

深部找矿技术及其在复杂地质条件下的应用研究

张 伟

内蒙古致和地质勘查有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：深部找矿，是指在地表以下较深的地层中寻找矿产资源。与浅部找矿相比，深部找矿面临的地质条件更为复杂，地层构造、岩性多样以及地球物理场异常等因素都给找矿工作带来了极大的挑战。因此，如何在复杂地质条件下有效地应用深部找矿技术，提高找矿的成功率和效率，成为矿产勘查领域亟待解决的问题。

关键词：深部找矿技术；复杂地质条件；化学勘探；钻探技术

随着经济的快速发展和工业化进程的加速，矿产资源作为国民经济的基础支撑，其需求量持续增长。然而，经过长期的开采，地表及浅部的矿产资源已逐渐枯竭，寻找新的矿产资源成为迫切的需求。

1 深部找矿技术基本原理

1.1 地质理论指导原理。成矿深度预测模型，通过研究岩浆活动、热液运移规律及构造控矿特征，建立矿床垂向分带模型。例如，岩浆型矿床受深大断裂控制，矿体可延伸至地下数千米；热液型矿床则依据流体包裹体压力推算原始成矿深度（如斑岩铜矿成矿深度可达3-5公里）。矿体延伸规律，矿体垂向延伸受岩性界面和构造应力场约束，如金矿验证金矿脉在1500米以下仍具经济价值，颠覆传统“浅成矿床”认知。

1.2 地球物理探测原理。重磁反演技术，重力勘探：通过测量地表重力场微小差异（精度达0.1 mGal），反演地下密度异常体。例如，四川盆地火山岩储层因密度低于围岩，形成可识别的重力低异常区。磁法勘探：识别磁性矿物（如磁铁矿）引起的磁场畸变，结合三维反演算法可定位63公里深度的隐伏矿体（误差 $< 10\%$ ）。多源信息融合，集成地震波速结构、地电参数与遥感影像，构建三维地质模型。长江中下游成矿带通过该技术预测深部砂卡岩型矿体位置。

1.3 工程验证技术原理。岩心钻探技术，绳索取芯（S75型）：双管钻具设计，内管通过打捞器提升（无需提钻），保障岩心完整性与取芯率。关键环节包括：卡座咬合岩心柱、扶正环稳定内管、扩孔器减少岩心污染。泥浆隔离工艺：小球封堵泥浆通道，防止流体污染岩心样本（如地热流体成分分析）。深部适应性改进，硬岩地层采用金刚石钻头提高耐磨性；陡斜矿体应用双壁钻杆解决泥浆漏失问题，但受限于设备成本。

2 深部找矿技术目的

2.1 核心战略目标。延长矿山服务年限，在现有矿区

深部实施勘探，新增资源储量延续矿山生产周期。例如小秦岭金矿深部探获金金属量11.3吨，延长开采年限15年以上。保障国家资源安全，我国石油、铁、铜等战略性矿产对外依存度高，深部找矿可提升资源自给率，应对国际矿业波动风险。

2.2 社会与环境效益。稳定就业与社会发展，深部找矿维持矿山持续运营，例如铜绿山项目保障4000余人就业，避免资源枯竭型城市衰退。支撑新兴产业需求，为新能源产业（锂、钴等）和高端制造业（稀土、芯片材料）提供资源保障。减少生态扰动，通过“就矿找矿”模式（棕地勘查），减少新区地表开发，降低环境破坏。

2.3 政策与战略定位。国家战略需求，总书记提出“向地球深部进军”，将深部探测列为国家科技创新战略核心，写入《国土资源“十三五”科技创新规划》。行业标准制定，自然资源部发布《深部矿产远景调查技术要求》，规范500-3000米深度勘查流程，推动技术标准。深部找矿本质是应对浅层资源枯竭的必然选择，通过技术创新实现资源接续、保障经济安全，同时承载国家战略资源自主可控的使命。

3 复杂地质条件定义标准

3.1 岩性岩相：种类 ≥ 3 种，露头不良，强度差异 $> 50\%$ ，特殊岩土：存在膨胀土、湿陷性土或古河道暗浜等特殊地质体，物理地质现象：滑坡、崩塌、泥石流等灾害发育密集（ ≥ 2 处/ km^2 ）。水文地质条件。含水层：隐伏岩溶发育，矿层顶底板透水性强（渗透系数 $> 10 \text{ m/d}$ ），矿井涌水量 $> 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。水质：腐蚀性离子（ $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ ）浓度超标，或存在多层含水层混合作用。地形地貌与环境。地形坡度： $> 30^\circ$ 的中低山区，相对高差 $> 200 \text{ m}$ ，地震风险：抗震设防烈度 ≥ 7 度，且存在活动断裂带，人类活动影响：地下采空区 ≥ 3 处或矿产开采扰动强烈。

3.2 综合分级判定。依据“单因素否决制”，满足

以下任一条件即划为复杂地质条件：断层/褶皱达Ⅳ类标准；水文地质属“复杂”或“极复杂”类型；场地抗震等级为一级（设防烈度 ≥ 7 度+不良地质现象）；工程地质含 ≥ 2 类特殊性岩土或物理灾害高发育区。

3.3 典型场景案例。煤矿开采：断层密度 > 5 条/ km^2 +顶底板裂隙发育+奥灰水突水风险 \rightarrow 判定为复杂条件。边坡工程：岩性种类 ≥ 4 种+外倾贯通结构面发育+历史滑坡活动 \rightarrow 需按复杂等级设计支护。隧道施工：穿越古河道暗浜+流砂层厚度 > 5 m \rightarrow 触发复杂地基处理流程。

4 如何判断地质条件是否复杂

地质条件复杂性的判定需综合考虑构造活动、岩土性质、水文环境等多维度指标，遵循“单因素否决制”原则（即任一核心指标达到复杂标准即判定整体为复杂地质条件），

4.1 地质构造复杂度。断层发育程度，大中型断层密度 ≥ 10 条/ km^2 或存在交叉切割现象；断层位移导致岩层连续性严重破坏（如煤层错断 $> 30\%$ ）。褶皱特征，紧密褶皱或倒转褶皱发育，地层倾角变化 $> 30^\circ$ ；褶皱轴面产状突变，影响采区合理划分（仅能划部分正规采区）。岩浆侵入影响，侵入体切割矿层，导致 $> 30\%$ 矿体失去开采价值。

4.2 岩土工程特性。岩性多样性，岩土种类 ≥ 3 种，强度差异 $> 50\%$ （如花岗岩与泥岩共存）；露头不良，岩相变化剧烈。特殊岩土与灾害，存在膨胀土、湿陷性黄土或古河道暗浜；滑坡、崩塌等物理灾害密度 ≥ 2 处/ km^2 。岩体结构面，外倾贯通结构面发育，控制边坡稳定性（如岩质边坡受多组节理切割）。

4.3 地形与环境因素。地形地貌，坡度 $> 30^\circ$ 的中低山区，相对高差 > 200 m；跨越两种以上地貌单元（如河谷与陡坡交错）。地震与活动断裂，抗震设防烈度 ≥ 7 度，且存在活动断裂带。人类扰动，地下采空区 ≥ 3 处或矿产开采强烈扰动地层。

4.4 工程响应与技术应对。勘察设计升级，复杂地质需启动三维地质建模（结合AI注意力机制优化断层空间关系），并采用“强支护+动态监测”策略。施工风险阈值，基坑深度 > 5 m且地质复杂时，自动触发“超危工程”管理流程；隧道穿越高地应力区需配置岩爆预警系统（如实时微震监测）。

5 深部找矿技术的应用

5.1 深部找矿技术应用领域。金属矿产勘探，深部铜金矿定位，技术组合：重力-磁法三维反演+深穿透地球化学探测实例：某铜矿在1200米深度发现盲矿体，通过电磁法（CSAMT）圈定低阻异常区，验证见矿厚度达15

米。突破点：突破传统500米勘查深度限制，钻探见矿率提升40%。战略性稀有金属勘查，关键技术：高精度锂铍遥感光谱识别，地幔流体示踪技术，例：硬岩锂矿在基岩裂隙带中发现深部富锂伟晶岩脉，资源量新增30万吨LCE当量。能源矿产领域，煤层气高效开发，技术应用：煤矿井下定向钻孔（ > 1500 米），微震监测压裂裂缝扩展，成效：山西沁水盆地单井日产气量提升至8000 m^3 ，采收率提高25%。页岩气藏精细评价，核心手段：三维地质力学建模预测甜点区，随钻测井（LWD）实时调整轨迹，成果：四川盆地埋深3500米页岩气层钻遇率超90%，测试产量达20万方/日。技术创新驱动领域，智能勘探系统，实时分析微震数据预测岩爆风险，准确率 $> 85\%$ ，构建矿山知识库，快速匹配历史案例辅助决策。国家战略资源拓展，老矿山深部接替资源，应用“地球冷凝演化理论”重新定位成矿靶区，山东金矿深部新增储量50吨。紧缺矿种增储，2025年上半年新发现锡、钨等战略矿产大中型矿产地25处，深部找矿贡献率达60%。

5.2 深部找矿技术如何应用于金属矿床发现。技术应用核心场景，深部构造控矿靶区定位，技术组合：高精度重力-磁法三维反演（误差 $< 10\%$ ），深穿透地球化学探针（探测深度 > 1500 米）。隐伏矿体三维预测，关键技术：矿田构造精细解析（识别控矿断裂空间展布），基于机器学习的三维成矿模型构建（如AI优化矿体边界预测），成效：多龙铜矿应用三维地质建模技术，精准预测斑岩矿体延伸方向，钻探验证见矿率提升40%，新增铜资源量784万吨。鞍本地区钒钛磁铁矿通过井中电磁测量技术，锁定深部矿体垂向延伸规律，新增资源量17亿吨。物探技术集成，四位一体工作模式：高分辨率地震测量+重力测量组合 \rightarrow 探测深度延伸至3公里，瞬变电磁法联用 \rightarrow 识别隐伏矿化蚀变带。战略矿种增储实践，金矿深部拓展，技术路径：控矿断裂带精细刻画（如Q507矿脉受断裂控制呈透镜状），深部工程系统验证（坑内钻探控制垂深 > 800 米），成果：2025年山东金矿深部新增储量50吨，服务年限延长15年。政策驱动与技术前沿，国家战略支撑，《黄金产业高质量发展实施方案（2025—2027年）》明确要求：2027年前实现2000米深度矿山开采技术应用，黄金资源量增长5%~10%。深部找矿范围扩展至500-2000米“第二找矿空间”。

5.3 深部找矿技术在非金属矿勘探中作用。深部找矿技术在非金属矿勘探中发挥着关键作用，通过技术创新突破传统浅层勘探限制，显著提升资源发现效率和储量规模。靶区定位与成矿理论创新，深部控矿规律识别，同位成矿理论应用：分析同一空间内多期矿化叠加

规律,指导深部靶区优选(如蚀变花岗岩型锂矿体预测)。例:某矿区基于地质体运动理论,探获49亿吨锂矿石(氧化锂131万吨),伴生钨锡等战略矿产。地球物理-化学技术集成,技术组合:高精度重力-磁法三维反演(探测深度>3公里,误差<10%),深穿透地球化学探针识别隐伏矿化蚀变带。成效:磷矿通过重力-地震联合反演,在800米深度发现隐伏磷矿体,新增资源量2.3亿吨。勘探技术创新与实践,三维建模与智能预测,关键技术:多源数据融合构建非金属矿体空间展布模型(如石灰岩矿体形态重构精度达85%),AI算法优化靶区筛选(证据权重法量化成矿概率)。

6 复杂地质条件深部找矿挑战

6.1 探测精度受限。信号衰减与干扰,深部矿体地球物理信号微弱,易受地表尾矿堆、高压线及复杂岩性干扰,导致重磁数据失真(铁矿勘探中传统设备受地面环境干扰严重)。超深地层地震波衰减显著(如塔里木盆地万米深井),成像精度不足,影响油气定位准确性。地质结构复杂性,断层发育导致矿体错断位移(如铜矿被多条断层分割为碎块状),传统勘查方法难以圈定矿体边界。岩溶漏斗区地层杂乱,岩性多变且溶洞发育,矿体赋存规律隐蔽。

6.2 理论适配性不足。成矿模型滞后,传统沉积成矿理论难以解释陆内深部成矿机制(如长江中下游成矿带需创新深部动力学模型)。覆盖区找矿缺乏有效模型,厚覆盖层屏蔽矿化信息(我国大量无磁性金属矿未被发现)。技术整合瓶颈,深部多场耦合(地应力+地温+流体)机理不清,制约灾害预警模型构建(淮南煤矿“四高一大大”特征导致灾害耦合叠加)。AI等技术应用尚浅,如随钻地质信息实时解析能力不足。

6.3 亟待突破方向。探测技术:研发抗噪算法与量子重力仪,提升深部信号识别能力;钻探工艺:优化仿生钻头设计,发展智能钻进控制系统降本增效;理论创新:深化“地球冷凝演化说”等新范式,构建覆盖区综合找矿模型。深部找矿需直面“看不见、钻不到、控不住”三重困境,唯有技术迭代与理论革新协同推进,方能破解复杂地质条件下的资源困局。

6.4 深部找矿技术未来发展趋势研究方向。高精度探测技术革新,量子重力仪规模化应用,新一代量子重力仪精度达微伽级(1微伽 $\approx 10^{-6}\text{m/s}^2$),可识别地下10公里内矿体密度差异,定位误差缩至厘米级(传统设备为米级)。抗干扰能力显著提升,可在工地震动环境下稳定运行,但设备成本仍超200万美元且续航仅8小时,亟需轻量化与功耗优化。多源数据智能融合,融合重磁、地震波、地温梯度等多维数据,构建三维地质-成矿动态模型。智能化技术与装备升级,AI驱动勘探决策,构建矿山知识库,整合历史案例与操作规程,支持钻探方案智能生成。自动化钻探系统,模块化钻机(如N6590型)提升超深井起拔能力,结合岩屑自动分析系统减少提钻频次30%。

总之,随着科技的发展,深部找矿技术不断创新,涌现出新技术和新方法,提高了找矿效率和准确性,为深部找矿提供了新的思路。展望未来,深部找矿技术将追求高效、准确、环保的发展方向。

参考文献

- [1]刘德文,浅谈深部找矿技术及其在复杂地质条件下的应用.2022.
- [2]周志英,深部找矿技术及其在复杂地质条件下的应用研究分析.2023.