

# 多层合采稠油油藏蒸汽吞吐后期油藏物性特征

——以孤岛油田中二中Ng5砂层组为例

王代流<sup>1,2</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中国石化胜利油田分公司 孤岛采油厂,山东 东营 257231)

**摘要:**孤岛油田中二中Ng5砂层组为多层稠油油藏。该油藏经过多轮次蒸汽吞吐开发后,由于其主力层Ng5<sup>3</sup>和Ng5<sup>4</sup>层的合注合采及蒸汽超覆的影响,导致层间动用差异程度大及油藏物性分布不均衡。利用数值模拟技术,研究多层合采稠油油藏蒸汽吞吐后期的油藏物性特征,主要包括油藏压力和油藏温度、剩余油饱和度、剩余油储量丰度。研究表明:截至2011年9月,经多轮次蒸汽吞吐生产后,研究区Ng5砂层组的压力保持水平仅为42.93%,平均地层温度上升约2℃;Ng5砂层组中吞吐井数少的区域控制程度低,是高剩余油饱和度分布的区域;剩余油储量丰度不仅与剩余油饱和度有关,还与油层的有效厚度密切相关;高剩余油储量丰度区域主要位于构造高部位及距离边水较远的部位。

**关键词:** 蒸汽吞吐 数值模拟 剩余油分布 稠油油藏 多层合采 孤岛油田

**中图分类号:** TE345

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)03-0068-04

胜利油区孤岛油田中二中稠油油藏的主力油层为Ng5砂层组的Ng5<sup>3</sup>和Ng5<sup>4</sup>层,含油面积为2 km<sup>2</sup>,平均有效厚度为12.1 m,具有油层厚度薄、原油粘度大、泥质含量高、出砂严重及受水侵影响大等特点<sup>[1]</sup>。1994年对中二中Ng5砂层组采用200 m×283 m的九点法井网进行蒸汽吞吐开发,2000年和2003年又进行了扩边、局部井网完善和井网加密。截至2011年9月,中二中Ng5砂层组共有蒸汽吞吐生产井48口,平均单井产油能力为5.9 t/d。随着吞吐轮次的增加,开发效果逐渐变差<sup>[2-3]</sup>;同时,由于Ng5<sup>3</sup>和Ng5<sup>4</sup>层的合注合采,不仅加剧了蒸汽的超覆,还使层间动用程度差异进一步加剧<sup>[4-5]</sup>。为此,笔者通过数值模拟技术研究多层合注合采蒸汽吞吐开发后油藏的物性特征,分析油藏温度和压力的变化规律,查明油藏的剩余油分布情况,以期为进一步实施分层注汽技术及后续转蒸汽驱的应用提供依据。

## 1 油藏概况

孤岛油田中二中Ng5砂层组为网状河流相沉积,岩性以粉细砂岩及细砂岩为主,平均孔隙度为32%,平均渗透率为 $1\ 600\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,储层渗透性好,

非均质性强,胶结类型为孔隙接触式,胶结疏松。该砂层组共分为6层,其中Ng5<sup>3</sup>和Ng5<sup>4</sup>层为主力油层,Ng5<sup>5</sup>层为非主力油层,其平均有效厚度分别为4.7、4.5和2.8 m,Ng5<sup>1+2</sup>和Ng5<sup>6</sup>层均呈土豆状发育,开发价值小。Ng5<sup>3</sup>—Ng5<sup>5</sup>层的探明石油地质储量为 $610.2\times 10^4\ \text{t}$ ,占该砂层组总探明石油地质储量的93.6%。

## 2 油藏数值模拟

### 2.1 模型建立

采用孤岛油田中二中Ng5砂层组的地质参数及自1991年9月投产至2011年9月的生产动态资料,应用CMG-STARs油藏数值模拟软件<sup>[6-7]</sup>,建立中二中Ng5砂层组的油藏地质模型,并对其开发过程进行了动态跟踪模拟。根据测井解释结果,将Ng5砂层组沿纵向划分为5个小层,其中,Ng5<sup>3</sup>,Ng5<sup>4</sup>和Ng5<sup>5</sup>层为油层,Ng5<sup>3</sup>和Ng5<sup>4</sup>层为主力油层;3个油层之间各有1个发育完全的隔层。平面上,建立网格步长为25 m×25 m的网格系统,数值模拟总节点数为 $130\times 65\times 5$ ,共计42 250个。

### 2.2 参数选取

油藏岩石及流体的热物性参数主要包括:岩石

收稿日期:2013-03-04。

作者简介:王代流,男,高级工程师,博士,从事油田开发技术研究。联系电话:(0546)8885441,E-mail:wangdailiu.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“蒸汽驱后稠油油藏提高采收率技术研究”(2011ZX05009-004)。

和盖层的热容分别为 1.82 和 1.60 J/(m<sup>3</sup>·℃), 岩石、水相、油相和盖层的导热系数分别为 1.08, 0.62, 0.13 和 1.62 J/(m·s·℃)。

油相和水相的相对渗透率数据如图 1 所示。分析图 1 可知, 温度从 60℃ 升至 300℃ 的过程中, 稠油油藏的束缚水饱和度增加, 而残余油饱和度逐渐降低。高温条件下油水相渗特征体现了热采提高原油采收率的机理<sup>[8]</sup>。

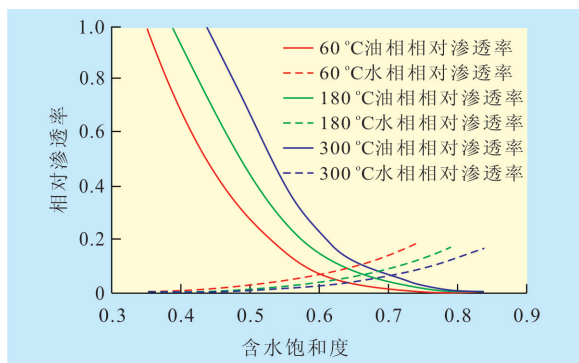


图1 孤岛油田中二中Ng5砂层组不同温度下油相和水相的相对渗透率

地面原油粘度数据如图 2 所示。由图 2 可以看出, 随着温度的升高, 稠油粘度大幅度降低, 稠油受热降粘, 提高稠油流动能力是热采提高稠油产量的主要机理<sup>[9]</sup>。

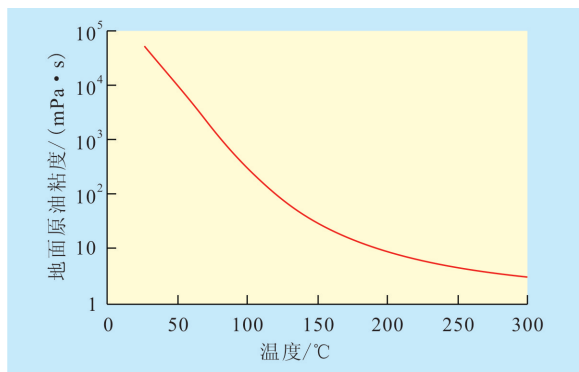


图2 孤岛油田中二中Ng5砂层组温度与地面原油粘度的关系

### 2.3 模型验证

根据建立的油藏数值模拟模型、选取的流体及岩石热物性参数、原油的粘温关系曲线、油相和水相的相对渗透率曲线、油藏初始条件、蒸汽吞吐井的注入及生产动态数据, 对中二中Ng5砂层组的生产历程进行了历史拟合。

分析Ng5砂层组的数值模拟结果可知: 探明石油地质储量模拟值为 608.4×10<sup>4</sup>t, 与实际值(610.2×10<sup>4</sup>t)误差为 0.29%; 累积产油量模拟值为 111.3×10<sup>4</sup>t, 与实际值(110.89×10<sup>4</sup>t)误差为 0.37%; 累积产液量

模拟值为 665.69×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 与实际值(660.53×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)误差为 0.78%; 累积产水量模拟值为 554.93×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 与实际值(549.64×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)误差为 0.96%。自投产至 2011 年 9 月, Ng5 砂层组注采井共计 82 口, 其中生产动态达到拟合精度要求的共有 75 口, 拟合较差的井仅为 7 口, 单井拟合符合率达到 91.46%。说明所建油藏数值模拟模型与实际油藏的地质条件及流体分布特征吻合程度较高, 可用于描述不同蒸汽吞吐阶段油藏物性的分布特征<sup>[10-11]</sup>。

## 3 蒸汽吞吐后期油藏物性特征

### 3.1 地层压力和温度

中二中Ng5砂层组的平均埋深为 1 300 m, 原始油藏压力为 12.3 MPa, 原始油藏温度为 65℃, 该温度下脱气原油粘度约为 5 000 mPa·s, 属于普通稠油油藏。经历近 20 a 的蒸汽吞吐开发, 油藏的压力和温度发生了明显变化。从图 3 中可以看出, 自蒸汽吞吐开发后, 平均地层压力出现大幅度降低, 截至 2011 年 9 月, 平均地层压力仅为 5.2 MPa, 压力保持水平为 42.93%; 平均地层温度逐渐升高, 平均地层温度上升约 2℃。

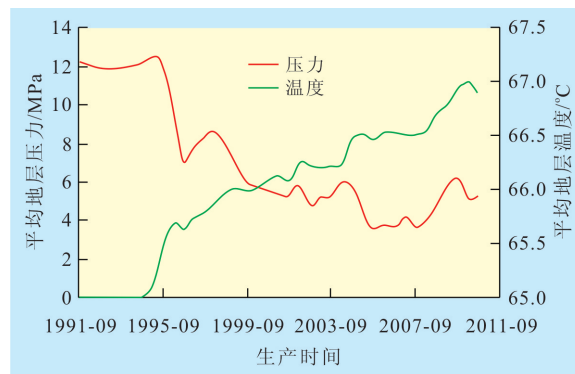


图3 孤岛油田中二中Ng5砂层组平均地层压力和温度随时间的变化

### 3.2 剩余油饱和度

利用所建Ng5砂层组数值模拟模型, 得到自投产至 2011 年 9 月该砂层组多轮次蒸汽吞吐后的剩余油饱和度分布(图 4)。

Ng5<sup>3</sup>层剩余油饱和度较高的部位主要有 3 处(图 4a): ①以 GD36-522 井为中心的周边区域, 该区域吞吐井数少, 动用程度低, 剩余油饱和度较高, 为 0.55~0.60; ②GD33-519 井所在的油藏边部只有 3 口井进行了完井生产, 动用程度低, 剩余油饱和度较高, 为 0.60~0.65; ③Ng5<sup>3</sup>层西南部蒸汽吞吐井间动用程度低, 含油饱和度基本保持原始含油饱和

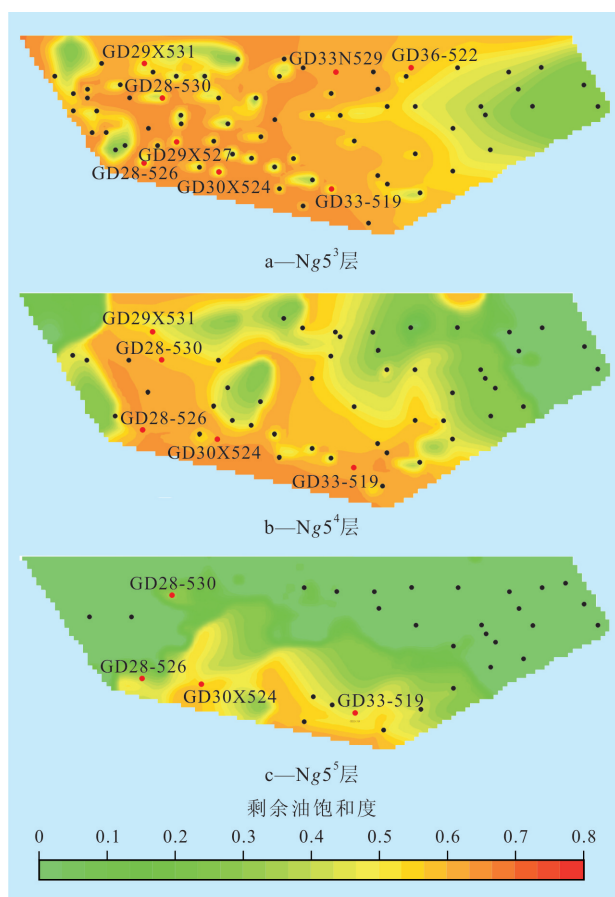


图4 孤岛油田中二中Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>—Ng<sup>5</sup><sub>5</sub>层剩余油饱和度分布(2011-09)

度,为0.70左右,也是剩余油的富集区域。

Ng<sup>5</sup><sub>4</sub>层剩余油饱和度较高的部位主要有2处(图4b):①Ng<sup>5</sup><sub>4</sub>层南部的构造高部位,蒸汽吞吐井数少,控制程度低,剩余油饱和度高,为0.60~0.65;②GD28-526井附近生产井数较少,剩余油饱和度较高,基本保持原始含油饱和度,为0.70左右。

Ng<sup>5</sup><sub>5</sub>层含油区主要集中在该油层南部,含油区周围为大面积含水区,吞吐井控制程度低,因此剩余油富集区较小(图4c)。

Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>和Ng<sup>5</sup><sub>4</sub>层蒸汽吞吐井分布集中,至2011年9月,2层吞吐生产井周围剩余油饱和度虽大幅度降低,但由于蒸汽吞吐加热范围有限,吞吐井间仍存在大量剩余油。

### 3.3 剩余油储量丰度

截至2011年9月,中二中Ng<sup>5</sup>砂层组经历近20a的蒸汽吞吐开发,剩余油分布较为分散。目前剩余油储量丰度仍较高的区域主要分布于油藏西部远离边底水的区域,油藏整体采出程度仍较低,尤其是Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层井间剩余油储量丰度较高,最高达240×10<sup>4</sup> t/km<sup>2</sup>,挖潜潜力较大。

与Ng<sup>5</sup><sub>4</sub>和Ng<sup>5</sup><sub>5</sub>层相比,Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层的油层厚度较

大,生产井均在Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层进行完井生产。分析3层的剩余油储量丰度分布(图5)可见:Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层的剩余油储量丰度明显大于其他2层。对比图4和图5可知,Ng<sup>5</sup>砂层组的剩余油储量丰度分布与剩余油饱和度的分布存在一定差异,这是因为剩余油储量丰度不仅与剩余油饱和度有关,还与油层有效厚度密切相关。Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层的GD33N529井和GD28-530井周围油层有效厚度较大,虽然剩余油饱和度较低,但剩余油储量丰度仍较大。由图5可知:高剩余油储量丰度主要集中在Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层构造高部位,例如Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>层西南部的GD30X524井;受边水影响较小的中间部位及西部区域等,由于水侵影响小,剩余油储量丰度也较高。对Ng<sup>5</sup><sub>4</sub>层来说,高剩余油储量丰度主要集中于远离边水的西侧部位,如GD28-530和GD29X531井附近区域。

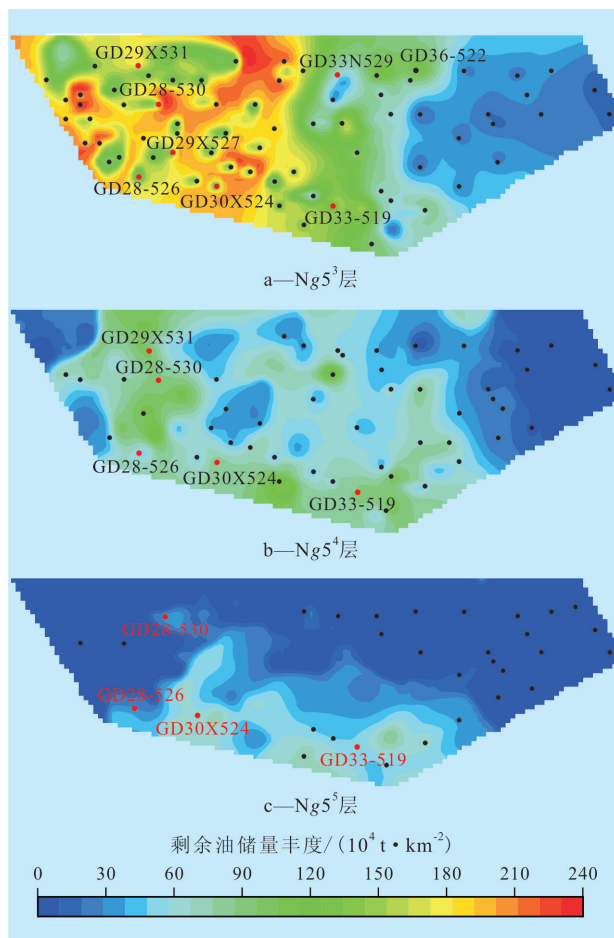


图5 孤岛油田中二中Ng<sup>5</sup><sub>3</sub>—Ng<sup>5</sup><sub>5</sub>层剩余油储量丰度分布(2011-09)

## 4 结论

依据孤岛油田中二中Ng<sup>5</sup>砂层组的地质参数及自1991年9月至2011年9月的生产动态资料,进行

了中二中Ng5砂层组蒸汽吞吐动态跟踪模拟。所建立的数值模拟模型平面节点数为130×65个,纵向上分为5个模拟层。历史拟合结果表明:探明石油地质储量拟合误差为0.29%,累积产油量模拟误差为0.37%,累积产液量模拟误差为0.78%,累积产水量模拟误差为0.96%,单井拟合符合率达到91.46%。

多轮次蒸汽吞吐开发后,孤岛油田中二中Ng5砂层组的平均地层压力大幅度降低,平均地层温度呈现逐步上升趋势,至2011年9月,平均地层压力仅为5.2 MPa,压力保持水平仅为42.93%,而平均地层温度上升约2℃。剩余油饱和度分布主要受蒸汽吞吐井控制程度的影响,一般来说,吞吐井控制程度低的区域往往是剩余油的富集区域。剩余油储量丰度不仅与剩余油饱和度有关,还与油层的有效厚度相关;对Ng5<sup>3</sup>层而言,高剩余油储量丰度主要集中在构造高部位,受边水影响较小的中间部位及西部区域等;对Ng5<sup>4</sup>层而言,高剩余油储量丰度主要集中于远离边水的西侧部位。

#### 参考文献:

[1] 毛卫荣.孤岛油田中二中Ng5薄层稠油环蒸汽吞吐中后期调整

技术[J].油气地质与采收率,2005,12(6):61-63.

- [2] 时贤,李兆敏,刘成文,等.稠油油藏多轮次蒸汽吞吐防砂后产能预测模型[J].油气地质与采收率,2012,19(4):56-58.
- [3] 邵先杰,汤达祯,樊中海,等.河南油田浅薄层稠油开发技术试验研究[J].石油学报,2004,25(2):74-79.
- [4] 许涛,李星,徐红梅.蒸汽吞吐后期剩余油分布规律研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2011,33(3):333-335.
- [5] 邵先杰,孙冲,王国鹏,等.浅薄层特、超稠油注蒸汽吞吐后剩余油分布研究[J].石油勘探与开发,2005,32(1):131-133.
- [6] 高达,侯健,孙建芳,等.水平井蒸汽吞吐经济技术界限[J].油气地质与采收率,2011,18(1):92-96.
- [7] 东晓虎,刘慧卿,张红玲,等.稠油油藏注蒸汽开发后转热水驱实验与数值模拟[J].油气地质与采收率,2012,19(2):50-53.
- [8] 杨龙,沈德煌,王晓冬,等.温度对稠油相对渗透率及残余油饱和度的影响[J].石油勘探与开发,2003,30(2):97-99.
- [9] 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.
- [10] 李卉.稠油油藏蒸汽吞吐参数优化及效果预测[J].石油地质与工程,2012,26(1):89-91.
- [11] 李星,黄郑,费永涛,等.过热蒸汽吞吐开采界限及注采参数优化研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2012,34(6):148-151.

编辑 常迎梅

#### (上接第67页)

- [2] Kelley C. Detection and remediation of stagnation in Nelder-Mead algorithm using a sufficient decrease condition [J]. SIAM Journal on Optimization, 1999, 10(1): 43-55.
- [3] Custódio A L, Rocha H, Vicente L N. Incorporating minimum Frobenius norm models in direct search [J]. Computational Optimization and Applications, 2010, 46(2): 265-278.
- [4] Custódio A L, Vicente L N. Using sampling and simplex derivatives in pattern search methods [J]. SIAM Journal on Optimization, 2007, 18(2): 537-555.
- [5] 张凯,李阳,姚军,等.油藏生产优化理论研究[J].石油学报,2010,31(1):78-83.
- [6] 孙业恒.裂缝性低渗透砂岩油藏数值模拟历史拟合方法[J].油气地质与采收率,2010,17(2):87-90.
- [7] Yan Xia, Zhang Kai, Mudassir Nawaz, et al. Reservoir history matching using a stochastic method [J]. World Journal of Engineer-

ing, 2012, 9(5): 437-444.

- [8] 闫霞,李阳,姚军,等.基于流线EnKF油藏自动历史拟合[J].石油学报,2011,32(3):495-499.
- [9] 闫霞,张凯,姚军,等.油藏自动历史拟合方法研究现状与展望[J].油气地质与采收率,2010,(4):69-73
- [10] 吴翠娟,李冬,嵩天.基于共轭梯度的罚项最优脑外科过程优化算法[J].计算机工程与设计,2010,(20):4480-4483.
- [11] 杨卫民,谭骏珊,金正.基于奇异值分解的彩色图像水印算法[J].计算机工程与设计,2008,29(23):6152-6153.
- [12] 赵辉,曹琳,李阳,等.基于改进随机扰动近似算法的油藏生产优化[J].石油学报,2011,32(6):1031-1036.
- [13] 胡慧芳.油藏数值模拟历史拟合质量评价方法[J].断块油气田,2012,19(3):354-358.

编辑 武云云