

多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井分析

汪春浦,叶海峰,肖高棉

中国石油集团川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院 四川成都 610051

通讯作者:Email: 56780459@qq.com

项目支持:中国石油集团川庆钻探工程有限公司-西南石油大学联合研究院 2019 年合作项目“苏 59 区块气水渗流机理及治水对策研究”(CQXN-2019-07)

引用:汪春浦,叶海峰,肖高棉. 多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井分析[J]. 油气井测试,2021,30(6):1-9.

Cite: WANG Chunpu, YE Haifeng, XIAO Gaomian. Well test analysis of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir [J]. Well Testing, 2021, 30(6):1-9.

摘要 缝洞型碳酸盐岩气藏非均质性强,具有多尺度特征,试井解释效果差,无法真实反映实际储层特征。运用裂缝渗流关系式及管流理论,引入裂缝几何参数、溶洞半径,考虑两个微裂缝系统渗透率和裂缝横截面积相关比值参数,建立多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井数学模型,应用 Laplace 变换及 Mathematica 数学软件,通过 Stehfest 数值反演求取真实空间下井底压力解函数。利用矿场实际储层、流体及生产数据,对模型的有效性进行验证。采用该方法,对塔里木油田 S4 井进行解释,得到溶洞 1 体积为 $143\ 650\ \text{m}^3$,裂缝 1 长度为 128.57 m,较好反映了储层结构和解释缝洞参数,解决了对于大尺度裂缝和溶洞储集空间,连续介质理论,即 Saphir 软件解释结果无法准确认识储层结构的问题,说明了该模型的有效性和适用性。多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井分析可为预测单井动态控制储量提供理论依据。

关键词 缝洞型气藏;多尺度缝洞储层;渗透率;管流;自由流;数学模型;缝洞体积法;试井解释**中图分类号**:TE344 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.06.001

Well test analysis of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir

WANG Chunpu, YE Haifeng, XIAO Gaomian

Research Institute of Geological Exploration and Development, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China

Abstract: It is hardly to reflect the true characteristics of the fracture-vuggy carbonate gas reservoir due to its strong heterogeneity, multi-scale characteristics and poor well test interpretation performance. In this paper, the well testing mathematical model of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir is established by the fracture seepage relationship and pipe flow theory introducing the fracture geometric parameters, cave radius, and the related ratio parameters of permeability and fracture cross-sectional area of two micro fracture systems. In addition, the bottom hole pressure solution function in real space is obtained through Stehfest numerical inversion by using Laplace transform and Mathematica mathematical software after establishing the well testing mathematical model. The validity of the model is verified by the data of actual reservoir, fluid, and production. Well S4 in Tarim Oilfield is interpreted by this method, and the results show that the volume of karst cave 1 is $143\ 650\ \text{m}^3$ and the length of fracture 1 is 128.57 m. It proves that this method reflects the reservoir structure and interprets fracture cave parameters accurately, and solves the problem that the reservoir structure for large-scale fracture and karst cave reservoir space cannot be accurately clarified by the continuous medium theory (the interpretation results of Saphir software), which shows the effectiveness and applicability of the model. The well testing analysis of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir can provide a theoretical basis for predicting single well dynamic control reserves.

Keywords: fracture-vuggy gas reservoir; multi scale fracture-vuggy reservoir; permeability; pipe flow; free flow; mathematical model; fracture-vuggy volume method; well testing interpretation

目前,对于大尺度串珠状的碳酸盐岩气藏储集空间类型、缝洞之间的沟通关系及分布模式等方面还处于定性向定量过渡阶段,该类储层的储集空间、储层物性等存在强烈的非均质性和多尺度

性^[1-3]。因此,针对均质砂岩储集层的储量研究方法思路不适用于非均质性极强的碳酸盐岩。以西北油田 S 区块 S4 井为例,早期压力恢复资料显示地层可能为裂缝-孔洞型储层,天然气为干气,相对

密度 0.641 g/cm^3 , CH_4 含量 $88.94\% \sim 89.34\%$, 测试未见地层水。地震显示“串珠状”强反射,东西向地震剖面为长条状强反射串;取心显示缝洞发育,开启度较高;钻井目的层段漏失 $6\,000 \text{ m}^3$,放空 5.48 m 。生产压力出现开井急下、关井急上的现象,显示周围存在储集体。开井压力下降快,说明储集体到井底流通不畅通,通过裂缝与溶洞相连。储层分布呈现了多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏特征,即存在多个大溶洞之间通过大裂缝连通,呈“葫芦状”,且多条微裂缝交错相连,为多尺度多缝洞系统储层类型。

针对多尺度多缝洞系统的碳酸盐岩气藏单井控制储量评价,其难点在于多尺度多缝洞系统中流动描述与储量的计算方法。对于缝洞型碳酸盐岩油气藏模型的描述,国内外学者做了大量研究,建立了双重介质、三重介质以及多重介质试井模型,从 Barenblatt G. I. 等^[4]在研究裂隙型油藏的过程中,针对裂隙型油藏的储层特征,首次提出了双重介质的概念,到 Kazemi H.^[5]和 Warren J. E. 等^[6]继续延伸,在双重介质中针对流体流动问题,发现了两种介质之间存在不同的流态,即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。Closmann P. J.^[7]在多重介质理论中不断探索,在双重介质的基础上提出了三重孔隙或三重介质渗流的数学模型。薛成瑾等^[8]总结多重介质的特点,开创性地将溶洞归纳为三重介质类型中的一种介质。Fuentes-Cruz G. 等^[9]研究了碳酸盐岩缝洞型油藏的压降特征。王子胜等^[10-11]、常学军等^[12]的主要贡献在研究多重介质数学模型方面,引入遗传算法进行试井拟合,给出了在试井解释上不同的数学方法。Arbogast T. 等^[13]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,但是忽略了裂缝及其孔洞对溶洞流动的影响。而模型均基于连续均质渗流场的假设,不能解决复杂的多尺度的缝洞型碳酸盐岩油气藏中的流动问题。

在大尺度缝洞型油气藏试井问题上,建立了不同缝洞结构的数学模型^[14-16]。诸如井钻遇单一大溶洞模型、井钻遇多缝洞单元模型,但未建立流体在大型溶洞、管流通道、微裂缝之间存在不同交换机制的多缝洞系统,以及对流体在介质中不同流动规律的描述也不够完善。彭小龙等^[17]采用零维模型的思路,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。张福祥等^[18]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。杨锋等^[19]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,利用 Stehfest 数值反演和拉普拉斯变换,求解数学模型,绘制了试井分析曲线,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。杨芳等^[20]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。但该模型并没有在现场中有成功的应用实例。Chen P. 等^[21]和张星星等^[22]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,并进行了实例计算,但对其它缝洞参数未进行分析讨论。

由于针对大尺度缝洞型油气藏储层结构尚未建立流体在大型溶洞、管流通道、微裂缝之间存在不同交换机制的多缝洞系统,以及对流体在介质中不同流动规律的描述也不够完善,根据研究区域的多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏的储层特性,兼顾该类气藏单井控制储量评价方法存在局限性,在划分储层缝洞连接结构的基础上,本文建立多尺度多缝洞系统结构物理模型,运用渗流关系式和管流理论,引入裂缝的几何参数、溶洞的半径,考虑两个微裂缝系统渗透率和裂缝横截面积相关比值参数,建立多尺度多缝洞系统的碳酸盐岩气藏试井数学模型。在定产量生产的情况下,通过与现场实际生产数据的拟合计算分析,并且利用 Saphir 软件解释对比,验证模型的适用性和准确性。

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 缝洞描述

从研究区域地震显示、取芯测试和三维地质雕刻对该类碳酸盐岩气藏的描述,并借助现场的资料来看,确定储层类型为微裂缝-河道大裂缝-溶洞型,溶洞为主要的储集空间,河道大裂缝以及微裂缝既为流动通道又为次储集空间,溶洞外部流体可动性差,裂缝与溶洞耦合连接。通过建立缝洞结构模型以及对储层中的河道大裂缝流动的描述,实现缝洞数学模型的建立,以便精确模拟实际储层。

1.1 缝洞结构模型描述

根据对储层的认识,简化为如图 1a 所示的缝洞结构模型示意图(缝洞系统为在同一水平面上)或图 1b 所示的缝洞结构模型示意图(缝洞系统为在同一垂直面上)。该缝洞结构模型不局限于图 1a 和图 1b,即裂缝可以任意角度与溶洞连接。

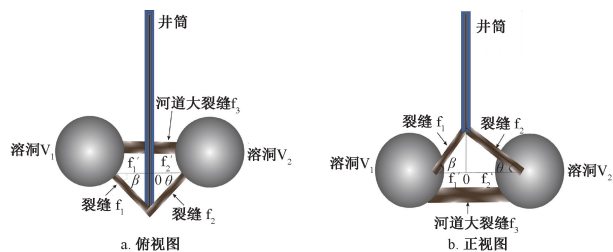


图 1 缝洞结构模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fracture-vuggy structure model

1.2 河道大裂缝流动描述

由于河道大裂缝流动尺度大,可达毫米级别,常规渗流理论、立方定律,以及等效连续介质理论不能准确表征,需要通过管流流体力学,建立双溶洞与河道大裂缝之间的关系式。

将河道大裂缝视为等径的圆柱形管道(图 2),模型内流体为单相非理想可压缩气体,流动为等温过程,满足流体力学原理。

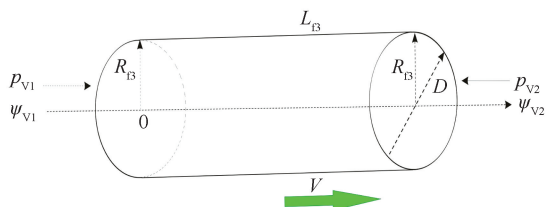


图 2 裂缝 f_3 流动示意图

Fig. 2 Flow diagram of fracture f_3

当流动方向与水平方向相同时,没有落差变化。因此,不存在重力压降,忽略流速增加引起的动能压降。总压力梯度为摩擦压力梯度,即

$$\frac{d\psi}{dx} = f \frac{\rho v^2}{2D} \quad (1)$$

式中: f 为摩阻系数; ρ 为储层流体密度, kg/m^3 ; v 为流体在大裂缝中平均流速, m/s ; D 为大裂缝 f_3 直径, m 。

流体在大裂缝中的平均流动速度可表示为

$$v = \frac{qB_g}{A} = \frac{qB_g}{\pi R_{f3}^2} \quad (2)$$

式中: R_{f3} 为大裂缝 f_3 半径, m ; B_g 为气体体积系数; q 为气井地面产量 ($p = 0.101 \text{ MPa}$, $T = 293.15 \text{ K}$), $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

将(2)式代入(1)得到:

$$\frac{d\psi}{dx} = f \frac{\rho (qB_g)^2}{4\pi^2 R_{f3}^3} \quad (3)$$

大裂缝可以被认为是一个完整的粗管,其流体在通道中具有较大的过流断面及高流速,因此,雷诺数很大。在 Moody 图中,摩擦系数趋向于平行于水平轴,主要受相对粗糙度的影响。使用 Colebrook-White 方程,摩擦系数公式为

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \lg \left(\frac{e}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \quad (4)$$

压力梯度方程用变量积分法分离,即

$$\begin{aligned} \int_{\psi|_{x=0}}^{\psi|_{x=L_{f3}}} d\psi &= \psi_{f3}|_{x=L_{f3}} - \psi_{f3}|_{x=0} \\ &= \int_0^{L_{f3}} f \frac{\rho (qB_g)^2}{4\pi^2 R_{f3}^3} dx \\ &= f \frac{\rho (qB_g)^2}{4\pi^2 R_{f3}^3} L_{f3} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: e/D 为相对粗糙度; L_{f3} 为大裂缝长度, m ; Re 为雷诺数。

此外,忽略大裂缝与溶洞连接处存在的局部阻力,以及流体在连接处周围的微裂缝中形成窜流,并且下文中已假设溶洞是气体完全充填的势体,即缝洞连接处的压力与溶洞内部压力相等,即

$$\psi_{f3}|_{x=0} = \psi_{v1}|_{x=0} = \psi_{v1} \quad (6)$$

$$\psi_{f3}|_{x=L_{f3}} = \psi_{v2}|_{x=L_{f3}} = \psi_{v2} \quad (7)$$

将(6)式、(7)式代入(5)式,可得双溶洞之间的关系式,即

$$\psi_{v2} - \psi_{v1} = f \frac{\rho (qB_g)^2}{4\pi^2 R_{f3}^3} L_{f3} \quad (8)$$

式中: ψ_j 表示气体拟压力 ($j=f_1, f_2, f_3, v_1, v_2$), 分别表示裂缝 f_1 、裂缝 f_2 、裂缝 f_3 、溶洞 1、溶洞 2), $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; r_w 表示井筒的半径, m。

2 渗流-自由流-管流模型

在缝洞模型的建立和描述的基础上, 针对储层的微裂缝利用渗流理论, 并对大裂缝具有的流动特征, 结合管流流动规律建立数学模型, 对于储层中存在的大型溶洞, 利用自由流动和物质守恒定律进行中间方程的建立, 形成了缝洞储层的渗流-自由流-管流数学模型, 最后对模型求解并绘制了理论曲线, 对相关参数进行敏感性分析。

2.1 无因次数学模型

针对微裂缝-河道大裂缝-溶洞型储层结构 (图 1), 实际裂缝 f_1 、 f_2 与水平方向或垂直方向的夹角分别为 β 、 θ , 实际裂缝 f_1 、 f_2 水平投影或垂直投影至 f'_1 、 f'_2 , 建立模型简化示意图如图 3 所示。

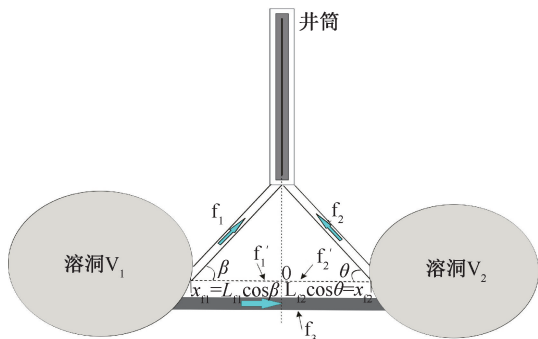


图 3 多尺度缝洞系统模型简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of multi-scale fracture-vuggy system model

模型假设条件如下:

(1) 气井以定产量生产, 井筒位于裂缝 f_1 、裂缝 f_2 的交汇处, 开井生产前溶洞及裂缝中的压力分布均匀;

(2) 气藏的开采方式为衰竭式开采;

(3) 流体为单相, 储层储集空间为溶洞及裂缝;

(4) 溶洞 1、溶洞 2、裂缝 f_1 、裂缝 f_2 , 以及流体都为微可压缩, 且压缩系数为常数;

(5) 溶洞 1、溶洞 2 充填, 且将溶洞始终视为等势体 (溶洞内部压力处处相等);

(6) 忽略重力的影响, 不考虑表皮效应, 考虑井筒储集效应;

(7) 裂缝 f_1 、裂缝 f_2 同时向井筒供气, 流体在裂缝中的流动满足达西定律; 溶洞 1 向裂缝 f_1 供气, 溶洞 2 向裂缝 f_2 供气, 考虑溶洞 1 通过裂缝 f_3 向溶

洞 2 中供气;

(8) 考虑裂缝 f_1 、裂缝 f_2 的长度、横截面积、孔隙度以及渗透率;

(9) 溶洞及裂缝边界为不渗透边界。

以井筒底部中心为原点, 建立如图 2 所示的坐标系。气体在两条裂缝中流动的无因次化后的渗流微分方程分别为

$$\begin{cases} \text{裂缝 } f_1: K^* \frac{\partial^2 \psi_{1D}}{\partial x_D^2} = \omega_{f1} A_{f1D} \frac{\partial \psi_{1D}}{\partial t_D} \\ \text{裂缝 } f_2: (1 - K^*) \frac{\partial^2 \psi_{2D}}{\partial x_D^2} = \omega_{f2} A_{f2D} \frac{\partial \psi_{2D}}{\partial t_D} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$K^* = \frac{K_{f1} A_{f1}}{K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2}}$$

$$\psi_{jD} = \frac{86.4 (K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2})}{q T r_w} (\psi_i - \psi_j), j = f_1, f_2$$

$$x_D = \frac{x}{r_w}, \quad A_{f1D} = \frac{A_{f1}}{r_w^2}, \quad A_{f2D} = \frac{A_{f2}}{r_w^2}$$

$$t_D = \frac{3.6 (K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2}) t}{\mu_{gi} (\phi_{f1} C_{f1} + \phi_{f2} C_{f2} + \phi_{v1} C_{v1} + \phi_{v2} C_{v2}) r_w^4}$$

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{\phi_{f1} C_{f1} + \phi_{f2} C_{f2} + \phi_{v1} C_{v1} + \phi_{v2} C_{v2}}, j = f_1, f_2$$

式中: K^* 为两个裂缝系统渗透率和裂缝横截面积相关比值参数; ψ_{jD} 为无因次拟压力 ($j = f_1, f_2$); f_1, f_2 分别表示裂缝 f_1 、裂缝 f_2 ; x_D 为无因次距离; A_{f1D} 为无因次裂缝 f_1 横截面积; t_D 为无因次时间; ω_j 为储溶比 ($j = f_1, f_2$); K_{f1}, K_{f2} 分别为裂缝系统 f_1, f_2 的渗透率, mD; ψ_i 为气藏原始拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; μ_{gi} 为气体原始黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; C_j 为气体压缩系数 ($j = f_1, f_2, v_1, v_2$), MPa^{-1} ; v_1, v_2 分别为溶洞 1、溶洞 2; ϕ_j 表示孔隙度 ($j = f_1, f_2, v_1, v_2$); T 表示气藏温度, K。

在 dt_D 时间内, 大型溶洞 1 的压降为 $d\psi_{v1D}$, 则由大型溶洞 1 通过弹性膨胀产生的流出量在裂缝 f_1 的 $x_D = x_{f1D}$ 处流量为 $V_{v1D} \omega_{v1} (\partial \psi_{v1D} / \partial t_D)$, 符合渗流理论, 所以

$$K^* \frac{\partial \psi_{1D}}{\partial x_D} \bigg|_{x_D = x_{f1D} (x_{f1D} = L_{f1D} \cos \beta)} = - \frac{V_{v1D}}{24 A_{f1D}} \omega_{v1} \frac{\partial \psi_{v1D}}{\partial t_D} \quad (10)$$

$$\text{其中 } V_{v1D} = \frac{V_{v1}}{r_w^3}, \quad L_{fjD} = \frac{L_j}{r_w}, \quad j = f_1$$

$$\psi_{jD} = \frac{86.4 (K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2})}{q T r_w} (\psi_i - \psi_j), j = v_1$$

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{\phi_{f1} C_{f1} + \phi_{f2} C_{f2} + \phi_{v1} C_{v1} + \phi_{v2} C_{v2}}, j = v_1$$

式中: x_{f1D} 为裂缝 f_1 在水平方向上或垂直方向上投影的无因次长度; V_{v1D} 为无因次溶洞 1 体积; ψ_{jd} 为无因次拟压力; L_{f1D} 为裂缝 f_1 在储层中无因次实际长度; ω_j 为储溶比。

同理,在 $x_D = x_{f2D}$ 处,由节点两端流量相同,得裂缝 f_2 与大型溶洞 2 之间气体流量关系式,即

$$(1 - K^*) \frac{\partial \psi_{f2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = x_{f2D} (x_{f2D} = L_{f2D} \cos \theta)} = - \frac{V_{v2D}}{24A_{f2D}} \omega_{v2} \frac{\partial \psi_{v2D}}{\partial t_D} \quad (11)$$

其中

$$\omega_j = \frac{\phi_j C_j}{\phi_{f1} C_{f1} + \phi_{f2} C_{f2} + \phi_{v1} C_{v1} + \phi_{v2} C_{v2}}, j = v_2$$

$$V_{v2D} = \frac{V_{v2}}{r_w^3}, \quad L_{jd} = \frac{L_j}{r_w}, j = f_2$$

$$\psi_{jd} = \frac{86.4(K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2})}{qTr_w} (\psi_i - \psi_j), j = v_2$$

式中: ω_j 为储溶比($j = v_2$); V_{v2D} 为无因次溶洞 2 体积; A_{f2D} 为无因次裂缝 f_2 横截面积; L_{f2D} 表示裂缝 f_2 在储层中无因次实际长度; ψ_{jd} 为无因次拟压力。

裂缝 f_1 与溶洞 1 的节点压力连续条件为

$$\psi_{f1D} \Big|_{x_D = x_{f1D}} = \psi_{v1D} \quad (12)$$

根据由管流理论推导出的(8)式,同理(12)式可得裂缝 f_2 、 f_3 与溶洞 1、2 压力耦合关系式,即

$$\psi_{f2D} \Big|_{x_D = x_{f2D}} = \psi_{v2D} = \psi_{v1D} + fL_{f3D} \frac{10.8\rho_D}{\pi R_{f3D}^2} \quad (13)$$

$$\text{其中 } L_{jd} = \frac{L_j}{r_w} (j = f_3), R_{id} = \frac{R_i}{r_w} (i = f_3), \rho_D = \frac{\rho}{\rho_g}$$

式中: L_{f3D} 为裂缝 f_3 在储层中无因次实际长度; x_{f2D} 为裂缝 f_2 在水平方向上或垂直方向上投影的无因次长度; R_{f3D} 为大裂缝 f_3 的无因次半径; ρ_D 为气体相对密度。

内边界处两条裂缝与井底之间的压力关系式为

$$\psi_{f1D} \Big|_{x_D = 0} = \psi_{f2D} \Big|_{x_D = 0} = \psi_{wD} \quad (14)$$

其中

$$\psi_{jd} = \frac{86.4(K_{f1} A_{f1} + K_{f2} A_{f2})}{qTr_w} (\psi_i - \psi_j), j = w$$

式中: ψ_{jd} 表示无因次拟压力($j = w$, 表示井筒)。

两条裂缝的交汇处,由物质平衡原理,气井产量即为两条裂缝的流量之和,同时在井底考虑井储效应,即

$$K^* \frac{\partial \psi_{f1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = 0} + (1 - K^*) \frac{\partial \psi_{f2D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D = 0} = -1 + C_D \frac{\partial \psi_{wD}}{\partial t_D} \quad (15)$$

其中

$$C_D = \frac{C}{\phi_{f1} C_{f1} + \phi_{f2} C_{f2} + \phi_{v1} C_{v1} + \phi_{v2} C_{v2}}$$

式中: C_D 为无因次井筒储集系数。

气藏初始压力条件:

$$\begin{aligned} \psi_{f1D} \Big|_{t_D = 0} &= \psi_{f2D} \Big|_{t_D = 0} = \psi_{v1D} \Big|_{t_D = 0} \\ &= \psi_{v2D} \Big|_{t_D = 0} = \psi_{wD} \Big|_{t_D = 0} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

外边界不渗透条件:

$$\frac{\partial \psi_{f1D}}{\partial x_D} \Big|_{x_D < x_{f1D} + 2R_{f1D}, x_D > x_{f2D} + 2R_{f2D}} = 0 \quad (17)$$

2.2 无因次数学模型求解

无因次数学模型经拉普拉斯变换后的模型为

$$\begin{cases} \text{裂缝 } f_1: K^* \frac{d^2 \bar{\psi}_{f1D}}{dx_D^2} = s\omega_{f1} A_{f1D} \bar{\psi}_{f1D} \\ \text{裂缝 } f_2: (1 - K^*) \frac{d^2 \bar{\psi}_{f2D}}{dx_D^2} = s\omega_{f2} A_{f2D} \bar{\psi}_{f2D} \end{cases} \quad (18)$$

$$K^* \frac{d\bar{\psi}_{f1D}}{dx_D} \Big|_{x_D = x_{f1D} (x_{f1D} = L_{f1D} \cos \theta)} = -s \frac{V_{v1D}}{24A_{f1D}} \omega_{v1} \bar{\psi}_{v1D} \quad (19)$$

$$(1 - K^*) \frac{d\bar{\psi}_{f2D}}{dx_D} \Big|_{x_D = x_{f2D} (x_{f2D} = L_{f2D} \cos \theta)} = -s \frac{V_{v2D}}{24A_{f2D}} \omega_{v2} \bar{\psi}_{v2D} \quad (20)$$

$$\bar{\psi}_{f1D} \Big|_{x_D = x_{f1D}} = \bar{\psi}_{v1D} \quad (21)$$

$$\bar{\psi}_{f2D} \Big|_{x_D = x_{f2D}} = \bar{\psi}_{v2D} = \bar{\psi}_{v1D} + sfL_{f3D} \frac{10.8\rho_D}{\pi R_{f3D}^2} = \bar{\psi}_{v1D} + sT \quad (22)$$

$$K^* \frac{d\bar{\psi}_{f1D}}{dx_D} \Big|_{x_D = 0} + (1 - K^*) \frac{d\bar{\psi}_{f2D}}{dx_D} \Big|_{x_D = 0} = -\frac{1}{s} + sC_D \bar{\psi}_{wD} \quad (23)$$

$$\bar{\psi}_{f1D} \Big|_{x_D = 0} = \bar{\psi}_{f2D} \Big|_{x_D = 0} = \bar{\psi}_{wD} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{f1D} \Big|_{t_D = 0} &= \bar{\psi}_{f2D} \Big|_{t_D = 0} = \bar{\psi}_{v1D} \Big|_{t_D = 0} \\ &= \bar{\psi}_{v2D} \Big|_{t_D = 0} = \bar{\psi}_{wD} \Big|_{t_D = 0} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\frac{d\bar{\psi}_{f1D}}{dx_D} \Big|_{x_D < x_{f1D} + 2R_{f1D}, x_D > x_{f2D} + 2R_{f2D}} = 0 \quad (26)$$

将(18)~(26)式输入至 Mathematica 软件中, 求解得到拉普拉斯空间下的井底压力解函数,即

$$\overline{\psi}_{wD} = \frac{e^{-m} [\sqrt{aK}(e^{2m} + e^{2n}) + c\sqrt{s}(e^{2m} + e^{2n})] [\sqrt{b(1-K)}(e^{2l} + 1) - dT\sqrt{s}(e^{2l} - 1)]}{s^{\frac{3}{2}} \left\{ aK(e^{2n} - 1) [\sqrt{b(1-K)}(e^{2l} + 1) - dT\sqrt{s}(e^{2l} - 1)] + c\sqrt{s}(e^{2n} - 1) \right.} \quad (27)$$

$$\left. \left[(bK - b + Tdgs)(e^{2l} - 1) + (dT - g) \sqrt{bs(1-K)}(e^{2l} + 1) \right] + \sqrt{a}(e^{2n} + 1) \right. \\ \left. \left[(b - bK + Tds(c - g)) \sqrt{K}(e^{2l} - 1) - ((c + dT - g) \sqrt{bsK(1-K)})(e^{2l} + 1) \right] \right\}$$

以下为解函数的参数团:

$$a = \omega_{f1} A_{f1D}, \quad b = \omega_{f2} A_{f2D}$$

$$c = -\frac{V_{v1D}}{24A_{f1D}} \omega_{v1}, \quad d = -\frac{V_{v2D}}{24A_{f2D}} \omega_{v2}, \quad g = C_D$$

$$m = \sqrt{\frac{as}{k}} x_{fD}, \quad n = \sqrt{\frac{as}{k}} x_{f1D}, \quad l = \sqrt{\frac{as}{1-k}} x_{f2D}$$

2.3 典型曲线绘制

通过运用 Stehfest 数值反演方法, 在 MATLAB 软件中编程求取真实空间下的井底压力解函数, 绘制理论试井数学模型的典型曲线如图 4 所示。

将典型曲线划分为 6 个流动阶段: 第 I 阶段为井筒储集阶段; 第 II 阶段是气体在近井裂缝 f_2 系统中的流动段; 第 III 阶段主要是离井筒较近的溶洞 2 开始向裂缝供气, 导致压力导数曲线快速下降; 第 IV 阶段反映的是裂缝 1 (远井缝) 系统流动段; 第 V 阶段反映的主要是溶洞 1 开始向裂缝 1 供气, 导致压力导数曲线快速下降; 第 VI 阶段反映整个系统的拟稳态流动。

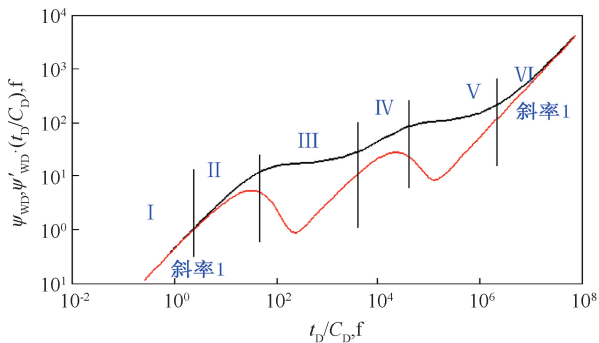


图 4 大尺度缝洞型碳酸盐岩气藏典型曲线图

Fig. 4 Typical curve diagram of large-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir

2.4 敏感性分析

选取溶洞体积、裂缝横截面积这 2 项大尺度缝洞的关键参数进行敏感性分析, 通过改变某一参数值确定对典型曲线的影响以及变化规律, 为下步模型验证判断提供依据。

2.4.1 远井溶洞 1 体积

由图 5 可知, 在保持其余参数为定值时, 远井溶洞 1 体积影响图版, 远井溶洞 1 体积主要影响第二

个下凹的深度和宽度。远井溶洞 1 体积越大, 压力波传播所需要的时间相应延长, 且向裂缝供气能力增大, 波谷纵深和横向宽度相应增加, 即第二个溶洞响应特征段下凹越宽, 并且越深; 远井溶洞 1 体积越大, 能量衰竭的周期也将延长, 达到拟稳定供气状态的时间节点将延迟。同时, 该图版也说明当双洞并联连接时, 改变其中一个溶洞的体积大小, 在曲线上并未影响另一个溶洞响应特征段, 即压力波在缝洞并联连接的气层中传播时, 并未形成强烈的压力扰动现象, 两洞分别向裂缝供气的能力不会出现明显变化。

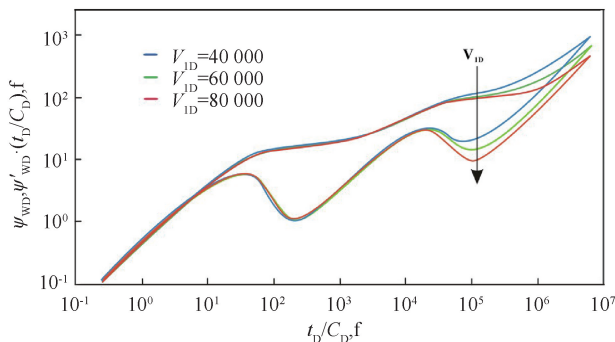


图 5 溶洞 1 体积对典型曲线的影响

Fig. 5 Influence of Cave 1 volume on typical curve

2.4.2 近井溶洞 2 体积

图 6 为在保持其余参数为定值时, 溶洞 2 体积影响图版。

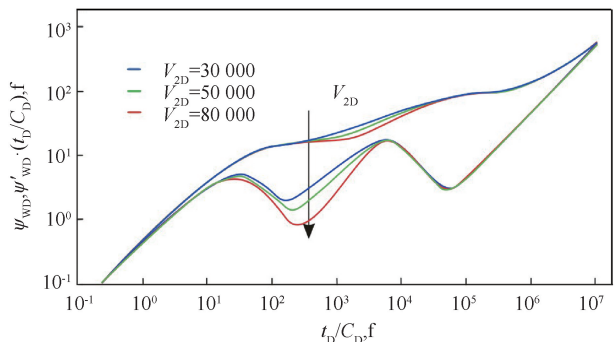


图 6 溶洞 2 体积对典型曲线的影响

Fig. 6 Influence of Cave 2 volume on typical curve

由图 6 可知, 近井溶洞 2 体积主要影响第一个下凹的深度和宽度, 同时还影响远井裂缝的线性流动特征段。近井溶洞 2 体积越大, 其能量体供气速

度将超越远井溶洞1中的供气速度,导致第一个下凹越宽,并且越深,气体在近井裂缝中的流动速度较远井裂缝中的流动速度也相对提高,出现近井裂缝流动段特征更明显,而远井裂缝流动段特征减弱的现象,在曲线上表现为远井裂缝线性流动段变短。

2.4.3 远井裂缝1横截面积

图7为在保持其余参数为定值时,远井裂缝1横截面积影响图版。由图7可知,远井裂缝1横截面积主要影响自身的裂缝流动段和远井溶洞1的溶洞响应特征段。横截面积越大,远井溶洞1能量损失越快,其溶洞空间迅速被压缩,压力波的传播路径缩短,导致了远井溶洞1凹子响应段减弱;同时远井裂缝1横截面积的变大,将放大裂缝线性流动,表现为压力曲线和压导曲线分开程度越高。

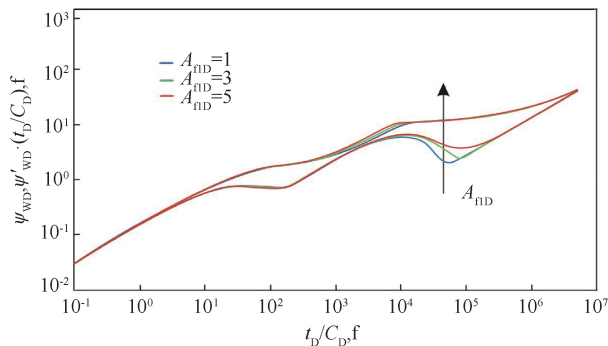


图7 裂缝1横截面积对典型曲线的影响

Fig. 7 Influence of cross-sectional area of Crack 1 on typical curve

2.4.4 近井裂缝2横截面积

图8为在保持其余参数为定值时,近井裂缝2横截面积影响图版。由图8可知,远井裂缝1横截面积的作用机理与近井裂缝2的相似,其不同之处为:当近井溶洞1中能量迅速枯竭,远井裂缝1的线性流动段特征将更显著,作为主力供气段,远井溶洞1向裂缝持续供气的时间相应缩短,曲线上表现为第二个凹子变窄。

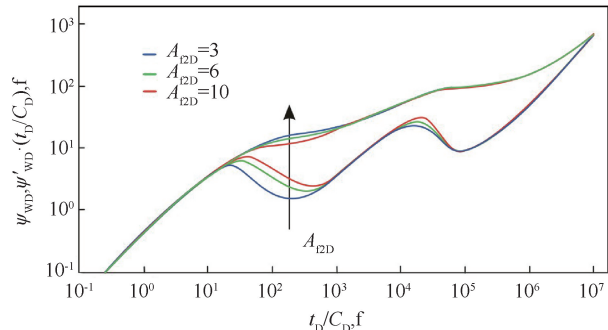


图8 裂缝2横截面积对典型曲线的影响

Fig. 8 Influence of cross-sectional area of Crack 2 on typical curve

3 模型有效性验证

选取塔里木盆地塔中I号断裂带下盘的S4井,其地震显示“串珠状”强反射,东西向地震剖面为长条状强反射串;取心显示缝洞发育,开启度较高;晶间孔发育,局部晶间孔充填泥质;钻井目的层段漏失6000 m³,放空5.48 m。生产压力出现开井急下,关井急上的现象,显示周围存在储集体;开井压力下降快,说明储集体到井底流通不畅通,通过裂缝与溶洞相连。基于以上判断,该井储层类型符合本文物理模型基本特征,其基础参数为:储层厚度5.48 m(测井),井筒半径0.107 95 m(裸眼),孔隙度5%,PVT结果为干气。

图9为利用传统的连续介质模型(变井储+有限传导裂缝+径向复合)解释压力恢复数据,图10为本文方法的双对数试井曲线拟合结果。

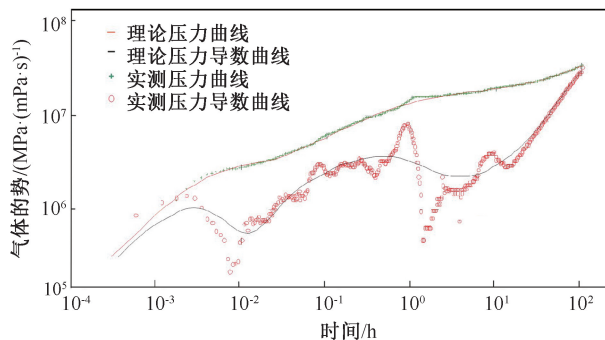


图9 Saphir 软件双对数拟合曲线

Fig. 9 Double logarithmic fitting curve explained by Saphir software

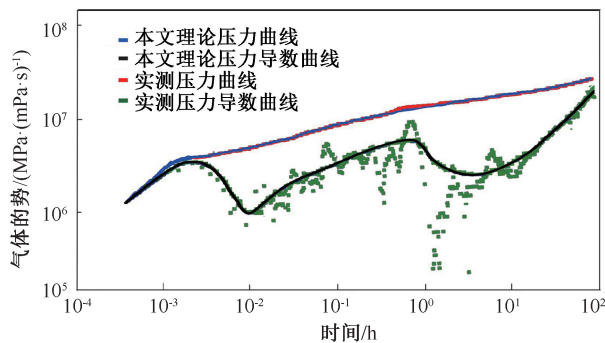


图10 本文方法双对数拟合曲线

Fig. 10 Double logarithmic fitting curve explained by the method in this paper

Saphir 软件解释结果见表1,本文解释参数结果见表2。

因为该井的储集空间主要为大尺度的裂缝和溶洞,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的反映储层结构和解释缝洞参数。

表 1 Saphir 软件解释结果
Table 1 Interpretation result by Saphir software

井储系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$)	表皮系数	渗透率/ mD	地层系数/ ($\text{mD} \cdot \text{m}$)	复合半径/ m	裂缝半长/ m	流度比	分散比	外推压力/ MPa
18.9	0.5	70	383.6	618.6	42.2	5.02	0.002 33	75.9

表 2 本文解释参数结果表
Table 2 Interpretation result by the method in this paper

渗透率/ mD	井储系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$)	溶洞体积/ m^3		裂缝长度/m			裂缝面积/ m^2			外推压力/ MPa
		溶洞 1	溶洞 2	裂缝 1	裂缝 2	裂缝 3	裂缝 1	裂缝 2	裂缝 3	
1 070.03	12.037 9	143 650	25 117	128.57	12.23	1.83	0.051 5	0.000 243	0.125	75.9

4 结论

(1)综合考虑了该区缝洞型碳酸盐岩气藏的储层地质特征和缝洞结构,构建了多尺度缝洞型系统(双溶洞之间存在两条微裂缝交错连接,且双溶洞通过河道大裂缝串通,形成大通道)。

(2)考虑了流体在不同尺度的流动通道以及储集空间中存在渗流、管流、自由流这三种流动方式,基于渗流、管流、自由流理论,建立了流动耦合试井数学模型。

(3)利用本文模型对该区一口符合该储层特征的典型井进行试井解释,并与现有的 Saphir 试井解释结果进行对比分析,验证了模型的有效性和适用性,进一步地利用试井解释的缝洞几何参数预测单井动态控制储量。

致谢:感谢川庆钻探地质勘探开发研究院对本文的支持,并通过单位保密审查。

参考文献

[1] 王小垚,曾联波,魏荷花,等. 碳酸盐岩储层缝洞储集体研究进展[J]. 地球科学进展,2018,33(8):818-832.
WANG Xiaoyao, ZENG Lianbo, WEI Hehua, et al. Research progress of the fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoir [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(8): 818-832.

[2] 蔡明金,王守峰,尹国君,等. 缝洞型碳酸盐岩储层储集类型判别方法[J]. 油气井测试,2018,27(4):7-14.
CAI Mingjin, WANG Shoufeng, YIN Guojun, et al. Reservoir type identification method for fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Well Testing, 2018,27(4):7-14.

[3] 杨敏,龙喜彬,潜欢欢,等. 塔河缝洞型油藏试井曲线特征及储集体识别[J]. 油气井测试,2020,29(3):64-70.
YANG Min, LONG Xibin, QIAN Huanhuan, et al. Well test curves and identification of fractured vuggy reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Well Testing, 2020,29(3):64-70.

[4] 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.

[5] KAZEMI H. Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1969,9(4):451-462.

[6] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963,3(3):245-255.

[7] CLOSMANN P J. Aquifer model for fissured reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1975, 15 (5):385-398.

[8] 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.
XUE Chengjin, DAI Weihua, ZHANG Jiaosheng. Well test interpretation method for triple media oil reservoir in which fracture communicated with wellbore [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2003,10(3):39-41.

[9] 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]. SPE 92116, 2004.

[10] 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研究[J]. 中外能源,2006,11(2):13-17.
WANG Zisheng, YAO Jun, ZHANG Kai. The characteristic of transient pressure of non-Newtonian fluid's transient flow in tripie-media reservoirs [J]. Sino-Global Energy, 2006,11(2):13-17.

[11] 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.
WANG Zisheng, YAO Jun. Study of pressure-transient characteristic for stress-sensitive triple-medium reservoirs with fractures and vugs conveying fluids to wellbore [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2006,21(1):84-89.

[12] 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.
CHANG Xuejun, YAO Jun, DAI Weihua, et al. The study of well test interpretation method for a triple medium reservoir [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004,

- 19(3):339-346.
- [13] ARBOGAST T, LEHR H L. Homogenization of a Darcy-Stokes system modeling vuggy porous media [J]. Computational Geosciences, 2006, 10(3): 291-302.
- [14] 常宝华,刘华勋,熊伟,等. 大尺度多洞缝型油藏试井分析方法[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(4): 14-16.
CHANG Baohua, LIU Huaxun, XIONG Wei, et al. Well test analysis of large-scale multi-fractured-vuggy reservoir [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(4): 14-16.
- [15] 熊钰,滕鹏,牛新年,等. 塔里木油田缝洞型油藏试井解释新模型研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 1-4.
XIONG Yu, TENG Peng, NIU Xinnian, et al. Research on new well testing interpretation model for fracture cavity type reservoir in the Tarim Oilfield [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 1-4.
- [16] 段宝江,常宝华,安为国,等. 双洞型碳酸盐岩油藏试井分析研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25): 6305-6309.
DUAN Baojiang, CHANG Baohua, AN Weiguo, et al. Research on well test analysis of the dual cavity/fracture system in carbonate formations [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 6305-6309.
- [17] 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, 2008, 30(2): 74-77.
PENG Xiaolong, DU Zhimin, LIU Xueli, et al. A new well test model for the big size cavity-fracture reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2008, 30(2): 74-77.
- [18] 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.
ZHANG Fuxiang, CHEN Fangfang, PENG Jianxin, et al. A well test model for wells drilled in big-size cavity of naturally fractured vuggy carbonate reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 912-915.
- [19] 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.
YANG Feng, WANG Xinhai, LIU Hong. Well test interpretation model for wells drilled in cavity of fractured vuggy carbonate reservoirs [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(3): 278-283.
- [20] 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.
YANG Fang, WU Xiaoqing, LI Jin. Establishment and solutions to the well test model of large scale cave type oil reservoir [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2014, 25(4): 27-31.
- [21] CHEN Peng, WANG Xinhai, LIU Hong, et al. A pressure-transient model for a fractured-vuggy carbonate reservoir with large-scale cave [J]. Geosystem Engineering, 2015, 19(2): 1-8.
- [22] 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.
ZHANG Xingxing, WANG Qin, WU Guangju, et al. Pressure response characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(6): 778-781.

编辑 穆立婷

第一作者简介:汪春浦,男,1979年出生,硕士,工程师,2010年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,主要从事油气藏动态分析方面的研究工作。电话:028-86015020;13982251001,Email: 56780459@qq.com。通信地址:四川省成都市成华区建设北路1段83号,邮政编码:610051。