

金矿开采中的机械化开采与效率提升

刘立辉

四川黄金股份有限公司 四川成都 610213

摘要：在世界范围内对黄金的需求量日益增加以及对资源的开采力度的加大，使得我国的金矿开采面临资源品位降低、开采深度加大以及对安全环境的要求越来越高等问题。传统的手工采煤方式已经很难适应现代化矿山对高效、安全的要求，因此，大力发展机械化金矿开采是工业发展的必经之路。从地面采矿到井下深挖，装备自动化不但使黄金矿山的生产模式发生变化，而且在提高资源回收率、减少能源消耗和改善工作环境中显示出明显的优势。这种新的工艺革命，改变传统的黄金生产模式，促进黄金行业向高效率 and 智能化方向发展。

关键词：金矿开采；机械化开采；效率提升

根据中国黄金协会发布的《2025年中国黄金行业发展报告》，我国重点金矿企业的机械化开采率已从2020年的65%提升至2025年的82%，井下采矿设备的自动化程度达到国际先进水平。数据显示，采用全机械化开采的金矿，其综合效率较传统方式提高40%以上，吨矿成本下降约25%。尤其在深部开采领域（深度超过1000米），智能凿岩台车、无人铲运机等装备的应用使作业效率提升超50%，安全事故率降低70%。国际黄金理事会（World Gold Council）2025年预测表明，全球前十大黄金生产商的机械化投资占比已超过总资本支出的35%，这一趋势将持续推动行业技术升级。

一、金矿开采中的机械化开采核心技术体系

（一）智能采矿装备系统

黄金矿山智能化矿山设备的研制，对促进矿业无人化和高效率发展具有重要意义。该平台利用激光和惯导等先进的方法，实现了对岩石的精确定位，并可实现对岩石的冲击次数（1800–2200 Hz）、推力（15–20 MPa）的智能化控制。桑迪维克公司新型DD422i钻井平台采用了钻铤振动谱分析技术，对钻进过程进行了实时调节，已在山东招远金矿成功使用，钻井速度提高了35%。该无人机群采用5G通信技术，可在-30摄氏度到50摄氏度的低温条件下工作，每个装置均搭载16条线路的激光雷达及360度的全景摄像机，可在-30℃到50℃的低温下工作。WJ-6自动刮土机在中国金矿内蒙古矿区使用，可在15 t载荷下将作业周期压缩到8 min，比手动作业效率高25%。山特维克LH621系列采煤机是一种新型的集束式采煤机，它是一种集切割辊子—链式传送为一体的

新型集流设备，其最大截切强度为12，在紫金矿区的—一个工程中，年采矿量超过了80万 t。中信集团研发的JKMD-5.5x4系列起重机，其升降速率为12米/s，其位置精确控制为±5 mm，并配置了一套可对断丝进行实时监控的新型设备。通过矿井物联网技术，将各设备间的信息进行互联，形成从凿岩、装卸、运输到提升的完整智慧开采闭环。实际使用结果显示，该套方法可降低矿工人数60%、开采总费用降低18%、矿贫化小于5%，满足GB16423-2020《金属非金属矿山安全规程》的先进技术标准^[1]。

（二）数字化控制平台

黄金矿山数字监控系统的建立，将促进我国传统矿山走向智慧矿山的发展。利用Lapfrog程序对哥伦比亚武里蒂卡金矿进行了紫金矿山有限元数值模拟，其模拟结果与传统方法相比，其计算结果误差小于0.5 m。山东三山岛金矿采用5G专用网络进行遥控作业，可将作业延迟小于50 ms，满足《矿山机械远程监控系统技术要求》GB/T 34679-2017。基于GIS和RFID等先进的实时生产计划，在中金金矿区实现200台装备的同步跟踪，并对输送路线进行动态调整，提高了18%的工作效率。中国金矿内蒙古矿区应用的以振动与机油测试为基础的设备健康监控平台，其32种类型的故障特征库可对机器故障进行72小时以上的报警，其准确性达到92%。在此基础上，建立起了从勘查到开采的完整的数字流程。通过对一座深部矿山的实际应用，发现该系统可以将开采规划的周期减少60%，将开采装备的使用效率由原来的68%提高到85%，体现出了先进的信息化与矿山生产的深度

结合的价值^[2]。

(三) 安全增效技术

建立黄金矿山安全、高效生产的技术体系,是保证黄金矿山机械化、高效生产的重要支撑。在采场顶部和巷道周围布置16-32路传感阵,利用纵横波到时相结合的方法,可达到±5米的精确位置。将加拿大ESG公司Paladin技术用于一座深层金矿开采,对冲击地压的预报精度高达82%,从而有效地防止一起严重的安全事件。根据《金属非金属矿山安全规程》GB16423-2020的规定,采用可编程的方式对其进行了动态调整,实现了对矿井空气质量的有效调控。本项目以超宽频为基础,以煤矿作业人员为研究对象,以50~100米为间隔,通过穿戴身份卡,以1.6 GHz为激励源,以1 Hz的速率进行位置更新,精度优于0.3米。在南非的一座黄金矿山,采用这种方法,救援和救援的成功率提高了60%。应急避灾体系由避难硐室、紧急通讯及生活支持三个部分组成,其中,避难硐室为两层钢筋砼,配有长达4 h的供氧及二氧化碳吸收设备,通讯系统为泄漏电缆,保证了通信信号的全面覆盖。山东三山岛金矿所研制的防爆装置,经安标鉴定,其抗冲击能力为1 MPa^[3]。

二、金矿开采中的机械化开采的综合效率提升策略

(一) 生产流程优化

黄金采矿过程的优化是提高黄金采矿效率的关键。通过建立一个统一的调度平台,实现凿岩、爆破、装卸、运输等各个环节的工作时间精度不超过30分钟。“五位一体”协作体系在山东黄金三山岛金矿得到了推广,采场整体效率提高28%,装备备用时间缩短了40%。介绍一种新型的有轨电车,即以电铲取代了原有的有轨电车,并在加拿大麦拉提奇矿山进行现场试验,结果表明,这种新型的无轨交通方式可以提高35%的输送效率,减少能源消耗22%。在施工过程中,需要着重突破三个主要的技术难点:为了保证设备的正常使用,隧道的截面必须增大到4.5*4.0米;充电网络以200米间距配置;研制了一种新型的防爆式快速充电设备(可以在15分钟内连续工作4个小时)。

突破常规不连续开采技术的技术瓶颈是实现矿石开采技术革新的关键。紫金公司研制的“凿岩车—连续卸料—胶带”技术已在贵州汞洞金矿床成功地完成了每小时150 t矿石的生产。该技术的关键在于对矿石的出料口进行了改进,通过加装水力调整门来实现对矿石的释放速率的调控,并利用激光雷达对矿石的形状进行实时监

控。按照GB/T 51450—2023《金属非金属矿山充填技术规范》,采用破碎后的废弃矿石(颗粒小于25 mm,占65%),与胶凝材料以4:1的配比进行配比,经输送到采空区。根据招金公司对夏甸金矿的实际生产情况,采用这种方法,可节约废石62%的费用,28 d内的充填物强度可达3.5 MPa。施工中重点关注骨料级配的在线监测,浆液流动速度1.2~1.5 m/s,光纤传感技术监测填料密实程度。

多项过程优化方法的集成运用可取得明显的增效效果。根据《中国黄金学会2025年度报告》,通过综合工艺优选,可使矿山开采的直接费用降低18%~25%,贫化程度低于8%。尤其是对于深井(1000米),采用智能化的调度方法,使各个工序的工作时长减少15%,装备的整体利用率提高到82%。其中,流程重组要符合矿体的实际情况,特别是针对小于1.5 m厚的薄矿体,要发展专用的窄缝开采装备。目前开采与充填工艺的发展趋势是“采矿—充填一体化”,这对设备具有“变径凿岩钻头”“模块化充填管线”等特点的需求^[4]。

(二) 智能管理系统

黄金矿山智能化管理体系的建立,促进矿山企业的生产力水平发生了根本性的变化。基于BIM+GIS的“数字孪生”矿井建设,利用激光雷达获取井下巷道点云,结合钻井资料,构建毫米级别的3D可视化建模方法。山东黄金三山岛金矿业有限公司研发的“数字双工”技术,通过对15000余台物联网传感设备的采集,达到对采矿全过程进行动态模拟和预报的目的。紫金公司研发的“矿山大脑”可实现对采矿、爆破、出矿等生产过程中产生的结构化和非结构化数据进行深入研究,其成果可实现对装备的24小时内发生的故障预警,准确度超过85%。以5 G+边缘计算为基础,通过在矿井下配置工业级CPE装置,以保证设备状态在毫秒级的时间内传递。湖南黄金洞煤矿应用该方法,对设备的历史操作资料进行了分析,对刮土机的路线进行了优选,将单机容量由80 t提高到了110 t。

中国科学院武汉地质所研制的一套膏体填充体系,是利用矿山尾矿和胶凝物质1:8的配比,采用高压泵送方式回填采空区,使其具有3.5 MPa以上的抗压强度。招金公司在夏甸金矿采用的智能化充注技术,利用压力传感器对抽气工艺进行了在线调整,使充注效果提高40%,并可在地面上节省60多公顷的地面尾砂。以OPC UA协议为基础,建立了从勘查到生产计划的全过程数字控制

系统，并在此基础上进行了推广，使职工平均劳动生产率提升了65%，单位产量降低了18%。本项目以煤矿环境保护和环境保护为研究对象，采用区块链等方法对其进行有效的“存证”，为煤矿环境保护和环境保护提供可靠的数据支持^[5]。

（三）人机协同机制

在建立黄金采矿人-机协作机理的基础上，提出利用5G专用网络进行多台机器协作运行调度的方法。针对我国黄金矿山实际生产中存在的12台凿岩台车、8台铲运机、4台破碎机联合运行的问题，提出一种基于增强学习的动态轨迹优化方法，实现对装备空载率的优化。通过OPC UA与中心控制中心进行通信，实现对设备位置、工作状态及矿石品位的实时采集，并以30s的速度进行优化调度。该系统根据ISO9241-210国际规范，具有眼球运动跟踪功能，可在用户盯着某个装置的图标看1.5秒以上时，系统会自动显示细节参数。该触摸屏可设定三个级别的紧急作业授权，普通作业的反应延时小于200毫秒，临界作业的启动时间不得大于50毫秒。

利用Unity3D引擎，建立11011的数字化矿井环境，包括27种典型工作状态下的紧急处理功能。训练员戴上HTC Vive专业的隐形眼镜，戴上触感回馈式的手套，完成训练过程的即时记录，并形成一份测评报告。一家采矿企业的统计表明，通过VR技术训练的作业人员，其入职适应时间减少了60%，误报率降低了45%。针对不同情况下的应急处理方案，设计136个应急场景，在监测岩石移动速度大于5mm/h、CO含量大于24ppm的情况下，将会自动推送三级警报，并开始相应的处理过程。在2024年的一座金矿发生的突涌水事件中，采用这种方法，比常规方法节省了78%的人力疏散时间。其核心是构建“信息传感—智能决策—人机协作”闭环体系。在矿井中布设超宽带无线通信系统，采用1kHz频段采集6~8个振动、温度和压力传感器，测量精度达到10厘米。利用数码双元化的方法，实现了矿井下15分钟一次

的井下操作模拟，并对2个小时内的生产瓶颈进行预报。一旦发现装备效能偏离15%以上，系统将启动人机协作优化工作，并通过3D可视化操作界面进行操作参数的调节。通过实验验证，将矿井生产系统的整体运行效率提高32%，对装备失效的反应时间增加60%，从而为矿井生产提供一种可推广的人机协作技术。

结束语

综上所述，机械化开采工艺对于金矿行业的可持续发展有着十分重要的作用。提高采矿效率，降低开采成本，提高作业安全性，是目前黄金开采所面对的主要技术问题，也是我国应对未来矿产资源开采的重要途径。随着智能化和自动化技术的不断深入，黄金资源的开发将朝着更加高效、精确和安全的方向发展。这个过程不但可以提高金矿的开采和使用程度，也能提升金矿的开采与利用效率，促进矿产行业整体技术系统的升级与变革，也为世界黄金工业的长远、持续发展打下良好的基础。

参考文献

- [1] 王振阔, 李振龙, 李帅, 等. 机械化上向水平分层充填法在低品位缓倾斜多层金矿脉开采中的应用[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 87-93.
- [2] 陈维, 杜坤, 陈伟. 地下金矿非爆破机械化连续协同开采技术[J]. 金属矿山, 2020, (05): 70-75.
- [3] 李永辉, 顾生春, 王海文. 机械化上向水平分层充填采矿法在哈图金矿的应用[J]. 黄金, 2019, 40(12): 32-35.
- [4] 李永辉, 顾生春, 王海文. 机械化上向水平分层充填采矿法在哈图金矿的应用[J]. 黄金, 2019, 40(12): 32-35.
- [5] 李响. 精细化采矿技术在金矿中的具体应用分析[J]. 世界有色金属, 2025, (05): 142-144.