

缝洞型油藏离散数值试井解释方法研究^{*}

龙武 万小勇 李冬梅 陶碧娥 张翼

(西北油田分公司工程技术研究院 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏主要是裂缝和溶洞组成的缝洞型储层,非均质性极强,基质系统不具有储渗能力,地层流体以管流或管流—渗流耦合流动为主。传统试井解释方法基于多重连续介质模型和解析渗流理论,难以对储层特征和流体流动规律正确描述。离散数值试井解释方法通过连续性特征分析,把溶洞和裂缝视为离散介质进行处理,把缝洞型储层等效为粗细溶洞相间的组合模式,并对粗细溶洞中的流体流动进行管流公式和等效渗流公式描述,建立8种试井地质模型,对径向流、线性流和储罐流分别进行有限差数值方法求解,绘制典型曲线并分析各流动阶段压力特征。通过T762井实例应用分析,其解释结果能更好地描述缝洞型油藏特征并指导开发。

关键词 塔河油田 缝洞型油藏 离散数值试井 管流与渗流 研究

文章编号:1004-4388(2013)05-0001-04

中图分类号:TE353

文献标识码:A

0 引言

塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏属古岩溶缝洞型油藏,非均质性强,储集空间分布具有不连续性,裂缝将溶洞连通,致使流体在缝洞系统内的流动规律十分复杂,裂缝是主要的渗流通道,而流体又主要储存在溶洞中^[1-2]。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,无法解释出地下的溶洞性质,其分析解释结果与缝洞型网络状油藏的实际地质特征有很大的差异^[3]。将缝洞型油藏作为离散介质来处理更符合缝洞型储层的真实地质特征,离散介质数值试井方法对该井的解释结果更好地反应了缝洞的发育特征,验证了三维地质综合解释的结果。

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,即使孔隙中储集了原油,开发过程中的流动性也极差,属于裂缝—孔隙型双重(孔)介质类型^[2-4]。溶蚀孔洞是主要的储集空间,而裂缝是主要的渗流通道,孔洞空间通过裂缝联系起来,并将其中储集的油气流体输送到油井而被开采出来。

缝—洞型双重介质与传统的裂缝—孔隙型双重介质完全不同,虽然都属于双重介质的范畴,但它们的渗流方式和渗流机理有很大的差异。缝洞型双重介质的流体从渗透率相对较高的溶蚀孔洞系统渗流到渗透率相对较低的裂缝系统,而传统的裂缝—孔隙型双重介质则恰恰相反,流体从渗透率相对较低的孔隙系统渗流到渗透率相对较高的裂缝系统。裂缝—孔隙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^[5-9]。虽然油藏的储集空间由裂缝和孔洞2种类型的孔隙构成,形式上可以称之为双孔介质或双重介质,但由于溶蚀孔洞的渗透性远高于裂缝的渗透性质,因此,油藏或油井生产动态特征上却表现不出双重介质的特性。

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两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

[基金项目] 受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”中的“塔里木盆地大型碳酸盐岩油气田勘探开发示范工程”(2008ZX05049-05)资助

[作者简介] 龙武,男,工程师,1983年出生,硕士,现从事油藏评价研究工作。电话:0991-3161082, E-mail:305118621@qq.com。

开,因而也是离散的。整个地层局部为连续的,整体为离散的,一维为连续的,二维和三维为离散的。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。一般说来,当缝洞数量无限大时,可视为双重介质;当缝洞数量有限时,便不能称作双重介质^[8],塔河油田有很多大型的洞穴,但洞穴数量有限,也不能称作双重介质。

1.3 流体流动模型

缝洞型油藏储层中,在单个溶洞或缝中,油井的产量计算管流公式为

$$q = \frac{\pi r^4 (p_e - p_{wf})}{2\mu \Delta L} \quad (1)$$

式中: q ——油井的产量, m^3/d ;

Δp ——油井的生产压差,即外边界压力与井底流压的差值(= $p_e - p_{wf}$), MPa ;

ΔL ——溶洞长(井距), m ;

μ ——流体的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

r ——管子的半径, m 。

实际油藏中储层结构应该描述为粗细溶洞相间的组合情形(见图1),粗细溶洞是间隔排列的,假设溶洞等长,粗溶洞与细溶洞的半径比为

$$R_{pi} = \frac{r}{r_i} \quad (2)$$

则油井产量计算公式为

$$q = \frac{\pi r^4 (p_e - p_{wf})}{\mu (1 + R_{pi}^4) \Delta L} \quad (3)$$

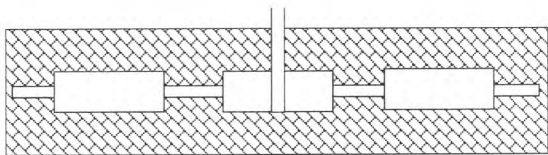


图1 组合溶洞

粗细溶洞半径比的数值变化范围是非常大的,它可以在 $1 \sim \infty$ 之间取任何值,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^[6-8]。

用管流公式描述地层中的流动是很不方便的,因为不知道管径的大小和管子的弯曲程度以及管径的均匀程度。若用渗流公式描述地层中的流动,(1)式可以用渗流公式描述,即

$$q = \frac{KA}{\mu} \frac{\Delta p}{\Delta L} \quad (4)$$

2 离散介质试井地质模型

2.1 圆形储层模型

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^[9]。根据塔河油田碳酸盐岩储层特征,圆形储层模型可分为3种类型(见图2):

①圆形均质模型:该模型是碎屑岩地层中常见的单井地质模型,其主要特征是均质等厚圆形地层中心一口油井,碳酸盐储层中主要为大的溶洞和物性相对均匀溶蚀缝洞储层;②圆形复合模型:是一种非均质地层,若缝洞发育不均匀,地层物性出现了内外分区现象,这种地层则为圆形复合地层;③圆形单洞地层:圆形地层中若出现一个大型洞穴,其中必定储集了大量的流体,是地层能量的重要源泉。

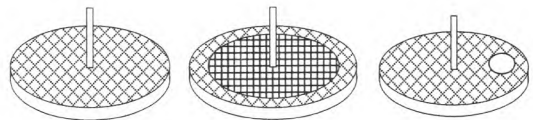


图2 圆形储层模型中的均质模型、复合模型、单洞模型

2.2 线性储层模型

缝洞发育成条带状河道形态,则可以把单井的地质模型建立成线性储层模型(见图3)。

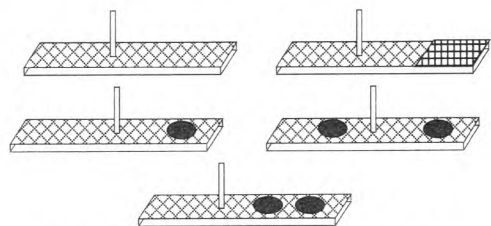


图3 线性储层模型中的均质模型、复合模型、单洞模型、哑铃模型、串珠模型

该模型有5种情况:①线性均质模型。由于塔河油田的储集体是在古水流作用下形成的岩溶储层,古河道的形态部分决定了储集体的发育形态,因此,河道线性储层是塔河油田的常见的储层形态。若古岩溶均匀发育,则形成了线性均质储层。②线性复合模型。若古水流的能量不均匀,则会出现非均质的线性储层,即储层由高渗透和低渗透两个均质层段组合而成;③线性单洞模型。若线性储层中发育了一个大型溶洞,则成为线性单洞储层;④线性哑铃模型。若线性储层中对称发育了二个大型溶

洞,则成为线性哑铃储层;⑤线性串珠模型。若线性储层中单边发育了二个大型溶洞,则成为线性串珠储层。

3 数学与数值模型建立

3.1 数学模型建立

3.1.1 连续性方程

根据质量守恒定律,渗流的连续性方程为

$$-\nabla \cdot (\rho V) = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) \quad (5)$$

式中: ρ ——流体的密度, g/cm^3 ;

V ——渗流速度, m/ks ;

ϕ ——储层岩石的孔隙度。

3.1.2 运动方程

基于达西定律,流体的运动方程可以表示为

$$V = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (6)$$

式中: K ——储层岩石的渗透率, D 。

3.1.3 状态方程

流体的密度随压力变化的关系方程可以写成

$$\rho = \rho_i [1 - C_L(p_i - p)] \quad (7)$$

式中: ρ_i ——原始地层压力下的流体密度, g/cm^3 ;

p_i ——原始地层压力, MPa ;

C_L ——流体的压缩系数, MPa^{-1} 。

岩石的孔隙度随压力变化的关系方程可以写成

$$\phi = \phi_i [1 - C_p(p_i - p)] \quad (8)$$

式中: ϕ_i ——原始地层压力下的岩石孔隙度, f ;

C_p ——储层岩石的压缩系数, MPa^{-1} 。

3.1.4 渗流微分方程

把运动方程和状态方程代入连续性方程,简化后可得渗流微分方程

$$\nabla \cdot (K \nabla p) = \mu \phi C_i \frac{\partial p}{\partial t} \quad (9)$$

其中

$$C_i = C_L + C_p \quad (10)$$

式中: C_i ——储层的总压缩系数, MPa^{-1} 。

3.2 数值模型建立

3.2.1 网格系统

对于前面建立的数学模型,本文用有限差分法对其进行数值求解。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(见图4)。

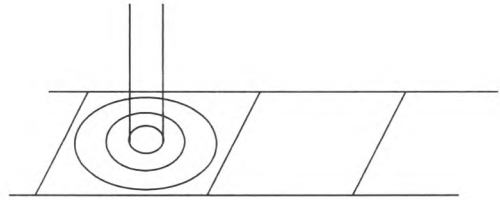


图4 径向网格示意图

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。这样既能保证求解精度,也能大大减少网格节点的数目。

3.2.2 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 之间的流量计算如下

$$q = \frac{A}{\mu} K_{i-1/2} \frac{p_{i-1} - p_i}{x_i - x_{i-1}} \quad (11)$$

(11) 式中的渗流横截面积和粘度为常数,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

$$K_{i-1/2} = \min(K_{i-1}, K_i) = K_{i-1} \quad (12)$$

同理

$$K_{i+1/2} = \min(K_i, K_{i+1}) = K_{i+1} \quad (13)$$

4 离散数值试井解释实例

用缝洞型油藏离散介质数值试井软件对塔河油田 T762 井压力恢复数据进行了解释,得到了合理的解释结果(见图5)。

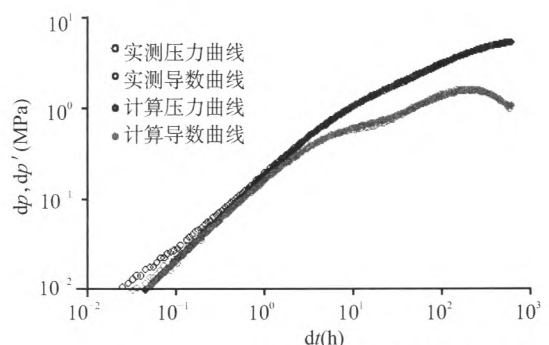


图5 T762井离散数值试井拟合成果图

从实测数据双对数曲线图来看,压力曲线和导

数曲线中后期呈现出明显的斜率为 1/2 的平行线,表现出明显的线性流特征,因此选用了河道线性流模型进行解释。导数曲线后期明显下掉,根据该井产量压力变化状况和曲线下掉的幅度,拟合解释为存在一个大溶洞,因此选用线性单洞模型,最终拟合结果是在存在大溶洞的河道一侧为封闭边界,另一侧为定压边界,沟通底水,能量充足。

常规试井在解释导数曲线出现“凹子”的方法只能借助于双重介质,并且不能解释为什么导数曲线出现“凹子”后没有出现径向流特征,而是继续上扬^[9-10]。通过离散数值试井解释与常规试井解释结果对比,用离散介质试井模型解释得到的地质参数比较合理,反应了缝洞型油藏特有的大溶洞特征,其解释结果更具有实际应用价值(见表 1)。T762 井钻至 5523.96 ~ 5525.61 m 放空,钻至 5533.55 m 井涌。8 月 16 ~ 25 日进行钻杆测试,用 7 mm 油嘴,油压 6.8 MPa,日产原油 160 m³。因钻杆测试获工业油气流,所以在井深 5533.55 m 提前终孔。钻井过程显示井底存在溶洞。T762 井 2001 年 8 月 19 日投产至今,累产生原油 6.5 × 10⁴ t,产水 5.3 × 10⁴ t,表明地下溶洞较为发育。

表 1 T762 井数值试井与常规试井解释结果对比表

离散数值试井解释		常规试井解释	
参数	取值	参数	取值
地质模型	线性单洞	油藏模型	双重介质 + 复合地层
边界条件	定压 + 封闭	井筒条件	井筒 + 表皮
原始地层压力 (MPa)	55.35	外边界条件	无穷大边界
井储系数 (m ³ /MPa)	24	井筒储集系数 (m ³ /MPa)	2.8
井底溶洞容积 (m ³)	29840	内区渗透率 (D)	1.83
表皮因子	-5	表皮系数	-8.6
储层渗透率 (D)	2.46	原始地层压力 (MPa)	55.36
河道宽度 (m)	180	内区窜流系数	4.77 × 10 ⁻⁸
外边界距离 (m)	400	内区储能比	0.034
地层溶洞距离 (m)	310	外区窜流系数	6.64 × 10 ⁻⁷
地层溶洞渗透率 (D)	8		
地层溶洞容积 (m ³)	700000		

5 结 论

(1) 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解释出缝洞介质性质,其分析结果与实际地质特征差异较大。将缝洞型油藏作为离散介质来处理及利用离散介质数值试井方法能更好地反应了缝洞的发育特征。

(2) 与孔隙—裂缝储层不同,缝洞型双重介质的流体从渗透率相对较高的溶蚀孔洞系统渗流到渗透率相对较低的裂缝系统,可视为单一介质,缝洞介质

油藏上的“凹子”特征是地层存在大型溶洞—洞穴的反映。

(3) 流体在缝洞介质中的流动可分为管流和渗流,可分别用管流公式和渗流公式进行描述,但渗流和管流是统一的,可以采用等效的渗流模型进行研究。

(4) 根据缝洞介质与洞穴的不同组合,把地质模型划分为圆形地层和线性地层 2 大类,又可细分为 8 个小类。离散介质的流动由径向流、线性流和储罐流三种流动组合而成,利用离散数值试井方法求解地质参数比较合理,更具应用价值。

参 考 文 献

- [1] 鲁新便. 岩溶裂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型[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. 管流于渗流的统一[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 446 - 449.
- [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 Reservoirs[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.

本文收稿日期: 2012 - 12 - 11

修改稿返回日期: 2013 - 09 - 10 编辑: 许兰婷

缝洞型油藏离散数值试井解释方法研究

作者: [龙武](#), [万小勇](#), [李冬梅](#), [陶碧娥](#), [张翼](#)
作者单位: [西北油田分公司工程技术研究院 新疆乌鲁木齐830011](#)
刊名: [油气井测试](#)
英文刊名: [Well Testing](#)
年, 卷(期): 2013, 22(5)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_yqjcs201305001.aspx