

大尺度串联双缝洞碳酸盐岩油藏的压力响应分析

熊钰¹, 叶海峰¹, 蔡明金², 牛新年²

(1.西南石油大学, 四川 成都 610500; 2.中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:针对以裂缝—溶蚀洞穴为储集空间的大尺度非连续介质缝洞型油气藏,大量的井基本上都是独立的缝洞系统,多为通过井眼沟通大裂缝,然后由裂缝串联起1至2个大型溶蚀洞穴系统的独立缝—洞单元,采用连续介质理论解释所获得的结果难以和储层实际流动过程相对应。提出的数学模型把井—洞之间和洞与洞之间的裂缝考虑为一维裂缝,远井洞外围存在裂缝沟通流动,从而形成裂缝沟通两个溶蚀洞穴系统的线性串联试井数学模型,模型中引入了瞬态流动概念和多重介质中窜流的概念。利用瞬态传导原理和拉普拉斯变换逐步求解数学模型,在拉普拉斯空间下无因次井底压力的解析解进行改进的Stehfest数值反演绘制典型曲线,通过敏感性分析讨论发现该模型可正确反映流动控制因素与地质因素之间的关系。实例解释对比表明:用该模型可正确解释井筒储集系数、表皮效应、裂缝系统渗透率、溶洞系统等效渗透率、缝长和溶洞大小等几何参数。

关键词:缝洞型油藏; 钻遇裂缝; 双缝洞串联; 数学模型; 典型曲线分析

中图分类号: TE372 **文献标识码:** A

Pressure response analysis of large scale series double fracture–cavity carbonate reservoir

Xiong Yu¹, Ye Haifeng¹, Cai Mingjin² and Niu Xinnian²

(1.Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The fracture–cavity carbonate reservoir has large scale and discontinuous medium, and its main reservoir space is composed of fractures and caverns. Many wells are independent fractured–cavity systems, and most of them connect macrofractures to the wellbore. These wells are separate fracture–cavity cells which connect with one or two big cavities in series by fracture network, so the actual flow process of the reservoir does not match the result obtained by adopting traditional continuum theory. An analytical mathematic model is presented by considering the fracture network between well–cavity and cavity–cavity as one dimensional linear fracture, and other fracture communication flow exist in the periphery of the cavity (away from wellbore). Accordingly, the linear–in–series well test mathematic model with fracture connecting two cavity systems is established, and the model introduces the conception of transient flow and channeling flow of multiple media. The Transient conduction principle and Laplace transform are used to solve the mathematical model, and the dimensionless bottom hole pressure type curves are plotted in real space by using the improved Stehfest numerical inversion. The analysis of the sensitivity of cave parameters shows that the model can correctly reflect the relation between flow control factor and geological factor. Application examples indicate that this model can correctly explain wellbore storage factor, skin effect, the permeability of fracture system and cavity system, and the geometric parameters of fracture and cavity.

Key words: fracture–cavity reservoir, drilling fracture, double fractured–cavity in series, mathematical model, type curves analysis

一般来讲碳酸盐岩按储集条件划分为四种类型:孔隙型、裂缝—孔洞型、孔隙—裂缝型、裂缝型。实际上还有卡斯特地貌类型的碳酸盐岩油气藏,国

内外的学者把这种类型划分为缝—洞型碳酸盐岩油气藏^[1],塔里木盆地在该种类型储层中已经建立起年产量超过1 000万吨的石油生产能力。该种储层主要

收稿日期:2017-05-16。

第一作者简介:熊钰(1968—),男,教授,博士,油气藏工程、油气藏流体相态理论与测试及注气提高采收率方面的教学与研究。

储集和渗流空间为互相连通的裂缝和溶蚀孔洞,具有极强的非均质性,常常出现钻井放空漏失等现象,缝洞特征尺度较大,可达几米甚至几十米^[2-4],采用常规连续介质的方法不能解释缝洞特征的几何参数,对于试井解释工作带来巨大的困难。

国内外在碳酸盐岩缝洞型油气藏试井理论及解释方法方面已做了大量研究,但很多成功的例子均是建立在连续介质理论的基础上。从1960年苏联的Barenblatt^[1]首次针对裂隙油藏提出了双重介质的概念,到Warren、Root^[2](1963)和Kazemi^[3](1969)在双重介质的基础上,研究了两种介质之间的稳态窜流和非稳态窜流,全面详细地阐述了两种介质之间的流体交换规律。1975年,Cloosmann P J基于三重介质提出了三重孔隙或三重介质渗流的数学模型^[4]。薛成瑾等人(2003)将溶洞归为三重介质类型^[5]中的一种介质。Camacho-Velazquez(2005)研究了碳酸盐岩缝洞型油藏的压降特征^[6]。2004~2006年,姚军等人在三重介质数学模型的基础上,进一步研究了相应的试井解释,主要贡献在引入了遗传算法进行拟合^[7-9]。Arbogast T(2006)为考虑溶洞在流动过程所起的作用,使用Darcy-Brinkman方程这一统一的形式描述流体在溶洞中的流动,通过有限元的方法可以直接用达西定律描述整个渗流场的运动^[10],但是忽略了裂缝及其孔洞对溶洞流动的影响。2008年,彭小龙等人采用零维模型思路建立了井打在大尺度溶洞中的单洞试井模型,该模型适用于流动边界复杂的情况,但同时也直接忽略了流动边界条件^[11]。2009年,张福祥等人在一维圆形坐标下建立了井打在溶洞中的单洞试井模型,得到了实空间下的压力分布表达式^[12]。2011年,杨锋等人建立了井打在大溶洞中并通过裂缝再连接一个溶洞的双溶洞试井模型,通过井打在洞中,该洞相当于扩大了井径,等效为了增加井筒储集效应^[13],利用Stehfest(1970)数值反演^[14]和拉普拉斯变换解数学模型,绘制了试井分析曲线^[15],进行了敏感性分析,该模型考虑了连接井底的溶洞与裂缝的流动边界,但是未给出远井溶洞与裂缝的流动边界,并且模型是在径向坐标下建立,仍然使用的是常规连续介质的方法,所以裂缝对溶洞的影响不明显。2014年,杨芳等人^[16]采用正交变换法求解出了井打在大溶洞的单洞试井模型的解析解,分析了裂缝储容比、溶洞储容比、裂缝与溶洞之间的窜流系数对典型曲线的影响^[15],但该模型并没有在现

场中有成功的应用实例。2015年Chen P, Wang X, Liu H, et al^[17]和2016年Zhang X, Wang Q, Guangju W U, et al^[18]均采用了边界元法建立了井打在溶洞中的单洞试井数学模型,主要对溶洞大小、压缩系数、溶洞与井的距离等参数进行了敏感性分析,进行了实例计算,但对其它缝洞参数未进行分析讨论。而事实上是到目前为止还没有见到能够正确处理缝—洞储层试井解释方法。

本文根据塔里木盆地油气井类型统计,在已开发的缝洞型油气井中发现大面积连通的情况较少。针对该情况,将裂缝中流动处理为渗流,经裂缝串联的大型溶洞处理为向裂缝供给的等势体,在考虑各个裂缝与溶洞连接处存在瞬态流动边界条件下,建立了井打在裂缝中的双缝洞串联非连续介质油藏试井模型,结合现场试井测试,分析了模型在溶洞规模和裂缝参数变化上对压力响应特征曲线的影响,用生产动态特征研究中所建方法验证了其正确性和实用性。

1 数学模型

根据前述,单井控制储集体多为通过井眼沟通大裂缝,然后由裂缝串联1至2个大型溶蚀洞穴系统的独立缝—洞单元,以井筒底部中心为原点,建立如图1所示的坐标系,模型基本假设条件:1) 储层储集空间为溶洞及裂缝,洞间裂缝和井筒间裂缝的长度、宽度、孔隙度以及渗透率存在非均质性,溶洞和裂缝为微可压缩,且压缩系数为常数;2) 流体为单相微压缩流体;3) 流体在裂缝中的流动满足达西定律,溶洞流动始终视为等势体;4) 忽略重力的影响,考虑表皮效应,考虑井筒储集效应。

基于上述假设和多孔介质中流体流动的基本理

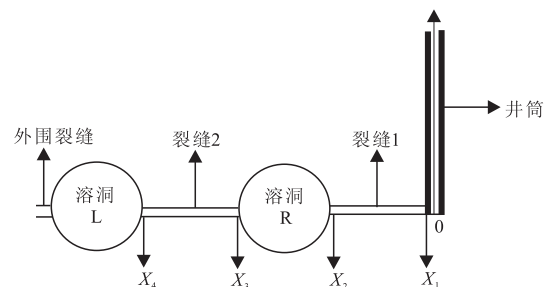


图1 线性非均质串联双缝洞碳酸盐岩油藏物理模型
Fig. 1 Physical model of linearly heterogeneous and series double fracture-cavity carbonate reservoir

论,建立在缝洞型碳酸盐岩油藏中流体在裂缝中流动的无量纲微分方程:

$$K \frac{\partial^2 p_{\text{D}}}{\partial x_{\text{D}}^2} + \lambda_{\text{Rf}}(p_{\text{D}} - p_{\text{RD}}) + \lambda_{\text{Lf}}(p_{\text{D}} - p_{\text{LD}}) = \omega_{\text{f}} \frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial t_{\text{D}}} (x_{1\text{D}} \leq x_{\text{D}} \leq x_{4\text{D}}) \quad (1)$$

该系统的初始条件为:

$$p_{\text{D}}|_{t=0} = p_{\text{LD}}|_{t=0} = p_{\text{RD}}|_{t=0} = p_{\text{wD}}|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

考虑井筒储集系数和表皮效应的内边界条件为:

$$K \frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial x_{\text{D}}} \Big|_{x_{\text{D}}=x_{1\text{D}}} = \frac{1}{L_{2\text{D}} W_{\text{D}}} \left(1 - C_{\text{D}} \frac{dp_{\text{wD}}}{dt_{\text{D}}} \right) \quad (3)$$

$$p_{\text{D}} \Big|_{x_{\text{D}}=x_{1\text{D}}} = p_{\text{wD}} - S \frac{1}{L_{2\text{D}} W_{\text{D}}} \quad (4)$$

由于远井溶洞L左侧连接其他裂缝,外边界近似处理为无限大边界条件:

$$\lim_{x_{\text{D}} \rightarrow \infty} p_{\text{D}} \Big|_{x=x_{\text{ND}}, t=t_{\text{ND}}} = 0 \quad (5)$$

当洞间裂缝2向近井溶洞R供液时,在近井溶洞R与近井裂缝1远端的界面处,裂缝2与溶洞R的界面流量和溶洞R自身的弹性膨胀液量共同流向近井裂缝1中,根据瞬态流动原理,其关系如下:

$$K \frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial x_{\text{D}}} \Big|_{x=x_{2\text{D}}} = K \frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial x_{\text{D}}} \Big|_{x=x_{3\text{D}}} + \frac{\pi \omega_{\text{R}} R_{\text{RD}}^3}{L_{2\text{D}} W_{\text{D}}} \frac{dp_{\text{RD}}}{dt_{\text{D}}} \quad (6)$$

在洞间裂缝2远端和远井溶洞L的界面处,溶洞L向裂缝2供液,其关系如下:

$$K \frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial x_{\text{D}}} \Big|_{x=x_{4\text{D}}} = \frac{\pi \omega_{\text{L}} R_{\text{LD}}^3}{L_{2\text{D}} W_{\text{D}}} \frac{dp_{\text{LD}}}{dt_{\text{D}}} \quad (7)$$

由于洞为等势体,所以裂缝与溶洞在界面处的压力为:

$$p_{\text{D}} \Big|_{x=x_{2\text{D}}} = p_{\text{D}} \Big|_{x=x_{3\text{D}}} = p_{\text{RD}} \quad (8)$$

$$p_{\text{D}} \Big|_{x=x_{4\text{D}}} = p_{\text{LD}} \quad (9)$$

引入下列无量纲变量:

$$K = \frac{k_{\text{f}}}{k_{\text{f}} + k_{\text{L}} + k_{\text{R}}}$$

$$x_{\text{ND}} = \frac{x_{\text{N}}}{r_{\text{w}}} (N=1,2,3,4)$$

$$p_{\text{D},\text{LD},\text{RD},\text{wD}} = \frac{86.4(k_{\text{f}} + k_{\text{L}} + k_{\text{R}})r_{\text{w}}}{q\mu B_{\text{o}}} (p_{\text{i}} - p_{\text{f},\text{L},\text{R},\text{wf}})$$

$$\omega_{\text{M}} = \frac{\phi_{\text{M}} C_{\text{M}}}{\phi_{\text{L}} C_{\text{L}} + \phi_{\text{f}} C_{\text{f}} + \phi_{\text{R}} C_{\text{R}}} \quad (\text{M}=\text{f},\text{R},\text{L})$$

$$t_{\text{D}} = \frac{3.6(k_{\text{f}} + k_{\text{L}} + k_{\text{R}})t}{\mu(\phi_{\text{L}} C_{\text{L}} + \phi_{\text{f}} C_{\text{f}} + \phi_{\text{R}} C_{\text{R}})r_{\text{w}}^2}$$

$$R_{\text{iD}} = \frac{R_{\text{i}}}{r_{\text{w}}} (i=\text{R},\text{L})$$

$$L_{2\text{D}} = \frac{L_2}{r_{\text{w}}}$$

$$W_{\text{D}} = \frac{W}{r_{\text{w}}}$$

$$\lambda_{\text{Rf}} = \frac{\beta_{\text{Rf}} k_{\text{R}}}{k_{\text{f}} + k_{\text{R}} + k_{\text{L}}} r_{\text{w}}^2$$

$$\lambda_{\text{Lf}} = \frac{\beta_{\text{Lf}} k_{\text{L}}}{k_{\text{f}} + k_{\text{R}} + k_{\text{L}}} r_{\text{w}}^2$$

$$C_{\text{D}} = \frac{C}{24(\phi_{\text{L}} C_{\text{L}} + \phi_{\text{f}} C_{\text{f}} + \phi_{\text{R}} C_{\text{R}})r_{\text{w}}^3}$$

其中: k_{f} 为裂缝系统渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_{L} 为溶洞L的等效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_{R} 为溶洞R的等效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; x_{N} ($N=1,2,3,4$) 为裂缝端点的位置坐标; S 为表皮因子; r_{w} 为井筒半径, m; q 为油井的地面产量, m^3/d ; μ 为油的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B_{o} 为原油体积系数; p_{i} 为初始压力, MPa; $p_{\text{f},\text{L},\text{R},\text{wf}}$ 为裂缝、溶洞L、溶洞R、井底的压力, MPa; C_{M} ($\text{M}=\text{f},\text{R},\text{L}$) 为裂缝、溶洞R、溶洞L的综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; ϕ_{M} ($\text{M}=\text{f},\text{R},\text{L}$) 为裂缝、溶洞R、溶洞L的孔隙度, 无量纲; ω_{M} ($\text{M}=\text{f},\text{R},\text{L}$) 为裂缝、溶洞R、溶洞L的储容比, 无量纲; t 为时间; K 为裂缝系统渗透率与裂缝和溶洞整个系统渗透率的比值参数, 无量纲; R_{i} ($i=\text{R},\text{L}$) 为溶洞的半径, m; W 为裂缝的宽度, m; λ_{Rf} 为溶洞R向裂缝1供液时的窜流系数; λ_{Lf} 为溶洞L向裂缝2供液时的窜流系数; C 为井筒储集系数, m^3/MPa ; $L_{2\text{D}}$ 为无因次裂缝的短方向延伸长度; W_{D} 为无因次的裂缝宽度; β_{Rf} 为溶洞R向裂缝1窜流时的形状因子; x_{ND} ($N=1,2,3,4$) 为无因次裂缝端点的位置坐标; β_{Lf} 为溶洞L向裂缝2窜流时的形状因子; $p_{\text{D},\text{LD},\text{RD},\text{wD}}$ 为无因次压力; t_{D} 为无因次时间; R_{iD} ($i=\text{R},\text{L}$) 为无因次溶洞半径; C_{D} 为无因次井筒储集系数。

2 模型求解

数学模型经拉普拉斯变换后,其裂缝渗流方程:

$$K \frac{d^2 \bar{p}_{\text{D}}}{dx_{\text{D}}^2} + \lambda_{\text{c1f}}(\bar{p}_{\text{D}} - \bar{p}_{\text{c1D}}) + \lambda_{\text{c2f}}(\bar{p}_{\text{D}} - \bar{p}_{\text{c2D}}) = s\omega_{\text{f}} \bar{p}_{\text{D}} \quad (10)$$

溶洞R和溶洞L区域方程:

$$K \frac{d\bar{p}_{\text{D}}}{dx_{\text{D}}} \Big|_{x_{\text{D}}=x_{2\text{D}}} - K \frac{d\bar{p}_{\text{D}}}{dx_{\text{D}}} \Big|_{x_{\text{D}}=x_{3\text{D}}} = \frac{\pi \omega_{\text{R}} R_{\text{RD}}^3}{L_{2\text{D}} W_{\text{D}}} s \bar{p}_{\text{RD}} \quad (11)$$

$$K \left. \frac{d\bar{p}_{\text{FD}}}{dx_{\text{D}}} \right|_{x_{\text{D}}=x_{4\text{D}}} = \frac{\pi\omega_{\text{L}}R_{\text{LD}}^3}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}} s\bar{p}_{\text{LD}} \quad (12)$$

溶洞与裂缝的界面压力方程:

$$\bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{2\text{D}}} = \bar{p}_{\text{RD}} \quad (13)$$

$$\bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{3\text{D}}} = \bar{p}_{\text{RD}} \quad (14)$$

$$\bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{4\text{D}}} = \bar{p}_{\text{LD}} \quad (15)$$

初始条件和外边界条件:

$$\bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{t=0} = \bar{p}_{\text{LD}} \Big|_{t=0} = \bar{p}_{\text{RD}} \Big|_{t=0} = \bar{p}_{\text{wFD}} \Big|_{t=0} = 0 \quad (16)$$

$$\lim_{x_{\text{D}} \rightarrow \infty} \bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x > x_{4\text{D}} + 2R_{\text{L}}, t = t_{\text{eD}}} = 0 \quad (17)$$

考虑井储和表皮系数的内边界条件变为:

$$K \left. \frac{d\bar{p}_{\text{FD}}}{dx_{\text{D}}} \right|_{x_{\text{D}}=x_{1\text{D}}} = \frac{1}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}s} - \frac{C_{\text{D}}}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}} s\bar{p}_{\text{wFD}} \quad (18)$$

$$\bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x_{\text{D}}=x_{1\text{D}}} = \bar{p}_{\text{wFD}} - S \frac{1}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}s} \quad (19)$$

由于裂缝渗流方程中有窜流项的存在,该方程具有高度的非线性,必须把方程线性化。

引入窜流扩散项,并做拉斯变换,可得到:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{Lf}}(\bar{p}_{\text{FD}} - \bar{p}_{\text{LD}}) = s\omega_{\text{L}}\bar{p}_{\text{LD}} \\ \lambda_{\text{Rf}}(\bar{p}_{\text{FD}} - \bar{p}_{\text{RD}}) = s\omega_{\text{R}}\bar{p}_{\text{RD}} \end{cases} \quad (20)$$

将方程(20)带入方程(10),可得到线性化的裂缝渗流方程:

$$K \frac{d^2 \bar{p}_{\text{FD}}}{dx_{\text{D}}^2} = \left(\frac{s\omega_{\text{R}}}{1 + \frac{s\omega_{\text{R}}}{\lambda_{\text{R}}}} + \frac{s\omega_{\text{L}}}{1 + \frac{s\omega_{\text{L}}}{\lambda_{\text{L}}}} + s\omega_{\text{f}} \right) \bar{p}_{\text{FD}}(x_{1\text{D}} \leq x_{\text{D}} \leq x_{4\text{D}}) \quad (21)$$

方程(21)为在拉斯空间下的不稳定渗流方程,其通解为:

$$\bar{p}_{\text{FD}} = C_1 e^{ax_{\text{D}}} + C_2 e^{-ax_{\text{D}}} \quad (22)$$

其中: C_1, C_2 为待定的常数; x_{D} 为无因次裂缝的位置; a_1, a_2 为与拉普拉斯变量 s 有关的函数。

压力公式关于 x_{D} 求导可得压力导数公式:

$$\frac{\partial \bar{p}_{\text{FD}}}{\partial x_{\text{D}}} = C_1 a x_{\text{D}} e^{ax_{\text{D}}} - C_2 a x_{\text{D}} e^{-ax_{\text{D}}} \quad (23)$$

将方程(22)代入方程(13)、(14)、(15)、(19)中,可以得到:

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{1\text{D}}} = C_1 e^{ax_{1\text{D}}} + C_2 e^{-ax_{1\text{D}}} = \bar{p}_{\text{wFD}} - S \frac{1}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}s} \\ \bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{2\text{D}}} = \bar{p}_{\text{RD}} = C_1 e^{ax_{2\text{D}}} + C_2 e^{-ax_{2\text{D}}} \\ \bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{3\text{D}}} = \bar{p}_{\text{RD}} = C_1 e^{ax_{3\text{D}}} + C_2 e^{-ax_{3\text{D}}} \\ \bar{p}_{\text{FD}} \Big|_{x=x_{4\text{D}}} = \bar{p}_{\text{LD}} = C_1 e^{ax_{4\text{D}}} + C_2 e^{-ax_{4\text{D}}} \end{cases} \quad (24)$$

将方程(23)代入方程(11)、(12)、(18),可以得到:

$$\begin{cases} \frac{1}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}s} - \frac{C_{\text{D}}}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}} s\bar{p}_{\text{wFD}} = C_1 a x_{\text{D}} e^{ax_{1\text{D}}} - C_2 a x_{\text{D}} e^{-ax_{1\text{D}}} \\ \frac{\pi\omega_{\text{R}}R_{\text{RD}}^3}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}} s\bar{p}_{\text{RD}} = (C_1 a x_{\text{D}} e^{ax_{2\text{D}}} - C_2 a x_{\text{D}} e^{-ax_{2\text{D}}}) - \\ (C_1 a x_{\text{D}} e^{ax_{3\text{D}}} - C_2 a x_{\text{D}} e^{-ax_{3\text{D}}}) \\ \frac{\pi\omega_{\text{L}}R_{\text{LD}}^3}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}} s\bar{p}_{\text{LD}} = C_1 a x_{\text{D}} e^{ax_{4\text{D}}} - C_2 a x_{\text{D}} e^{-ax_{4\text{D}}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\bar{p}_{\text{wFD}}、\bar{p}_{\text{RD}}、\bar{p}_{\text{LD}}、\bar{p}_{\text{FD}}$ 为 $P_{\text{wFD}}、P_{\text{RD}}、P_{\text{LD}}、P_{\text{FD}}$ 在拉氏空间的解。

联立方程组(24)、(25)逐步求解,最终得到无因次井底压力表达式:

$$\bar{p}_{\text{wFD}} = \frac{A_1 A_2 A_8}{A_3 - A_4} + \frac{A_1 A_5 A_9}{A_6 + A_7} \quad (26)$$

$$C_1 = \frac{A_1 A_2}{A_3 - A_4}$$

$$C_2 = \frac{A_1 A_5}{A_6 + A_7}$$

$$a = \sqrt{\frac{\omega_{\text{f}}s + \frac{s\omega_{\text{R}}}{1 + s\omega_{\text{R}}/\lambda_{\text{R}}} + \frac{s\omega_{\text{L}}}{1 + s\omega_{\text{L}}/\lambda_{\text{L}}}}{K}}$$

$$b = a - \frac{3.14\omega_{\text{R}}R_{\text{RD}}^3}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}K}s$$

$$c = a - \frac{3.14\omega_{\text{L}}R_{\text{LD}}^3}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}K}s$$

$$d = a + \frac{C_{\text{D}}s}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}}$$

$$e = \frac{C_{\text{D}}s}{K(L_{2\text{D}}W_{\text{D}})^2}$$

$$f = \frac{1}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}s}$$

$$g = \frac{C_{\text{D}}s}{KL_{2\text{D}}W_{\text{D}}} - a$$

$$h = \frac{3.14\omega_{\text{R}}R_{\text{RD}}^3}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}K}s - a$$

$$i = \frac{3.14\omega_{\text{L}}R_{\text{LD}}^3}{L_{2\text{D}}W_{\text{D}}K}s - a$$

$$A_1 = (f - e)$$

$$A_2 = (ie^{-ax_{4\text{D}}} + e^{-ax_{3\text{D}}} - he^{-ax_{2\text{D}}})$$

$$A_3 = de^{ax_{1\text{D}}}(ie^{-ax_{4\text{D}}} + e^{-ax_{3\text{D}}} - he^{-ax_{2\text{D}}})$$

$$A_4 = e^{ax_{4\text{D}}} + be^{ax_{2\text{D}}} - e^{ax_{3\text{D}}}$$

$$A_5 = ce^{ax_{4\text{D}}} + be^{ax_{2\text{D}}} - e^{ax_{3\text{D}}}$$

$$A_6 = ge^{-ax_{1\text{D}}}(e^{ax_{4\text{D}}} + be^{ax_{2\text{D}}} - e^{ax_{3\text{D}}})$$

$$A_7 = -de^{ax_{10}} \left(ie^{-ax_{40}} + e^{-ax_{40}} - he^{-ax_{20}} \right)$$

$$A_8 = e^{ax_{10}}$$

$$A_9 = e^{-ax_{10}}$$

3 典型曲线绘制与敏感性分析

3.1 典型曲线绘制

对于绘制典型曲线,首先需要采用消除法,逐步求取(23)式中的系数 C_1 和 C_2 。然后用改进的Stehfest数值反演(AWG)^[19],求解井底压力响应在实数空间下的解,典型曲线是在Matlab下编程来实现的,如图2。根据典型曲线的特征,将整个曲线分为6个阶段,第I阶段反映的是井筒储集期,无因次压力曲线和无因次压力导数曲线都呈斜率为1的直线,表明为续流段的影响;第II阶段是表皮效应阶段,在末端可能出现了近井裂缝1系统流动段,该段近似为表皮效应阶段和裂缝过渡段;第III阶段是近井溶洞R开始向近井裂缝1供液导致压导曲线快速下降,表现为第一个“凹子”的特征段;第IV阶段反映远井洞间裂缝2系统流动段,第IV阶段前、后段为裂缝过渡段,中段为裂缝线性流,压力及压力导数曲线呈斜率为1/2的平行线;第V阶段反映远井溶洞L开始向洞间裂缝2供液导致压导曲线快速下降,表现为第二个“凹子”的特征段;第VI阶段反映整个系统的拟稳态流动,无因次压力导数曲线呈斜率为1的直线,并且末端与压力曲线平行,反映为远端裂缝线性流。

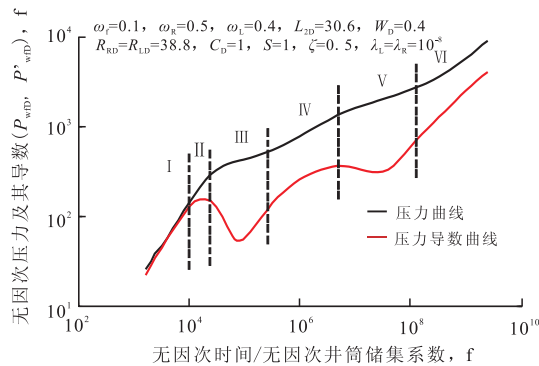


图2 线性非均质串联双缝洞碳酸盐岩油藏的典型曲线
Fig. 2 Type curves of linearly heterogeneous and series double fracture-cavity carbonate reservoir

3.2 敏感性分析

1) 溶洞R储容比 ω_R 对典型曲线的影响。图3

反映的是在其它参数固定的情况下,近井溶洞R储容比影响图版,近井溶洞R储容比主要影响第1个下凹的深度和宽度,并且也影响了第II阶段裂缝过渡流段。储容比越大,近井裂缝1过渡流段处压力导数曲线下移,向裂缝中流动过渡段变短,导致了第III阶段下凹越宽,并且越深,原因是随着孔隙空间的扩大,溶洞内部存在更大的流体储存空间,压力波在非固体物质中的传播速度降低,导致了传播时间的延长,在典型曲线上表现为此特征。

近井溶洞半径主要影响第III阶段溶洞响应段,溶洞半径越大,反映溶洞大小的第一个凹子深度变深,压力曲线和压导曲线在井筒储集压力和压力导数曲线逐渐分离,裂缝线性流动特征逐渐变得明显一些。

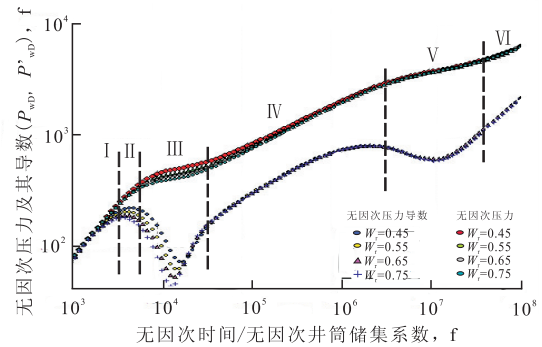


图3 溶洞R储容比 ω_R 对典型曲线的影响
Fig. 3 Impacts of storage ratio ω_R of cavity R on type curves

2) 裂缝系统渗透率与裂缝和溶洞系统渗透率之和的比值 K 对典型曲线的影响。图4反映的是在其它参数固定的情况下,裂缝系统渗透率与裂缝和溶洞系统渗透率之和的比值 K 影响图版, K 控制了整个曲线形态, K 越大,第I阶段井筒储集阶段越

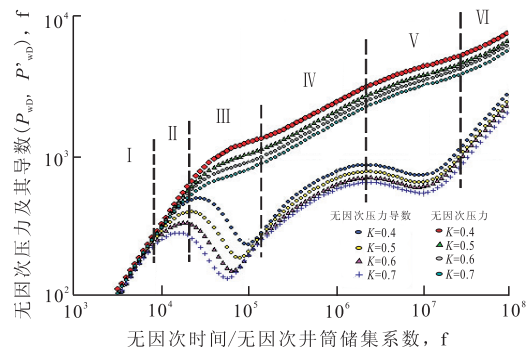


图4 裂缝系统渗透率与裂缝和溶洞系统渗透率之和的比值 K 对典型曲线的影响
Fig. 4 Impacts of ratio K of fracture permeability and sum of fracture and cavern permeability on type curves

短;第Ⅱ阶段表皮效应和裂缝过渡流阶段开始的时间提前;第Ⅲ阶段溶洞R“凹子”特征反应阶段向下平移,凹子的深度不变;第Ⅴ阶段溶洞L“凹子”特征反应阶段向下平移,凹子深度不变。反映出缝洞系统中裂缝控制系统的流动能力这个事实。

3) 远井溶洞L半径 R_{LD} 对典型曲线的影响。图5反映的是在其它参数固定的情况下,远井溶洞L半径影响图版,远井溶洞L半径主要影响第2个下凹的深度和宽度。半径越大,溶洞体积变大,在压力波传播速度不变的情况下,直接导致传播的距离变大,从而延长了传播的时间,在曲线上表现为第Ⅴ阶段凹子越宽,并且越深;半径越大,第Ⅲ阶段的宽度越大,由于远井洞的边界效应增强,有一部分反射波能够到达近井洞处,但是速率越来越小。后段压力导数曲线为平行线,压力曲线保持一致,反映外围裂缝的影响。

远井溶洞L储容比主要影响第2个下凹的深度和宽度。 ω_L 储容比越大,远井溶洞L的储集空间越大,压力波在其内部的传播时间延长,导致了第2个凹子逐渐变宽变深,后段压力导数曲线逐渐平行,这是由于远井洞外围考虑存在裂缝而出现裂缝传播。

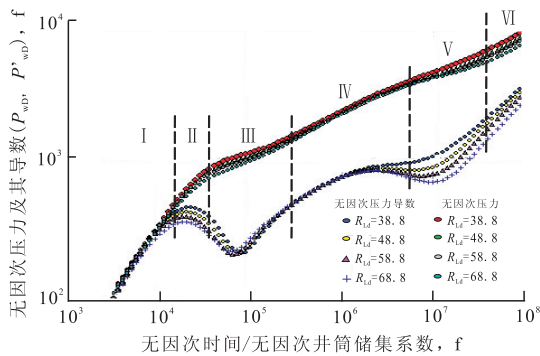


图5 远井溶洞L半径 R_{LD} 对典型曲线的影响

Fig. 5 Impact of radius R_{LD} of cavity L on type curves

4) 远井溶洞L向裂缝2供液时的窜流系数 λ_{Lr} 对典型曲线的影响。图6反映的是在其它参数固定的情况下,远井溶洞L向洞间裂缝2供液时的窜流系数 λ_{Lr} 影响图版。窜流系数 λ_{Lr} 影响第Ⅳ阶段裂缝2的过渡流段, λ_{Lr} 增大,缩短了裂缝过渡流阶段持续的时间,并且压力导数曲线变得更平缓,压降速度变小; λ_{Lr} 增大,远井溶洞L“凹子”特征反应开始的时间提前,凹子随之展开变宽,压降值变小。它也同时表明洞间缝网越发育,远井洞的反应特征逐渐变得

不明显,而是稍微下凹的平台,与裂缝形成了一种向视均质流动特征转换的特征。

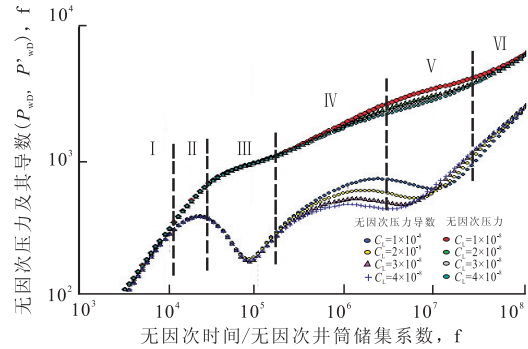


图6 远井溶洞L向裂缝2供液时的窜流系数 λ_{Lr} 对典型曲线的影响

Fig. 6 Impact of leakage coefficient λ_{Lr} from cavity L to the second fracture system on type curves

4 模型的验证

某井位于新疆且末县境内,是塔里木盆地中央隆起塔中低凸起塔中I号断裂坡折构造带塔中62岩性圈闭中的一口开发井,井筒半径为0.0889 m,储层有效厚度为42.47 m,孔隙度为2.10%,产层中深为4799.27 m、中部垂深为4799.20 m,在开井426天进行过压力恢复测试段,关井前日产气量197446 m³,日产油23.97 t,历时467.9 h,测点压力由34.79 MPa上升至37.11 MPa。静温为132.29℃,流温为127.66℃。停产时累积产油量为3.347×10⁸ t,累积产气量为1.4534×10⁸ m³,经油藏工程研究表明该井储量为2.54×10⁸ m³。

利用传统的连续介质模型(井储+表皮+四区径向复合无限大边界油藏)来解释压力恢复数据和本文方法的双对数试井曲线拟合结果见图7和图8,其本文方法双对数曲线主要解释的无因次参数拟合参数如表1所示,其两种方法的解释参数结果对比如表2所示。因为该区的基质基本上为基质渗透,储集空间主要为裂缝和溶蚀孔洞,显然连续介质理论解释结果难以理解储层结构,而利用本文模型则能较好地反映储层结构,所解释出的缝洞储集空间大小和储量反算的储集空间大小相差1.28×10⁴ m³,相对误差1.6%,可能是裂缝储集空间大小没有计算进去导致的。解释曲线在近井裂缝到近井溶洞储集体的流动拟合方面不是太令人满意,根据前述理论中曲

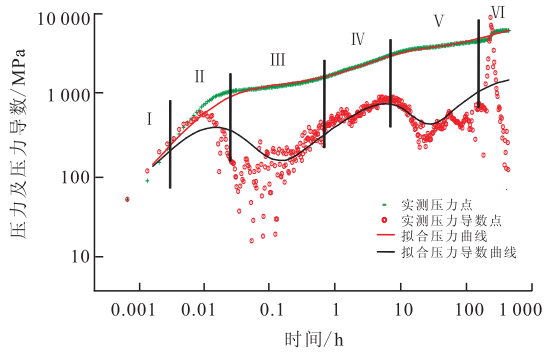


图7 Saphir软件双对数拟合曲线

Fig. 7 Log-log fitted curves of actual well test data with Saphir software

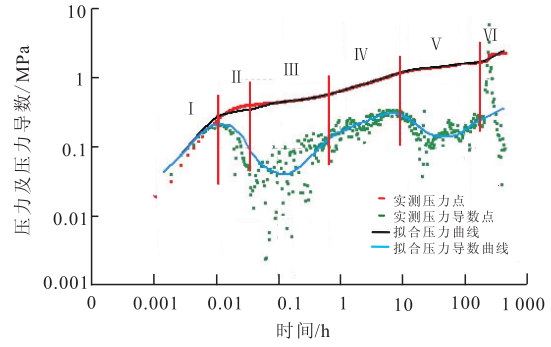


图8 本文方法双对数拟合曲线

Fig. 8 Log-log fitted curves of actual well test data by method in this paper

表1 无因次参数主要拟合参数

Table 1 Main fitting parameters of dimensionless parameters

$\omega_{f,f}$	$\omega_{R,f}$	$\omega_{L,f}$	$K_{,f}$	L_{2D},f	W_{D},f	R_{RD},f	R_{LD},f	C_{D},f
0.212	0.451	0.337	0.238	4 780.65	0.360	607.42	359.96	0.854

表2 使用不同方法的解释结果

Table 2 Interpretation results by using different methods

本文方法									
$\omega_{f,f}$	$\omega_{R,f}$	$\omega_{L,f}$	$K_{,f}$	L_2/m	W/m	R_R/m	R_L/m	C_{D},f	$V_{R+L}/10^4m^3$
0.212	0.451	0.337	0.238	425	0.032	54	32	0.854	80
Saphir 软件									
$K_1/10^{-3}\mu m^2$	R_1/m	$K_2/10^{-3}\mu m^2$	R_2/m	$K_3/10^{-3}\mu m^2$	R_3/m	$K_4/10^{-3}\mu m^2$	$S_{,f}$	C_{D},f	$V_{cavity}/10^4m^3$
11.42	48.1	1.05	121.22	10.48	130.3	1.46	0.085	49.5	30

注:求取井筒储集系数 C ,所需裂缝、溶洞的综合压缩系数根据具有孔洞缝结构的岩心进行实验室标准测定,或者根据现场区块的实际资料求取平均值。

线的敏感性分析和地质特点,在第 II 阶段裂缝过渡流阶段,井筒周围与近洞相连的裂缝中可能存在伴生溶洞,导致实测曲线与理论曲线的偏离。

5 结论

1) 缝洞型储层中,井与洞相连的裂缝和洞间裂缝以及洞外围缝简化为井—缝—洞—缝—洞—缝的串联模型是可行的。所建立的双缝洞串联非连续介质试井模型考虑了井筒储集效应、表皮效应、裂缝系统渗透率、溶洞系统渗透率和窜流系数以及瞬态流动边界的影响。

2) 缝洞型储层的流动受控于井与洞之间和洞

与洞之间的裂缝的流动能力,双对数曲线上的凹子对应溶洞系统、洞间过渡段对应裂缝系统的流动;储容比开始影响压力的行为在裂缝的过渡段和溶洞的响应特征段。溶洞系统和裂缝系统的储容比越大,裂缝过渡段向下倾斜,溶洞相应段下凹越严重。

3) 裂缝系统流动能力在整个系统流动能力中比值越大,井筒储集期持续的时间逐渐变短,近井裂缝系统与近井溶洞系统距离增加会使过渡流段变长,同时反映近井溶洞系统的凹子变深。

4) 远井洞间裂缝流动能力增加、洞间过渡流段压力导数曲线下移,压力导数曲线上反映远井溶洞的下凹程度变浅。远井溶洞和裂缝间窜流能力越大,裂缝过渡段压力导数曲线呈阶梯状向左下移动,

同时压力导数曲线下凹程度变小,宽度扩大。

5) 根据现场实际油气井的地质特征对比,用本模型解释结果与实际地质情况相吻合,且解释溶洞大小与实际储量对比显示所建数学模型是正确的,但对狭长形溶洞结构体的解释结果误差增大。

参考文献

- [1] Barenblatt G I, Zheltov I P, Kochina I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata][J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1960, 24 (5): 1286-1303.
- [2] Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963, 3 (3): 245-255.
- [3] Kazemi, H. Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1969, 9(4): 451-462.
- [4] Clossman P J. Aquifer model for fissured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1975, 15 (5): 385-398.
- [5] 薛成瑾,戴卫华,张皎生. 裂缝与井筒连通的三重介质油藏试井解释方法[J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(3): 39-41.
- [6] Fuentes-Cruz G, Camacho-Velazquez R, Vasquez-Cruz M. Pressure transient and decline curve behaviors for partially penetrating wells completed in naturally fractured-vuggy reservoirs[C]// paper SPE-92116-MS presented at the SPE International Petroleum Conference in Mexico, 7-9 November 2004, Puebla, Mexico.
- [7] 王子胜,姚军,张凯. 三重介质油藏非牛顿液不稳定渗流压力变化特征[J]. *中外能源*, 2006, 11(2): 13-17.
- [8] 王子胜,姚军. 缝洞向井筒供液时三重压敏介质油藏压力响应特征研究[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2006, 21(1): 84-89.
- [9] 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:A辑*, 2004, 19(3): 339-346.
- [10] Arbogast T, Lehr H L. Homogenization of a darcy-stokes system modeling vuggy porous media[J]. *Computational Geosciences*, 2006, 10(3): 291-302.
- [11] 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*, 2008, 30(2): 74-77.
- [12] 张福祥,陈方方,彭建新,等. 井打在大尺度溶洞内的缝洞型油藏试井模型[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 912-915.
- [13] 杨锋,王新海,刘洪. 缝洞型碳酸盐岩油藏井钻遇溶洞试井的解释模型[J]. *水动力学研究与进展:A辑*, 2011, 26(3): 278-283.
- [14] Stehfest H. Remark on algorithm 368: numerical inversion of Laplace transforms[J]. *Communications of ACM*, 1970, 13 (10): 624-625.
- [15] Zou C Y, Li Z P, An X P, et al. Well test type curves plotting methods[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29 (3): 124-127.
- [16] 杨芳,吴小庆,李进. 大尺度溶洞型油藏试井模型建立与求解[J]. *石油规划设计*, 2014, 25(4): 27-31.
- [17] Chen P, Wang X, Liu H, et al. A pressure-transient model for a fractured-vuggy carbonate reservoir with large-scale cave[J]. *Geosystem Engineering*, 2016, 19(2): 69-76.
- [18] 张星星,王琴,吴光举,等. 缝洞型碳酸盐岩油藏压力响应特征[J]. *断块油气田*, 2016, 23(6): 778-781.
- [19] Wooden B, Azari M, Soliman M. Well test analysis benefits from new method of Laplace space inversion[J]. *Oil and Gas Journal*, 1992, 90(29): 108-110.

(编辑 杨友胜)