

复杂地层条件下高效钻探施工技术研究

侯露露 张俊生 梁佳望 冯雪松

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】随着地质勘探与基础工程规模的不断扩大,钻探施工面临的地层条件日益复杂,传统施工方法在地层破碎、高温高压及硬软互层等复杂环境中难以保持效率与安全性。针对这一问题,本文系统探讨了复杂地层特性对于钻探过程的影响,并结合地层破碎性、含水率、硬软互层及高温高压等方面进行分析,提出了相应的高效钻探施工技术,优化钻进方式、加强钻具耐磨与强度、强化护壁与冷却效果以及保持井壁稳定等措施,可有效提高施工效率并降低风险,为后续复杂地层钻探提供技术参考与实践指导。

【关键词】复杂地层; 钻探施工; 地层破碎

引言

复杂地层通常具有破碎性高、含水率显著且硬软性质多变等特征,极易导致钻探过程中出现井壁坍塌、钻具损耗过快以及钻进效率低等问题。在地质勘查、石油天然气开发及基础工程施工中,如何在保证安全的前提下兼顾经济效率,成为工程技术领域关注的焦点。国内外学者通过地层物性分析与钻进工艺改进等研究,在地层适应性、钻具材料更新、护壁与冷却措施等方面取得了阶段性进展。

1 复杂地层对钻探施工的影响

1.1 地层破碎性对钻探稳定性的影响

地层破碎性通常指岩层内部存在大量裂隙、断层和节理,岩石整体完整度较低,致使钻探过程中井壁极易坍塌或产生掉块,进而威胁施工安全与效率。据某地质勘探项目统计数据:在破碎率超过35%的钻探井段内,井壁坍塌事故发生率比破碎率低于20%的井段高出近18%,且平均卡钻次数增加约25%。破碎性岩体由于内部胶结强度不足,使得钻压和泥浆压力在作用于井壁时,往往难以形成稳定的围护支撑。此外,大量碎屑岩块被循环泥浆带出井口,容易造成泥浆比重和黏度的波动,不仅增加了泥浆净化负担,还可能在孔内形成落石堆积或“桥堵”现象,进一步造成卡钻、堵管或埋钻等严重事故,对于地层破碎性对稳定性的不利影响方面,常需采取一系列针对性措施。首先,在钻前阶段应尽量通过地质勘查和地球物理测井评估破碎程度,合理制定护壁策略与泥浆性能指标。其次,施工时需保持适宜的泥浆密度与流量,并根据实时测井数据适当调整排量与钻压,尽量降低对地层的扰动。

1.2 地层含水率对钻孔塌陷的影响

地层含水率是反映土岩体内部水分含量的重要指标,高含水率往往意味着岩土结构较为松散,强度降低并易受水化作用的影响。某水文地质勘察报告显示:在含水率高于20%的黏性土层中,井壁失稳事故率可达35%以上,而含水率低于10%的相邻井段仅有不到15%的井壁塌陷概率,差异十分显著。含水层在钻进过程中更易发生软化、膨胀或泥化,这种水化作用会削弱岩体胶结力,使孔壁表面层逐渐剥落。当含水率较高且与地表或地下水系相连时,局部水压力会抬升,从而进一步加速井壁变形或诱发局部涌水,导致孔壁破坏范围扩大。此外,井下循环泥浆与含水层的相互作用也需要高度关注。若泥浆密度过低,可能难以平衡地层水压;若黏度或滤失量控制不佳,则易对地层造成进一步扰动,使井壁处于更不稳定的状态。为减轻地层含水率带来的负面影响,施工时可通过提升泥浆密度、黏度以及添加降滤失剂,在井壁表面快速形成稳定滤饼,减少水分渗透。对于局部高含水层,必要时可采用段塞泥浆或封堵剂进行暂堵,避免水分持续浸入井筒。

1.3 硬软互层对钻进效率的影响

硬软互层是指在垂向或横向岩性变化中,坚硬岩层与松软或弱胶结岩土层交替分布的一种地质特征。由于不同层位的强度、弹塑性及可钻性差异巨大,往往导致施工过程中钻压、转速和泥浆排量等参数难以兼顾,进而显著降低钻进效率。据某矿区统计,硬软互层分布占比约60%的井段中,平均机械钻速仅为4m/h,而在以单一坚硬岩层为主的区段则可达6.5m/h以上,效率下降接近40%。硬层通常需

要较大的钻压和扭矩才能实现有效破碎，否则机械钻速偏低；而软层则对钻压较为敏感，过高的钻压和转速可能导致井壁扰动或塌陷，也易产生泥饼厚积或“打滑”现象。此外，硬软交替地层中的井壁形变往往不规则，孔径尺寸可能在硬层段略小、软层段较大，形成局部缩径或塌孔区，增大卡钻风险并对后续下套管或测井工作造成影响。

1.4 高压与高温地层对钻具寿命的影响

在深井、超深井或地热资源开发中，高压与高温地层的存在极大地挑战了钻具的使用寿命和施工安全。高压环境下，井下静水压力和地层压力会显著增大，对钻具的外壁、接头部位以及内部结构产生强烈的压力作用，若设计不当或材料强度不足，极易引发疲劳裂纹、接头断裂或管体变形等事故。某超深井项目数据显示，当井深超过5000m且井底压力超35MPa时，常规合金钻具的平均使用寿命仅为浅层或中浅层的60%左右，明显缩短了施工周期。与此同时，高温因素也会对钻具材料产生不利影响。地层温度超过150℃时，传统合金钢或硬质合金接触地层的部件容易发生热膨胀、退火或氧化，加速其磨损与疲劳。若在高温环境中还叠加高速旋转摩擦和泥浆循环热量累积，钻头和钻铤等关键部位的表面温度可能大幅上升，导致金属基体内部微观组织结构劣化，强度显著降低。

2 复杂地层条件下高效钻探施工技术

2.1 选择适应不同地层的钻进方式

在复杂地层条件下，地层性质往往呈现显著的空间差异与非均质分布，单一的钻进工艺难以兼顾效率与安全。为此，结合地层的岩性特征、含水属性及力学参数，灵活选用多种钻进方式显得尤为关键。首先，对于松散或破碎地层，可优先采用空气钻进、泡沫钻进或低冲击回转钻进等方式，利用较小的钻压与循环压力来减轻对孔壁的扰动，并通过高排量气体或泡沫携带井下碎屑，从而降低塌孔及埋钻风险。其次，遇到高硬度或致密岩层时，则需提升钻头转速与扭矩，采用高功率回转式或冲击回转式钻机，并结合硬质合金或金刚石强化钻头实现高效破岩；同时，在地层软硬差异较大的区域，可考虑使用复合式钻进，将滚刀破碎与冲击切削相结合，以应对不同岩石强度的转换。在施工过程中，应密切监测地层压力、泥浆黏度及钻速变化，通过地质导向和实时测井技术在井下数据出现异常时及时调整钻进模式，防止盲目加大钻压或提高转速而引发孔壁失稳。针对地层含水率差异较大的段落，可灵活切换

泥浆体系或注入封闭剂、减黏剂，以抑制局部水化膨胀和坍塌。对于高温高压区域，需配合防热与防压措施，例如在作业井口增设冷却装置、提高泥浆排量或采用特殊合金钻具等方式增强整体抗高温冲击能力。在此基础上，还可结合岩屑录井与测井资料，适时修正地层界面识别与钻柱设计，确保施工参数匹配井下变化，多种钻进方式的有机结合，能够在复杂地层实现速度与稳定性之间的平衡，为后续井筒结构设计、下套管及完井工艺奠定坚实的基础，并在提高钻进效率的同时有效降低工程风险与成本。

2.2 应用高耐磨与高强度钻头应用

在复杂地层中，钻头是直接承担破岩与受力的重要部件，其性能优劣直接决定了钻进效率和施工安全。由于破碎层、硬软互层以及高温高压地层往往会对钻头造成显著磨损和冲击，传统硬质合金钻头在此环境下易出现切削齿崩落、基体烧蚀或疲劳裂纹等问题，导致施工周期延长，甚至引发卡钻等风险。为解决这一难题，可将金刚石、立方氮化硼等超硬材料与新型纳米复合基体相结合，制备具有高耐磨、高强度和高韧性的钻头。此类强化钻头在承受快速切削冲击和高温侵蚀时不易产生脆性破裂，能显著提升钻进速度并延长使用寿命。在结构设计方面，通过增加刀翼数量、优化刀齿间距和排屑槽形态，可改善切削屑的排出通道，减少硬软互层或含水层中黏堵现象的发生。配合可调式喷嘴和内部循环冷却通道，可及时带走局部摩擦热，避免高温累积对切削面造成的烧蚀。对于深井或超深井，还可采用模块化或可更换刀片式结构，一旦关键切削单元磨损严重，仅需更换受损部件即可恢复钻头整体功能，减少频繁起下钻造成的施工延误。在材料处理环节，利用表面热处理、纳米涂层或激光合金化等技术可进一步提高钻头硬度、耐磨性及抗氧化能力。与此同时，还需针对不同地层特性选择适宜的钻头类型。若地层破碎且含大量砂砾，可选用耐冲击性较好的牙轮或PDC钻头；若岩体完整且硬度高，则可采用金刚石增强型滚刀钻头以实现高效破岩。通过将高性能钻头与实时监测及合理施工参数配合，不仅能提升钻进效率，还能大幅降低因钻头失效导致的非计划停工概率，为复杂地层条件下钻探工程的顺利实施提供技术保障。

2.3 提高护壁与冷却性能

护壁与冷却是保障复杂地层钻探安全和效率的关键环节，尤其在破碎层、高含水层以及高温地层中，其效果对

井壁稳定和钻具寿命起着至关重要的作用。就护壁而言,可通过提升泥浆质量与配方设计来实现。采用具有优异降滤失能力的高分子材料,如部分水解聚丙烯酰胺或多功能有机复合物,可在井壁表面迅速形成致密滤饼,阻隔地层水与泥浆的过度交换。同时,根据地层特性调配泥浆黏度与剪切强度,也能避免对脆弱孔壁产生过度冲刷,降低塌孔和掉块风险。在含水率较高或易水化膨胀的地层中,必要时可采用加重泥浆、段塞泥浆以及预置堵漏剂等辅助技术,进一步强化井壁支撑作用。针对高温或深井环境,冷却性能同样不可或缺。井下温度的逐层升高会削弱泥浆黏度与滤失控制效果,并加剧对钻头和钻柱的热冲击。为此,需提高循环排量或增设井口冷却设备,利用表面热交换装置将返出泥浆的温度降至相对合理的水平后再重新注入井下。此外,也可将某些耐高温材料,如高性能合成油基泥浆或耐高温乳化体系,应用于极端环境以保持较好的流变学特性。对于超高温井段,借助特殊冷却剂或在钻柱内部设计辅助冷却通道,能更直接、高效地带走井底热量,从而减缓钻头和底部工具的温升。在实践中,护壁与冷却往往需要与实时监测技术相结合。利用随钻测量或测井手段,及时获取井下压力、温度以及井壁成像信息,可将护壁材料添加量、泥浆循环速率及冷却设备功率进行动态调节,避免因施工参数固定导致的塌陷、井漏或过热等失控状况。只有在泥浆处理与温度控制两个层面都做到精细化管理,才能在复杂地层中兼顾安全与效率,为钻井工程的顺利推进奠定坚实基础。

2.4 井壁稳定控制技术

井壁稳定性是复杂地层钻探中不可忽视的核心难题,任何程度的井壁失稳都可能带来塌孔、卡钻或埋钻等严重事故,直接威胁整个工程的安全与进度。为此,必须将井壁稳定控制纳入钻探施工全过程的关键环节。其基本思路在于综合运用地层力学分析、泥浆护壁、井筒支护以及实时监测等多种手段,构建一套全流程的稳定维护体系。在开钻前,应基于地质勘查、岩石力学测试以及地球物理测井等数据,对目标井段可能存在的软弱夹层、破碎带及高含水区域进行精细划分,并结合地应力场分布情况评估坍塌与井漏风险。随后,在设计阶段可考虑优化井身结构,如适当缩短或跳过不稳定层段的裸眼长度,并提前做好套

管程序规划。施工过程中,泥浆密度与排量的选择至关重要:密度过低则难以平衡地层压力,易引发孔壁倒塌;密度过高又可能导致漏失和地层破裂。因此需结合随钻测量数据,动态调整泥浆性能。若发现孔壁已有松动或掉块迹象,可通过及时注浆、提高黏度或加大封堵材料投放来进行抢救性加固。在井筒支护方面,硬软互层或破碎层往往更需要分段加设套管或衬管,以在最短的裸眼段范围内保证安全。对于极易坍塌的浅表土层,也可以采用表层套管+跟管钻进的方式,将护壁效果延伸至地表附近,从而减少顶部冲刷风险。最后,实时监测与预警系统能够对井下压力、振动、岩屑组成及循环温度进行连续追踪。一旦异常信号出现,操作人员可迅速采取措施,如减小钻压、放慢进尺或提升泥浆黏度,从而避免小问题演变为大事故。通过上述多管齐下的井壁稳定控制技术,可有效降低复杂地层中塌孔和卡钻的发生概率,为后续取芯、测井及完井作业创造良好的安全环境与工艺条件。

3 结语

综合而言,复杂地层中地层破碎性、含水率、硬软互层及高温高压等因素相互作用,使得钻探施工面临诸多挑战。通过对地层特性的精确分析与分层控制,灵活选用适宜的钻进方式,配合高耐磨与高强度钻头、有效的护壁与冷却措施以及完善的井壁稳定技术,可大幅提升施工效率并降低事故风险。随着深井和超深井工程的不断拓展,需进一步结合先进材料学及智能化监测手段,不断优化钻探施工方案,为各种极端复杂地层提供更加精准与高效的工程技术支持。

参考文献:

- [1]陶克军.云贵川复杂地层深孔钻探施工技术措施探讨[J].中国西部科技,2009.
- [2]何杨,王伟.浅谈钻探施工技术在复杂地层中的应用[J].吉林地质,2008(4):2.
- [3]刘云峰.钻探施工技术在复杂地层中的应用[J].地球,2016,28(011):41-42.
- [4]汪涛.云南某矿区复杂地层深孔岩心钻探关键技术应用研究[J].中国地质大学(北京),2013.
- [5]张燕清.复杂地质条件下隧道综合施工技术研究与应
用[J].科技与企业,2016.