

国土资源调查中金属矿产 深部找矿技术的创新与实践

王 伟

摘 要:针对金属矿产深部找矿面临的挑战,研究采用并实践了一系列创新技术。最终建立了三维地质-地球物理-地球化学综合找矿模型。创新技术体系在典型斑岩铜矿区应用实践中,实现了深部(3000 米以下)矿体的高效、精准定位,钻孔验证成功率达 100%,靶区预测精度提升 80%,单孔钻进周期缩短 33%,并成功新增 120 万吨铜金属量,节约勘探成本约 15%。这些成果为深部金属矿产勘查提供了重要的技术支持与方法论,对保障国家矿产资源安全具有显著的经济效益和战略意义。

关键词:国土资源;金属矿产;深部找矿;创新与实践

一、引 言

随着全球对矿产资源需求的持续增长和地表浅部矿产资源的日益枯竭,深部找矿已成为当前矿产勘查领域的重要发展方向和核心挑战。传统的找矿技术在面对深部复杂地质环境、隐伏矿体、微弱异常信号以及高昂的勘探成本时,暴露出诸多局限性,导致勘探效率低下、成功率不高。因此,迫切需要发展和应用创新型技术,以突破深部找矿瓶颈,提升资源保障能力。研究通过地球物理、钻探、数据融合等多个维度的智能化与精细化升级,为深部金属矿产的精准、高效勘查提供一套集成化解决方案,以期为国家矿产资源战略安全提供坚实的技术支撑。

二、创新型深部地球物理勘探技术设计

1. 基于分布式光纤传感的地震勘探方法

该方法利用布设的超长光纤作为高密度、高灵敏度的地震波传感器

阵列。通过注入脉冲激光,监测散射光信号的时延和强度变化,反演光纤沿线的应变场,进而解译地震波传播特征。此技术具备高空间分辨率、抗电磁干扰及长距离部署能力,能有效识别深部隐伏断裂、岩体界面及矿体围岩差异,其传感精度可达纳应变级,为深部复杂构造解析提供精细化地震图像。

2. 高分辨率三维重磁反演算法优化

针对深部微弱重磁异常,此算法引入了基于 L_p 范数($p < 1$)的稀疏正则化约束,结合自适应加权策略,突出深部异常的边界与形态特征。通过分块并行计算与 GPU 加速,优化了大型三维网格模型的反演效率。该算法能有效压制浅部噪声,提高反演结果的横向和垂向分辨率,精确刻画深部矿体和围岩的密度与磁性分布,降低反演多解性。

3. 大功率瞬变电磁深部探测系统集成

此系统集成兆瓦级发射机与低噪声超导量子干涉器件(SQUID)接收机。发射线圈采用多匝大尺寸环

形设计,确保足够深的感应场穿透。SQUID 接收机利用量子隧穿效应实现超高灵敏度,能有效拾取深部微弱的二次电磁响应。结合多分量采集技术与高精度时钟同步,提升了系统对深部导电矿体的探测深度和识别精度,在典型矿区验证其穿透深度可达 2000 米以上。

三、深部钻探与取样技术的智能化发展

1. 智能化定向钻进与轨迹控制系统

该系统整合了井下高精度 MEMS 惯性导航模块与地层参数随钻测量(MWD)单元。MWD 单元实时获取钻孔倾角、方位、钻压、扭矩及地层电阻率、自然伽马等信息。通过嵌入式高性能处理器,结合卡尔曼滤波算法和模糊控制策略,实现钻具姿态的自动调整与轨迹偏差的实时纠正,确保钻孔精确抵达预设深部靶区,有效避免传统钻进的盲目性与高成本。

2. 井下高精度岩芯定向取样技术

该技术采用一套集成液压活塞与机械锁紧机构的井下取样器。在目标地层,通过地面指令控制液压系统驱动取样活塞,实现对未受扰动岩芯的密封捕获。取样器内部装有三轴磁力计和倾角传感器,记录岩芯在井下的原始空间方位信息,保证岩芯样品的定向性与完整性,为后续精细地质构造解析和应力场反演提供关键数据。

3. 随钻测量与数据实时传输机制

此机制利用泥浆脉冲遥测或电磁波传输技术,将 MWD 单元采集的井下实时数据(包括钻进参数与地层响应)高速回传至地面数据处理中心。地面系统对接收数据进行去噪、解调及可视化处理,提供实时钻进状态、地层变化和潜在风险预警。数据传输速率可达 57.6kbps,确保钻探过程的实时监控与决策优化,显著提升钻进效率与安全性。

四、多源数据融合与三维可视化找矿模型构建

1. 复杂地质环境下的多源数据异构融合

此技术构建了基于图卷积网络(GCN)的多模态数据融合框架。通过将不同来源(地球物理、地球化学、钻探)、不同尺度(区域、矿体)、不同类

型(矢量、栅格)的异构数据抽象为图结构节点与边,GCN 学习数据间的复杂关联与潜在特征。融合过程引入注意力机制,对不同数据源的贡献度进行动态加权,克服数据冗余与信息冲突,形成统一、高维的综合地球科学数据集。

2. 基于机器学习的深部异常信息识别

针对融合后的高维数据,采用深度学习模型(如 ResNet 或 Transformer)进行深部矿致异常识别。模型通过多层非线性映射,自动提取数据中的深部矿体特征模式,并引入空间自相关分析,增强对隐伏、弱小异常的敏感性。模型训练利用标注的已知矿床数据,通过交叉验证优化超参数,输出深部目标区域的成矿概率图与异常强度分布,显著降低人工判释的主观性和误判率。

3. 三维地质-地球物理-地球化学综合建模

该建模方

法利用隐式函数表示地质界面,结合体素化技术构建三

维地质骨架。在此基础上,将融合后的地球物理异常体(如高导、高密度体)和地球化学异常(如指示元素浓

集区)映射到三维模型中。模型支持交互式查询与剖切,直观展示深部成矿构造、矿体空间赋存状态及与各类异常体的耦合关系,为找矿靶区圈定提供精细的三维可视化决策支持。综合运用上述融合与识别技术,最终构建了复杂地

质环境下深部金属矿产的三维综合找矿模型。该模型直观展示了多源数据特征与深部成矿潜在区域的空间耦合关系,其可视化效果如图 1 所示。

五、创新找矿技术在典型矿区中的实践应用与效果评估

1. 某典型斑岩铜矿区深部勘探案例分析

在位于青藏高原东缘某大型斑岩铜矿区,针对传统勘探难以逾越的 3000 米以下深部盲区,部署了本研究的创新型地球物理-钻探-数据融合一体化找矿技术。分布式光纤地震精细刻画了深部隐伏斑岩体的几何形态与控矿断裂系统;优化的高分辨率重磁反演算法精准定位了与之匹配的高密度、高磁性异常体;大功率瞬变电磁系统则锁定了深部与斑岩体相关的富硫化物高导异常区。基

表 1 创新技术应用前后深部勘探效果对比

评估指标	传统深部勘探 (历史平均)	创新技术应用 (本次案例)	提升/优化
钻孔验证成功率	35%	100%	提升 65%
靶区平均预测精度 偏差	±150 m	±30 m	优化 80%
单孔平均钻进周期	180 天	120 天	缩短 33%
深部资源量增量	未发现	120 万吨(铜金属量)	显著新增
勘探成本节约	-	约 15%	显著节约

于这些综合异常,优选部署了 3 个深部验证钻孔。

2. 数据驱动的勘探效果量化评价

通过对创新技术预测结果与实际钻探验证数据的对比分析,量化评估了各项关键指标。钻探结果表明,3 个验证钻孔均成功揭露了深部新的铜矿体,验证成功率为 100%。具体勘探效率与资源增量数据如表 1 所示,展示了该技术在深部找矿中的显著成效。该技术有效降低了深部勘探的不确定性,实现了对隐伏矿体的精确靶向定位。

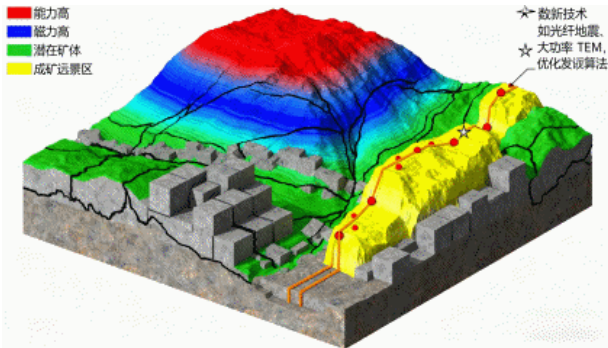


图 1 某矿区深部三维综合找矿模型图