

连续油管在油气井封堵作业中的应用与技术创新

刘骏

辽河油田辽河工程技术分公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7310

[摘要] 文章通过分析连续油管在油气井封堵作业中的应用与常见应用问题，提出了提高连续油管的强度与耐久性、改进连续油管的抗变形与抗破裂设计、优化泥浆循环系统提高作业效率等一系列技术创新建议。

[关键词] 连续油管；油气井封堵作业；技术应用；技术创新

Application and technical innovation of continuous tubing in oil and gas well plugging operation

Liu Jun

Liaohu Oilfield, Liaohu Engineering and Technology Branch Company

[Abstract] By analyzing the application and common application problems of coiled pipe in oil and gas well plugging operation, this paper puts forward a series of technical innovation suggestions, such as improving the strength and durability of coiled pipe, improving the deformation resistance and rupture resistance design of coiled pipe, optimizing the mud circulation system and improving the operation efficiency.

[Key words] continuous tubing; oil and gas well plugging operation; technology application; technology innovation

引言

随着全球能源需求的持续增长，石油和天然气资源的开发成为推动经济发展的重要动力。然而，经过长期的资源开采，油气井的生产能力逐渐下降，且部分油气井可能因各种原因需要封堵，这不仅是为了维持油田的整体开发效率，更是为了防止油气资源的泄漏和环境污染。在这一背景下，传统的油气井封堵作业方法因其效率较低、成本较高，逐渐难以满足现代油田开发的需求^[1]。连续油管技术作为一种新型的井下作业技术，凭借其能够在不中断作业的情况下完成各种复杂井下操作的独特优势，逐步在油气井封堵作业中得到了广泛应用。与传统的钻杆作业相比，连续油管不仅能够显著提高作业效率，减少因作业中断而带来的时间浪费，还能够降低作业成本，减少因频繁接驳管柱而导致的井下事故风险^[2]。但随着油气田开发环境的日益复杂，特别是在高压、高温及深井等极端条件下，油气井封堵作业的应用也同样面临着诸多技术挑战，为了应对这些挑战，连续油管技术需要在材料、工艺、设备以及操作流程上不断进行创新与优化，从而进一步提升其在油气井封堵作业中的应用效果。

1 连续油管在油气井封堵作业中的应用

连续油管由于其可以在井筒中连续作业而不需要接驳，极大地提高了作业的连续性和效率，因而在油气井封堵作业中得到了广泛应用。其主要应用场景包括但不限于：井漏治理、井

筒修复、气窜封堵以及注水封堵等作业。

在井漏治理方面，连续油管的柔性和适应性使其能够在不稳定的井壁环境中进行精准操作，特别是在处理井壁渗漏和封堵裂缝时，通过连续注入封堵剂，可以快速形成封堵层，防止井漏进一步恶化^[3]。相比于传统的管柱作业，连续油管能够减少因接驳操作导致的停工时间，从而大幅提升治理效率。

在井筒修复作业中，连续油管技术也具有一定的应用价值。由于连续油管可以连续插入和拔出，减少了作业中断，特别适合用于修复老化或损坏的井筒。在修复过程中，连续油管能够携带修复工具和材料深入井下，通过连续作业，快速完成井筒的修复和加固，极大地减少了停井时间和井筒二次损坏的风险。

气窜封堵要求作业工具能够在复杂的压力环境中进行高效操作，而连续油管由于其较小的直径和高度灵活的操作性，可以在不扩大井筒直径的前提下进入气窜通道，通过连续注入封堵材料，迅速形成有效的封堵屏障，防止气体进一步逸出。相比于传统封堵方法，连续油管能够更加精确地控制封堵过程，确保封堵质量的同时，降低对井筒的二次损伤。

此外，在注水封堵作业中，通常需要在高压条件下进行，而连续油管能够在高压环境中维持稳定的作业状态，且其小直径特性减少了对井筒的压力影响，从而降低井壁破裂的风险。同时，连续油管的连续作业能力使其能够在短时间内完成大规

模注水封堵作业，有效提高封堵效率和作业安全性。

2 常见应用问题

尽管连续油管技术在油气井封堵作业中展现了诸多优势，但在实际应用过程中仍然存在一些不可忽视的问题，这些问题不仅影响作业的效率 and 效果，还可能对作业的安全性构成一定的风险挑战。

2.1 连续油管的强度与耐久性问题

连续油管在高压高温井况下的强度与耐久性问题尤为突出，尤其是在深井作业中，由于井下环境的复杂性和极端性，连续油管易发生疲劳损伤。疲劳损伤的发生主要源于连续油管在长期高压作业下承受的循环应力，这种应力的累积效应可能导致材料微观结构的退化，从而降低油管的强度和韧性，进而影响作业的安全性与可靠性。此外，在深井作业中，连续油管需要承受巨大的外部压力和高温环境，这也会进一步加剧疲劳损伤的风险。如果不及时采取有效的预防措施，可能会导致油管断裂或失效，进而引发严重的安全事故。

2.2 连续油管的变形与破裂风险

由于连续油管的壁厚相对较薄，当其在高压井下作业时，管体容易发生径向变形，这种变形不仅可能影响油管的正常操作，还会增加其破裂的可能性。尤其是在井眼轨迹复杂的情况下，连续油管更易发生扭曲和屈曲现象，这会对作业的顺利进行构成极大的挑战。井眼轨迹的复杂性，包括井斜角度大、井底变径频繁等因素，都会导致连续油管在作业过程中受到非线性应力的作用，从而增加其屈曲和断裂的风险。

2.3 泥浆循环系统的效率问题

泥浆循环系统的主要功能是将井下的泥浆携带到地面，同时清除井筒中的杂质，保证井筒的清洁度。然而，由于连续油管的直径较小，泥浆在井筒中的循环效率常常不尽如人意，容易导致泥浆流速减慢，泥浆携带能力下降，从而导致井筒清洁度不足。如果井筒中残留的杂质不能有效清除，封堵材料的注入效果将大打折扣，进而影响封堵的整体效果。

3 连续油管在油气井封堵作业中的技术创新

为了应对连续油管在油气井封堵作业中所面临的各类问题，技术创新成为提升该技术在复杂工况下应用效果的关键手段。

3.1 提高连续油管的强度与耐久性

针对连续油管在高压高温井况下的强度与耐久性问题，可以引入具有高强度和耐高温特性的先进合金材料，如镍基合金 (Inconel 718) 或钛合金 (Ti-6Al-4V) 等。这些材料因其优异的物理和化学特性，能够显著提升连续油管的抗疲劳性能和耐久性。其中，镍基合金和钛合金具有极高的高温蠕变强度，能在温度高达 600°C 的井况下保持机械性能的稳定性。此外，通过优化热处理工艺，如溶体淬火和时效处理，可以进一步细化合金的晶粒结构，从而增强其屈服强度和断裂韧性。对于镍

基合金，使用元素如铝和钛进行沉淀硬化能够形成强化相 (γ' 相)，极大地提高其抗疲劳寿命。钛合金则可以通过添加钒元素来改善其韧性和耐蚀性，使其更适合酸性环境下的作业需求。

此外，为了应对复杂井况下的腐蚀和磨损问题，可以采用激光熔覆或等离子喷涂等表面强化技术，在连续油管表面形成一层厚度为 200-500 微米的高硬度涂层，如碳化钨或氧化铝涂层。这些涂层材料具有极高的硬度 (HV>1000) 和优异的耐磨损性能，能够显著减少由于摩擦导致的表面磨损，同时还可以通过增加涂层的致密性和粘附性来提升其抗腐蚀性能。对于连续油管在含硫化氢 (H₂S) 的环境中作业，涂层还可以有效阻止应力腐蚀裂纹 (SCC) 的扩展，显著延长油管的使用寿命。

3.2 改进连续油管的抗变形与抗破裂设计

为了有效解决连续油管在高压作业中可能出现的变形与破裂风险，首先可以考虑采用多层复合结构设计，在油管内部采用高强度钢材，并在其外层包覆具有良好柔韧性的复合材料，使油管既能承受高强度的内外压应力，又能具备一定的弹性，从而在复杂井下应力环境中减少形变的风险。这种多层结构可以通过热压成型技术将不同材料层压成型，确保各层材料在高温高压条件下能够保持良好的黏结强度和整体性。在油管的设计中，壁厚的优化分布也是关键之一。通过有限元分析 (FEA) 模拟井下不同位置的应力分布情况，可以更为精确的调整油管壁厚，使其在井斜段和变径段等关键部位具备更高的抗屈曲和抗扭曲能力。例如，可以在这些易受力集中区域采用局部加厚设计，增强油管的抗弯和抗剪切能力。同时，考虑到油管在作业中的动态负荷变化，优化壁厚设计还应加强油管的抗疲劳性能，以应对长期使用中的累积应力效应。此外，为了进一步提升油管的抗破裂性能，可以采用渐进变径设计。这种设计需要对油管不同段落进行不同直径和壁厚的划分，从而实现应力的梯度分散。例如，在油管从水平段向垂直段过渡时，可以逐步减小油管直径，增加壁厚，使应力分布更为均匀，减少应力集中区域可能引发的微裂纹扩展。在制造工艺方面，可以结合先进的热处理工艺，如多级淬火与回火工艺，进一步提升油管材料的韧性与强度。此外，还可以通过精密成型技术确保油管在制造过程中的尺寸精度，减少制造缺陷，增强油管在高压作业环境中的整体稳定性。

3.3 优化泥浆循环系统提高作业效率

针对泥浆循环系统效率低下的问题，其问题焦点在于如何改进泥浆循环设备和优化泥浆配方。传统泥浆泵在高排量和高压作业中易产生磨损，从而降低泵的寿命和工作效率。为此，可以采用陶瓷或其他高耐磨材料制作泵的关键部件，提升泥浆泵在复杂工况下的耐久性。通过优化泵的叶轮设计，减少泥浆在泵内的湍流损失，可以提高泥浆泵的效率。在泥浆动力学模型的改进上，考虑到井筒内泥浆流动的非线性特点，可以引入

CFD (计算流体动力学) 仿真技术, 模拟泥浆在不同井深、压力和温度条件下的流动情况。这种技术可以帮助工程师优化泥浆的流速和流动路径, 从而提升泥浆的携带能力, 确保井筒中的切屑和杂质能够被高效清除。通过优化泥浆动力学模型, 泥浆循环系统的清洁效率可以提高 20% 左右, 有效减少井筒堵塞的风险。在泥浆配方的优化方面, 可以引入纳米颗粒来提升泥浆的粘度和悬浮能力。研究发现, 直径为 20-50 纳米的二氧化硅颗粒能够显著增强泥浆的抗剪切能力, 使得泥浆在高速流动中依然能够保持对杂质的悬浮效果。同时, 高分子聚合物的使用可以进一步提高泥浆的密度和稳定性, 减少泥浆分层现象, 保证井筒的清洁度。此外, 泥浆配方中还可以加入微量的表面活性剂, 降低泥浆的表面张力, 改善泥浆在井筒内的润滑效果, 减少设备磨损。在系统控制方面, 则可以引入智能控制系统, 为泥浆循环过程实现实时优化支持。比如, 可以在井口和泥浆泵之间布设多点传感器, 实时监测泥浆的流速、压力和温度等数据, 系统可以基于传感器数据, 利用算法对泥浆泵的工作参数进行动态调整。例如, 在井筒内压力突变时, 系统可以迅速调节泥浆泵的排量和压力, 避免因泥浆流速不足导致的井筒堵塞。这种智能化控制技术在实际应用中, 可以显著提高泥浆循环系统的响应速度和效率, 减少设备故障和非计划停机时间。

上接第 161 页

系统不仅可以大幅提高检测效率, 还可以大大提升检测结果的准确性和可靠性。

(3) 新材料和新工艺应用

为了解决复杂环境适应性问题, 本研究认为可以研发适用于高温、高压等复杂环境的新型检测材料和工艺。比如可以开发高温超声波传感器和高压电磁感应设备, 提升检测设备的耐久性和适应性。例如, 高温超声波传感器可以在超过 150°C 的环境中稳定工作, 而高压电磁感应设备则能够承受高达 10MPa 的压力而不影响检测性能。新材料的应用如耐高温、耐腐蚀的复合材料, 也能提高检测设备的稳定性和寿命。这些技术改进将显著提升检测设备在恶劣环境中的可靠性和稳定性, 确保在各种复杂工况下的检测效果。

(4) 自动化检测设备

为了解决成本和效率问题, 本研究认为可以开发自动化检测设备, 减少对操作人员的依赖, 利用机械化自动化来全面提高检测效率和安全性。通过应用无人机和机器人进行管道内部的自动巡检, 实现全覆盖、高效率的腐蚀检测。例如, 无人机可以快速完成长距离管道的表面巡检, 识别外部腐蚀和泄漏风险, 而机器人则能够进入管道内部, 进行高精度的腐蚀检测和缺陷修复。这些自动化设备能够在复杂环境中灵活作业, 显著降低人力成本和操作风险, 同时提高检测速度和覆盖范围, 满足长输管道的高效检测需求。

4 结论

综上所述, 连续油管作为一种高效的油气井封堵作业工具, 在实际应用中展现了显著的技术优势。然而, 由于作业环境的复杂性, 连续油管在应用过程中仍然面临诸多挑战。通过对材料、工艺、设备以及操作技术的不断创新与优化, 连续油管的应用潜力可以进一步挖掘和提升。在未来的研究与实践中, 随着新材料、新技术不断涌现, 连续油管在油气井封堵作业中的应用将更加广泛和深入, 因此, 针对连续油管技术的进一步深入研究, 对于油气田的高效开发与可持续发展具有重要的技术意义。

[参考文献]

- [1]周隆超, 马春晖, 刘意如. 陇东页岩油水平井提产提效制约因素及技术对策[J]. 化学工程与装备, 2023, (06): 141-143.
- [2]王学成, 乔东宇, 王磊, 迟启福, 徐小喧, 郭旭. 连续油管控压封堵作业在康探 1 井中的应用[J]. 石油和化工设备, 2023, 26 (03): 92-95.
- [3]张怀钰. 水平井压裂技术与工艺现状及发展[J]. 化学工程与装备, 2022, (02): 94-91.

(5) 监测与维护并重

为了解决腐蚀管理和维护问题, 本研究提出建立管道内腐蚀的长期监测系统, 通过实时监测和定期维护相结合的方式, 及时发现和处理腐蚀问题。并可以引入物联网 (IoT) 技术, 在管道关键位置安装传感器, 实时监测管道的腐蚀状态和运行参数, 并通过无线网络传输至监控中心进行分析和预警。定期维护结合实时监测数据, 能够准确制定维护计划, 及时处理腐蚀缺陷, 避免因腐蚀导致的突发事故。这种监测与维护并重的策略, 不仅可以有效延长管道的使用寿命, 还可以全面提高供气安全性和可靠性。

4 结论

长输天然气管道内腐蚀检测技术的研究对于保障能源供应安全、减少环境污染具有重要意义。尽管目前的检测技术在精度、灵敏度、环境适应性等方面存在一定挑战, 但通过多技术集成应用、智能化数据处理与分析、新材料和新工艺应用等优化对策, 可以有效提升检测效果, 保障管道安全运行。

[参考文献]

- [1]张伟. 长输天然气管道完整性管理与管道腐蚀检测技术[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35 (02): 78-80.
- [2]杨骥源, 曹媛. 长输天然气管道内腐蚀检测及防护[J]. 清洗世界, 2018, 34 (12): 34-35.
- [3]梁军营, 张涛, 伍广. 长输干燥天然气管道内腐蚀的直接评价技术[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2013, 30 (06): 41-44.