

Study on the application of ground drilling technology in fault exploration

Jianfu Cao

Anhui Coalfield Geological Bureau Hydrogeological Exploration Team, Suzhou, Anhui, 234000, China

Abstract

Faults are significant products of geological tectonic movements, and their spatial distribution characteristics are directly related to regional geological stability assessment and engineering safety. Traditional exploration methods are limited by surface cover interference and insufficient detection depth, making it difficult to accurately obtain structural parameters of fault zones. Ground drilling technology, with its advantages of direct core sampling and in-situ testing within boreholes, has opened up technical pathways for revealing the orientation, mechanical properties, and hydrogeological conditions of faults. This paper focuses on the standardization of drilling procedures and multi-source data fusion analysis, aiming to enhance the accuracy of three-dimensional fault modeling, providing scientific support for geological disaster prevention and engineering site selection.

Keywords

ground drilling; fault exploration; core analysis; borehole imaging

地面钻探技术在断层勘查中的应用研究

曹建富

安徽省煤田地质局水文勘探队, 中国·安徽 宿州 234000

摘要

断层是地质构造运动的重要产物, 其空间展布特征与活动性直接关系区域地质稳定性评价及工程安全。传统勘查方法受到地表覆盖层干扰与探测深度不足的限制, 在精准获取断层破碎带结构参数方面存在困难。凭借着岩芯直接取样以及孔内原位测试优势的地面钻探技术, 为揭示断层产状、力学特性还有水文地质条件开拓出了技术路径。本文聚焦于钻探流程标准化的构建以及多源数据融合分析上, 目的在于提升断层三维建模的精度, 为地质灾害防治和工程选址给予科学的支撑。

关键词

地面钻探; 断层勘查; 岩心分析; 钻孔成像

1 引言

现有地球物理勘探手段虽能实现大范围快速扫描, 但却受到介质各向异性与信号衰减的限制, 难以准确界定断层破碎带的边界特征及内部结构。地面钻探技术通过将定向取芯与孔内物探相结合的方式, 能获取到关于断层垂向分带性以及力学参数的连续剖面信息, 如此便有效弥补了间接探测方法的数据缺失问题。本文基于岩土工程与钻探工艺交叉的视角, 对钻探技术在断层识别、参数提取以及稳定性评估中的应用流程展开系统梳理, 重点探讨钻进参数优化与多源数据协同解译方法。研究成果对于突破复杂地质环境下断层精细化勘查瓶颈具有实践价值, 在理论参考层面也为构建钻探技术标准化体系提供了有力支撑。

2 地面钻探技术概述

地面钻探技术依据动力传输方式与取芯原理的差异可划分为冲击钻探、旋转钻探、反循环钻探及定向钻探四类。冲击钻探依赖高频锤击作用破碎岩层, 其往复运动特征对卵石层与胶结砾岩具有较强穿透力, 钻头与岩体的瞬时接触模式能最大限度保留原状土结构特征。旋转钻探采用回转切削原理, 通过不同牙轮或金刚石钻头的组合设计适应软硬交替地层, 恒定的轴向压力与转速匹配使岩芯采取率显著提升, 尤其适用于深部均质岩体的连续取样。反循环钻探以压缩空气或泥浆为介质形成逆向循环系统, 高速流体将岩屑直接输送至地表, 在松散砂层与高渗透性地层中可有效避免孔壁坍塌并实现快速钻进。定向钻探借助可控弯接头与井下动力工具调整钻孔轨迹, 通过实时监测井斜角与方位角变化精准控制钻具走向, 能够绕避地下障碍物或沿预设地质界面延伸, 为复杂构造区三维空间勘探提供技术支撑。各类钻探技术的核心差异体现在岩层破碎机理与样品获取方式上, 其

【作者简介】曹建富(1993-), 男, 中国安徽省砀山县人, 硕士, 助理工程师, 从事地质调查与资源勘查研究。

设备选型需综合考虑地层岩性、目标深度及勘查精度等多重因素^[1]。

3 断层勘查的基本要求与技术难点

3.1 断层勘查的目的与任务

断层是地壳中的一种断裂带，经常伴随着地震活动，是地质灾害的重要来源。在工程建设中，断层地质对地基稳定性、地质灾害、工程安全等方面具有重要影响。因此，对断层地质情况进行全面、系统地勘察，是对工程建设安全和稳定性负责的重要工作。地质工作者需查明断层走向、倾向、倾角等产状要素，准确圈定破碎带宽度与影响范围，结合地层错动痕迹与构造岩特征判断断层性质及力学机制。针对活动断层需重点获取其最新活动年代、滑动速率与复发周期等动力学参数，评估潜在地震危险性对周边建筑设施与居民生活的威胁程度。勘查过程中常面临隐伏断层识别困难，地表无明显地貌标志的断裂构造需借助岩芯定向取样与显微构造分析追溯深部变形历史，第四纪松散沉积物覆盖区则需综合多重地质证据判断断层延展路径。复杂构造区多期次活动形成的叠加改造现象易导致断层属性误判，要求勘查人员系统梳理不同构造层位的变形序列，区分继承性活动与新生断裂的时空演化规律。勘查成果需转化为可供工程规划直接使用的量化指标，为地震地质灾害防治与国土空间开发提供可靠的地质基础数据支撑。

3.2 断层勘查的技术难点

地质体内部构造的非均质性与断裂带的多期次活动特征使得破碎带空间展布规律难以精确捕捉，尤其在覆盖层较厚区域，松散沉积物对地震波速的强烈衰减作用导致反射信号信噪比显著降低，间接探测手段获取的断层倾向与倾角参数常与钻孔验证结果存在系统性偏差。断裂带内部复杂的岩性互层结构与流体赋存状态对物性参数的反演建模形成干扰，地球物理方法在识别毫米级位移的次级断裂时分辨率不足，难以满足工程安全评价对断层精细刻画的需求。隐伏断层的空间定位受地表地形起伏与岩体风化程度影响，常规勘探剖面布置方案易遗漏走向多变的断裂分支，二维勘查成果向三维地质模型转化时易产生结构面连接误差。活动断层动态监测需要长期布设跨断裂观测站点，但地表植被覆盖与人类活动干扰导致形变监测数据连续性受损，跨季节温度变化引起的地表膨胀收缩效应可能掩盖真实的构造位移信号，如何区分构造运动与非构造因素对监测数据的影响成为长期观测的技术瓶颈^[2]。

3.3 传统断层勘查方法的局限性

传统断层勘查方法在实际应用中常受限于地质条件的复杂性与探测手段的固有缺陷，地质测绘依赖地表露头与构造形迹的可见性，在植被茂密或第四纪沉积覆盖区难以获取完整的断层空间展布特征，导致破碎带边界判定存在较大不确定性。物探手段虽能弥补地表观测的不足，但电法勘探与

重力勘探易受地下岩性差异及局部构造干扰，同一异常响应可能对应不同成因的断裂构造或岩体接触界面，解释过程常陷入多解性困境难以验证。隐伏断层探测面临更大挑战，常规勘查技术对深部构造的垂向分辨能力有限，尤其在多期构造叠加区域，浅层地球物理信号易被后期改造事件掩盖，无法准确追溯断层深部延伸轨迹与活动历史。松散沉积层中缺乏基岩错动证据时，传统方法往往难以区分构造变形与沉积压实作用形成的地层扰动，可能将古河道或滑坡体误判为断层活动产物。复杂构造区断层交切关系与运动学参数的定量解析需要多学科数据融合，单一勘查手段获取的孤立信息难以建立完整的构造演化模型，直接影响活动性评价与灾害风险评估的可靠性。

4 地面钻探技术在断层勘查中的应用流程

4.1 钻探前的准备工作

准备工作基于区域地质背景与勘查目标的深度耦合，地质人员应系统整合历史勘探数据与遥感解译成果，对目标断层的可能展布范围及影响带宽度进行多尺度预判，从而科学规划钻孔布设方案与取芯层位。岩芯管规格与钻头类型的匹配性设计直接影响破碎带识别效率，针对断层角砾岩与糜棱岩的差异性力学特征，需预先制定不同岩性地层的钻进参数调整预案，例如软硬互层界面处的转速控制策略与泥浆循环压力阈值设定。现场踏勘环节需重点评估施工区域的地表稳定性与地下水位波动规律，为钻机平台构筑与套管下入深度提供依据，雨季施工时还需预留排水沟渠与防塌方支护的冗余空间。钻探班组成员需在开钻前统一数据采集标准，明确岩芯编录中破碎带倾角测量与断层泥厚度的记录规范，同步校准孔内摄像仪与随钻测斜探头的精度参数，确保原始数据的时空一致性满足后期三维建模需求。钻探液配方的区域性优化试验应提前两周完成，结合地层孔隙率与矿物成分测试结果调整添加剂比例，避免因泥浆性能不稳定导致的孔壁坍塌或岩芯污染问题^[3]。

4.2 钻探设备的选择与操作

钻机型号的确定需综合考虑目标断层埋深与岩层物理特性，浅层松散沉积区多采用轻便式全液压钻机配合薄壁取芯管，遇到坚硬基岩则切换为涡轮钻进或金刚石钻头以保障取芯完整率。操作人员根据实时返渣颜色与钻进速度变化调整转速和压力，砂岩层段保持中低转速避免岩芯管过度磨损，泥岩夹层则需降低泵量防止水力冲刷破坏原生裂隙结构。班前检查环节必须逐项确认液压系统密封性与钻杆丝扣咬合状态，卡钻风险较高的破碎带施工前预先配制高粘度泥浆稳定孔壁，同时备足不同规格的扩孔器应对突发性孔径收缩。岩芯出筒后立即进行定向标记，使用防水记号笔在柱状体侧壁标注回次编号与顶底方向，尤其注意擦痕面与断层泥的原始产状保存，褪色风险较高的泥质岩芯需及时封装防氧化处理。遇到岩芯采取率骤降或回转扭矩异常波动时，操作

员应暂停推进并反复提动钻具判断孔内状况,破碎带频繁出现的孔段采取限制回次进尺策略,每回次控制在1.5米以内以提高破碎岩层取芯质量。钻探日志需同步记录每个回次的起止深度、冲洗液消耗量及岩粉特征,砾石层突现棱角状石英颗粒或灰岩段出现方解石膜壳等现象均需在备注栏重点标注,为后期判断断层活动期次提供原位证据。终孔后采用分层止水技术隔离不同含水层,水泥浆液灌注前需测定孔内静水位与温度数据,套管外壁间隙的封闭质量直接影响跨孔CT探测时的信号传输精度。

4.3 钻探过程中的数据采集与监测

操作人员需实时跟踪钻压、转速及泥浆泵压的动态变化曲线,结合岩屑返出速率与颗粒形态的连续观测,初步判断钻头是否进入断层破碎带或次级裂隙发育区。孔内摄像设备在每回次提钻后自动下放至孔底,对孔壁岩体节理产状与断层擦痕方向进行高清成像,图像识别算法将结构面几何参数转化为可量化分析的数字化高程模型,为判断断层活动期次提供可视化证据。随钻测斜仪以每分钟两次的频率记录钻孔轨迹的空间偏移量,当钻遇断层上下盘接触面时,方位角突变信号与岩芯破碎程度形成双重验证机制,有效规避因钻具漂移导致的构造面误判风险。地面监测站通过无线传输模块接收孔内电阻率探针与声波发射器的原始数据流,后台处理软件对地层波阻抗差异与流体渗透性特征进行交叉比对,动态修正断层破碎带宽度与倾角的解译结果。岩芯出筒后需立即进行真空封装并标注深度标签,X射线衍射仪与扫描电镜的快速检测数据同步录入地质数据库,与钻孔轨迹参数构成多维校验体系,最大限度降低人为编录误差对断层空间建模的干扰^[4]。

4.4 钻探后的数据分析与处理

岩芯样本的预处理工作需在钻探结束后24小时内启动,地质人员使用高分辨率扫描仪对定向标记的柱状岩芯进行三维数字化存档,重点捕捉擦痕面倾向与断层泥接触关系等微构造特征,扫描数据自动上传至地质信息管理平台生成可视化层序剖面。岩芯编录环节注重构造岩类型与蚀变程度的系统描述,角砾岩的砾石粒径分选性及胶结物成分差异需与扫描影像交叉验证,硅化强烈的碎裂岩段需配合偏光显微镜观察石英波状消光特征以还原构造应力场方向。钻进参数记

录仪采集的转速、泵压时序数据经滤波降噪处理后,与对应孔段的岩粉粒度分布图谱进行耦合分析,回扭矩异常峰值若与断层角砾岩出现深度吻合,可辅助判断破碎带内部结构非均质性。孔内电视拍摄的孔壁全景影像需经几何校正消除畸变,结合岩芯定向结果重建钻孔轨迹穿过的断层产状,糜棱岩条带倾角突变处往往指示次级断层面或构造透镜体边界。多方位孔数据整合时采用克里金插值算法构建断层带三维渗透率模型,渗透性突变的区域需核实地温梯度数据与地下水化学类型是否呈现构造控流特征。跨孔电阻率层析成像反演过程中,岩芯电性参数标定直接影响异常体形态解译精度,高导异常区若与钻探揭露的泥化夹层空间位置重叠,可确认断层导水性破碎程度量化关系。最终成果图件需保留原始数据置信区间标注,断层活动性评价报告必须注明钻探揭露最深构造痕迹的绝对年龄测试结果及其与区域地震目录的对应关系。

5 结语

凭借揭示断层垂向结构特征的直观能力,地面钻探技术让勘查数据的空间分辨率与可信度得到显著提升。合理控制钻进速率与泥浆配比可有效获取完整岩芯,而借助随钻测斜与孔内摄像技术的集成应用,将断层产状要素的现场识别精度提升至厘米级。在深部钻探方面,建议采用模块化组合钻具系统,以通过动态调整取芯方案来适应不同岩性地层的需求,同时强化孔间电阻率与声波测试数据的联合反演建模。未来研究应重点关注智能传感设备与钻进过程的深度融合,开发具备自主纠偏功能的定向钻进系统,建立起基于机器学习的三维地质模型动态更新机制。

参考文献

- [1] 张沛. 煤矿地质钻探技术的应用分析[J]. 能源与节能, 2024, (12): 261-263.
- [2] 胡荣杰,李亮. 地面定向钻探技术在新区巷道超查探查中的应用实践[J]. 能源技术与管理, 2024, 49 (02): 50-53.
- [3] 郑丙谦,张先恒. 地面钻探技术在断层勘查中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36 (02): 54-57.
- [4] 吴磊. 矿山地质资源勘查中断层分析的基本方法[J]. 世界有色金属, 2024, (23): 166-168.