

深部隐伏矿产地质特征与勘查技术应用

朱 敏

山西省地质调查院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：深部隐伏矿产因埋藏深、信息弱，勘查难度极大。本文系统阐述了深部隐伏矿体在空间分布、物质组成、地质构造及成因方面的特征，剖析了地球物理、地球化学和地质钻探三大核心勘查技术的原理与流程，分析了不同矿产类型和埋深条件下的技术适配方案及多技术组合应用原则，探讨了现有技术精度与效率方面的优化路径以及超深穿透电磁成像、量子重力测量等新型技术的研发趋势。

关键词：深部隐伏矿产；地球物理勘查；地球化学勘查；技术组合；智能化找矿

引言：随着浅表矿产资源日趋枯竭，向地球深部拓展找矿空间已成为保障矿产资源供给的战略选择。深部隐伏矿体因被厚层覆盖且经受多期构造改造，地表信息极为微弱，传统勘查手段难以有效识别。深部独特的高温高压环境赋予矿体不同于浅部的物质组成与构造特征，这要求勘查技术必须具备更强的穿透能力和更高的分辨精度。地球物理、地球化学与钻探技术的协同应用构成了深部找矿的技术主体，而多源信息融合与智能化处理则代表了技术发展的前沿方向。

1 深部隐伏矿产地质特征

1.1 空间分布特征

隐伏矿体在垂向上呈现明显的分带性特征，成矿元素随着深度增加逐渐富集，矿化强度在不同层位表现出差异。热液型隐伏矿体多集中于地下500至2000m范围内，这一区间恰好对应地温梯度急剧升高的地带，高温高压条件为矿质沉淀提供了热力学基础。受区域地热场分布影响，不同构造单元的垂向矿化区间存在细微差异，构造活动强烈区域的矿化深度可延伸至2500m，且矿化强度随深度增加呈现阶段性峰值，并非持续递增^[1]。水平分布关联方面，隐伏矿体常沿深大断裂带或隐伏岩体接触带呈线性或带状展布，矿体走向与区域构造线保持高度一致，反映出深部构造格架对矿体空间定位的控制作用。与浅表矿产的空间关联上，深部隐伏矿体往往是地表已知矿体向下延伸的部分，二者在物质组成和成因上具有继承性，地表矿体的剥蚀残留可为深部找矿提供重要的垂向追索线索。

1.2 物质组成特征

深部隐伏矿体中金属硫化物占比显著高于浅部，黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等硫化物矿物组合在高温高压环境下更趋稳定。相较于浅部矿体，深部硫化物颗粒更细小、结晶程度更高，部分矿物会因深部压力作用发生晶

格畸变，形成特征性的变形纹和双晶结构，可作为判断矿体深部延伸的矿物学标志。元素赋存状态方面，深部成矿元素多以类质同象形式分散于造岩矿物晶格中，或以独立矿物微粒包裹于脉石矿物内部，这种赋存方式导致常规分析手段难以直接检出。物质成分分异特征表现为从矿体中心向外缘，成矿元素含量呈梯度递减，近矿围岩中则出现明显的蚀变分带，从内向外依次为钾化、硅化、绢英岩化和青盘岩化，这一分带序列为深部矿体定位提供了地球化学标尺。

1.3 地质构造特征

隐伏矿体主要受深大断裂、隐伏褶皱和岩体接触带三类构造控制。深大断裂为成矿流体提供了运移通道和储集空间，隐伏褶皱的转折端和虚脱部位常成为矿体富集的可利部位，岩体接触带则因物理化学条件突变而诱发矿质沉淀。三类控矿构造并非孤立存在，多呈现叠加组合特征，深大断裂常切割隐伏褶皱，岩体接触带多沿断裂带分布，形成“断裂-褶皱-岩体”协同控矿的格局。构造与矿产的空间耦合关系表现为矿体严格受构造软弱带控制，断层交汇处、产状拐弯处和分支复合处矿化最为强烈。构造活动对矿产形成的影响体现在多期构造叠加改造上，早期构造提供成矿空间，晚期构造破坏或改造原有矿体，使得深部矿体形态更加复杂多变。

1.4 成因相关特征

深部隐伏矿的成矿物质多来源于下地壳或上地幔，通过深大断裂向上运移，部分矿体还显示出壳幔混合来源的地球化学证据。壳幔混合来源的矿体多伴随幔源流体活动痕迹，其同位素组成具有明显的幔源端元特征，与单一地壳来源的矿体形成清晰区分，可作为追溯成矿物质来源的关键依据。成矿环境相关特征表现为深部成矿作用发生在封闭或半封闭体系中，流体以高盐度、高温度为特征，成矿压力可达数百兆帕。成矿作用相关特

征方面,深部隐伏矿多为中高温热液充填交代成因,成矿过程经历了脉石矿物早期沉淀和金属矿物晚期富集两个阶段,这种阶段性特征直接影响了矿体内部的结构构造和品位分布格局。

2 深部隐伏矿产勘查核心技术

2.1 地球物理勘查技术

主要技术类型涵盖可控源音频大地电磁测深法与大地电磁探测等电磁类方法,以及高精度重力测量和航空磁测等位场类手段。各类方法具有明确的适用场景,电磁类方法更适用于探测高导电矿体,位场类方法则对密度、磁性差异显著的矿体识别效果更佳,实际应用中需根据区域地质背景灵活选用。技术应用原理在于利用深部矿体与围岩在电导率、密度和磁化率等物理参数上的差异,通过人工激发或接收天然场源信号来反演地下异常体的空间形态。电磁法依靠交变电磁场在不同介质中的扩散和衰减特性实现深部穿透,而重力和磁法则基于牛顿万有引力定律与磁性体激发磁场的叠加效应进行探测^[2]。技术应用流程从野外数据采集起步,经仪器布置与参数设定后获取原始场值,再经过静校正、去噪和反演成像等数据处理环节,最终生成深部地质体的二维或三维电性、密度及磁性结构剖面,为矿体定位提供物理约束。

2.2 地球化学勘查技术

主要技术类型包括原生晕法、地气测量法、水地球化学分散流法和地电化学法等。不同技术的探测深度和适用介质存在差异,原生晕法适用于钻孔岩心的垂向探测,地气测量法可捕捉深部气态迁移元素,水地球化学法则适用于覆盖区的间接探测。技术应用原理建立在成矿作用过程中元素迁移、分带和在介质中富集的地球化学行为之上,原生晕法通过分析钻孔岩心或槽探样品中元素的垂向分带序列来指示深部矿化中心,地气测量则利用成矿元素以气态形式沿微裂隙向上运移的特性在地表捕捉深部信息。技术应用流程始于采样方案设计,依据区域地质背景选定合适的介质类型和采样密度,样品经前处理与仪器分析后获得元素含量数据,再通过统计分析和异常圈定识别出与深部矿体相关的地球化学异常,结合地质背景进行综合解释以缩小找矿范围。

2.3 地质钻探技术

主要技术类型涉及金刚石绳索取芯钻探、液动锤钻进和定向钻进等。各类钻探技术优势互补,金刚石绳索取芯钻探可获取完整连续的岩心,液动锤钻进能提高硬岩地层的钻进效率,定向钻进可实现对复杂形态矿体的精准追踪。技术应用原理是通过回转或冲击方式破碎深

部岩石,利用岩芯管提取连续岩心以直接获取地下地质信息,金刚石钻头依靠莫氏硬度极高的人造金刚石颗粒切削岩石,液动锤则借助冲洗液压力驱动锤头反复冲击孔底实现破岩。技术应用流程从钻孔设计开始,依据物探和化探综合异常确定孔位与开孔角度,钻进过程中实时监测钻压、转速和冲洗液返水情况以判断地层变化和矿化征兆,终孔后进行测井、编录和岩心取样,将深部实物资料与地面探测成果相互印证,完成从间接推断到直接验证的关键转换。

3 勘查技术适配与组合应用

3.1 不同地质条件下的技术适配

3.1.1 不同矿产类型的技术适配

岩浆岩型矿床受侵入体形态和接触带产状控制,宜选用高精度磁法圈定隐伏岩体边界,辅以CSAMT探测接触带电阻率突变,化探则以Cu、Mo、Au等成矿元素原生晕追踪为主。热液脉型矿床空间延展有限但品位变化大,电磁法中的中梯装置对导电矿体敏感,激发极化法可有效区分金属硫化物与石墨等干扰体,土壤测量需加密采样点以捕捉微弱晕圈^[3]。沉积型矿床埋深大、层状特征明显,重力梯度测量适合识别密度差异,大地电磁测深则能穿透厚覆盖层刻画基底起伏,化探应侧重分散流采样以追踪层间矿化。

3.1.2 不同深度条件的技术适配

500m以浅的隐伏矿体可用高精度磁法和浅层地震联合探测,分辨率高且成本可控。500至1500m中等深度段,可控源电磁法与重力测量配合效果较好,大地电磁测深在这一区间仍保持较好的穿透能力。超过1500m的深部目标,天然源大地电磁法和深地震反射成为主要手段,重力异常的长波长特性使深部密度体仍可被识别,化探则需转向地气测量和深穿透性地球化学方法来获取深部信息。

3.2 多技术组合应用方式

3.2.1 技术组合的原则

组合方案应遵循物理场与化学场互补的基本逻辑,电性异常与元素异常相互约束可大幅降低多解性。不同方法的探测深度和分辨率需形成梯度衔接,浅部高分辨率方法与深部大穿透方法搭配使用,避免出现探测盲区。经济成本与地质效果之间需要权衡,在靶区缩小阶段可采用高成本高精度手段,在面积普查阶段则以快速经济的方法为主。

3.2.2 常见组合模式

面状扫描阶段采用航空磁测与重力测量联合获取区域构造格架,线状详查阶段部署可控源电磁测深剖面与

激发极化中梯装置精确定位异常体,点状验证阶段通过钻探取芯与井中物探直接揭示矿体产状和品位。化探与物探的空间叠合分析是目前应用最为广泛的组合模式,土壤地球化学异常套合物探低阻或高极化异常区域,能够显著提高靶区命中率。

4 深部隐伏矿产勘查技术发展方向

4.1 现有技术的优化方向

4.1.1 勘查精度优化

提升勘查精度的核心在于缩小探测盲区并增强深部信号的可辨识度。电磁法需向宽频段方向拓展,通过接入更低频率的天然场源信息来延长穿透深度,使2000m以深的低阻矿体获得清晰成像^[4]。宽频段电磁法可同时捕捉不同深度的信号,实现浅部与深部异常的同步识别,有效解决深部信号微弱、易被干扰的问题。重力测量应着力于微重力梯度仪的灵敏度改进,将噪声水平压低至微伽量级,以便从背景场中剥离出深部密度体产生的微弱异常。地震勘探的精度优化则依赖于高密度采集与全波形反演算法的结合,通过增加道间距加密程度来改善深层反射信号的信噪比。化探方面,高灵敏度电感耦合等离子体质谱仪的普及使得纳克级元素检出成为可能,这为捕捉深部矿体在地表留下的极微弱地球化学指纹创造了仪器条件。

4.1.2 勘查效率提升

效率提升的关键在于缩短野外作业周期并加快数据处理速度。航空物探平台搭载多通道传感器可在单次飞行中完成磁、电、放射性三参量同步采集,覆盖效率较地面逐点测量提升数倍。多通道传感器的集成应用,避免了单一参数采集的重复作业,同时实现了不同物理场数据的同步获取,为后续综合分析提供了高效的数据支撑。自动化钻探系统通过智能送钻与孔内参数实时回传,减少了起下钻次数和非生产时间。数据处理端引入并行计算架构和深度学习反演模型,将原本需要数周的三维反演运算压缩至小时级完成,使得勘查方案能够根据中间成果快速调整。

4.2 新型勘查技术的发展趋势

4.2.1 新型技术的研发重点

当前研发聚焦于超深穿透电磁成像和量子重力测量两大前沿方向。超深穿透技术试图利用甚低频电磁波跨越高导屏蔽层,直接获取地壳深部电性结构。甚低频电磁波具有极强的穿透能力,可突破高导地层的屏蔽限

制,解决深部矿体因屏蔽效应无法被有效探测的技术难题。量子重力仪基于冷原子干涉原理,理论上可将重力测量精度提升2个数量级,为识别深部隐伏密度异常提供全新手段。另一研发重点是深部原位传感技术,通过在钻孔中部署耐高温高压传感器阵列,直接获取矿体周围的物理场和化学场参数,突破间接探测的信息衰减瓶颈。

4.2.2 技术融合发展趋势

单一技术手段难以全面解决深部隐伏矿勘查问题,多技术深度融合已成为必然路径。物理场反演结果与地球化学异常的三维空间叠合分析正在向智能化方向演进,机器学习算法可自动识别物探化探异常的空间耦合模式并生成靶区优选排序^[5]。机器学习算法能够快速处理海量勘查数据,挖掘数据间的隐藏关联,避免人工分析的主观性和局限性,大幅提升靶区优选的效率和准确性。数字孪生技术将地质模型、物探数据和钻探实物统一纳入虚拟空间,实现从数据采集到矿体圈定的全流程数字化闭环,大幅压缩勘查决策周期。

结束语

深部隐伏矿产勘查是一项涉及多学科交叉的系统工程,地质特征认识是基础,核心技术突破是关键,多技术协同集成是保障。从地球物理场反演到地球化学异常追踪,从钻探直接验证到智能化靶区优选,各环节紧密衔接方能有效应对深部信息衰减难题。宽频电磁探测、量子重力测量及深部原位传感等前沿技术的持续突破,将进一步拓展探测深度与精度边界。数字孪生与机器学习的深度嵌入正在重塑勘查流程,推动深部找矿从经验驱动向数据驱动加速转变。

参考文献

- [1]游水凤,路思明,蔡娉婷.深部地质勘查与隐伏矿床探测技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(4):184-186.
- [2]曾琪.地质勘查技术在金属矿产勘探中的应用与实践[J].中国金属通报,2025(7):190-192.
- [3]杨东红.深部金属矿产资源勘查技术与方法研究[J].世界有色金属,2025(4):76-78.
- [4]高远,姜俊杰,管翔,等.矿山深部及外围隐伏矿体定位预测技术研究[J].中国金属通报,2026(1):101-103.
- [5]鲁岳鑫,张必敏,刘汉粮,等.深穿透地球化学勘查技术对隐伏稀有金属矿的勘查指示:以甲基卡X03号锂矿脉为例[J].地质学报,2023,97(1):291-305.