

# 二氧化碳和氮气及烟道气吞吐采油物理模拟实验

## ——以辽河油田曙一区杜84块为例

付美龙<sup>1</sup>, 熊帆<sup>1</sup>, 张凤山<sup>2</sup>, 高远文<sup>2</sup>, 郑观辉<sup>2</sup>, 田华<sup>2</sup>, 于兰春<sup>2</sup>

(1. 长江大学 石油工程学院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国石油辽河石油勘探局 工程技术研究院, 辽宁 盘锦 124010)

**摘要:** 针对辽河油田曙一区杜84块超稠油主力含油区块在开采过程中普遍存在的吞吐周期高、开发效果逐渐变差等问题, 通过室内实验, 分析了二氧化碳和氮气在杜84块超稠油中的溶解性及其对原油粘度的影响; 通过物理模拟实验, 模拟了在注蒸汽辅助的条件下, 单纯注CO<sub>2</sub>、单纯注N<sub>2</sub>及模拟烟道气等多种吞吐方式的采油规律及增产机理; 研究了CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>的注入次序、注入量、注入比例及注入压力与放喷压力等参数对吞吐效果的影响。结果表明, 在杜84块超稠油主力含油区块开采过程中, CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>的注入次序为先注N<sub>2</sub>后注CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>的体积比为2:1, 注入压力为15MPa, 生产时放喷压力以地层压力7.35MPa为最佳。

**关键词:** 烟道气; 吞吐; 放喷压力; 物理模拟; 超稠油; 杜84块

**中图分类号:** TE357.42      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-9603(2010)01-0068-03

蒸汽吞吐是一种相对简单和成熟的开采技术, 该技术的发展趋势主要在于应用各种助剂改善吞吐效果。如注入天然气可降低原油粘度、增加油层的加热体积及油层能量, 在回采过程中能发挥气驱助排作用。CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>及烟道气等可以改善稠油油藏开采效果, 增加周期产量及油气比, 提高油层动用程度, 改善蒸汽吞吐效果<sup>[1-9]</sup>。辽河油田曙一区超稠油储量资源丰富, 含油面积为22.4km<sup>2</sup>, 探明石油地质储量为1.53×10<sup>8</sup>t。杜84块是曙一区超稠油主力含油区块, 相继投入蒸汽吞吐开采, 取得了较好的生产效果, 是辽河油田增储上产的重要区块。但目前普遍存在吞吐周期长、开发效果逐渐变差等问题。为了进一步提高杜84块超稠油的开发效果, 开展了CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和烟道气吞吐采油物理模拟研究<sup>[10-11]</sup>, 期为辽河油田超稠油油藏的开发提供技术支持。

### 1 CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在原油中的溶解性及其对原油粘度的影响

#### 1.1 CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在原油中的溶解性

CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在原油中的溶解度是指在一定温度和压力下, 单位体积地层原油能溶解的CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在

标准状况下的体积。气体溶解度的测定方法有闪蒸法和差异法2种。笔者采用闪蒸法。其步骤为: 先将约为配样器容积1/2~1/3的脱气、脱水原油装入配样器, 再向配样器中分别注入CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>并加热, 边注气体边搅拌, 直至温度和压力稳定在设计值, 使CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在油中达到溶解平衡; 最后将出口回压调至设计压力, 在室温条件下计量排出的气量。

结果表明(图1), CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在原油中的溶解度与压力均呈很好的线性关系, 并且溶解度均随压力的增加而增大。CO<sub>2</sub>在杜84块超稠油中的溶解度较小, 远低于其在一般轻质油中的溶解度; N<sub>2</sub>在杜84块超稠油中的溶解度也较小, 且大大低于CO<sub>2</sub>在该油样中的溶解度。

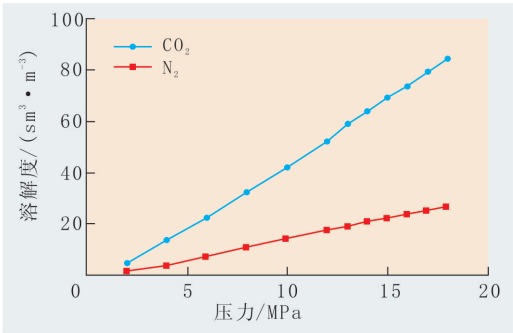


图1 CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>在杜84块超稠油中的溶解度与压力的关系

收稿日期:2009-10-15;改回日期:2009-12-15。  
作者简介:付美龙,男,副教授,博士,从事油田化学和提高采收率方面的教学与科研工作。联系电话:13607210109,E-mail:fm1990@tom.com。  
基金项目:湖北省教育厅重点科研项目“提高原油采收率用疏形大分子的研究”(D20091206)

1.2 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>对原油粘度的影响

首先测定不同温度下杜 84 块脱气原油的粘度,再在不同温度下测定脱气原油在地层压力条件下饱和 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后的原油粘度。将脱气原油转入 MC300 数字流变仪的样品筒<sup>[12]</sup>,加热温度调到设计温度,恒温 30min 后,测定脱气原油在该温度下的粘度,然后进行下一个温度点的粘度测试;测溶解 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后原油的粘度则是在每个温度点,向样品筒中分别注入 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>至压力为 7.35MPa,并搅拌使其达溶解平衡,再测该温度下溶解 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后原油的粘度。

比较杜 84 块脱气原油与溶解 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后的原油粘度发现(图 2):杜 84 块超稠油的粘度对温度非常敏感,随着温度升高而大幅度降低;溶解 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后原油粘度降低,温度越高,下降得幅度越大;且溶解 CO<sub>2</sub>后原油粘度下降幅度大于溶解 N<sub>2</sub>后原油粘度的下降幅度。这表明 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>均可溶入杜 84 块超稠油,CO<sub>2</sub>的溶解性比 N<sub>2</sub>强;溶入 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>后,杜 84 超稠油的原油粘度会降低,并且 CO<sub>2</sub>对原油性质的影响比 N<sub>2</sub>更明显。

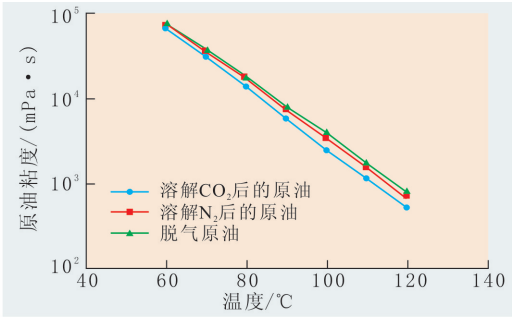


图 2 杜 84 块原油粘度与温度的关系

2 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>及烟道气吞吐室内实验

2.1 实验物理模型及步骤

实验采用的物理模型是根据杜 84 块平均油层渗透率和孔隙度,利用油层砂建立的松散砂线性物理模型,其长度为 100cm,直径为 5cm,孔隙体积为 563.2cm<sup>3</sup>,孔隙度为 28.7%,渗透率为 1.33μm<sup>2</sup>。

实验步骤包括:将模型抽空饱和地层水,进行油驱水建立束缚水饱和度;在压力为 7.35MPa 和温度为 38℃的条件下,注入温度为 250℃、干度为 75%、压力为 15MPa 的蒸汽;注气辅助蒸汽吞吐时先进行 1 个周期的蒸汽吞吐;第 2 周期开始注 CO<sub>2</sub>或 N<sub>2</sub>或烟道气(烟道气由 10%~15%的 CO<sub>2</sub>和 80%~85%的 N<sub>2</sub>组成,其中还含有少量未燃烧的气体),注入次

序是先注入气体,再注入蒸汽,气体的注入量为前一周蒸汽注入量的 20%。

2.2 辅助蒸汽吞吐效果对比

注 CO<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>和模拟烟道气(将 N<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>按 4:1 的体积比混合注入)辅助蒸汽吞吐与单纯注蒸汽吞吐对比后发现(图 3):注 CO<sub>2</sub>辅助蒸汽吞吐的效果最好,注模拟烟道气辅助蒸汽吞吐效果次之,注 N<sub>2</sub>辅助蒸汽吞吐效果最差,但均好于单纯注蒸汽吞吐的效果。从注气量来看,注 CO<sub>2</sub>辅助蒸汽吞吐的注入量最大,注模拟烟道气辅助蒸汽吞吐的注入量次之,注 N<sub>2</sub>辅助蒸汽吞吐的注入量最小,略高于单纯注蒸汽吞吐的注入量。注气量与原油采出程度密切相关,注气量越大,注入气体进入地层越深,与气体接触的原油越多,波及系数越高,原油采出程度也就越高。

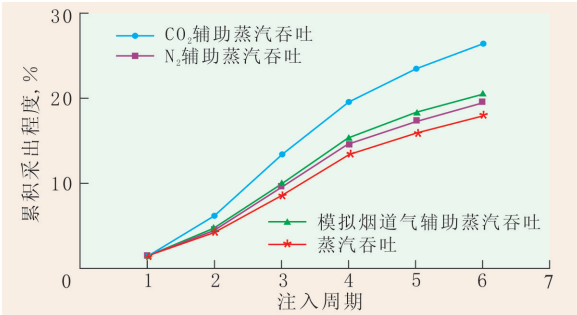


图 3 不同注入气体的吞吐效果

2.3 注入参数对吞吐效果的影响

2.3.1 注入次序

在CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>注入体积比分别为1:1,1:2和2:1的条件下,不同气体注入次序的模拟实验结果表明(图 4):辅助蒸汽吞吐时,在注入比例相同的条件下,先注入 N<sub>2</sub>的效果均好于先注入 CO<sub>2</sub>的。这是因为 CO<sub>2</sub>在地层油和水中的溶解度较大,先注入的 CO<sub>2</sub>在推进过程中不断溶入接触到的油和水,消耗了大量注入的 CO<sub>2</sub>,后续注入的 N<sub>2</sub>虽然可将剩余的 CO<sub>2</sub>推到地层深部,但此时 CO<sub>2</sub>的含量已不是最佳

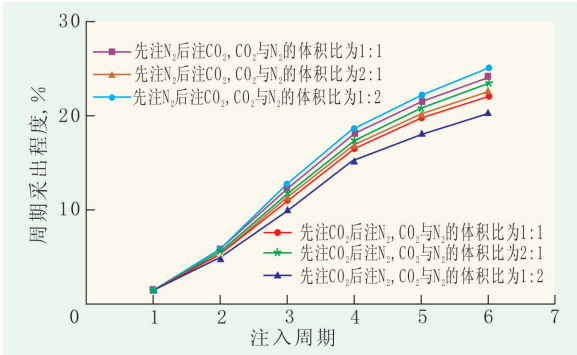


图 4 N<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>注入次序对采出程度的影响

浓度,注入气体与地层原油的相互作用不如先注 N<sub>2</sub> 效果好,其采出程度自然不如前者高。因此,在注入 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 进行吞吐开采时,先注入 N<sub>2</sub> 进行吞吐效果更好。

2.3.2 注入体积比

在 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 的注入体积比分别为 1:4,1:3,1:2,1:1,2:1,3:1 和 4:1,注气次序为先注 N<sub>2</sub> 再注 CO<sub>2</sub> 的条件下,进行 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 吞吐各 6 个周期,累积采出程度分别为 21.13%,21.67%,22.72%,24.16%,24.94%,25.55% 和 26.01%。由此可以看出,注 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 辅助蒸汽吞吐的采出程度随着混合气体中 CO<sub>2</sub> 气体比例的增高而增大,但当 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的注入体积比为 2:1 时,累积采出程度增加量变小。因此,注 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 辅助蒸汽吞吐时 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的注入体积比以 2:1 为最佳。

由实验结果可知,在注 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 辅助蒸汽吞吐时,对提高采出程度起主要作用的是 CO<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub> 在杜 84 原油中的溶解度明显高于 N<sub>2</sub>,原油溶解 CO<sub>2</sub> 后粘度的下降幅度比溶解 N<sub>2</sub> 后要大,因此,混合气体中 CO<sub>2</sub> 比例越大,溶入原油的 CO<sub>2</sub> 越多,原油粘度降低幅度越大,对原油流动能力的改善越显著,原油的采出程度也越高。

2.3.3 注入压力

在注入压力分别为 12,15 和 18MPa,注入次序为先注入 N<sub>2</sub>,再注入 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的体积比为 2:1 的条件下,每组实验各进行 3 个周期的吞吐。

由注入压力对采出程度的模拟结果可以看出(表 1),注入压力越高,注入量越大,原油采出程度越高,提高注入压力在一定程度上可以提高原油的采出程度,促进原油生产。但实际的注入压力又受 2 个因素的限制:①油层的破裂压力,注入速度如超过油层的破裂承受能力,易发生气窜,降低吞吐开采

效果;②注入设备的最高工作压力。因此,虽然高压注入可促进原油生产,但必须考虑注入设备的能力和油层破裂压力的限制。结合杜 84 块油层特征,注入压力选为 15MPa。

2.3.4 放喷压力

注入次序为先注入 N<sub>2</sub>,再注入 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的体积比为 2:1,放喷压力分别为 7.35MPa(地层压力)和大气压,且每组实验共进行 5 个周期的吞吐。由实验结果可见(表 2),放喷压力越低,即生产压差越大,采出程度越高,放喷压力为大气压时,其 5 个周期的累积采出程度为 18.53%,比放喷压力为地层压力时的累积采出程度高 1.42%。这是因为,降低放喷压力、增大生产压差后,原油的渗流动力增大,使原生产压差下不能流动的原油采出;同时减少了生产过程中的热量损耗。然而,在实际生产过程中,大幅度地降低放喷压力,致使 CO<sub>2</sub> 放压吸热,导致近井地层和井底井筒降温对储层造成冷伤害。因此,应保持在地层压力条件下开展吞吐生产。

| 表 2 放喷压力对采出程度的影响 |                    |                  |                  |                    |                  |                  |
|------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 周期               | 放喷压力为地层压力          |                  |                  | 放喷压力为大气压           |                  |                  |
|                  | 周期注气<br>孔隙体积<br>倍数 | 周期采<br>出程度,<br>% | 累积采<br>出程度,<br>% | 周期注气<br>孔隙体积<br>倍数 | 周期采<br>出程度,<br>% | 累积采<br>出程度,<br>% |
| 1                | 0.037              | 1.68             | 1.68             | 0.039              | 1.71             | 1.71             |
| 2                | 0.062              | 3.15             | 4.83             | 0.071              | 3.01             | 4.71             |
| 3                | 0.084              | 5.45             | 10.28            | 0.087              | 5.81             | 10.52            |
| 4                | 0.082              | 4.40             | 14.68            | 0.083              | 5.26             | 15.78            |
| 5                | 0.079              | 2.43             | 17.11            | 0.092              | 2.74             | 18.53            |

3 结 论

注 CO<sub>2</sub>,N<sub>2</sub> 和烟道气辅助蒸汽吞吐工艺技术是一项可持续发展的油田开采技术,其提高采出程度的效果超过了一般的增产措施。在杜 84 块的开采过程中,N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的注入次序为先注 N<sub>2</sub> 后注 CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的体积比为 2:1,注入压力为 15MPa,生产时放喷压力以地层压力 7.35MPa 为最佳,提高注入压力在一定程度上可以提高原油的采出程度,促进原油生产。生产时放喷压力越低,采出程度越高,所以在实际生产过程中,应最大程度地降低放喷压力,但要避免由于 CO<sub>2</sub> 放压吸热导致近井地层和井底井筒降温造成的冷伤害。因此,建议在保持地层压力条件下开展吞吐生产。

| 表 1 注入压力对采出程度的影响 |    |                |                |               |               |
|------------------|----|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 注入压力/<br>MPa     | 周期 | 周期注气孔<br>隙体积倍数 | 累积注气孔<br>隙体积倍数 | 周期采出<br>程度, % | 累积采出<br>程度, % |
| 12               | 1  | 0.032          | 0.032          | 1.43          | 1.43          |
|                  | 2  | 0.052          | 0.084          | 3.25          | 4.68          |
|                  | 3  | 0.081          | 0.165          | 5.80          | 10.48         |
| 15               | 1  | 0.036          | 0.036          | 1.74          | 1.74          |
|                  | 2  | 0.069          | 0.105          | 3.40          | 5.14          |
|                  | 3  | 0.084          | 0.189          | 5.75          | 10.89         |
| 18               | 1  | 0.041          | 0.041          | 2.88          | 2.88          |
|                  | 2  | 0.077          | 0.118          | 3.36          | 6.24          |
|                  | 3  | 0.106          | 0.224          | 6.17          | 12.41         |