

连续油管技术在井下作业中的可靠性评估

刘申策 王冬 倪庆怀

渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司 天津 300280

摘要：本文探讨了连续油管技术在井下作业中的可靠性评估。首先概述了连续油管技术的起源与发展，介绍其在修井等多个领域的应用及特点，包括作业安全高效、快速运移就位、减少环境影响等。接着分析了影响连续油管技术可靠性的因素，涵盖材料性能、设备性能、操作工艺和环境因素等方面。阐述了四种可靠性评估方法，如故障模式和影响分析、可靠性框图法、故障树分析法和蒙特卡洛模拟法。最后提出了提升连续油管技术可靠性的策略，包括技术改进、管理优化和安全保障等措施。

关键词：连续油管技术；井下作业；可靠性评估

引言：随着石油工业的不断发展，连续油管技术在井下作业中发挥着越来越重要的作用。连续油管技术起源于20世纪40年代，历经多年发展，应用范围不断扩大。然而，在复杂的井下作业环境中，确保连续油管技术的可靠性至关重要。井下作业面临着各种挑战，如高温高压、腐蚀性介质、复杂地质条件等，这些因素都可能影响连续油管技术的可靠性。

1 连续油管技术概述

连续油管技术起源于20世纪40年代，最初主要用于井下打捞作业。随着技术的不断发展，连续油管的直径和强度不断提高，应用范围也逐渐扩大到修井、完井、压裂、酸化等领域。目前，连续油管技术已经成为井下作业中不可或缺的重要技术之一。连续油管是一种由高强度合金钢制成的连续管状物，其外径通常为1.5-5.0英寸。连续油管通过卷盘装置卷入和放出，在井下作业过程中，连续油管可以通过井口装置下入井内，进行各种作业操作。连续油管技术的工作原理主要是利用连续油管的柔韧性和可操作性，实现对井下设备的安装、维修、清洗等作业。

2 连续油管技术的特点

2.1 作业安全高效

连续油管技术的最大优势之一是作业安全高效。与传统的分段油管相比，连续油管可以实现连续作业，减少了接头数量，降低了因接头问题导致的故障率。连续油管的作业速度也很快，能够在短时间内完成复杂的井下作业，大大提高了作业效率。就比如，在修井作业中，连续油管可以快速下入井底，进行清洗、酸化、压裂等作业，显著缩短了作业时间，提高了工作效率。

2.2 快速运移和就位

连续油管设备具有高度的便携性和快速部署能力。

由于其轻便灵活，可以在不同的井场之间快速移动，减少了设备转运时间和成本。这种快速运移和就位的能力使得连续油管技术在紧急情况下能够迅速响应，提高作业的灵活性和应急处理能力。比如，在突发井喷事故中，连续油管设备可以迅速到达现场，进行井控作业，有效控制事故的进一步发展^[1]。

2.3 减少对环境影响

连续油管作业对环境的影响较小。由于连续油管可以实现连续作业，减少了多次起下管柱的次数，从而减少了泥浆和废弃物的产生。此外，连续油管作业所需的占地面积较小，对周围环境的干扰也相对较小。比如在海上钻井平台，连续油管作业可以减少对海洋生态的影响，保护海洋环境。

2.4 现场占用人员少

连续油管作业通常只需几名操作人员，便可顺利完成整个作业流程。这带来了多重积极影响。（1）人力成本得到了大幅降低。企业无需雇佣大量员工，从而减少了工资支出等费用。（2）因人员减少，人为因素导致的作业风险也随之降低。在一些复杂的作业环境中，人为操作失误可能引发严重后果，而连续油管作业的少人化有效避免了这种风险。少人操作还极大地提高了作业的安全性，使事故发生率显著下降。以偏远地区的井场为例，连续油管作业能够减少人员的长期驻守。在这些偏远之地，生活条件艰苦，安全风险也相对较高。若采用传统作业方式，需要大量人员长期驻扎，不仅给员工的生活带来诸多不便，还增加了安全隐患。

2.5 运行费用相对低

连续油管技术的经济性优势显著，在市场竞争中颇具吸引力。一方面，其作业速度快、效率高，使得运行费用相对较低。相比一些传统作业方式的缓慢与繁琐，

连续油管能够迅速完成作业任务，大大缩短了作业时间，进而减少了在人力、物力等方面的投入。比如在常规的井下作业中，使用连续油管技术可以快速地进行冲砂、解堵等操作，节省了大量的作业时间和成本。另一方面，连续油管设备的维护成本也不高。该设备结构相对简洁，不像一些大型复杂设备需要频繁且昂贵的维护。其零部件的耐用性较强，不易损坏，这在很大程度上降低了设备的维护费用。在页岩气开发中，连续油管技术的应用更是极大地降低了钻井和完井的成本，为项目带来了显著的经济效益。

3 影响连续油管技术可靠性的因素

3.1 连续油管材料性能

连续油管技术的可靠性受多种因素影响，其中连续油管材料性能是很关键的，具体体现在以下方面：（1）强度：强度不足会严重影响连续油管的可靠性。在井下作业时，连续油管需要承受各种复杂的应力，如拉伸应力、弯曲应力等。如果强度不够，在这些应力的作用下，连续油管很容易发生断裂等事故。例如在深井作业中，由于深度增加，油管所受的拉力也会相应增大，若强度不达标，就无法承受这种拉力，导致作业中断甚至引发安全事故。（2）韧性：韧性差的连续油管在井下作业过程中容易发生脆断。井下环境复杂多变，油管可能会受到各种冲击和振动，如果韧性不足，就无法有效吸收这些能量，从而容易出现脆断现象。这种情况在遇到井下突发情况，如岩石崩塌对油管产生冲击时，表现得尤为明显。（3）耐腐蚀性能：井下作业环境通常具有较高的腐蚀性，连续油管容易受到腐蚀。如果耐腐蚀性能不足，油管表面会逐渐被腐蚀，导致管壁变薄、强度降低，最终可能发生腐蚀穿孔等事故。例如在一些高含硫化氢、二氧化碳等腐蚀性气体的油气井中，连续油管的耐腐蚀性能就显得尤为重要。

3.2 设备性能

连续油管技术的可靠性在很大程度上受设备性能的影响，主要体现在以下几个方面：（1）卷盘装置是连续油管技术的核心设备。它直接决定着连续油管的下入和放出速度。若卷盘装置性能不稳定，会带来诸多问题。比如，在作业过程中，可能会导致连续油管在下入和放出时发生卡阻事故。一旦出现卡阻，不仅会影响作业进度，还可能对连续油管造成损伤，增加维修成本，甚至可能引发安全事故。（2）井口装置是连续油管技术的重要设备，其性能关乎连续油管的下入和放出安全。如果井口装置性能不稳定，很容易在操作过程中发生泄漏事故。泄漏不仅会造成资源浪费，还可能对环境造成污

染，更严重的是，可能引发火灾、爆炸等危险情况，对人员和设备的安全构成巨大威胁。（3）作业设备作为连续油管技术的辅助设备，对作业效率和质量有着直接影响。若作业设备性能不稳定，在连续油管作业过程中容易发生故障。故障可能导致作业中断，影响生产进度，同时也需要投入时间和精力进行维修，增加了作业成本^[2]。

3.3 操作工艺

（1）下入速度：连续油管的下入速度如果过快，会带来诸多问题。当下入速度超出合理范围时，连续油管在下行过程中极易发生弯曲。弯曲的油管可能会与井壁产生不正常的摩擦和碰撞，进一步增加卡阻事故的发生几率。这不仅会影响作业进度，还可能对连续油管造成不可逆转的损伤，增加维修成本和作业风险。（2）作业压力：当作业压力过高时，连续油管可能无法承受巨大的压力而发生破裂。一旦破裂，不仅会导致作业中断，还可能引发安全事故，如井喷等。同时，过高的压力也可能使连续油管出现泄漏问题，造成资源浪费和环境污染，给企业带来经济损失和环保压力。（3）作业温度：如果连续油管所处的作业温度过高，其材质可能会发生软化。软化后的油管强度降低，容易在作业过程中出现变形等情况。变形的油管可能无法正常工作，影响作业效果。而且，高温还可能加速油管的老化和损坏，缩短其使用寿命。

3.4 环境因素

（1）地质条件复杂多样，不同的地质状况对连续油管可靠性有着不同影响。在松软地层中，连续油管很容易发生弯曲和卡阻事故。这是因为松软地层的支撑力较弱，连续油管在下入和作业过程中容易受到周围土壤的挤压而变形，进而导致卡阻。而在坚硬地层中，连续油管则面临磨损和断裂风险。坚硬的岩石会对油管造成较大的摩擦，长时间作业下，油管表面容易磨损，甚至可能出现断裂情况。（2）井下的温度和压力较高，这对连续油管的材料性能和设备性能提出了更高要求。如果连续油管的材料和设备无法承受井下的高温高压环境，就容易在作业过程中发生故障。例如，高温可能使油管材质变软，降低其强度；高压则可能使油管变形或破裂。（3）井下存在各种腐蚀性介质，如硫化氢、二氧化碳等。这些腐蚀性介质对连续油管的耐腐蚀性能要求极高。如果连续油管的耐腐蚀性能不足，就容易在作业过程中发生腐蚀穿孔事故。一旦发生腐蚀穿孔，不仅会影响作业进度，还可能引发安全问题，如泄漏等。

4 连续油管技术在井下作业中的可靠性评估方法

4.1 故障模式和影响分析（FMEA）

故障模式和影响分析(FMEA)一种系统的可靠性分析手段。在连续油管技术的井下作业过程中,通过全面梳理各种可能出现的故障模式,深入分析每一种故障对整个系统可靠性的影响程度。比如,连续油管可能出现断裂、堵塞、腐蚀等故障模式。对于每一种故障模式,评估其发生的可能性、对作业的影响程度以及可能导致的后果。在此基础上,提出有针对性的改进措施,以提高连续油管技术在井下作业中的可靠性。

4.2 可靠性框图法

可靠性框图法是一种较为直观的可靠性分析方法。将连续油管技术在井下作业中的各个组成部分用框图表示出来,清晰地展现各个部分之间的逻辑关系。就比如,连续油管设备可分为卷盘装置、井口装置、作业设备等部分,通过框图将它们之间的连接和相互作用表示出来。根据这些逻辑关系确定系统的可靠性模型,从而评估整个系统的可靠性。这种方法能够让人们直观地了解系统的结构和运行方式,有助于快速找出可能影响可靠性的关键环节。

4.3 故障树分析法(FTA)

故障树分析法(FTA)也是一种重要的可靠性评估方法。它是一种自上而下的分析方式,从连续油管技术在井下作业中可能出现的各种故障事件开始进行分析。通过建立故障树模型,将故障事件层层分解,找出导致故障发生的根本原因^[1]。就比如,若连续油管发生泄漏故障,可以通过故障树分析找出是由于材料问题、操作不当还是设备故障等原因引起的。根据故障树的逻辑关系确定系统的可靠性,为预防和解决故障提供有力依据。

4.4 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟法是一种基于随机抽样的可靠性分析方法。考虑到连续油管技术在井下作业中存在各种不确定因素,如材料性能的波动、操作参数的变化等。通过对这些不确定因素进行随机抽样,并根据抽样结果进行模拟计算。多次重复模拟过程,以评估系统的可靠性。这种方法能够较好地处理不确定性问题,为评估连续油管技术在复杂井下环境中的可靠性提供了一种有效的手段。

5 提升连续油管技术可靠性的策略

为增强连续油管技术的可靠性,可从以下几个方面着手。首先,在技术改进方面,持续进行创新至关重要。优化设备设计,提升设备的耐久性与可靠性,比如对泵组设计进行改进,使其在高温高压环境下性能更优。研发新型材料,增强连续油管的抗腐蚀性与耐高温性,延长其使用寿命,像开发新型防腐材料。再开发智能化控制系统,提高作业自动化程度和安全性,例如利用物联网技术实现远程监控和智能控制,进而提升作业效率。其次,管理优化也是关键举措。建立完善的设备管理制度,定期检测和维护设备,通过建立设备档案记录使用和维护情况,保证设备良好运行。制定严格操作规程,规范作业流程,详细的操作指南能指导操作人员正确作业。加强现场安全管理,及时发现和处理安全隐患,提高作业安全性。建立应急预案,提升应对突发事件的能力。最后,安全保障是基础。加强井控管理,确保井内压力可控,安装井控设备维持压力稳定。严格遵守环保法规,减少作业对环境的影响,执行环保标准降低泥浆和废弃物排放。加强人员培训,提高操作人员安全意识和应急处理能力,定期开展安全培训活动。建立安全监测系统,实时监控作业参数,如温度、压力等,及时发现潜在安全隐患,确保作业安全。

结束语:连续油管技术在井下作业中的可靠性评估是一个复杂而重要的课题。通过对连续油管技术的特点、影响可靠性的因素以及可靠性评估方法的分析,我们可以更好地了解该技术在井下作业中的优势与不足。同时采取了有效的提升策略,如技术改进、管理优化和安全保障等措施,能够显著提高连续油管技术的可靠性。

参考文献

- [1]许建波.井下作业中连续油管技术的应用分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(003):001-003.
- [2]林军.连续油管技术在井下作业中的应用[J].化学工程与装备,2023(2):99-100.
- [3]李斌.连续油管技术在井下作业中的应用现状[J].福建化工,2020(5):85-90.