

稠油热采中水平井蒸汽吞吐工艺的经济性能评估

仲玉梅¹ 班晓春² 刘 涛² 陈 静² 卢立刚³

(1. 河口采油厂地质研究所, 山东 东营 257000)

(2. 河口采油厂采油管理七区, 山东 东营 257000)

(3. 胜利油田注汽技术服务中心河口注汽项目部, 山东 东营 257000)

摘要: 稠油开采难度较大。为了提高稠油开采效率, 本文探讨了水平井蒸汽吞吐工艺在稠油热采中的技术原理、特点、挑战及优化方案。通过注汽、浸泡和生产三个阶段, 该工艺能有效降低稠油粘度, 改善其流动性。水平井技术在该工艺中展现了显著优势, 包括更大的接触面积和更高的渗透率, 有助于蒸汽的均匀分布和高效利用。本文还评估了该工艺的性能效果和经济效益, 通过采收率、蒸汽利用效率、油井产量以及井底压力和地层温度等指标对该工艺进行综合分析。

关键词: 稠油热采; 水平井; 蒸汽吞吐工艺; 经济性能评估

0 引言

稠油是一种高粘度、高密度、低流动性的石油资源, 其开采难度较大, 传统的开采方法往往难以达到预期的采收率^[1]。随着世界能源需求的不断增长, 稠油资源的开发利用显得尤为重要。稠油热采技术作为提高稠油开采效率的关键手段, 得到了广泛的应用和研究。稠油热采中的蒸汽吞吐工艺 (Steam Huff and Puff) 是一种有效的热采方法, 通过周期性地向油层注入高温蒸汽, 降低稠油粘度, 改善油层流动性, 从而提高油井的采收率。水平井技术的发展为蒸汽吞吐工艺的应用带来了新的契机。与传统的垂直井相比, 水平井具有更大的接触面积和更高的渗透率, 能够更有效地覆盖稠油储层, 提升采收效率。近年来, 随着钻井技术和热采技术的不断进步, 水平井蒸汽吞吐工艺在稠油热采中的应用逐渐增多, 并展现出显著的经济效益和技术优势。水平井蒸汽吞吐工艺的发展经历了从理论研究到现场应用的逐步演变。早期的研究主要集中在蒸汽吞吐过程中的传热机制和热力学特性, 通过实验室模拟和数值模拟等手段, 探讨了不同参数对采收率的影响^[2]。随着技术的成熟, 水平井蒸汽吞吐工艺在实际油田中得到了广泛的推广应用, 并在多个稠油油田中取得了显著的增产效果。然而, 尽管水平井蒸汽吞吐工艺在技术上取得了长足的进步, 其经济性能仍然是评估其可行性和推广应用的重要指标。本文计划从水平井蒸汽吞吐工艺的性能研究入手, 全面分析其在稠油热采中的经济效益和成本构成, 从而

为油田开发决策提供学术依据。

1 稠油热采中水平井蒸汽吞吐工艺的技术分析

1.1 技术原理

水平井蒸汽吞吐工艺是稠油开采中的一种关键热采方法, 主要是通过向油藏注入高温高压蒸汽, 使稠油受热膨胀, 降低其粘度, 增加其流动性, 从而提高油井产能。该工艺的原理可以分为三个主要阶段: 注汽、浸泡和生产。

①注汽阶段。通过注汽管道向油藏中注入高温高压的饱和蒸汽。这一阶段的目标是将大量热量传递给油层, 使蒸汽在油层中扩散并形成蒸汽室。蒸汽室的形成过程包括蒸汽在孔隙中的渗透和扩散, 这一过程需要克服油层的阻力, 并且要保证蒸汽能够在油层中均匀分布。蒸汽通过传导和对流的方式将热量传递给周围的稠油, 使油层温度升高。

②浸泡阶段。在注汽完成后, 关闭井口阀门, 使蒸汽在油藏中停留一段时间。这一阶段蒸汽继续将热量传递给油层中的稠油, 进一步降低其粘度。这一过程中, 稠油受热后发生热膨胀, 密度减小, 部分轻质组分挥发, 进一步改善油的流动性。浸泡阶段的时间长短直接影响到蒸汽热量的利用效率和稠油的降粘效果, 因此需要根据具体油藏条件进行优化调整。

③生产阶段。打开井口阀门, 通过生产管道将受热降粘后的稠油采出地面。在这一阶段, 受热后的稠油由于粘度降低, 流动性大幅增加, 能够更加容易地通过油藏中的孔隙流向生产井。生产过程中, 井底压

力需要保持适当，保证稠油能够顺利采出，同时防止蒸汽与稠油混合物的流失。

蒸汽在油层中的扩散和传热是整个工艺的核心。注入的高温蒸汽需要通过热传导和热对流将热量传递给周围的稠油，蒸汽在油层中的扩散过程中，通过热传导将热量传递给接触到的稠油颗粒。热传导是一个微观过程，依赖于蒸汽和稠油的接触面积以及两者之间的温度梯度。蒸汽注入油层后，形成的蒸汽室内存在明显的温度梯度，热对流现象将热量从高温区域传递到低温区域。热对流能够加快热量在油层中的传播速度，提高加热效率。蒸汽在油层中凝结为水时，会释放出大量的潜热，这部分热量也会传递给稠油，进一步降低其粘度。

在实际操作中，注汽参数的优化是确保蒸汽吞吐工艺成功的关键。主要参数包括注汽压力、注汽速度和注汽量等。其中，注汽压力需要控制在一个合适的范围内，过高的压力可能会导致地层破裂，影响油层稳定；过低的压力则无法有效加热稠油，降低采收率。因此，注汽压力需要根据油藏的地质条件进行精确控制。注汽速度的选择则会影响到蒸汽在油层中的扩散和传热效果。过快的注汽速度可能会导致蒸汽无法充分扩散，影响加热效果；过慢的注汽速度则可能导致注汽时间过长，增加成本。注汽量则需要根据油层的储量和物性参数进行计算，保证在注汽过程中蒸汽能够充分覆盖油层，提高采收率。

1.2 技术特点

①水平井的应用。水平井技术在稠油热采中的应用具有显著的优势。与传统的垂直井相比，水平井能够在油层中延伸更长的距离，从而显著增加井眼与油层的接触面积。这种设计使得注入的蒸汽能够更广泛且均匀地分布在油层中，有效提升了蒸汽的加热效率。更大的接触面积意味着更多的稠油能够被高温蒸汽直接加热，迅速降低其粘度和密度，提高流动性。此外，水平井的设计减少了蒸汽窜流的风险。在垂直井中，蒸汽容易沿着高渗透通道或裂缝快速窜流，导致热量损失和加热不均匀。然而，水平井由于其独特的结构，可以形成更均匀的蒸汽分布，有效减少蒸汽在油层中的窜流和热损失。这种均匀的热分布不仅提高了稠油的采收效率，还降低了蒸汽的消耗，提升了整个工艺的经济性。

②高效的注采切换。水平井蒸汽吞吐工艺具有高效的注采切换能力，这意味着在注汽和生产之间可以

快速转换，极大地提高了开采效率。传统的稠油热采方法往往需要较长的注汽和浸泡时间，而水平井蒸汽吞吐工艺则能够根据油层和油井的实际情况，灵活调整注汽和生产的周期。通过优化注采周期，可以在短时间内达到最佳的采收效果。这种高效的注采切换不仅提高了油井的产量，还减少了停井时间，使得油井可以更频繁地进行生产。这对于油田开发来说，是一个显著的优势，可以最大限度地利用现有的井筒资源，提高整体开采效率。同时，灵活的注采调整还可以根据油藏压力和温度的变化，及时优化注汽参数，进一步提升稠油的采收率。

1.3 技术挑战及优化方案

①蒸汽窜流。蒸汽窜流是水平井蒸汽吞吐工艺中的一大挑战。在注入过程中，蒸汽可能会沿着油藏中的高渗透通道或天然裂缝快速窜流，导致部分区域过热，而其他区域却得不到足够的加热。这样的加热不均匀会显著影响采油效果，会使得整体采收率降低。针对蒸汽窜流问题，首先通过精细化的注汽参数控制，包括注汽速率、注汽量和注汽时间的调整，可以减小蒸汽窜流的风险。使用先进的地质模型和数值模拟技术，可以更好地预测蒸汽在油层中的扩散路径，从而优化注汽方案。还可以改进井筒结构来预防蒸汽窜流，例如采用分段注汽技术和多分支井技术，可以有效控制蒸汽的分布，减少蒸汽沿高渗透通道窜流的问题。通过在不同深度设置多个注汽点，使蒸汽能够更均匀地分布在油层中。还可以使用堵水剂和封堵技术，在注汽前或注汽过程中使用堵水剂或其他封堵材料，可以封堵高渗透通道或裂缝，减少蒸汽窜流，提高蒸汽利用效率。

②注汽压力控制。注汽压力控制是蒸汽吞吐工艺中的关键因素。注汽压力过高可能导致地层破裂，破坏油藏结构；而注汽压力过低则无法有效加热稠油，降低采收率。因此，精确控制注汽压力，确保加热效果和地层稳定性是非常重要的。在进行注汽压力控制优化的时候，首先需要安装先进的压力监测和控制系统，实时监测井底压力和地层压力，通过反馈调节注汽压力，保持在一个安全有效的范围内。还可以采用分阶段注汽技术，根据油层的不同深度和压力变化情况，分阶段调整注汽压力和注汽量，避免地层破裂和热效应不足的问题。也可以利用数值模拟和实验室研究，深入分析不同注汽压力对地层和稠油的影响，制定出最佳的注汽压力方案。通过模拟不同注汽压力下

的油藏响应，优化注汽工艺，提高采收率。

2 技术应用的性能效果评估

在评估水平井蒸汽吞吐工艺在稠油热采中的性能效果时，需考虑多个方面的指标，包括采收率、蒸汽利用效率、油井产量、井底压力和地层温度等。

2.1 采收率

采收率是衡量油田开发效果的关键指标。通过对水平井蒸汽吞吐工艺的应用，可以显著提高稠油的采收率。具体评估方法包括动态监测和对比分析等。其中，动态监测主要是通过生产数据分析，实时监测油井的采油量和采收率变化。通常在实施水平井蒸汽吞吐工艺后，采收率会有显著提升。对比分析则是将水平井蒸汽吞吐工艺的采收率与传统垂直井采收率进行对比，评估技术改进带来的增产效果。

2.2 蒸汽利用效率

蒸汽利用效率是指单位蒸汽量所能采出的稠油量。高效的蒸汽利用能够降低成本，提高经济效益。评估方法包括蒸汽 - 油比 (SOR) 和热损失分析等。其中，蒸汽 - 油比 (SOR) 主要是计算注入的蒸汽量与采出的油量之比，SOR 值越低，表示蒸汽利用效率越高。而热损失分析则是通过监测井筒和地层温度，评估蒸汽在传导过程中热损失的情况，优化蒸汽注入方案以减少热损失。

2.3 油井产量

油井产量的变化是直接反映水平井蒸汽吞吐工艺效果的重要指标。评估方法包括产量曲线分析、产量提升幅度等。其中，产量曲线分析需要绘制油井产量随时间的变化曲线，分析注汽周期和浸泡时间对产量的影响。产量提升幅度则需要计算技术应用前后油井产量的提升幅度，从而量化技术带来的增产效果。

2.4 井底压力和地层温度

井底压力和地层温度是确保蒸汽吞吐工艺安全和有效运行的关键参数。评估方法包括压力监测和温度分布等。其中，压力监测需要实时监测井底压力，确保压力在安全范围内，防止地层破裂。而温度分布则是利用温度传感器和地层温度监测技术，评估蒸汽在地层中的温度分布，确保热量传导均匀，优化注汽方案。

3 技术应用经济效益评估

在评估水平井蒸汽吞吐工艺的经济效益时，需要考虑多种经济指标，包括投资成本、运行成本、收益和投资回报率等。

3.1 投资成本

投资成本是指技术应用前期的设备、材料和工程

建设费用。评估方法包括设备投资和工程建设费用等。其中，设备投资主要包括了计算水平井钻井设备、蒸汽注入设备和监测设备的购置费用。工程建设费用则需要包括井筒建设、管道铺设和地面设施建设等费用。

3.2 运行成本

运行成本是指技术应用过程中所需的日常运营和维护费用。具体包括了能源成本——计算蒸汽注入所需的燃料或电力费用；维护费用——包括设备维修、保养和更换的费用；人工成本——计算技术操作和管理人员的工资和福利费用等。

3.3 收益分析

收益分析是指技术应用带来的直接经济效益。分析的时候需要计算增产收益，也就是计算由于水平井蒸汽吞吐工艺带来的稠油产量增加所产生的销售收入。还要核算节约成本，也就是由于蒸汽利用效率提高和热损失减少，节省的能源和运营成本。

3.4 投资回报率

投资回报率 (ROI) 是评估技术应用经济效益的关键指标。计算方法包括净现值 (NPV)、内部收益率 (IRR) 和投资回收期等内容。其中，括净现值 (NPV) 是指通过现金流量折现，计算技术应用在一定时间内的净现值。而内部收益率 (IRR)，则需要计算技术应用项目的内部收益率，判断项目的经济可行性。投资回收期方面，也需要计算技术应用项目的投资回收期，评估项目的风险和收益平衡。

综上所述，水平井蒸汽吞吐工艺在稠油热采中的应用展现了显著的技术和经济优势。通过优化注汽参数和工艺流程，该工艺可以显著提高稠油的采收率和蒸汽利用效率，减少蒸汽窜流和热损失，增强油井产量。同时，该技术具有很强的适应性，能够在不同类型的稠油油藏中有效应用，特别是在高粘度和低渗透率油藏中表现尤为突出。经济效益评估表明，尽管前期投资和运行成本较高，但通过增产收益和节约成本，可以实现较高的投资回报率。因此，水平井蒸汽吞吐工艺是一种具有广泛应用前景的稠油开采技术，可以为提高稠油资源的开发利用提供有力的技术支持。

参考文献：

- [1] 孙焕泉, 刘慧卿, 王海涛, 束青林, 吴光焕, 杨元亮. 中国稠油热采开发技术与发展方向 [J]. 石油学报, 2022, 43(11):1664-1674.
- [2] 卫骏, 许清海, 刘世岩, 罗仁凯, 马伟. 浅谈稠油井降粘剂辅助注蒸汽开采 [J]. 石化技术, 2022, 29(07): 0052-0054.