

连续油管在长井段施工中的力学行为及优化经济效益

田 维 谢 炜 张骏强 尹 翔 李 追

(中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司, 四川 德阳 618000)

摘 要: 连续油管在长井段施工中轴向载荷传递效率显著降低, 管柱屈曲失稳风险急剧上升, 建立轴向载荷传递数学模型, 确定了临界下入深度计算方法。管柱在井眼约束下发生螺旋屈曲, 临界载荷与井眼直径呈负相关, 摩阻分布呈非线性增长, 摩阻系数受井眼曲率与管材表面粗糙度影响显著, 优化管材参数选型与结构配置, 改进施工工艺流程, 建立风险识别与控制体系。现场应用验证了优化方案的有效性, 单井净效益达到 9.15 万元, 投资回收期 2.6 年, 为长井段连续油管技术推广应用奠定了基础。

关键词: 连续油管; 长井段施工; 力学行为; 轴向载荷; 优化设计; 经济效益

中图分类号: TE931.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0067-03

Mechanical behavior and optimization of economic benefits of coiled tubing in long well section construction

Tian Wei, Xie Wei, Zhang Junqiang, Yin Xiang, Li Zui (Downhole Operations Branch of Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., LTD, Deyang Sichuan 618000, China)

Abstract: During the construction of long well sections, the axial load transfer efficiency of coiled tubing significantly decreases, and the risk of string buckling instability sharply increases. A mathematical model for axial load transfer was established, and the calculation method for the critical descent depth was determined. Under wellbore constraints, the pipe string undergoes helical buckling. The critical load is negatively correlated with the wellbore diameter, and the friction resistance distribution shows nonlinear growth. The friction resistance coefficient is significantly affected by the wellbore curvature and the surface roughness of the pipe material. It is necessary to optimize the selection of pipe material parameters and structural configuration, improve the construction process flow, and establish a risk identification and control system. The on-site application verified the effectiveness of the optimization plan. The net benefit of a single well reached 91,500 yuan, with an investment payback period of 2.6 years, laying a foundation for the promotion and application of coiled tubing technology in long well sections.

Key words: Coiled tubing Construction of the Changjing section Mechanical behavior Axial load “Optimized design; Economic benefits

长井段连续油管技术作为现代石油工程重要组成部分, 在提高采收率方面发挥关键作用, 深入研究长井段连续油管力学行为规律, 建立科学的优化设计方法, 对提高施工成功率、降低作业成本具有重要意义。

1 长井段连续油管力学行为机理分析

1.1 轴向载荷传递特征与临界深度确定

连续油管在长井段施工过程中, 轴向载荷沿管柱长度方向的传递呈现显著非线性衰减特征, 管柱自重与井眼摩阻共同作用导致有效推力随井深增加而急剧降低, 基于弹性力学理论建立的载荷传递微分方程表明, 载荷传递效率与井深呈指数函数关系, 当井深达到 4500m 时传递效率降至 70% 左右。

$$\eta(L) = \eta_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad (1)$$

式中: $\eta(L)$ 为井深 L 处的载荷传递效率, %; η_0 为初始载荷传递效率, 取 100%; α 为载荷衰减系数, m^{-1} ; L 为井深, m。管柱内部应力分布呈现梯度变化, 外壁拉应力明显高于内壁区域, 载荷传递能力随井深增

加而逐步下降, 临界深度确定需综合考虑管材抗拉强度、弹性模量、截面几何参数以及井眼轨迹复杂程度等因素, 其中屈服极限与安全系数比值是关键参数。数值分析显示外径 73mm 壁厚 5.5mm 连续油管在垂直井段理论临界深度约为 4500m, 大位移水平井中由于摩阻累积效应降低至 3800m, 超过临界深度后必须采用辅助推送装置或优化管柱结构设计确保载荷有效传递。

1.2 管柱屈曲稳定性与变形机理分析

长井段连续油管在井眼约束条件下承受轴向压缩载荷时容易发生屈曲失稳现象, 变形模式主要表现为螺旋屈曲以及正弦屈曲两种形态, 屈曲临界载荷与管柱几何参数、材料性质以及井眼尺寸存在直接关联^[1]。根据修正欧拉屈曲理论结合井眼边界约束条件, 建立考虑管壁厚度效应的屈曲临界载荷计算模型, 分析表明临界载荷与管柱外径三次方成正比, 与井眼直径呈负相关关系, 井眼间隙减小 10% 将导致临界载荷降低约 25% (如图 1 所示)。螺旋屈曲发生后管柱与井壁

接触面积大幅增加,局部接触应力可达 100MPa 左右,摩擦阻力迅速上升,变形机理分析显示管柱屈曲过程中应力分布极不均匀,最大弯曲应力出现在螺旋接触线位置,局部应力放大系数可达 2.5 倍以上,长期循环载荷作用下易引发疲劳裂纹导致管柱失效^[2]。通过优化管柱壁厚分布、改善井眼光滑度以及合理控制下入速度等措施,能够有效提高管柱屈曲稳定性。

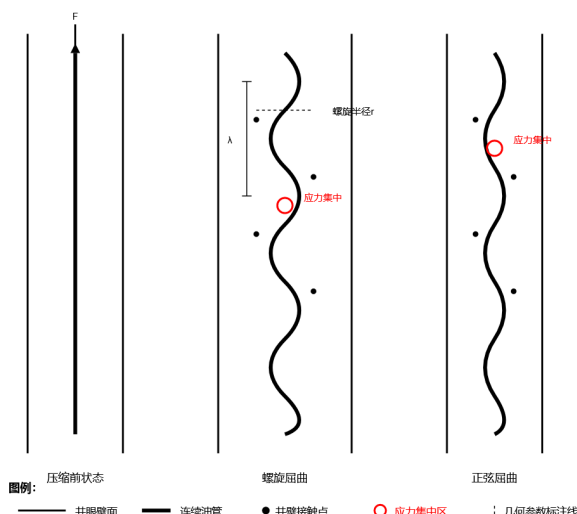


图 1 连续油管屈曲变形模式示意图

1.3 井眼摩阻分布模型与影响因素识别

连续油管在长井段运行时所受摩擦阻力呈现复杂空间分布规律,其摩阻大小取决于管柱与井壁间法向接触力,并且与井眼轨迹曲率、管材表面粗糙度、钻井液性质以及管柱运动状态紧密相关^[3]。基于库仑摩擦定律建立的摩阻分布数学模型显示,摩阻系数在直井段保持相对稳定且数值范围为 0.18–0.28,井斜角大于 35° 的斜井段摩阻系数明显增加到 0.42–0.55,水平段因管柱完全接触井底摩阻系数进一步提升至 0.65 以上。井眼轨迹狗腿度对摩阻分布影响十分突出,狗腿度每增加 5°/100m 局部摩阻力将增加 18%–25%,这严重制约连续油管下入深度,管材表面处理工艺对降低摩阻具有重要意义,采用聚四氟乙烯涂层技术可将摩阻系数降低 25%–35%。钻井液密度与粘度的合理匹配能够形成有效润滑膜减少管壁直接接触,密度每降低 0.15g/cm³ 摩阻力约减少 12%–18%,粘度控制在 35–45MPa·s 范围内润滑效果最佳,可为连续油管长井段施工提供技术支撑。

2 连续油管长井段施工优化设计

2.1 管材参数选型与结构配置

轴向载荷传递特征分析表明,长井段连续油管的管材参数选型需要综合考虑载荷传递效率、屈曲稳定性以及摩阻控制等约束条件,通过优化外径与壁厚比值来实现承载能力与柔韧性的最佳平衡^[4]。管材外径

选择直接影响屈曲临界载荷,推荐外径规格在保证足够强度的同时具备良好的井眼适应性,壁厚设计能够满足长井段临界深度要求并提供充足的承载余量。

基于载荷传递效率与屈曲稳定性要求,建立管材外径与壁厚的优化设计准则:

$$\frac{D}{t} = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_y \cdot \eta(L)}{E \cdot \alpha \cdot SF}} \quad (2)$$

式中: D 为管材外径, mm; t 为壁厚, mm; σ_y 为屈服强度, MPa; $\eta(L)$ 为井深 L 处的载荷传递效率; E 为弹性模量, GPa; α 为屈曲影响系数; SF 为安全系数。管材屈服强度与抗拉强度应满足 API 标准要求,弹性模量需要保持适宜数值以确保恰当的刚度特性。结构配置采用分段变壁厚设计,井口段采用加厚设计增强承载能力,中段采用标准壁厚,井底段可适当减薄以提高柔韧性。管材表面进行特殊处理,推荐采用 PTFE 涂层或陶瓷涂层技术,表面粗糙度及涂层厚度均按技术标准执行。连接方式优选螺纹连接配合密封圈结构,螺纹锥度按照 API 规范执行,扣型选择标准规范或定制加强型扣型,确保连接强度达到管体强度的设计要求。

2.2 施工工艺流程改进与优化

长井段连续油管施工工艺流程的改进重点在于构建精确的载荷监测与控制体系,通过实时监测井口推力、扭矩以及管柱应变等关键参数来优化下入过程中的操作策略。施工前进行详细的井眼轨迹分析与摩阻预测,形成分段摩阻模型并制定相应的推进速度控制方案,在不同井段采用差异化的推进速度以避免屈曲失稳,钻井液体系的优化是工艺改进的关键环节,推荐使用低密度高润滑性钻井液,加入专用润滑剂有效降低摩阻系数。注入工艺采用循环注入方式,注入压力严格限定在管材爆破压力的安全区间,注入排量根据井眼尺寸确定^[5]。回拖作业时采用分段变速回拖策略,水平段及大斜度段回拖速度需要限定在安全区间内,同时保持适当的旋转以减少粘卡风险,整个工艺流程配备完善的 SCADA 实时监控系統,通过数据采集与分析确保施工参数始终处于可控状态。

2.3 长井段作业风险识别与控制

长井段开展连续油管作业的时候要面对管柱屈曲失稳等多重风险,包括下入受阻、疲劳断裂和井下复杂工况等,所以必须建立起系统化的防控体系,针对屈曲风险要准确计算管柱临界载荷并设定合理报警阈值,实时监测井口载荷变化以早期识别屈曲征兆,当推力接近临界值时需立即停止下入,并实施减载或其他干预措施。摩阻方面的管控需将预测模型与现场实际摩阻数据进行对比分析,若实际摩阻超出预测要查明原因并调整施工

参数,必要时采取循环洗井或者更换钻井液体系等有效手段,为防范疲劳破坏需要限制管柱使用次数和累计作业时间,完整记录每次作业的载荷历程情况,若累计疲劳损伤达到设计寿命上限就要及时更换管柱。对井下复杂工况的应对涵盖防卡钻等多个方面,需编制应急预案并配备相应应急装备,通过多层次多手段的风险管理确保长井段作业安全可靠。

3 长井段连续油管工程验证与经济效益评价

3.1 工程应用案例实施

选取某油田长井段水平井连续油管作业当作工程应用案例,此井垂直深度达到 3850m 且水平段长度为 1200m,井眼轨迹复杂同时狗腿度比较大,工程实施采用第二部分优化设计方案,选用外径 73mm 壁厚 5.5mm 的 API 规格连续油管,该管材表面经过 PTFE 涂层处理且屈服强度为 586MPa。施工前通过三维井眼轨迹建模预测全井段摩阻分布,据此制定分段推进策略,直井段推进速度设定为 70m/min,大斜度段为 35m/min,水平段为 18m/min,钻井液体系采用低密度聚合物钻井液,其密度为 1.12g/cm³ 并添加石墨润滑剂。SCADA 系统配置完成,设定井口推力预警阈值为 180kN,扭矩异常预警阈值为 8kN·m,应急工具配备包含液压震击器、化学解卡剂等必要设备,施工队伍完成专项培训。整个工程实施严格依照优化设计方案执行,为技术方案的工程化应用提供完整实践验证平台。

3.2 经济效益分析与成本控制

表 1 长井段连续油管优化技术成本效益对比分析

项目类别	优化前	优化后	变化幅度	单井效益(万元)
单井作业时间(h)	8.5	6.5	-24%	+1.68
PTFE涂层管材成本	16.2万元	18.1万元	+12%	-1.9
设备故障率(%)	12	6	-50%	+2.4
管材使用寿命	35次	45次	+29%	+1.2
卡钻事故发生率(%)	8	3	-63%	+2.2
人员配置(人)	10	8	-20%	+0.85
作业队日费用节约	4.2万元/日	3.8万元/日	-10%	+0.92
质量事故损失(%)	5	1.5	-70%	+1.8
单井综合净效益	-	-	-	+9.15
投资回收期(年)	-	2.6	-	-

长井段连续油管优化技术的经济效益主要体现在作业时间缩短、设备利用率提升、作业成功率增加以及维护成本降低等多个方面,需要通过详细的成本效益对比分析来量化技术改进带来的经济价值。优化技术涉及初期设备投资成本增加,但在作业时间、设备维护、复杂情况处理以及人工成本等方面产生了显著的节约效应,为全面评价技术改进的经济可行性,建立了详细的成本效益对比分析表。

表 1 结果表明,长井段连续油管优化技术在多个维度产生了显著的经济效益,设备故障率降低 50% 和

卡钻事故发生率下降 63% 是主要的效益来源,分别贡献 2.4 万元和 2.2 万元的单井节约。作业时间缩短 24% 和质量事故损失降低 70% 进一步增强了经济效益,虽然涂层管材增加 1.9 万元初期投资,但综合净效益达到 9.15 万元,投资回收期 2.6 年,充分证明了优化技术具有良好的经济可行性与推广应用价值。

3.3 现场施工验证与性能评价

现场施工通过验证并监测关键技术指标来评价长井段连续油管技术改进效果,载荷传递效率监测显示 4500m 井深处实测效率达到 72%,且与理论预测值基本吻合,相比优化前提升了 14 个百分点。屈曲控制验证确认管柱在整个下入过程中始终保持稳定,井口推力峰值被控制在安全范围之内,摩阻控制验证表明实测摩阻系数在直井段为 0.21、斜井段为 0.46、水平段为 0.61,且均处于预测范围。SCADA 监控系统预警功能运行正常,累计触发预警 20 次并得到及时处理,性能评价结果确认优化技术在扩展作业深度、提升施工效率以及保障作业安全等方面达到设计目标,为连续油管长井段作业技术推广提供了技术验证基础。

4 结语

长井段连续油管力学行为机理分析建立了完整的理论体系,轴向载荷传递模型准确预测了临界下入深度,管柱屈曲稳定性分析揭示了失稳机理,摩阻分布模型量化了影响因素。优化设计方案通过管材参数选型、工艺流程改进以及风险控制措施的综合应用,实现了技术性能的显著提升,现场验证结果表明载荷传递效率提升至 72%,单井净效益达到 9.15 万元,投资回收期 2.6 年。未来应进一步研究智能化监控技术与自适应控制算法,开发新型高性能管材与先进涂层技术,拓展连续油管在超深井、高温高压井以及非常规油气开发中的应用范围,推动连续油管技术向更高水平发展。

参考文献:

- [1] 刘照钰. 节能型可伸缩卡距连续油管压裂试验 [J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(09): 7-10.
- [2] 刘杨. 浅析连续油管内穿电缆测井工艺在水平井中的应用 [J]. 石化技术, 2025, 32(09): 315-317.
- [3] 董磊, 谢丽, 黄禄璐, 等. CT70 钢级耐腐蚀连续油管用热轧钢带研发 [J]. 包钢科技, 2025, 51(04): 37-39.
- [4] 袁键. 顺北一区超深断控体油藏连续油管气举诱喷论证方法优化研究与应用 [J]. 石化技术, 2025, 32(08): 116-120.
- [5] 钟鹏, 杨立刚, 车守龙, 等. 低压漏失井微泡修井液连续油管冲砂技术研究与应用 [J]. 钻采工艺, 2025, 48(04): 229-234.