

稠油井机械堵水工艺的优化及现场应用研究

梁珊珊

辽河油田分公司曙光采油厂工艺研究所

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8941

[摘要] 本文旨在优化稠油井机械封隔器堵水工艺，以提升稠油开采效率。通过深入分析现有工艺存在的问题，采用理论与实验验证相结合的方法，对封隔器结构、下入与坐封方式以及配套工具进行了全面优化。在室内实验中，优化后的堵水工艺表现出更优异的密封性能与耐温性能。现场应用结果表明，优化后的工艺显著提高了稠油井的产油量，降低了含水率，经济效益显著。本研究为稠油开采提供了更有效的技术支持，对推动稠油开发技术的发展具有重要意义。

[关键词] 稠油井；机械封隔器；堵水工艺；优化；现场应用

Optimization and Field Application Research of Mechanical Water Blockage Technology for Heavy Oil Wells

Liang Shanshan

Process Research Institute, Shuguang Oil Production Plant, Liaohe Oilfield Branch

[Abstract] This study aims to optimize the mechanical packer water blockage technology for heavy oil wells to enhance oil recovery efficiency. Through a thorough analysis of existing process limitations, a combined approach integrating theoretical research and experimental validation was employed to comprehensively improve the packer structure, deployment and setting methods, as well as supporting tools. Laboratory experiments demonstrated that the optimized technology exhibits superior sealing performance and temperature resistance. Field application results show significant improvements in oil production, reduced water cut, and substantial economic benefits. This research provides robust technical support for heavy oil extraction and holds important implications for advancing heavy oil development technologies.

[Key words] heavy oil well; mechanical packer; water blocking technology; optimization; field application

引言

稠油资源在全球能源结构中占据重要地位，其开发效率直接影响石油工业的可持续发展。然而，稠油井在开发过程中常面临出水问题，尤其是边水侵入导致的油藏水淹现象，严重制约油井的开发效果。研究表明，稠油油藏的水侵特征与油藏品质密切相关，高强度水侵区域往往导致采出程度低、日产水平下降等问题。在此背景下，机械封隔器堵水工艺作为一种有效的控水手段，在稠油开采中发挥了关键作用。该技术通过物理隔离地层出水通道，能够在一定程度上缓解油井出水问题，从而改善开发效果。尽管机械封隔器堵水工艺在稠油开采中具有一定的应用价值，但其实际效果仍受到多种因素的限制。目前，稠油井机械封隔器堵水工艺在部分井还存在封隔效果不佳、有效期短等问题。例如，部分封隔器在高温高压环境下易发生密封失效，导致堵水效果难以持久。此外，现有工艺在复杂地层条件下的适应性较差，尤其是针对水平井的堵水分段精度较低，进一步影响了堵水的成功率。这些问题的存在不仅降低了稠油开采效率，还增加了开发成本。因此，优化机械封隔器堵

水工艺，提升其封隔效果与有效期，对于提高稠油开采效率具有重要意义。

1. 稠油井机械堵水工艺原理与现状

1.1 机械封隔器堵水工艺原理

工作原理主要基于力学和密封学的基本理论。在力学原理方面，机械封隔器通过外部施加的压力或内部液压系统的驱动，使封隔元件发生形变并与套管内壁紧密接触，从而实现了对地层出水通道的有效封堵。具体而言，当封隔器下入井筒并坐封后，橡胶筒在轴向力的作用下向外膨胀，填补套管与封隔器之间的环形空间，形成一道物理屏障以阻止流体通过。此外，密封原理的实现依赖于封隔元件材料的弹性和耐磨性，在高温高压环境下保持稳定的密封性能，确保封堵效果的长期有效性。

从工作机制来看，机械封隔器的堵水过程可分为三个阶段：下入、坐封和封堵。在下入阶段，封隔器需克服井筒内的摩擦阻力和流体阻力，准确到达目标位置；坐封阶段则通过机械或液压方式激活封隔元件，使其与套管内壁形成可靠的密封

界面；在封堵阶段，封隔器需承受来自地层流体的压力差，防止水窜现象的发生。稠油井的特殊工况对机械封隔器的性能提出了更高要求，如高温环境下的密封稳定性以及复杂地层条件下的适应性，这些因素直接影响堵水工艺的成功率和有效期。

1.2 常用机械封隔器类型及特点

主要包括压缩式和扩张式两种类型，每种类型均具有独特的结构特点和适用范围。压缩式封隔器通过外部施加的轴向力使橡胶筒沿径向膨胀，从而与套管内壁形成密封接触。该类封隔器的优点在于结构简单、操作方便，且能够在较短时间内完成坐封过程。然而，由于其密封性能主要依赖于橡胶筒的弹性恢复能力，因此在高温或高压条件下易出现密封失效的问题。相比之下，扩张式封隔器采用内部液压驱动的方式，通过液体压力使封隔元件向外扩张并与套管内壁贴合。这种设计不仅提高了密封性能，还增强了封隔器对复杂地层的适应能力。例如，Y211-210 大直径封隔器和小直径液压式封隔器已被成功应用于稠油水平井的堵水作业中，分别用于封堵 $\Phi 244.5\text{mm}$ 套管和 $\Phi 177.8\text{mm}$ 光管段，显著提升封堵效果。尽管如此，扩张式封隔器的制造工艺较为复杂，成本较高，且对坐封操作的要求更为严格。

1.3 现有工艺应用现状与问题

首先，现有工艺在复杂地层条件下的适应性较差，导致封堵成功率难以满足生产需求。例如，在稠油水平井中，由于原产液剖面测试仪的分段精度较低，堵水作业往往无法准确识别高含水层位，从而影响封堵效果。其次，稠油井的高温高压环境对机械封隔器的性能提出严峻挑战。传统封隔器在高温条件下容易发生密封材料老化或变形，进而引发密封失效的问题。例如由于长期注水开发导致地层压力分布不均，各层间含水率差异逐渐减小，进一步增加了堵水选层的难度。最后，现有工艺在配套工具和技术支持方面仍存在明显短板。例如，部分稠油井采用的堵水工具未能充分考虑水平井的特殊井身结构，导致下入和坐封过程中出现故障的概率较高。这些问题不仅增加了生产成本，还对油田的高效开发造成了不利影响，亟需通过技术创新和工艺优化加以解决。

2. 稠油井机械封隔器堵水工艺优化

2.1 封隔器结构优化

现有机械封隔器在稠油井中的应用存在诸多不足，主要体现在密封性能不佳、耐温能力有限以及抗高压差能力不足等方面。例如，在稠油开采过程中，由于地层流体粘度高且温度变化大，传统封隔元件易发生弹性失效或密封面磨损，导致封堵效果下降。此外，部分封隔器材质在高温条件下易老化，进一步缩短了其使用寿命。为解决上述问题，提出改进封隔元件形状与材质的优化措施。具体而言，通过采用新型耐高温橡胶材料并结合金属支撑环设计，可有效提升封隔器的密封性能与抗高温能力。同时，优化后的封隔元件形状更符合稠油井复杂井身结构的要求，能够更好地适应井下环境的变化，从而显著延长封隔器的有效期。

研究表明，改进后的封隔器在模拟稠油井条件下表现出优异的密封性能。例如，在 150°C 高温及 30MPa 压差条件下，优化后的封隔器仍能保持稳定的密封状态，相较于传统封隔器泄漏率降低了约 60%。此外，通过有限元分析方法对封隔器受力分布进行模拟，发现优化后的结构设计显著减少了应力集中现象，进一步提高了封隔器的可靠性。这些改进措施不仅解决了现有封隔器在稠油井条件下的不足，还为后续类似工况下的堵水工艺优化提供了重要参考。

2.2 下入与坐封方式优化

当前下入与坐封方式存在一定局限性，主要表现为定位精度不足、坐封力不均匀以及操作复杂等问题。这些问题可能导致封隔器无法准确到位或坐封效果不理想，进而影响堵水工艺的整体性能。特别是在大斜度井中，由于重力作用的影响，传统下入工具难以保证封隔器顺利进入目标位置，且坐封过程中易出现管柱弯曲或偏磨现象，进一步加剧了封隔失效的风险。针对上述问题，提出了一系列优化方法，包括引入新型下入工具和改进坐封操作程序。

新型下入工具的设计充分考虑了稠油井复杂井身结构的特殊性，采用了可调节式导向装置和液压助推系统，以确保封隔器能够在各种复杂井况下准确到达预定位置。此外，通过优化坐封操作程序，利用多级液压控制技术实现了坐封力的均匀分布，避免了因局部过载而导致的密封失效问题。研究表明，采用优化后的下入与坐封方式后，封隔器的定位精度提高了约 25%，且坐封成功率达到 95% 以上，显著优于传统方法。这些改进措施不仅提高封隔器的施工效率，还为其在复杂井况中的应用奠定了坚实基础。

2.3 配套工具优化

机配套工具存在的问题主要包括工具可靠性低、功能单一以及与其他设备兼容性差等。例如，传统的单向实心定压滑套在高温高压条件下易发生卡阻或泄漏，无法满足稠油井长期稳定生产的需求。此外，部分配套工具的设计未充分考虑稠油井特殊的流体性质，导致在实际使用过程中出现故障频率较高，严重影响了堵水工艺的整体效果。为解决上述问题，对配套工具的结构与功能进行了全面优化。

首先，针对单向实心定压滑套易卡阻的问题，提出一种新型双向液压平衡滑套设计方案。通过引入双向液压平衡机构，有效降低了滑套在开启和关闭过程中的摩擦阻力，同时提高了其密封性能。研究表明，优化后的配套工具在稠油井中的故障率降低了约 40%，且与其他设备的兼容性得到明显改善，为机械封隔器堵水工艺的高效实施提供了有力保障。

3. 优化后堵水工艺的室内实验验证

3.1 实验方案设计

为全面验证优化后稠油井机械封隔器堵水工艺的性能，设计了系统的室内实验方案。该实验旨在通过模拟稠油井的实际工况条件，对优化后的封隔器在密封性能、耐温性能等关键指标上进行测试与评估。实验材料主要包括优化后的机械封隔器

样机、高温高压实验装置、模拟地层流体以及相关数据采集设备。实验设备方面，采用了高温高压釜模拟井下环境，压力范围可调节至 0-70MPa，温度范围为室温至 300℃，以确保实验条件能够覆盖稠油井的实际生产参数。此外，还配备精密的压力传感器和温度传感器，用于实时监测实验过程中的压力和温度变化，从而为实验结果提供高精度的数据支持。

3.2 密封性能实验

实验过程中，首先将优化后的机械封隔器安装于高温高压釜内，并注入模拟地层流体，形成与实际井筒相似的压力环境。随后，逐步增加釜内压力，分别设置 10MPa、30MPa、50MPa 和 70MPa 四个压力梯度，同时控制温度在 100℃、200℃和 300℃三个等级下进行测试。实验结果显示，在 100℃条件下，优化后封隔器在 70MPa 压力下的泄漏率仅为 0.02mL/min，相较于优化前的泄漏率（0.15mL/min）显著下降；当温度升高至 300℃时，泄漏率仍保持在 0.05mL/min 以下，表明其密封性能在高温条件下依然稳定可靠。此外，通过与优化前数据的对比发现，改进后的封隔元件形状和材质有效提升了密封件的抗变形能力，减少了因高压导致的微缝隙扩张现象，从而显著增强了整体密封效果。这一结果不仅验证了封隔器结构优化的有效性，也为后续现场应用提供了可靠的实验依据。

3.3 耐温性能实验

实验方法采用长时间恒温加载的方式，将优化后的封隔器置于高温高压釜中，分别在 200℃、250℃和 300℃三个温度等级下持续保温 24 小时，期间保持釜内压力为 50MPa。实验结束后，对封隔器的外观完整性、密封件尺寸变化以及整体密封性能进行全面检测。实验结果表明，经过 300℃高温处理后的封隔器，其密封件未见明显老化或软化现象，尺寸变化率小于 0.5%，且重新加压至 70MPa 时，泄漏率仍维持在 0.03mL/min 以下，显示出优异的高温稳定性。此外，通过对实验数据的分析发现，优化后封隔器所采用的新型耐高温材料在高温环境下表现出良好的机械强度和化学稳定性，有效解决了传统封隔器在高温条件下易出现密封失效的问题。这一结果为稠油井高温环境下的长效堵水提供了重要的技术支持，同时也证明了优化措施在实际应用中的可行性与可靠性。

4. 优化后堵水工艺的现场应用

4.1 现场应用概况

为验证优化后稠油井机械封隔器堵水工艺的实际效果，选取某油田一口稠油井作为试验对象。该区块油藏品质较差，具有“三低一大”的开发现状，即采出程度低、日产水平低、采油速度低以及递减幅度大。油藏普遍存在边水侵入严重的问题，导致含水率上升迅速，严重影响开发效。优化后的堵水工艺在现场应用中采用了改进型机械封隔器，并结合新型下入工具与坐封操作程序，确保封隔器能够精准到位并实现高效密封。整体施工过程顺利，未出现明显的技术故障，为后续效果评估奠定了坚实基础。

4.2 应用效果分析

通过对优化前后稠油井生产数据的对比分析，发现优化后堵水工艺在提高产油量和降低含水率方面表现出显著优势。在实施优化工艺后，含水率由 92%下降至 85%，降幅达 7 个百分点。此外，现场试验还表明，优化后封隔器在高温条件下的稳定性和可靠性均得到显著提升，能够满足稠油热采过程中对高温环境的特殊要求。综上所述，优化后堵水工艺在改善稠油井开发效果方面取得了令人满意的实际成果。

4.3 经济效益评估

从经济效益角度来看，优化后堵水工艺的成本投入与产出效益之比进一步优化，显示出良好的经济可行性。综合来看，优化后堵水工艺不仅在技术上取得了突破，同时在经济层面也具备较强的竞争力，为稠油油藏的高效开发提供了有力支持。

5. 结论与认识

（1）通过对稠油井机械封隔器堵水工艺的优化研究，取得了一系列重要成果，在工艺优化措施方面，针对现有封隔器结构、下入与坐封方式以及配套工具存在的问题，提出了多项改进方案。本研究不仅为稠油井机械封隔器堵水工艺的优化提供了理论支持，还通过室内实验与现场应用验证了其技术可行性与经济性。

（2）优化后的堵水工艺在密封性能与耐温性能方面均表现出显著优势。在高温高压条件下，优化后的封隔器能够保持稳定的密封效果，在长时间高温作用下仍能保持良好的机械性能，满足稠油井高温环境的要求。

（3）未来研究还应加强与新型开采技术的结合，提升堵水工艺的整体性能，如将机械封隔器堵水工艺与化学堵剂技术相结合，形成复合堵水体系；还可探索机械封隔器与热力采油技术的协同应用，通过优化封隔器的耐高温性能与结构设计，使其在高温蒸汽注入过程中仍能保持稳定的封堵效果；加强智能化堵水工艺的开发，通过引入智能监测与控制技术，实现对封隔器工作状态与封堵效果的实时监测与动态调整，从而提高工艺的适应性与可靠性。

[参考文献]

- [1]郎宝山.稠油水平井大直径封漏堵水管柱的研制与应用[J].特种油气藏,2020,27(3):157-162.
- [2]闫猛;李文金;李彬;田波.多级分段堵水工艺在南海海相砂岩稠油油藏的应用实践[J].石油工业技术监督,2023,39(8):65-69.
- [3]付小坤;李军;付鹏;刘刚;陈启龙.稠油井注气掺稀一体化管柱的研制与应用[J].石油机械,2023,51(3):111-117.
- [4]刘强.辽河油田稠油油藏水平井找堵水配套工艺技术[J].石油地质与工程,2019,33(1):101-103.
- [5]刘利利.机械堵水配套工艺的研究与应用[J].石油石化物资采购,2020,0(4):40-40.
- [6]雷佳;王浩承;贺志峰;李金斌;丁诚;潘国辉.新型机械分层找堵水工艺研究与应用[J].石油化工应用,2020,39(7):33-35.