

# 裂缝性油藏渗流特征及驱替机理数值模拟研究

郑浩, 苏彦春, 张迎春, 王月杰

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300452)

**摘要:**通过双重介质数值模拟,详细研究了裂缝性油藏的渗流特征与驱替机理,并对开发效果的影响进行了敏感性分析。结果表明:岩石应力敏感性是制定裂缝性油藏开发策略的关键,它决定着开发方式、油藏压力保持能力及基质系统与裂缝系统采收率;基质系统与裂缝系统间的窜流作用在边底水能量充足或人工注水保压开发情况下很难发生,仅在降压开发过程中显现;对于基质系统,毛管压力渗析作用是最主要的渗流特征及驱替机理,采收率可达4%以上;对于裂缝系统,油水流动近似管流,采收率可达75%以上;重力作用在裂缝性油藏开发过程中虽客观存在,但作用较微弱。基质系统与裂缝系统油水相渗曲线形态的选取仅影响油水两相渗流能力,对采收率影响很小。

**关键词:**裂缝性油藏 渗流特征 驱替机理 双重介质 数值模拟

**中图分类号:** TE311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)04-0079-05

裂缝性油藏地质成因的复杂性和储层结构的特殊性,导致其渗流特征及驱替机理与常规砂岩油藏有着本质性的区别<sup>[1-4]</sup>。目前,郭小美等通过室内实验手段,研究了裂缝性油藏渗流特征及驱替机理<sup>[5-7]</sup>;肖阳等开展了裂缝性油藏生产动态分析和开发效果评价<sup>[8-15]</sup>。与此同时,裂缝性油藏数值模拟亦逐渐得到关注<sup>[16-20]</sup>,但未对构成裂缝性油藏的基质和裂缝2大系统的开采特征进行深入研究。为此,笔者通过双重介质数值模拟,详细研究了裂缝性油藏基质系统和裂缝系统各自的渗流特征及驱替机理,并就其对开发效果的影响进行了敏感性分析,以期科学、合理地制定裂缝性油藏开发技术政策提供理论依据。

## 1 渗流特征及驱替机理

裂缝性油藏储集空间的多样性,导致流体在其孔隙网络中渗流条件差异很大,从而使这类油藏具有多重孔隙结构特征。为便于研究和评价,根据其孔隙结构特征和流体在其中的流动特点,将多重孔隙介质简化为双重孔隙介质,即裂缝和基质2大系统。其中,裂缝系统是由张开度较大的裂缝及与之相连通的孔洞构成的高渗透网络系统。其裂缝宽度大于10  $\mu\text{m}$ ,渗透率可达几平方微米,孔隙度一般不超过1%,含有缝洞的裂缝孔隙度通常低于2%,储

集空间大部分充满原油,含油饱和度接近100%。基质系统由被裂缝切割、大小不等的岩块组成。其裂缝宽度小于10  $\mu\text{m}$ ,渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度一般为2%~5%,只是孔隙喉道较细小,束缚水饱和度较高,大多在30%以上。由于裂缝和基质2大系统的储集空间特征不同,其渗流特征与驱替机理也存在较大差别。

裂缝系统主要靠外部驱动压差进行排油,由于裂缝张开度远大于一般孔隙尺寸,因此可忽略毛管压力作用,而且束缚水及残余油饱和度很低,水驱油过程近似活塞式,流体流动符合达西定律。主要有2大特征:①对于理想裂缝系统,油水相对渗透率与含水饱和度接近线性关系。尽管实际油藏中存在着不同张开度且相互连通的裂缝系统,但与常规油水相对渗透率曲线相比仍有明显不同。②在垂向驱替过程中,重力作用不可忽略。其可减缓含水率的快速上升并抑制驱替过程的非活塞性,从而提高波及体积和驱油效率。

基质系统是一个储渗条件差异很大、分布关系复杂的集合体。其中,只有次生孔隙比较发育且有连通条件的部分才有储集、渗流能力,原生孔隙实际上不具备储集、渗流条件。因此,基质系统的渗流及驱替过程主要是在微裂缝洞及微裂缝发育的次生孔隙中进行。主要有3大特征:①对于储层润湿性以亲水为主的裂缝性油藏,基质系统依靠毛管

收稿日期:2014-05-06。

作者简介:郑浩,男,工程师,硕士,从事油气田开发及油藏工程研究。联系电话:(022)25804912, E-mail:zhenghao2@cnoc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项子课题“海上油田丛式井网整体加密及综合调整油藏工程技术应用研究”(2011ZX05024-002-007)。

压力的渗析作用排油是区别于裂缝系统的本质性特征,更是不同于常规砂岩油藏的主要渗流特征及驱替机理。该过程只有借助裂缝系统的渗流通道并且当含水率在一定范围内才能得以进行。②基质系统依靠外部驱动压差进行的排油亦在微裂缝发育的次生孔隙中进行。当基质系统与裂缝系统间存在压差时,就会发生物质交换,即窜流。③基质系统的水驱油过程在理想状态下是可以发生的,但在裂缝性油藏实际开发以及数值模拟过程中,裂缝和基质2套系统所需压力梯度相差太大。在两者共存条件下,裂缝系统处于主导地位,基质系统水驱油过程难以发生。

## 2 数值模拟研究

### 2.1 模型建立

裂缝性油藏地质建模主要包括2个步骤:①利用Petrel软件,在建立统一构造格架的基础上,针对基质系统和裂缝系统不同储集空间特点,选择相应物性建模方法建立模型。其中,裂缝系统应用离散化裂缝网格建模技术,以实现裂缝系统有效分布规律的描述与预测,并整合输出符合油藏非均质性特点的基质和裂缝双重介质模型。②应用Eclipse油藏数值模拟软件中的E100黑油模块,将Petrel双重介质模型转换为油藏模型。其中,平面网格数为928个,水平和纵向网格数分别为32和29个,网格步长为50 m×50 m;垂向模拟层数为20,网格步长为4.4 m。须说明的是,双重介质模型包括基质和裂缝2套系统。因此,模型实际三维总网格数为上述网格数的2倍。

所建地质模型中基质和裂缝的石油地质储量分别为 $621.3 \times 10^4$ 和 $207.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,总地质储量为 $828.5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,无边底水存在。开发井数5口,均为水平井,其中4口采油井,1口注水井。油藏数值模拟基础参数包括:基质孔隙度为5.72%,基质渗透率为 $1 \times 10^{-3}$  μm<sup>2</sup>,裂缝孔隙度为1.08%,裂缝渗透率为 $465 \times 10^{-3}$  μm<sup>2</sup>,油藏温度为75℃,埋深为1 760 m,地层压力为17.7 MPa,饱和压力为12.6 MPa,地层原油密度为0.8 g/cm<sup>3</sup>,地层原油粘度为2.36 mPa·s,地层原油体积系数为1.172 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,原始溶解气油比为35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。

### 2.2 不同开发方式下渗流特征及驱替机理敏感性分析

考虑到不同开发方式下,裂缝性油藏基质系统和裂缝系统的渗流特征及驱替机理有所不同,因

此,笔者分别针对天然能量开发和注水开发2种情况进行研究。

#### 2.2.1 天然能量开发

在无边底水驱情况下,裂缝性油藏主要依靠岩石和流体的弹性能量进行开发。由于地下原油为单相流动,因此不存在油水驱替过程,其渗流特征就是裂缝系统的近似管流以及基质系统与裂缝系统之间的窜流。因此,笔者针对裂缝性油藏岩石应力敏感以及基质系统与裂缝系统间的窜流能力进行研究。

岩石应力 裂缝性油藏在天然能量开发过程中,随着地层压力下降,裂缝和基质系统由于所承受的有效应力增加可能发生弹塑性变形,会使裂缝和孔隙喉道变窄甚至闭合,从而导致渗透率下降及渗流能力变差。从数值模拟结果(图1)可以看出,在岩石应力敏感的作用下,裂缝性油藏地层能量保持能力有所下降,并对最终采收率的影响较大。需要强调的是,地层压力下降的快慢取决于岩石的应力敏感程度,这将直接决定最终采收率的高低。

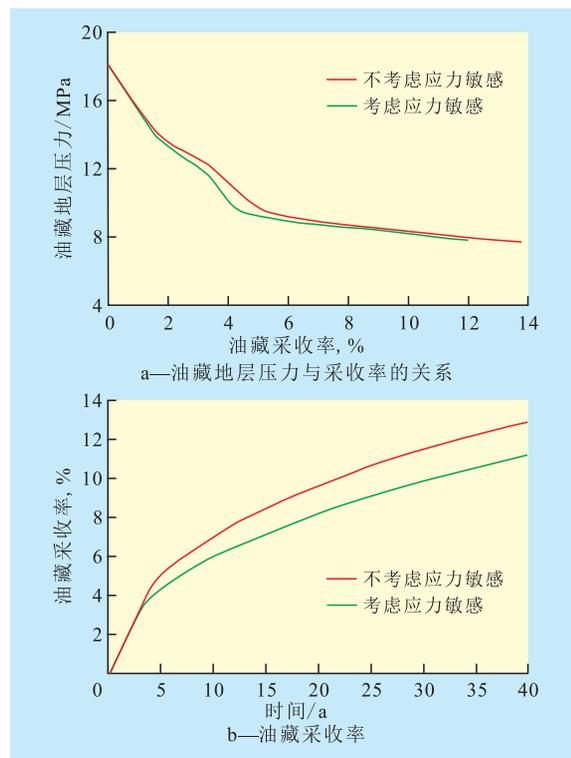


图1 天然能量开发时裂缝性油藏岩石应力模拟

对于基质和裂缝系统而言:由于基质系统传导性比裂缝系统小,在裂缝和基质系统之间压差作用下,基质对裂缝供油速度缓慢,导致基质压力下降速度比裂缝系统慢;同时基质系统的压缩性比裂缝系统小,因而压实变形作用小,所以基质的供油速度远不如裂缝中原油被采出速度,即采收率低(图

2)。由此可见,对于应力敏感性强的裂缝性油藏,岩石变形对开发效果的影响较大,因此在实际生产过程及数值模拟研究中应予以重视。

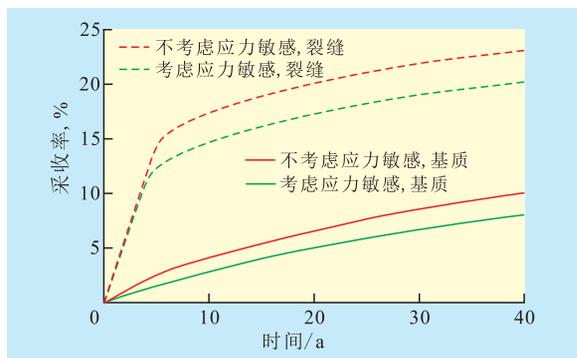


图2 天然能量开发时基质系统和裂缝系统岩石应力模拟

窜流能力 裂缝性油藏基质与裂缝系统之间的物质交换取决于彼此间的连通程度,主要以裂缝密度予以描述。在数值模拟中,用窜流因子表征裂缝密度的发育程度。即裂缝密度越大,基质岩块越小,窜流因子越大。为了研究窜流因子对开发效果的影响,笔者设计了4种不同窜流能力的方案进行研究。模拟结果(图3)表明:①随着窜流因子的增大,裂缝性油藏整体采收率逐渐提高。这是因为基质与裂缝系统之间的渗流能力增强,从而导致基质系统的原油采出量增加所致。②作为渗流通道的裂缝系统,采收率变化不大。这主要由于裂缝系统渗流阻力很小且排油过程近似管流,无论何种情况均可达到较高的波及体积和动用程度。正因如此,其采收率要远高于基质系统。需要说明的是,由于窜流因子是通过地质统计和随机性建模获得的,具有一定不确定性。因此,在数值模拟研究、尤其历史拟合过程中应予以重视。

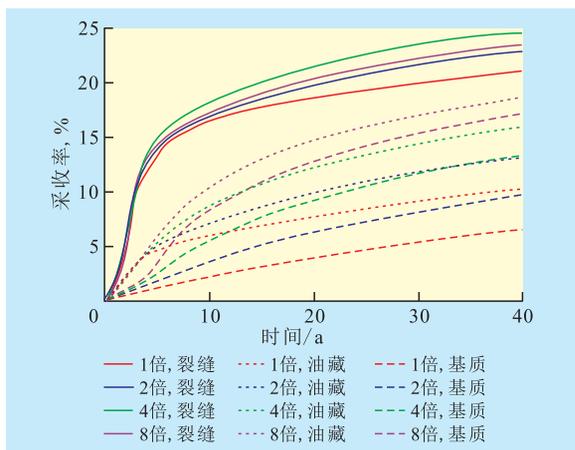


图3 天然能量开发时裂缝性油藏窜流能力模拟

### 2.2.2 人工注水开发

与常规砂岩油藏不同,裂缝性油藏在利用天然

能量开发过程中可能存在岩石应力敏感。因此,需要采取人工注水补充地层能量来避免或抑制这种情况的发生。在水驱开发过程中,裂缝性油藏的基质与裂缝2个系统会表现出窜流、毛管压力渗析以及重力作用等渗流特征,并且在数值模拟过程中,油水相渗曲线形态也将会对研究结果产生影响。因此,笔者针对水驱过程中的这些问题进行了详细研究。

窜流能力 为了研究人工注水在保持油藏原始地层压力过程中基质与裂缝之间窜流特征对开发效果的影响,在不考虑毛管压力渗析作用与重力作用的情况下,笔者设计了4种不同窜流能力的方案进行数值模拟。模拟结果(图4)表明:随着基质与裂缝系统之间窜流因子的增大,4种方案油藏整体采收率差别不大,约为19%;裂缝系统和基质系统4种方案下的采收率变化趋势均相差很小,最终采收率分别为77%和0,基质系统并未得到动用。主要原因是:基质系统与裂缝系统间没有压差,从而无法发生窜流。由此可见,只有在天然能量不足或人工注水降压开发过程中,基质系统与裂缝系统之间的窜流特征才会显现。因此,在裂缝性油藏数值模拟过程中,尤其对基质系统与裂缝系统进行开发效果评价时,仅考虑窜流作用将无法客观分析基质系统的动用程度、采出状况及其对油藏整体采收率的贡献。

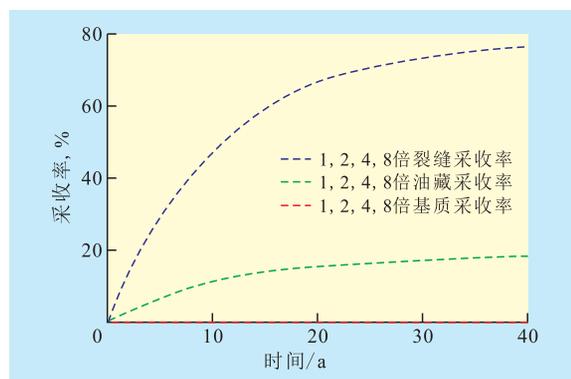


图4 人工注水开发时裂缝性油藏窜流能力模拟

毛管压力渗析作用 毛管压力渗析作用作为基质系统最主要的渗流特征和驱替机理,在裂缝性油藏开发过程中是不容忽视的。为了分析其对开发效果的影响,笔者设计了是否考虑毛管压力2种方案进行数值模拟研究。由模拟结果(图5)可见:当考虑毛管压力渗析作用时,油藏整体采收率有所增加。其中,基质系统的原油通过渗析作用得以动用而被采出,其最终采收率可达4%以上;而裂缝系统不受毛管压力渗析作用的影响,采收率变化不

大。由此可见,在人工注水开发裂缝性油藏过程中,裂缝系统中的大部分原油可被采出,其采收率可达75%以上,但由于裂缝性油藏储量主要储集在基质系统中,因此,整体采收率主要取决于基质系统的采收率。所以,提高基质系统的有效动用和采出程度才是提高裂缝性油藏整体采收率的关键,因此毛管压力渗析作用在提高基质系统采收率的过程中所起的作用不容忽视。

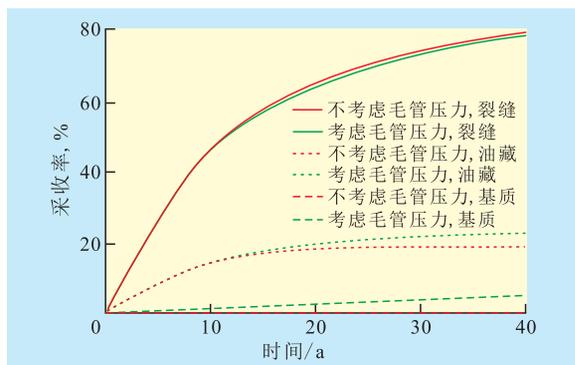


图5 人工注水开发时裂缝性油藏毛管压力渗析作用模拟

**重力作用** 在考虑基质系统最主要的渗流特征和驱替机理(毛管压力渗析作用)的基础上,设计了是否考虑重力作用2种方案进行数值模拟研究。模拟结果(图6)显示,当考虑重力作用时,油藏整体采收率相对于不考虑重力作用略有增加。其中,基质系统采收率有所增加,而裂缝系统采收率基本没有变化。由此可见,基质系统通过重力作用进行驱替是客观存在的,这种渗流特征和驱替机理对基质系统开发效果的影响主要取决于基质系统与裂缝系统之间油水高度差异以及密度差异。总体来看,重力作用在裂缝性油藏开发过程中,起到一定积极作用,但由于基质岩块一般较小,其作用较微弱。

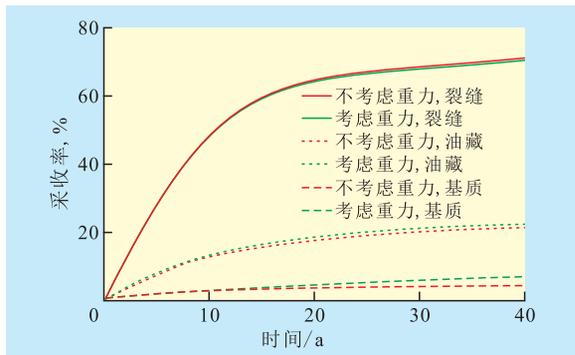


图6 人工注水开发时裂缝性油藏重力作用模拟

**油水两相渗流能力** 为了研究油水两相共存时相对渗流能力对裂缝性油藏开发效果的影响,在确保束缚水饱和度与残余油饱和度端点值不变的前提下,针对基质和裂缝2个系统,分别设计了2种

形态的相渗曲线进行数值模拟,以研究基质系统和裂缝系统的渗流特征和驱替机理。

在基质系统选取凹型相渗曲线不变的条件下,设计了裂缝系统选取直线型和凹型2种形态相渗曲线方案进行研究。由模拟结果(图7)可以看出:在含水率达到80%之前,相同采出程度下,直线型相渗曲线方案含水率上升速度远高于凹型相渗曲线方案;在含水率达到80%之后,2种方案含水率上升速度变缓且趋于一致。主要原因是:初期随着含水率的上升,直线型相渗曲线方案油相相对渗流能力线性降低,而水相相对渗流能力线性增加,表现出管流特征,从而提高了油水两相渗流能力,但却加快了见水后的含水率上升速度;但由于2种方案相渗曲线的束缚水饱和度与残余油饱和度端点值并未改变,因此,后期含水上升规律及最终采收率相差不大。

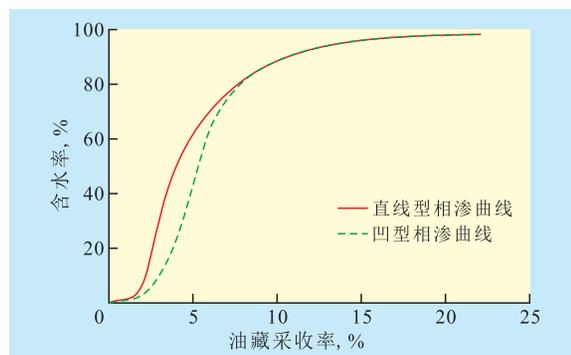


图7 人工注水开发时裂缝系统油水两相渗流能力模拟

在裂缝系统选取直线型相渗曲线不变的条件下,设计了基质系统选取直线型和凹型2种形态相渗曲线方案进行研究。由模拟结果(图8)可见:2种相渗曲线方案的油藏含水上升规律和最终采收率基本一致。虽然直线型相渗曲线方案中基质系统在毛管压力渗析、窜流以及重力作用的油相渗流能力有所提高,但理想状态下的水驱油过程在裂缝性油藏实际开发以及数值模拟过程中难以实现,仅在基质岩块局部可能发生,这不是基质系统具有实

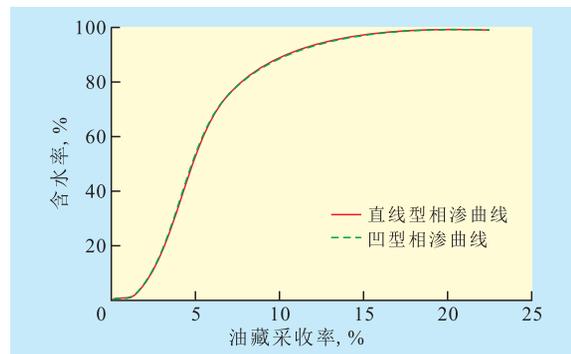


图8 人工注水开发时基质系统油水两相渗流能力模拟

际意义的渗流特征及驱替机理。

### 3 结论

岩石应力敏感性是制定裂缝性油藏开发策略的关键,其决定了开发方式、油藏压力保持能力以及基质系统与裂缝系统采收率。

在边底水能量充足或人工注水保压开发情况下,裂缝性油藏基质系统与裂缝系统间的窜流由于压力平衡而无法发生,仅在天然能量不足或人工注水降压开发过程中显现。其作用程度主要取决于裂缝的发育程度,但由于裂缝性油藏的复杂性而存在很大的不确定性,在实际生产和数值模拟研究过程中应高度重视。

对于基质系统,毛管压力渗析作用是最主要的渗流特征及驱替机理,采收率可达4%以上。对于裂缝系统,主要靠外部驱动压差进行驱替,采收率可达75%以上。重力作用对采收率的贡献取决于基质系统与裂缝系统间油水高度及密度差异,但由于基质岩块一般较小,其作用较微弱。

在裂缝性油藏数值模拟过程中,直线型相渗曲线与常规凹形相渗曲线相比,对裂缝系统来说,提高了油水两相渗流能力、加快了含水率上升速度;对基质系统来说,提高了渗析、窜流及重力作用过程中油相渗流能力,但对模拟结果影响很小。

#### 参考文献:

- [1] 杜殿发,陈月明,汪庐山,等.潜山油藏油水井侵动态研究[J].油气采收率技术,2000,7(3):42-45.
- [2] 李亚军,姚军,黄朝琴,等.单裂缝多孔介质渗透特性研究[J].特种油气藏,2011,18(4):94-97.
- [3] 孙晓飞,张艳玉,王中武.裂缝性低渗透砂砾岩油藏一体化评价方法及应用——以盐家油田盐22块为例[J].油气地质与采收率,2011,18(5):70-73.
- [4] 张丽艳,赵国欣,乌洪翠,等.裂缝性碳酸盐岩储层裂缝网络测

- 井响应特征——以沾化凹陷富台潜山为例[J].油气地质与采收率,2011,18(5):34-36.
- [5] 郭小美,孙雷,周涌沂,等.裂缝性油藏大尺度可视化水驱油物理模拟实验[J].特种油气藏,2011,18(3):109-111.
- [6] 李爱芬,凡田友,赵琳.裂缝性油藏低渗透岩心自发渗吸实验研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):67-69,77.
- [7] 刘宁.岩心裂缝图像分析技术及应用[J].油气地质与采收率,2010,17(5):17-19.
- [8] 肖阳,江同文,冯积累,等.缝洞型碳酸盐岩油藏开发动态分析方法研究[J].油气地质与采收率,2012,19(5):97-99.
- [9] 荣元帅,李新华,刘学利,等.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏多井缝洞单元注水开发模式[J].油气地质与采收率,2013,20(2):58-61.
- [10] 韩福成,何应付.裂缝性低渗透油气藏压裂井压力动态特征[J].特种油气藏,2008,15(4):63-65.
- [11] 单娴,姚军.基于离散裂缝模型的裂缝井渗流压力场分析[J].油气地质与采收率,2011,18(3):67-69,73.
- [12] 向祖平,陈中华,邱蜀峰.裂缝应力敏感性对异常高压低渗透气藏气井产能的影响[J].油气地质与采收率,2010,17(2):95-97.
- [13] 黄勇,李春兰,程林松,等.低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法[J].油气地质与采收率,2010,17(1):99-101.
- [14] 常宝华,熊伟,高树生,等.大尺度缝洞型碳酸盐岩油藏含水率变化规律[J].油气地质与采收率,2011,18(2):80-82,86.
- [15] 杨凯.裂缝性低渗透油藏注水吞吐开发影响因素分析[J].特种油气藏,2010,17(2):82-84.
- [16] 张铁栋,王亮,李景,等.裂缝性底水油藏单井水锥数值模拟研究[J].石油化工应用,2011,30(10):106-109.
- [17] 刘显太,王玉芹,杜玉山,等.背斜构造裂缝性碳酸盐岩油藏裂缝网络发育模式——以胜利油区富台油田车古201潜山为例[J].油气地质与采收率,2011,18(6):70-73.
- [18] 杨坚,吕心瑞,李江龙,等.裂缝性油藏离散裂缝网络随机生成及数值模拟[J].油气地质与采收率,2011,18(6):74-77.
- [19] 郑应钊,刘国利,马彩琴,等.多条件约束地质建模技术在青西油田裂缝性油藏中的应用[J].油气地质与采收率,2011,18(3):77-80,93.
- [20] 张岚,霍春亮,赵春明,等.渤海湾盆地锦州南油田太古界变质岩潜山储层裂缝三维地质建模[J].油气地质与采收率,2011,18(2):12-15.

编辑 常迎梅

欢迎订阅《油气地质与采收率》