

小角度钻探工艺在复杂地质条件中的应用与优化

郝小庆 宰俊文 刘占辉 姚宇

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】小角度钻探工艺广泛应用于地质勘探、矿产开采、工程勘察等领域，尤其在复杂地质条件下，其灵活性和适应性使其成为关键钻探技术。然而，复杂地质条件如地质构造的多变性、岩土性质的差异性以及水文地质环境的影响，均对钻探工艺提出了严峻挑战。因此，优化小角度钻探工艺对于提高钻探效率、减少工程风险、降低施工成本至关重要。本文围绕小角度钻探工艺的基本概述，分析复杂地质条件对钻探工艺的影响，并探讨优化措施，以期为提高小角度钻探工艺的适应性和稳定性提供理论指导和工程实践参考。

【关键词】小角度钻探；复杂地质条件；钻井工艺；钻探优化；监测技术

1 小角度钻探工艺概述

小角度钻探是一种采用较小倾角（通常在 $10^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ）进行钻进的工艺，广泛应用于矿产勘探、能源开发、地质灾害治理及工程勘察等领域。与垂直钻探和大倾角定向钻探相比，小角度钻探具有更强的适应性和灵活性，尤其在复杂地层条件下，可以有效绕避障碍、减少地层破坏并提高钻探精度。小角度钻探的基本工艺流程包括钻井设计、钻机选择、钻具匹配、钻井液配置、钻进参数优化、测井监测及井壁稳定性控制等环节。由于小角度钻探的倾角较小，钻孔轨迹的控制尤为重要，通常需要结合定向钻进技术，如使用导向钻具、MWD系统或陀螺仪测量技术，以确保钻进方向的可控性。该工艺在工程实践中具有诸多优势：

（1）能够在矿体周围布设多条小角度钻孔，提高资源探测精度；（2）适用于浅层或中深层钻探，减少对地层的扰动；（3）在油气勘探、煤矿瓦斯抽采、地热资源开发等领域，可以有效提高资源采收率；（4）在地质灾害治理中，如滑坡监测、边坡稳定性评估等，可用于安装监测设备，提高地质监测精度。然而，小角度钻探工艺也面临一定的挑战，如钻进过程中容易发生钻孔偏移、轨迹控制难度较大、井壁稳定性较低、钻具易受侧向力影响等。因此，在实际应用中，需要结合地层特性，合理选择钻进参数、优化钻具结构，并采用先进的监测和控制技术，以确保钻探工作的稳定性和高效性。

2 复杂地质条件对钻探工艺的挑战

2.1 地质构造复杂性对钻探的影响

复杂地质构造主要是指对小角度钻探的稳定性和效率

影响较大的断裂带、褶皱构造、岩层倾斜带和地应力异常区域等地质构造特征。首先，该断层带内部岩层破碎，应力集中，极易造成井壁失稳和井崩问题，是钻探过程中经常遇到的难点区域。钻头在钻进到断层带时，由于钻头受力突变，可能会发生硬度变化，使钻进速率发生波动，从而引起钻头钻孔卡壳。其次，岩层倾角在褶皱构造区域变化较大，钻进时钻行轨迹容易出现偏移。钻头进入软层后可能产生偏移，导致钻孔轨迹失控，影响目标层准确定位。此外，地应力异常区域容易导致钻孔周围的岩体发生变形，尤其是在钻探扰动后可能发生岩层突然坍塌的高地应力区，钻探作业安全受到影响。因此，在进行复杂地质构造区域的小角度钻探时，为了提高钻孔的稳定性和弹道控制的精度，需要结合定向钻进技术，对钻探参数进行优化，采用井壁支护措施。

2.2 岩土性质对钻探效果的影响

岩土性质的多样性对小角度钻探工艺的适应性提出了较高要求。不同类型的岩石具有不同的物理力学特性，例如硬度、韧性、孔隙率、节理裂隙发育程度等，这些因素都会影响钻进速率和钻孔稳定性。对于硬岩地层，如花岗岩、玄武岩等，钻进过程中主要面临的问题是钻头磨损严重、钻速较慢。而在软岩或强风化岩层，如砂岩、泥岩、页岩等，钻探则面临井壁坍塌的风险。这类岩层孔隙率较高，易吸收钻井液，导致井壁失稳，甚至出现塌孔、缩径等问题，影响后续钻探工作的顺利进行。另外，若钻区为含水层或强富水地层，可能导致钻井液大量流失，进而影响钻进稳定性，岩层的可钻性会因地下水渗流而受到影

响。因此，要合理选择钻头类型，调整钻入参数，采用适当的钻液体系，提高钻入效率和井壁稳定性，就需要在复杂岩土条件下进行小角度钻探。

2.3 水文地质条件对钻探工艺的影响

水文地质条件是影响小角度钻探稳定性的重要因素之一，尤其在富水地层、承压含水层及地下水动态变化较大的区域，钻探施工可能面临钻井液流失、井壁坍塌、孔隙水压力增大等问题，从而降低钻探效率，甚至导致钻井事故。首先，富水地层的渗透性会影响钻井液的循环稳定性。在高渗透性砂层或裂隙发育的岩层中，钻井液容易渗透到周围地层，导致钻井液流失，不仅降低了井内压力平衡，还可能引发井壁塌陷。特别是在地下水位较高的地层中，钻探过程中可能出现井口喷水、钻井液携带过多沉积物，导致井底清理困难，影响钻进效率。其次，承压含水层可能导致井下突水问题。承压水在钻探过程中可能沿裂隙快速上升，若压力控制不当，易造成井口溢流，甚至导致井喷事故。此外，在断层带或溶洞发育地区，地下水可能形成强大的水流通道，对钻进稳定性造成严重干扰。此外，地下水化学成分的影响也不容忽视。例如，高盐度水或含腐蚀性成分的水体可能对钻具和钻井液产生不利影响，导致钻具加速腐蚀，甚至影响井壁稳定性。因此，在复杂水文地质条件下，小角度钻探需要采取针对性的控制措施，如采用抗塌钻井液、合理调控井内压力、实施封隔技术等，以确保钻探施工的安全性和稳定性。

3 小角度钻探工艺在复杂地质条件中的优化措施

3.1 钻探设备的优化设计

在复杂地质条件下，小角度钻探设备的优化设计对提高施工效率和安全性至关重要。设备优化的主要目标是提高钻探精度、增强抗井壁失稳能力，并降低钻进阻力，以确保在多变地质环境中实现稳定、高效钻进。首先，钻机结构的优化是提升小角度钻探适应性的关键。针对地层软硬交替、岩石破碎带等情况，钻机应配备可调节角度的旋转钻塔，以确保在不同地形条件下实现精确钻进。此外，为了减少钻具弯曲应力，提高轨迹控制精度，钻机应采用高刚性导轨或可变角钻架，使钻杆受力更均匀，减少因钻杆弯曲造成的孔斜问题。其次，钻具组合的优化有助于提升钻进稳定性。在高硬度岩层中，可选用金刚复合片（PDC）钻头或硬质合金钻头，提高钻进效率，并减少钻头损耗。在易塌陷地层，可采用带有扩孔器的钻头，提高钻

孔稳定性，减少井壁收缩。在高渗透性地层，可配备封堵型钻头或使用随钻封隔装置，以防止钻井液大量渗漏。此外，动力系统的优化能够提高钻探效率。例如，采用液压驱动系统可提高钻机的稳定性，使其在复杂地层条件下仍能保持较高的钻进速率。同时，钻机应配备自动化控制系统，以实时监测钻压、扭矩、钻进速率等参数，确保钻进过程的精准控制，减少人为操作误差，提高钻进质量。

3.2 钻井参数的调整与优化

合理的钻井参数调整能够有效降低钻进阻力，提高钻探效率，减少井下复杂情况的发生。在复杂地层条件下，钻井参数的优化需要根据岩层硬度、裂隙发育情况、水文地质特征等因素进行动态调整，以确保钻进的稳定性和安全性。首先，钻压和转速的优化对于不同类型的岩层至关重要。在软岩层（如页岩、砂岩）中，应采用较低的钻压和适中的转速，以减少钻头对井壁的破坏，防止井壁失稳。而在硬岩层（如花岗岩、玄武岩）中，则需要提高钻压和转速，以增加钻进速率，并减少钻头磨损。此外，在裂隙发育的地层，过高的钻压可能导致钻头偏移或井壁崩塌，因此应采用逐步加压的方式，确保钻进稳定。其次，钻具下放速度的调整也是关键参数之一。在破碎带或富水地层，过快的下放速度可能导致井壁坍塌或钻具卡钻。因此，在这些地层中，应采用缓慢下放、逐步增速的方法，以确保钻孔结构的稳定性。同时，在高粘土含量的地层中，可适当提高下放速度，以减少粘附性钻井液对钻具的阻力。此外，冲洗液排量和压力的调控对井壁稳定性和钻进效率影响显著。在易塌陷地层，较低的冲洗液流速可减少井壁冲刷，提高井壁稳定性；而在高硬度岩层，较高的冲洗液排量可有效冷却钻头，提高钻进速率，并减少碎屑堵塞风险。总体而言，合理调整钻压、转速、钻具下放速度及冲洗液排量，能够在复杂地层条件下实现更稳定、高效的小角度钻探，提高施工安全性，并降低工程风险。

3.3 改进钻进液的配比与使用

钻进液（或称钻井液、泥浆）在小角度钻探工艺中起到润滑、冷却钻头、携带岩屑、稳定井壁和控制井下压力的重要作用。在复杂地质条件下，钻进液的合理配比与使用对提高钻探效率、减少井下复杂情况至关重要。因此，需要根据地层条件优化钻井液的性能，以适应不同地质环境的要求。首先，在地层破碎、易塌陷区域，钻井液的主要作用是稳定井壁，防止坍塌。在这种情况下，需要使用高粘度、低

失水量的钻井液，以增强井壁的支撑能力。例如，在松散砂层或泥岩层中，加入膨润土和聚合物增粘剂可以提高钻井液的黏度，减少钻井液的渗透性，从而有效防止井壁坍塌。其次，在高渗透性岩层或富水层，钻井液的主要挑战是防止漏失。在砂岩、裂隙发育的灰岩等地层中，钻井液容易渗透流失，导致液柱压力不足，进而影响井壁稳定性。因此，可以在钻井液中添加封堵剂，如纤维素、微米级碳酸钙、膨胀石墨等，提高钻井液的封堵性能，减少流失。此外，对于承压含水层，可使用加重钻井液，如加重膨润土或重晶石粉，以增加钻井液密度，平衡地层压力，避免井涌或井喷事故的发生。在高硬度岩层，钻井液的作用主要是冷却钻头并减少钻头磨损。在这种情况下，应采用低黏度、高润滑性的钻井液，如油基或聚合物钻井液，以减少钻头与岩石之间的摩擦，降低扭矩，提高钻进速率。同时，可适量添加润滑剂，如石蜡乳化液或油脂类添加剂，减少钻具卡钻的风险。此外，为了提高钻井液的综合性能，可采用智能钻井液管理系统，实时监测钻井液的密度、黏度、pH值等参数，确保钻井液在不同地层条件下均能发挥最佳作用。近年来，一些先进的钻井项目已开始采用自动配比系统，依据实时数据调整钻井液的成分，提高钻进的稳定性和安全性。综上，钻井液的配比与使用应根据具体地质条件进行调整，通过优化黏度、密度、润滑性和封堵能力，提高钻进效率，减少井下复杂问题的发生，为小角度钻探在复杂地质条件下的应用提供有力支持。

3.4 监测技术的应用与优化

在复杂地质条件下，小角度钻探的施工安全性和效率受多种因素影响，如地层结构、钻井参数、井壁稳定性等。因此，采用先进的监测技术对钻探过程进行实时控制和优化，能够有效减少施工风险，提高钻探精度。首先，随钻测量和随钻定向技术在小角度钻探中发挥着重要作用。这些技术可以实时获取钻孔轨迹、地层倾角、井斜角度、岩层性质等关键参数，并通过无线数据传输系统将信息传输到地面控制中心。这样，工程师可以根据实时数据调整钻井参数，确保钻进轨迹符合预定设计，避免因钻孔偏移影响钻探目标的精度。例如，在复杂地层（如断裂带或软硬岩交替区）钻探时，MWD系统可以提供井斜变化趋势，及时调整钻具组合或钻井液配方，提高钻探的稳定性。其次，声波成像和电阻率成像测井技术可以用于钻孔井壁检测。在富水层或破碎带钻探时，这些技术能够提供井壁裂缝、

地层密实度、地下水分布等信息，有助于判断井壁的稳定性和指导工程师采取适当的井壁加固措施，如加装套管或使用高密度钻井液封堵裂隙。此外，钻井参数实时监测系统可用于监控钻井过程中扭矩、钻压、转速、泵压等关键参数，确保钻探设备在最佳工况下运行。例如，若监测到钻压突然增大，可能意味着钻头遇到硬岩层或钻屑排出受阻，工程师可据此调整钻井液流量或更换合适的钻头，以提高钻探效率。在智能钻探系统的应用方面，近年来人工智能（AI）和大数据分析技术已逐步应用于钻探工程。通过历史钻探数据分析，AI系统可以预测可能出现的井下复杂情况，并提供最佳钻井参数建议。例如，在某些智能化钻探项目中，AI系统能够实时调整钻进速率、钻压和扭矩，以优化钻探过程，提高钻井成功率。最后，远程监控和自动化控制技术也在小角度钻探中得到广泛应用。利用物联网技术，钻井数据可实时传输到远程监控中心，专家团队可以在远程指导现场操作人员进行钻探优化决策。这种模式不仅提高了钻探作业的安全性，还降低了对高风险区域现场人员的需求，减少了施工成本。

4 结语

小角度钻探工艺在复杂地质条件下的应用面临诸多挑战，包括地质构造复杂性、岩土性质变化大、水文地质影响显著等问题。小角度钻探技术的发展将更加依赖智能化和信息化技术，如人工智能优化钻井参数、远程监控提升施工安全性等，从而进一步提高钻探的精度和适应性。随着科技的进步和工程实践的积累，小角度钻探工艺将在能源勘探、矿产资源开发、地质灾害监测等领域发挥更加重要的作用，为地质勘探和工程建设提供更高效、安全的技术支持。

参考文献：

- [1] 刘文锐, 姜全果. 地质钻探技术安全及其管理分析[J]. 工程学研究与应用, 2023, 4(3): 155-157.
- [2] 王国娜, 张海军, 孙景涛, 等. 大港油田大型井丛场高效钻井技术优化与应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 51-57.
- [3] 郑武杰. 野外工程地质钻探取样方法差异比较[J]. 地质与勘探, 2014, 50(4): 716-721.
- [4] 张金昌, 尹浩, 刘凡柏, 等. 自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J]. 地质论评, 2022, 68(4): 11.
- [5] 姜涛, 李明. 矿井复杂地质条件下软岩层钻进技术研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 33-37.