

复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探技术研究

王金昊 马 牛 贾建涛

陕西省煤层气开发利用有限公司钻探分公司 陕西 榆林 719000

摘要: 矿山岩土工程勘察钻探技术对资源开发意义重大。本文聚焦复杂地质环境, 阐述冲击、回转、螺旋及组合钻探技术原理与适用条件, 分析岩土体特性、地质构造、地下水及不良地质体对技术实施的影响, 提出设备选型调试、工艺参数设定等关键操作要点, 并从设备性能、工艺、取样技术及适配性调整四方面探讨优化方向, 为复杂地质条件下矿山岩土工程勘察钻探提供参考。

关键词: 复杂地质环境; 矿山岩土工程; 钻探技术; 操作要点; 优化方向

引言: 矿山岩土工程勘察是矿山开发建设的基础环节, 其成果直接影响矿山设计与施工安全。复杂地质环境具有地质构造复杂、岩土体性质多变、地下水丰富且分布不均等特点, 给钻探工作带来极大困难。传统钻探技术在复杂地质条件下常面临钻进效率低、成孔质量差、取样困难等问题。深入研究复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探技术, 提高钻探效率与质量, 对保障矿山工程顺利开展具有重要意义。

1 复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探核心技术分类

1.1 冲击钻探技术

冲击钻探技术核心原理基于冲击载荷对岩土体的破碎作用。通过钻具在重力或动力驱动下, 周期性地对孔底岩土体施加冲击力, 使岩土体在反复冲击下逐渐破碎。这种冲击力能够克服岩土体的抗剪强度和抗压强度, 实现钻进目的。操作流程上, 先将钻具安装至钻机, 调整好钻机位置与角度, 确保钻孔方向准确^[1]。开启钻机, 使钻具在动力作用下做上下往复运动, 对孔底岩土体进行冲击。同时, 根据钻进情况适时向孔内注入冲洗液, 以携带钻屑排出孔外, 保持孔底清洁, 防止孔壁坍塌。该技术适用于多种复杂地质条件。在坚硬岩石地层中, 冲击力能够有效破碎岩石, 尤其对于裂隙发育的岩石, 冲击可使裂隙扩展, 加速岩石破碎。在含有孤石、漂石的地层, 冲击钻探能凭借强大的冲击力穿透孤石、漂石, 继续钻进。

1.2 回转钻探技术

回转钻探技术核心原理是利用钻头的回转运动对岩土体进行切削破碎。钻头在钻机带动下做高速回转, 同时施加一定的轴向压力, 使钻头上的切削刃与岩土体接触并切削, 将岩土体破碎成钻屑。操作时, 先完成钻机就位与安装调试, 将钻头安装到钻杆上并下入孔内。启

动钻机, 使钻头开始回转, 同时缓慢下放钻杆, 施加合适的钻压。根据岩土体性质和钻进情况, 合理控制回转速度和钻压大小, 并及时排出钻屑。回转钻探技术适用于软弱地层到中等硬度岩石地层。在软土、砂土等松散地层, 钻头切削刃能轻松切入并破碎土体。对于中等硬度的岩石, 通过选择合适的钻头类型和钻进参数, 也能实现有效钻进。

1.3 螺旋钻探技术

螺旋钻探技术核心原理是依靠螺旋钻杆的旋转, 将岩土体沿螺旋叶片向上提升并排出孔外。螺旋钻杆在回转过程中, 其叶片对岩土体产生挤压和剪切作用, 使岩土体破碎并附着在叶片上, 随着钻杆旋转被带到地面。操作流程为将螺旋钻杆安装到钻机上, 调整好钻机参数。启动钻机, 使螺旋钻杆开始回转并逐渐下压钻进。在钻进过程中, 密切观察排土情况, 根据排土速度和岩土体性质适时调整钻进参数。螺旋钻探技术适用于浅部松散地层和软弱土层。在填土、淤泥质土等软弱土层中, 能快速钻进并获取土样。对于一些浅部的砂层, 也能较好地完成钻探任务。

1.4 组合钻探技术

组合钻探技术组合逻辑是将不同钻探技术的优势相结合, 以应对复杂地质条件。例如, 将冲击钻探的强大破碎能力与回转钻探的稳定切削能力结合, 先利用冲击破碎坚硬岩石, 再用回转进行修整和继续钻进。操作要点在于根据地质条件合理选择钻探技术组合顺序和切换时机。在不同技术转换时, 要确保钻具更换顺利, 钻机参数调整及时准确。同时, 要做好孔内情况监测, 保证钻进过程安全稳定。组合钻探技术适用于多种复杂地质条件交织的地层。在既有坚硬岩石又有软弱夹层的地质层, 以及含有孤石且覆盖层复杂的地层, 能充分发挥各技术优势, 提高钻探效率和质量。

2 复杂地质环境对矿山岩土钻探技术的影响因素

2.1 岩土体物理力学特性影响

矿山区域岩土体物理力学特性差异显著，对钻探技术实施构成直接挑战。郭家滩煤矿地层岩性差异突出：第四系风积沙、砂层疏松多孔，钻进易塌孔、漏浆；保德组红土黏性强、易缩径；安定组、直罗组砂岩坚硬致密，钻头磨损剧烈；延安组粉砂岩、砂质泥岩软弱破碎，岩芯采取率低。同一钻孔内地层软硬交替，可钻性波动大，如P1钻孔孔深0~12m为松散砂层、12~34.5m为黏土层、34.5~87.2m为泥岩与砂岩互层、87.2~119.7m为稳定砂岩、119.7~330m为含煤地层，钻探需动态调整钻压、转速、泵量等参数，否则易出现钻进停滞、钻具折断、塌孔缩径等问题。

2.2 地质构造复杂性影响

郭家滩煤矿位于陕北斜坡，地层为平缓单斜构造，倾角 $< 1^\circ$ ，无大断层褶皱，但局部存在波状起伏与节理裂隙发育带。在排水钻孔P5~P7、注氮孔Z1施工中，裂隙发育段导致钻井液漏失，需提高泥浆黏度、采用化学固壁与套管跟进技术维持孔壁稳定；地层微小起伏易引发钻孔偏斜，项目要求每10m测斜一次，终孔偏斜率 $\leq 1\%$ ，通过导向钻具与稳定器控制轨迹，确保钻孔精准贯通井下泵房与辅运大巷。

2.3 地下水环境影响

地下水赋存状态会对钻探技术的实施产生显著干扰，如图1所示。承压水区域，钻孔揭露含水层后，地下水压力可能引发突水事故，威胁钻探安全；潜水位动态变化导致孔内静水压力波动，影响泥浆性能稳定性，需实时监测并调整泥浆密度。裂隙水发育岩体中，水流携带岩屑冲刷孔壁，加剧孔壁坍塌风险，需优化泥浆循环系统以增强携砂能力。地下水化学成分复杂时，可能腐蚀钻具金属部件，缩短设备使用寿命，需选用耐腐蚀材料或采取防护措施。

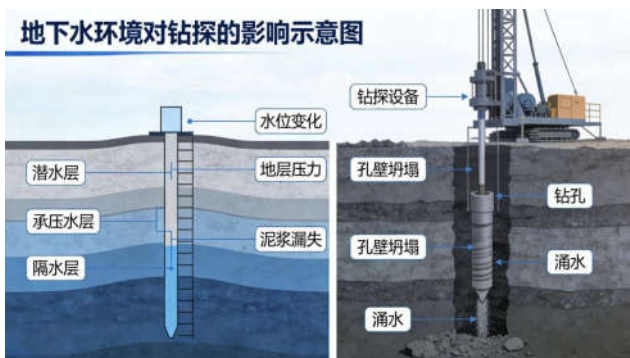


图1

2.4 不良地质体影响

溶洞、软弱夹层等不良地质体对钻探技术提出特殊要求。溶洞发育区域，钻进至溶洞顶部时，需降低钻进速度并加强孔壁支护，防止突然塌孔；溶洞内填充物性质差异大，需根据填充物类型选择合适钻进工艺。软弱夹层存在时，钻进易产生偏斜，需采用导向钻具或增加稳定器数量以控制钻孔轨迹。此外，岩爆倾向性岩体中，钻进扰动可能诱发岩爆，需采取超前钻孔释放应力或加强孔壁支护等预防措施。

3 复杂地质环境下矿山岩土钻探技术关键操作要点

3.1 钻探设备选型与调试

复杂地质环境对钻探设备性能提出严苛要求。郭家滩煤矿项目选用TSJ-600型钻机3台、TSJ-2000型钻机1台，配套850/20、850/50型泥浆泵，适配330~338m深孔施工需求；坚硬砂岩段启用大扭矩回转模式，破碎带采用冲击-回转复合工况。设备调试重点校验动力系统、钻杆同轴度、钻头磨损度，一开 $\Phi 1200\text{mm}$ 、二开 $\Phi 811\text{mm}$ 扩孔阶段，严格检查钻具连接与导向装置，确保孔径规整、钻孔垂直，满足 $\Phi 920\text{mm}$ 、 $\Phi 377\text{mm}$ 套管顺利下入要求。

3.2 钻探工艺参数设定

钻进压力、转速与泵量构成工艺参数核心组合。郭家滩煤矿钻孔施工参数如下：先导孔 $\Phi 219\text{mm}$ ，钻压40~80KN，转速75~100r/min，排量18~21l/s，泵压2~4MPa；扩孔 $\Phi 450/580\text{mm}$ ，钻压50~60KN，转速50~58r/min；扩孔 $\Phi 811/1200\text{mm}$ ，钻压90~100KN，转速50~58r/min，排量统一18~21l/s，泵压1~4MPa。松散砂层轻压慢转、增大泥浆护壁；坚硬岩层适当提钻压；黏土层控制泵量防泥皮过厚，实现效率与成孔质量平衡。

3.3 钻探孔位布置与校正

孔位布置需结合地质与工程需求。郭家滩煤矿布置7个排水孔：P1~P4位于主排水泵房，孔距12m；P5~P7位于抗灾排水泵房，孔距8m；注氮孔Z1位于2-2煤辅运大巷，孔深332.6m。开孔用RTK精确定位，每10m测斜、每50m校核孔深，孔深误差 $\leq 1.5\%$ ，终孔偏斜率 $\leq 1\%$ ，通过定向纠偏确保钻孔精准贯通井下巷道。

3.4 钻探过程中的岩土取样技术

岩芯采取率是评价勘察质量的关键指标。在完整岩层中，采用双层岩芯管可有效减少岩芯磨损，提高采取率；破碎带取样时，半合管取芯工具能更好保持岩芯原状结构。取样过程中需严格控制回次进尺，软弱地层单次进尺不超过0.5米，坚硬岩层可适当延长至1米。岩芯提出孔口后，立即进行编号、记录与封装，避免长时间暴露导致水分流失或结构破坏。特殊地质体取样时，需采

用专用取样器,如针对溶洞填充物使用薄壁取土器,确保样品代表性。

3.5 钻探孔壁稳定控制技术

泥浆性能调控是维持孔壁稳定的核心手段。砂层钻进时,通过添加膨润土与增粘剂提高泥浆粘度,形成致密泥皮阻挡砂粒塌落;破碎带则需加入堵漏材料填充裂隙,增强孔壁自稳能力。套管跟进技术适用于复杂地层,开孔后立即下入表层套管隔离表土层,钻至稳定岩层后再下入技术套管,为后续钻进提供稳定通道。深部钻探中,采用分级护壁工艺,根据地层变化逐步调整泥浆密度与成分,形成多层次孔壁保护结构。

4 复杂地质环境下矿山岩土钻探技术优化方向

4.1 钻探设备性能优化

复杂地质环境对钻探设备性能提出更高要求,需从动力输出、结构强度与智能化控制三方面进行突破^[4]。针对深部硬岩钻探,研发大功率液压驱动系统,通过优化液压回路设计提升能量转换效率,使钻机在高压工况下仍能保持稳定输出扭矩^[2]。钻杆材料改用高强度合金钢,采用热处理工艺增强抗疲劳性能,延长设备在复杂地层中的使用寿命。引入智能监测模块,实时采集钻压、转速、振动等参数,通过数据分析预判设备故障风险,实现预防性维护。针对不同地质条件,开发模块化钻机平台,通过快速更换动力头、钻杆等部件,实现设备功能灵活调整,提升复杂地质环境适应性^[3]。

4.2 钻探工艺改进

工艺优化需聚焦钻进效率与成孔质量的平衡。在破碎地层中推广复合钻进技术,将回转破碎与冲击破岩有机结合,通过高频冲击软化岩层,降低回转钻进阻力,提升钻进速度。针对深部高温地层,研究冷却液循环系统,通过强制冷却降低钻头工作温度,减缓热疲劳导致的磨损。开发孔底动力钻具,利用泥浆压力驱动钻头旋转,减少钻杆与孔壁摩擦,降低卡钻风险。引入动态压力调节技术,根据地层变化实时调整钻压,在软硬互层中实现平滑过渡,避免因压力突变引发的孔壁失稳。

4.3 取样技术优化

取样质量直接影响勘察成果可靠性。针对松散地层,研发双动取样器,通过内外管同步运动减少样品扰

动,保持原状结构。在破碎带取样时,采用薄壁取芯钻头配合液动锤,利用高频冲击快速穿透破碎层,减少岩芯脱落风险。开发无线传输岩芯编录系统,在钻进过程中实时获取岩芯图像与地质参数,实现取样与编录同步进行。针对深部高压环境,设计高压密封取样装置,防止样品在提升过程中因压力释放导致结构破坏,确保样品代表性。

4.4 复杂地质适配性技术调整

技术适配需建立动态调整机制。在断层发育区,采用地质雷达与钻探联合探测,提前识别断层位置与破碎带宽度,优化布孔方案。针对溶洞地层,开发超前探测钻具,通过声波反射原理探测前方溶洞形态,指导钻进轨迹调整。在富水地层中,研究泥浆固相控制技术,通过离心分离与化学絮凝结合,维持泥浆性能稳定^[5]。建立地质-钻探数据交互平台,将地质预报信息实时反馈至钻机控制系统,自动调整钻进参数,实现技术与地质条件的动态匹配。

结束语

复杂地质环境下的矿山岩土工程勘察钻探工作充满挑战,但通过不断研究与实践,在核心技术分类、影响因素分析、关键操作要点把握以及技术优化方向探索等方面取得了一定成果。合理运用各类钻探技术,依据地质条件精准调整操作参数,积极优化设备性能与工艺方法,能够有效应对复杂地质带来的难题,提高钻探工作的效率与质量,为矿山岩土工程勘察提供可靠的技术支持,推动矿山行业的稳定发展。

参考文献

- [1]胡军.复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探技术分析[J].世界有色金属,2022(23):166-168.
- [2]魏冬林.复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探技术分析[J].中国金属通报,2025(20):207-209.
- [3]李城.复杂地质环境下矿山岩土工程勘察钻探技术分析[J].中国金属通报,2021(22):191-192.
- [4]林晓波.岩土工程勘察技术在复杂地形地质条件下的应用研究[J].中国金属通报,2024(24):173-175.
- [5]项京.隧道复杂地质环境下的岩土工程勘察与评价研究[J].世界有色金属,2021(1):205-206.