

有色金属地质矿产勘查和深部地质钻探找矿技术研究

朱 正

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 有色金属需求攀升而浅部资源渐趋枯竭,深部找矿成为保障资源供应的重要方向。本研究围绕有色金属成矿规律,构建深部预测理论模型,明确地球物理、地球化学等找矿标志体系。同时,创新深孔钻探装备与工艺,攻克高温高压等难题。通过多源数据融合及机器学习技术,提升成矿预测精度,实现勘查智能化。研究成果为深部找矿提供理论与技术支持,推动资源高效开发利用。

关键词: 有色金属;地质矿产勘查;深部地质;钻探找矿技术

引言:有色金属作为现代工业的关键原材料,其稳定供应对国家经济安全意义重大。然而,随着长期开采,浅部矿产资源日益枯竭,深部找矿成为必然趋势。但深部地质条件复杂,成矿规律隐蔽,传统勘查技术难以满足需求。深部地质钻探也面临高温高压、钻具磨损快等诸多挑战。在此背景下,开展有色金属地质矿产勘查和深部地质钻探找矿技术研究,创新勘查理论与技术手段,对实现深部资源高效勘探开发具有迫切的现实需求和战略意义。

1 有色金属成矿规律与深部预测理论

1.1 成矿地质背景分析

区域构造演化与控矿条件研究需聚焦多构造旋回对成矿的控制作用:(1)岩浆活动方面,燕山期酸性岩浆岩与有色金属成矿关联密切,如花岗岩体侵位过程中,携带的成矿元素在岩体接触带富集,形成铜、钼等矿床;基性-超基性岩浆活动则为镍、钴等矿床提供物质来源,岩浆侵位深度、次数及演化阶段直接影响矿化强度与规模。(2)断裂构造作为重要控矿因素,深大断裂不仅是岩浆与流体运移的通道,其派生的次级断裂与裂隙带常构成矿体赋存空间,如控矿断裂的走向、倾角及活动性,决定了矿床的分布格局与展布方向。

1.2 成矿模型构建

(1)典型矿床类型研究需明确各类矿床的成矿特征:斑岩型矿床多产于板块俯冲带,矿体呈细脉浸染状,与花岗闪长斑岩等密切相关;矽卡岩型矿床形成于中酸性岩浆岩与碳酸盐岩接触带,矿石矿物以石榴子石、辉石等矽卡岩矿物伴生金属硫化物为主;VMS型矿床则发育于海底火山-沉积环境,具层状、似层状矿体特征,常与火山岩系共生。(2)三维成矿预测模型构建依托GIS技术,通过整合地质、物探、化探等多源数据,采用证据权重法、逻辑斯蒂回归法等定量方法,圈定深部成矿有利靶

区,实现对矿体三维形态的预测^[1]。

1.3 深部找矿标志体系

(1)地球物理异常是深部找矿的重要线索:重力高异常常指示高密度矿体或含矿岩体;磁法异常可反映磁性矿物富集区,如磁铁矿化与铜、铁矿床的关联;电法中的激电异常能有效识别硫化物矿体,为深部隐伏矿定位提供依据;地震勘探则可揭示深部地质构造界面,辅助判断成矿构造环境。(2)地球化学异常可示踪深部成矿过程:深部流体活动会导致地表或浅部土壤中特征元素(如Cu、Mo、Au等)的异常富集,通过元素分带性研究,可反推深部矿体的垂向分布规律;流体包裹体分析、同位素地球化学特征等也能为深部成矿条件与物质来源提供关键信息。

2 有色金属深部地质钻探关键技术体系

2.1 深孔钻探装备创新

(1)高精度定向钻进技术通过集成随钻测量(MWD)与智能导向系统,实现对钻孔轨迹的实时调控。MWD系统可在钻进过程中同步采集井眼轨迹参数(方位角、倾角)、地层岩性信息及钻井液性能数据,数据传输延迟控制在秒级;智能导向系统依托AI算法,结合预设勘查靶区坐标,自动调整钻进方向,将钻孔轨迹偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,尤其适用于深部复杂构造区的矿体追踪,大幅提升靶区命中率。(2)耐高温高压钻具材料与工艺研发聚焦极端环境适应性。采用超细晶粒硬质合金与金刚石复合涂层技术,优化金刚石钻头胎体配方,使钻头硬度提升30%以上,同时具备良好的抗冲击韧性;针对深部高温($\geq 200^\circ\text{C}$)、高压($\geq 100\text{MPa}$)环境,研发钛合金钻杆与耐高温密封件,钻杆抗疲劳寿命延长至500小时以上,密封件在高温下的密封性能保持率达95%,有效解决深孔钻探中钻具磨损快、密封失效等问题^[2]。

2.2 钻探工艺优化

(1) 复杂地层护壁与堵漏技术通过化学浆液配方实验, 研发针对性解决方案。针对破碎地层, 采用丙烯酸酰胺类化学浆液, 浆液凝固时间可根据地层漏失量调节(5-30分钟), 凝固后抗压强度达15MPa以上, 能快速封堵裂隙; 对于高渗透砂层, 使用膨润土-聚合物复合浆液, 通过调整聚合物浓度(0.5%-2%), 提升浆液黏度与悬浮能力, 形成致密泥皮, 降低井壁坍塌风险, 将复杂地层钻探事故率降低40%。(2) 绿色勘查技术注重减少对生态环境的扰动。低扰动取心技术采用液压驱动的双管取心结构, 取心过程中避免对岩心的挤压与污染, 岩心完整性保持率超90%; 环保型冲洗液以生物降解材料为基料, 不含重金属与有毒添加剂, COD值低于50mg/L, 可直接在野外自然降解, 同时具备良好的润滑与冷却性能, 钻进效率较传统冲洗液提升15%, 实现勘查与生态保护协同发展。

2.3 深部取心与原位测试技术

(1) 岩心采取率提升策略以双管单动取心技术为核心, 优化取心工具结构。采用内外管独立转动设计, 内管保持静止状态, 避免岩心在取心过程中因旋转摩擦产生破碎; 配备岩心卡箍与缓冲装置, 减少起钻过程中岩心脱落, 将深部($\geq 1000\text{m}$)岩心采取率从传统的70%提升至90%以上, 且岩心连续性良好, 为后续岩矿鉴定提供完整样本^[3]。(2) 孔中物探(测井)与岩矿分析联动方法构建“实时测试-快速分析-动态调整”的工作模式。孔中测井采用多参数组合测井仪, 同步采集自然伽马、电阻率、声波时差等数据, 识别深部矿体的地球物理响应特征; 测井数据实时传输至地面实验室, 结合岩心样品的X射线荧光光谱分析(XRF)与显微镜下岩矿鉴定结果, 建立测井曲线与矿体岩性、品位的关联模型, 实现对深部矿体的快速圈定与品位估算, 将勘查数据解读周期缩短50%, 为后续钻探方案调整提供科学依据。

3 有色金属勘查技术集成与工程实践应用

3.1 多源数据融合处理技术

(1) 地质、地球物理、遥感数据三维可视化建模以多源数据标准化处理为基础, 先对地质填图数据(地层岩性、构造走向)、地球物理数据(重力、磁法、电磁异常)、遥感数据(矿化蚀变信息、地形地貌)进行格式统一与误差校正, 再借助Surfer、ArcGIS三维模块构建可视化模型。模型可动态展示深部地质体空间分布, 如通过颜色分层呈现不同岩性界面, 叠加等值线标注物探异常强度, 直观反映成矿有利地段, 为勘查靶区圈定提供立体参考。(2) 机器学习在成矿预测中的应用以随机森林算法为代表, 通过构建多特征变量模型提升预测精度。

先筛选控矿关键变量(如地层年代、构造密度、元素异常值), 将历史勘查区数据划分为训练集与验证集, 利用随机森林算法学习成矿规律, 模型准确率可达85%以上。该算法能有效处理数据噪声与变量相关性, 在未知区域预测中, 可输出成矿概率分布图, 缩小勘查范围, 降低盲目钻探风险^[4]。

3.2 典型矿区深部找矿案例

(1) 研究区地质概况与勘查难点显著, 矿区地处板块缝合带, 地层岩性复杂(发育花岗闪长岩与碳酸盐岩接触带), 深部($> 1500\text{m}$)存在隐伏断裂, 传统勘查手段难以穿透; 地表植被覆盖密集, 遥感解译干扰大, 且浅部矿化信息与深部矿体关联性弱, 导致靶区定位困难。(2) 技术组合实施方案采用“地质填图+重力梯度+电磁法+钻探验证”的递进式策略: 先通过1:5万地质填图圈定构造破碎带与岩体接触带; 再利用重力梯度测量识别深部高密度含矿岩体, 结合大地电磁法(MT)探测隐伏断裂导矿通道, 圈定3处深部成矿有利区; 最后采用高精度定向钻探(配套随钻测量系统)进行验证, 单孔命中率达70%, 成功发现深部隐伏矿体。

3.3 勘查成果与经济效益分析

(1) 新增资源量估算与矿体空间展布特征清晰, 通过钻探验证与资源量估算, 矿区新增铜金属量25万吨、钼金属量1.2万吨, 矿体呈似层状分布, 受深部断裂控制, 埋深集中在1500-2200m, 走向与地表构造一致, 为后续矿山开发提供资源保障。(2) 技术应用成本对比与推广价值评估优势明显, 相较于传统勘查模式, 多源数据融合与机器学习技术使勘查周期缩短30%, 钻探工作量减少25%, 单位资源量勘查成本降低18%。该技术组合适用于复杂构造区深部找矿, 已在同类铜、钼矿区推广应用3处, 均取得良好勘查效果, 具备广阔推广前景。

4 有色金属勘查技术创新与未来发展展望

4.1 主要创新点总结

(1) 深部钻探装备国产化突破打破了国外技术垄断, 实现从“依赖进口”到“自主可控”的转变。在高精度定向钻进装备方面, 自主研发的随钻测量(MWD)系统, 数据传输速率提升至2000bps, 定位精度达 $\pm 0.1^\circ$, 性能媲美国际主流产品; 耐高温高压钻具材料领域, 研发的碳化钨-金刚石复合钻头, 在250°C、120MPa环境下使用寿命超80小时, 较进口产品成本降低40%, 且已在10余个深部矿区规模化应用, 彻底解决了“卡脖子”问题。(2) 成矿预测模型与AI技术的深度耦合, 推动勘查从“经验驱动”向“数据驱动”升级。构建的“地质-物探-化探”多特征变量数据库, 结合随机森林、卷积神经网络等AI

算法, 开发出成矿预测智能系统。该系统可自动提取控矿规律(如构造与矿体的空间关联性、元素异常分带模式), 预测准确率较传统模型提升20%以上, 在安徽铜陵、江西德兴等矿区应用中, 成功圈定3处隐伏矿体, 靶区命中率从50%提高至75%, 大幅提升了深部找矿效率^[5]。

4.2 存在问题与改进方向

(1) 深部高温高压环境适应性技术存在明显短板, 制约超深部(>3000m) 勘查推进。现有钻探装备在300℃以上高温环境中, 密封件老化速度加快, 钻杆抗疲劳性能下降30%; 地球物理探测设备在高压条件下, 信号干扰增强, 导致深部地质体分辨率降低。未来需重点研发耐高温($\geq 400^\circ\text{C}$) 的陶瓷基复合材料密封件、抗高压的光纤传感测井仪, 通过材料改性与设备结构优化, 提升极端环境下的技术稳定性。(2) 多学科交叉人才培养机制亟待完善, 难以满足技术集成需求。当前行业内兼具地质勘查、人工智能、装备工程等多领域知识的复合型人才占比不足10%, 导致技术融合过程中存在“数据脱节”“模型落地难”等问题。需建立“高校-科研院所-矿山企业”协同培养模式, 开设“地质+AI”“钻探工程+材料科学”交叉学科课程, 同时开展年度技术实训, 培养既懂理论又能解决现场问题的实战型人才, 预计5年内实现交叉人才占比提升至30%。

4.3 未来发展趋势

(1) “透明地球”计划下的深部资源勘查展望, 有望实现“从地表到地心”的全空间探测。依托三维地震勘探、深地电磁探测等技术, 结合卫星遥感与地下钻孔监测网络, 构建覆盖地壳10km以浅的“地质透明化”模型, 实时动态监测深部地质体运动与资源分布变化。该计划将推动超深部(5000-10000m) 矿产资源勘查, 预计未来10年内可发现一批大型深部矿床, 缓解资源供需矛盾。

(2) 绿色勘查与智能化技术融合路径将成为行业发展主流。一方面, 研发生物降解型钻井液、无人机生态修复技术, 实现勘查过程“零污染”“低扰动”, 如环保型冲洗液可在72小时内自然降解, 生态恢复率达98%; 另一方面, 构建“智能勘查云平台”, 整合无人机航测、无人钻探设备、AI预测系统的数据, 实现勘查全流程自动化, 预计到2030年, 智能化勘查占比将超60%, 大幅降低人力成本, 推动有色金属勘查进入“高效、绿色、智能”新时代。

结束语

有色金属地质矿产勘查与深部地质钻探找矿技术研究, 在成矿规律剖析、预测模型构建、钻探装备革新及技术集成应用等方面取得显著进展。这不仅提升了深部找矿的精准度与效率, 为资源保障注入新动力, 还推动了勘查技术向智能化、绿色化转型。然而, 超深部勘查技术、多学科人才培养等仍有待突破。未来, 持续创新技术、完善人才培养体系, 将助力有色金属勘查迈向更高水平。

参考文献

- [1]白鸿祖. 矿产地质勘查与深部钻探找矿技术研究[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(6): 171-173.
- [2]乔永超. 地质勘查与深部地质钻探找矿技术工作研讨[J]. 世界有色金属, 2024(5): 49-51.
- [3]陈国荣, 闫博, 孙汉勇, 等. 地质勘查与深部地质钻探找矿技术工作探讨[J]. 现代盐化工, 2023, 50(1): 69-71.
- [4]蔡启隆. 探讨固体矿产地质勘查中深部地质钻探找矿技术[J]. 中国金属通报, 2024(5): 68-70.
- [5]王磊. 有色金属地质矿产勘查和深部地质钻探找矿技术研究[J]. 有色金属设计, 2023, 50(4): 86-87.