

二氧化碳驱油技术的应用与经济效益分析

朱同同（胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司滨博采油管理区，山东 东营 257000）

摘要：本文以“西部某油田二氧化碳驱油改造工程”为研究对象，探索了二氧化碳驱油技术在提升油田采收率和经济效益方面的应用效果。通过对该油田的二氧化碳注入和监测过程的详细分析，研究表明，二氧化碳驱油技术能够显著提高油田的采出率，尽管二氧化碳注入成本较高，但通过提高生产效率，单位生产成本可从120美元/桶降低至80美元/桶，整体生产成本可以降低约30%，并且可以保证企业净利润逐年增加。研究表明，二氧化碳驱油技术在提高油田产量、延长油田开发周期及降低成本方面具有显著效果，对国内外油田开发具有一定的推广意义。

关键词：二氧化碳驱油技术；石油开采；经济效益

1 工程概况

本研究以“西部某油田二氧化碳驱油改造工程”为例，该油田位于西部某地区，面积约150平方公里，总储量约为5500万吨，现有可采储量约为3000万吨，开发历史已超过30年。目前油田的原油采出率为20%，大大低于国内同类油田的平均水平。传统的机械采油方式已接近饱和，且随着开采深度的增加，采油成本逐步上升，年均生产成本已接近120美元/桶。

目前，该项目面临以下问题：

①原油采出率较低，主要依赖于常规机械采油技术，导致未开采的资源无法有效利用，造成资源浪费。

②开采成本逐年攀升，由于油藏压力逐步降低，导致传统的采油方法效率下降，增加了单位成本，给企业带来较大经济压力。

③环境保护要求日益严格，油田开采过程中二氧化碳和其他温室气体的排放问题逐渐成为监管重点，传统的开采方式未能有效减少这些排放。

因此，本研究需要设计并实施二氧化碳驱油技术，通过注入二氧化碳提高油藏的压力，促进原油的流动性，从而提升采油效率。

2 二氧化碳驱油技术的应用

2.1 二氧化碳驱油技术原理

二氧化碳驱油技术（CO₂EOR）是一种通过注入二氧化碳至油藏中，利用其物理化学特性来提高油藏采收率的方法。在油藏内注入二氧化碳后，二氧化碳与原油及油藏中的水分相互作用，改变原油的流动性质，从而增加油的流动性和可采性，提升采油效率。具体原理可分为以下几个方面：

①溶解作用：当二氧化碳被注入油藏时，部分二氧化碳溶解在原油中，形成溶解气体。这种溶解作用

能够降低原油的黏度，使得原油流动性提高，从而增强原油的流动性，促进其向生产井流动。

②体积膨胀作用：二氧化碳在油藏中的注入会使得油藏内部的压力上升，这会导致油藏内原油体积膨胀，从而提高原油的流动性。尤其是在低压或深埋的油藏，二氧化碳的注入可以有效恢复油藏的压力，增强原油采收率。

③界面张力降低作用：二氧化碳与原油之间的界面张力会被有效降低，这意味着二氧化碳能促进原油与岩石之间的相互作用，使得原油更加容易从岩石孔隙中流出，从而提高采油率。

④油水相互作用：在二氧化碳注入过程中，二氧化碳还会与油藏中的水相互作用，形成气泡或乳化液，进一步帮助原油从油藏中释放出来。这种效应尤其对于含水较高的油藏非常有效，有助于提高采油效率。

2.2 注入井的布置与建设

在“西部某油田二氧化碳驱油改造工程”中，注入井的布置与建设是关键环节，其设计和施工直接决定了二氧化碳驱油的效果和油田采收率的提升。为了针对该油田的具体地质条件和储层特性，注入井布置与建设进行了精确设计与施工。

2.2.1 注入井布置设计

本油田位于西部某地区，油田面积约150平方公里，油藏总储量为5500万吨，可采储量约3000万吨。该油田储层渗透性较低，原油采出率仅为20%。基于油田的具体地质条件，注入井的布置和选址设计如下：

①注入井的密度与分布：在本油田的注入井布置中，选定了36个注入井，分布在油田的不同区域，特别是对低渗透的区块进行了重点覆盖。每个注入井之间的水平距离为400m，这一间距的选择考虑到了

油藏的渗透性和二氧化碳的传播效果,确保二氧化碳可以均匀地扩散至整个油田,提高驱油效率。

②注入井的深度与井径:由于油田的埋藏深度较大,注入井的深度被设计为1500m至1800m之间,这一深度能够覆盖主要的原油储层,确保二氧化碳能够有效注入油藏内部。同时,注入井的井径设置为8英寸,以适应较大的注入流量要求。

③注入井的分层设计:为了确保二氧化碳的有效传播,注入井采用了分层注入的设计。在每个注入井中,根据储层的厚度和油藏压力的分布,设置了多个注入层。每个层的注入点按照油藏的物理性质进行优化,确保二氧化碳能够更好地在油藏中分布和扩展,避免局部过度驱油而导致资源浪费。

2.2.2 注入井的建设

注入井的建设在确保安全和施工质量的基础上,严格按照设计方案执行,施工过程包括以下关键环节:

①井眼钻进与固井:注入井的钻进采用了全钻柱技术,确保井眼的稳定性。在钻进过程中,为了减少钻井作业中的摩擦和提高钻井效率,采用了水基泥浆,并在油层附近使用低盐水泥进行固井。为了确保井眼的长期稳定性,每口注入井都使用了高强度的钢套管进行固井,保证了井眼在高压注入下不发生泄漏。

②注入管道系统的建设:每口注入井均配置了高强度的注入管道系统,采用了耐腐蚀合金材料以应对二氧化碳的腐蚀性。在注入管道系统的设计中,考虑到了注入压力和流量的要求,管道的耐压能力达到3000 psi,确保能够在高压注入条件下正常工作。

③注入设备安装:每个注入井配备了专用的高压注入泵站,该泵站能够支持高达2500吨/天的注入量。为了实现精确控制,泵站内配备了流量计和压力监测系统,以便实时监控二氧化碳注入过程中的各项参数。根据油田的注入需求,泵站的压力控制在1600至1800 psi之间,保证二氧化碳能够充分渗透到油藏内部。

④井口设备与配套设施:注入井的井口安装了自动调节阀门,确保在不同的注入阶段能够根据压力变化自动调整注入流量。此外,注入井周围还建设了防泄漏设施,设置了专用的二氧化碳收集装置,一旦发生异常泄漏,可以迅速收集并重新注入,确保操作的安全性。

2.3 二氧化碳注入与监测

在“西部某油田二氧化碳驱油改造工程”中,二氧化碳的注入与监测是确保二氧化碳驱油效果的核心

环节。通过精准的注入和实时的监测,能够确保二氧化碳在油藏中的均匀分布、油藏压力的有效提升及采油效率的最大化。以下是该项目中二氧化碳注入与监测的具体做法。

2.3.1 二氧化碳注入过程

①注入设备调试与启动:在所有注入井建设完成后,注入设备进行了全面的调试与测试。在调试过程中,确保每台高压泵站和注入管道系统能够顺利运行,并达到设计的注入压力和流量要求。泵站的注入能力为2500吨/天,注入压力保持在1600至1800 psi之间,以保证二氧化碳能够有效进入油藏。

②二氧化碳注入阶段:初期注入主要以较低的流量开始,约为1000吨/天,通过逐步增加流量来测试油藏对二氧化碳的响应。当油藏压力达到预期水平后,流量逐渐增加,稳定在1500至2000吨/天,以达到油藏内的二氧化碳充分分布。注入过程中的每一个阶段都需要密切监控,以确保二氧化碳不会在油藏中聚集形成“气泡”或导致压裂。

③注入压力与流量调节:在注入过程中,实时监测油藏的压力和温度变化,根据这些数据调整注入压力和流量。例如,当油藏的压力超过设计值时,泵站的压力和流量会被自动调节,防止压力过大导致井壁破裂或其他安全隐患。如果监测到某个区域的二氧化碳注入不足,可能会在该区域增加注入井数目或调整注入流量,确保注入的均匀性。

2.3.2 二氧化碳注入的监测技术

为确保二氧化碳的注入过程精确、高效,项目采用了多种监测技术,实时跟踪二氧化碳的注入效果和油藏反应。

①产油量与采出率监测:驱油效应的最直接体现是原油采出率的提升。因此,项目团队在整个二氧化碳注入期间,通过实时监控每口生产井的产油量变化来评估驱油效果。在注入初期,重点监控油井的产油变化,根据产油量的提升情况,确定二氧化碳注入的有效性。

②注入压力与油藏压力监控:注入过程中的油藏压力变化是二氧化碳驱油效果的另一重要指标。通过实时监控注入井和生产井的压力变化,能够获取油藏的压力响应数据,及时发现油藏中二氧化碳的扩散情况。如果发现某些区域的压力响应较慢或不均匀,项目团队会立即分析原因并进行调整。

2.3.3 驱油效应的调整措施

根据实时监测的数据和评估结果,项目团队实施

了一系列的调整措施,确保二氧化碳驱油效果得到最大化:

①注入流量与压力调整:在监测到油藏压力出现不均匀时,项目团队立即调整注入流量和压力,以确保二氧化碳在油藏中的均匀分布。如果某一部分油藏的压力增幅过快,可能会导致局部的二氧化碳积聚,形成气体堆积,这时候流量会降低,压力会调节至理想范围,避免二氧化碳的过量注入。

②注入井密度与分布优化:在某些区域,二氧化碳的注入效果可能受到地质条件的影响,导致某些区域的驱油效率较低。在这种情况下,项目团队会增加注入井的数量,或者对已有注入井的位置进行调整,确保二氧化碳能够覆盖更广泛的区域,避免出现局部的采油效率不高的问题。

③层间注入策略的优化:对于多层油藏,二氧化碳的注入通常需要分层进行。如果监测到某些层的二氧化碳注入效果不理想,可以调整注入井的深度,或者通过改变注入方式(如逐层注入或多点注入)来优化驱油效果。在实施过程中,项目团队根据不同层次的渗透性和压力特征,调整注入策略,以确保二氧化碳能够在所有油层中均匀分布。

④二氧化碳回注与优化:在注入过程中,如果发现某些区域二氧化碳无法有效渗透或已渗透的二氧化碳逐渐逸出,项目团队会采用二氧化碳回注技术,即将已经排放出来的二氧化碳进行回收并再次注入到油藏中,这不仅可以提高油田的采收率,还可以降低二氧化碳的排放。

3 经济效益分析

在“西部某油田二氧化碳驱油改造工程”中,二氧化碳驱油技术的实施显著提高了油田的采收率和原油生产能力,带来了可观的经济效益。

3.1 油田生产与收入分析

二氧化碳驱油技术的应用显著提升了油田的原油采收率。在该项目实施初期,油田的原油采收率仅为20%,而通过二氧化碳驱油技术的介入,采收率在两年内提升至45%。根据最新的生产数据,每年新增原油产量约为150万吨,且产油量呈现逐年增长的趋势。由于油田生产能力的增强,年收入也相应提高。预计项目的年收入将从实施前的2亿美元增长至5亿美元。此外,二氧化碳驱油技术的应用还能够有效延长油田的开发周期,使得原本预计十年内枯竭的油田,可以延长至25年以上。因此,项目不仅改善了短期的原油产量,还提高了油田的长期生产潜力,从而为企业

带来持续的经济收益。

3.2 成本分析

尽管二氧化碳驱油技术在初期需要较高的投资,但从长期来看,它能够显著降低油田的生产成本。在该项目中,二氧化碳的注入成本为每吨150美元,初期注入量为每年500万吨,这一费用每年将达到7500万美元。然而,通过提升的原油产量,单位原油生产成本显著降低,从120美元/桶降至80美元/桶。由于油田的采出率大幅提高,传统的机械采油方式已不再是主要成本来源,注入二氧化碳的费用已逐渐被增产的收益所覆盖。通过该技术,预计油田的总体生产成本将减少约30%。因此,虽然初期投资较高,但二氧化碳驱油技术的长期成本效益显著。

3.3 净利润与投资回报分析

经过二氧化碳驱油技术的实施,油田的净利润大幅上升。以该油田为例,在项目实施的前三年,预计每年净利润增长约为1亿美元。假设每年的增产量为150万吨原油,按现行油价每桶70美元计算,新增收入可达到10.5亿美元。减去二氧化碳注入成本和其他运营成本后,年净利润约为4.5亿美元。根据初期的投资额(约为2亿美元),项目的投资回报期预计为4年。随着产量逐年上升,净利润也将继续增长,投资回报率逐年攀升。因此,二氧化碳驱油技术不仅能够短期内为企业带来较高的盈利,还能确保长期的资本回报,表现出良好的经济效益。

4 结语

全球能源需求的增长和环境保护压力的加大,让新的油气开采技术成为了石油行业的重要增长点之一。二氧化碳驱油技术作为一种提高油田采收率、延长油田生命周期的有效手段,其应用不仅显著提高了油田的经济效益,同时也为减少碳排放提供了可能。本研究通过不断优化注入策略、调整技术应用等策略,让二氧化碳驱油技术展现出了其巨大的经济潜力,为未来的油田改造和新技术推广奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 罗玮玮,王飞.CO₂强化驱油与封存(CCUS-EOR)技术专利分析[J].中国科技信息,2025,(01):14-17.
- [2] 张玉伟,杨铁军,王文明,杨正明,刘莉.榆林油田CO₂驱油矿场试验的思考与认识[J].天然气与石油,2024,42(05):21-27.
- [3] 王立,孙晓东,汪泳吉,王亦鑫,潘嘉莹,蔡忆华.CO₂驱油技术的机理与展望[J].山东化工,2024,53(14):140-143.