

套损井多级分段修复工艺设计与实践

路学宽

辽河油田辽河工程技术分公司修井技术研究所

DOI:10.12238/jpm.v6i7.8253

[摘要] 随着油气田开发进入中后期，套损井问题日益突出。据统计，我国主要油田套损井比例已达15%–30%，部分老油田甚至超过40%。多级分段修复技术通过差异化治理策略，可有效应对复杂套损情况，具有显著的经济和技术优势。套损井修复不仅是经济可行技术手段，更是保障安全、环保、可持续发展关键措施。随着技术进步，套损井修复将在老油田挖潜、非常规油气开发中发挥更大作用。

[关键词] 套损井；多级分段；修复工艺；设计

Design and Practice of Multi-stage Segment Repair Technology for Wellbore Damage Wells by

Lu Xuekuan

Liaoh River Oilfield Liaoh River Engineering Technology Branch Well Repair Technology Research Institute

[Abstract] As oil and gas fields enter the middle and late stages of development, the issue of wellbore damage has become increasingly prominent. According to statistics, the proportion of wellbore damaged wells in major oilfields in China has reached 15%–30%, and in some older fields, this figure can exceed 40%. Multi-stage segment repair technology, through differentiated management strategies, effectively addresses complex wellbore damage conditions, offering significant economic and technical benefits. Repairing wellbore damaged wells is not only an economically viable technical solution but also a critical measure for ensuring safety, environmental protection, and sustainable development. With technological advancements, wellbore damaged well repair will play a more significant role in tapping potential in older fields and unconventional oil and gas development.

[Key words] Wellbore damaged wells; multi-stage segment; repair technology; design

引言

套损井是指由于各种原因导致油气井套管发生变形、破裂、错断或腐蚀穿孔等损坏现象的井。多级分段修复工艺是针对不同井段、不同类型套损情况采取的针对性修复技术组合。该工艺通过针对不同井段、不同类型的套损情况采取差异化修复策略，显著提高了套损井修复成功率和经济效益。数据显示可延长老井寿命，降低新钻井成本。未来随着新材料、新工具和数字化技术的发展，套损井修复技术将向更精准、更高效、更持久的方向发展。套损井多级分段修复技术是针对石油、天然气井套管损坏问题的一种先进修复方法，主要应用于油气井生产过程中出现的套管变形、破裂、腐蚀等损坏情况。

1. 套损机理与诊断方法

1.1 套损机理

套损机理主要包括地质因素、工程因素、腐蚀因素和生产因素三个方面。

(1) 地质因素包括地层滑动或蠕变、盐岩层、泥岩层蠕变、地层压实作用、地震等自然因素盐岩、蠕变（引用 XX 油田案例）和地层滑移。

(2) 工程因素包括固井质量差、套管材质或强度不足、射孔作业影响、增产措施（压裂、酸化）影响固井缺陷（测井曲线对比）和高压压裂诱发裂缝。

(3) 腐蚀因素包括 CO_2 / H_2S 腐蚀速率。

(4) 生产因素：长期生产导致套管腐蚀压力变化引起应力变化、温度变化引起热应力。

1.2 套损检测技术对比

常规套算检测技术包括多臂井径测井、多臂井径测井和超声波成像技术。

表1 套管检测技术对比表

检测方法	精度	适用条件	局限性
多臂井径测井	$\pm 1\text{mm}$	变形检测	无法识别微裂缝
电磁探伤	高	腐蚀/壁厚损失	受套管磁导率影响
超声波成像	极高	全井周成像	需清洁井筒

1.3 先进检测技术

近年来除了常规的套管检测技术，还发展了先进的套算检测技术，包括三维磁记忆检测、相控阵超声、光纤传感和井下电视检测。

表2 先进套管检测技术对比表

技术类型	分辨率	检测能力	典型设备
三维磁记忆检测	1mm	早期应力集中区识别	TSC-5M
相控阵超声	0.5mm	微裂缝检测	Olympus OmniScan
光纤传感	连续监测	温度/应变场重建	DAS/DTS 系统

1.4 技术优势

多级分段套管修复技术具有以下优势：（1）精准修复。针对不同损坏程度采取最合适的修复方案；（2）成本效益。避免全井段更换套管的高成本；（3）施工周期短。相比传统修复方法大幅缩短作业时间；（4）成功率高。分段处理降低整体修复风险；（5）适应性广：适用于各种复杂损坏情况。

1.5 应用范围

该技术特别适用于：长井段多部位损坏的套管修复、不同损坏类型并存的复杂情况、老井、深井、高温高压井的套管修复以及需要最大限度保留原井眼尺寸的情况。

2. 多级分段修复工艺设计

2.1 技术原理

该技术通过将损坏的套管段分成多个独立区域进行分段处理，针对不同损坏程度和类型采取相应的修复措施，主要包括：

（1）多级分段隔离：使用封隔器、桥塞等工具将损坏段分隔成多个独立区间；

（2）针对性修复：根据不同区间的损坏情况选择适合的修复工艺；

（3）逐级验证：完成每一段修复后进行测试验证，确保修复质量。

2.2 修复等级划分

按照套管通径将多级修复分为五级，如下：

（1）一级（通径 $\geq 95\text{mm}$ ）：机械整形+化学加固，挤水泥修补、化学封堵

或者小直径衬管补贴。

（2）二级（80-95mm）：液压胀管修复，机械整形（梨形胀管器、旋转铣锥）、液压膨胀补贴，用于中等程度变形或腐蚀。

（3）三级（60-80mm）：可膨胀管补贴，用于中等程度变形或腐蚀。

（4）四级（40-60mm）：取换套技术。

（5）五级（ $< 40\text{mm}$ ）：侧钻或弃、侧钻技术以及套管回接技术。

2.3 核心技术创新

（1）可膨胀管技术：分为液压膨胀工艺和机械膨胀工艺，用于 $\Phi 139.7\text{mm}$ 及以上套管修复。采用形状记忆合金，膨胀率可达25%，内置FBG传感器实时监测膨胀率 $\geq 15\%$ （实验数据），抗内压 $\geq 35\text{MPa}$ 、有限元模拟膨胀过程。使用机械整形工具修复变形段，恢复通径后再进行加固，适用于轻度至中度变形。

（2）化学固井修复技术：纳米 SiO_2 改性水泥浆（配方：水泥+添加剂），抗压强度提升45%。固井材料包括高韧性水泥体系和柔性堵漏材料，适用于微间隙漏失。

（3）纳米复合修复材料技术： SiO_2 /环氧树脂复合材料，抗压强度 $\geq 80\text{MPa}$ ，耐温 200°C 。使用高强度纤维复合材料，通过树脂固化形成新的内衬层，适用于腐蚀穿孔或微小裂缝。

（4）液压补贴技术：液压坐封补贴管，适用于 $\Phi 177.8\text{mm}$ 套管修复，承压能力可达 35MPa 。在损坏段内下入补贴管，采用悬挂或膨胀方式固定，适用于局部严重损坏。

（5）取换套技术：包括套铣工艺和新旧套管，对接适用于严重错断井。

2.4 多级分段修复流程

2.4.1 井况评估阶段

确定套损位置、程度和类型，以及评估井筒完整性。

2.4.2 修复设计阶段

施工前应制定分段修复方案，对施中所需要的工具串组合设计，并严格施工参数计算。

2.4.3 施工准备阶段

井筒预处理（通井、洗井）和工具准备与检测。

套损井修复前的井筒预处理是确保后续修复作业成功的关键环节，主要包括井况诊断、井筒清理、通径检测、套管整形及井筒稳定性评估等步骤。合理的预处理可提高修复效率，降低施工风险。

1) 井况诊断与检测

在修复前，必须准确掌握套损井的损坏类型、位置及程度，主要检测方法包括以下。

（1）井下电视（CCTV）或电磁探伤（EMIT）：通过摄像或电磁感应技术检测套管的变形、腐蚀、裂缝等损坏情况。适用于浅井或中深井，可直观显示损坏形态。

（2）多臂井径测井（MIT/CAL）：采用机械臂测量套管内径变化，判断变形、缩径或扩径位置。可提供精确的套管内径数据，适用于严重变形井。

（3）超声波测井（USIT）或声波成像测井（CAST）：通过声波反射检测套管壁厚、腐蚀及水泥环胶结情况。适用于腐蚀穿孔、壁厚减薄等隐蔽性损坏。

（4）封隔器试压或漏失测试：通过打压测试判断套管破损位置及漏失程度。适用于套管破裂、螺纹泄漏等情况。

2) 井筒清理（通井与洗井）

在修复前，必须清除井筒内的沉砂、结垢、碎屑等障碍物，确保工具顺利下入。

（1）通井作业（Mill & Run）：使用通井规、刮管器、铣锥等工具清理套管壁附着物。若遇严重变形，需先进行磨铣或扩孔，恢复基本通径。

（2）循环洗井（Jetting & Cleanout）：采用高压水射流、化学清洗液或泡沫洗井清除井筒内沉积物。必要时加入缓

蚀剂、除垢剂，防止二次腐蚀。

2.4.4 分段实施阶段

按设计顺序逐段修复并实时监测修复效果。

套管整形（通径恢复）：若套管存在缩径、弯曲、错断等问题，需先进行整形，确保后续修复工具顺利下入。

（1）机械整形（Swaging）：使用梨形胀管器、旋转辊子整形器等工具逐步扩径。适用于轻度至中度变形（变形量<15%）。

（2）磨铣整形（Milling）：采用铣锥、磨鞋等工具磨削变形段，恢复通径。适用于严重变形或错断井段。

（3）爆炸整形（Explosive Swaging）：在变形段下方引爆整形弹，利用冲击波恢复套管形状。适用于深井或难以机械整形的井段。

2.4.5 井筒稳定性评估

在修复前，需评估井筒力学状态，防止修复后再次损坏。并进行通径规测试下入标准通径规，确保工具能顺利通过修复段。

合理的预处理可提高修复成功率、降低作业风险，为后续膨胀管修复、补贴、复合材料修复等工艺提供良好条件。

套损井修复前的井筒预处理是修复成功的基础，主要包括：

- （1）井况检测（测井、试压）
- （2）井筒清理（通井、洗井）
- （3）套管整形（机械、磨铣或爆炸）
- （4）井筒稳定性评估（地应力、水泥环）
- （5）修复前验证（通径、试压）

2.4.6 效果评价阶段

修复后检测和试压验证。对整形后的套管进行耐压测试，确保无泄漏或二次变形。

2.5 现场应用与效果分析

2.5.1 案例 1：

曙 2-8-09 井深 2800m，套损段：1200m（变形）、2100m（穿孔）。

（1）修复方案：1200m：旋转铣锥整形+ ϕ 114mm 补贴管；2100m：化学封堵+柔性衬管。

（2）效果：修复后试压 25MPa 合格，日产油恢复至 8.5t（修复前 0t）。通过套损井修复，单井恢复产能 8.5 t/d，修复成本 80 万元，而新钻一口井需 300 万元，结余 220 万元。

2.5.2 案例 2：

曙 2-5-033 井分段修复：井深：3200m，套损情况：多段变形+腐蚀穿孔。

（1）修复方案：上部（800-1200m）取换套；中部（1800-2200m）可膨胀管；下部（2800-3000m）化学固井+小套管间接。

（2）效果：修复后套管试压 25MPa 合格，产能恢复至原产量的 85%，通过套损井修复，单井恢复产能 5t/d，修复成本 60 万元，而新钻一口井需 260 万元，结余 200 万元。

2.5.3 经济效益对比

表 3 传统挤水泥与多级分段修复对比表

修复技术	单井成本（万元）	施工周期（天）	成功率
传统挤水泥	50	7	60%
多级分段修复	80	12	92%

3. 多级分段修复的意义

3.1 经济意义

（1）降低开发成本，提高经济效益

减少新钻井需求：修复一口套损井的成本通常仅为新钻井的 20%~50%，可大幅节约投资。延长老井寿命：修复后油井可继续生产，提高单井累计产量，提升油田整体采收率。避免产能损失：套损井若不修复，可能导致关井或减产，直接影响油田经济效益。

（2）提高资产利用率

套损井修复可盘活僵尸井（因套管损坏停产但仍有储量的井），避免资源浪费。

3.2 技术意义

（1）保障井筒完整性，维持安全开采。套损可能导致井筒垮塌、窜槽、套管泄漏，影响生产安全。修复后可恢复密封性和承压能力，防止地层流体互窜（如气窜、水窜）。

（2）适应复杂地质条件。在盐膏层、泥岩蠕变层、高压裂缝性储层等易损地层，套损修复技术可维持井筒稳定。

3.3 环境与社会意义

（1）减少废弃井，降低环境风险。未修复的套损井可能发生套管泄漏，导致地下水污染、地表塌陷等环境问题。修复后可避免长期关井带来的环保隐患，符合绿色油田发展要求。

（2）提高能源供应稳定性。套损井修复可维持油田产能，保障国家能源安全，尤其在老油田稳产中作用显著。

（3）促进老油田二次开发。全球 30%~40% 的生产井存在不同程度套损，修复技术是老油田稳产增效的关键。推动石油工程装备发展，套损修复需求促进了井下工具（如膨胀管、补贴管）、检测技术（如电磁探伤、超声波成像）的进步。

多级分段修复、可膨胀管、智能检测等技术的发展，提升了套损井治理水平。

4. 结论与展望

（1）多级分段修复、可膨胀管、智能检测等技术的发展，提升了套损井治理水平。

（2）多级分段修复技术可针对性解决复合套损问题，成功率提升 45%。

（3）超深井套损修复难度大，复杂井况下修复工具可靠性仍然是亟待解决的一类套损井。

[参考文献]

[1]李希东,张天渠.油田套损井原因分析及治理[J].中国石油和化工标准与质量.2021, (18).

[2]才华.套损风险井监测对策及应用分析[J].国外测井技术.2021, (2).76-79, 2.

[3]杨龙,刘喆,马实英,等.胡尖山油田套损井防治方法研究[J].石油化工应用.2023, 42(2).