

连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性分析与优化

余微

辽河工程技术分公司工程技术研究所

DOI: 10.32629/jpm.v7i9.9046

[摘要] 本文旨在深入剖析连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性，并提出针对性优化策略，以提升作业效率与质量。对连续油管技术在小井眼大修作业中的应用现状、适应性及优化策略展开系统研究。研究发现，连续油管技术虽在作业效率和对储层伤害方面具有优势，但在工具尺寸、管柱强度及作业环境适应性上存在不足。基于此，提出从工具尺寸、管柱强度及作业工艺等方面的优化策略，经可行性与有效性分析，这些策略能够显著提高连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性，为现场作业提供理论支持与实践指导。

[关键词] 连续油管技术；小井眼；大修作业；适应性；优化

Adaptability Analysis and Optimization of Coiled Tubing Technology in Small-Well Overhaul Operations

YUwei

Engineering Technology Research Institute of Liaohe Engineering Technology Branch

[Abstract] This paper aims to conduct an in-depth analysis of the applicability of coiled tubing technology in small-bore well overhaul operations and propose targeted optimization strategies to enhance operational efficiency and quality. A systematic study is performed on the current application status, adaptability, and optimization strategies of coiled tubing technology in such operations. The study reveals that while coiled tubing technology offers advantages in operational efficiency and reservoir damage mitigation, it still faces limitations regarding tool size, tubing string strength, and adaptability to diverse operating environments. Accordingly, optimization strategies focusing on tool size, tubing string strength, and operational procedures are proposed. Feasibility and effectiveness analyses demonstrate that these strategies can significantly improve the adaptability of coiled tubing technology in small-bore well overhaul operations, thereby providing both theoretical support and practical guidance for field operations.

[Key words] Casing Tubing Technology; Small Wellbores; Overhaul Operations; Adaptability; Optimization

引言

小井眼大修作业作为石油开采过程中的重要环节，对提升油井生产效率、延长油井寿命具有不可替代的作用。随着全球能源需求的持续增长以及油气资源开发难度的不断增加，小井眼钻井技术因其成本较低、环境友好等优势逐渐得到广泛应用。然而，在小井眼大修作业中，由于井眼尺寸的限制以及复杂的地层条件，传统修井技术往往难以满足高效、安全的作业需求。在此背景下，连续油管技术凭借其高效性、灵活性和清洁性等显著优势，成为小井眼大修作业中的重要技术手段之一。连续油管技术自 20 世纪 60 年代问世以来，目前已广泛应用于洗井、打捞、压裂等多种作业场景。尽管如此，该技术在小井眼大修作业中的适应性仍面临诸多挑战，其实际应用过程中仍存在诸多问题亟待解决。亟需深入研究以进一步优化其应用效果。

1. 连续油管技术在小井眼大修作业中的应用现状

1.1 应用情况概述

常见应用场景包括清洗井筒、打捞落物、修复套管以及处理井内复杂故障等。在清洗井筒作业中，连续油管能够通过高压喷射流体有效清除井壁附着物，确保井筒畅通；在打捞落物作业中，连续油管凭借其连续性和柔性特点，能够快速下入井底进行精准打捞，显著缩短作业时间。此外，随着非常规油气资源的开发，小井眼井的数量不断增加，连续油管技术在这些复杂井况中的应用频率也显著提升。据统计，在部分油田的小井眼大修作业中，连续油管技术的应用占比已超过传统作业技术的 50%。

1.2 应用优势分析

连续油管技术在小井眼大修作业中展现出显著的优势，主要体现在作业效率高、对储层伤害小以及环境友好等方面。首先，连续油管技术能够实现不间断作业，避免了传统作业方法中因起下钻具而耗费的大量时间。其次，连续油管技术对储层

的伤害较小。由于该技术采用连续管柱作业，减少了井筒内液体泄漏的风险，从而有效保护了储层特性。研究表明，在相同作业条件下，连续油管技术对储层的污染程度较传统方法降低约 20%。

此外，在环保方面的优势也不容忽视。其封闭式作业系统能够显著减少作业过程中的液体排放和废弃物产生，符合现代石油工业绿色发展要求。采用连续油管技术进行小井眼大修作业后，作业现场的废弃物排放量减少了约 25%，有效改善作业环境。同时，连续油管技术的灵活性使其能够适应多种复杂井况，特别是在小井眼大修作业中，其通过性和操作性表现尤为突出。

1.3 应用劣势分析

尽管连续油管技术在小井眼大修作业中具有诸多优势，但其应用过程中仍面临一些显著劣势，主要包括工具尺寸受限、管柱易疲劳以及作业成本较高等问题。首先，小井眼的特殊井身结构对连续油管工具的尺寸提出了严格要求，而现有工具往往难以完全满足这些需求。此外，由于小井眼内空间狭小，工具在作业过程中易发生磨损，进一步影响了其使用寿命和作业效果。

其次，连续油管在长时间作业中容易出现管柱疲劳问题，尤其是在复杂工况下，如高温、高压或腐蚀性环境中，管柱的疲劳损伤更为严重。研究表明，管柱疲劳失效的概率较常规井眼高出约 15%。这一问题不仅增加了作业风险，还可能导致作业中断，进而影响整体作业效率。最后，连续油管技术的初期投入成本较高，包括设备购置费用和技术研发成本，这在一定程度上限制了其在部分油田的推广应用。因此，如何克服这些劣势成为连续油管技术在小井眼大修作业中进一步发展的关键所在。

2. 连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性分析

2.1 工具尺寸适应性

小井眼大修作业对连续油管工具尺寸提出严格的限制，主要由于井眼直径减小导致工具通过性成为关键问题。现有连续油管工具的尺寸设计常基于标准井眼规格，而在小井眼环境中，这些工具往往难以满足作业需求。此外，工具尺寸不适配还会影响作业效率，研究表明，当前连续油管工具尺寸优化仍面临诸多挑战，特别在复杂结构井中，工具需通过多个变径段，这对工具的尺寸灵活性和强度提出了更高要求。因此，深入研究现有工具尺寸与小井眼尺寸的匹配程度，对于提升连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性具有重要意义。

为解决工具尺寸不适配的问题，提出一系列改进措施，包括采用新型材料和改进结构设计以减小工具外径。然而，这些措施在实际应用中仍需进一步验证其可行性和可靠性。例如，某些新型材料的耐磨性和抗腐蚀性尚未经过长期现场试验的检验，而结构设计的改进可能导致工具的其他性能参数发生变化，如强度或密封性。因此，在未来的研究中，应综合考虑工具尺寸优化与整体性能之间的平衡，以确保其在小井眼大修作业中的高效应用。

2.2 管柱强度适应性

连续油管在小井眼复杂工况下的受力情况较为复杂，其主要受到轴向拉力、扭转应力以等多重载荷的作用。这种复杂受力环境对管柱强度提出更高的要求，而管柱强度不足可能导致一系列安全隐患，如管柱断裂、泄漏等问题。特别是在小井眼大修作业中，由于井眼曲率较大且存在多个变径段，管柱在通过这些区域时容易受到额外的弯曲应力，从而加剧了管柱的疲劳损伤。

为提升连续油管管柱强度，提出多种优化措施，包括改进管柱材质和优化连接方式。例如，采用高强度合金钢或复合材料可以有效提高管柱的抗拉强度和抗疲劳性能，但同时也会增加制造成本。此外，优化管柱连接方式，如采用新型螺纹接头或焊接工艺，可增强管柱的密封性和整体强度。然而，这些措施在实际应用中仍需考虑其与现有作业设备的兼容性以及施工便利性。因此，未来研究应重点关注如何在保证管柱强度的同时，兼顾其经济性和可操作性，以进一步提升连续油管技术在小井眼大修作业中的可靠性。

2.3 作业环境适应性

小井眼内的高温、高压、腐蚀等恶劣环境对连续油管的性能提出严峻挑战。首先，高温环境会导致力学性能下降，例如屈服强度和抗拉强度的降低，从而增加管柱失效的风险。其次，高压环境会对管柱的密封性和抗内压能力提出更高要求，特别是在进行高压作业（如压裂或清洗）时，管柱内部的压力波动可能引发泄漏或爆裂等安全隐患。此外，小井眼中的腐蚀介质会对连续油管表面造成严重的腐蚀损伤，从而缩短其使用寿命并影响作业安全性。

为提升连续油管在不同作业环境下的适应性，开展了多项针对性研究。如，通过改进材料配方或添加耐腐蚀涂层，可有效提高连续油管的抗腐蚀性能；同时，优化管柱结构设计以增强其密封性和抗内压能力，也是应对高压环境的重要手段。然而，这些措施在实际应用中仍需综合考虑其成本效益和技术可行性。因此，未来研究应致力于开发兼具高性能和经济性的连续油管材料与技术，以全面提升其在小井眼大修作业中的环境适应性。

3. 连续油管技术在小井眼大修作业中的优化策略

3.1 工具尺寸优化

首先，采用新型材料是解决工具尺寸限制的有效途径之一。例如，使用高强度、低密度的复合材料可以显著减轻工具重量，同时保持其结构强度，从而在不增加井眼负担的前提下提升工具的通过性。此外，通过改进结构设计，如设计可伸缩式或模块化工具，能够更好地适应不同井眼尺寸的需求。这种设计不仅可以在运输和存储时减小工具体积，还能够在作业过程中根据井眼实际情况灵活调整工具尺寸，从而避免因工具与井眼不匹配而导致的卡钻等问题。

其次，针对小井眼内复杂工况，应进一步优化喷嘴和喷射工具的尺寸设计。研究表明，在管柱安全和管内空间允许条件下，选择大尺寸连续管并结合多孔喷嘴设计，可有效降低管内

摩阻并提高流体返出速度，增强清洗效果。因此，开发适用于小井眼的新型喷射工具，并通过模拟实验验证其性能，将成为工具尺寸优化的重要方向。最后，结合先进的制造工艺，如3D打印技术，可以实现工具的定制化生产，进一步满足小井眼作业对工具尺寸的精确要求。

3.2 管柱强度优化

首先，优化管柱材质是提升强度的关键手段之一。目前，国内外已开始尝试使用高强度合金钢、钛合金等高性能材料制造连续油管，这些材料具有较高的抗拉强度和抗疲劳性能，能够在恶劣环境下保持稳定的力学性能。同时，通过添加耐腐蚀涂层或采用双金属复合管技术，可以进一步增强管柱的耐腐蚀性和抗磨损性能，从而延长其使用寿命。

其次，改进连接方式也是提高管柱强度的重要措施。传统的焊接或螺纹连接方式在长期作业中容易出现疲劳裂纹，导致管柱失效。为此，可引入新型的无缝连接技术，如液压胀接或激光焊接，以增强连接部位的密封性和承载能力。此外，通过在管柱内部嵌入增强纤维或采用多层结构设计，也可以有效分散作业过程中的应力集中，从而降低管柱断裂的风险。

最后，结合实际作业需求，应建立科学的管柱强度评估体系。通过对管柱在不同工况下的受力情况进行有限元分析，可以准确预测其承载能力，并据此优化管柱的设计参数。例如，针对高温高压井段，可通过增加管壁厚度或优化材质配比来提高管柱的抗压能力，从而保障作业安全。

3.3 作业工艺优化

为提升连续油管技术在小井眼大修作业中的效率与质量，必须对其工艺流程进行系统优化。首先，合理控制作业参数是优化工艺的核心内容之一。在实际作业中，泵车参数、射流速度和喷嘴直径的匹配关系直接影响清洗效果和作业效率。研究表明，通过模拟连续管、喷嘴组合及泵车水力参数的匹配关系，可以确定最佳作业参数范围，从而在保证清洗效果的同时降低能耗。例如，对于井深不超过3000米的井段，选择 $\phi 73\text{mm}$ 连续管并结合适当尺寸的喷嘴，可以显著提高流体返出速度和清洗效率。

其次，优化作业顺序也是提升工艺水平的重要手段。在复杂井况下，应根据具体作业需求合理安排施工步骤，以最大限度地减少作业时间和风险。例如，在修套作业中，可先通过测井获取套变井径参数，然后采用一系列外径间隔3-5mm的高效复合铣锥依次对套变井段进行磨铣，最后利用强磁工具清除井内金属碎屑，从而确保作业质量和安全性。此外，通过引入智能化监控系统，可实时监测作业参数并自动调整工艺流程，进一步提高作业的精准性和效率。

最后，结合实际案例，应不断总结经验并完善作业规范。基于成功经验，可制定标准化的作业流程，并将其推广至其他类似油田，从而全面提升连续油管技术在小井眼大修作业中的应用水平。

4. 优化策略的可行性分析

优化策略可行性需从技术、经济、安全等多个维度进行综

合评估。从技术层面来看，所提出工具尺寸优化方法，如采用新型高强度合金材料和改进结构设计，已在相关领域中展现出一定的应用潜力。此外，基于SOA架构的数据服务接口技术为连续油管作业的智能化管理提供了技术支持，从而有助于实现更精准的作业参数控制。这些技术的成熟度为优化策略的实施奠定了坚实基础。

从经济角度分析，优化策略实施需要综合考虑成本投入与效益产出。尽管采用新型材料和先进技术可能增加初期投资，但其带来长期收益不容忽视。如，在长水平段井的连续管作业中，减少因工具尺寸不匹配或管柱强度不足而导致的作业失败次数，将显著降低维修成本和停工损失。同时，优化后的作业工艺能够提高施工效率，进一步缩短作业周期，从而提升整体经济效益。

在安全性方面，优化策略的核心目标之一是降低作业风险，保障人员与设备的安全。通过对管柱材质和连接方式的改进，可有效增强连续油管在高压、高温及腐蚀性环境中的抗疲劳性能，避免因管柱失效引发的安全事故。此外，结合视频联动控制技术，可实现对作业过程的实时监控与快速响应，从而缩短应对突发事件的应急响应时间，提高作业安全性。综上所述，优化策略在技术、经济和安全方面均具备较高的可行性，其实施所需的条件与资源亦可通过现有技术手段和合理资源配置得以满足。

5. 结论

(1) 连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性分析表明，该技术在实际应用中具有显著的优势，但也面临诸多挑战。本文提出了多项优化策略，包括采用新型材料与改进结构设计以优化工具尺寸、优化管柱材质与连接方式以提升管柱强度等。这些策略为在小井眼大修作业中的进一步推广奠定了基础。

(2) 连续油管技术的优化不仅需要从硬件层面进行改进，还需结合智能化技术实现多功能集成，这些成果为连续油管技术在小井眼大修作业中的适应性提升提供了有力支持。

(3) 连续油管技术在小井眼大修作业中的发展方向应聚焦于智能化与多功能集成。此外，还需在长水平段井与复杂结构井中的应用进行深入研究，以满足未来油气田开发的需求。总之，通过持续技术创新与工艺优化，连续油管技术有望在小井眼大修作业中发挥更加重要的作用。

【参考文献】

- [1]马宇泽.萨北油田连续油管技术应用实践及发展[J].化工管理,2021,(5):189-190.
- [2]董方平;蒲寅;吴永兴;乔志才;朱培珂;阚凯.特色连续管作业技术的应用与发展思考[J].石化技术,2022,29(10):90-92.
- [3]焦文夫;张宏强;艾白布·阿不力米提;赵签;刘洪雷.连续油管技术在井下作业中的应用现状及优化策略[J].工程技术研究,2020,5(1):91-92.
- [4]杜承强;王方祥;徐飞;高飞;廖经南;王晓磊.连续油管拖动压裂在小井眼中的应用[J].石油管材与仪器,2021,7(4):69-71.