石贫化率6.78%,

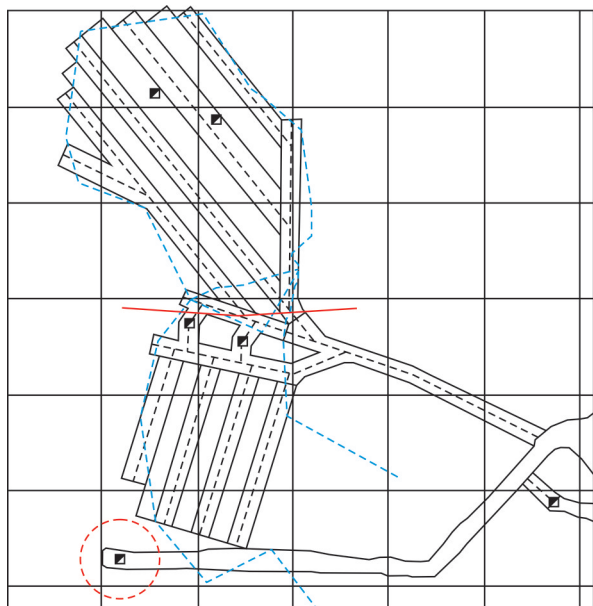


图4 -485 m中段9443大盘区采场三分段采场回采示意图
Fig. 4 Schematic diagram of extraction at the slope on Sublevel 3, Panel 9443, Level -485 m

表6 -485 m中段9443大盘区采场三分段技术经济指标
Table 6 Technical and economic indicators of the stope on Sublevel 3, Panel 9443, Level -485 m

指标	盘区化上向进路式膏体充填采矿法
出矿量/t	72 560
矿石贫化率/%	6.78
采矿损失率/%	9.30
采场生产能力/(t·d ⁻¹)	385.6
千吨采切比/(m ³ ·kt ⁻¹)	330
回采周期/d	225

采矿损失率9.30%,相比点柱式上向水平分层充填采矿法采场生产能力提升了约2.85倍。与采矿方法优化设计的相应指标基本吻合,证明了采矿方法优化的可靠性。虽然回采周期相对于设计增加了45 d(试验采场刚开始回采时台车操作不熟练,导致前期回采效率较低),但总体上比工艺优化前的矿体回采效率快了105 d。

4 结论

1)针对铜绿山铜铁矿采用点柱式上向水平分层充填采矿法回采存在的采矿损失贫化大、人员劳动强度大、机械化程度低、采充循环效率低等问题,基于新引进的机械化采矿设备和充填系统的改造成果,提出了盘区化上向进路式膏体充填采矿法,充分利用了无轨化设备与高质量充填体,降低了采场回采的采矿损失率、矿石贫化率及千吨采切比,并使得采场生产能力提高了约2.85倍,采场回采周期减少了105 d。

2)盘区化上向进路式膏体充填采矿法进行了工业

试验,验证了该采矿方法的采场技术经济指标,证明了本次采矿工艺优化成果具有良好的工业应用价值。

[参考文献]

- [1] 魏明辉.我国铜资源开发利用现状及可持续发展策略[J].现代矿业,2023,39(10):9-12.
- [2] 解舒喻,张嘉苒,孟嘉禾,等.中国铜矿资源供应安全及对策[J].中国金属通报,2023(11):49-51.
- [3] 张楠.新能源产业发展背景下我国铜资源供需现状与趋势[J].中国矿业,2023,32(6):2-9.
- [4] 高佳伟.新时期铜矿开采利用现状及发展战略探讨[J].中国金属通报,2024(3):4-6.
- [5] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
- [6] 杨佳,任斌,张娣.无轨设备在黄金矿山地下开采中的应用——以贵州锦丰矿业有限公司为例[J].黄金,2020,41(7):49-53.
- [7] 肖振凯.全无轨机械化残矿回采技术在金山金矿的应用[J].黄金,2013,34(5):31-34.
- [8] 曹国华,张燕军,王茂德,等.缓倾斜薄矿体机械化干式充填采矿法研究[J].采矿技术,2024,24(5):8-11.
- [9] 石大庆,王贻明,张纯锋,等.丰山铜矿机械化盘区高效采矿方法优化[J].金属矿山,2023(6):40-44.
- [10] 肖柏林,王建栋,阮竹恩,等.金属矿绿色高效膏体充填胶凝材料研究与应用进展[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):1-13.
- [11] 黎维平.充填采矿技术在金属矿山采矿工程中的应用研究[J].冶金与材料,2024,44(8):121-123.
- [12] 孙希奎,范建国,常庆粮.浅埋特厚煤层下向分层膏体充填开采覆岩变形控制机理[J].绿色矿山,2024,2(3):221-233.
- [13] 戴宏辉.铜绿山矿采矿方法优化研究及应用[J].采矿技术,2021,21(1):12-14.
- [14] 周科礼,熊国雄.铜绿山矿中深孔爆破参数优化试验研究[J].黄金,2023,44(7):96-100.
- [15] 曹文钢.铜绿山矿分段空场嗣后充填采矿法工业试验研究[J].现代矿业,2023,39(12):90-93.
- [16] 蔡世祥.铜绿山铜铁矿井下边坡部探矿方法与实践[J].采矿技术,2022,22(5):230-232.
- [17] 高剑,舒亮.机械化盘区上向进路充填采矿法改进生产实践[J].湖南有色金属,2023,39(4):5-8,27.
- [18] 张社稷.上向水平分层进路式全尾砂胶结充填采矿法在锦丰金矿的应用[J].黄金,2020,41(12):53-56.
- [19] 石教华,毕成,吴爱祥,等.自动化数字矿山膏体充填系统升级改造及应用[J].黄金,2024,45(8):33-39,45.
- [20] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1 652-1 666.

Optimization and application of mining methods for deep orebodies in the Tonglushan Copper-Iron Mine

Yin Dongsheng¹, Liu Pengpeng², Zhang Peng¹, Bi Cheng², Xiong Guoxiong¹, Wang Yiming², Cao Wengang¹

(1. Daye Nonferrous Metals Co., Ltd.;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: To address challenges such as great mining loss and dilution, high labor intensity, low mechanization, and inefficient mining-filling cycles in the deep orebodies of the Tonglushan Copper-Iron Mine using the point pillar upward horizontal layered filling mining method, this paper proposes to carry out experimental study on a panel-based upward approach paste filling mining method, based on the mine's mechanized equipment and upgraded paste filling system. By leveraging recently acquired mechanized mining equipment and an optimized paste filling system at Tonglushan Copper-Iron Mine, the method eliminates stopes' point pillars, enhances ore recovery, reduces underground labor intensity, and improves stope filling efficiency. The findings provide a novel strategy for efficient mining in similar mines.

Keywords: Tonglushan Copper-Iron Mine; mining method optimization; approach; paste filling; mechanization; panel

(上接第34页)

Recovery of silver from zinc hydrometallurgical residue using water leaching-flotation method

Cui Qiangqiang¹, Zhu Feilin¹, Ning Deyang¹, Xie Wei²

(1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology;

2. Sichuan Geophysical Survey and Research Institute)

Abstract: Flotation is a critical method for recovering silver from zinc hydrometallurgical residue. However, soluble ions in the residue, along with parameters such as particle size and mineral composition, significantly influence silver flotation behavior. Through process mineralogy analysis and evaluation of zinc hydrometallurgical parameters, this study optimized and designed an optimal silver recovery flotation process. An improved flotation method for refining silver concentrate from zinc hydrometallurgical residue was proposed. Results demonstrate that the water leaching-flotation method under ambient temperature and pressure achieves higher silver concentrate yield and recovery rates compared to direct flotation. The final rough concentrate attained a silver grade of 3 262.46 g/t with a recovery rate of 81.84 %, enabling efficient silver recovery. This approach provides a reference for high-yield silver concentrate refining, contributes to addressing silver resource scarcity, and offers a new pathway for sustainable silver utilization.

Keywords: flotation method; silver concentrate; hydrometallurgy; zinc; metallurgical residue; process improvement