

# 岩心微观与油藏宏观剩余油临界描述尺度研究

侯 健<sup>1</sup>, 罗福全<sup>2</sup>, 李振泉<sup>3</sup>, 郇绍献<sup>3</sup>, 张言辉<sup>4</sup>, 李 军<sup>5</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油冀东油田分公司 勘探开发研究院, 河北 唐山 063000; 3. 中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015; 4. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院, 天津 塘沽 300452; 5. 中国石油川庆钻探工程公司 井下作业公司, 四川 成都 610213)

**摘要:** 中国陆上油田已整体进入高含水开发期, 地下油水关系日趋复杂, 剩余油分布更加分散, 准确揭示剩余油分布规律, 为开发调整措施提供决策依据是亟待解决的难题。利用人工石英砂制作岩心模型, 借助微焦点CT系统对岩心模型进行CT切片扫描, 在对二维切片进行图像预处理、插值、分割的基础上, 对CT切片图像进行三维重建, 得到了岩心三维孔喉结构及油水分布情况。基于岩心三维孔喉模型, 发现岩心孔喉微观剩余油具有连续、连续—离散、离散等不同分布特征, 由离散特征向连续特征转化的临界描述尺度下限为45  $\mu\text{m}$  (约为孔喉半径的2倍)、临界描述尺度上限为167  $\mu\text{m}$  (约为孔喉半径的7.6倍); 基于油藏数值模拟技术, 得到了油藏宏观剩余油合理临界描述尺度, 当网格尺寸不高于油藏宏观剩余油临界描述尺度时, 模拟结果能够有效刻画油藏宏观剩余油局部富集现象。

**关键词:** 剩余油 临界描述尺度 离散特征 连续特征 岩心微观 油藏宏观

**中图分类号:** TE311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)06-0095-04

按照剩余油研究规模的不同, 可分为岩心微观剩余油及油藏宏观剩余油研究。岩心微观剩余油主要对孔喉内部剩余油分布特征及其与孔喉结构、岩石表面性质等参数的关系进行研究<sup>[1-4]</sup>, 可为提高采收率方法制定及深入挖潜孔喉剩余油提供指导; 油藏宏观剩余油分布是微观剩余油内在成因在实际矿场中的外在体现, 对其进行有效刻画并寻求剩余油富集部位, 对开发井位部署、剩余油挖潜具有重要意义。油藏数值模拟技术是研究油藏宏观剩余油分布规律的有效手段<sup>[5-12]</sup>, 但当网格尺寸较大时, 模拟结果不能有效描述宏观剩余油分布特征及形态, 难以描述高含水期剩余油局部富集现象<sup>[13-15]</sup>。因此, 笔者从岩心微观剩余油和油藏宏观剩余油2个方面出发, 对二者的分布特征及规律进行了研究, 得到了能够有效刻画岩心微观剩余油离散分布特征及油藏宏观剩余油局部富集特征的描述尺度范围。

## 1 岩心微观剩余油临界描述尺度

### 1.1 岩心三维孔喉模型的建立

利用粒径为70~80目的人工石英砂制作岩心

模型, 模型直径为5 mm, 长度为5 cm, 岩心渗透率为8.38  $\mu\text{m}^2$ , 孔隙度为27.6%。利用美国BIR公司生产的ACTIS—225FFi CT/DR/RTR工业用微焦点CT系统, 对岩心模型进行CT切片扫描, 岩心扫描总长度为2.5 mm, 沿长度方向按等间距共扫描切片100张, 对这些二维切片进行图像预处理、插值、分割后<sup>[16-17]</sup>, 采用Lorensen等提出的移动立方体算法<sup>[18]</sup>实现CT切片图像的三维重建, 得到岩心三维孔喉结构及油水分布, 再利用体积加权平均法, 计算得到孔喉半径为22.05  $\mu\text{m}$ 。

以水驱至残余油时刻为例, 二维切片模型尺寸为2.5 mm×2.5 mm, 水和油共同占据孔隙空间, 由于岩石表面亲水, 剩余油主要分布在孔喉中心(图1a)。

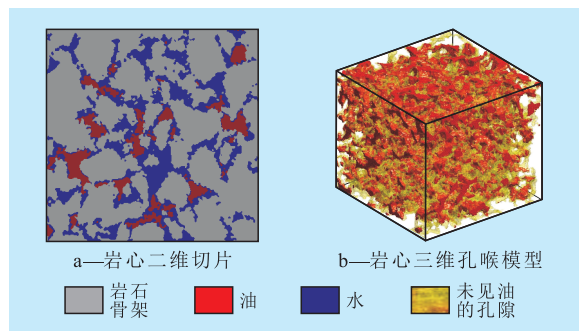


图1 水驱至残余油时刻油水分布状态

收稿日期: 2014-09-10。

作者简介: 侯健, 男, 教授, 博导, 从事水驱及三次采油方面的科研及教学工作。联系电话: 13954670741, E-mail: houjian@upc.edu.cn。

基金项目: 山东省自然科学基金“微观渗流实验与模拟”(JQ201115), 国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高采收率技术”(2011ZX05011), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“多孔介质多尺度多相流动模拟研究”(13CX05007A)。

相邻孔隙分别被油、水填充,剩余油间断出现。重建后岩心三维孔喉模型尺寸为 $2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ ,孔喉中的剩余油是离散分布的(图1b)。

随着描述尺度的增大,描述尺度内包含的孔隙数目增多,得到的剩余油饱和度分布趋于平均连续化,这与图1观测到的剩余油间断分布现象有所不同。因此,有必要进一步揭示岩心微观剩余油离散分布的描述尺度范围及微观剩余油由离散分布向连续分布发生转化的临界描述尺度。

## 1.2 微观剩余油临界描述尺度

为了得到不同描述尺度下的微观剩余油分布特征,进而确定其临界描述尺度,将岩心三维孔喉模型(图1b)在每个方向上均匀分成10,11,15,22,33,55,66和110份,对应的描述尺度分别为250,227,167,114,76,45,38和 $23\text{ }\mu\text{m}$ ,在每种描述尺度下可得到一系列空间网格,统计分析每个网格的平均剩余油饱和度并作出频率分布(图2)。

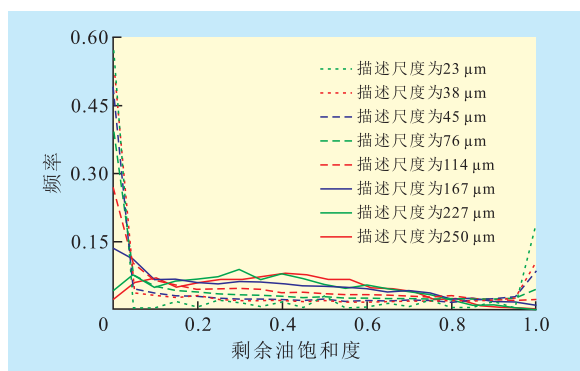


图2 不同描述尺度下的剩余油饱和度频率分布

当描述尺度为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同剩余油饱和度对应的频率分布较均匀,体现的是微观剩余油连续分布特征(图2)。随着描述尺度降低,剩余油饱和度频率分布曲线形态发生变化,当描述尺度为 $23\text{ }\mu\text{m}$ 时,存在2个异常点,剩余油饱和度为0和1时,频率值极高,表明网格中要么是油,要么是水,体现的是微观剩余油离散分布的特征(图2)。

根据图2很难判断在何种尺度下微观剩余油由离散向连续转换,因此对剩余油饱和度累积频率分布进行分析(图3)。微观剩余油呈现离散分布特征时,剩余油饱和度为0和1处对应的频率值较高,累积频率分布曲线起点值相对较大且后半段会发生上翘;微观剩余油呈现连续分布特征时,累积频率分布曲线起点值相对较小且后半段下凹。

根据上述原则对图3中各个描述尺度对应的剩余油分布特征进行判别并分类,结果表明,岩心孔喉微观剩余油具有连续、连续—离散、离散等不同

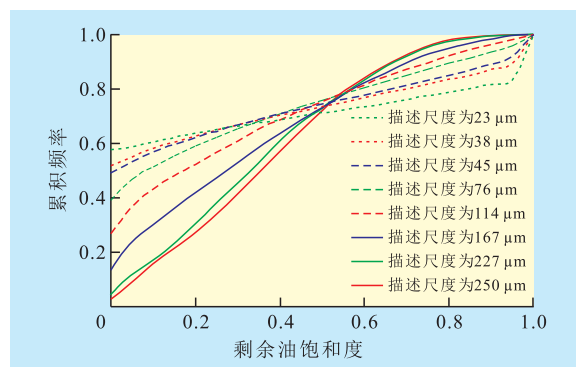


图3 不同描述尺度下的剩余油饱和度累积频率分布

分布特征,由离散特征向连续特征转化的临界描述尺度下限为 $45\text{ }\mu\text{m}$ (约为孔喉半径的2倍)、临界描述尺度上限为 $167\text{ }\mu\text{m}$ (约为孔喉半径的7.6倍)。当描述尺度低于临界描述尺度下限时,微观剩余油具有离散分布特征;当描述尺度高于临界描述尺度上限时,微观剩余油具有连续分布特征。

## 2 油藏宏观剩余油临界描述尺度

由于油藏宏观剩余油描述尺度不同,因此,得到的剩余油分布形态及规律往往不一致。数值模拟过程中,当网格尺寸较大时,难以有效描述剩余油分布位置及形态,不能刻画出高含水期宏观剩余油局部富集的现象。笔者基于油藏数值模拟技术,确定宏观剩余油平面及纵向的临界描述尺度。

### 2.1 油藏三维数值模型的建立

油藏长度为 $150\text{ m}$ ,宽度为 $150\text{ m}$ ,厚度为 $15\text{ m}$ ,平均孔隙度为0.3,平均渗透率为 $1\text{ }\mu\text{m}^2$ ,渗透率场纵向均质、平面非均质,纵向渗透率为平面渗透率的0.1倍,布井方式为一注一采,注采井距为 $200\text{ m}$ ,生产模式为定液量生产,注采速度为每年0.1倍孔隙体积。基础方案共划分 $15\times 15\times 5$ 个网格,均匀网格步长为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 3\text{ m}$ ,束缚水饱和度、残余油饱和度分别为0.288 5和0.240 1。

### 2.2 平面临界描述尺度的确定

模拟计算了含水率为98%时,不同平面网格尺寸下的剩余油分布规律,由于剩余油主要分布在油层顶部,故以第1层为研究对象。结果(图4)表明,随着平面描述尺度的增大,剩余油分布形态发生三角形—梯形—矩形—消失演变,剩余油面积逐渐递减。当描述尺度较小时,能够有效刻画非主流线部位剩余油局部富集现象,描述尺度增大后剩余油饱和度分布趋于平均,富集现象消失。

由不同平面描述尺度下的剩余油饱和度频率

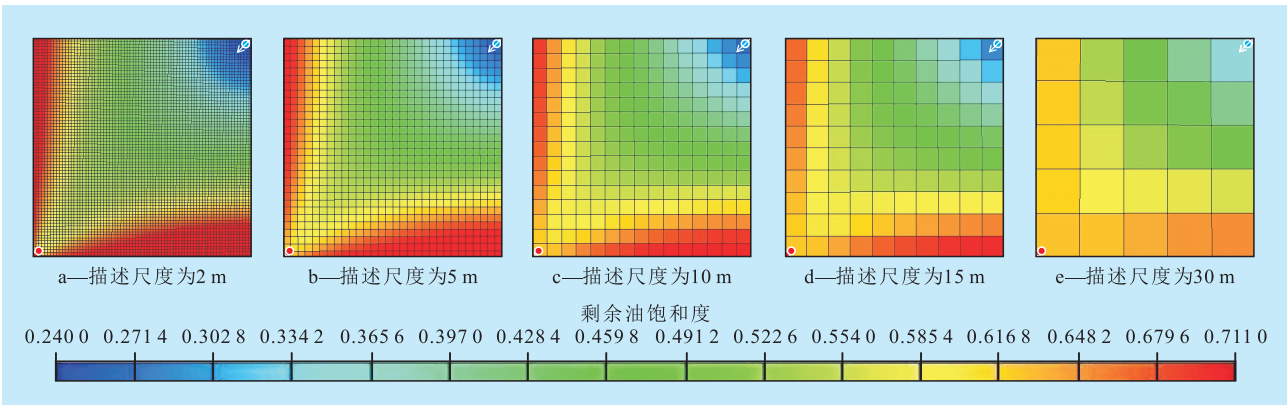


图4 平面描述尺度对剩余油饱和度的影响规律

分布(图5)可知,平面描述尺度为2 m时,剩余油饱和度为0.7处分布频率较高,剩余油局部富集现象明显;平面描述尺度超过15 m后,剩余油局部富集现象消失,故选取15 m作为平面临界描述尺度,平面描述尺度低于该临界值时,能够有效刻画剩余油平面局部富集现象。

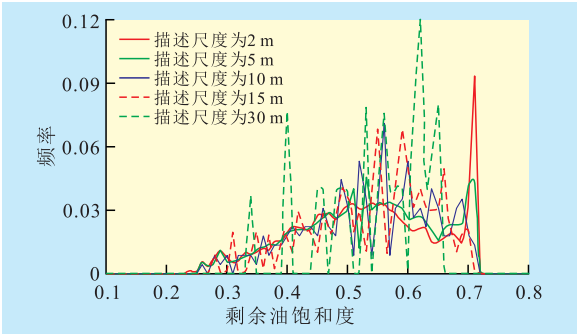


图5 平面描述尺度对剩余油饱和度频率分布的影响

随注采井距增加,注采井间控制面积增大,平面临界描述尺度线性递增,表明井距较大时,可选取较稀的平面网格对剩余油进行有效刻画。平面临界描述尺度与注采井距的关系式为

$$D_x = 0.107\,2L - 5.867\,7 \tag{1}$$

式中:  $D_x$  为平面临界描述尺度,m;  $L$  为注采井距,m。

2.3 纵向临界描述尺度

模拟计算了含水率为98%时,不同纵向网格尺寸下剩余油分布规律,结果(图6)表明,随着纵向描述尺度增加,剩余油分布形态发生梯形—矩形—消失演变,剩余油厚度递减,当纵向网格尺寸大于6 m后,剩余油局部富集现象消失(图6d),故选取6 m作为纵向临界描述尺度。当纵向描述尺度低于该临界值时,能有效刻画剩余油垂向局部富集现象。

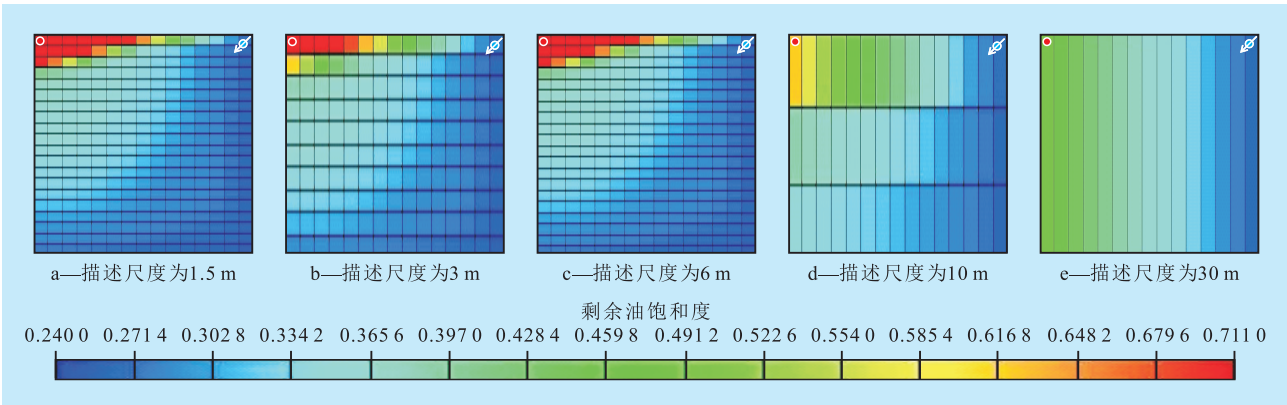


图6 纵向描述尺度对剩余油饱和度的影响规律

随油藏厚度增加,纵向临界描述尺度线性递增,表明油藏厚度较大时,可选取较稀的垂向网格对剩余油进行有效刻画。纵向临界描述尺度与油藏厚度的关系式为

$$D_z = 0.2H \tag{2}$$

式中:  $D_z$  为纵向临界描述尺度,m;  $H$  为油藏厚度,m。

3 结束语

岩心微观剩余油具有连续、连续—离散、离散等分布特征,由离散特征向连续特征转化的临界描述尺度下限及上限分别为孔喉半径的2和7.6倍;当描述尺度不高于临界描述尺度下限时,反映的是岩

心微观剩余油离散分布特征,当描述尺度高于临界描述尺度上限时,得到的是岩心微观剩余油连续分布特征。

运用油藏数值模拟手段,得到了油藏宏观剩余油合理临界描述尺度,主要包括平面合理临界描述尺度、纵向合理临界描述尺度2个方面,当同时满足平面描述尺度不高于平面临界描述尺度、纵向描述尺度低于纵向临界描述尺度时,能够有效刻画油藏宏观剩余油局部富集现象;建立了平面临界描述尺度与注采井距、纵向临界描述尺度与油藏厚度的相关关系。对实际油藏井位精确部署、剩余油进一步挖潜具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 赵跃华,翁大丽,唐金星.应用图象处理技术研究双河油田剩余油分布特征[J].石油勘探与开发,1996,23(2):57-61.
- [2] 吕伟峰,冷振鹏,张祖波,等.应用CT扫描技术研究低渗透岩心水驱油机理[J].油气地质与采收率,2013,20(2):87-90.
- [3] 侯健,张顺康,袁士宝.聚合物驱微观渗流实验剩余油分布的定量分析研究[J].水动力学研究与进展: A 辑,2006,21(1):41-45.
- [4] 张明安.二元复合体系微观驱油机理可视化实验[J].油气地质与采收率,2013,20(3):79-82.
- [5] 韩大匡.准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J].石油学报,2007,28(2):73-78.
- [6] 马艳,李洪生,刘大猛,等.双河油田高含水高采出程度油藏剩余油分布特征[J].大庆石油学院学报,2010,34(1):51-55.
- [7] 宋道万.二氧化碳混相驱数值模拟结果的主要影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(4):72-74.
- [8] 郝建明,吴健,张宏伟.应用水平井资料开展精细油藏建模及剩余油分布研究[J].石油勘探与开发,2009,36(6):730-736.
- [9] 杨晓培.二次聚合物驱后剩余油分布及挖潜措施——以河南油区下二门油田 H2 II 油组为例[J].油气地质与采收率,2011,18(4):61-64.
- [10] 牛保伦,任韶然,张玉,等.超稠油油藏蒸汽吞吐末期剩余油分布规律研究[J].断块油气田,2012,19(2):228-231.
- [11] 冯其红,王守磊,白军伟,等.层间非均质油藏提液效果数值模拟[J].油气地质与采收率,2013,20(3):49-52.
- [12] 马春华,郑浩,王文军.应用精细数值模拟方法研究聚合物驱后剩余油分布[J].石油钻探技术,2007,35(4):76-79.
- [13] Eliana L, Denis J, Célio Maschio. Effect of grid size in risk assessment of petroleum fields[R]. SPE 89845, 2004.
- [14] Khalid Aziz. Sensitivity of steamflood model results to grid and timestep sizes[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(1):65-74.
- [15] 陆熠,张原平,梁芹.油藏数值模拟技术的误差分析[J].西安石油学院学报:自然科学版,2001,16(2):13-16.
- [16] Hou J, Li Z Q, Zhang S K, et al. Experiment and simulation study on construction of a three-dimensional network model[J]. Science in China Series G, 2008, 38(11):1 563-1 575.
- [17] Hou J, Li Z Q, Zhang S K, et al. Computerized tomography study of the microscopic flow mechanism of polymer flooding[J]. Transport in Porous Media, 2009, 79(3):407-418.
- [18] Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4):163-169.

编辑 武云云

#### (上接第94页)

- [2] 唐人选,唐小立,秦红祥.注 CO<sub>2</sub>混相驱油藏合理采收率确定[J].石油钻探技术,2012,40(3):112-115.
- [3] 廖长霖,廖新维,赵晓亮,等.低渗透油藏二氧化碳驱油及埋存可行性研究——以新疆油田八区克上组油藏为例[J].油气地质与采收率,2013,20(5):79-83.
- [4] 国殿斌,徐怀民.深层高压低渗油藏 CO<sub>2</sub>驱室内实验研究——以中原油田胡96块为例[J].石油实验地质,2014,36(1):102-105.
- [5] 张恩磊,顾岱鸿,何顺利,等.杂质气体对二氧化碳驱影响模拟研究[J].油气地质与采收率,2012,19(5):75-77.
- [6] 沈平平,黄磊.二氧化碳-原油多相多组分渗流机理研究[J].石油学报,2009,30(2):247-251.
- [7] 郭平,孙雷,孙良田,等.不同种类气体注入对原油物性的影响研究[J].西南石油学院学报,2000,22(3):57-60.
- [8] 熊钰,高平.两种介质注入对原油物性的影响[J].新疆石油地质,2004,25(1):58-60.
- [9] 杨学锋,郭平,杜志敏,等.细管模拟确定混相压力影响因素评价[J].西南石油学院学报,2004,26(3):41-44.
- [10] 孙业恒,吕广忠,王延芳,等.确定 CO<sub>2</sub>最小混相压力的状态方程法[J].油气地质与采收率,2006,13(1):82-84.
- [11] 张广东,李祖友,刘建仪.注烃混相驱最小混相压力确定方法研究[J].钻采工艺,2007,31(3):99-102.
- [12] 郝永卯,陈月明,于会利. CO<sub>2</sub>驱最小混相压力的测定与预测[J].油气地质与采收率,2005,12(6):65-66.

编辑 刘北羿