

稠油热采多阶段蒸汽注入策略及其经济优化研究

班晓春¹ 刘 涛¹ 陈 静¹ 卢立刚² 仲玉梅³

(1. 河口采油厂采油管理七区, 山东 东营 257000)

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

(3. 河口采油厂地质研究所, 山东 东营 257000)

摘要:本文探讨了稠油热采中多阶段蒸汽注入策略的必要性、操作原理及其经济优化方法。多阶段蒸汽注入通过分阶段、多次注入蒸汽, 可以全面提高热能利用效率和稠油采收率, 优化地层适应性和压力管理。然而, 多阶段注入策略在设备投资、运营成本、技术复杂性和地层评估方面存在一定的挑战。本文针对这些挑战提出了相应的经济优化方案, 希望可以实现成本控制和经济效益的最大化。

关键词:稠油热采; 多阶段蒸汽注入; 热能利用; 经济优化

稠油热采作为一种重要的石油开采技术, 在世界范围内广泛应用。稠油因其高黏度和低流动性, 使得传统的开采方法难以奏效, 热采技术通过提高油藏温度来降低稠油的黏度, 从而提高其流动性和采收率^[1]。近年来, 随着稠油资源的不断开发, 稠油热采技术也在不断进步和创新。其中, 多阶段蒸汽注入策略作为一种先进的热采方法, 展现了其独特的优势和巨大的潜力。本研究将从稠油热采常见问题分析入手, 探讨多阶段蒸汽注入策略的意涵和必要性, 详细阐述其操作原理和操作难点, 并对其经济优化进行深入分析。

1 稠油热采常见问题分析

在稠油热采过程中, 一般常用单阶段蒸汽注入来进行蒸汽驱油。此方法通过一次性注入大量蒸汽, 迅速提高油藏温度, 降低稠油黏度, 从而提高稠油的流动性和采收率。然而, 单阶段蒸汽注入在实际应用中常存在以下问题: ①热能利用效率低: 单阶段蒸汽注入的过程中, 蒸汽在传输到油藏的过程中会产生大量热量损失, 特别是在深层油藏和高渗透性地层中, 热损失更加严重。这导致注入蒸汽未能充分加热油藏, 使得稠油降黏效果不理想, 采收率较低; ②地层适应性差: 单阶段蒸汽注入通常难以根据不同油藏和地质条件进行调整, 无法满足各种地层的需求。不同油藏对蒸汽注入的响应不同, 单一的注入策略难以实现最佳的采收效果, 往往导致部分油藏未能充分加热, 稠油采收率低; ③蒸汽窜流和蒸汽突破: 在高渗透区, 单阶段蒸汽注入容易形成蒸汽窜流和蒸汽突破现象, 导致注入蒸汽直接窜入生产井而未能有效加热稠油

层。这种现象不仅降低了热能利用效率, 还增加了蒸汽的无效消耗, 影响了整体采收效果; ④经济效益低: 由于单阶段蒸汽注入存在热能利用效率低、地层适应性差、蒸汽窜流和突破、地层压力管理困难等问题, 导致采收率低, 经济效益不佳。大量蒸汽和能量消耗, 使得热采成本较高, 经济效益难以最大化。

2 稠油热采多阶段蒸汽注入策略的意涵

正因为单阶段蒸汽注入存在较多实操性问题, 因此越来越多开采单位开始探索和应用多阶段蒸汽注入策略。多阶段蒸汽注入策略通过分阶段、多次注入蒸汽, 逐步提高油藏温度, 最终实现更高效的稠油采收。这一策略的核心在于精细化管理蒸汽注入过程, 优化热能利用, 提高采收效率, 并减少不必要的资源浪费。

2.1 热能利用效率的提高

多阶段蒸汽注入策略通过分段注入蒸汽, 使得每个阶段的蒸汽能够更充分地加热油藏, 从而减少热量损失。相比单阶段注入一次性大量蒸汽, 多阶段注入能够更好地控制注入量和注入时间, 使得蒸汽在油藏中更均匀地分布, 提高了热能的利用效率。逐步加热油藏可以确保稠油在每个阶段都能达到最佳的降黏效果, 从而提高整体采收率。

2.2 地层适应性的优化

多阶段蒸汽注入策略能够根据不同地质条件和油藏特性, 灵活调整注入参数和注入方案。通过对油藏进行详细的地质调查和评估, 确定每个阶段的注入压力和注入温度, 以满足不同油藏的需求。这样不仅可以避免单阶段蒸汽注入带来的适应性差问题, 还能够

更好地利用油藏资源，实现最佳的采收效果。

2.3 蒸汽窜流和蒸汽突破的控制

多阶段蒸汽注入策略通过分阶段控制蒸汽注入量和注入速度，可以有效减少蒸汽窜流和蒸汽突破现象。在每个阶段的注入过程中，蒸汽逐步加热油藏，形成稳步推进的热前沿，避免了单阶段蒸汽注入过程中高渗透区形成的蒸汽窜流和突破问题。这样不仅提高了热能利用效率，还减少了蒸汽的无效消耗，进一步提升了采收效果。

2.4 经济效益的提升

多阶段蒸汽注入策略通过提高热能利用效率、优化地层适应性、控制蒸汽窜流和突破、优化地层压力管理等手段，显著提高了稠油采收率和经济效益。虽然多阶段注入策略在操作上较为复杂，但其带来的高采收率和低资源消耗，使得整体经济效益显著提升。通过合理的经济优化，可以实现成本的有效控制，最大化稠油热采的经济回报。

3 稠油热采多阶段蒸汽注入策略的操作原理

稠油热采多阶段蒸汽注入策略是一种通过分阶段、逐步注入蒸汽的方法，以最大限度地提高热能利用效率和稠油采收率。这一策略在操作上涉及多个步骤和关键技术，包括蒸汽注入的分段控制、地层压力的精确管理、实时监测和调整等。

3.1 分段控制蒸汽注入

多阶段蒸汽注入策略的核心在于将蒸汽注入过程分为多个阶段，每个阶段注入特定量的蒸汽，进而逐步提高油藏温度。具体操作步骤如下：①地质调查与评估：在进行蒸汽注入前，需要对油藏进行详细的地质调查和评估，确定油藏的地质条件、渗透率、孔隙度等关键参数。基于这些数据，制定合理的蒸汽注入方案；②分段注入计划：根据油藏评估结果，将蒸汽注入过程分为多个阶段。每个阶段的注入量、注入时间和注入压力需要根据油藏的具体情况进行设计，以实现最佳的热能传递和稠油降黏效果；③注入实施：按照预定的分段注入计划，逐步注入蒸汽。每个阶段结束后，进行油藏的温度和压力监测，评估蒸汽注入效果，并根据监测结果调整后续阶段的注入参数。

3.2 实时监测与调整

多阶段蒸汽注入策略要求对注入过程进行实时监测，并根据监测数据进行动态调整，从而确保注入效果和安全性。具体操作包括：①温度和压力监测：在注入过程中，利用传感器和监测设备，实时监测地层温度和压力变化。监测数据通过无线传输系统，实时

反馈到地面控制中心；②数据分析与评估：对实时监测数据进行分析，评估每个阶段的蒸汽注入效果。通过对比预期注入效果和实际数据，发现问题并进行相应调整；③动态调整注入参数：根据数据分析结果，动态调整后续阶段的注入参数，包括注入量、注入时间和注入压力等。确保每个阶段的蒸汽注入能够最大限度地提高热能利用效率和稠油降黏效果。

3.3 地层适应性优化

在多阶段蒸汽注入策略中，地层适应性优化是确保蒸汽注入效果的关键。操作步骤包括：①地层特性分析：在蒸汽注入前，对地层特性进行详细分析，了解地层的渗透性、孔隙度和地质构造等信息；②注入参数优化：根据地层特性，优化每个阶段的注入参数。通过调整蒸汽注入量和注入速度，确保蒸汽能够均匀地分布在油藏中，提高热能利用效率；③分层注入技术：在多阶段蒸汽注入过程中，采用分层注入技术，对不同层位进行差异化注入。通过精确控制各层位的注入量和注入压力，实现全油藏的均匀加热。

4 稠油热采多阶段蒸汽注入策略的操作难点

虽然稠油热采多阶段蒸汽注入策略在提高采收率和热能利用效率方面表现出显著优势，但其操作过程中也面临一系列经济层面的难点。这些难点主要体现在设备投资、运营成本、技术复杂性和管理要求等方面。了解并克服这些操作难点，对于实现多阶段蒸汽注入策略的经济优化具有重要意义。

4.1 设备投资成本高

实施多阶段蒸汽注入策略需要投入大量专业设备，包括蒸汽发生器、注入管道、压力控制装置、温度传感器和监测系统等。这些设备的采购、安装和维护都需要高昂的资金投入。尤其在初始阶段，设备投资成本较大，会给企业带来较大的财务压力。此外，部分高精度监测设备和控制系统可能需要进口，进一步增加了项目成本。

4.2 运营成本增加

多阶段蒸汽注入策略的实施过程中，运营成本较高。这些成本包括能源成本、人力成本以及维护成本等，其中，能源成本是指蒸汽注入过程需要消耗大量能源，特别是在多个阶段反复注入蒸汽时，能源消耗更加显著。能源价格波动也会直接影响到运营成本。而人力成本则是指多阶段注入策略需要大量专业技术人员进行操作和维护，同时，人员培训和技术支持也是一笔不小的开支。维护成本则是指设备的高频使用和复杂的操作流程，会增加设备的磨损和故障概率，

设备的维修和保养费用就会比较高。

4.3 技术复杂性高

多阶段蒸汽注入策略涉及复杂的技术操作和精细的参数控制，包括注入压力、注入温度和注入时间的精确调节。这对操作人员的技术水平和设备的控制精度提出了很高的要求。技术复杂性高不仅增加了操作难度，还增加了培训和管理成本。此外，操作过程中如果出现技术失误或设备故障，可能会导致严重的经济损失。

4.4 地层适应性评估复杂

在实施多阶段蒸汽注入策略前，需要进行详细的地层适应性评估，包括地质构造、渗透性和孔隙度等多项参数的分析。评估过程复杂且耗时，需要大量的专业设备和技术支持。地层适应性评估结果的准确性直接影响到后续蒸汽注入的效果和经济性，因此评估过程中任何疏漏或误差都会带来巨大的经济风险。

5 稠油热采多阶段蒸汽注入策略的经济优化

针对稠油热采多阶段蒸汽注入策略在操作过程中面临的设备投资成本高、运营成本增加、技术复杂性高、地层适应性评估复杂等操作难点，可以从经济角度思考相应的优化方案。

5.1 优化设备投资

在采购设备的时候，可以通过集中采购和批量订购的方式，与设备供应商谈判获得更优惠的价格。此外，也可以鼓励设备制造企业进行技术创新，开发出性价比更高的蒸汽注入设备。对于投资较大的设备，如高精度监测设备和控制系统，可以通过共享和租赁的方式降低初期投资成本。建立设备共享平台，多个油田项目可以共同使用一套设备，分摊成本。同时，还可以推动蒸汽注入设备国产化进程，减少对进口设备的依赖。鼓励本土企业研发生产符合技术要求的设备，降低采购成本和后续维护费用。

5.2 控制运营成本

在能源优化使用方面，可以优化蒸汽注入方案，减少不必要的能源浪费。采用先进的能源管理系统，实时监控和调节蒸汽注入过程中的能源消耗。在条件允许的情况下，探索使用替代能源，如太阳能、地热等，降低对传统能源的依赖，减少能源成本波动带来的影响。在人力成本管理上，一方面要通过系统化的培训，提高操作人员的技术水平和操作效率，减少操作失误带来的经济损失。另一方面，也可以逐步采用自动化控制系统，减少对人力的依赖，提高操作精度和效率，从而降低人力成本。

5.3 简化技术操作

开采单位可以制定多阶段蒸汽注入的标准化操作流程和技术规范，减少操作过程中的复杂性和不确定性，提高操作效率和准确性。同时，建立技术支持平台，提供实时在线技术支持和指导，帮助操作人员解决技术难题，降低因技术复杂性导致的操作难度和经济损失。也可以采用先进的模拟仿真技术，进行多阶段蒸汽注入策略的模拟实验，优化注入参数，减少实际操作中的试错成本。

5.4 提高地层适应性评估效率

开采单位可以引入快速地层评估技术，缩短地层适应性评估的时间，提高评估效率。通过先进的地质分析工具，快速获取地层信息，减少评估过程中的时间和成本消耗。利用多源数据融合技术，综合分析地质构造、渗透性、孔隙度等多项参数，提高地层适应性评估的准确性，减少评估过程中的误差和经济风险。同时，组建专业的地层评估团队，提高地层适应性评估的专业水平和效率。通过团队合作和经验积累，提升地层评估的质量和经济性。

5.5 经济效益评估与风险管理

开采单位可以建立动态经济效益评估系统，实时监控和分析多阶段蒸汽注入策略的经济效益。根据实际运营数据，动态调整策略，优化经济效益。还可以建立完善的风险管理机制，识别和评估多阶段蒸汽注入过程中可能出现的经济风险。通过风险预警和应对措施，降低经济风险带来的不确定性。在投资之前，要进行详细的投资回报率分析，评估多阶段蒸汽注入策略的经济可行性。根据分析结果，制定合理的投资计划，确保投资收益的最大化。

综上所述，稠油热采技术需要通过提高油藏温度来降低稠油的黏度，从而提高其流动性和采收率。多阶段蒸汽注入策略通过分阶段、多次注入蒸汽，逐步提高油藏温度，优化热能利用，可以显著提高稠油采收率和经济效益。但也面临设备投资高、运营成本增加、技术复杂性高和地层适应性评估复杂等难题。因此，本研究提出通过优化设备投资、控制运营成本、简化技术操作、提高地层适应性评估效率和进行经济效益评估与风险管理等策略，实现多阶段蒸汽注入策略的经济优化，从而最大化稠油热采的经济回报。

参考文献：

- [1] 夏泊洢, 高清春, 孙立伟, 卢毓周. 稠油热采井全井段热流耦合规律 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(04):142-148.