

复杂地层条件下钻探工艺优化与应用研究

郭佳敏

安徽省煤田地质局第二勘探队 安徽 芜湖 241000

摘要：复杂地层非均质结构与动态物性变化对钻探施工构成多维度制约，传统工艺在参数适配、护壁协同与动态调控等方面存在明显短板。本文围绕破碎松散、软硬交互、含水裂隙及高塑性等典型复杂地层，系统剖析钻探工艺的制约机理与技术缺陷，构建以精细化参数调控、冲洗液性能优化、辅助工艺改良及标准化作业流程为支撑的工艺优化体系，并从适用场景、质量管控与安全保障等层面提出落地路径，为复杂地层条件下钻探作业的稳定性与施工精度提升提供技术参考。

关键词：复杂地层；钻探工艺；参数优化；护壁技术；施工保障

引言：钻探工程在地质勘察与岩土施工中占据关键地位，但遭遇破碎松散、软硬交替、含水裂隙及高塑性等复杂地层时，传统回转与冲击钻进工艺常面临适应性不足的困境。地层结构的非均质性与物性参数的动态波动，使孔壁失稳、钻进偏移、泥浆漏失等问题反复出现，常规技术体系难以有效响应。围绕这一现实难题，从工艺参数、冲洗液体系、钻具组合及作业流程等多个维度展开系统优化，形成贴合复杂地层特征的钻探技术方案，对提升施工质量与作业效率具有现实意义。

1 复杂地层钻探基础特性分析

1.1 复杂地层基本类型与地质特征

地质环境演化过程中形成的非均质特殊地层统称为复杂地层，这类地层在结构构造与物质组成上区别于常规沉积地层^[1]。岩层松散破碎地层普遍存在颗粒胶结强度不足的问题，内部结构均匀性较差，岩体整体完整性偏弱，岩土颗粒之间的联结作用力处于较低水平。软硬交互地层呈现岩层交替堆积的分布状态，不同岩层的致密程度、矿物组分与固结程度存在明显差异，纵向地层物性分布具备极强的不均匀性。含水裂隙地层内部发育大量网状裂隙与孔隙通道，岩土体渗透性能较强，内部水体赋存状态复杂，岩层整体稳定性会随水环境变化产生动态改变。盐渍化与高塑性地层具备特殊的水敏性与胀缩性，环境湿度与地应力状态出现细微变化时，地层原有结构形态便会发生改变，地层整体物性参数处于动态波动状态。

1.2 复杂地层钻探施工难点解析

复杂地层的特殊地质条件会大幅提升钻探作业的实施难度，常规钻探工艺与设备参数难以适配地层的动态变化规律。松散破碎地层开展钻进作业时，孔壁岩土体极易发生失稳坍塌，孔内成型质量难以保障，钻进进程

会受到持续性干扰。软硬交替地层会让钻探钻头承受不均衡的阻力作用，钻头钻进轨迹容易出现偏移，钻孔垂直度与成型精度无法达到施工标准，设备损耗速度也会显著加快。含水裂隙地层作业阶段易出现孔内漏水、涌水等不良现象，孔内压力平衡状态被打破，会引发泥浆流失、孔壁冲刷破坏等一系列施工问题。高塑性地层钻进过程中容易出现缩径、糊钻等现象，钻具回转与下放阻力持续增加，有效钻进效率大幅降低，施工连续性难以维持。

1.3 地层特性对钻探施工的制约机制

地层自身的结构属性、物理力学性质与水文条件，会从多个维度对钻探施工形成实质性制约。地层结构完整性直接决定孔壁的稳定能力，破碎松散的岩体结构会削弱孔壁自持稳定的能力，大幅提升孔内事故发生的概率。岩土体力学强度的差异性会改变钻进阻力的分布状态，岩层强度波动会造成钻进负荷频繁变化，影响钻探作业的平稳推进。地层渗透特性与水体赋存条件，会调控孔内流体的动态平衡状态，高渗透性地层会破坏泥浆护壁的防护效果，弱化孔壁岩土体的固结性能。地层固有的形变特性会持续改变钻孔内部空间形态，干扰钻具正常作业行程，制约钻探施工质量与作业效率的同步提升，也会对钻探设备的运行状态与使用寿命形成间接影响。

2 复杂地层传统钻探工艺及现存问题剖析

2.1 主流传统钻探工艺技术体系

国内钻探工程长期沿用的传统工艺体系，依托成熟的机械钻进原理构建而成，适配多数常规地层的标准化施工作业^[2]。回转钻进工艺依靠钻杆带动钻头持续切削岩体，借助泥浆循环系统带出孔内岩屑，依靠机械回转扭矩完成深部地层的钻进作业。冲击钻进工艺利用钻具自重产生的冲击能量破碎岩体，通过反复冲击作用形成规

整钻孔,多用于硬质岩层与浅层地层的钻探作业。回转冲击复合钻进工艺整合两类基础工艺的作业优势,通过回转切削搭配冲击破碎的作业模式,提升硬质岩层的钻进推进速度。各类传统工艺搭配固定配比的护壁泥浆与标准化施工参数,构成适配常规地质场景的完整技术体系,长期应用于各类地质勘察与岩土施工项目。

2.2 传统钻探工艺适配复杂地层的短板

传统钻探工艺的技术参数与作业模式多针对均质稳定地层设计,应对复杂多变的特殊地质场景会暴露诸多局限。固定化的泥浆护壁体系无法适配地层物性的动态变化,难以应对裂隙发育、岩体松散等复杂工况产生的孔壁失稳问题。恒定的钻进转速与钻压参数不能适配软硬交错地层的力学差异,破碎岩体区域极易出现钻进扰动过大的情况,加剧孔壁破损与岩体脱落问题。单一的岩屑排出模式难以应对高渗地层的流体扰动,泥浆流失会造成孔内清洁度下降,岩屑堆积会阻碍钻进作业正常推进。工艺调整模式较为固化,现场灵活调控空间不足,无法根据实时地质变化调整作业方案。

2.3 复杂地层钻探施工工艺适配性缺陷分析

传统钻探工艺与复杂地层的适配矛盾,核心源于技术体系与地层动态变化特征的不匹配。工艺设计逻辑偏向静态均质地质条件,忽略复杂地层结构、物性参数的非均质变化特征,作业参数无法贴合地层实际受力与形变规律。护壁与携岩技术的适配范围较为狭窄,面对水敏性、高渗透性、破碎性地层的特殊属性,防护与排屑效果会出现明显衰减。整套工艺体系的动态调控能力较弱,无法响应地层钻进过程中产生的结构形变、水体渗透等实时变化,施工过程中容易累积各类质量隐患与安全隐患。技术配套体系的滞后性,让传统工艺难以满足复杂地层钻探对稳定性与精准度的施工要求。

3 复杂地层钻探工艺优化体系构建

3.1 钻探工艺优化的整体思路与设计原则

工艺优化工作针对复杂地层钻探作业中的技术缺陷开展,贴合地层非均质结构、易扰动形变、含水渗流等真实地质特征调整技术架构。摒弃一刀切的传统施工模式,依据地层不同深度、不同层位的物性差异制定差异化技术方案。优化工作立足工程现场实际条件,所有技术调整均贴合场地施工设备与作业条件,保证技术改良具备落地条件^[3]。施工稳定作为核心把控标准,通过技术调整降低机械扰动对软弱岩体的破坏作用,减少孔内不良工况的产生。结合地层钻进过程中的动态变化特征预留技术调整空间,适配地层受力状态与含水环境的实时改变。严格把控改良技术的安全属性,规避技术调整带

来的新型施工隐患,维持钻探作业的稳定推进状态。

3.2 钻探参数精细化优化设计

精细化参数调整针对不同类型复杂地层的力学特性与结构特征开展精准调控。破碎松散地层钻进过程中,降低固定钻压带来的持续挤压作用,放缓钻头回转速度,减轻钻头切削对孔壁岩体的撕扯扰动,减少岩体脱落与孔壁松动问题。软硬互层地层交替钻进阶段,根据各层岩体固结强度调整瞬时钻进速率,匹配岩层硬度变化调整切削力度,规避阻力不均造成的钻孔轨迹偏移。裂隙发育含水地层施工中,调整泥浆循环流速与流量,维持孔内液柱压力平衡,抑制裂隙渗水问题,减弱流动水体对孔壁的持续冲刷。高塑性黏土地层通过调整钻具运行参数,降低钻具与土体的接触摩擦,削弱土体挤压形变带来的缩径现象,减少黏土附着钻头形成的糊钻问题。

3.3 钻探配套工艺与技术流程优化

调整泥浆基础配比组分,提升泥浆胶体稳定性与胶结能力,增强松散岩层颗粒之间的联结效果,强化孔壁自持稳定能力。优化泥浆循环净化路径,升级孔内携屑方式,提升细小岩屑的悬浮与排出效率,避免细碎岩屑在孔底堆积。调整钻探各工序的衔接逻辑,理顺地质研判、参数调试、现场钻进、孔内防护的作业顺序,消除工序衔接空档。在钻进过程中嵌入实时监测内容,持续捕捉孔内压力、泥浆性能、孔壁状态的细微变化,依据现场工况及时调整施工节奏。优化孔内护壁作业流程,针对不同层位地层灵活调整护壁方式,适配地层结构与含水状态的差异化需求。

3.4 钻探辅助施工工艺改良设计

改良裂隙地层封堵施工方式,适配不同宽度的裂隙通道选用对应的封堵处理手段,填充岩体内部孔隙结构,阻断地下水渗流通道,改善孔内渗漏现象。优化地层前期预处理作业,对水敏性较强的软弱地层开展表层加固处理,提升浅层岩体结构整体性,弱化水体浸润引发的岩体溃散问题。调整钻具结构适配复杂地层作业环境,优化钻头切削结构与钻杆适配性能,降低钻进过程中的设备磨损,规避卡钻滞钻等异常工况。完善孔口防护工艺,强化孔口岩体固定效果,阻挡表层松散岩体滑落脱落,为深部钻进作业提供稳定的孔口作业条件。

4 优化后钻探工艺的应用体系与保障措施

4.1 优化工艺的适用场景与应用逻辑

优化后的钻探工艺针对复杂地层施工痛点迭代升级,适配各类物性不稳定、结构不完整的特殊地质钻探场景。工艺体系能够覆盖松散破碎岩体、软硬交替岩层、裂隙含水岩层以及高塑性软弱地层等常规工艺难以

适配的施工环境,针对性解决传统作业模式中孔壁失稳、钻进扰动过大、岩屑排出不畅等实际问题^[4]。整套应用逻辑依托地层地质演变规律搭建,以地层结构稳定性、渗透性能与力学强度的真实状态为依托,匹配适配性更强的钻进参数与防护技术手段。工艺运行模式摒弃固化的作业标准,依托钻进过程中地层状态的动态变化调整技术执行力度,让施工技术主动适配地层形变、渗流、应力波动等地质特征。技术落地贯穿钻探作业全周期,从前期地层状态研判、中期参数动态调控到后期孔内状态防护,层层衔接推进,实现施工技术与复杂地层地质条件的深度适配。

4.2 复杂地层钻探标准化作业流程构建

标准化作业流程的搭建能够统一优化工艺的现场执行标准,弱化人为操作差异对施工质量的影响。流程体系覆盖钻探作业全周期施工环节,整合地层前期勘测分析、工艺参数精准匹配、现场钻进实操、孔内防护处理以及工序交接核验等核心内容。细化各施工环节的操作规范,统一钻进调控方式、泥浆调配标准、岩屑清理模式的执行尺度,为现场施工提供明确的操作依据。规范地层物性变动后的工艺调整方式,结合岩层结构与水文状态的细微变化调整作业模式,规避盲目改动参数引发的施工隐患。理顺各工序的递进与衔接关系,填补传统施工模式中的工序空档与操作疏漏,让整体钻探作业保持连贯有序的推进状态,稳定优化工艺的现场应用效果。

4.3 钻探工艺施工质量管理体系搭建

质量管理体系围绕复杂地层钻探施工的核心要点搭建,全方位把控优化工艺的落地成效。管控范围覆盖工艺参数精准度、孔内环境稳定状态、钻孔成型规整度、配套工艺落实效果等关键施工维度。建立全过程动态管控模式,对钻进推进速率、泥浆运行性能、孔壁完整状态开展持续性监测,及时修正偏离施工标准的操作行为。结合不同复杂地层的施工难点细化管控重点,精准识别钻孔偏移、孔壁破损、泥浆渗漏、孔径形变等质量问题,实现施工隐患的精准把控。完善施工数据记录与核验机制,依托现场实时施工数据把控工艺运行状态,将质量管控重心前移,依靠过程管控提升钻探工程的整

体施工品质,杜绝后期质量整改带来的工程损耗。

4.4 复杂地层钻探施工安全与工艺保障机制

完善的保障机制是优化工艺稳定落地的核心支撑,能够有效应对复杂地层多变的施工工况。建立地层动态监测机制,持续捕捉钻进过程中岩体结构、水体分布、地应力状态的细微变动,提前预判各类潜在施工风险。搭建设备与工艺运维机制,定期核验钻探设备运行状态、泥浆工艺适配效果与辅助防护措施落实情况,保障各类优化技术持续发挥作用^[5]。细化现场安全管控细则,结合复杂地层钻探风险特点划定作业管控重点,规范现场操作行为,降低塌孔、涌水、卡钻等事故的发生概率。建立工况应急调控机制,针对突发地质变动储备适配的技术调整方案,及时优化施工模式与工艺参数,维持钻探作业的平稳推进,筑牢复杂地层钻探施工的技术基础与安全防线。

结束语

复杂地层钻探工艺的优化并非单一环节的调整,而是参数调控、护壁协同、流程规范与安全保障的系统集成。优化后的工艺体系以地层真实物性为依据,以动态适配为运行逻辑,以标准化作业为执行准则,能够有效缓解孔壁失稳、钻进扰动过大及岩屑排出不畅等施工难题。质量管控与安全保障机制的同步建立,则为工艺稳定落地提供了制度支撑。工艺优化工作的持续推进,将为复杂地层钻探施工质量与作业效率的协同提升奠定坚实的技术基础。

参考文献

- [1]杨云波.复杂地层条件下矿山钻探工艺优化与取芯质量提升[J].世界有色金属,2026(8):144-146.
- [2]黄诚.复杂地质条件下有色金属矿山钻探工艺的应用实践[J].中国金属通报,2025(14):201-203.
- [3]刘永福.复杂地质条件下长距离钻探施工技术及其风险控制研究[J].工程机械与维修,2025(3):134-136.
- [4]常国攀.复杂地质条件下深孔钻探技术的优化及措施[J].中州建设,2025(4):43-44.
- [5]黄振可.矿山工程中复杂地质条件钻探技术研究[J].中国金属通报,2025(22):198-200.