

Restoration of Misaligned Sections in Directional Drilling under Complex Geological Conditions

Guojian Li

Project Management Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

Directional drilling technology is widely used in oil and gas pipeline crossing projects. However, in complex geological conditions, it is prone to casing misalignment and deformation, which seriously affects the project quality and construction safety. Taking the casing deformation and axis misalignment problem in the Huashanxi crossing project of the West Third Line Fujian-Guangdong Branch Line as an example, this paper proposes a comprehensive management technology that takes into account mechanical repair and geological adaptation for the casing misalignment and deformation problem in the interface between silt and bedrock strata. The results show that the misalignment problem is mainly caused by the sudden change of rock strata and the mismatch of construction parameters. The progressive grinding technology and elastic laying design can effectively repair the deformation. By optimizing the mud ratio and implementing dynamic monitoring, the success rate of repair can be significantly improved. The technical system formed by this study provides theoretical guidance for directional drilling construction in complex geological conditions and has important practical value for ensuring the safety of pipeline crossing projects.

Keywords

Directional drilling; Casing misalignment; Geomechanics; Repair technology; Risk control

复杂地质定向钻错台修复

李国见

国家石油天然气管网集团有限公司建设项目管理分公司, 中国·河北 廊坊 065000

摘要

定向钻技术在油气管道穿越工程中应用广泛,但在复杂地质条件下易出现套管错台变形问题,严重影响工程质量和施工安全。本文以西三线闽粤支干线花山溪穿越工程套管变形与轴线错台问题为例,针对粉砂-基岩交界地层中套管错台及变形问题,提出兼顾机械修复与地质适应的综合治理技术。结果显示,错台问题主要由岩层突变与施工参数失配导致,采用渐进式修磨技术和弹性敷设计可有效修复变形;通过优化泥浆配比和实施动态监测,能显著提高修复成功率。本文研究形成的技术体系为复杂地质定向钻施工提供了理论指导,对保障管道穿越工程安全具有重要实践价值。

关键词

定向钻; 套管错台; 地质力学; 修复工艺; 风险控制

1 引言

近年来,油气管道建设规模持续扩大,穿越工程逐渐向山地、河谷等地质突变区域延伸。复杂地层中岩性界面变化、孤石分布及水力作用等因素,极易导致套管安装过程中产生轴线偏移与局部变形。此类问题若未得到有效处理,将引发扩孔扭矩异常、孔壁失稳等一系列连锁反应,最终造成回拖失败或管道损伤。现有技术多聚焦于单一环节的临时处理,缺乏对地质特性与机械修复协同作用的系统性研究,难以从根本上解决错台问题,亟需探索更为高效可靠的解决方案。

【作者简介】李国见(1979-),男,中国山东乳山人,硕士,工程师,从事工程管理研究。

2 复杂地质定向钻错台成因分析

2.1 地质条件对错台形成的影响

地层结构的非均质性对定向钻错台产生具有决定性作用。在岩性突变区域,不同岩层间的力学性质差异导致扩孔过程中形成不规则孔壁。硬岩与软岩交界处常出现应力集中现象,当扩孔器通过时,软岩部分过度切削而硬岩部分切削不足,造成孔壁几何突变。孤石的存在进一步加剧了这种不均匀切削,特别是在粒径超过孔径 30% 的孤石分布区,扩孔轨迹易发生不可控偏移。

粉砂层与基岩接触面表现出典型的台阶效应。粉砂层在泥浆冲刷作用下持续流失,而基岩段保持相对稳定,形成明显的孔径差异。这种差异随着钻进深度增加而累积,最终导致套管无法顺利通过。现场观测数据显示,在粉砂层厚度超过 2 米的区段,台阶高度可达孔径的 15%-20%,成为错

台形成的主要诱因。此外，地下水的渗流作用会弱化粉砂层结构强度，进一步扩大与基岩段的孔径差异。

2.2 施工工艺因素

扩孔参数设置不当直接关系到孔壁的稳定。扭矩与转速的匹配关系影响切削效率与孔壁质量。当转速超过临界值时，扩孔器产生的离心力会破坏孔壁结构，特别是在松散地层中，这种破坏作用更为显著。测试数据表明，在砂卵石地层中，转速每增加 10rpm，孔壁坍塌概率上升约 8%。同时，扭矩波动幅度超过平均值的 30% 时，孔壁不规则度显著增加。

套管旁进过程中的力学失衡源于多方面因素。套管与孔壁的接触状态直接影响力分布，当存在初始偏心时，接触压力呈现非对称分布，导致套管运动轨迹持续偏离设计轴线。力学分析显示，偏心距达到孔径 5% 时，侧向接触压力可增大至轴向压力的 3 倍以上。此外，旁击频率与地层响应特性的不匹配也会加剧这种失衡，高频旁击在软弱地层中易引发套管“跳跃式”前进，造成轨迹突变。

2.3 错台量化评估模型

错台程度的量化表征需要建立科学的评价体系。轴线偏移量 (L) 与孔径差 (ΔD) 构成评价的基本参数，两者之间存在非线性耦合关系。通过大量现场数据回归分析，建立了包含地层修正系数的数学表达式： $L = \alpha \cdot \Delta D^2 / (D \cdot \tan \theta)$ ，其中 α 为地层特性系数， θ 为错台面倾角。该模型能够准确反映不同地质条件下错台的发育程度。

模型验证采用声波测井与惯性测量单元 (IMU) 的实测数据对比。在砂泥岩互层区段的测试表明，模型计算结果与实测值的相对误差控制在 8% 以内，具有较好的工程适用性。进一步分析发现，当 $\Delta D/D$ 比值超过 0.25 时，错台风险概率呈指数增长，这一临界值为工程预警提供了量化依据。模型的建立为错台危害程度分级奠定了理论基础，有助于指导现场风险管控^[1]。

3 错台修复关键技术理论

3.1 套管变形修复原理

研究分析了扩孔器硬度与套管材质的匹配关系，发现 HRC62 硬质合金扩孔器与 Q235B 材质套管的组合为最优。在此基础上，构建了渐进式修磨力学模型，综合考虑轴向进给力、旋转扭矩和接触应力等多因素耦合作用，精确描述修磨过程中能量传递与材料去除的定量关系。控制修磨角度在 $15^\circ - 25^\circ$ 并采用分级加载方式，能实现最优修磨效果。同时，提出“预紧力 - 修磨量”双参数控制方法，预紧力确保修磨工具与变形部位稳定接触，修磨量由位移传感器实时监测，两者协同保障修复精度。该原理在硬岩地层应用优势明显，修复效率提升约 40%，还降低了工具损耗率。

3.2 错台过渡区优化设计

错台过渡区设计是确保管道顺利穿越的关键环节。本

文基于弹性力学理论建立曲率半径计算模型，推导出 1000D 的最优曲率半径计算公式，该公式综合考虑管道材质特性、地层反力和施工牵引力等多重因素，经有限元分析验证可靠。采用此曲率半径能有效降低管道弯曲应力，避免塑性变形风险。过渡段长度设计遵循“孔径差 - 长度”动态平衡原则，通过大量数值模拟建立经验公式。优化后的过渡区设计改善了管道通过性，使管道回拖阻力降低达 35%，有效避免卡管事故。

3.3 泥浆携渣与孔壁稳定控制

泥浆性能对错台修复质量具有决定性影响。本文开发了高携岩性泥浆体系，通过正交试验确定最佳配比，采用复合型聚合物为主要添加剂，配合特定比例膨润土基浆，动塑比提升至 $0.48 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{mPa} \cdot \text{s}$ ，岩屑携带能力较常规泥浆提高 60% 以上，在复杂地层适应性良好。建立孔壁稳定分析模型，求解 Navier - Stokes 方程，揭示压力波动与孔壁失稳的关联机制。将环空返速控制在 $0.8 - 1.2 \text{ m/s}$ ，既能保证携渣效率，又能维持孔壁稳定。“临界塌落压力梯度”概念为预防性灌浆提供理论指导，现场应用使塌孔事故率降至 5% 以下，提升了施工安全性^[2]。

4 修复工艺与设备配置

4.1 分级修复工艺流程

针对复杂地质条件下定向钻孔错台问题，研究构建了四阶段递进式修复工艺体系。该体系采用“变形处理→错台修孔→分级扩孔→试回拖”的闭环控制逻辑，形成完整的工艺链条。在变形处理阶段，重点对套管变形区域进行应力释放和几何校正，采用液压矫直装置对局部变形部位实施精确矫正，消除应力集中现象。错台修孔环节引入渐进式修磨技术，通过特制修孔工具沿孔轴线方向进行多角度修磨，逐步消除孔壁不规则凸起，该过程需严格控制进给速度在 $0.5 - 1.2 \text{ m/min}$ 范围内。

分级扩孔阶段采用三级扩孔工艺，孔径梯度按 15% - 20% 递增，每级扩孔完成后进行孔壁质量检测。该工艺通过建立孔径过渡曲线，确保孔壁几何形状的平缓过渡。最终的试回拖环节采用模拟管道进行通过性测试，验证修复效果，形成工艺闭环。现场应用表明，该工艺体系可使错台修复合格率达到 92% 以上，较传统方法提升约 35%。特别在硬岩与软土互层地层中，修复效率提高 40%，且显著降低了二次损伤风险^[3]。

4.2 关键设备选型

设备配置方案基于不同地质条件进行差异化设计。扩孔器规格采用 $\Phi 1090 \text{ mm}$ 至 $\Phi 1300 \text{ mm}$ 的级差体系，相邻规格间直径差控制在 $150 - 200 \text{ mm}$ 范围内。硬岩地层选用镶齿式扩孔器，齿尖硬度达 HRC65 以上；松软地层则配置板式扩孔器，增加切削面积以提高效率。针对特殊工况，开发了组合式扩孔器，可根据地层变化实时调整切削结构。

反向扩孔技术的设备改造重点解决了动力传递和导向控制问题。将常规扩孔器的动力头改为双向输出结构，增加了反向旋转功能。导向系统升级为液压可调式，调节精度达到 $\pm 0.5^\circ$ 。设备改造后，在处理严重错台区段时，反向扩孔效率提升25%，且有效避免了卡钻事故。配套开发了专用扶正器，其扶正力可达200kN，确保扩孔器在复杂孔况下的工作稳定性。设备选型方案经现场验证，平均无故障工作时间达300小时以上，满足连续施工要求。

4.3 施工参数控制

扭矩-顶力协同控制系统建立了多参数关联模型。通过实时采集扭矩、顶力、转速等数据，构建了三维参数控制空间。该系统设定扭矩波动阈值不超过平均值的15%，顶力变化梯度控制在5kN/m以内。当参数超出安全范围时，自动调节系统会立即介入，调整钻进参数。监测数据显示，采用该标准后，孔壁质量标准差降低至0.8mm以下，较人工控制精度提高60%。

洗孔工艺建立了基于地层特性的动态控制标准。在砂层段，洗孔次数不少于3次，返浆含砂量控制在5%以下；在黏土层段，洗孔次数增至5次，含砂量标准放宽至8%。开发了在线含砂量检测装置，测量精度达 $\pm 0.3\%$ ，实现了洗孔质量的实时评价。参数控制体系的应用使孔道清洁度合格率从75%提升至95%，显著降低了后续施工风险。同时，通过优化洗孔参数，泥浆消耗量减少约30%，取得了显著的经济效益^[4]。

5 安全与风险控制体系

5.1 施工风险识别

基于JSA（作业安全分析）方法，本文对定向钻错台修复全过程进行了系统性风险识别。通过分解施工工序、识别潜在危险源，建立了包含3个风险等级、12个风险类别的评估矩阵。分析表明，塌孔风险主要出现在粉砂层与基岩接触带，其发生概率达23%；卡钻事故多发生在孔径突变区，占总事故率的35%；电气安全隐患则集中在临时配电系统，占比18%。研究采用故障树分析法，绘制了各类事故的因果关系图，量化了基本事件的重要度。其中，泥浆性能不达标对塌孔风险的贡献率达42%，成为最关键的影响因素。

风险识别工作特别关注了特殊工况下的危害叠加效应。在雨季施工时，地下水位上升会使塌孔风险提高1.8倍；夜间作业时，照明不足导致的操作失误率增加25%。通过建立风险概率-后果矩阵，将各类风险划分为可接受区、缓冲区和不可接受区三个等级，为后续风险控制提供了明确的目标导向。研究得出，超过70%的事故发生在工序转换环节，这一发现为优化施工组织提供了重要依据^[5]。

5.2 动态控制措施

针对识别出的施工风险，建立了完善的动态控制体系。

在预警机制方面，开发了基于实时数据采集的扭矩突变预警系统，当监测参数超出安全阈值时自动触发应急停机程序。在套管变形区监测方面，采用高精度传感器网络，实现对变形区域的实时监控和数据传输。动态控制措施还包括：建立应急响应预案库，针对不同风险等级制定相应的处置方案；优化施工组织设计，合理安排作业顺序和时间窗口；加强现场巡查力度，确保各项控制措施落实到位。这些措施形成了多层次、立体化的风险防控网络。

5.3 HSE 管理标准化

本项目将HSE（健康、安全、环境）管理理念贯穿于整个修复过程，制定了标准化的管理体系。在临时用电管理方面，规范了配电箱设置、电缆敷设和接地保护等技术要求，确保用电安全。吊装作业管理则细化了吊具检查、信号指挥和作业半径控制等操作规程。HSE管理体系还包括：建立三级安全教育制度，强化作业人员安全意识；实施作业许可制度，对高风险作业实行分级审批；完善现场监督检查机制，定期开展HSE绩效评估。这些标准化管理措施有效提升了整体施工安全水平，为工程顺利实施提供了制度保障^[6]。

6 结论

本文系统地分析了复杂地质定向钻错台的成因，涵盖地质条件与施工工艺等多方面因素，并构建了量化评估模型。基于此，提出了套管变形修复原理、错台过渡区优化设计等关键理论，形成了分级修复工艺流程，明确了设备选型和施工参数控制标准，同时建立了完善的安全与风险控制体系。这些研究成果为复杂地质定向钻错台修复提供了全面、科学的理论与技术支撑，有效提升了修复效率与施工安全性。

未来研究可聚焦智能监测技术在错台修复中的应用，实现实时精准的施工监测与决策。同时，探索极端地质条件下的创新修复工艺，进一步拓展定向钻技术的应用范围和可靠性。

参考文献

- [1] 于江浩,李薇薇,梁蕊宏,等. 定向钻穿越土岩交替复杂地层注浆加固处理案例分析[J]. 电力勘测设计, 2023, (S2): 72-78.
- [2] 梁华,陈国军,田钊. 伊拉克某油田盐膏层定向井套管变形原因分析及预防措施[J]. 石油和化工设备, 2023, 26 (03): 146-150.
- [3] 胡磊. 地质条件对定向钻穿越的影响和应对措施[J]. 居业, 2024, (12): 221-223.
- [4] 张忠华. 定向钻穿越的泥浆工艺及运用分析[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (06): 87-89.
- [5] 陈宇. 复杂地质条件下地面定向钻孔预注浆巷道围岩控制技术研究[D]. 安徽理工大学, 2024.
- [6] 张满. 复杂地层条件下长距离水平定向钻施工关键技术研究[D]. 武汉工程大学, 2024.