

金属矿山充填采矿方案研究

邱 臣

额尔古纳诚诚矿业有限公司 内蒙古 呼伦贝尔 022250

摘要: 本研究基于东郡锌铅银矿X-2矿段实际工程案例,系统阐述了井下充填站的设计要点与运行机制。围绕工艺组织、能力核算、设备配置及自动化控制等方面展开深入剖析。通过对料浆制备能力、原材料消耗、电力负荷与智能监控系统的详尽描述,揭示了现代金属矿山充填系统向集约化、精细化发展的趋势。研究成果可为类似地下金属矿充填工程提供可复制的技术路径与实践参考。

关键词: 金属矿山充填; 采矿方法; 技术路径

引言: 随着深部资源开发力度加大,传统地表集中充填模式暴露出输送能耗高、系统响应慢等问题。越来越多矿山转向井下分布式充填体系建设。相较于地表充填站,高寒地区井下充填站可有效抵御低温对料浆输送和设备运行的不利影响,大幅降低地表管线防冻维护成本,同时缩短料浆输送距离以减少能耗损失,这也是本项目采用井下充填模式的核心优势之一。

1 工艺流程组织与物流路径优化

从原料进场到料浆输出全过程遵循闭环控制原则,各环节之间设有明确接口标准与缓冲机制。脱水尾砂由选厂经汽车运抵后卸入井下尾砂硐室,含水率控制在10%以内,每日运输量约为1012t。铲车负责将物料推送至给料机入口,启动后经出料皮带送至斜皮带起点位置,全程封闭运行,减少扬尘扩散。斜皮带末端直接对接搅拌槽进料口,实现无缝衔接,避免中途洒落造成浪费或

安全隐患。胶结料运输方式为罐车气力输送,现场无需大型起重设备即可完成上料操作。粉体通过风送管道进入水泥仓,过程密闭高效,不受天气影响。当需要添加时,微粉秤根据设定值自动开启,精确称重后由螺旋输送机送入搅拌槽,误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。供水系统依托井下生产水池,内置两台 $Q = 63\text{m}^3/\text{h}$ 潜水泵互为备用,水源稳定可靠,水质符合工业用水标准^[1]。搅拌环节是整个流程的核心节点,采用高浓度立式搅拌槽进行强制混合,电机功率45kW,每小时可制备 100m^3 合格料浆。搅拌时间设定为5~8分钟,确保尾砂、水泥与水充分融合,形成流动性良好且稳定性高的膏状体。搅拌完成后,料浆流入加压泵吸入口,由拖泵加压推送至井下采空区,输送压力可达4MPa,足以克服沿程阻力完成700~1000m范围内的远程输送任务。如下图1所示,为充填站设备布置图,用以直观展示各主要设备的空间分布关系。

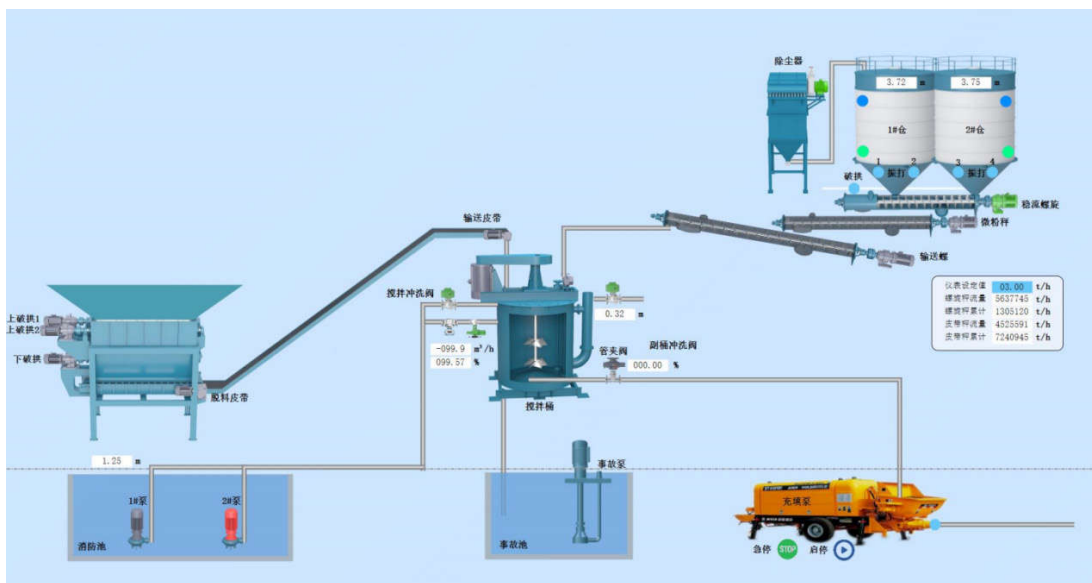


图1 充填站设备布置图

2 充填能力核算与原材料消耗分析

2.1 日均充填体积与系统产能匹配

根据X-2矿段年生产规模37.5万t矿石、矿石体重 $2.92\text{t}/\text{m}^3$ 、年工作日210天计算,得出平均日需充填体积为 611.5m^3 。考虑到充填体在输送过程中的沉缩效应与沿途流失损耗,引入沉缩比 $k_1 = 1.2$ 与流失系数 $k_2 = 1.05$ 进行修正,得到实际日需料浆体积为 771m^3 。这一数值成为确定制备系统能力的基础依据。设计配置一套额定产能为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 的料浆制备系统,理论上可在7.71小时内完成全天任务。但结合现场作业制度——每天两班制,每班有效充填时间约4小时,合计8小时作业窗口——实际运行中留有足够余量应对突发情况或临时增产需求。即便在极端工况下出现短暂延误,系统仍能在下一班次补足进度,不会造成长时间停工^[2]。更重要的是,该产能设计兼顾了未来扩产可能性。当前采矿方法主要包括房柱嗣后充填法、浅孔留矿嗣后充填法及分段空场嗣后充填法,各类方法对充填节奏的要求存在差异。随着后续开采深度增加,部分区域可能需要更高强度的支护措施,进而提高胶结充填比例。现有系统具备一定超前储备能力,无需立即扩建即可适应中期发展需要。

2.2 胶结与非胶结充填比例设定依据

基于井下地质条件与采场结构特征,充填作业采取差异化配比策略:15%的采空区实施胶结充填,灰砂比严格控制在1:6;其余85%区域采用非胶结尾砂充填。此种分配并非随意设定,而是建立在大量实测数据与力学模拟基础上的结果。对于围岩完整性较差、顶板暴露面积较大或存在构造破碎带的区域,必须通过胶结增强整体稳定性,防止后期发生塌陷事故。此类区域通常位于主巷道交叉口、大跨度硐室上方或临近断层带,安全等级要求较高,需依靠具有一定抗压强度的固化体提供支撑力。而非胶结充填主要用于边角残矿回收、低应力区回采或临时隔离用途,侧重于体积填充与应力转移功能,无需过高强度。两种模式共用同一套制备系统,通过调节供水量与水泥添加速度实现快速切换。控制系统预设两组参数模板,操作员只需选择对应模式,系统即自动调整各执行机构动作。例如,在胶结模式下,微粉秤启动供料,水量相应减少以维持目标浓度68%;而在非胶结模式下,水泥系统停运,仅尾砂与水参与搅拌,浓度仍保持一致,确保流变性能稳定^[3]。该策略既节约了胶凝材料成本,又避免了“一刀切”带来的资源浪费。据统计,全年仅需消耗水泥4206.41t,占全部耗材总量不足3%,却能有效保障关键部位的安全稳定。相比之下,若全部采用胶结充填,则水泥年耗将超过2.8万吨,直接导

致运营成本飙升,经济效益大幅下降。

2.3 原材料日耗量与运输组织安排

正常生产状态下,每日需消耗脱水尾砂911t、胶结料20t、生产水438t。由于尾砂含水率为10%,实际运输量需按湿重折算,即每天需由地面运往井下1012t湿砂。此项运输任务由重型自卸卡车承担,每车装载约30t,日均出动34趟次,高峰期可达40趟以上。矿山采用向选厂拉运矿石返回的空车拉运尾砂,并规划了最优行车路线,避开主运输干线,减少交叉干扰。同时,在井下610m平硐内设立尾砂硐室,有效容积约 600m^3 ,一旦井下设备检修或突发停电,仍可维持数小时供料。水泥供应依赖本地供应商,采用散装罐车配送,每次运输25~30t,每月进货1~2次即可满足需求。罐车到达后直接连接风送管道,30分钟内可完成卸料,全过程无人工接触,降低污染风险。仓内料位由雷达物位计实时监测,低于警戒线时自动触发补货指令,实现智能化库存管理^[4]。水资源取自矿区既有生产水系统,管网已覆盖至610m中段,接口位置距充填站不足50m,引水便捷。水池容量 100m^3 ,配备两台潜水泵交替运行,单台即可满足最大瞬时流量需求。供水管路上安装电磁流量计与电动调节阀,可根据搅拌槽实时浓度反馈动态调整补水量,确保料浆质量始终处于受控状态。如下表1所示,为充填耗材量计算表,用以详细列出不同充填类型下的单位消耗指标、日耗总量与年耗总量。

表1 充填耗材量计算表

名称	单位	37.5万t/a		
		胶结充填	非胶结	
浓度	%	68	68	
砂灰比		6	—	
所占比例	%	15	85	
充填料浆量	m^3/d	771		
料浆容重	t/m^3	1.7840	1.7766	
每 m^3 单耗	胶结材料	t/m^3	0.1733	0.0000
	尾砂	t/m^3	1.0398	1.2081
	水	t/m^3	0.5709	0.5685
加权每 m^3 单耗	胶结材料	t/m^3	0.0260	
	尾砂	t/m^3	1.1829	
	水	t/m^3	0.5689	
日耗	胶结材料	t/d	20	
	尾砂	t/d	911	
	水	t/d	438	
年耗	胶结材料	t/a	4206.41	
	尾砂	t/a	191406.91	
	水	t/a	92053.32	

经计算,正常生产时日耗尾砂911t,日耗胶结料20t。脱水尾砂含水量按照10%计算,每天需运输脱水尾砂1012t。

3 电气动力配置与自动化控制系统构建

3.1 电力负荷分布与供配电方案实施

全站设备安装总功率为380.1kW,其中工作功率为365.1kW,主要用电设备集中在搅拌系统与加压输送环节。拖泵功率高达220kW,占总负荷比重超过60%,属于一级重要负荷,必须确保供电连续性。其次为搅拌槽45kW、斜皮带15kW、潜污泵15kW(双台)、微粉秤8kW等,其余辅助设备功率较小但数量较多,合计约占15%。为满足井下特殊环境要求,新建一座独立变电所,位于充填硐室旁侧,电源引自就近10kV高压线路。配置KKSG-400/10/0.4kV矿用防爆型变压器一台,额定容量400kVA,低压侧电压等级0.4kV,满足全站负载需求并留有适当裕度。高压侧设GKG型开关柜一台,具备电流速断、过流保护与单相接地检测功能;低压侧配置GKD型开关柜五面,分别承担动力分配、无功补偿与照明供电任务。系统设置动态无功补偿装置,补偿后功率因数达到0.95,视在功率降至269.0kVA,有效降低线路损耗与变压器温升。全年预计耗电量为115.0万kWh,按现行电价测算,电费支出约占运营成本的12%左右。所有电动机均选用高效节能型号,符合国家最新能效标准,变压器亦采用低损耗硅钢片铁芯结构,进一步压缩空载与负载损耗。接地系统严格按照《矿山电力设计标准》GB50070-2020执行,主接地网采用40×4镀锌扁钢沿硐壁敷设,分支线为25×4镀锌扁钢,所有电气设备外壳、电缆接线盒、移动工具金属部件均可靠连接至接地网,确保接触电压不超过40V安全限值。控制室与值班区设置局部等电位联结端子箱,防范雷击与静电危害。

3.2 自动化监控范围与仪表选型原则

充填过程纳入全站自动化控制系统,监控范围涵盖料浆制备全流程,重点包括电气设备启停连锁、关键工艺参数采集与调节、流程优化控制、网络通信集成及视频监控等功能模块。系统以PLC为核心控制器,CPU运行负荷控制在满载的60%以下,预留20%以上的I/O点备用容量,适应后期扩展需要。仪表选型坚持高可靠性与成熟应用业绩优先原则,针对恶劣工况选用防护等级IP65及以上产品。物位检测方面,水泥仓采用雷达料位计,抗粉尘干扰能力强;搅拌槽液位同样使用雷达式传感器,

响应速度快;生产水池则配置超声波液位计,适用于开放容器测量。流量检测统一采用分体型电磁流量计,分别用于水与矿浆的瞬时与累计流量统计,信号稳定准确^[5]。压力监测选用平膜片式差压变送器,安装于矿浆输送管路关键节点,防止传统引压管堵塞问题。浓度检测采用环保豁免型Na22射源浓度计,非接触式测量,精度高且维护简便。调节执行机构中,水量控制采用电动调节阀,动作平稳;矿浆流量调节使用电动胶管阀,耐磨损、密封性好;切断功能由电动刀闸阀实现,启闭迅速,关闭严密。所有仪表供电由UPS统一供给,24VDC与220VAC电源均经稳压滤波处理,避免电网波动影响测量精度。380VAC直接驱动的大功率设备由电力专业专线供电,独立回路控制,防止相互干扰。整个系统具备与第三方设备通讯能力,支持ModbusTCP/IP协议,可接入矿山综合信息化平台,实现远程诊断与数据共享。

结语

该项目成功实现了充填系统由地面向井下的战略转移,显著提升了运行效率与安全保障水平。尤其在高寒环境下,井下充填站充分发挥了核心优势:一是规避了地表低温导致的料浆冻结、管路堵塞等季节性难题,保障全年连续稳定生产;二是省去了地表设施大规模防冻保温工程的建设与运维成本,提升经济效益;三是井下环境温度相对稳定,降低了低温对机电设备密封件、管路接口等关键部件的损耗,延长设备使用寿命。通过合理规划硐室布局、精确核算生产能力、科学配置机电设备与全面实施自动化管控,构建起一个高效、稳定、智能的现代充填作业体系。该案例表明,针对特定地质与开采条件定制化设计充填系统,是实现绿色高效采矿的重要途径,值得在同类矿山推广应用。

参考文献

- [1]南二刚.地下金属矿山充填采矿技术分析[J].世界有色金属,2025(10):111-113.
- [2]孙玉良.地下金属矿山充填采矿技术研究[J].中国科技纵横,2025(9):126-128.
- [3]张腾,王超,张少波.充填采矿技术在金属矿山采矿工艺中的应用[J].世界有色金属,2025(11):100-102.
- [4]王伟.充填采矿技术在金属非金属矿山采矿工程中的应用研究[J].中国金属通报,2025(8):28-30.
- [5]朱恒扬.地下金属矿山的充填采矿技术分析[J].冶金与材料,2025,45(6):70-72.