

# 稠油油藏水平井多元热流体吞吐高效开采技术

杨兵<sup>1</sup>,李敬松<sup>1</sup>,张贤松<sup>2</sup>,姜杰<sup>1</sup>,官汝祥<sup>1</sup>

(1.中海油田服务股份有限公司,天津 300450; 2.中海石油研究总院,北京 100010)

**摘要:**水平井多元热流体吞吐高效开采技术是一项综合利用水平井、二氧化碳、氮气和蒸汽进行稠油开发的提高采收率新技术。根据稠油油藏的特点,对其进行了水平井多元热流体吞吐实验及数值模拟研究,揭示了其提高采收率机理。与常规蒸汽吞吐相比,水平井多元热流体吞吐高效开采技术具有3大优势:水平井可以提高注入能力与生产能力,且吞吐有效期长;二氧化碳能有效降低稠油粘度和残余油饱和度,提高驱油效率;氮气可以扩大注入蒸汽波及范围,降低注入蒸汽热损失。现场应用证实,该技术可有效提高蒸汽的利用效率,降低注入压力,提高油井产能,延长吞吐有效期,能够大幅度提高海上稠油产量。

**关键词:**稠油油藏 水平井 多元热流体吞吐 二氧化碳 氮气

**中图分类号:**TE345

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2014)02-0041-04

中国渤海油区稠油储量丰富,约占其石油地质总储量的70%。其中,相对密度大于0.92的稠油油藏约占80%;相对密度大于0.96且粘度大于150 mPa·s的稠油油藏约占40%<sup>[1]</sup>。目前海上稠油油藏主要采取冷采模式进行开发,其开发效果不理想,主要表现为油井产量、采油速度和采出程度低。注蒸汽是提高稠油油藏开发效果的有效手段<sup>[2]</sup>,但对于海上稠油油藏开发来说,受平台空间、载重、经济等因素限制,常规注蒸汽开发实施难度较大<sup>[3]</sup>。

为有效提高海上稠油油藏采油速度,增加稠油油藏产油量,笔者借助小型化热采设备,开展了水平井多元热流体吞吐开发技术研究,对水平井及多元热流体各组分提高采收率机理进行了分析,并通过数值模拟对气汽比、二氧化碳含量、注汽强度进行了优化。该技术在现场应用取得显著效果,为海上稠油油藏热采开发提供了技术借鉴。

## 1 技术综述

水平井多元热流体吞吐高效开采技术是利用火箭发动机的燃烧喷射原理生成多元热流体并由井口注入水平生产井内,以提高稠油油藏水平井开发效果。多元热流体主要由二氧化碳、氮气和蒸汽组成。综合利用蒸汽和气体的能量及驱油作用,结合水平井开采,发挥热量和气体在油层中的混合传

质作用,进而降低稠油粘度,提高原油流动性,扩大蒸汽波及体积,增加驱油动力,降低残余油饱和度,最终达到提高油井产油量、改善开发效果的目的。

水平井多元热流体吞吐高效开采技术的主要工艺流程包括:①下注热管柱。下入隔热油管,安装热采井口,为多元热流体注入做好准备。②注入多元热流体。连接地面注热管线,按设计参数通过水平井井口向井筒内注入多元热流体,注入过程中注意观察井口油套压变化及井口渗漏情况,以便及时调整注热参数。③焖井。当注入的多元热流体达到设计注入量时,在井口安装耐温压力表,开始焖井。焖井时间一般取方案设计时间。焖井过程中应注意观察井口压力变化并以此对焖井时间进行适当调整。④放喷。采用油嘴进行放喷。放喷初期应适当控制油嘴大小以防止出砂,并每隔8 h进行一次含砂测量,进而确定合理的油嘴大小。⑤下泵转抽。当油井停喷且井口无压力时,进行压井作业,拆热采井口,起注热管柱,下入生产管柱,进入机采阶段。

## 2 提高采收率机理

水平井多元热流体吞吐高效开采技术主要由水平井、注蒸汽、注二氧化碳和注氮气4个关键部分组成,须针对各组成部分提高采收率机理分别进行

收稿日期:2013-12-10。

作者简介:杨兵,男,工程师,从事油藏数值模拟和稠油热采研究。联系电话:(010)84522814, E-mail:89421969@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05024)。

研究。

### 2.1 水平井

稠油油藏在开发过程中,由于地层原油粘度高,流动性差,使得油藏与井筒之间的生产压差大,极易导致边底水突进,影响油井正常生产。水平井较长的水平井段增加了井筒与油藏的接触面积,在较小的生产压差下即可获得较高的油井产能,对边底水的突进有很好的抑制作用,因此目前广泛应用于稠油油藏的开发<sup>[4-6]</sup>。

与直井相比,水平井与油层接触面积大,进行多元热流体吞吐开发时,可提高注入能力和生产能力。通过渤海油区N油田水平井与直井注采参数对比(表1),分析认为水平井多元热流体吞吐开发相对于直井具有以下特点:①吸汽能力强,注入速度高,水平井注入速度约为直井的4倍;②注入压力低,注入量大。水平井单位井段的注入强度大幅降低,注入压力低,油层压力传播快,周期注入蒸汽量大;③产油能力强,有效期长。多元热流体吞吐后,水平井日产油能力为直井的3.6倍,周期产油约为直井的20倍,水平井生产有效期为376 d,而直井仅为40 d。

表1 渤海油区N油田直井与水平井注采参数对比

井别	射孔井段长度/m	平均注入速度/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	注入压力/MPa	周期注入蒸汽量/ $\text{m}^3$	周期产油量/ $\text{m}^3$	高峰产油量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	有效期/d
直井	11	50	17.5	1950	900	35	40
水平井	214	190	15.0	4700	19600	126	376

### 2.2 注蒸汽

稠油油藏注蒸汽开发,主要是利用蒸汽对稠油的加热降粘作用、对油层的解堵作用以及对油水相对渗透率的改变,进而改善孔隙渗流能力,增强稠油油藏的流动性。通过室内实验研究分析了温度对稠油粘度的影响,及蒸汽对油水相对渗透率的改变。

**加热降粘作用** 向油层注入高温、高压蒸汽后,蒸汽有效加热半径内地层温度升高,将油层及原油加热。由于稠油对温度有较强的敏感性,受热后粘度大幅降低。根据渤海N油田粘度测试数据,随温度增加,原油粘度急剧降低,200℃时原油粘度仅为9.3 mPa·s,较50℃时粘度(1 279 mPa·s)降低近137倍。

**蒸汽对油水相对渗透率的改变** 向油层注入高温、高压蒸汽后,受蒸汽高温作用,岩石表面的胶质和沥青质极性油膜被破坏,润湿性发生改变,油

层由亲油变为偏亲水或弱亲油<sup>[7]</sup>。由图1可以看出,温度越高,束缚水饱和度越高;在相同含水饱和度下,温度越高,油相相对渗透率越高,而水相相对渗透率越低。

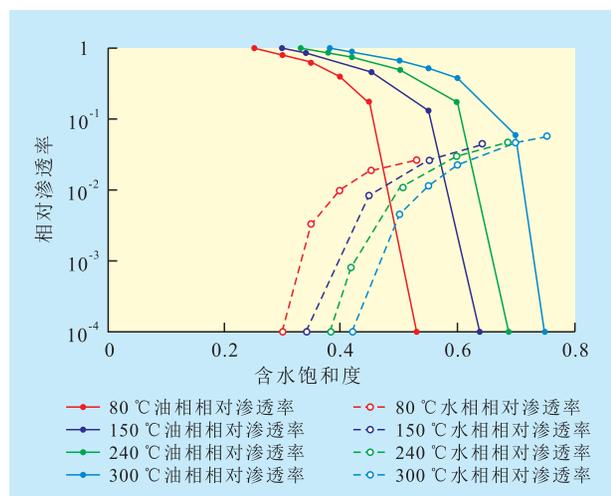


图1 不同温度下蒸汽驱油水相对渗透率曲线

### 2.3 注二氧化碳

二氧化碳作为一种有效的驱油剂,其提高采收率机理主要包括:溶解降粘、膨胀驱替、降低油水界面张力、改善储层物性和溶解气驱等。

**溶解降粘** 通过实验测定了不同溶解气油体积比及饱和二氧化碳条件下稠油粘度的变化。由图2可以看出,随着溶解气油体积比增加,原油粘度大幅降低。当温度为56℃时,原油粘度由463.87 mPa·s降至78.88 mPa·s,降幅为83%;当温度为180℃时,由于受加热降粘影响降粘幅度有所降低,约为50%。由图3可以看出,饱和二氧化碳的原油粘度随温度升高逐渐降低,与脱气原油粘温曲线变化趋势一致。低温时,饱和二氧化碳的原油粘度较脱气原油大幅降低;高温时,受热作用影响,二者差

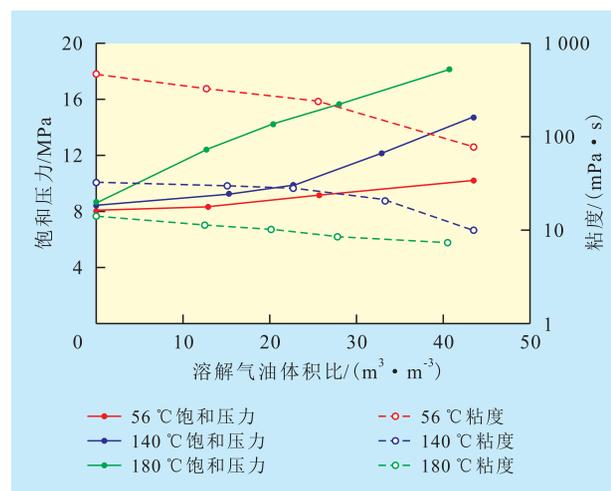


图2 二氧化碳溶解对稠油粘度的影响

别不大。由此可见,二氧化碳对稠油具有很好的降粘效果。稠油溶解二氧化碳后,粘度大幅降低,减小了原油向井底流动过程中的渗流阻力,提高了油水流量比,从而增加了油井产油量,改善了吞吐开发效果。

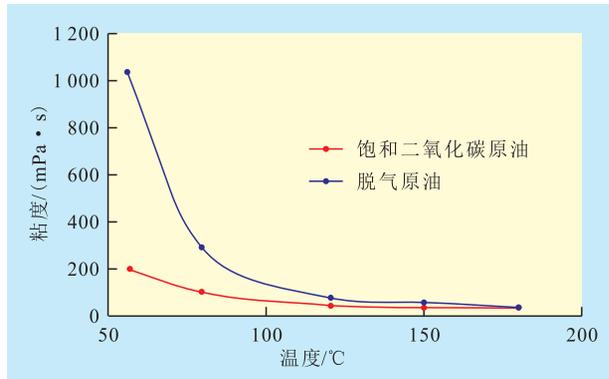


图3 饱和二氧化碳的原油粘度与温度关系曲线

**提高驱油效率** 采用一维填砂模型进行蒸汽驱和蒸汽—二氧化碳驱模拟实验。测得温度分别为140, 200和300℃时,蒸汽驱油效率分别为52.1%, 62.5%和69.2%;蒸汽—二氧化碳驱油效率分别为67.4%, 71.3%和73.4%。实验结果表明:不同温度下蒸汽—二氧化碳驱替采收率均高于单纯蒸汽驱采收率,低温时采收率提高幅度大于高温。这是由于二氧化碳溶于原油,使原油体积膨胀,有利于剩余油脱离岩石表面的束缚变为可动油,从而降低残余油饱和度,提高驱油效率。

## 2.4 注氮气

**隔热作用** 氮气的导热系数极低<sup>[8]</sup>,仅为0.028 W/(m·K)。稠油注热吞吐开发时,氮气进入地层后由于重力分异作用分布在油层上部,形成隔热层,减少了蒸汽向上覆岩层的传热速度,提高了注入蒸汽的利用效率。

**增加热波及体积** 氮气由于其良好的渗透性,且膨胀系数大,与蒸汽一同注入地层后体积膨胀,可将蒸汽推至地层深处,扩大蒸汽加热半径,增加蒸汽的波及体积,进而提高吞吐效果<sup>[9]</sup>。

**对稠油粘度的影响** 氮气在原油中溶解可降低稠油粘度,提高其流动性,其粘度降低幅度取决于氮气在稠油中的溶解度<sup>[10]</sup>,随着溶解度增加,原油粘度降低。与二氧化碳相比,氮气降粘能力稍差。

## 3 数值模拟

采用CMG数值模拟软件STARS模拟器对渤海

油区N油田水平井多元热流体吞吐开发进行了模拟研究。所建立模型网格系统为50×50×10,网格步长为10 m×10 m×1 m。油藏埋深为1 000 m,孔隙度平均为0.33,水平渗透率平均为4 500×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,含油饱和度平均为0.65,油层平均厚度为8 m,地层原油粘度为660 mPa·s。

### 3.1 气汽比

模拟研究气汽比分别为10, 50, 100, 200和300 m<sup>3</sup>/t时,水平井多元热流体吞吐的开发效果,由模拟结果(图4)可看出:随着气汽比的增加,采出程度逐渐增加,当气汽比大于200 m<sup>3</sup>/t时,采出程度增幅减小。

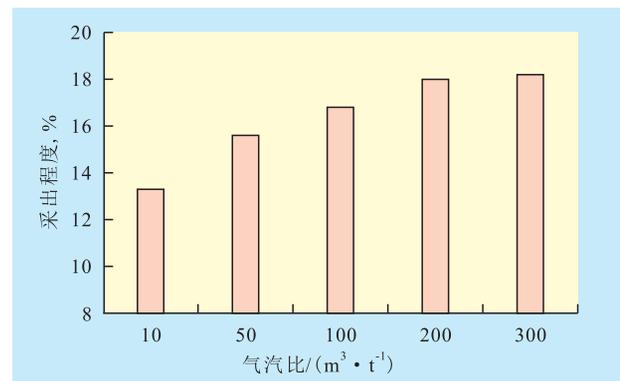


图4 不同气汽比对水平井多元热流体吞吐开发效果的影响

### 3.2 二氧化碳含量

与蒸汽驱相比,多元热流体的组成中增加了氮气和二氧化碳,其增油效果取决于氮气和二氧化碳的比例。由模拟结果(图5)可以看出,随着气体中二氧化碳含量的增加,多元热流体吞吐效果逐渐变好。

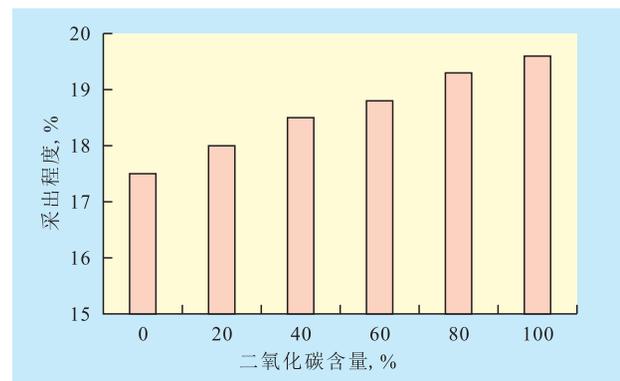


图5 二氧化碳含量对水平井多元热流体吞吐开发效果的影响

### 3.3 注汽强度

在气汽比为200 m<sup>3</sup>/t的情况下,模拟研究水平井段注汽强度分别为5, 10, 15, 20和30 t/m时的水

水平井多元热流体吞吐开发效果。由模拟结果(图6)可以看出,随着注汽强度的增加,采出程度逐渐增加,当注汽强度大于15 t/m<sup>3</sup>时,采出程度增幅减小。

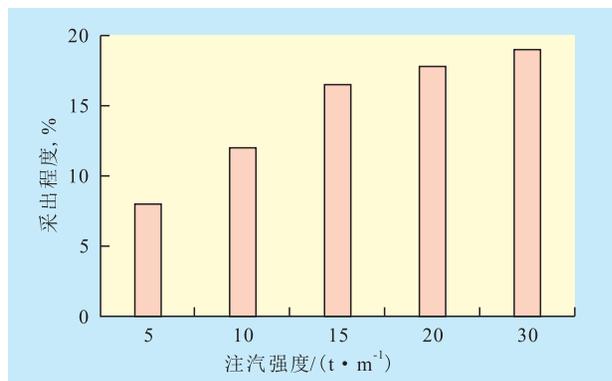


图6 注汽强度对水平井多元热流体吞吐开发效果的影响

## 4 应用实例

水平井多元热流体吞吐高效开采技术在渤海油田N油田得到了成功应用。自2010年第1口井实施作业以来,截至2012年底累积施工14井次,最高单井产油量达126 m<sup>3</sup>/d,为常规冷采的4倍;吞吐有效期为300~500 d,周期平均产油量为50~60 m<sup>3</sup>/d,约为冷采的2倍;累积增产原油约为6.5×10<sup>4</sup> t,单井增产原油为6 000~10 000 t。实施水平井多元热流体吞吐技术后,该油田的产油量由200 t/d增至600 t/d,采油速度大幅提高。

## 5 结束语

水平井多元热流体吞吐高效开采技术是一项综合了水平井开采、二氧化碳非混相驱、氮气非混

相驱和蒸汽吞吐等稠油开采方法的新技术。水平井能够降低注入压力,提高注入能力和生产能力;二氧化碳在稠油中有较好的溶解性,可大幅降低原油粘度,提高稠油流动能力,且能够使稠油体积膨胀,提高岩石表面原油的可动性,提高驱油效率;氮气具有良好的渗透性和隔热性,可以扩大蒸汽加热半径,降低薄层稠油油藏注热过程中向顶底层的热损失,提高注入热量的利用率。现场实践表明,水平井多元热流体吞吐高效开采技术可有效改善稠油油藏开发效果,其产能是冷采开发的2~4倍,可以成为稠油油藏提高产量和采油速度的有效手段。

### 参考文献:

- [1] 周守为.海上油田高效开发新模式探索与实践[M].北京:石油工业出版社,2007:45-52.
- [2] 刘文章.热采稠油油藏开发模式[M].北京:石油工业出版社,1991:37-40.
- [3] 唐晓旭,马跃,孙永涛.海上稠油多元热流体吞吐工艺研究及现场试验[J].中国海上油气,2011,23(3):185-188.
- [4] 万仁溥.中国不同类型油藏水平井开采技术[M].北京:石油工业出版社,1997:1-57.
- [5] 李立峰,岳湘安,李良川,等.底水油藏水平井开发水脊规律研究[J].油气地质与采收率,2013,20(1):89-91,95.
- [6] 王家禄,刘玉章,江如意,等.水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟[J].石油勘探与开发,2007,34(5):590-593.
- [7] 刘广友.孤东油田九区稠油油藏化学蒸汽驱提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2012,19(3):78-80,83.
- [8] 欧阳波,陈书帛,刘东菊,等.氮气隔热助排技术在稠油开采中的应用[J].石油钻采工艺,2003,25(1):1-3.
- [9] 刘文章.特稠油/超稠油油藏热采开发模式综述[J].特种油气藏,1998,5(3):1-7.
- [10] 孙建芳.氮气及降粘剂辅助水平井热采开发浅薄层超稠油油藏[J].油气地质与采收率,2012,19(2):47-49,53.

编辑 王星

欢迎广大科技人员踊跃投稿