

引用格式:徐燕东,陶杉,何辉,等.考虑重力作用的垂向双洞窜流试井模型[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):827-833.

XU Yandong, TAO Shan, HE Hui, et al. Well test model of vertical double-hole channeling considering gravity[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 827-833.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.014

## 考虑重力作用的垂向双洞窜流试井模型

徐燕东<sup>1,2</sup>,陶杉<sup>1,2</sup>,何辉<sup>3</sup>,万小勇<sup>1,2</sup>,邹宁<sup>1,2</sup>,袁鸿飞<sup>3</sup>

(1.中国石化西北油田分公司,新疆乌鲁木齐830011; 2.中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆乌鲁木齐830011; 3.西安华线石油科技有限公司,陕西西安710065)

**摘要:** 顺北油田塔里木盆地顺托果勒低隆北部断溶体储层具有明显的垂向发育及非均质性特征。由于储层垂向深度大,流体渗流过程中重力影响不可忽略。考虑油藏储层由小尺度的裂缝、大尺度的溶洞以及大尺度的窜流通道构成,不同深度处的初始压力随深度的变化,结合渗流力学原理及等势体理论建立了考虑重力作用的大尺度缝洞试井模型。采用Laplace(拉普拉斯)变换方法进行了求解,绘制了模型典型图版及参数敏感性分析图版。结果表明:考虑重力作用时流体流动需要克服更大的阻力,无因次压力及其导数曲线中后期位置更高;考虑小尺度裂缝储层渗流作用时会出现窜流通道线性流、大溶洞过渡流、大溶洞拟稳态流分别与裂缝性储层径向流的叠加特征,前者无因次压力及其压力导数曲线斜率介于0~0.5,后两者无因次压力导数曲线缓慢下降后缓慢上升。通过实例分析验证了模型的有效性和适用性。研究成果丰富了缝洞试井模型,为垂向大深度缝洞型油藏试井资料解释提供了理论依据。

**关键词:** 试井模型;缝洞型油藏;断溶体;重力;等势体;窜流通道

中图分类号:TE344

文献标识码:A

### Well test model of vertical double-hole channeling considering gravity

XU Yandong<sup>1,2</sup>, TAO Shan<sup>1,2</sup>, HE Hui<sup>3</sup>, WAN Xiaoyong<sup>1,2</sup>, ZOU Ning<sup>1,2</sup>, YUAN Hongfei<sup>3</sup>

(1. Sinopec Northwest Company of China Petroleum and Chemical Corporation, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-vuggy Reservoirs, CNPC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Xi'an Sino-line Petroleum Science & Technology Co., Ltd, Xi'an, shaanxi 710065, China)

**Abstract:** The fault-affected karst system in the north of Shuntuoguole low uplift, Tarim basin, Shunbei oilfield has obvious vertical development and heterogeneity. Due to the large vertical depth of the reservoir, the influence of gravity can not be ignored in the process of fluid flow. Considering that the reservoir is composed of small-scale fracture, large-scale cavity and large-scale channeling path, and the initial pressure at different depths varies with the depth, a large-scale fracture-vuggy well test model considering gravity is established combined with the principle of seepage mechanics and the equipotential body theory. The Laplace transform method was used to address this issue and the typical model plate and parameter sensitivity analysis plate were drawn. The results show that the fluid flow needs to overcome more resistance when gravity is taken into account, and the positions of dimensionless pressure and its derivative curves are higher in the middle and later stages. When accounting for the seepage effect in small-scale fractured reservoirs, distinct flow characteristics emerge: Linear flow in channeling paths, Transitional flow in large cavities, Quasi-steady flow in large cavities, and Radial flow in fractured reservoirs. The slope of the dimensionless pressure and its derivative curve of the former is between 0 and 0.5. The dimensionless pressure derivative curves of the latter two decrease slowly and then rise slowly. The applicability and validity of the model are further corroborated through case studies. This research not only enriches the fracture-vuggy well test model literature but also provides a solid theoretical foundation for interpreting well test data in vertical fracture-vuggy reservoirs with significant depth.

**Keywords:** well test model; fracture-vuggy reservoirs; fault-affected karst system; gravity; equipotential body; channeling path

收稿日期:2022-12-29。

第一作者简介:徐燕东(1975—),男,硕士,高级工程师,从事试油测试方面的工作。地址:新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区长春路南路466号中国石化西北石油科研生产园区B402室,邮政编码:830011。E-mail:tonnyxu2001@126.com

通信作者简介:何辉(1987—),男,硕士,工程师,从事油气藏开发与试井解释方法研究。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路青松公寓1001室,邮政编码:710065。E-mail:hh\_sol@126.com

基金项目:中国石化科技部项目“顺北一区5号断裂带提质提速钻完井技术研究”(P20002)。

顺北油气田位于塔里木盆地顺托果勒低隆北部,油气资源丰富,属于断控岩溶背景的缝洞型碳酸盐岩油气藏<sup>[1-2]</sup>。顺北断溶体油藏垂向深度深,储层结构复杂,且具有很强的非均质性<sup>[3-5]</sup>。试井分析作为油气藏动、静态资料评价的重要方法,在此类油气藏中具有广泛应用<sup>[6-7]</sup>。

对于缝、洞连续分布且尺度较小的缝洞型油气藏<sup>[8]</sup>,普遍使用以达西定律和连续性假设为基础的WARREN-ROOT双重孔隙介质模型<sup>[9]</sup>以及在此基础上改进和扩展的多重孔隙介质模型<sup>[10-11]</sup>。而针对大尺度的缝洞型油气藏,一些学者认为缝洞中流体具有极高的流动性,压力可以瞬间传到溶洞边界并形成拟稳态流,由此建立了不同缝洞组合关系的等势体缝洞试井解释模型。刘洪等<sup>[12]</sup>和尹洪军等<sup>[13]</sup>建立了井钻遇溶洞试井解释数学模型,其中溶洞为等势体模型,溶洞外储层为双重孔隙介质模型。彭小龙等<sup>[14]</sup>、常宝华等<sup>[15]</sup>和段宝江等<sup>[16]</sup>建立了大尺度溶洞裂缝型油藏等势体试井分析模型,其中裂缝考虑为一维拟稳定流模型。熊钰等<sup>[17]</sup>根据地质特征,建立了井打在大尺度裂缝上的缝洞型试井模型和串联双洞型试井模型,实例解释结果与地质模型和钻井数据有着较好的一致性。

少数学者在大尺度缝洞型油气藏的试井解析理论研究中考虑了重力因素。徐燕东<sup>[18]</sup>结合顺北油田断溶体储层纵向分布深的特征,建立了考虑重力因素的断溶体储层“井-洞-缝”试井模型。马国锐等<sup>[19]</sup>将溶洞与裂缝组合系统视作联立的圆柱形区域,建立了一种考虑重力因素影响的单洞型断溶体储层试井解释方法。DU等<sup>[20]</sup>综合考虑了流动和波动对溶洞压力变化的影响,建立了波动与流动耦合方程,进一步将重力作用修正到附加压降中并结合外部地层渗流方程形成了新的缝洞型油藏试井模型。

综上所述,在缝洞型油气藏的解析试井模型研究中,普遍忽略了重力因素的影响。少数学者在断溶体储层试井模型中考虑了重力作用,模型种类较少,仍需扩充完善,以便更好地适用于复杂地质特征。针对顺北油气藏缝洞储层垂向深度深的特征,建立了考虑重力作用的双洞窜流试井模型。利用Laplace变换方法对模型进行解析求解,并给出部分参数变化的典型特征图以及应用实例。

## 1 试井解释模型

### 1.1 模型假设

大溶洞1和大溶洞2均为圆柱体,分别位于圆形封闭储层1和储层2中心,直井钻遇大溶洞1,产量恒定;大溶洞1和2在储层纵向分布,通过窜流通道连接,大溶洞具有无限导流能力(等效压力点分别取在大溶洞1和2的中部位置),流体在窜流通道中的流动为非稳态流;储层1、2是由小尺度裂缝构成的裂缝性储层,流体流动符合达西渗流;储层1、2之间无流体交换,并分别向大溶洞1、2供给流体,大溶洞2中流体通过窜流通道流入大溶洞1,总系统中流体都经大溶洞1流入井筒;岩石及流体微可压缩,且压缩系数为常数;考虑溶洞储集效应,考虑重力作用(图1)。

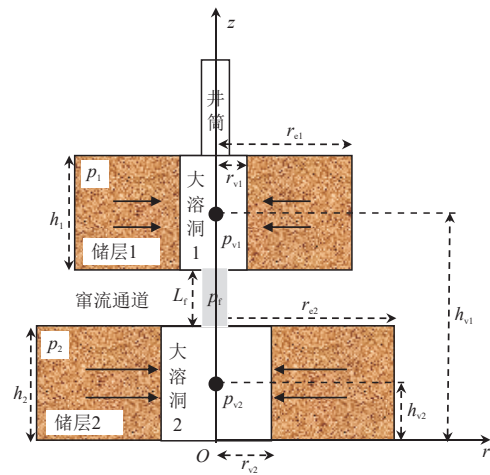
### 1.2 数学模型

根据渗流理论可建立储层1控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{1D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} = \frac{\partial p_{1D}}{\partial t_D} \quad (1)$$

式中无因次变量的定义如下:

$$p_{1D} = \frac{k_1 h_1}{1.842 q \mu B} (p_i - p_1), r_D = r/L, t_D = \frac{0.0036 k_1 t}{\varphi_1 \mu C_{11} L^2}$$



注: $r$ 为径向距离,单位m; $z$ 为垂向距离,单位m; $O$ 为坐标原点; $h_1$ 为储层1厚度,单位m; $h_2$ 为储层2厚度,单位m; $h_{v1}$ 为溶洞1中心点高度,单位m; $h_{v2}$ 为溶洞2中心点高度,单位m; $L_1$ 为窜流通道长度,单位m; $r_{e1}$ 为储层1半径,单位m; $r_{e2}$ 为储层2半径,单位m; $r_{v1}$ 为溶洞1半径,单位m; $r_{v2}$ 为溶洞2半径,单位m; $p_1$ 为储层1压力,单位MPa; $p_2$ 为储层2压力,单位MPa; $p_{1v}$ 为溶洞1压力,单位MPa; $p_{2v}$ 为溶洞2压力,单位MPa; $p_{1f}$ 为窜流通道压力,单位MPa。

图1 物理模型示意图

Fig.1 Physical model diagram

式中: $p_{1D}$ 为储层1无因次压力; $r_D$ 为无因次径向距离; $t_D$ 为无因次时间; $k_1$ 为储层1渗透率,单位 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $h_1$ 为储层1厚度,单位m; $q$ 为流量,单位 $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\mu$ 为黏度,单位 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ; $B$ 为体积系数,单位 $\text{m}^3/\text{m}^3$ ; $p_i$ 为初始压力,单位MPa; $p_1$ 为储层1压力,单位MPa; $r$ 为径向距离,单位m; $L$ 为参考长度(通常以井径作为参考),单位m; $t$ 为时间,单位h; $\varphi_1$ 为储层1孔隙度; $C_{11}$ 为储层1综合压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ 。

储层2控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{2D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} = \frac{1}{\sigma_{21}} \frac{\partial p_{2D}}{\partial t_D} \quad (2)$$

式中无因次变量的定义如下:

$$p_{2D} = \frac{k_1 h_1}{1.842 q \mu B} (p_i - p_2), \sigma_{21} = \frac{k_2 / (\varphi_2 \mu C_{12})}{k_1 / (\varphi_1 \mu C_{11})}$$

式中: $p_{2D}$ 为储层2无因次压力; $\sigma_{21}$ 为储层2与储层1的导压系数比; $p_2$ 为储层2压力,单位MPa; $k_2$ 为储层2渗透率,单位 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $\varphi_2$ 为储层2孔隙度; $C_{12}$ 为储层2综合压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ 。

窜流通道控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} + 2c_D g_D \frac{\partial p_D}{\partial z_D} = \frac{1}{\sigma_{11}} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (3)$$

式中无因次变量的定义如下:

$$p_D = \frac{k_f h_1}{1.842 q \mu B} (p_i - p_f),$$

$$\sigma_{11} = \frac{k_f / (\varphi_f \mu C_{1f})}{k_1 / (\varphi_1 \mu C_{11})}, c_D = \frac{1.842 q \mu B C_L}{k_1 h_1},$$

$$g_D = \frac{1.842 \times 10^6 q \mu B}{k_1 h_1} \rho g L, z_D = z/L$$

式中: $p_D$ 为窜流通道无因次压力; $z_D$ 为无因次垂向距离; $c_D$ 为流体压缩系数与无因次压力转换系数的比值; $g_D$ 为考虑重力作用时的无因次附加压力; $\sigma_{11}$ 为窜流通道与储层1的导压系数比; $p_f$ 为窜流通道压力,单位MPa; $k_f$ 为窜流通道渗透率,单位 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ; $\varphi_f$ 为窜流通道孔隙度; $C_{1f}$ 为窜流通道综合压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ ; $C_L$ 为流体压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ ; $\rho$ 为流体的密度,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $g$ 为重力加速度,单位 $\text{m}/\text{s}^2$ ; $z$ 为垂向距离,单位m。

根据物质守恒及窜流通道与大溶洞1连接处压力相等条件:

$$r_D \frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \Big|_{\substack{r_D = r_{1D} \\ z_D = h_{1D}}} - \frac{\omega_{v1}}{1 - \omega_{v1}} \frac{(r_{v1D})^2}{2} \frac{\partial p_{v1D}}{\partial t_D} \Big|_{z_D = h_{v1D}} - \frac{r_D m_{f1}}{2} \left( \frac{\partial p_{fD}}{\partial z_D} - g_D \right) \Big|_{z_D = h_{2D} + L_D} = -1 \quad (4)$$

$$p_D \Big|_{z_D = h_{2D} + L_D} = p_{v1D} \Big|_{z_D = h_{2D} + L_D} \quad (5)$$

式(4)一式(5)中无因次变量的定义如下:

$$p_{v1D} = \frac{k_1 h_1}{1.842 q \mu B} (p_i - p_{v1}), r_{v1D} = r_{v1}/L, r_{fD} = r_f/L,$$

$$h_{v1D} = h_{v1}/L, h_{2D} = h_2/L, \omega_{v1} = \frac{C_{1v1} \varphi_{v1} h_1}{C_{11} \varphi_1 h_1 + C_{1v1} \varphi_{v1} h_1},$$

$$L_{fD} = L_f/L, m_{f1} = (k_f r_f) / (k_1 h_1)$$

式(4)一式(5)中: $p_{v1D}$ 为溶洞1无因次压力; $r_{v1D}$ 为溶洞1无因次半径; $r_{fD}$ 为窜流通道无因次半径; $h_{v1D}$ 为溶洞1无因次中心点高度; $h_{2D}$ 为储层2无因次厚度; $\omega_{v1}$ 为溶洞1储容比; $L_{fD}$ 为窜流通道无因次长度; $m_{f1}$ 为窜流通道与储层1的流度比; $p_{v1}$ 为溶洞1压力,单位MPa; $r_{v1}$ 为溶洞1半径,单位m; $r_f$ 为窜流通道半径,单位m; $h_{v1}$ 为溶洞1中心点高度,单位m; $h_2$ 为储层2厚度,单位m; $L_f$ 为窜流通道长度,单位m; $C_{1v1}$ 为溶洞1综合压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ ; $\varphi_{v1}$ 为溶洞1孔隙度。

根据物质守恒及窜流通道与大溶洞2连接处压力相等条件:

$$m_{21} r_D \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \Big|_{\substack{r_D = r_{v2D} \\ z_D = h_{v2D}}} - \frac{\omega_{v2}}{1 - \omega_{v2}} \frac{(r_{v2D})^2}{2} \frac{\partial p_{v2D}}{\partial t_D} \Big|_{z_D = h_{v2D}} - \frac{r_D m_{f1}}{2} \left( \frac{\partial p_{fD}}{\partial z_D} - g_D \right) \Big|_{z_D = h_{2D}} = -1 \quad (6)$$

$$p_D \Big|_{z_D = h_{2D}} = p_{v2D} \Big|_{z_D = h_{2D}} \quad (7)$$

式(6)一式(7)中无因次变量的定义如下:

$$p_{v2D} = \frac{k_1 h_1}{1.842 q \mu B} (p_i - p_{v2}), r_{v2D} = r_{v2}/L, h_{v2D} =$$

$$h_{v2}/L, \omega_{v2} = \frac{C_{1v2} \varphi_{v2} h_2}{C_{11} \varphi_1 h_1 + C_{1v2} \varphi_{v2} h_2}, m_{21} = (k_2 h_2) / (k_1 h_1)$$

式(6)一式(7)中: $p_{v2D}$ 为溶洞2无因次压力; $r_{v2D}$ 为溶洞2无因次半径; $h_{v2D}$ 为溶洞2无因次中心点高度; $\omega_{v2}$ 为溶洞2储容比; $m_{21}$ 为储层2与储层1的流度比; $p_{v2}$ 为溶洞2压力,单位MPa; $r_{v2}$ 为溶洞2半径,单位m; $h_{v2}$ 为溶洞2中心点高度,单位m; $C_{1v2}$ 为溶洞2综合压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ ; $\varphi_{v2}$ 为溶洞2孔隙度。

储层与溶洞连接条件:

$$p_{v1D} = p_{1D} \Big|_{r_D = r_{e1D}} \quad (8)$$

$$p_{v2D} = p_{2D} \Big|_{r_D = r_{e2D}} \quad (9)$$

储层外边界条件:

$$\frac{\partial p_{1D}}{\partial r_D} \Big|_{r_D = r_{e1D}} = \frac{\partial p_{2D}}{\partial r_D} \Big|_{r_D = r_{e2D}} = 0 \quad (10)$$

式(8)一式(10)中无因次变量的定义如下:

$$r_{e1D} = r_{e1}/L, r_{e2D} = r_{e2}/L$$

式(8)一式(10)中: $r_{e1D}$ 为储层1无因次半径; $r_{e2D}$ 为储层2无因次半径; $r_{e1}$ 为储层1半径,单位m; $r_{e2}$ 为储层2半径,单位m;。

系统考虑重力时,储层、溶洞以及窜流通道中初始时刻的压力均是垂向距离 $z$ 的函数:

$$p_{jD} \Big|_{t_D = 0} = -g_D (h_{v1D} - z_D) \quad (11)$$

$$j = 1, 2, v1, v2, f$$

式中:下标1,2,v1,v2,f分别表示储层1、储层2、溶洞1、溶洞2、窜流通道。

### 1.3 模型求解

基于 $t_D$ 对式(1)一式(11)作Laplace变换,并结合初始条件和边界条件求解可得Laplace空间井底压力解为:

$$\bar{p}_{wD} = \frac{1}{u} \left\{ \frac{e^{(b_{f1} - b_{f2})L_{fD}} \left[ \frac{(b_{f1} - b_{f2})C_{fD}L_{fD}}{e^{b_{f1}L_{fD}} - 1} \right]^2 - f_1}{4f_2} \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$C_{fD} = \frac{r_{fD}m_{f1}}{L_{fD}} = \frac{k_{f1}r_{f1}}{k_{f1}L_{f1}} \quad (13)$$

$$f_1 = \frac{-I_1(b_1r_{e1D})K_1(b_1r_{v1D}) + K_1(b_1r_{e1D})I_1(b_1r_{v1D})}{I_1(b_1r_{e1D})K_0(b_1r_{v1D}) + K_1(b_1r_{e1D})I_0(b_1r_{v1D})} b_1r_{v1D} - \frac{\omega_{v1}u}{1 - \omega_{v1}} \frac{r_{v1D}^2}{2} - \frac{b_{f1}e^{b_{f1}L_{fD}} - b_{f2}e^{b_{f2}L_{fD}}}{e^{b_{f1}L_{fD}} - e^{b_{f2}L_{fD}}} \frac{C_{fD}L_{fD}}{2} \quad (14)$$

$$f_2 = \frac{-I_1(b_2r_{e2D})K_1(b_2r_{v2D}) + K_1(b_2r_{e2D})I_1(b_2r_{v2D})}{I_1(b_2r_{e2D})K_0(b_2r_{v2D}) + K_1(b_2r_{e2D})I_0(b_2r_{v2D})} m_{21}b_2r_{v2D} - \frac{\omega_{v2}u}{1 - \omega_{v2}} \frac{r_{v2D}^2}{2} + \frac{b_{f2}e^{b_{f2}L_{fD}} - b_{f1}e^{b_{f1}L_{fD}}}{e^{b_{f2}L_{fD}} - e^{b_{f1}L_{fD}}} \frac{C_{fD}L_{fD}}{2} \quad (15)$$

$$b_1 = \sqrt{u} \quad (16)$$

$$b_2 = \sqrt{u/\sigma_{21}} \quad (17)$$

$$b_{f1} = -\sqrt{u/\sigma_{f1} + (c_{fD}g_D)^2} - c_{fD}g_D \quad (18)$$

$$b_{f2} = \sqrt{u/\sigma_{f1} + (c_{fD}g_D)^2} - c_{fD}g_D \quad (19)$$

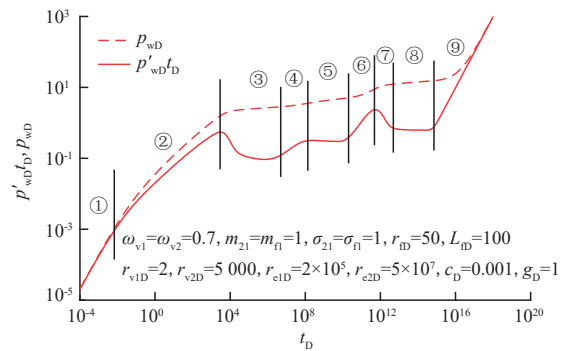
式(12)一式(19)中: $u$ 为无因次时间 $t_D$ 对应的Laplace变量; $I_0$ 、 $K_0$ 分别为改进的零阶第一类修正贝塞尔函数和零阶第二类修正贝塞尔函数; $I_1$ 、 $K_1$ 分别为改进的一阶第一类修正贝塞尔函数和一阶第二类修正贝塞尔函数; $C_{fD}$ 、 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_{f1}$ 、 $b_{f2}$ 均为中间变量。

## 2 典型图版及参数敏感性分析

### 2.1 典型图版

图2为无因次压力降落典型曲线。根据其特征可分为9个响应段:①大溶洞1拟稳态流段,由于溶洞1的储集效应,无因次压力及其导数曲线前期基本呈斜率为1的直线;②窜流通道线性流与储层1径向流叠加响应段,无因次压力及其导数曲线斜率介于0~0.5;③大溶洞2过渡流与储层1径向流叠加响应段,溶洞2流体通过窜流通道进入溶洞1,无因次压力导数曲线缓慢下降;④大溶洞2拟稳态流与储层1径向流叠加响应段,由于溶洞2的储集效应,无因次压力导数曲线缓慢上升;⑤储层1径向流和储层2径向流叠加响应段,无因次压力导数曲线后端基本呈水平线;⑥储层1拟稳态流段,压力波传播至储层1边界,储层1的供给作用逐渐减弱,无因次压力导数曲线开始上翘;⑦储层2过渡流段,储层2的供给作用逐渐增强,无因次压力导数曲线下掉;⑧储层2径向流段,无因次压力导数曲线后端基本为水平线;⑨储层2拟稳态流段(封闭边界控制流段),储层2的供给作用逐渐减弱,无因次压力导数曲线上翘,后期基本呈斜率为1的直线。

图3为不考虑小尺度裂缝储层渗流作用的无因



注: $t_D$ 为无因次时间; $p_{wD}$ 为式(12)所对应的实空间无因次井底压力; $p'_{wD}$ 为无因次压力导数, $p'_{wD} = dp_{wD}/dt_D$ 。

图2 无因次压力降落典型曲线

Fig. 2 Typical curve diagram of dimensionless pressure drop

次压力降落典型曲线(令储层1的半径等于溶洞1的半径以及储层2的半径等于溶洞2的半径即可实现)。典型特征图可分为4个响应段:①大溶洞1拟稳态流段,无因次压力及其导数曲线前期基本呈斜率为1的直线;②窜流通道线性流响应段,无因次压力及其导数曲线斜率基本呈斜率为0.5的平行线;③大溶洞2过渡流响应段,无因次压力导数曲线出现快速下掉;④大溶洞2拟稳态流响应段,无因次压力导数曲线呈斜率为1的直线。

## 2.2 参数敏感性分析

图4为考虑重力作用时的无因次附加压力变化响应特征。无因次附加压力主要对无因次压力降落图的中期及后期影响较大。当无因次附加压力越大时,流体受重力影响越大,系统中流体流动需要克服

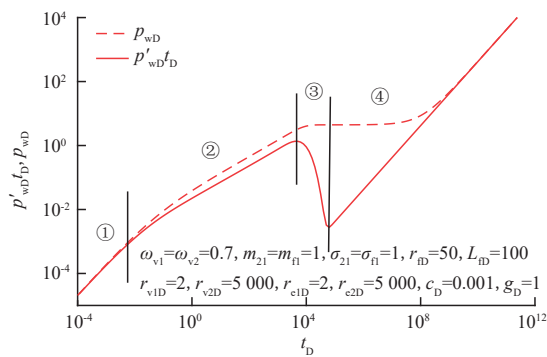


图3 无因次压力降落典型曲线  
(不考虑小尺度裂缝储层渗流作用)

Fig. 3 Typical curve of dimensionless pressure drop  
(without considering the flowing effect of small-scale fractured reservoir)

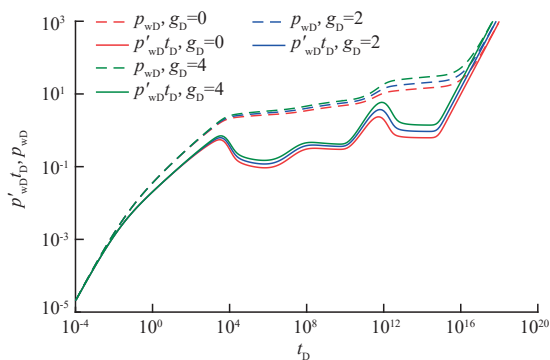


图4 无因次附加压力变化响应特征

Fig. 4 Response characteristic diagram of Dimensionless additional pressure change

的阻力也越大,相应的无因次压力及其导数曲线位置也越高。

图5为窜流通道无因次长度变化响应特征。窜流通道无因次长度主要对无因次压力降落图的中期影响较大。窜流通道无因次长度增大时,窜流通道线性流与储层1径向流叠加响应持续时间延长。同时,流体通过窜流通道时间增加,消耗能量增多,由溶洞2及储层2流向溶洞1的阻力增大,因此,相应的无因次压力及其导数曲线位置靠上。

图6为溶洞1无因次半径变化响应特征。溶洞1无因次半径主要对无因次压力降落图的前期影响较大。溶洞1无因次半径越大,溶洞体积越大,所具有的弹性能量越大且储存流体越多,因此,拟稳态流持续时间也越长。

图7为溶洞2无因次半径变化响应特征。溶洞2无因次半径主要对无因次压力降落图的中期影响较大。溶洞2无因次半径越大,溶洞体积越大,所具有

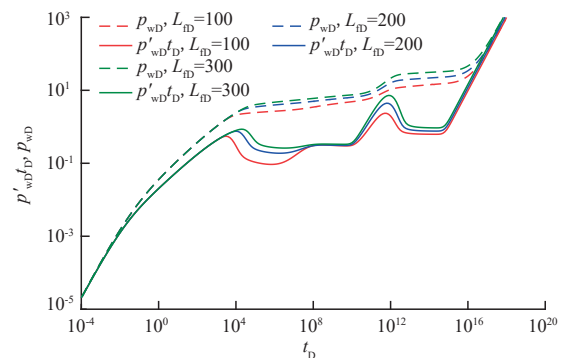


图5 窜流通道无因次长度变化响应特征

Fig. 5 Response characteristic diagram of dimensionless length change of channeling channel

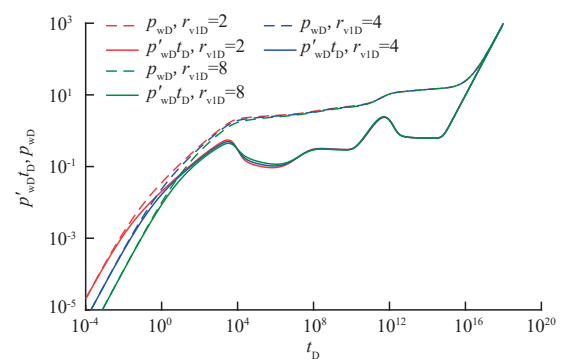


图6 溶洞1无因次半径变化响应特征

Fig. 6 Response characteristic diagram of dimensionless radius change of cave 1

的弹性能量越大且储存流体越多,因此,溶洞2拟稳态流与储层1径向流叠加响应持续时间越长,导数曲线上翘特征出现越晚。

### 3 实例分析

X井为顺北油田5号断裂带上的一口开发井,钻井过程中漏失 $1\ 400\ \text{kg/m}^3$ 的泥浆 $25.45\ \text{m}^3$ ,酸压投产后随即进行关井压力恢复测试。关井测试前7 mm油嘴日均产油量约为 $326.0\ \text{m}^3$ ,等效稳产时间113.2 h,关井有效测试时间为251.0 h。油体积系数 $1.58\ \text{m}^3/\text{m}^3$ ,油黏度 $0.33\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ,储层综合压缩系数 $3.17\times 10^{-3}\ \text{MPa}^{-1}$ ,孔隙度0.1,测试井段储层1有效厚度10.0 m。实测恢复压力差及其导数曲线如图8所示,前端无明显的线性流与径向流叠加特征,表明窜流通道的导压系数可能较大,很快地达到拟稳态流阶段。前期下凹段持续时间相对较长,表明溶洞2和储层1的储集体规模不大。后期导数曲线缓慢下掉主要是因为测试前生产时间相对较短,未探及储层2的边界所致(若探及储层2的边界,则导数曲线会快速下掉)。

结合测试前高产、钻井漏失以及实测数据双对数曲线图的特点,应用模型对该实例井进行拟合分析,解释结果为:储层1渗透率 $6.58\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,大溶洞1半径4.2 m,大溶洞2半径18.21 m,储层1外边界60.00 m,窜流通道长度30.20 m,拟合压力80.355 MPa。同时,应用商业软件Saphir中的径向两区复合模型进行拟合分析,解释结果为:井储系数 $0.59\ \text{m}^3/\text{MPa}$ ,表皮因子-4.20,内区渗透率 $293.79\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ ,内区边界31.72 m,拟合压力80.394 MPa。对比发现,从拟合效

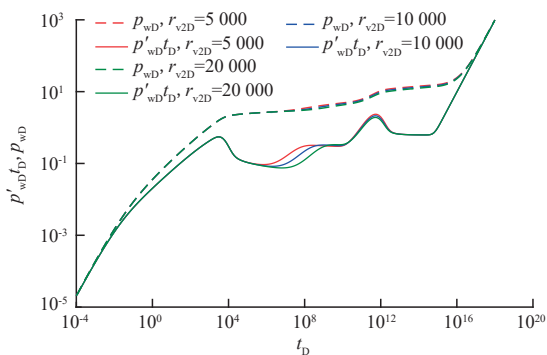


图7 溶洞2无因次半径变化响应特征

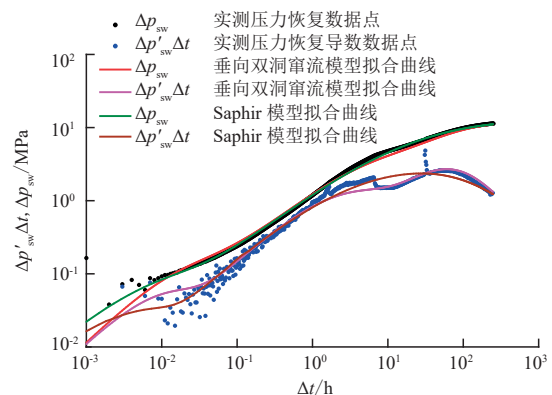
Fig. 7 Response characteristic diagram of dimensionless radius change of cave 2

果(图8)上来看,垂向双洞窜流模型与Saphir的径向两区复合模型拟合效果均较好,但结合现场地质背景情况,径向两区复合模型明显不符合使用条件,垂向双洞窜流模型能较好反应储层特征。因此,选用垂向双洞窜流模型解释的结果与现场生产动态情况也更为吻合,可靠性相对更高。

### 4 结论

建立了考虑重力作用的大尺度缝洞试井模型,应用数学物理方法对模型进行解析求解并绘制了模型典型特征图版及参数敏感性分析图版,给出了应用实例,主要结论如下:

- 1) 考虑重力作用时,流体流动需要克服更大的阻力,因此无因次压力及其导数曲线中期及后期位置更高,表明考虑重力作用的必要性。总体曲线特征和不考虑重力作用相似。
- 2) 考虑小尺度裂缝储层渗流作用时,窜流通道线性流与储层径向流叠加特征表现为无因次压力及其压力导数曲线斜率介于0~0.5。大溶洞过渡流与径向流叠加特征表现为无因次压力导数曲线缓慢下降。大溶洞拟稳态流与径向流叠加特征表现为无因次压力导数曲线缓慢上升且斜率小于1。
- 3) 不考虑小尺度裂缝储层渗流作用时,窜流通道线性流特征表现为无因次压力及其压力导数曲线斜率接近0.5。大溶洞过渡流特征表现为无因次压力导数曲线快速下掉。大溶洞拟稳态流特征表现为无因次压力导数曲线斜率接近1。



注:  $\Delta t$ 为关井时间,单位h;  $\Delta p_{sw}$ 为恢复压力差,单位MPa;  $\Delta p'_{sw}$ 为恢复压力差关于时间导数,  $\Delta p'_{sw} = d\Delta p_{sw} / d\Delta t$ ,单位MPa/h。

图8 顺北油田X井拟合成果

Fig. 8 Fitting results diagram of X well in Shunbei oilfield

参考文献

- [1] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355. LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [2] 胡文革. 顺北油气田断溶体油藏油井产能评价新方法[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 168-172. HU Wenge. A new method for evaluating the productivity of oil wells in fault-karst reservoirs in Shunbei oil & gas field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 168-172.
- [3] 李阳, 侯加根, 李永强. 碳酸盐岩缝洞型储层特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606. LI Yang, HOU Jiagen, LI Yongqiang. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600-606.
- [4] 商晓飞, 段太忠, 张文彪, 等. 断控岩溶主控的缝洞型碳酸盐岩内部溶蚀相带表征——以塔河油田10区奥陶系油藏为例[J]. 石油学报, 2020, 41(3): 329-341. SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, et al. Characterization of dissolution facies belt in fracture-cavity carbonate rocks mainly controlled by fault-controlling karst: A case study of Ordovician reservoirs in the Block 10 of Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(3): 329-341.
- [5] 唐磊, 王建峰, 曹敬华, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 329-339. TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 329-339.
- [6] 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. 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.
- [7] 王子胜, 姚军, 戴卫华. 缝洞型油藏试井解释方法在塔河油田的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 102(1): 72-74. WANG Zisheng, YAO Jun, DAI Weihua. Application of the well test interpretation method for fracture-vug reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 102(1): 72-74.
- [8] 王建峰, 彭小龙, 王高旺, 等. 缝洞型油藏流动模型的选择方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 86-88. WANG Jianfeng, PENG Xiaolong, WANG Gaowang, et al. Method of selecting the flow model for the fracture-cavernous reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 86-88.
- [9] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-255.
- [10] CAMACHO V R, VÁSQUEZ C M, CASTREJÓN A R. Pressure-transient and decline-curve behavior in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(2): 95-112.
- [11] 彭小龙, 杜志敏, 戚志林, 等. 多重介质渗流模型的适用性分析[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 99-101. PENG Xiaolong, Du Zhimin, Qi Zhilin, et al. Analysis on the adaptability of multi-medium percolation model[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 99-101.
- [12] 刘洪, 任路, 胡治华. 缝洞型油藏钻遇溶洞油井的压力曲线特征[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(2): 124-128. LIU Hong, REN Lu, HU Zhihua. Pressure curve characteristics for wells drilled in cave of fracture-cavity carbonate reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(2): 124-128.
- [13] 尹洪军, 邢翠巧, 计秉玉, 等. 大尺度溶洞发育的缝洞型油藏试井解释模型研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 84-88. YIN Hongjun, XING Cuiqiao, JI Bingyu, et al. Well test interpretation model for fracture-cavity reservoir with well-developed large-scale caves[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 84-88.
- [14] 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): 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 University (Science & Technology Edition), 2008, 30(2): 74-77.
- [15] 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 method of large-scale multiple fractured-vuggy reservoir[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(4): 14-16.
- [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 & Engineering, 2012, 12(25): 6305-6309.
- [17] 熊钰, 叶海峰, 蔡明金, 等. 井打在大尺度裂缝上的缝洞型油气藏试井模型[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(34): 49-54. XIONG Yu, YE Haifeng, CAI Mingjin, et al. A well test model for wells drilled in large-scale fracture of fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 49-54.
- [18] 徐燕东. 考虑重力因素的断溶体储层“井-洞-缝”模型试井解释方法[J]. 计算物理, 2020, 37(2): 189-197. XU Yandong. An interpretation method with “Well-Cave-Crack” model of dissolves reservoir considering gravity factors [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2020, 37(2): 189-197.
- [19] 马国锐, 宋海, 李新勇, 等. 一种考虑重力因素影响的单洞型断溶体储层试井解释方法: CN113294147A[P]. 2021-08-24. MA Guorui, SONG Hai, LI Xinyong, et al. An interpretation method with single cavity model of dissolved reservoir considering gravity factors: CN113294147A[P]. 2021-08-24.
- [20] DU Xin, LU Zhiwei, LI Dongmei, et al. A novel analytical well test model for fractured vuggy carbonate reservoirs considering the coupling between oil flow and wave propagation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 173: 447-461.

(编辑 徐佩)