

# 自动化数字矿山膏体充填系统升级改造及应用

石教华<sup>1</sup>, 毕成<sup>2,3</sup>, 吴爱祥<sup>2,3</sup>, 王勇<sup>2,3\*</sup>, 尹东升<sup>1</sup>, 赵雄文<sup>1</sup>

(1. 大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿;

2. 北京科技大学土木与资源工程学院; 3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室)

**摘要:**通过对铜绿山铜铁矿充填系统存在的矿山充填浓度低、给料井尾砂沉积、现有设备及仪表老旧、井下管道管阻大等问题进行分析,针对性提出了一套完整高效的自动化数字矿山充填系统升级改造方案。开展了改造成本估算和经济效益分析,得到改造成本约为 1 686 万元,直接降低运营及胶结剂成本 311.37 万元/a,表明充填系统改造具有良好的经济效益。改造完成后开展了膏体充填工业试验,结果表明,改造后,铜绿山铜铁矿新膏体充填系统获得了良好的充填生产指标,充填浓度 66 % ~ 69 %,充填流量 100 ~ 120 m<sup>3</sup>/h,胶结剂单耗同比降低 17.8 %,显著节约了充填成本,提高了充填效率,改善了回采环境,保证了充填体质量,降低了堵管、爆管事故发生的风险,充填系统升级改造效果显著,为同类矿山提供了借鉴和参考的范例。

**关键词:**数字矿山;膏体充填;系统改造;充填成本;经济效益;铜绿山铜铁矿

**中图分类号:**TD853.34

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-1277(2024)08-0033-07

**doi:**10.11792/hj20240804

## 引言

金属矿业作为国民经济发展的支柱型产业,为工业发展提供了重要的原材料<sup>[1]</sup>。但是,金属矿开发过程中,尤其是随着矿山进入深部开采,产生的大量尾砂堆存在地表尾矿库,并在井下形成大量的采空区,易引发尾矿库溃坝<sup>[2-3]</sup>、采空区塌陷<sup>[4-5]</sup>、土地与水源污染<sup>[6]</sup>等问题。随着充填技术的不断进步,全尾砂膏体充填因其安全、环保、经济、高效等优势正逐渐成为从源头遏制采空区塌陷与尾矿库溃坝灾害的技术手段,并能最大程度实现尾砂的资源化利用,实现“一废治两害”的目标<sup>[7-8]</sup>。

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”)是大冶有色金属有限责任公司主体矿山之一,始建于 1965 年,在近 60 年的悠久开采历史中先后经历了 4 次开采方式与对象的变化,充填系统也随开采方式与对象的变化经历了多次改、扩建<sup>[9]</sup>。早在 1999 年,铜绿山铜铁矿已经开始建设中国第二套膏体充填系统(现已拆除),采用高效浓密机+立式压滤机联合脱水的两段过滤脱水方式,系统充填能力 40 m<sup>3</sup>/h,料浆浓度为 84 % ~ 87 %,灰砂比为 1:10,设计充填体强度为 28 d 单轴抗压强度 ≥ 3 MPa<sup>[10]</sup>。由于压滤效果不稳定、生产能力不达标等

问题,对充填系统进行了相关技术改造,采用立式砂仓代替立式压滤机对尾砂浆浆进行脱水浓密<sup>[11]</sup>,但仍存在立式砂仓溢流浓度高,底流浓度不稳定等问题,需要配合尾矿库存储立式砂仓溢流的细粒级料浆<sup>[12]</sup>。2018 年,铜绿山铜铁矿为实现无尾排放,采用深锥浓密机代替立式砂仓,通过高效浓密机+深锥浓密机对尾砂实现了高效脱水,并保证了溢流水含固量低于 300 × 10<sup>-6</sup>,深锥底流浓度稳定的技术目标<sup>[13]</sup>,全尾砂除井下充填使用外,还输送至铜绿山铜铁矿露天坑进行生态治理使用。充填系统设计充填料浆浓度 ≥ 68.5 %,但实际运行中井下料浆充填难度大,降低了充填料浆浓度,甚至发生料浆浓度 63 % 仍难以下放的现象,现场充填浓度远低于膏体浓度范围<sup>[14-15]</sup>。

为此,铜绿山铜铁矿于 2023 年再次对充填系统进行升级改造,对充填系统存在的问题进行了归纳总结,提出了充填系统升级改造方案并估算了改造成本,分析了充填系统改造升级的实施效果,为同类矿山的充填系统升级提供了改造思路。

## 1 现有充填系统及存在问题

### 1.1 现有充填系统简介

铜绿山铜铁矿充填系统经历多次改造,目前有

收稿日期:2024-05-15;修回日期:2024-06-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52130404);北京科技大学青年教师学科交叉研究项目(中央高校基本科研业务费专项资金)(FRF-IDRY-GD22-004)

作者简介:石教华(1976—),男,工程师,从事矿山生产和充填管理工作;E-mail:1864688593@163.com

\*通信作者:王勇(1985—),男,教授,从事金属矿膏体充填理论和工艺方面的研究工作;E-mail:wangyong8551@126.com

1 台  $\phi 53$  m 高效浓密机、1 台  $\phi 18$  m 深锥浓密机和老、旧 2 座充填站。每座充填站有 2 套充填系统，共计 4 套完全独立的充填系统。老充填站主要负责 -605 m 及以上水平的充填，具体包括 1<sup>#</sup> 充填系统（井下充填）和 2<sup>#</sup> 充填系统（井下充填及露天坑生态治理）。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 充填系统均各含有 1 座立式砂仓、1 座胶结剂仓、1 套胶结剂给料计量装置及相应的指针式控制仪表；1<sup>#</sup> 充填系统采用 1 台立式搅拌桶搅拌，2<sup>#</sup> 充填系统采用 1 台双轴搅拌机和 1 台高速活化搅拌机联合的二级搅拌。旧充填站负责 -605 m 以下水平的充填，具体包括 3<sup>#</sup> 充填系统（井下充填）和 4<sup>#</sup> 充填系统（露天坑生态治理）；3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 充填系统均各含有 1 座立式砂仓、1 座胶结剂仓、1 套胶结剂给料计量装置及相应的 PLC 集成式控制仪表；3<sup>#</sup> 充填系统采用立式搅拌桶搅拌，4<sup>#</sup> 充填系统采用 1 台双轴搅拌机和 1 台高速活化搅拌机联合的二级搅拌。充填系统外观如图 1 所示。



图 1 铜绿山铜铁矿充填系统外观

Fig. 1 Appearance of the filling system at Tonglushan Cu - Fe Mine

铜绿山铜铁矿充填系统工艺流程如图 2 所示。2 座充填站共用 1 台  $\phi 18$  m 深锥浓密机，选矿厂尾矿浆经  $\phi 53$  m 高效浓密机浓缩形成浓度 35 % ~ 40 % 的全尾砂浆，再由渣浆泵输送至深锥浓密机。根据充填需求，深锥浓密机底流通过泵送至老、旧充填站的 4 套充填系统，分别经计量系统添加胶结材料后，制备成浓度 65 % 左右的充填料浆，制备好的料浆根据要求，井下充填时通过地表钻孔自流进入井下，露天坑生态治理时则采用渣浆泵泵送至露天坑。

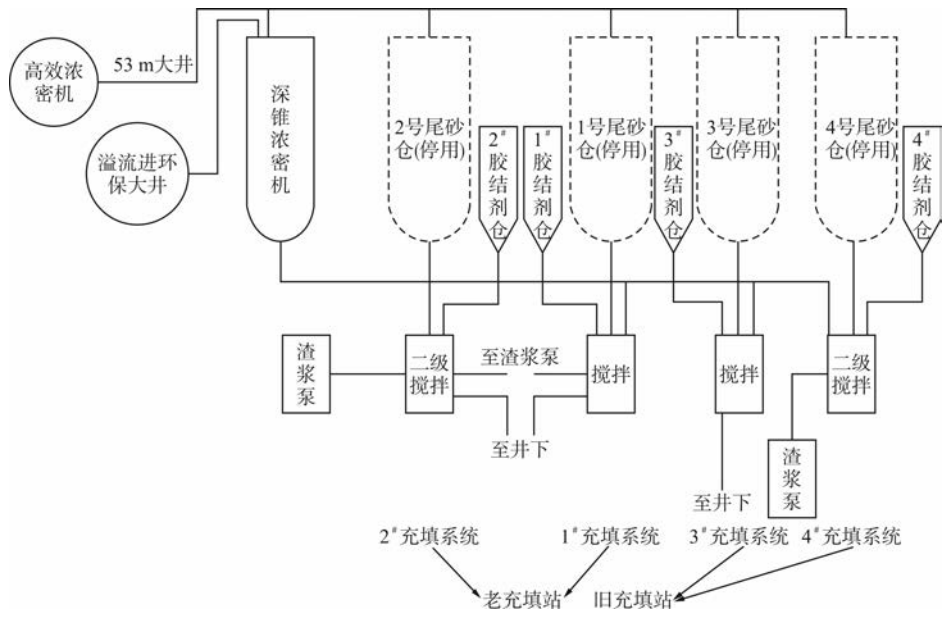


图 2 铜绿山铜铁矿充填系统工艺流程

Fig. 2 Process flow of the filling system at Tonglushan Cu - Fe Mine

铜绿山铜铁矿井下充填时，料浆通过地表（标高 40 m）的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、11<sup>#</sup> 钻孔自流输送至井下，输送流量 50 ~ 90 m<sup>3</sup>/h。其中，老充填站的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 及 11<sup>#</sup> 钻孔到达井下 -245 m 水平，井下充填管道布置如图 3 - a) 所示；旧充填站的 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 钻孔到达井下 -305 m 水平，井下充填管道布置如图 3 - b) 所示；5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 钻孔到达井下 -185 m 水平。其中，11<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 及 6<sup>#</sup> 钻孔由于使用时间长、磨损严重等问题已停止使用。充填主管道采用材质为带陶瓷内衬的陶瓷复合充填管，管道外径为 146 mm、108 mm，管道壁厚均为 11 mm，不同尺寸管道布置如图 3 所

示；进入采场的充填管道为外径 108 mm、壁厚 11 mm 的 PE 塑料管。

### 1.2 存在的主要问题

1) 充填料浆浓度低，充填成本高。铜绿山铜铁矿充填站建设时间长，改造次数多，管道布置复杂，管道输送阻力较大，现场生产时为了避免井下管路堵管事故，下放料浆浓度降低至 63 % 以下，远低于设计的膏体充填浓度标准。料浆浓度低导致料浆易沉降离析，料浆大量泌水导致充填体强度及充填采场环境较差。同时，为保证充填体强度，提高了充填灰砂比，充填成本居高不下。

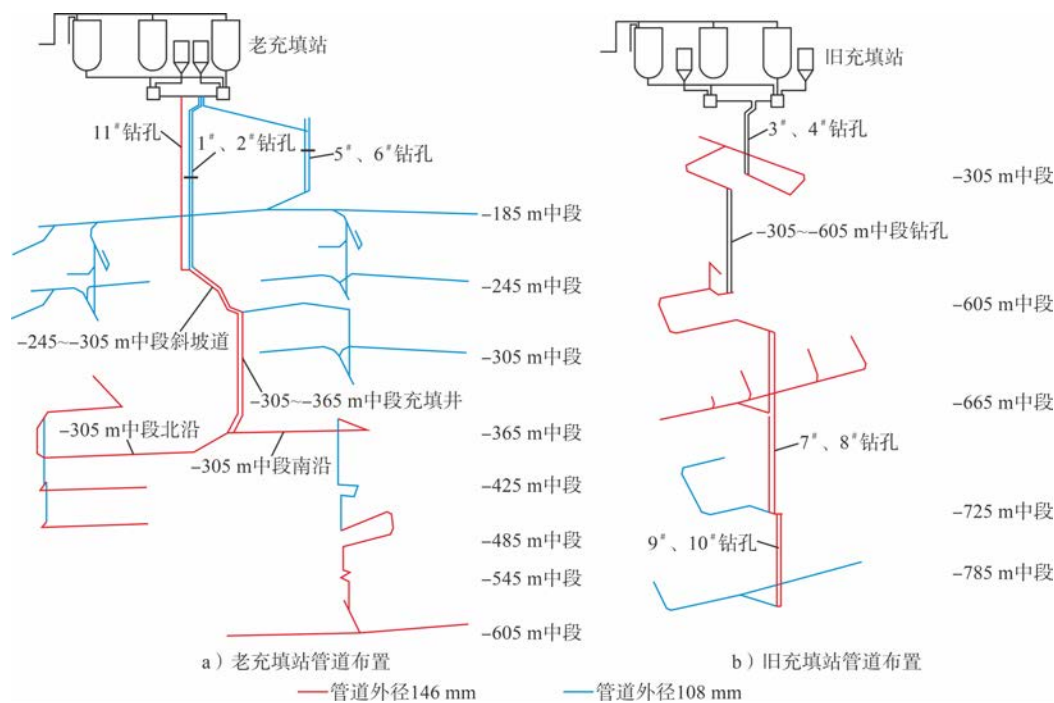


图 3 铜绿山铜铁矿充填管道布置

Fig. 3 Filling pipeline layout at Tonglushan Cu – Fe Mine

2) 深锥浓密机给料井尾砂沉积, 絮凝剂添加量高。铜绿山铜铁矿采用高效浓密机 + 深锥浓密机脱水的工艺流程。选矿厂全尾砂浆经  $\phi 53\text{ m}$  高效浓密机添加  $16\text{ g/t}$  絮凝剂后初次絮凝浓密, 泵送至深锥浓密机处再次添加  $23\text{ g/t}$  的同种絮凝剂, 两段絮凝后总絮凝剂添加量达到  $39\text{ g/t}$ , 絮凝剂添加量过高; 深锥浓密机的进料浓度为  $35\% \sim 40\%$ , 流量为  $300 \sim 340\text{ m}^3/\text{h}$ , 给料井处料浆不能达到设计的料浆流态, 料浆和絮凝剂不能均匀混合, 并在给料井处形成明显的料浆沉积。沉积料浆如图 4 所示, 沉积体的存在造成了絮凝剂与料浆混合时间减少, 进一步降低了料浆与絮凝剂混合的效果。



图 4 深锥浓密机给料井内料浆沉积

Fig. 4 Slurry deposition in feedwell of deep-cone thickener

3) 现有充填站设备、仪器仪表老旧, 自动化程度低。铜绿山铜铁矿老、旧充填站建成时间长, 历史上经历了多次改造。现在充填站内空间布局混乱, 设备

维修、更换困难, 充填站内各个系统的设备存在问题较多。

(1) 胶结剂储存及计量系统。铜绿山铜铁矿共有 4 座  $200\text{ t}$  胶结剂仓, 胶结剂仓使用年限较长, 仓顶除尘器、安全阀等均已损坏; 仓体有不同程度的裂缝, 经修补后仍易造成胶结剂板结。计量系统的冲板流量计和微分秤均损坏, 胶结剂计量通过螺旋给料机频率确定, 计量准确度较低。

(2) 料浆制备系统。现有料浆制备系统搅拌效果差、料浆制备不均匀; 立式搅拌桶液位靠经验摸索确定, 不能有效控制搅拌时间; 双轴搅拌机 + 高速活化二级搅拌系统的高速活化搅拌机损坏, 仅由 1 台 SJ03 型双轴搅拌机制备料浆。

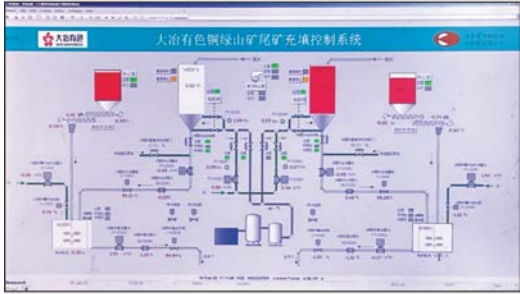
(3) 泵送系统。铜绿山铜铁矿泵送系统主要针对露天坑生态治理使用, 原采用活塞式工业泵, 设计泵送浓度  $\geq 65\%$ 。由于设备关键零件磨损快, 改用流量  $100\text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程  $20\text{ m}$  的渣浆泵泵送, 泵送浓度  $\leq 50\%$ , 严重影响了露天坑生态治理的效果和进度。

(4) 控制系统。铜绿山铜铁矿充填站的控制系统老旧, 控制复杂。老、旧充填站和深锥浓密机各使用 1 套独立的控制系统, 系统扩展性差、网络传输速率低、历史数据不完备, 控制复杂、难度大; 老充填站控制系统如图 5 - a) 所示, 仍使用指针式仪表, 旋钮式开关, 不能满足充填自动化、数据化要求; 旧充填站控制系统如图 5 - b) 所示, 其建设时间较长, 数据接口、控制系统功能等不能满足铜绿山铜铁矿近年建设数字矿山的操作需求; 深锥浓密机及底流输送分配系

统采用 PLC 集成操控系统,留有扩展接口供系统远程控制及优化使用。



a) 老充填站控制系统



b) 旧充填站控制系统

图5 老、旧充填站控制系统

Fig. 5 Old and previous filling station control systems

4)井下充填管道老化、管径选择不合理。铜绿山铜铁矿建设时间长,井下充填管道设计、安装经历多个阶段,管道使用时间长,腐蚀、尾砂沉积等情况较多,堵管、爆管等事故风险较大;主管道采用管道外径146 mm、108 mm 的2种陶瓷复合耐磨充填管,2种充填管随意混用,管径的变化导致料浆输送阻力大大增加,影响了管道输送的料浆浓度;进入采场使用外径108 mm 的PE 塑料管,且未进行固定,采场距离主管线较长时,管道摆动较大;PE 塑料管最大承压能力1 MPa,充填时管道容易破裂,造成爆管事故时有发生。

2 充填系统改造

为解决铜绿山铜铁矿充填系统存在的问题,提高充填浓度至膏体水平,亟须建立一套先进的自动化新膏体充填系统。通过对铜绿山铜铁矿充填站现场情况分析,结合各充填系统服务中段的生产年限等实际生产要求,综合考虑改造成本与经济效益,铜绿山铜铁矿联合北京科技大学等单位,制定了铜绿山铜铁矿充填系统改造方案,并于2023年进行了充填系统改造。改造保留现有 $\phi 18\text{ m}$ 深锥浓密机;优化原有充填工艺流程,取消 $\phi 53\text{ m}$ 高效浓密机;废弃原有老、旧2座充填站,新建1座新膏体充填站,满足井下充填及露天坑生态治理的充填需求;优化井下充填管道,全部采用外径146 mm 的16Mn 钢管,提高井下充填能力,降低充填阻力。

2.1 充填工艺流程优化

2.1.1 建设新膏体充填站

现有老、旧充填站使用年限长,经过多次系统改造,目前充填站内空间复杂,可供改造空间较小,且现有设备老旧,不能满足铜绿山铜铁矿建设数字化矿山的需求。针对铜绿山铜铁矿建设先进自动化充填系统的要求,通过经济对比分析,废弃原有老、旧2座充填站,建设1座新膏体充填站,简化原有充填工艺流程,降低控制难度,提高充填系统自动化水平。

2.1.2 选矿厂供砂流程优化

铜绿山铜铁矿原有高效浓密机+深锥浓密机脱水的工艺流程复杂,在铜绿山铜铁矿应用中存在较多问题,因此将选矿厂供砂工艺流程进行优化,直接采用深锥浓密机进行全尾砂浆的脱水浓密。全尾砂浆由选矿厂总长720 m 的DN350 管道直接泵送至深锥浓密机,改造前后的选矿厂供砂工艺流程如图6所示。针对选矿厂全尾砂浆泵送距离和流量增加,更换选矿厂全尾砂料浆泵,将原有2台ZBD250-530 渣浆泵(扬程40 m,流量 $870\text{ m}^3/\text{h}$ ,功率160 kW)更换为2台TD200-740 渣浆泵(扬程60 m,流量 $870\text{ m}^3/\text{h}$ ,功率250 kW)。

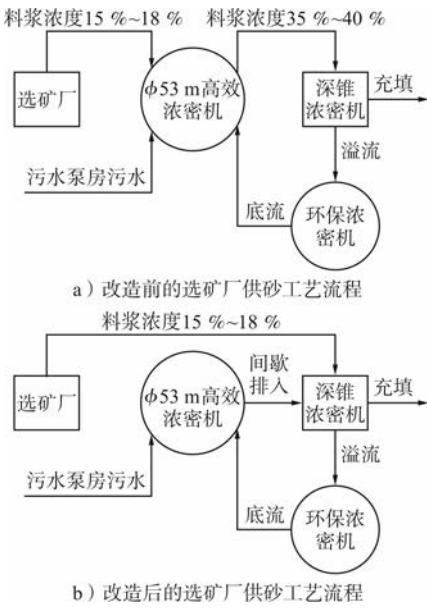


图6 改造前后选矿厂供砂工艺流程对比

Fig. 6 Comparison of the tailings supply process in the concentrator before and after renovation

针对改造后深锥浓密机进料流量增加、进料浓度降低的情况,将深锥浓密机溢流管尺寸由DN400 更换为DN600,管路布置不变;溢流槽尺寸由500 mm×260 mm(深×宽)更换为600 mm×350 mm(深×宽);并关闭一个给料井的自动稀释口。

2.1.3 新膏体充填工艺流程

改造完成后的新膏体充填工艺流程如图7所示,

选矿厂全尾砂直接输送至深锥浓密机,深锥浓密机的溢流水流入环保大井;深锥浓密机的底流通过渣浆泵泵送至新膏体充填站,新膏体充填站的3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>充填系统互为备用;搅拌系统由一套二级双轴卧式搅拌系统组成;井下充填通过3<sup>#</sup>钻孔和新建12<sup>#</sup>钻孔自流输送,设计流量120 m<sup>3</sup>/h;露天坑生态治理通过柱塞泵泵送,设计流量120 m<sup>3</sup>/h。根据铜绿山铜铁矿充填需求,设计井下充填每天工作10 h,露天坑生态治理每天工作14 h,在保证泥层高度在一定范围内的条件下,调节井下及露天坑充填时间分配。

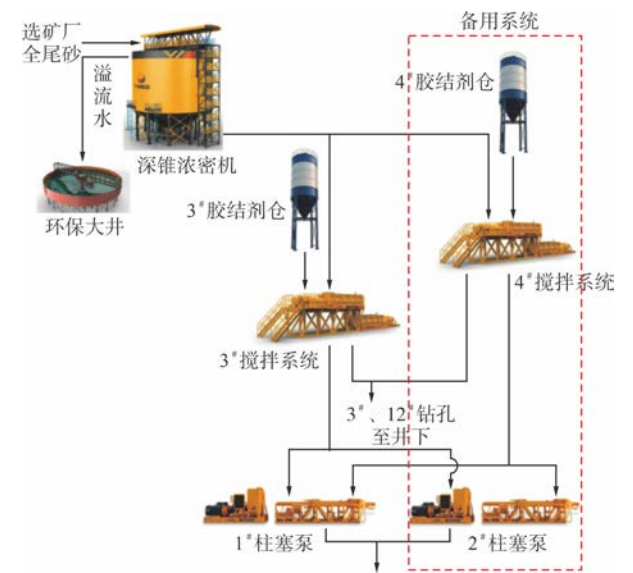


图7 新膏体充填工艺流程

Fig.7 Flow chart of the new paste filling process

2.2 新膏体充填系统

铜绿山铜铁矿充填系统改造保留原有的深锥浓密机,建设的新膏体充填站主要由胶结剂存储及计量系统、料浆制备系统、泵送系统及自动控制系统组成。

2.2.1 胶结剂存储及计量系统

考虑到胶结剂消耗量,新建2座300 t胶结剂仓,仓内设置1套采用仓壁击打器的自动破拱装置,防止胶结剂板结;同时仓顶设置雷达料位计、安全阀、除尘器,保证胶结剂仓使用安全,料位准确。计量系统采用双管螺旋给料机+微粉秤,微粉秤量程0~20 t/h,保证胶结剂下料顺畅,计量准确。

2.2.2 料浆制备系统

针对铜绿山铜铁矿全尾砂膏体料浆设计浓度较高的问题,采用2台JSH5000双轴卧式搅拌机组成二级搅拌系统,并配置ZYLD22雷达料位计、GJ941X-16L-150电动管夹阀、DN150电磁流量计、Na22浓度计、DMC52除尘器,形成一套完整的、自动化程度极高的料浆制备系统。

2.2.3 泵送系统

针对原有活塞式工业泵关键零件易磨损等问题,

提出了将原有柱塞泵泵头S摆阀改造为锥阀,将改造后的柱塞泵安装在新膏体充填站中,降低改造成本,保证膏体料浆输送。

2.2.4 自动控制系统

为将铜绿山铜铁矿建设成高度自动化的先进膏体充填系统,采用PLC控制系统,建立如图8所示的自动控制系统网络。将原有深锥浓密机控制系统合并控制,并配置浓度计、流量计、液位计、雷达料位计、电动三通阀、电动球阀、电动管夹阀等仪器仪表,实现新膏体充填系统“一键启停”,自动调节柱塞泵液位,自动计量添加胶结剂,全流程远程控制,全过程数据自动记录的功能,为铜绿山铜铁矿建设成为数字化矿山奠定基础。

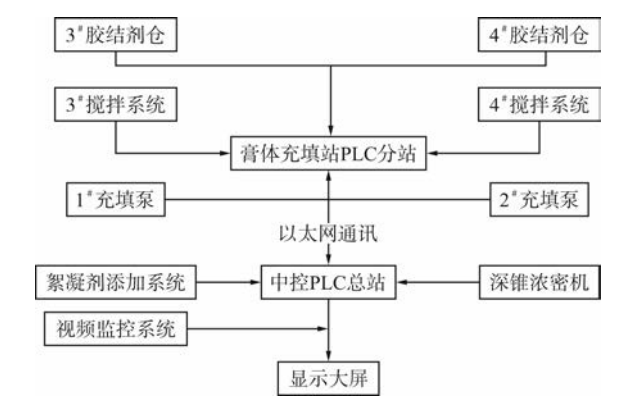


图8 自动控制系统网络

Fig.8 Automatic control system network

2.3 井下充填管道改造

铜绿山铜铁矿现有井下充填管道铺设较为完备,考虑到矿山生产计划安排紧张,因此本着系统优化高效、经济、快速合理的原则进行改造。

2.3.1 充填钻孔服务水平

原有充填钻孔由老充填站的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>钻孔服务-605 m以上中段,旧充填站的3<sup>#</sup>钻孔服务-605 m以下中段,在料浆浓度达到66%~68%的膏体浓度水平后,现有充填钻孔不能满足-305 m中段~-605 m中段的自流输送充填要求。因此,新建12<sup>#</sup>钻孔服务-425 m中段及以下水平;原有-305 m中段~-425 m中段借助三通阀门由3<sup>#</sup>钻孔服务。改造后的钻孔充填区域如图9所示,改造后井下采场的充填倍线最大值为4.61,井下区域均可自流输送充填。

2.3.2 井下管道更换

由于井下充填管道管径变化复杂,充填料浆输送阻力过大,将全部外径108 mm管道更换为外径146 mm管道。通过沿程阻力及管道压力计算,推算出浓度66%~68%的膏体料浆井下管道自流输送范围如表1所示。由表1可知:井下全部充填管道采用外径146 mm的充填管后,井下-305 m中段以下

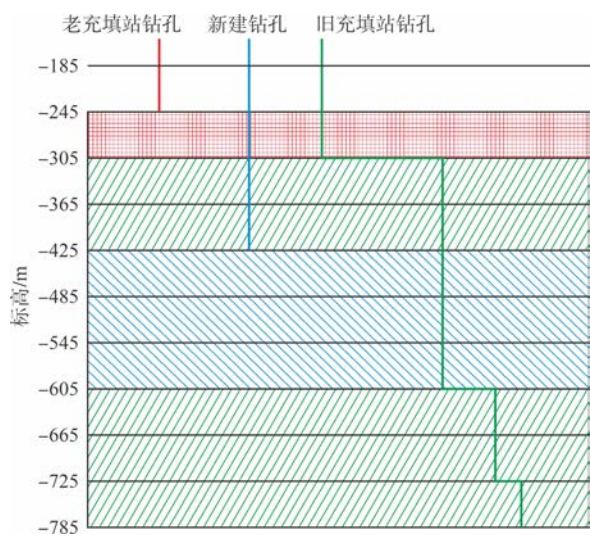


图9 管道充填区域示意图

Fig.9 Diagram of the pipeline filling area

表 1 新膏体充填自流输送范围

Table 1 Self-flow conveying range for new paste filling

| -305 m 中段以上 | -305 m 中段 | -365 m 中段 |       | -425 m 中段 |       | -485 m 中段 | -545 m 中段 | -605 m 中段 |         | -665 m 中段 | -725 m 中段 |       | -785 m 中段 |
|-------------|-----------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|-------|-----------|
| 不能自流        | 南沿远端      | 南沿        | 北沿    | 南沿        | 北沿    | 南沿        | 北沿        | 南沿        | 北沿      | 南沿        | 北沿        | 南沿    | 北沿        |
|             | 840 m     | 500 m     | 500 m | 1 160 m   | 630 m | 1 240 m   | 1 300 m   | 850 m     | 1 090 m | 960 m     | 1 260 m   | 400 m | 1 230 m   |
|             |           |           |       |           |       |           |           |           |         |           |           | 700 m | 1 260 m   |
|             |           |           |       |           |       |           |           |           |         |           |           |       | 870 m     |

浓密机作为环保浓密机收集厂区污水、深锥浓密机溢流水等,不再添加絮凝剂,降低了絮凝剂添加量、电费成本及相关的人工成本。

1)降低絮凝剂添加量:取消  $\phi 53$  m 高效浓密机,减少了絮凝剂添加量。按絮凝剂添加量 16 g/t、絮凝剂单价 1.3 万元/t、尾砂 3 200 ~ 3 700 t/d、工作时间 330 d/a 计算,每年减少絮凝剂添加量约 19.5 t,絮凝剂成本每年减少 25.40 万元。

2)降低电费成本:选矿厂底流槽处的渣浆泵由原功率 165 kW 更换为 250 kW,按工作时间 330 d/a、每天 24 h、电费 0.65 元/(kW · h) 计算,每年增加成本 43.76 万元; $\phi 53$  m 高效浓密机底流泵沿用现有 185 kW 渣浆泵,按照每周 1 次的频率开启,每次开启

膏体料浆全部可以自流输送至采场。同时,针对进入采场后外径 108 mm 的 PE 塑料管承压能力不足、管道振动大等问题,将进入采场的管道更换为外径 146 mm 的耐压塑料管,解决了膏体料浆进入采场最后 100 m 的难题。

3 充填系统改造成本及效果分析

3.1 投资成本估算

充填系统改造工程投资成本主要包括充填站改造投资及井下管道改造投资,总计约 1 686 万元。其中,设备及厂房建设费 1 467 万元,安装、拆除及调试费约 179 万元,设计费 40 万元。

3.2 运营及充填材料经济效益分析

3.2.1 选矿厂供砂系统运行成本

选矿厂尾砂直接输送至深锥浓密机, $\phi 53$  m 高效

2 h 计算,每年降低成本 93.99 万元。因此,电费每年减少 50.23 万元。

3)降低人工成本: $\phi 53$  m 高效浓密机无需专人值守,每年降低人工成本 6 万元。

综上所述,选矿厂供砂系统改造后每年可节省运营成本为 81.63 万元。

3.2.2 胶结剂成本

通过充填系统改造升级,实现铜绿山铜铁矿由高浓度充填向膏体充填的跨越,充填质量显著提升,经充填体配比试验结果分析,充填浓度 68 % 条件下,胶面层充填灰砂比 1:9、非胶面层灰砂比为 1:17 即可满足井下充填要求<sup>[16]</sup>。以 2022 年铜绿山铜铁矿胶结剂用量统计为例,改造前后胶结剂用量对比如表 2 所示。

表 2 铜绿山铜铁充填系统改造前后胶结剂用量对比

Table 2 Comparison of cementing agent dosage before and after filling system renovation at Tonglushan Cu - Fe Mine

| 序号 | 项目         | 充填量/<br>m <sup>3</sup> | 改造前<br>灰砂比 | 改造后<br>灰砂比 | 改造前<br>胶结剂用量/t | 改造后<br>胶结剂用量/t | 减少<br>胶结剂用量/t |
|----|------------|------------------------|------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| 1  | 井下胶结铺面     | 26 690                 | 1:7        | 1:9        | 4 816          | 3 365          | 1 451         |
| 2  | 采场首层铺底胶结充填 | 10 500                 | 1:7        | 1:9        | 1 895          | 1 324          | 571           |
| 3  | 矿房采场胶结充填   | 211 700                | 1:13       | 1:17       | 20 567         | 14 931         | 5 636         |
| 4  | 矿柱采场胶结充填   | 143 350                | 1:22       | 1:22       | 8 230          | 8 230          | 0             |
| 合计 |            | 392 240                |            |            | 35 508         | 27 850         | 7 658         |

由表 2 可知:充填浓度达到膏体充填标准料浆浓度 68 % 时,井下充填铺底及铺面(高强度充填)

胶结剂用量比改造前减少 2 022 t,矿房采场充填胶结剂用量比改造前减少 5 636 t;按胶结剂单价

300 元/t 计算,2022 年胶结剂成本比改造前减少了 229.74 万元。

3.3 充填系统改造效果

2024 年 4 月,铜绿山铜铁矿充填系统改造完成,

充填系统调试结束后,进行了为期 1 个月的现场工业试验,记录试验采场的充填料浆浓度、流量、充填体强度、溢流水状态等,计算得出胶结剂单耗等参数,结果如表 3 所示。

表 3 充填系统改造效果对比

Table 3 Performance of the filling system before and after renovation

| 项目  | 料浆浓度/% | 灰砂比 | 充填体强度/MPa |      |      | 胶结剂单耗/<br>(t·m <sup>-3</sup> ) | 充填流量/<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 充填管道<br>稳定性 | 井下泌水<br>情况 | 中控人员<br>数量 | 溢流水含固量/<br>×10 <sup>-6</sup> |
|-----|--------|-----|-----------|------|------|--------------------------------|---------------------------------------------|-------------|------------|------------|------------------------------|
|     |        |     | 3 d       | 7 d  | 28 d |                                |                                             |             |            |            |                              |
| 改造前 | ≤65    | 1:7 | 0.72      | 1.29 | 2.32 | 0.144 0                        | 40~70                                       | 振动较大        | 泌水量大       | 3          | <300                         |
| 改造后 | 66~69  | 1:9 | 0.78      | 1.17 | 2.71 | 0.118 4                        | 100~120                                     | 基本无振动       | 基本不泌水      | 2          | <300                         |

由表 3 可知:改造后在稳定的自流输送前提下,料浆浓度提高至 66 % ~ 69 %,达到了膏体充填水平;在充填体强度保持基本不变的前提下,灰砂比降低至 1:9,胶结剂单耗由原来的 0.144 0 t/m<sup>3</sup> 降低至 0.118 4 t/m<sup>3</sup>,胶结剂单耗同比降低了 17.8 %,降低了充填成本;中控人员由原来的 3 人减少至 2 人,减小了劳动强度的同时也降低了充填站运营成本;井下管道振动减小、泌水量减少。

总体来说,改造后的新膏体充填工艺流程顺畅,运行可靠,实现了高度自动化的全尾砂膏体充填,取得了明显的经济效益和充填效果。

4 结 论

1)通过对铜绿山铜铁矿现有充填工艺存在的问题进行细致分析,并结合现场生产实际情况,针对性地对充填系统进行优化及改造,实现了铜绿山铜铁矿充填浓度从不稳定的高浓度充填到稳定的膏体充填的跨越,有效解决了充填成本高、设备老旧、自动化程度低等问题,形成了一套完整、先进、高效的自动化膏体充填系统,为加快建设铜绿山铜铁矿数字化进程奠定了良好的基础。

2)铜绿山铜铁矿充填系统改造具有良好的经济效益,充填系统改造总投资约 1 686 万元,改造后可直接降低运营和胶结剂成本约 311.37 万元/a,充填成本显著降低,实现了矿山的降本增效。

3)充填系统优化效果显著,改造后井下充填浓度由≤65 % 提高到 66 % ~ 69 %;试验采场胶结剂单耗由 0.144 0 t/m<sup>3</sup> 降低至 0.118 4 t/m<sup>3</sup>;充填流量由 40~70 m<sup>3</sup>/h 提高到 100~120 m<sup>3</sup>/h;在满足充填体强度要求的同时减少了井下料浆泌水量,改善了回采环境;同时,井下管道振动减小,堵管、爆管等事故发生几率显著降低。

[参 考 文 献]

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等. 金属矿山地下开采关键技术新进展

与展望[J]. 金属矿山,2021(1):1-13.

[2] 闪淳昌,张振东,钟开斌,等. 襄汾“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故处置过程回顾与总结[J]. 中国应急管理,2011(10):13-18.

[3] SANTAMARINA J C,TORRES-CRUZ L A,BACHUS R C. Why coal ash and tailings dam disasters occur[J]. Science,2019,364(6 440):526-528.

[4] 刘传正,肖锐铨. 湖北远安盐池河 1980 年“6·3”山崩灾难成因分析[J]. 灾害学,2021,36(2):130-133,150.

[5] 张鹏,孟航. 矿山塌陷区生态环境恢复研究及应用[J]. 黄金,2020,41(2):69-72.

[6] HE X,YUHUA Z H,QAIDI S,et al. Mine tailings-based geopolymer:A comprehensive review[J]. Ceramics International,2022,48(17):24 192-24 212.

[7] 吴爱祥,杨莹,程海勇,等. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报,2018,40(5):517-525.

[8] 吴爱祥,李红,杨柳华,等. 深地开采,膏体先行[J]. 黄金,2020,41(9):51-57.

[9] 周科礼,霍晓锋,苟永刚,等. 铜绿山矿新型胶结充填材料工业化试验研究[J]. 采矿技术,2019,19(1):34-37.

[10] 刘乃锡. 铜绿山矿膏体泵送充填工艺的实施及其设备[C]//中国有色金属学会. 第四届全国充填采矿会议论文集. 长沙:中国有色金属学会,1999:16-20.

[11] 杨清平,冷复生. 胶结充填工艺技术在铜绿山矿的应用[J]. 采矿技术,2001,1(1):17-19.

[12] 冯和平,刘文. 铜绿山矿立式砂仓充填系统的自动控制设计[J]. 采矿技术,2009,9(6):70-72.

[13] 鲁超峰. 湖北铜绿山矿全粒级尾砂固结工艺研究[J]. 现代矿业,2018,34(6):169-171,175.

[14] 沈维华. 铜绿山矿全尾砂充填工艺存在的问题及对策[J]. 采矿技术,2022,22(2):149-151.

[15] 严鹏,王勇,吴爱祥. 全尾砂膏体充填技术规范制定研究[J]. 黄金,2020,41(7):36-38.

[16] 赵雄文,熊国雄,毕成,等. 某铜矿全尾砂膏体充填配比优化初步研究[J]. 现代矿业,2024,40(2):236-238,242.