

深孔钻探施工中取心技术的提升与误差控制

张文龙 栾天龙 于明保 于 礼

中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心 黑龙江哈尔滨 150000

【摘要】深孔钻探施工不单考验设备性能，也在于操作精度和地质适应性等多重要素。取心技术关系到地质样本的真实性与完整度，一旦在执行过程中发生定位偏差或操作疏漏，便会影响后续分析与评价。本文依据深孔钻探的实际经验，阐述了取心技术常见误差的主要来源，包括设备精度不足、操作人员失误、地质条件多变以及钻孔轨迹偏差。针对这些薄弱环节，本文探讨了可行的误差控制与优化思路，对于矿产勘查、地质科研以及地下工程定位都具有参考价值。

【关键词】深孔钻探；取心技术；误差来源；轨迹控制；设备维护

引言

深孔钻探在资源勘查和地下工程领域具有不可替代的作用，但它的施工难度随着钻进深度和地质复杂度呈指数型上升。与浅孔或中深孔相比，深孔施工面临的动力负荷高、岩层压力大、地下水流强度差异明显，而取心作业对现场技术人员与设备的要求也更加严苛。取心结果若存在显著偏差，不仅会误导地质解释，还可能对矿产规划、岩石力学研究乃至工程安全性评估造成负面影响。由此可见，有必要系统地分析导致取心精度下降的要素，并提出可操作的改进与误差控制手段，从而让取心数据更具准确性与代表性。基于若干深井施工案例我们不难发现导致取心偏差的原因往往相互交织，需要多维度的统筹管理和工艺提升。下面将从设备、操作、地质条件、轨迹控制四个方面解读误差产生的关键，并在此基础上探讨如何应用监测、预测以及设备维护策略来减少偏差，最终为深孔钻探提供更安全可靠的施工方案。

1 深孔钻探施工中取心技术误差来源

1.1 钻探设备的误差

深孔钻探对设备精度的依赖程度远高于常规孔，在大深度环境里，岩层压力、温度梯度和高强度摩擦会放大设备的微小缺陷，即便是口径较小的岩心管，若其壁厚均匀度存在误差，或是接头丝扣的同轴度不够，也可能在连续旋进时引发轻微偏摆。再者，动力系统若存在抖动或转速不稳定，亦会让核心管具在进入地层后产生弯曲或扭动，某些设备在出厂时标称精度较高，但经过数十次以上的深孔施工后，其轴承及传动部件发生磨损，导致取心效率和稳

定性逐渐下降。实际施工统计表明，当钻机使用年限超过5年且尚未进行系统检修时，取心失效率可提高约12%~15%。除此之外，一些辅助装置的精度也不容忽视。比如定向工具若误差大，会使取心方位与实际预期不符，进而给后续的岩芯方向性分析带来干扰。总的来说，在深孔环境下，任何细微的机械或仪表误差都会在多次取心操作中被放大，最终造成岩芯回收率偏低或样本结构变化等不良后果。为此，需要定期检测和标定关键设备的精度，及时淘汰或修复不合格部件，并在施工时严格遵守适配性原则，以确保设备能够持续稳定地发挥最佳效能。

1.2 操作人员的误差

人与设备之间的交互贯穿于深孔钻探始终，任何操作细节的疏忽都有可能引发连锁反应。操作人员的误差不仅体现在钻进参数的设置，也与把握操作节奏、判断地质变化、及时处理突发情况等环节息息相关。若技术人员对地层硬度或孔内水文环境预判不准确，往往会导致给进速度或扭矩设置失当，从而使得取心管卡阻或岩芯破碎。取心过程中如果操作人员未严格执行升降管的规范，岩芯在拉出时有可能碰撞管壁而受损，尤其在长时间连续作业或夜间施工时，疲劳和注意力不集中会放大人为失误，某地铁隧道下方深孔工程曾出现夜班操作工人在抽芯时动作过猛，造成岩芯顶部严重裂损。据现场记录，这种因操作习惯不当导致的取心损失占据总误差的20%左右。为规避人为误差带来的负面影响，除了要加强培训考核，还需明确操作流程的标准化模式，例如控制单次进尺量、规范岩芯提出顺序、实时监测扭矩变化，一旦发现异常信号就要迅速

暂停并检查，能将误差在萌芽阶段加以控制。

1.3 地质条件对误差的影响

地质条件的多样性是深孔钻探的特征挑战，坚硬岩层往往能保证较高质量的完整岩芯，但若遭遇破碎带或断层，取心管可能受到不均匀应力而弯曲，或者产生岩芯环状开裂。此外，岩性变化常常交替出现，当局部岩层硬度突变或有软弱夹层时，不同段落的取心损耗也会大相径庭。地下水活动也对取心质量构成干扰。若遇到高渗透性的含水层或裂隙水流冲刷，会削弱岩石胶结度，同时改变孔内压力分布，让岩芯在管内承受额外水流冲击。有时地层中还含有膨胀性黏土矿物，岩石在高水分条件下迅速膨胀软化，难以维持原始结构，从而增加岩芯破损率。某西部深井勘探数据显示，该地区地下水富含盐分与CO₂，岩芯回收率较同类地层大约低了8~10个百分点。要在这类环境下取得较准确的岩芯，需要提前制定相应的泥浆护壁与排水策略，灵活运用低转速高扭矩模式或跟管工艺，并在判定地层异常后及时更换适配钻头或取心工具。

1.4 钻孔轨迹控制误差

深孔钻探往往伴随严格的轨迹控制要求，一旦轨迹出现明显偏离，会在纵深处放大冲击与受力不均，从而妨碍取心操作。孔道弯曲或角度失控会导致钻具在管口与孔壁间反复摩擦，出现偏磨或卡钻现象，也容易让取心管在破碎带发生碰撞。特别是在斜孔或定向孔施工时，若未及时修正倾角与方位角，钻具下行路径与既定目标层位相差甚远，取到的岩芯很可能来自与预期不同的地质单元，甚至使岩芯朝向与真实层理不匹配，后续难以进行精确的地质分析。某矿山在进行850米深定向钻孔时，由于初始倾角设置不当加之轨迹测量延误，钻孔末端相对设计位置偏差达到2度以上。对于地质取心来说2度的偏离在垂向深度上足以令数米厚度的目标层错过或者部分缺失。与此同时连续弯曲还会让管具承受较大横向应力，出现扭断或管壁磨损超限等风险，从而加剧取心误差。为了保持轨迹稳定，需要在钻进过程里配置定向工具、轨迹测斜仪及随钻测量系统，并结合泥浆配方和压力调节，努力使孔道保持理想形态。

2 误差控制与优化措施

2.1 误差分析与控制方法

要减少取心误差，首先要明确误差出现的主次原因，

通过数据分析和现场观测进行分类归纳，一般可将取心误差分为随机误差和系统误差两类，对于随机误差而言，多半与操作人员临场发挥或地质条件的偶然波动相关，对此可采用多次重复取心和对比较验的策略，例如在关键深度设置双管取心或取双重岩心，以期通过对比分析来识别并减小偶发性偏差。针对系统误差说，通常来自设备精度不足、轨迹测量延迟或泥浆性能不稳定等相对固定的因素，需要通过工艺改进或技术升级来加以修正。部分工程单位已开始使用误差分配法，将深度测量、方位测量以及角度校准所产生的可能误差量化评估，进而在施工前将这些数值设定为管控指标。现场也可应用大数据和可视化手段来追踪取心质量。通过为每一段取心记录岩芯回收率、岩芯破损情况和地层性质，然后与设备参数做关联分析，找出异常高发区或某一施工班组取心异常的规律。对比分析若显示同一种岩性在不同班组取心偏差差异明显，说明操作因素占主导；如果同一班组在同类岩性中也频繁出现岩芯碎裂，可能与设备或泥浆等客观因素相关。针对这些排查结果，再制定优化策略，从根本上控制误差。通过这样纵横结合的分析方式，可将零散的施工数据转化为误差防控的依据，并在后续深孔钻探中不断迭代改进。

2.2 误差预测与实时调整技术

深孔施工面临的环境变化较为动态，因此仅靠事后分析不足以完全掌握误差走向，为提高取心质量，需要将误差预测与实时调整相结合。误差预测可借助数值模拟与统计模型来进行：在施工之前或钻孔过程中，根据既有地质资料与岩性特征，建立地层模型并模拟不同钻进参数对岩芯完整度的影响，若观测到泥浆压力或扭矩异常可以将这些参数投入模型，提前预判岩芯的破损风险或取心偏差范围。如果预测结果显示风险正逐步增大，此时作为现场技术人员，就能及时调低转速或切换取心方式。比如安装在钻柱上的随钻测量装置，可通过电缆或无线传输将孔内扭矩、倾角与井底温度等信息送回地面控制台，操作员得到提示后能够在最短时间内变更泥浆性质、给进速度甚至重新设计轨迹修正段。新型定向钻进系统可以主动调节钻头倾斜角度，使取心轨迹更精确地贴近设计要求；结合井下摄影设备或声呐扫描技术，也能在关键地层中监控岩壁裂隙或破碎程度，对取心方案做动态微调。某单位在一口

1200米的深孔探查时,就成功利用随钻测量数据,通过反馈控制实现轨迹在线微修正,把最终孔底位置与设计目标的偏差控制在1.5米之内,经过一段时间的探测可以数据反馈与预先模型预测能够协同配合,提升取心精度,对地质研究的辅助作用也得以体现。

2.3 优化钻孔轨迹与方向控制

深孔钻探若要获取高质量的岩芯,孔道形态必须得到合理控制。定向技术不仅要解决“钻到哪里”的问题,也要兼顾“以什么姿态接触地层”才能获得最佳取心效果。尤其在复杂地层或断裂密集区,若缺乏轨迹优化,钻具往往会在井下遭遇不均匀应力与弯曲力矩,导致取心管产生意外变形和摩擦。为了降低此类风险,通常会在钻前进行轨迹规划,包括初始角度选择、各段斜率控制以及修正节点布设。在施工时随钻定向常见方法是在钻具中整合泥浆驱动马达与可调斜器,其主要借助改变马达的偏心轴向来实现倾斜,引导钻头缓慢转向,施工人员结合地质导向仪返回的信息,实时调整偏心角度,使孔道逐渐偏转或保持稳定角度。若遇到非正常地层需要及时短半径或复合修正,以避开大范围破碎带。相比传统“打一段测一次”的离线定向方式,这种实时调整减少了偏离累积并能更加精准地纠偏。在孔口到中深段之间,也可引入专门的防斜工具与扶正器,让钻具在井下保持较直的姿态,从根本上降低孔道弯曲度。而对于终孔阶段的微调,同样可使用电缆测斜或随钻仪器完成精细修正,上述措施不仅能使取心管进入目标地层的角度更恰当,也能防止由于孔道弯曲而造成的岩芯损坏与卡阻。

2.4 定期检测与维护钻探设备

深孔钻探项目往往持续时间较长,对设备稳定性与可用度的要求非常严格。为维持取心过程的高精度,有必要制订系统的设备维护与检测计划,并按阶段落实。一方面,需要将核心组件如主轴、轴承、传动齿轮、螺纹接头等列为重点检查对象。检测周期可根据累计作业时长或进尺量来确定,例如在每钻进500~600米后,对关键部件进行开盖检修或无损探伤,排除磨损过度或微裂纹隐患。如果发现丝扣配合度明显降低或轴套偏摆超过标准数值,则要及时调换或修复。另一方面,应当确保随钻测量仪器、角度传

感器和井下摄像头等精密系统保持良好工作状态。每次转场或拆装后,都要重新标定其传感基准,预防携带、运输过程中对零件造成的轻微偏移。在设备保养层面,为减少现场突发故障,需要依托定期更换润滑油液、液压油等基础性工作,让动力系统保持稳定输出。对于使用频率极高的水泵或泥浆搅拌机,也应进行排放压力与阀件密封的常规检修。某些先进钻探设备配备了远程监控与自动报警系统,可以连续追踪油温、轴承转速、钻杆扭矩、泥浆压力等核心参数,一旦监测数据超出正常范围,系统会自动触发报警,并将异常信息发送至操作员终端,极大提升了设备管理的科学性和及时性,同时某些深井钻机的旋转主轴组件承受长期高强度负荷,普通维护计划可能要求每300小时更换一次轴承,而智能监测系统可以根据轴承的实际磨损情况,动态调整更换周期,既避免了过度保养造成的资源浪费,也能确保设备在最佳状态下运行。

3 结语

深孔钻探的取心技术对于地质与资源领域具有不可或缺的意义,但在深孔环境下实现准确高效的取心并非易事。影响结果的因素不仅包含设备精度或操作水准,还与地层构造、水文环境以及孔道轨迹等多方面交互相关。只有对每一层面的误差源进行细化剖析,才能在施工方案中加以针对性优化与预防。多项技术融合后显著提高岩芯回收率与完整度,也有助于在更深、更复杂的地层中推进地质研究与矿产勘查。展望后续,若能结合更多自动化与数字化手段,让钻探过程具备更完善的现场感知与自主决策能力,深孔取心的误差必将进一步降低,从而为地质工作与工程开发提供更精确、可靠的基础数据支撑。

参考文献:

- [1] 朱江龙,张伟,黄洪波,等.深孔取心钻进用高速顶驱式钻机[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(09):114-119.
- [2] 张宝河,王政敏,边鹏,等.哈达门沟深孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(06):14-18.
- [3] 于辉,叶兰肃.新疆阿舍勒铜矿深孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):32-34.