

缝洞型油藏离散数值试井与注水优化研究

龙武,张翼,黄知娟,万小勇

(中国石油化工股份有限公司西北油田分公司工程技术研究院,乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河油田油藏属古岩溶缝洞型碳酸盐岩油藏,非均质性强,储集体空间分布具有不连续性。裂缝是主要的渗流通道,将溶洞连通,而流体又主要储存在溶洞中,储层中流体流动复杂。传统试井解释方法难以正确描述储层特征和流体流动规律,针对缝洞型油藏地质特征,把储层视为离散介质进行处理,建立了离散介质数值试井解释方法,解释结果更符合缝洞型储层的真实地质特征,能更好地描述缝洞型油藏结构。根据离散数值试井分析与地质认识结合,划分出塔河油田碳酸盐岩5种典型油藏类型和解释溶洞大小、溶洞距离等关键油藏参数,试井解释成果能有效指导注水井优选、注水参数优化及配套生产措施制定,对碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率具有重要意义。

关键词:离散数值试井;压降试井;注水优化;缝洞型油藏;塔河油田

中图分类号:TE34

文献标识码:A

Discrete numerical well test and water injection optimization of fracture-cave type reservoirs

Long Wu, Zhang Yi, Huang Zhijuan, Wan Xiaoyong

(Institute of Engineering Technology, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The carbonate oil reservoirs in the Tahe Oilfield belong to ancient karst fracture-cave type reservoirs. It has strongly heterogeneous characteristics and its space distribution is not continuous. The cracks which connect caves are the primary seepage channel and the fluid is mainly stored in the caves, so complex fluid flows lie in the reservoir. The traditional well test methods are hard to correctly describe fracture-cave type reservoir characteristics and fluid flow law. In view of the geologic features of fracture-cave type reservoirs, we regard reservoir as discrete media and set up a discrete numerical well test interpretation method. The results show that interpretations are more in line with the true fracture-cave reservoir geological features, and can better describe fracture-cave reservoir structure. According to the discrete numerical well test analysis combined with geological features, the paper divides carbonate oil reservoirs in the Tahe Oilfield into five typical reservoir types and explains cave sizes, distances and other key reservoir parameters. Well test interpretation results can effectively guide the injection wells optimization, injection parameter optimization and other supporting measures for production. It has an important significance for EOR of fracture-cave type reservoirs.

Key words: discrete numerical well test; pressure drawdown test; injection optimization; fracture-cave reservoirs; Tahe Oilfield

塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏属古岩溶缝洞型油藏,储集体空间分布具有不连续性,流体流动十分复杂。目前基于以多重连续介质模型和解析渗流理论为基础的试井解释方法难以对测试资料进行有效解释,不能描述油藏溶洞等储层特征^[1-3]。离散介质数值试井方法能更好地描述缝洞的发育特征。注水开发是坐稳塔河油田攻坚战最重要的手段,近年来注水规模快速扩大,而注水效果变差。当前注水依据单一,过多依据现场经

验,从注水压降试井等测试解读信息量少、分析不准确、利用率低。本文主要探讨如何改进试井解释方法达到高效利用测试资料进行科学注水的目标。

1 缝洞型油藏流体流动机理

1.1 缝洞型油藏介质类型分析

塔河油田缝洞型油藏基质孔隙中储油的可能性很小,溶蚀孔、洞是主要的储集空间,而裂缝是主要的渗流通道,溶蚀孔、洞空间通过裂缝联系起来。

裂缝—溶蚀孔洞型介质的井底压力变化曲线,无论在半对数坐标系中,还是在双对数坐标系中,都无法表现出双重介质的特征,而与单一孔隙介质基本一致^[3-5]。

1.2 离散介质

小的缝洞组成的地层,其连续性特征尺度较小,在油井尺度上可以视作单一连续介质,而大的洞穴则由于连续性特征尺度太大,在油井尺度上必须视作离散介质^[6]。塔河油田奥陶系储集层由2个基本的储集单元组成:洞穴和缝洞连续介质。洞穴之间由缝洞连续介质分开,因而是离散的;缝洞连续介质由洞穴分开,因而也是离散的。整个地层局部为连续的,整体为离散的。由缝洞连续介质和洞穴构成的离散介质,并不能称作双重介质,因为双重介质属于连续介质的范畴^[5-7]。

1.3 流体流动模型

在塔河油田实际缝洞型油藏储层中,储层结构应该描述为粗细溶洞相间的组合情形,粗细溶洞是间隔排列的,假设溶洞等长,则油井产量计算公式为:

$$q = \frac{\pi r^4 (P_e - P_{wf})}{\mu (1 + R_{pt}^4) \Delta L} \quad (1)$$

式中, q 为油井的产量; $(p_e - p_{wf})$ 为油井的生产压差; ΔL 为溶洞长; μ 为流体的黏度; r 为管子的半径; R_{pt} 为粗溶洞与细溶洞的半径比,无量纲。

溶洞型地层的流动过程,受瓶颈效应即细溶洞的影响很大,否则,油井的产量则高得惊人。油井钻遇了溶洞的较粗部分,而较细的部分则很难发现,但它对流体的流动起着至关重要的限流作用^[6-10]。

2 离散介质试井地质模型和数值模型的建立

2.1 地质模型建立

对于缝洞大面积发育的地层,中间一口油井生产时,可以把单井的地质模型建立成圆形储层模型。根据塔河油田碳酸盐岩储层特征,圆形储层模型可分为3种亚类:(1)圆形均质模型;(2)圆形复合模型;(3)圆形单洞地层。

缝洞发育成条带状河道形态时,则可以把单井的地质模型建立成线性储层模型,主要有5种情况:(1)线性均质模型;(2)线性复合模型;(3)线性单洞模型;(4)线性哑铃模型;(5)线性串珠模型。

2.2 数值模型建立

2.2.1 网格系统

采用直角坐标系下的块中心网格系统对渗流河道空间进行离散,即用网格将求解区域分为小块,以块的几何中心作为网格的节点^[8-9]。油井所在网格为径向流,需采用径向网格系统(图1)。局部径向网格加密适合圆形油藏和线性油藏,为了模拟近井地带的径向流和提高数值试井模拟结果的精度,需要对井所在的矩形网格进行径向网格加密^[10-12]。这样既能保证求解精度,也能大大减少网格节点的数目。

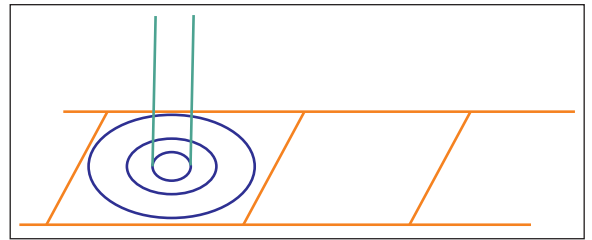


图1 径向网格示意

Fig. 1 Schematic diagram of radial grid

2.2.2 传导率

为了使数值计算稳定收敛,需要对传导率的计算方法进行设计^[7-12]。在一个一维网格系统中,第*i*个网格为一个大型溶洞。流体在网格*i-1*和*i*之间的流量需按下式计算:

$$q = \frac{A}{\mu} k_{i-1/2} \frac{p_{i-1} - p_i}{x_i - x_{i-1}} \quad (2)$$

式(2)中的渗流横截面积和黏度为常数,传导率的主要变量是渗透率。由于溶洞的渗透率为无穷大,因此,节点之间的渗透率取值方法为:

$$k_{i-1/2} = \min(k_{i-1}, k_i) = k_{i-1} \quad (3)$$

3 典型油藏类型划分及特征分析

3.1 塔河油田典型油藏类型划分

在塔河油田缝洞型油藏形成机理及储集空间特征分析的基础上,通过对前期51井次单井不稳定试井资料整理、对比、分析,结合单井静态认识、生产特征,将塔河油田缝洞型油藏划分5种典型类型(图2):

(1)河道底水型。储层整体呈条带状,河道储层中发育一定溶洞体,储层发育较好、有一定储集规模,强底水恒压边界;试井曲线整体呈1/2斜率,早期井储及径向流短或缺失,河道流中或出现下凹

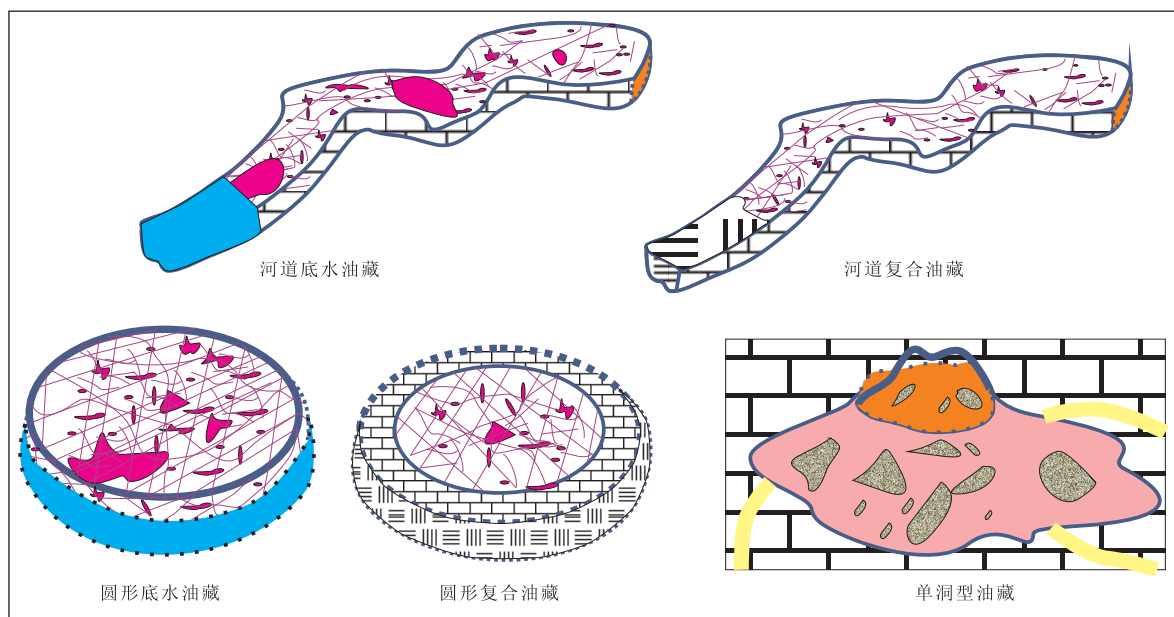


图2 塔河油田碳酸盐岩典型油藏类型

Fig. 2 Typical types of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield

溶洞特征显示,后期导数曲线下掉。

(2)河道复合型。储层整体呈条带状,储层发育相对差,后遇到封闭或物性差边界;试井曲线为曲线整体呈 $1/2$ 斜率,早期井储及径向流短或缺失,后期倒数曲线上翘。

(3)单洞型。井直接打到或沟通大的溶洞,井之外周围储层不发育或直接封闭边界;试井曲线整体表现为单一井储斜率为 1 或略小于 1 的曲线,持续时间长,后期展现短期斜率 $1/2$ 河道特征趋势或直接大斜率上翘。

(4)圆形复合型。井筒周围储集体发育较好,后遇到物性复合或封闭边界;试井曲线在井储阶段后进入径向流,后期导数曲线上翘。

(5)圆形底水型。井底沟通溶洞、井筒周围储层发育好,规模大,圆形地层出现数个大洞,强底水恒压边界;试井曲线初期表现一定时间井储阶段后进入径向流,径向流阶段出现下凹溶洞显示,后期导数曲线下掉。

3.2 不同类型典型油藏生产特征分析

对塔河油田划分的 5 种类型典型油藏注水前生产特征对比分析,不同类型油藏生产特征规律明显不同:(1)整体上圆形底水型、河道底水型油藏累产量大,河道底水和圆形底水类型油藏无水采油量明显优于其他 3 类;(2)河道复合、圆形复合及单洞型 3 种类型油藏压力、产量递减快,河道底水型及圆形底水型油藏压力、产量平稳;(3)河道底水、圆形底水型油藏整体含水相对较高,含水上升

相对平稳,单井之间差异大,圆形复合型油藏含水最低。

3.3 不同类型油藏类型注水效果分析

在进行不同类型单井注采比、周期产油、累计存水率、含水等参数对比分析的基础上,对塔河油田划分的 5 种类型典型油藏注水效果进行对比分析,不同类型油藏注水效果差异大:(1)圆形复合、单洞、河道复合型油藏,其平均注采比较低,累计存水率较高,适合单井注水替油,且效果较好;(2)圆形复合、单洞型油藏,注水替油产油量较高;(3)复合底水型、圆形底水型等底水油藏普遍注水替油次数较少(图 3)。

整体来看,圆形复合型、单洞型注水替油效果较为理想,其次是河道复合型,河道底水型与圆形底水型油藏注水替油效果差。

4 注水压降分析与注水优化应用

4.1 注水替油单井优选及参数优化原则

根据不同类型注水替油效果分析发现油藏类型是决定注水效果的决定因素,不同类型油藏注水效果指标层次明显,单洞型和圆形复合型效果具有明显优势,河道复合型注水效果中等一差且差异大,河道底水与圆形底水油藏注水替油效果差。结合单井注水后生产规律、注水效果评价分析,初步定性确定注水方式:单洞型和圆形复合油藏注水方式采用注水强度中等、注水量大、注水周期及关井时间逐步加大,开井生产制度小,生产压差过大易

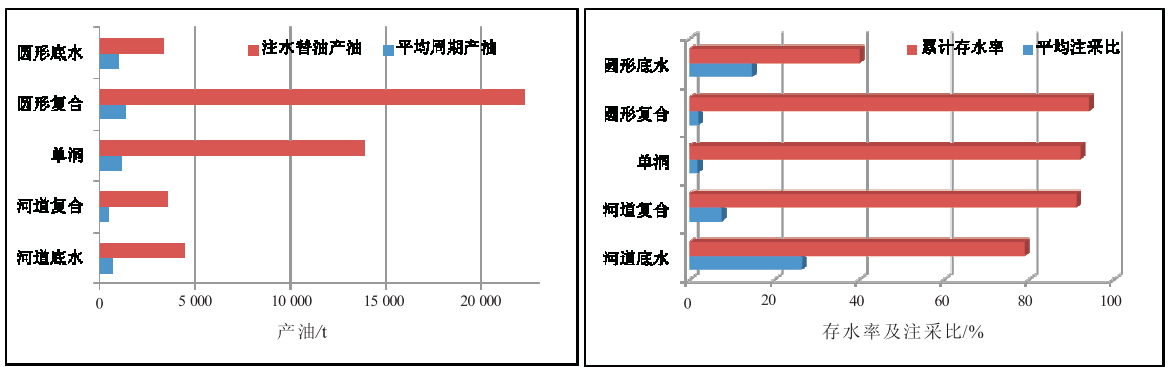


图3 塔河油田不同典型油藏类型注水效果对比分析

Fig. 3 Water injection effect analysis for different types of reservoir in Tahe Oilfield

导致底水锥进,建议注水后转抽生产。对于单洞型油藏,目前进行注水参数优化量化探索,选取现场单井周期最佳注水周期注水量,同时结合试井求出溶洞体积,初步通过溶洞大小确定合理注水量。通过压降试井测试优选单井是非常合理的方式,注水压降不影响生产,测试方便,成本低,可以有效准确预测注水效果。利用生产特征优选单井相比压降测试方法较为粗放,准确度低。

4.2 注水优化应用实例

TH12303井2010年11月9-17日进行注水压降,双对数曲线上有一个“凹子”,识别为溶洞,计算溶洞体积为123 500 m³,加大注水量,由每轮次注水2 600 m³加大到5 100 m³,动用井筒外的储集体(图4)。从生产数据看,未加大注水量前,平均周期产油758 t,加大注水量动用井筒附近储集体后平均周期产油1 126 t。

2012年塔河油田10、12区16井次注水压降测试显示为单洞型的单井计算储集溶洞大小等参数后,对单轮次注水量进行优化,及时跟踪应用效果并调整,单井平均周期增油216.8 t,累计增油约398 700 t。

5 结论与认识

1)塔河油田碳酸盐岩油藏缝洞型储层介质可

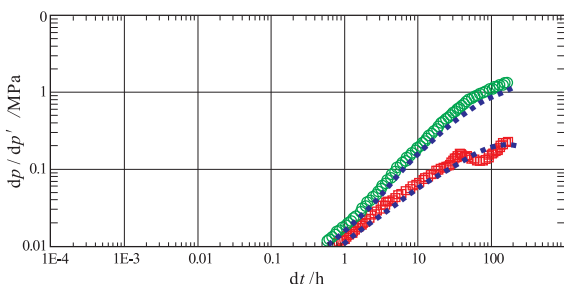


图4 TH12303井注水压降双对数曲线

Fig. 4 Double logarithmic curves of injection pressure drop in well TH12303

视为单一介质,缝洞介质油藏上的“凹子”特征是地层存在大型溶洞的反映。

2)根据碳酸盐岩油藏储层发育特征建立圆形地层和线性地层2大类8小类地质模型。通过离散数值试井方法对51井次试井资料解释分析,结合单井静态认识与生产特征,将塔河油田缝洞型油藏划分为河道底水、河道复合、单洞型、圆形复合、圆形底水5种典型类型。

3)通过对5种典型油藏注水前生产特征及注水效果对比分析发现,单洞型、圆形复合型油藏注水替油效果较为理想,河道复合型次之,河道底水型与圆形底水型油藏效果差。

4)利用离散数值试井方法对注水压降资料解释能有效刻画油藏并解释有效参数,对注水优化和指导注水精细开发具有重要意义。

参考文献:

- [1] 鲁新便. 岩溶缝洞型碳酸盐岩储集层的非均质性[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 360-362.
- [2] 李传亮. 两种双重介质的对比与分析[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 128-131.
- [3] 周兴熙. 初论碳酸盐岩网络状油气藏;以塔里木盆地轮南奥陶系潜山油气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 528.
- [4] 涂兴万, 陈朝晖. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏水动力学模拟新方法[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 53-56.
- [5] 张希明, 朱建国, 李宗宇, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分[J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 21-24.
- [6] 彭小龙, 杜志敏, 刘学利, 等. 大尺度溶洞裂缝型油藏试井新模式[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 75-77.
- [7] 常学军, 姚军, 戴卫华, 等. 裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏试井解释方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(3): 339-346.
- [8] 李传亮, 张学磊. 管流与渗流的统一[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 446-449.

表 1 三叠系哈拉哈塘组薄砂体测井解释标准

Table 1 Logging interpretation standard for thin sand body in Halahatang Formation of Triassic

解释结果	孔隙度/%	含水饱和度/%	泥质含量/%	电阻率/ (Ω·m)	AC/ (μs·ft)	DEN/ (g·cm ⁻³)
油层	≥15	<50	<20	≥1.7	≥79	<2.45
油水同层	≥1%	50~70	<20	1.5~1.7	≥77	<2.48
水层	≥15	>85	<20	<1.5		
干层	<10	>85	≥20			

率在 1.7 Ω·m 以上、油水同层电阻率在 1.5~1.7 Ω·m 之间、水层电阻率在 1.5 Ω·m 以下。根据该标准对盐边三叠系老井进行了油气复查,新增潜力层 21 井次,可以作为下步试油试采的重点。

5 圈闭综合评价

通过构造—储层研究发现,此次研究目标中的哈 1 段 1 号及 2 号薄砂岩油气藏,其圈闭类型基本上都是受岩性控制背景上的局部低幅度复合型圈闭;哈 1 段 1 号小层新落实 3 个圈闭均为低幅度岩性—构造复合型圈闭;哈 1 段 2 号小层新落实 1 个圈闭为岩性圈闭。计算 1 区三叠部位上油组 1 号小层 3 个圈闭合计地质储量为 48.7×10⁴ t;S7201 圈闭油藏有效厚度 3 m,油水界面为-3 540 m,含油面积 7.16 km²,计算石油地质储量为 149.9×10⁴ t。

6 结论

- 1) 通过开展小层精细划分、沉积相分析、储层预测等工作,为薄砂体储层基础性研究打下了基础。
- 2) 利用井震结合手段优选地震属性,研究及

对比发现弧长、平均反射强度、瞬时类属性可以较好的反映哈拉哈塘组薄砂体储层的展布。

3) 运用交汇图版法初步建立了哈拉哈塘组薄砂体储层的测井解释标准,经过老井复查,新增潜力层 21 井次。

4) 初步落实了 1 区、S72 井区等部位的储量为 306.2×10⁴ t,为后期老区层系接替提供了一定的储量基础。

致谢:撰写过程中受到了鲁新便副院长在“塔河油田盐边三叠系上统哈拉哈塘组薄砂体展布规律研究”项目中对储层预测研究方面给予的指导,在此表示深切感谢!

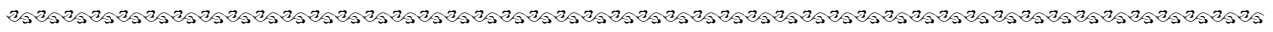
参考文献:

[1] 汪忠德,王新海,王锦芳,等.塔里木盆地轮南油田 2、3 井区三叠系沉积微相研究[J].沉积与特提斯地质,2008,28(3):66-74.

[2] 郭建华.阿克库勒地区三叠系层序地层与沉积相研究[J].西南石油大学学报,2007,22(5):1-5.

[3] 刘海兴.塔里木盆地三叠-侏罗系沉积相[J].沉积与特提斯地质,2003,23(1):37-44.

(编辑 叶德燎)



(上接第 44 页)

[9] 闫相宾,李铁军,张涛,等.塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J].石油与天然气地质,2005,26(2):202-207.

[10] 彭小龙,刘学利,杜志敏.缝洞双重介质数值模型及渗流特征研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(1):61-64.

[11] Chang J, Yortms Y C. Pressure transient analysis of fractal reser-

voirs[J]. SPEFE, 1990, 5(1):31-38.

[12] Aeuna J A, Yortsos Y C. Practical application of fractal pressure transient analysis in naturally fractured reservoirs[J]. SPEFE, 1995, 10(3):73-129.

(编辑 叶德燎)