

# 深孔钻探施工技术难点分析及质量控制措施探讨

李明鹏

云南南方地勘工程有限公司 671000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19708

**[摘要]** 深孔钻探作为矿产资源勘探、地质灾害治理、地下水开发及工程地质勘察等领域的核心技术手段,其施工深度通常超过 500m,部分工程需求突破 1000m,施工过程中面临孔斜控制、钻具磨损、护壁堵漏、钻进效率提升等多重技术难题,且施工质量直接决定勘探成果精度、工程安全性与成本控制效果。本文结合深孔钻探工程实践,从施工全流程出发,系统剖析孔斜偏差、钻具失效、护壁堵漏困难、环境适应性差等核心技术难点,针对性提出孔斜精准控制、钻具优化选型与维护、分级护壁堵漏方案、动态质量管控等具体措施,结合具体施工案例验证措施可行性,为深孔钻探工程施工质量提升提供可落地的实践参考。

**[关键词]** 深孔钻探; 技术难点; 孔斜控制; 护壁堵漏; 质量管控

## 引言

深孔钻探技术是矿产资源勘探、地质灾害防治、水利水电工程勘察及地热等新能源开发的关键技术手段。相较于浅孔钻探,深孔钻探施工环境更复杂,地层岩性多变、施工周期更长,技术管控难度大幅提升。随着深部勘探与复杂地质工程建设需求不断增加,深孔钻探施工中的孔斜超标、钻具失效、孔壁坍塌等技术瓶颈愈发突出,直接影响工程进度、施工安全与勘探成果精度。本文立足工程实践,聚焦深孔钻探核心技术难点,针对性提出精准质量控制措施,以期破解施工痛点,提升施工质量与效率,推动深孔钻探技术规范、精细化发展。

## 一、深孔钻探施工技术难点分析

### (一) 孔斜控制难度大, 偏差风险高

孔斜是深孔钻探的核心技术难点,主要体现在以下三方面:一是地层各向异性影响,深孔钻探穿越的地层多为砂岩、页岩、石灰岩等互层结构,不同地层的硬度、密度、倾角差异显著,钻头在软硬交错地层中易发生偏斜,如某铜矿深孔工程中,钻孔穿越 300m 厚的砂岩-页岩互层段,因页岩层抗钻蚀性弱,钻头偏向软质岩层,导致施工至 800m 时孔斜偏差达 3.5%,超出规范要求 2 倍以上;二是钻具刚性不足引发偏斜,深孔钻探需配备长钻杆(单根长度 6-10m),钻杆长度增加后,自身刚性下降,在钻进压力、回转扭矩作用下易发生弯曲变形,形成“弯曲钻杆效应”,加剧孔斜偏差;三是操作参数匹配不当,钻进压力过大、回转速度过快或钻头选型不合理,会导致钻头单侧受力不均,如使用平头钻头在破碎岩层中钻进时,单侧切削力过大,引发钻孔偏斜。孔斜超标

不仅会导致勘探样品采集偏差、钻孔报废,还可能引发钻具卡钻、埋钻等安全事故。

### (二) 钻具磨损与失效频繁, 施工成本激增

深孔钻探钻具(钻头、钻杆、岩心管)长期处于高压、高转速、强摩擦的工作环境中,且需穿越复杂地层(如裂隙带、岩溶发育区),磨损与失效问题突出,直接影响施工连续性。具体表现为:一是钻头磨损过快,深孔钻探钻进深度大,单只钻头钻进里程可达 500-1000m,在硬岩地层(如花岗岩、玄武岩)中,钻头刀齿(硬质合金齿、金刚石复合片)受高速冲击与摩擦影响,易出现崩齿、磨损殆尽的情况,如某铁矿深孔工程中,使用金刚石钻头钻进玄武岩地层,单只钻头仅完成 300m 钻进即出现刀齿脱落,被迫停工换钻,换钻次数较常规浅孔增加 3 倍;二是钻杆疲劳断裂,深孔钻探中钻杆需承受巨大的回转扭矩、轴向拉力与振动,长期反复受力易引发疲劳裂纹,尤其在钻杆接头部位,因螺纹磨损、密封失效,易出现断裂事故;三是岩心管磨损变形,岩心管在钻进过程中与孔壁摩擦,且需承受岩心冲击,易出现管壁变薄、弯曲变形,导致岩心采集不完整,影响地质数据准确性。钻具失效不仅增加施工成本,还会延长施工周期,降低深孔钻探整体效率。

### (三) 护壁堵漏难度大, 孔壁稳定性差

护壁堵漏是深孔钻探施工的关键环节,直接关系到钻孔安全与施工连续性。深孔钻探穿越的地层多为松散、破碎、岩溶发育区,孔壁稳定性差,易发生坍塌、漏浆等事故。难点主要包括:一是松散地层护壁困难,如砂层、卵石层、填土层等松散地层,孔隙率高、胶结性差,钻进过程中孔壁易受

冲洗液冲刷、钻具扰动影响,发生坍塌、掉块,某地下水深孔工程中,钻孔穿越40m厚的砂卵石层,因护壁措施不到位,发生孔壁坍塌,埋钻深度达20m,无法继续施工;二是岩溶发育区堵漏艰难,石灰岩、白云岩等岩溶发育区存在溶洞、溶蚀裂隙,冲洗液易渗入裂隙或溶洞,导致漏浆严重,漏浆量可达10-50m<sup>3</sup>/h,若堵漏不及时,会引发孔壁失稳,某矿产勘探工程中,钻孔深度800m,进入岩溶发育区后出现严重漏浆,冲洗液流失量达30m<sup>3</sup>/h,多次堵漏失败后被迫停工;三是冲洗液选型匹配不足,冲洗液作为护壁核心材料,其黏度、密度、滤失量需与地层特性匹配,若选型不当,如在破碎地层使用低黏度冲洗液,无法形成有效泥皮,加剧孔壁坍塌,在黏土层使用高黏度冲洗液,则会增加钻进阻力,降低效率。护壁堵漏失败不仅会导致钻孔报废,还可能引发地面沉降、地下水污染等次生灾害。

#### (四) 钻进效率提升受限,施工周期长

深孔钻探施工周期通常为30-60天,部分复杂地质工程可达90天,钻进效率低是制约施工进度的核心因素。难点主要有:一是地层适应性差导致钻进效率低,在硬岩地层(如花岗岩、片麻岩)中,岩石抗压强度超过150MPa,钻头切削效率低,单米钻进耗时可达2-3h,而在软岩地层(如页岩、泥岩)中,虽钻进速度快,但易出现孔壁坍塌,影响连续施工;二是钻具组合与操作参数不合理,如钻杆直径过大增加回转阻力,钻头转速与钻进压力匹配不当,导致钻头切削效率下降,某工程中,因未根据地层变化调整钻进参数,硬岩地层钻进效率较常规降低40%;三是岩心采集与清理耗时,深孔钻探需连续采集岩心,岩心提取、清洗、编号、存放等环节耗时较长,且在破碎地层中岩心采集不完整,需反复回次钻进,增加无效作业时间。钻进效率低直接导致施工周期延长,增加施工成本,如某深孔工程原计划40天完成,因钻进效率低延误15天,施工成本增加18%。

## 二、深孔钻探施工质量控制具体措施

### (一) 精准控制孔斜,保障钻孔轴线精度

孔斜控制需贯穿深孔钻探施工全过程,采用“预防为主、过程管控、及时纠偏”的管控策略,具体措施如下:

1. 优化钻具选型与组合,根据钻孔深度与地层特性,选择刚性强、精度高的钻具,如钻孔深度超过800m时,采用加重钻杆(直径127mm以上)与扶正器组合,增强钻具刚性,减少弯曲变形,同时配备孔斜测量仪(如陀螺测斜仪),每钻

进50-100m测量一次孔斜数据,实时掌握钻孔偏斜情况。

2. 规范操作参数,根据地层变化动态调整钻进压力、回转速度,在软硬交错地层段,降低钻进压力(调整至15-20kN)、减慢回转速度(控制在60-80r/min),采用平头钻头替换锥形钻头,避免单侧受力不均,同时使用导向钻头,增强钻孔方向性。

3. 及时实施纠偏处理,当孔斜偏差超过1.5‰时,立即采取纠偏措施,对于轻度偏差(1.5‰-2‰),采用轻压慢转、多次扫孔的方式纠正,对于重度偏差(>2‰),使用纠偏钻具(如偏心纠偏器)进行定向纠偏,某铜矿深孔工程中,通过上述措施,将800m处孔斜偏差3.5‰逐步纠正至0.8‰,满足规范要求。

### (二) 强化钻具管理,降低失效风险

钻具管理需从选型、维护、检修三方面入手,具体措施如下:

1. 精准选型钻具,根据地层硬度、钻孔深度选择适配钻具,在硬岩地层(抗压强度>100MPa)中,选用金刚石复合片钻头(PDC钻头),其耐磨性强、切削效率高,单只钻头钻进里程可达800-1000m;在软岩-破碎地层中,选用牙轮钻头,增强抗冲击性,同时根据钻杆受力情况,选择高强度合金钻杆(抗拉强度≥900MPa),提升钻杆疲劳寿命。

2. 做好钻具日常维护,每次下钻前,对钻杆接头、钻头刀齿进行全面检查,清理螺纹杂质,涂抹专用润滑脂,防止螺纹磨损与密封失效,钻进过程中,定期监测钻具温度,当钻头温度超过150℃时,停止钻进,进行冷却处理,避免刀齿过热崩损,同时建立钻具使用台账,记录每只钻具的使用时长、磨损情况、失效原因,实现钻具全生命周期管理。

3. 严格钻具检修标准,钻具出现轻微裂纹、磨损时,及时进行补焊、修复,如钻杆接头螺纹磨损量超过0.5mm时,采用螺纹修复机进行加工,钻头刀齿磨损不超过1/3时,进行补齿处理,对于磨损严重、无法修复的钻具,及时报废更换,某工程通过强化钻具管理,钻具失效发生率较之前降低65%,施工成本减少22%。

### (三) 分级实施护壁堵漏,保障孔壁稳定

护壁堵漏需根据地层类型分级制定方案,具体措施如下:

1. 松散地层护壁措施,对于砂层、卵石层等松散地层,采用“泥浆护壁+套管跟进”组合方案,钻进前先下入套管(套管长度不小于20m),隔离松散地层,同时配制高黏度护壁泥

浆(黏度 25-30s、密度 1.2-1.3g/cm<sup>3</sup>), 在孔壁形成致密泥皮, 防止孔壁坍塌, 如某地下水深孔工程中, 通过该措施, 顺利穿越 40m 砂卵石层, 未发生坍塌事故。

2. 岩溶发育区堵漏方案, 针对溶洞、溶蚀裂隙, 采用“分级堵漏+注浆加固”组合方式, 轻度漏浆(漏浆量 < 10m<sup>3</sup>/h)时, 向孔内投入黏土球、锯末等堵漏材料, 封堵裂隙通道, 重度漏浆(漏浆量 > 10m<sup>3</sup>/h)时, 采用水泥-水玻璃双液注浆, 注浆压力控制在 0.5-1.0MPa, 填充溶洞与裂隙, 同时在漏浆段下入套管, 隔离漏浆区域, 某矿产勘探工程通过该方案, 成功解决岩溶区严重漏浆问题, 保障钻孔连续施工。

3. 优化冲洗液选型, 根据地层特性匹配冲洗液, 在破碎地层中, 使用低滤失量、高黏度的聚合物冲洗液(如 CMC 聚合物泥浆), 形成厚泥皮, 增强护壁效果, 在黏土层中, 使用低黏度清水冲洗液, 减少钻进阻力, 同时根据孔深增加冲洗液流量, 确保冲洗液循环顺畅, 及时携带岩粉, 减少孔壁摩擦。

#### (四) 优化钻进工艺, 提升钻进效率

钻进效率提升需聚焦工艺优化与参数匹配, 具体措施如下:

1. 动态调整钻进工艺, 根据地层变化分段优化钻进工艺, 在硬岩地层中, 采用“金刚石钻头+高转速(80-100r/min)+低钻进压力(10-15kN)”工艺, 提升切削效率, 在软岩地层中, 采用“牙轮钻头+低转速(50-60r/min)+高钻进压力(20-25kN)”工艺, 加快钻进速度, 同时在破碎地层段, 减少回次进尺长度(控制在 5-8m/回次), 避免岩心堵塞, 提升岩心采集效率。

2. 简化岩心采集流程, 采用高效岩心管(如双层岩心管), 提升岩心采集完整性, 同时配备自动化岩心清洗机, 缩短岩心清洗、编号时间, 建立岩心采集流水线, 减少无效作业时间。

3. 强化设备维护, 定期检修钻机、泥浆泵等设备, 确保设备运行稳定, 避免因设备故障导致停工, 同时配备备用钻具、设备, 应对突发失效, 某工程通过优化钻进工艺, 钻进效率较之前提升 35%, 施工周期缩短 12 天。

### 三、施工质量管控保障体系

为确保深孔钻探施工质量可控, 需建立“全流程、动态化、精细化”的质量管控体系, 具体如下:

1. 建立施工前准备管控机制, 施工前详细勘察地层资料, 编制针对性施工方案, 明确孔斜控制、护壁堵漏、钻具管理

等核心环节的技术参数与操作规范, 组织施工人员进行技术交底, 确保每位人员掌握操作要点, 同时对钻具、设备进行全面检测, 确保设备性能达标。

2. 强化施工过程动态管控, 安排专业技术人员全程旁站监督, 每道工序完成后进行质量验收, 如孔斜测量、护壁效果检查、钻具磨损检测等, 验收合格后方可进入下一道工序, 同时建立质量问题台账, 及时记录施工中出现的难题与质量缺陷, 分析成因并制定整改措施。

3. 完善施工后验收管控机制, 施工完成后, 对孔斜偏差、岩心采集质量、护壁效果等进行全面检测, 出具详细的施工质量报告, 同时对施工资料(如钻孔记录、钻具使用台账、质量检测数据)进行整理归档, 为后续工程提供参考, 同时开展施工复盘, 总结经验教训, 优化施工技术与管控措施。

### 结语

深孔钻探施工技术难点集中于孔斜控制、钻具维护、护壁堵漏与钻进效率提升, 各难点相互关联, 任何环节管控不当均会影响施工质量与安全。本文结合具体工程实践, 从施工全流程出发, 针对性提出孔斜精准纠偏、钻具精细化管理、分级护壁堵漏、优化钻进工艺等具体措施, 并构建全流程质量管控体系, 通过实践验证, 这些措施可有效降低孔斜偏差、减少钻具失效、保障孔壁稳定、提升钻进效率, 显著提升深孔钻探施工质量与效率。在未来深孔钻探工程中, 需进一步结合地层特性与施工需求, 持续优化技术措施, 推动深孔钻探技术向精细化、智能化、高效化方向发展, 为矿产资源勘探、工程建设等领域提供更可靠的技术支撑。

### [参考文献]

[1] 韦海瑞, 孙红波, 贾明浩, 温仲龙, 朱芝同, 邵玉涛, 刘广. 大口径地面钻孔救援技术与装备发展[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 143-149.

[2] 王程林, 王明耀, 王翠. 矿山大口径钻孔钻探施工技术及其研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(S02): 26-28.

[3] 陈旭. 复杂地质条件下矿山大口径钻孔施工技术特点分析[J]. 世界有色金属, 2022, 47(7): 58-60.

[4] 邱春阳, 张翔宇, 赵红香, 等. 顺北区块深层井壁稳定钻井液技术[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(2): 81-86.

[5] 杨博仲, 汪瑶, 叶小科. 川西地区复杂超深井钻井技术[J]. 钻采工艺, 2022, 45(4): 27-30.