

套管损坏原因及修井作业技术研究

柳巍涓 冀东油田分公司井下作业公司

【摘要】为预防套管损坏提高修井作业效率，首先分析了套管损坏的几个主要原因，包括地质因素对套管完整性的影响、套管材料与设计缺陷、修井作业过程中的操作错误以及外力作用与环境腐蚀。其次，提出了一系列预防措施来降低套管损坏的可能性，包括强化套管设计和选材标准、应用新型抗腐蚀技术与材料、优化修井工艺与操作程序以及定期维护及早期损伤检测系统。最后，提出了基于预防套管损坏的修井作业技术要点，包括实施精确的地层压力控制方法、运用先进的井下成像技术、采纳弹性套管运用策略以及制定应对突发事件的快速响应流程。通过上述措施，保证了套管的完整性和提高了修井作业的效率，为相关人员提供了实践参考。

【关键词】套管损坏；地质因素；修井作业

【DOI】10.12316/j.issn.1674-0831.2024.07.016

引言

套管在油气井用于支撑井壁、隔离地层和保护环境。然而，套管损坏问题一直困扰着油气行业。套管损坏会导致油气井的完整性受损，加剧安全风险，影响产能，还有可能造成环境污染。因此，深入研究套管损坏的原因以及修井作业技术非常重要。套管损坏原因的研究可以帮助工作人员了解套管失效的机制和过程，比如，井压变化、地震活动、钻井液侵蚀、金属疲劳等。通过分析这些原因，有关人员可以识别高风险区域并采取相应的预防措施来降低套管损坏的可能性。修井作业技术的研究旨在开发有效的作业措施，在预防套管损坏的基础上，提高修井作业效率，减少油气资源的浪费。

一、修井作业中套管损坏的原因

1.地质因素对套管完整性的影响

地层运载压力是导致套管损坏的重要因素。首先，在油气井中，地层的高温高压环境会产生巨大的地层压力，这种压力会向套管壁施加外部载荷，容易导致套管变形、塌陷或破裂。特别是当井深增加或井筒所处地层不稳定时，地层压力的影响更为显著。其次，地层的岩石力学性质会对套管的完整性产生影响。当地层存在高岩石应力、断裂带、脆性岩石等情况时，套管会受到局部应力集中的影响，导致局部变形或断裂。这些地质因素需要在套管设计和井筒施工过程中加以考虑和评估。

2.套管材料与设计缺陷

如果选择的套管材料不符合工程要求或存在质量问题，容易导致套管在修井作业过程中出现断裂、腐蚀等问题。此外，套管的厚度和外径也需要根据井深、地层条件和工作环境等因素进行合理设计，否则会导致套管在受到外力冲击时无法承受，进而发生破裂或塌陷。

在油气井中，地下环境中的酸性、碱性物质以及高盐度的水等都会对套管材料产生腐蚀作用，进而降低套管的强度和耐久性。因此，在套管设计中，应该采取适当的防腐蚀措施，如涂覆防腐蚀涂层、选择抗腐蚀性能更好的材料等，以延长套管的使用寿命并降低修井作业中的风险。

3.修井作业过程中的操作错误

首先，在修井作业中，井筒需要经常清洗以去除杂质和堵塞物，确保井筒通畅。然而，如果清洗力度过大或清洗液中含有腐蚀性物质，会对套管表面造成刮擦、腐蚀和侵蚀，从而降低套管的完整性。其次，操作人员的疏忽和错误操作也容易导致套管损坏。在修井作业过程中，操作人员如果没有严格按照规范和程序进行操作，缺乏专业知识或忽视安全操作规程，容易引发意外事故，例如，使用不当的工具或施加过大的力量，导致套管弯曲、变形或破裂。

4.外力作用与环境腐蚀

首先，在修井作业中，套管容易受到来自各个方面的外力作用，如钻具的冲击和振动、地层压力的突变、井液循环过程中的液柱压力等。这些外力容易导致套管局部应力集中，使套管发生塑性变形、破裂或塌陷。其次，环境腐蚀也是导致套管损坏的一个重要因素。油气井环境存在各种腐蚀性介质，如酸性物质、盐水、硫化物和氧气等。这些介质会侵蚀套管表面，引起腐蚀破坏，特别是在高温高压条件下，腐蚀范围更大和腐蚀程度更强。

二、修井作业中套管损坏的预防措施

1.强化套管设计和选材标准，加强地下环境适应性
强化套管设计关键在于提升套管结构完整性以适应

复杂的地下环境。首先，设计团队应细致地评估地质，包括岩石力学特性、地层压力和温度分布等参数。基于这些数据，采用有限元分析方法对套管的应力分布进行模拟，确保设计在最不利条件下仍能保持结构安全。其次，在选材方面，设计团队必须根据井下环境选择合适的材料。高强度、低合金化钢材是常见的选择，它们具备良好的抗拉强度和耐冲击特性。对于含硫酸盐还原菌（SRB）活跃的地区，必须选用具有抗硫化氢应力腐蚀开裂（SSC）能力的材料。此外，当面临极端温度或高压条件时，超级双相不锈钢等特殊材料更为适用，尽管成本较高，但其长期稳定性能降低了日后的维护成本和潜在的修井风险。最后，实施质量保证和控制流程是确保设计和选材标准得到严格执行的关键步骤。这意味着从原材料采购、制造、运输到现场安装的每个环节均需有详细的检查和测试流程。例如，通过采用超声波检测技术来检测套管缺陷，使用磁粉检测和涡流检测等方法来识别微小裂纹和非金属包含物。此外，制订紧急应对计划，以便在发现问题时能够迅速采取补救措施。

2.应用新型抗腐蚀技术与材料，避免材料及设计缺陷

传统的套管多采用N80、J55等钢级，但在高硫化氢、高二氧化碳和高氯离子含量的环境中，这些材料容易受到腐蚀。因此，建议选用高抗腐能力的超级双相不锈钢、镍基合金或者钛合金作为套管材料。例如，超级双相不锈钢（PREN），能够承受更严酷的腐蚀环境。钛合金虽然成本较高，但其卓越的耐蚀性和强度重量比使得它的长期效益显著。

腐蚀抑制剂的使用是防范修井作业中套管损坏的有效手段。根据套管运行的具体条件，选择适宜的腐蚀抑制剂，如在酸性环境中使用胺类抑制剂，在碱性环境中使用苯酚类抑制剂。此类抑制剂通过形成一层吸附膜覆盖在金属表面，避免了金属和腐蚀介质的直接接触。

内外涂层，可以大幅提升套管的抗腐蚀能力。内部涂层采用环氧树脂、聚乙烯等材料，能有效阻隔产生腐蚀的流体对套管内壁的侵蚀。外部涂层则可以使用富锌漆、热喷塑或三层PE（聚乙烯）涂层等进行处理，提供物理隔绝并防止土壤中腐蚀性物质的侵害。采用电化学保护法，包括阴极保护和阳极保护。阴极保护是将套管作为阴极，通过牺牲阳极或施加外部直流电源来防腐，适用于固定设施的长期保护。阳极保护则将套管作为阳极，适用于暂时保护和移动设备。此外，科学的设计和精确的工艺也至关重要。例如，在套管连接的螺纹配合上，可采用激光或电子束焊接技术以减少接合处的

缺陷。

3.优化修井工艺与操作程序，减少操作失误

优化修井工艺与操作程序的目标是尽量不影响套管的完整性，在具体操作中，操作人员需要精确计算并施加适当的压力以避免在修井过程中造成套管塑性变形或者爆破。首先，应用实时监控技术如电子压力传感器来严格控制井内压力，保持在套管设计允许的压力范围内。其次，调整水泥浆配比和性能，增强其与套管及地层的粘接强度，减少因为修井导致的套管移动和应力集中，使用高品质的水泥添加剂，例如硅酸盐、钙镁物质，增强水泥浆的流动性和抗裂性，从而强化其耐腐蚀性和密封效果。

探针下入井时，操作人员要精细操作，确保套管在下入过程中平稳，避免由于速度过快或操作不当导致的碰撞与摩擦损伤。此过程中，应用程序化下入技术，通过自动化设备控制下放的速度和角度，使得套管受到的力更为均匀，降低套管因不均匀力而产生的变形风险。此外，维护井筒清洁同样重要。井下作业需要详细规划，包括废弃物的管理和清理。有序的废弃物处理不仅可以防止套管被意外堵塞，还能避免腐蚀性物质在套管表面积累，进一步保证了套管的结构安全。

4.定期维护及引入早期损伤监测技术，提前发现损坏处

首先，定期维护套管的重点在于确保其物理和化学性质符合设计要求。对此，操作人员应制定详细的检查和维护计划。例如，使用超声波测厚仪定期测量套管厚度，检测可能存在的腐蚀情况。同时，采用电磁感应工具检测套管的内外壁损伤，如点蚀、裂纹或凹陷。其次，引入早期损伤检测技术。一种方法是使用基于光纤的监测系统，该系统能够实时监控套管的温度和变形情况。当套管受到异常压力或开始出现腐蚀时，光纤传感器会检测到数据的微小变化，从而提前预警，降低潜在的损坏风险。应用这项技术不仅能及时发现问题，同时通过长期数据积累，可用于分析套管失效的趋势和模式，进而进行数据驱动的维护决策。最后，实施智能化评估和修复方案，可使用机器学习算法，结合历史数据和即时监测数据，预测套管的损伤和剩余寿命。借助先进的预测工具，操作人员能够优化维护和修井计划，以减少意料之外的套管损坏事故。

三、基于预防套管损坏的修井作业技术要点

1.使用精确的地层压力控制方法

实施精确地层压力控制前，必须充分评估井况，包

括井深、温度、历史生产数据以及周围地层的压力分布。通过集成测井资料、测试数据和地质模型来评估地层压力，确定各个地层的压力基线。根据评估结果，采用动态井控模型来模拟井下条件，实时更新地层压力数据。这种模型能够预测井内流体动态，比如，泥浆循环时井底压力的变化。操作人员再利用多参数监测系统实时监控修井过程中地层压力的变化，该系统包括井底压力传感器、井口压力计和流量计，确保获取准确的井内压力和流速信息，通过自动控制系统调节泥浆密度和循环速率，精确控制井内压力。

针对可能出现的高风险情况，操作人员应制订应急响应计划。例如，在地层压力容易失控的区域，事先配置好压井设备和材料，一旦检测到异常，立即执行压井操作来重新建立井筒控制。在修井工艺选择时，优先考虑能够提供稳定压力控制的方法，如选用顶驱钻机系统，相比传统回转钻进系统，它能提供较为稳定的转速和扭矩，有助于更平稳地钻进，减少对地层压力的冲击。

2. 运用先进的井下成像技术

精准地监测和评估套管的完整性可以显著降低风险并提高修井操作的成功率。首先，采用多指纹成像技术（Multi-Finger Caliper Logging, MFCL）可以进行全面的套管检查。MFCL工具通过其多个感应臂扫描井壁，生成井壁厚度的详尽图像。这些图像能够显示套管的损耗、变形、裂缝或腐蚀情况。此技术能够提供套管内外径的精确测量数据，从而使工程师能够及时识别问题区域并采取适当措施来修复或加固套管。其次，电磁波成像技术可用于检测套管后的环空空间以及套管本身的损害情况。通过传递电磁波并分析其反射和衰减的数据，可以确定环空水泥的完整性以及通道、孔洞或微裂缝的情况。电磁波成像不仅可以定位损害区域，还能评估损害的严重程度，为后续的修复工作提供依据。最后，随着技术的发展，井下成像技术和数据分析方法将不断进步和融合。在实施过程中，每种技术的选择和使用都应基于井况、运营经济性以及安全环境等因素的综合考量。

3. 采用弹性套管运用策略

弹性套管涉及对传统套管设计的改良，以适应地层压力变化而不产生损害。首先，需详细地评估井下条件，收集地层的压力数据、井温、历史生产数据和现有套管状况的信息。设计弹性套管时，要选择合适的材料和结构，以确保其具有足够的柔性和强度来承受地层压力的波动而不发生变形。例如，采用具有较高延展性的合金材料并通过调整壁厚和外径来优化套管的弹性特性。

使用专门的软件来模拟套管在井下条件下的行为。通过模拟不同的载荷情况，包括井内压力、地层压力、温度变化及其他工况，确保套管设计能在预期的运行范围内保持稳定。在选材和设计完成后，操作人员应进行实验室测试和现场试验，以验证弹性套管的性能。包括压力测试、拉伸和压缩试验以及耐腐蚀性能测试。安装弹性套管时，操作人员还需考虑精确的井下定位和正确的下入程序。包括采用特殊的下套工具和技术，以确保按照设计要求将套管下放到指定深度。最后，修井作业完成后，操作人员应持续监控套管的状态，以便及时检测并处理潜在的问题。通常涉及定期利用声波或电磁波成像工具检测套管，确保其未出现变形和裂纹。

4. 完善应对突发事件的快速响应流程

制定应对突发事件的快速响应流程是修井作业中确保人员安全和最小化环境影响的关键。首先，进行风险评估和预案制定，识别可能导致套管损坏的潜在风险因素，制定具体的应对措施。例如，通过模拟不同的套管失效情景，确定那些对套管完整性威胁最大的操作条件，如极端压力或温度波动、地层移动等。其次，安装套管内外的压力、温度传感器以及形变监测设备，实时监控套管的状态。结合远程监控中心与现场监测数据的即时分析，一旦检测到异常指标，立即预警。最后，分类风险等级并为每一类风险制订相应的响应计划，从而确保发生相关风险之后能够迅速采取行动。例如，对于轻微的套管磨损或微小裂缝，进行局部修补。而对于严重的套管变形或断裂，要采取更换套管段或实施其他紧急修复措施。

四、结语

通过深入研究套管损坏原因和修井作业技术，可以更好地理解套管失效的机制并找到更有效的修复方法，有助于提高油气井的安全性和可靠性，防止生产中断，降低环境风险，最大程度地利用油气资源。有关人员需要进一步探索新的套管材料和修井作业技术，以应对日益复杂的油气开采环境和挑战。同时，有关单位要加强监测和预警系统的开发，通过培训增强工作人员意识和技能，以确保套管的安全运行。

参考文献：

- [1] 吴小亮, 赵天增, 朱宏业. 提高井下修井作业施工质量管理的对策探讨[J]. 石化技术, 2023(12):230-232.
- [2] 魏晓强, 吴建, 田志召. 石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化的策略探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(22):178-180.