

跨断层形变综合观测场地建设技术与实践

黄建强, 宋彬滨, 王雪玉*, 赵辉, 黄宝胜, 侯兴博

(山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队(山东省第七地质矿产勘查院), 山东 临沂 276006)

摘要: 立体式跨断层形变综合观测场地的建设,是把“地表-浅层-深部”多种手段布设到同一条活动断裂上,依托精准套管护壁、钻孔倾角精密控制及深部绳索取心等核心施工工艺,构建起高质量的立体观测体系,形成高密度、多频段、同步监测的“三维阵列”,可实时捕捉断层瞬态跳动并长期跟踪其慢性应变。结合山东省临沂市跨断层形变综合观测场地建设项目施工实践,介绍了2个连续观测站、3个断层形变综合观测墩和1套断层面牛顿力监测系统的施工技术,构建了一个立体式的跨断层形变综合观测场地。项目的实施不仅有助于提高区域的地震预警能力,减少地震灾害带来的损失,同时也为地质学、地震学等领域的科研提供宝贵数据支持,推动相关学科的发展。

关键词: 断层形变综合观测墩;牛顿力监测钻孔;绳索取心钻进;锚索

中图分类号: P634;P631.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0400-06

Construction technology and practice of comprehensive observation site for cross-fault deformation

HUANG Jianqiang, SONG Binbin, WANG Xueyu*, ZHAO Hui, HUANG Baosheng, HOU Xingbo

(No.7 Geological Brigade of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources (Shandong No.7 Institute of Geological and Mineral Exploration), Linyi Shandong 276006, China)

Abstract: The construction of a three-dimensional comprehensive observation site for cross-fault deformation involves deploying multiple observation methods across the "surface-shallow-deep" layers along the same active fault. Relying on core construction techniques such as precision casing wall protection, precise control of borehole inclination, and deep wireline coring, a high-quality three-dimensional observation system is established. This forms a "three-dimensional array" characterized by high density, multi-frequency, and synchronous monitoring, capable of real-time detection of transient fault movements and long-term tracking of chronic strain accumulation. Drawing on the construction practices of the Cross-Fault Deformation Comprehensive Observation Site Project in Linyi City, Shandong Province, this paper introduces the construction technologies for two continuous observation stations, three comprehensive fault deformation observation piers, and one set of fault plane Newtonian force monitoring systems, ultimately establishing a three-dimensional comprehensive observation site for cross-fault deformation. The implementation of this project not only helps improve regional earthquake early warning capabilities and mitigate the losses caused by earthquake disasters, but also provides valuable data support for scientific research in fields such as geology and seismology, thereby promoting the development of related disciplines.

Key words: comprehensive fault deformation observation pier; Newton force monitoring borehole; wire-line core drilling; anchor cable

0 引言

活动断裂是地震灾害的“震源命脉”,其瞬态错

动与慢性应变积累直接决定强震发生的时间、地点与强度。然而,传统单点、单手段观测难以同时捕

收稿日期:2026-04-21; 修回日期:2026-06-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.054

第一作者:黄建强,男,汉族,1978年生,高级工程师,探矿工程专业,主要从事地质钻探、定向钻探及深部钻探工艺方法研究等工作,山东省临沂市兰山区蒙山大道97号,1025199455@qq.com。

通信作者:王雪玉,男,汉族,1990年生,工程师,探矿工程专业,从事钻探技术工作,山东省临沂市兰山区蒙山大道97号,910978059@qq.com。

引用格式:黄建强,宋彬滨,王雪玉,等.跨断层形变综合观测场地建设技术与实践[J].钻探工程,2026,53(S1):400-405.

HUANG Jianqiang, SONG Binbin, WANG Xueyu, et al. Construction technology and practice of comprehensive observation site for cross-fault deformation[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):400-405.

捉从秒级跳动到十年尺度蠕滑的完整图像,导致地震危险性判定长期面临“看不见、联不通、算不准”的瓶颈。随着大陆活动地块理论与亚失稳实验认识的深化,构建“地表-浅层-深部”立体协同观测阵列,已成为国际地震科学前沿的共识。立体式跨断层形变综合观测场地正是在同一条活动断裂上集成地表位移观测、水准、基线、深孔牛顿力、光纤应变等多物理量传感器,形成高密度、多频段、同步监测的“三维阵列”,既能捕捉断层瞬态跳动,也能长期跟踪其慢性演化,为破解震源物理全过程提供了前所未有的数据入口。

山东省临沂市跨断层形变综合观测场地将上述理念转化为工程实践。通过新建2个连续观测站、3个断层形变综合观测墩和1套深度300 m的断层面牛顿力监测系统^[1],构建起覆盖地表毫米级位移至地下应力微变的立体观测链。施工过程中,创新采用“绳索取心+跟管钻进+分级扩孔+预应力锚索”组合工艺,在破碎带内一次性成孔、永久保径,实现了深孔传感器20年免维护运行的技术突破。该场地的建成不仅将地震预警时间提前10 s以上,更为研究断裂带应变分配、成核深度及临界前

兆提供了厘米-牛顿级精度的连续数据,对推动地震机理、危险评估与工程减灾协同进步具有示范意义。

1 项目概况

1.1 项目设计

项目位于山东省临沂市,旨在构建一个立体式的跨断层形变综合观测场地。项目的基本设计包括:新建2个连续观测站(断层两侧分别布设1个基岩观测墩和1个土层观测墩);建设3个断层形变综合观测墩(包含2个基岩观测墩和1个土层观测墩);以及部署1套断层面牛顿力监测系统。其中,牛顿力监测钻孔的设计深度为300 m,终孔直径≥150 mm,钻孔入射角设定为40°,以实现断层应力状态的精准监测。

1.2 钻遇地层与岩性分析

根据钻探取心揭露情况,将该项目钻遇第四系地层划分为7层^[2],分别为:泥砂堆积岩,砖红色岩屑粉砂岩,砖红色岩屑细砂岩,砖红、紫红色构造角砾岩、断层泥,紫红色岩屑细砂岩(2层),紫红色岩屑中砂岩。具体岩性描述如表1所示,钻孔主要孔段岩心照片如图1所示。

表1 钻遇地层岩性描述

孔深/m	厚度/m	岩性描述
0.00~1.77	1.77	灰红色泥砂
1.77~45.80	44.03	砖红色岩屑粉砂岩,含岩屑、长石及少量石英、泥质。岩石硬度较低,完整性较差
45.80~236.30	190.50	砖红色岩屑细砂岩,含岩屑、长石及少量石英、泥质。岩石硬度较低,完整性适中。214 m后因受地震断裂扰动,岩石轻微破碎。232及232.7 m处见少量灰绿色泥质沿裂隙充填,厚度约1 cm
236.30~247.23	10.93	砖红、紫红色构造角砾岩、断层泥。顶部3 m为砖红色构造角砾岩,角砾成分为顶部围岩岩屑、砂岩,泥质胶结;底部为紫红色构造角砾岩、断层泥,泥质胶结。243.1~243.3 m处见两条碳酸盐岩脉,宽为3~5 mm
247.23~268.10	20.87	紫红色岩屑细砂岩,含岩屑、长石及少量石英、泥质。岩石硬度较低,完整性较差,254~268.1 m处岩石破碎严重
268.10~284.60	16.50	紫红色岩屑细砂岩,含岩屑、长石及少量石英、泥质。岩石硬度较低,完整性较差,268.1~282.5 m处岩石破碎严重
284.60~311.30	26.70	紫红色岩屑中砂岩,含岩屑、长石及少量石英、泥质。岩石硬度适中,完整性较好

2 发震断裂带牛顿力监测系统建设

发震断裂带牛顿力监测系统建设包括监测孔成孔、锚索的制作及下放、注浆、锚墩建设和恒阻器定位安装等过程,按照6个阶段实施,施工工序如表2所示。

2.1 监测孔成孔

发震断裂带牛顿力监测孔设计方位角100°,倾角40°,终孔方位角100.69°,倾角42.7°,施工孔深及孔斜数据如表3所示,施工工序如下:

(1)采用Ø96 mm单管硬质合金钻头进行取心



(a) 236.30~247.23 m砖红、紫红色构造角砾岩，断层泥岩心



(b) 247.23~268.10 m紫红色岩屑细砂岩岩心

图1 钻孔主要孔段岩心

钻进，钻进至1.77 m，下入 $\varnothing 89$ mm套管。

(2)采用 $\varnothing 75$ mm孕镶金刚石钻头进行绳索取心钻进，钻进至311.30 m，终孔。

(3)起拔 $\varnothing 89$ mm套管，采用 $\varnothing 110$ mm导向复合片钻头进行扩孔钻进，钻进至孔底。

表2 发震断裂带牛顿力监测钻孔施工工序

施工工序	施工内容
第一阶段	钻孔钻进取心施工
第二阶段	钻孔扫孔施工及成孔
第三阶段	钻孔下锚索施工
第四阶段	钻孔注浆
第五阶段	监测站锚墩施工
第六阶段	恒阻器定位安装

(4)采用 $\varnothing 130$ mm导向复合片钻头进行扩孔钻进至孔底。

(5)采用 $\varnothing 150$ mm导向复合片钻头进行扩孔钻进至孔底。

(6)钻孔质量：钻孔设计孔深300 m，实际钻进108回次，钻进进尺311.30 m，设计方位角 100° ，倾角 40° ，终孔方位角 100.69° ，倾角 42.7° ，该钻孔取心工艺主要采用 $\varnothing 96$ mm单管取心钻具和 $\varnothing 75$ mm的绳索取心钻具，全孔平均岩心采取率95.17%，孔深及孔斜数据采用JTL-40FW型陀螺测斜仪测量，各项技术数据均满足设计要求(表3)。

表3 钻孔施工孔深及孔斜数据

记录孔深/m	校测孔深/m	误差/m	误差率/%	测量孔深/m	倾角/($^{\circ}$)	方位角/($^{\circ}$)
无	无			51.80	40.1	100.00
102.80	102.80	0	0	102.80	40.1	102.15
150.80	150.80	0	0	150.80	41.6	106.78
201.80	201.80	0	0	201.80	42.0	99.32
252.80	252.80	0	0	252.80	42.4	102.03
299.30	299.30	0	0	299.30	42.7	101.98
311.30	311.30	0	0	311.30	42.7	100.69

2.2 锚索的制作及下放

(1)锚索采用 $\varnothing 15.2$ mm的无黏结预应力钢绞线，强度级别为1860 MPa。

(2)按照设计要求，采用砂轮切割机将钢绞线切成6段，并对每根钢绞线的锚固段部分进行喷砂除锈和溶剂脱脂处理，确保水泥浆黏结强度。钢绞线的锚固段部分采用箍线环(采用 $\varnothing 8$ mm钢筋焊接成内径为4 cm的圆环)进行绑扎。

(3)锚索制作完成后采用裸孔下锚工艺，下放过程需人工配合机械匀速推进，保持弯曲半径 ≤ 3 m，严禁猛落或强行下入以防损伤注浆管及破坏孔壁。下放期间每推进50 m须暂停作业，利用测斜仪或张

力计校验锚索张力与孔斜，确保杆体居中且无卡阻现象。锚索入孔到位后，需全面检查注浆管通畅性及孔口预留长度，确认锚索体平顺、无打折破损后方可进行后续注浆作业，确保施工质量与结构安全。

2.3 注浆

将注浆管与BW250型泥浆泵连接进行洗孔作业，直至将孔内黏稠泥浆替换成满足注浆要求的稀泥浆。经技术人员把关认可后，在技术人员的监督下采用搅浆机现场搅拌浆液进行注浆。水泥采用强度等级为42.5的硅酸盐水泥，水灰比0.45。采用从孔底到孔口返浆式注浆(距孔口2 m停止注浆)，注浆

压力0.3~0.4 MPa,全过程压力平稳,历时8.5 h,直至孔口返浆,完成注浆工作。之后,对注浆量、压力变化及返浆情况进行详细记录。

2.4 锚墩建设

锚墩采用5×5角铁焊接框架,内置钢筋网(横向钢筋 $\Phi 20@200$ mm,纵向钢筋 $\Phi 8@200$ mm),尺寸上底为500 mm×1000 mm,下底为1500 mm×1000 mm。锚墩整体采用混凝土浇筑,混凝土强度为C30。锚墩效果如图2所示。



图2 锚墩效果

2.5 恒阻器定位安装

在技术团队指导下,采用声学定位与张力反馈双校验技术。通过孔内声学探测仪实时获取恒阻器深度与姿态数据,同步结合张力计监测下放过程中的受力变化,以“位置+受力”双重指标相互印证,精准判定恒阻器到达断层下盘设计位置,确保定位偏差控制在 ± 3 m以内。安装后保留3 m调节段,为后续张拉预留操作空间。

3 观测墩建设施工

观测墩建设施工依据地理与地质环境差异,将观测墩划分为基岩与土层两类。建设内容共包含2个连续观测站(含基岩、土层观测墩各1个)及3个断层形变综合观测墩(含2个基岩、1个土层观测墩)。在点位布局上,A点与B点的断层形变综合观测墩与连续观测墩实行共址建设,C点断层形变综合观测墩则独立建设,且确保了3个观测墩测点之间相互通视。

3.1 基岩观测墩建设

基岩观测墩建设过程中,地下部分采用开挖施工。从地表开挖至完整基岩处,清理基岩表面的风化层,再用风镐向下开凿出深0.5 m、直径1 m的圆

坑,并在坑底打钢筋植入孔,将焊接好的钢筋笼下放,采用C30混凝土一次性连续浇筑完成观测墩,同时埋设强制归心装置和水准标志。

3.2 土层观测墩建设

土层观测墩建设过程中采用气动潜孔锤钻机施工,钻井完成后用空压机进行洗井、排渣,并用吊车将钢筋笼快速放入孔内,使用PVC管将准备好的C30混凝土灌入孔底,每灌入1 m混凝土用振动棒振动一次,整个施工过程一次性完成。

观测墩建设效果如图3所示。



(a) A点



(b) B点



(c) C点

图3 观测墩效果

4 监测设备安装

监测设备的安装是整个项目的最终落脚点,直接决定了系统是否能够稳定、高效地运行。安装前

对设备基础、供电线路、通信接口等进行全面检查,确保各项条件均符合设计要求。

(1)太阳能板平整安装,朝向为正南方向,以最大化接收太阳辐射能量,提高发电效率。支架与地面连接采用预埋地脚螺栓或膨胀螺栓固定,同时加设斜撑加固。

(2)穿线管采用钢制材质,埋地敷设,深度1.2 m,穿越道路或易损区域时加设保护套管。监测设备终端统一安装于机房内,配备UPS不间断电源系统,确保设备在突发断电情况下仍能持续工作一段时间,避免数据丢失。

(3)监控设备(如摄像头、报警装置等)合理布置,覆盖关键区域,确保全天候可视监控,提升整体系统的安全性和可靠性。

5 施工技术难点及解决方案

5.1 低倾角钻孔轨迹精准控制技术

本项目采用40°入射角斜孔设计,为有效解决钻孔倾角偏差导致无法精准穿越断层带的问题,施工过程中采用以下技术措施:

(1)孔位测放与校验:采用北斗GNSS RTK技术(平面精度 $\pm 2\text{ mm}+0.5\text{ ppm}$)结合全站仪测放孔位,执行“初放—复测—监理复核”三级校验流程,确保孔位偏差为 $\pm 5\text{ cm}$,优于设计要求的 $\pm 10\text{ cm}$ 。开钻前由甲方代表现场签字确认坐标控制点,建立永久性定位基准桩。

(2)弯曲度测量与动态纠偏:每钻进30 m采用JTL-40FW型陀螺测斜仪(分辨率 0.01°)实施顶角及方位角测量,较规范要求的50 m频次提高66%。在软硬岩交界面,采用螺杆钻具+定向仪实施预防性纠偏。对钻孔轨迹进行实时建模分析,确保每100 m顶角偏差 $<1.5^\circ$ (低于技术要求的 $\leq 2^\circ$)^[3-4]。

5.2 岩心采取率保障工艺

针对岩心采取率技术要求的常规段 $\geq 80\%$,断层带 $\geq 90\%$,实施差异化取心工艺:

(1)钻具选型:上部采用 $\varnothing 96\text{ mm}$ 单管取心钻具,配用硬质合金取心钻头;下部换用 $\varnothing 75\text{ mm}$ 绳索取心双管钻具,配用孕镶金刚石钻头,确保岩心完整性^[5-7]。

(2)半合管取心技术:在断层预测带及主断裂带(根据物探确定)采用半合管取心工艺,岩心管设计为纵向剖分式,取心后内管闭合提升,避免提钻

振动导致的岩心二次破碎。

(3)岩心全程数字化管理:实施“一筒四拍”制度(原状、清洗后、编号后、装箱后拍照),采用红油漆分层段连续编号,同步录入岩心电子数据库。配备定制岩心展示柜,按1:200比例制作钻孔柱状图。

5.3 断层破碎带综合控制技术

针对断层破碎带的施工难点,采取了超前预测、分段压力平衡钻进、加密水文观测等控制方案。

(1)超前预测与动态调整:在钻孔至断层预测带前启动断层预警程序,每回次进尺缩减至0.5 m,断层角砾岩特征为:灰绿—灰褐色角砾(含量65%~75%),粒径0.5~2 cm,棱角状—次棱角状,充填碎粒岩和碎斑岩。

(2)分段压力平衡钻进:上部地层采用无固相聚合物冲洗液(黏度35~40 s),进入断层带采用低固相纳米封堵浆液(配方:4%膨润土+0.3% PAC-LV+1% 纳米 SiO_2),形成分子级封堵膜,减少破碎带漏失^[2,5,8]。

(3)实时水文监测系统:配备自动水位记录仪(精度 $\pm 1\text{ cm}$),每班实施提钻后/下钻前动水位观测(间隔10 min),同步记录单回次冲洗液消耗量。遇涌水、漏失等异常时,立即注入由速凝水泥浆与核桃壳、云母片等桥塞复合材料混合而成的浆液。

5.4 软弱岩层孔壁稳定技术

针对钻遇的软弱岩层遇水软化、缩径风险,实施三重防护体系:

(1)力学护壁:采用阶梯式套管程序,套管间环空灌注早强微膨胀水泥浆(膨胀率2%~3%),形成连续支撑。

(2)化学固结:配制硅酸盐-聚合物复合冲洗液(配方:3% KCl+0.5% HPH-21+2% SMP-1),有效抑制水化膨胀^[7-9]。

(3)工艺防控:在强缩径层位执行“限速钻进”工艺(进尺 $\leq 1\text{ m/h}$),每钻完单根实施“划眼修孔”(反复提钻3次修整孔壁)。提钻速度控制在0.3 m/s以内,避免抽吸效应引发塌孔^[10]。

5.5 分阶段张拉与监测集成

采用分级加载同步张拉技术,确保牛顿力监测系统精准运行:

(1)预张拉与正式张拉:砂浆强度达80%后实施预张拉(0.1倍设计荷载),消除系统间隙。正式张拉分四级(0.25 P→0.5 P→0.75 P→1.2 P)实施,每

级稳压 10 min,记录伸长量。最终超张拉至 200 t (1.2 P)稳压 48 h,锁定荷载 150 t。分级加载同步张拉如图 4 所示。



图4 分级加载同步张拉

(2)监测系统集成:张拉后安装 NPR 监测装置(恒阻器、采集终端、三轴传感器),太阳能供电系统采用 1000 W 光伏板+600 Ah 蓄电池组。穿线管全程采用 $\varnothing 75$ mm 镀锌钢管(埋深 1.2 m),观测室至锚墩段加装 EMI 电磁屏蔽管,防止电磁干扰。监测系统建成效果如图 5 所示。

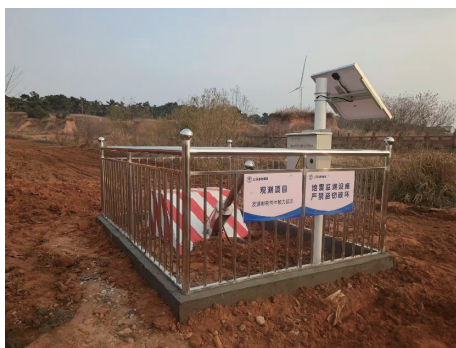


图5 监测系统建成效果

6 结语

立体式跨断层形变综合观测场地的建设,通过将连续观测站、综合观测墩与牛顿力监测三种异构观测手段耦合于同一断裂段,构建了覆盖垂向 0~300 m、横向 ± 500 m,时间尺度从秒级至年級的“三维立体监测阵列”。该阵列实现了对断层瞬态错动与慢性应变积累的同框架捕捉、分离与标定。实践表明,通过高密度的台阵布局与互补的频段设计,可有效将传统多期复测才能分辨的毫米级形变信

号转化为实时数据流。这不仅为地震灾情的会商研判提供了关键技术数据,也为地震灾害风险评估与应急响应决策提供了即时、量化的科学依据。在建设过程中形成的“基岩开挖-套管护壁-深孔光纤-牛顿力耦合”一体化施工工艺,经总结提升已形成可复制推广的技术模块,为其他活动断裂带的规模化观测台阵建设奠定了工程范式。

随着观测数据积累跨度逐渐覆盖一个完整的地震复发周期,该立体式观测场地有望从单一的“监测窗口”升级为研究断层动力学的“天然实验室”,在揭示断层应力腐蚀、慢滑移成核机制及级联破裂演化等前沿科学问题中发挥不可替代的作用。地震防御的终极愿景在于实现城市在断裂带之上的安全韧性,而实现这一目标的前提是让深部断裂在仪器监测下变得透明。该“三维阵列”将作为防震减灾事业的关键“基准点”,在每一次地壳的静默拉伸与压缩中,将不可见的构造应力转化为可视化的公共安全屏障。

参考文献:

- [1] 林俊宇,黄杨,向文斌.抑制性封堵泥浆在煤系地层钻探施工中的应用[J].西部探矿工程,2025,37(6):27-29.
- [2] 王志祥,欧涛,韩庆.绳索取心钻孔堵漏新工艺研究[J].钻探工程,2025,52(S1):193-198.
- [3] 蒋力.新形势下当前地质矿产绿色勘查及找矿技术研究[J].西部探矿工程,2025,37(3):177-179,183.
- [4] 渠洪杰,谭春亮,冉灵杰,等.面向新一轮找矿突破战略行动绿色勘查的钻探技术研发与应用建议[J].中国矿业,2024,33(10):246-256.
- [5] 刘强.防斜纠斜技术在小口径岩心钻探中的应用——以江西省德兴市德兴铜矿铜厂矿区为例[J].世界有色金属,2024(9):175-177.
- [6] 王娟.深孔钻探防斜纠斜技术与管理措施探究[J].城市建设理论(电子版),2023(12):107-109.
- [7] 潘德元,贺前平,蔡隽,等.绳索取心满眼管柱的力学模型优化与应用[J].力学与实践,2023,45(3):585-591.
- [8] 蔡隽,吕敬尊,潘德元,等.湖南安化天明矿区复杂地层钻探难点及对策研究[J].中国锰业,2023,41(3):25-31.
- [9] 郝峰,李存峰.跨断层牛顿力监测系统超大长度锚索综合施工技术[J].钻探工程,2021,48(5):88-95.
- [10] 刘少伟,尚鹏翔,张辉,等.煤矿软弱围岩巷道锚杆孔扩孔机理与试验[J].煤炭学报,2015,40(8):1753-1760.

(编辑 王文)