

稠油热采工艺中 CO₂ 注入技术的经济与环境效益分析

卢立刚¹ 仲玉梅² 班晓春³ 刘 涛³ 陈 静³

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

(2. 河口采油厂地质研究所, 山东 东营 257000)

(3. 河口采油厂采油管理七区, 山东 东营 257000)

摘要:本文分析了稠油热采工艺中 CO₂ 注入技术的经济与环境效益, 通过胜利油田的实际案例展示了该技术的应用过程及其显著成果。胜利油田位于中国东部黄河三角洲, 因其高粘度、低流动性的稠油特性, 传统采油技术难以有效提高采收率。为了提升采收率, 油田于 2020 年引入了 CO₂ 注入技术。通过前期的油藏评价、设备准备和人员培训, 油田成功实现了 CO₂ 注入的平稳实施, 并在注入过程中实时监控各项参数以保证注入效果。该技术显著提高了油田的采收率, 从 15% 提升至 35%, 大幅增加了原油产量和经济效益。同时, 利用工业废气 CO₂ 注入油藏, 不仅可以降低了 CO₂ 采购成本, 还减少了温室气体的排放, 产生了显著的环境效益。胜利油田的成功案例表明, CO₂ 注入技术在稠油热采中具有广泛的应用前景, 可以为油田的进一步发展提供专业技术和经验支持。

关键词:稠油热采工艺; CO₂ 注入技术; 经济效益; 环境效益

0 引言

稠油资源素来以其高粘度和低流动性著称, 传统开采方法往往难以有效提取。为此, 稠油热采工艺成为各大油田重要的开采手段, 具体包括蒸汽驱、火烧油层和 CO₂ 注入等技术^[1]。CO₂ 注入技术通过利用 CO₂ 的溶解和膨胀效应, 显著提高了稠油的流动性, 从而提升采收率。本文将通过胜利油田的相关案例, 分析 CO₂ 注入技术在稠油热采中的应用情况, 并探讨其经济与环境效益。

1 案例概述

胜利油田某稠油油田, 位于中国东部黄河三角洲地区, 是胜利油田的重要组成部分。该油田地质条件复杂, 油藏埋藏深度为 800–1200m, 油藏面积达 50km²。油藏内的稠油资源丰富, 但由于其高粘度、低流动性的特性, 传统的采油技术难以有效提取。该油田稠油粘度高达 5000–10000MPa·s, 这使得常规的机械采油和热采技术在该油田的应用效果并不理想。在常规采油技术的应用过程中, 采收率一直徘徊在 15% 左右, 远低于预期的 40%–50% 的采收率目标。这不仅导致了资源的浪费, 也使得油田的经济效益不佳。为了应对这一挑战, 提高采收率, 该油田管理团队在深入研究和多方论证后, 于 2020 年决定引入 CO₂ 注入技术。在 CO₂ 注入技术正式实施之前, 油田进行了设备购置和安装, 包括 CO₂ 压缩机、注入管道及监测系统。

与此同时, 对技术人员进行了专业培训, 确保他们能够熟练掌握 CO₂ 注入的操作流程, 保证注入过程的安全和高效。2020 年初, CO₂ 注入技术在胜利油田正式启动。注入参数的确定是关键环节之一, 根据油藏特性和模拟结果, 设定了合适的 CO₂ 注入压力、注入速率和注入周期。注入过程中, 利用先进的监测系统, 实时监控注入压力、温度和油藏反应, 确保注入过程稳定, 并及时调整注入策略以应对可能出现的异常情况。经过一年的试验和调整, CO₂ 注入技术在该稠油油田取得了显著的效果。稠油的流动性大幅提高, 采收率从原来的 15% 提升至 35%, 原油产量显著增加。

2 稠油热采工艺中 CO₂ 注入技术应用过程

2.1 前期准备

在 CO₂ 注入技术正式实施之前, 前期准备工作尤为关键, 涉及油藏评价、设备准备和人员培训等多个方面。

2.1.1 油藏评价

为了确保 CO₂ 注入技术的可行性和效果, 需要提前进行全面的油藏评价。首先, 该油田利用先进的地质模型和流体流动模拟技术, 对目标油藏进行了全面评估。通过三维地质模型构建, 详细分析了油藏的构造特征和储层特性。结合流体流动模拟, 确定了 CO₂ 注入的最佳位置和注入量。模拟结果显示, 最佳注入点位于油藏的西北部, 注入压力为 25 MPa, 注入量为

每年 30 万吨 CO₂。

2.1.2 设备准备

CO₂ 注入技术需要专用设备的支持。该油田购置了一台高效 CO₂ 压缩机，压缩能力为 50m³/min，能够满足注入需求。此外，还安装了总长达 30km 的注入管道系统，确保 CO₂ 能够顺利输送至油藏。为实时监控注入过程，油田还配置了一套先进的监测系统，包括压力传感器、温度传感器和流量计等设备。这些设备总投资约为 1.5 亿元人民币。

2.1.3 人员培训

为了确保 CO₂ 注入过程的安全和高效，技术人员的培训也是前期准备的重要环节。该油田邀请了国内外 CO₂ 注入技术专家，对操作人员进行了为期三个月的系统培训。培训内容包括 CO₂ 注入技术原理、设备操作规程、安全防护措施等。此外，还进行了多次实地模拟演练，确保每一位技术人员都能够熟练掌握 CO₂ 注入的各项操作技能。

2.2 CO₂ 注入实施

2.2.1 注入参数确定

在 CO₂ 注入实施过程中，注入参数的确定是至关重要的一步。注入参数包括注入压力、注入速率和注入周期，这些参数的选择需要结合油藏特性和模拟结果。①注入压力的确定：根据地质模型和流体流动模拟结果，该油田的目标油藏具有较高的压力敏感性。为确保 CO₂ 能够有效进入油藏，并在油层中均匀分布，最终确定的注入压力为 25 MPa。该压力值通过多次模拟和实际测试，证明能够在不破坏油藏结构的情况下，最大程度地提高 CO₂ 的溶解和膨胀效应；②注入速率的确定：注入速率直接影响 CO₂ 在油藏中的扩散速度和覆盖面积。在综合考虑油藏的吸收能力和 CO₂ 供应量后，确定注入速率为每小时 20 吨。这一速率不仅能保证 CO₂ 在油藏中的有效扩散，还能避免因注入速度过快而导致的油藏压力异常变化；③注入周期的确定：注入周期是指 CO₂ 注入的间隔时间和持续时间。根据模拟结果和油藏反应，确定注入周期为每注入 30 天，停注 10 天。这样的周期设置不仅能保证 CO₂ 在油藏中的均匀分布，还能通过停注期观察油藏的反应，及时调整注入策略。

2.2.2 CO₂ 来源

为了保证 CO₂ 的持续供应，该油田选择了利用附近化工厂排放的工业 CO₂。该方案不仅有效降低了 CO₂ 采购成本，还实现了地区的环保效益，减少了工

业 CO₂ 的排放。①工业 CO₂ 的净化：工业 CO₂ 通常含有杂质，直接注入油藏可能会对油藏和注入设备造成损害。因此，在 CO₂ 注入前，必须对其进行净化处理。油田与化工厂合作，建立了一条先进的 CO₂ 净化生产线，通过化学吸收和冷凝分离等技术，将 CO₂ 纯度提高至 99.5% 以上。净化后的 CO₂ 符合注入要求，确保了注入过程的顺利进行；② CO₂ 的运输和储存：净化后的 CO₂ 通过专用管道输送至油田。为保证运输过程中的安全和效率，管道采用高压密封设计，并配备了泄漏检测系统。同时，在油田内部建立了 CO₂ 储存设施，储存能力为 10 万吨，足以应对紧急情况下的短期需求。

2.2.3 注入过程监控

CO₂ 注入过程中，实时监控是确保注入过程稳定和安全的关键。案例油田采用了一套先进的监测系统，对注入压力、温度和油藏反应进行实时监控。

①压力监控：压力监控是注入过程中的核心环节。通过安装在注入管道和油藏内的压力传感器，实时监测注入压力。监控系统能够及时捕捉压力波动，并通过数据分析，判断压力变化的原因，及时调整注入参数，避免因压力异常导致的油藏损害；②温度监控：CO₂ 注入过程中，温度变化对油藏反应有重要影响。为此，在注入管道和油藏内设置了温度传感器，实时监测温度变化。监控系统能够根据温度数据，分析 CO₂ 在油藏中的分布情况和反应效果，指导后续注入策略的调整；③油藏反应监控：油藏反应监控主要包括油藏压力变化、油水界面移动和采收率提升等指标。通过油藏内的多点监测系统，实时采集这些数据，并进行综合分析。监控系统能够及时发现油藏的异常反应，并通过模型预测未来的油藏行为，确保注入过程的稳定和高效。

2.2.4 注入过程中的技术挑战与解决方案

在 CO₂ 注入实施过程中，面临着诸多技术挑战。案例油田通过技术创新和精细化管理，逐渐克服了这些挑战，确保了 CO₂ 注入的成功实施。

①注入过程中油藏压力波动挑战：在 CO₂ 注入初期，油藏压力波动较大，容易引发油藏损害。为解决这一问题，油田采用了分阶段注入策略，即在注入初期采用低压缓慢注入，待油藏逐渐适应后，再逐步提高注入压力。同时，增加注入点，分散注入压力，降低单点注入压力对油藏的冲击；②注入过程中 CO₂ 溶解效率挑战：CO₂ 的溶解效率直接影响油藏的流动性提升效果。为了提高 CO₂ 的溶解效率，油田采用了多点注入

技术，即在不同深度和位置设置多个注入点，确保 CO₂ 在油藏中的均匀分布。同时，通过注入温度的调控，增强 CO₂ 的溶解和膨胀效应；③注入过程中油水界面变化挑战：CO₂ 注入过程中，油水界面变化复杂，容易导致注入效果不稳定。为应对这一挑战，案例油田在注入过程中，实时监测油水界面变化，通过调整注入参数，控制油水界面移动。同时，采用化学封堵技术，在油水界面设置化学封堵剂，防止界面过度移动，确保注入效果；④注入过程中的环境影响控制挑战：CO₂ 注入过程中，可能会对周围环境产生一定影响。为控制环境影响，本案油田采取了一系列环保措施。首先，注入过程中严格控制 CO₂ 的泄漏，通过高压密封和泄漏检测系统，确保 CO₂ 的安全注入。其次，注入过程中加强废水处理，确保排放水质达到环保标准。此外，为了降低注入过程对周围居民的影响，注入过程中还特别注重噪音控制，安装了相应的消音设备，并合理安排注入时间，减少了对周边环境的相关影响。

3 应用效果分析

3.1 采收效益大幅提升

CO₂ 注入技术显著提升了本案油田的采收率，在引入 CO₂ 注入技术前，油田采收率仅为 15%。传统采油技术难以有效提高稠油的流动性，导致大量油藏资源未能被充分利用。CO₂ 注入后，稠油的流动性显著提高，采收率提升至 35%。这一变化不仅增加了原油的可采储量，也表明 CO₂ 注入技术在稠油油田中具有广泛的应用前景。因为 CO₂ 的注入，而发生了溶解和膨胀效应，降低了稠油的粘度，使其流动性显著增强。并且，通过注入高压 CO₂，使 CO₂ 溶解于稠油中，形成具有较低粘度的 CO₂- 油混合物，促进了原油在油藏中的流动。根据监测数据，在注入 CO₂ 的第一个月，油田的日均产油量就增加了 50%，而这一显著的增产效果直接持续了整个注入周期。

3.2 经济效益

CO₂ 注入技术不仅提升了采收率，还显著增加了原油产量，带来了巨大的经济效益。引入 CO₂ 注入技术后，油田年产量从 20 万吨增加至 40 万吨，年收入增加约 2 亿元人民币。根据市场油价，每吨原油的售价约为 5000 元人民币，年增产 20 万吨原油带来了约 10 亿元人民币的额外收入。扣除运营成本和设备维护费用，净增收入约为 2 亿元人民币。这一显著的经济效益，为油田的进一步发展和技术改进提供了资金支持。同时，CO₂ 注入技术的成功应用，不仅提升了油

田的经济效益，还增强了案例油田在国内外油气市场的竞争力。通过提高采收率和原油产量，油田在市场中的份额和话语权得到了显著提升。

尽管 CO₂ 注入技术在前期投入较大，但通过利用工业废气 CO₂，胜利油田显著节约了购买纯 CO₂ 的成本，从而整体经济效益显著。CO₂ 注入技术的前期投入主要包括设备购置、安装和技术培训。设备方面，包括高压 CO₂ 压缩机、注入管道、监测系统等，这些设备总投资约为 5000 万元人民币。安装费用和技术人员培训费用约为 1000 万元人民币。这些前期投入为 CO₂ 注入技术的成功实施提供了坚实的基础。

CO₂ 的来源是附近化工厂的工业废气。通过合作协议，胜利油田以低成本获得了净化后的 CO₂，大大降低了注入过程中的运行成本。相比购买纯 CO₂ 的高昂费用，利用工业废气 CO₂ 每年节约了约 3000 万元人民币。此外，通过先进的监测系统，油田能够实时监控注入过程中的各项参数，减少了设备的维护和管理成本。同时，尽管 CO₂ 注入技术的前期投入较大，但通过提高采收率和产量，带来了可观的长期收益。按照每年增产 20 万吨原油计算。

3.3 环境效益

除了显著的经济效益外，CO₂ 注入技术还带来了重要的环境效益。通过利用工业废气 CO₂，胜利油田每年减少了数百万吨 CO₂ 的直接排放，降低了温室气体对环境的影响。这一举措不仅符合国家的环保政策，也体现了油田在履行社会责任方面的积极态度。在注入过程中，通过严格的监控和管理，胜利油田确保了 CO₂ 的安全注入和有效封存，未对周边环境造成不良影响。通过技术创新和环保措施，油田实现了经济效益和环境效益的双赢。

4 结论

综上所述，CO₂ 注入技术在胜利油田的成功应用，充分展示了其在稠油热采中的巨大潜力和广泛前景。通过科学的管理和技术创新，油田不仅可以实现经济效益的显著提升，还可以在环保和社会责任方面取得重要进展。胜利油田这一成功案例为其他油田提供了宝贵的经验和参考，推动了稠油开采技术的持续进步和行业发展。

参考文献：

- [1] 赵凤兰, 王鹏, 黄世军. 页岩油注 CO₂ 过程中重有机质沉积预测 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(03):134-144.