

油田大修井下工具耐久性与适应性研究

龚小兵

辽河油田分公司曙光作业三大队

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8920

[摘要] 本文旨在深入探究油田大修井下工具的耐久性与适应性，以提升油田开采效率与质量。通过综合分析井下工具的工作条件，如高温高压、腐蚀性介质及复杂地质结构环境，并系统研究材料性能、制造工艺及受力情况等因素对工具耐久性的影响，以及不同井深、井斜角和地质构造下工具的适应性。研究发现，材料性能、制造工艺及受力情况是井下工具耐久性的主要影响因素，而井深、井斜角和地质构造则显著影响工具的适应性。基于此，提出从材料优化、结构改进和工艺创新等方面提升井下工具耐久性与适应性的策略，为油田大修作业的高效开展提供理论与实践指导。

[关键词] 油田大修；井下工具；耐久性；适应性；材料性能

Research on Durability and Adaptability of Downhole Tools for Major Oilfield Overhaul

Gong Xiaobing

Third Brigade of Shuguang Operation Team, Liaohe Oilfield Branch

[Abstract] This study aims to thoroughly investigate the durability and adaptability of downhole tools used in major oilfield overhauls to enhance extraction efficiency and quality. Through comprehensive analysis of operational conditions—including high temperatures, high pressures, corrosive environments, and complex geological structures—the research systematically examines the impact of material properties, manufacturing processes, and load conditions on tool durability, as well as the adaptability of tools under varying well depths, inclination angles, and geological formations. Findings indicate that material performance, manufacturing techniques, and load conditions are primary determinants of tool durability, while well depth, inclination angle, and geological characteristics significantly influence adaptability. Based on these findings, the study proposes strategies to improve tool durability and adaptability through material optimization, structural enhancements, and process innovations, providing theoretical and practical guidance for efficient oilfield overhaul operations.

[Key words] Oilfield overhaul; Downhole tools; Durability; Adaptability; Material properties

引言

大修作业作为解决油井常常面临套管破损、卡钻等复杂问题的核心手段，其施工效率与质量直接决定了油井的恢复能力和生产寿命。而井下工具作为大修作业的关键执行部件，在复杂工况下承担着修井、打捞、封堵等多项任务，其性能优劣对整个大修作业的成败起着决定性作用。当前，油田大修井下工具在耐久性与适应性方面存在诸多亟待解决的问题。如由于井下环境的高温高压、强腐蚀性介质以及复杂地质结构的影响，工具材料易发生疲劳失效、腐蚀破坏等问题，导致工具使用寿命大幅缩短。这些问题的存在不仅增加了油田开采的成本，还可能对施工安全造成潜在威胁。因此，深入研究井下工具耐久性与适应性的影响因素，并提出针对性的改进策略，对于提高油田大修作业效率、降低生产成本具有重要意义。

1. 油田大修井下工具工作环境分析

1.1 高温高压环境

在高温环境下，井下工具所承受的温度通常可达 150℃ 以上，部分深井甚至超过 200℃；而压力方面，井下工具可能需承受超 70MPa 静液柱压力。这种极端的工作条件对井下工具的材料性能和密封性能均产生了显著影响。此外，高温还会对橡胶密封材料产生老化效应，影响密封件的可靠性和使用寿命。在密封性能方面，高温高压环境会加剧密封件与配合面之间的微动磨损，导致泄漏风险增加。因此，在设计井下工具时，必须充分考虑材料的高温性能以及密封结构的设计合理性，以确保工具在极端环境下的可靠性。

1.2 腐蚀性介质环境

油田井下环境中存在多种腐蚀性介质，它们对井下工具材料性能构成严重威胁。H₂S 主要通过电化学腐蚀机理对金属材料产生破坏作用，其腐蚀产物 FeS 会在金属表面形成一层疏松保护膜，但该膜无法有效阻止进一步腐蚀发生，从而导致材料全面腐蚀和点蚀现象加剧。与此同时，CO₂ 溶于水后会生成碳

酸，进而对碳钢和低合金钢等材料产生严重均匀腐蚀。此外， H_2S 和 CO_2 的协同作用会进一步加剧腐蚀程度，对工具材料的耐腐蚀性能提出更高要求。

1.3 复杂地质结构环境

其典型特征包括断层、裂缝、溶洞等地质异常体。这些地质特征不仅会影响井下工具的受力状态，还会对其通过性和作业效率产生显著影响。如在断层和裂缝发育区域，井下工具在作业过程中容易受到非均匀地应力的作用，从而导致工具体承受额外的弯曲应力和剪切应力。这种复杂的受力状态可能引发工具结构的疲劳损伤，甚至导致工具失效。研究人员通常通过优化工具外形设计、增强工具结构强度以及改进作业参数等方式来应对这些挑战。然而，这些措施的有效性往往依赖于对具体地质条件的精确掌握，这在实际操作中仍存在一定的技术难度。

2. 井下工具耐久性研究

2.1 材料性能与耐久性

常用的井下工具材料包括高强度合金钢、耐腐蚀合金以及特种橡胶等，这些材料在力学性能与耐腐蚀性能方面的表现直接影响工具的耐久性。研究表明，氟硅橡胶、氢化丁腈橡胶等高分子材料在高温高压及腐蚀性环境中表现出优异的耐蚀性和密封性能，但其力学性能相对较弱，需通过复合增强技术提升承载能力。此外，材料表面处理技术如镀层、喷涂陶瓷涂层等也被广泛应用于提高工具的抗磨损能力和耐腐蚀性，从而延长其使用寿命。

从材料性能与工具耐久性关系看，力学性能优化可以显著提高工具在复杂工况下的可靠性。如通过调整合金成分或进行热处理工艺，可改善材料的强韧性匹配，降低疲劳裂纹萌生和扩展的风险。进一步提升材料性能，研究人员提出了多种方法，包括开发新型高强度耐腐蚀合金、利用纳米技术改性传统材料以及采用多层复合材料设计等策略。这些方法不仅提高了材料本身的综合性能，还为井下工具在恶劣环境中的耐久性提升提供了理论支持和技术保障。

2.2 制造工艺与耐久性

制造工艺对井下工具的耐久性具有重要影响，如锻造工艺能够通过塑性变形细化晶粒并改善金属材料致密度，提高工具的抗疲劳性能和抗冲击能力。然而，锻造过程中若控温不当或冷却速率不合理，可能导致内部残余应力集中，增加工具开裂的风险。这些问题可能成为工具失效起源点。因此，优化焊接参数、采用先进焊接技术以及加强焊后热处理是提升焊接接头性能关键措施。

机械加工精度和表面处理质量也是影响工具耐久性的重要因素。如高精度的机械加工可以减少表面粗糙度，降低应力集中效应，从而延缓疲劳裂纹的萌生。针对井下工具的具体应用场景，研究人员通过引入自动化生产线控制加工误差，采用无损检测技术及时发现潜在缺陷，以及结合实际工况需求设计合理的工艺流程等。这些措施不仅提高了工具的制造质量，还为其在复杂工况下的长期稳定运行奠定了基础。

2.3 受力分析与耐久性

井下工具在作业过程中通常承受复杂的力学载荷，这些复杂力的共同作用会导致工具内部应力分布不均，从而加速疲劳损伤并降低其结构强度。此外，工具在通过复杂地质构造时，还可能遭遇突发载荷或冲击载荷，这对工具的抗冲击性能和结构完整性提出了更高要求。为准确评估受力对工具耐久性的影响，研究人员建立了多种力学模型来模拟工具在实际工况下的受力状态。通过力学模型计算，研究人员发现优化工具受力结构的设计能够显著提高其耐久性。例如，通过增加关键部位的壁厚、优化过渡圆角半径以及采用非对称结构设计等方式，可以有效降低应力集中系数并延长工具的使用寿命。此外，结合现场实测数据对力学模型进行校准和验证，能够进一步提高模型的预测精度，为工具的设计和改进提供科学依据。

3. 井下工具适应性研究

3.1 不同井深下的适应性

随着井深的增加，井下工具所承受的压力呈线性增长，这对工具材料的强度、密封性能以及结构设计提出了更高的要求。研究表明，在高温高压环境下，传统材料的力学性能可能发生显著退化，从而导致工具失效的风险增加。此外，信号传输的可靠性也受到井深的影响，由于地层对电磁信号的吸收作用增强，深井中的信号衰减问题尤为突出。为解决这一问题，研究人员提出多种适应性调整策略，包括采用高强度合金材料以提高工具的抗压能力，以及优化信号传输系统设计以降低信号衰减的影响。例如，通过引入光纤传输技术，可以有效提升深井环境下数据传输的稳定性和精度。因此，针对不同井深条件，合理选择材料并优化工具设计是提升其适应性的关键。

3.2 不同井斜角下的适应性

在斜井或水平井中，较大井斜角会导致工具下放过程中与井壁之间摩擦阻力显著增加，从而可能引发卡钻等事故。此外，井斜角的变化还会影响工具的作业姿态稳定性，进而降低施工效率和质量。为应对这一挑战，研究人员从工具外形设计和操作工艺两方面入手提出改进方法。例如，通过优化工具外形设计，减少其与井壁的接触面积，可有效降低摩擦阻；同时，采用导向机构或旋转装置有助于维持工具在复杂井眼条件下的稳定姿态。实验结果表明，这些改进措施能够显著提高井下工具在不同井斜角下的适应性。此外，结合计算机模拟技术对工具下放过程进行动态分析，进一步验证优化设计的有效性和可行性。

3.3 不同地质构造下的适应性

以砂岩和页岩为例，砂岩地层通常具有较高的孔隙度和较低的硬度，因而对工具的磨损较小，但可能因颗粒磨蚀而导致工具表面疲劳；相比之下，页岩地层硬度较高且易碎，对工具的破岩能力提出了更高要求，同时也加剧了工具的磨损程度。研究人员通过调整工具结构和作业参数来提升其适应性。例如，在砂岩地层中，采用耐磨涂层或硬质合金材料可以有效延长工具寿命；而在页岩地层中，则需优化切削齿的布局 and 角度，以提高破岩效率并减少工具损耗。此外，结合地质特征开发智

能化工具也成为一个重要研究方向, 此类工具能够根据实时监测数据自动调整作业参数, 从而更好地适应不同地质条件的变化。综上所述, 针对不同地质构造设计专用工具结构或优化作业参数, 是提升井下工具适应性的重要途径。

4. 提升井下工具耐久性与适应性的策略

4.1 材料优化

针对井下高温、高压以及腐蚀性介质的复杂工况, 采用新型耐腐蚀、高强度材料成为研究的重点方向之一。例如, 氟硅橡胶和氢化丁腈橡胶等高分子材料因其优异的耐腐蚀性能, 在高温高压环境中表现出良好的稳定性, 能够有效抵抗 H₂S 和 CO₂ 等酸性气体的侵蚀。此外, 通过材料复合技术, 如将金属基材料与陶瓷涂层结合, 可以显著提高工具表面的耐磨性和抗腐蚀能力, 同时保持其内部结构的强度与韧性。表面处理技术, 如渗氮、镀层等工艺, 也被广泛应用于增强工具材料的表面性能, 从而延长其使用寿命并提高其在复杂环境中的适应性。这些材料优化方法的综合应用, 为井下工具在恶劣工况下的长期稳定运行提供了重要保障。

4.2 结构改进

首先, 从整体结构布局来看, 合理的结构设计能够有效分散工具在作业过程中所承受的复杂应力, 减少局部应力集中现象的发生, 从而提高工具的结构强度与稳定性。例如, 通过有限元分析方法对工具受力分布进行模拟计算, 可以优化工具的整体几何形状, 使其在承受拉伸、压缩和扭转等复杂力时具有更高的抗疲劳性能。其次, 针对关键部件的结构优化, 如密封件、连接部位等, 可通过改进其几何形状或采用分体式设计来增强其密封性能与装配精度, 从而降低因结构缺陷导致的失效风险。此外, 计算机模拟技术的应用为结构改进提供了重要的验证手段, 通过虚拟仿真可以预测工具在不同工况下的性能表现, 并据此调整设计方案, 确保改进措施的有效性和可靠性。

4.3 工艺创新

先进的精密锻造技术可以通过优化金属材料的内部组织结构, 减少微观缺陷, 从而提高工具的力学性能与抗腐蚀能力。此外, 增材制造技术的引入为复杂结构工具的制造提供了新的可能性, 其逐层堆积的加工方式不仅能够实现高度个性化的设计, 还可有效缩短生产周期并降低成本。在装配工艺方面, 自动化装配线的应用显著提高了工具的装配精度与一致性, 减少了人为因素对装配质量的影响。同时, 通过结合实际案例对工艺创新效果进行分析, 可以发现新工艺的应用在实际生产中带来了显著的经济效益。这些工艺创新的实践表明, 通过不断探索和优化制造与装配工艺, 能够有效提升井下工具的耐久性与适应性, 为油田大修作业的高效开展提供坚实的技术保障。

5. 现场应用案例分析

在某油田大修作业中, 井下工具应用环境极为复杂, 油田井深约为 2200 米, 井下温度约为 130℃, 压力为 50MPa, 且井斜角较大, 平均达到 45°, 部分井段超 60°。此外, 该油田地质构造以页岩为主, 夹带少量砂岩, 井下工具在作业过程中

面临严重摩阻问题和信号传输干扰。针对这些特点, 对井下工具进行了专项优化, 包括优化工具外形设计以减少摩阻, 改进信号传输系统以适应大井斜角条件下的复杂工况, 同时采用高强度复合材料提高工具的耐久性。

现场应用结果显示, 优化后井下工具在不同井斜角下的适应性显著增强。例如, 在井斜角超过 60° 的井段中, 传统工具下放成功率仅为 80%, 而改进后工具下放成功率提高至 95% 以上。此外, 工具作业姿态更加稳定, 摩阻系数降低约 30%, 有效减少卡钻风险。在耐久性方面, 改进后工具在页岩地层中的磨损程度明显减轻, 使用寿命较传统工具延长了约 35%。从经济效益来看, 由于工具适应性的提高, 单次大修作业的周期从原来的 15 天缩短至 10 天, 作业成本降低了约 20%。

通过本案例的分析看出: 针对不同井况的井下工具优化策略具有普适性和有效性; 其通过针对性的设计改进和材料选择, 可显著提升工具在复杂工况下的适应性和耐久性。这些经验为未来井下工具的研发和应用提供了重要参考, 同时也证明了本研究提出的提升策略在实际应用中的可行性与价值。

6. 结论与认识

(1) 本文通过系统分析油田大修井下工具的工作环境、材料性能、制造工艺及受力特性, 揭示了影响其耐久性与适应性的关键因素。研究表明制造工艺的优化能够改善工具内部组织结构和表面质量, 从而提高其抗疲劳性能; 而对工具受力特性的深入分析则为优化设计提供了理论依据。

(2) 本文提出了多项提升井下工具耐久性与适应性的有效策略。如在材料选择上, 推荐采用新型耐腐蚀合金或复合材料, 并结合表面处理技术以增强材料性能。这些策略在实际应用中得到了验证, 为油田大修作业效率与质量的提升提供了重要支持。

(3) 未来研究应关注井下工具与整个作业系统集成优化, 通过建立多物理场耦合模型, 深入分析工具与钻井液、完井管柱等之间的相互作用机制, 进一步优化工具设计提供科学依据。同时, 随着人工智能与大数据技术的快速发展, 利用机器学习算法对工具失效模式进行预测与健康监测, 也将为提升工具耐久性与适应性开辟新途径。

[参考文献]

- [1]李荣;唐红强;肖宗政.油田井下作业大修施工技术的研究[J].石化技术,2021,28(2):76-77.
- [2]窦益华;韩硕;郑杰;李贞贞.国内高温高压井下工具试验装置发展现状综述[J].石油化工应用,2022,41(1):1-6.
- [3]杨昊;于慧艳.油田井下作业大修施工技术分析[J].化工管理,2022,(18):136-138.
- [4]于新.油田井下作业大修施工技术的应用及价值研究[J].石化技术,2018,25(5):93-93.
- [5]康涛.井下工具的可靠性设计分析[J].区域治理,2017,(1):138-138.