第42卷 第8期 地球科学 Earth Science Vol. 42 No. 8
2017年8月 http://www.earth-science.net Aug. 2017

doi:10.3799/dqkx.2017.519

缝洞型油藏井钻遇大尺度部分充填溶洞数学模型

雷 刚[1,2],张东晓[1,2],杨 伟[2],王会杰[2]

1.北京大学工程科学与新兴技术高精尖创新中心,北京 100871
2.北京大学工学院,北京 100871

摘要:缝洞型油藏不同介质间流体窜流的研究对于大尺度溶洞中原油是否能够得到有效开发具有重大意义.基于缝洞型油藏大尺度溶洞充填特征,建立了井钻遇大尺度部分充填溶洞数学模型,采用Laplace变换和Stehfest数值反演,分别得到了基岩—溶洞未充填区域窜流量、溶洞充填区域—溶洞未充填区域窜流量和大尺度溶洞无因次流量,并分析了不同参数对窜流特征曲线的影响.研究结果表明:流体窜流过程可划分为4个流动阶段,流动前期和中前期主要为基质中流体向溶洞未充填部分窜流;流动中后期和后期主要为溶洞充填物流体向溶洞未充填部分窜流.在流动前期,基质和未充填溶洞间流体交换对部分充填溶洞流量贡献较大;而流动后期,溶洞充填物和未充填溶洞间流体交换对部分充填溶洞流量贡献较大.重力会导致溶洞充填物—溶洞未充填部分窜流量减小,而基质—溶洞未充填部分窜流不受到重力影响.溶洞充填程度、溶洞未充填部分和基质系统能量等因素对窜流特征曲线具有重大的影响.研究方法和结果对合理分析缝洞型油藏大尺度溶洞流动特征具有一定的指导意义.

关键词:缝洞型油藏;大尺度溶洞;充填特征;窜流特征曲线;参数分析;石油地质.

中图分类号:P345 **文章编号**:1000—2383(2017)08—1413—08 **收稿日期**:2017—02—03

Mathematical Model for Wells Drilled in Large-Scale Partially Filled Cavity in Fractured-Cavity Reservoirs

Lei Gang[1,2], Zhang Dongxiao[1,2], Yang Wei[2], Wang Huijie[2]

1.*Beijing Innovation Center for Engineering Science and Advanced Technology*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*
2.*College of Engineering*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*

Abstract: It is significant to explore fluid crossflow rule of various medium in fractured-cavity reservoirs for effective development of crude oil in large-scale partially filled cavity. Based on the filling characteristics of the large size cavity in fractured-cavity reservoir, a fluid flow mathematical model for wells drilled in large-scale partially filled cavity in fractured-cavity reservoir has been proposed in this paper. The Laplace transformation and Stehfest numerical inversion are applied to analyze the crossflow rule in the partially filled cavity. The fluid crossflow characteristic curve for the partially filled cavity has been obtained and studied in this paper. The results show that the process of the flow for the partially filled cavity can be divided into four sections, including the earlier period and middle-early period flow for the crossflow between the matrix system and unfilled part of the cavity, the middle-late period and the later period flow for the crossflow between the filler of the cavity and unfilled part of the cavity. In middle-early flow period, the crossflow between the matrix system and unfilled part of the cavity reaches the quasi steady state. And the crossflow between the filler of the cavity and unfilled part of the cavity reaches the quasi steady state at the later period. Gravity is one of the main factors that influences the typical crossflow characteristic curve, leading to the decrease of the crossflow between the filler and the unfilled part of the cavity. However, the inter-porosity flow between the matrix and the unfilled part of the cavity has no relation with gravity. In addition, the cross flow characteristic curve is greatly affected by filling degree of the cavity, the energy parameters of the filler of the cavity and the energy parameters of the matrix. The methods and results of this research can facilitate further studies on the crossflow characteristics of the partially filled cavi-

---

基金项目:国家科技重大专项(No.2016ZX05014004-006);中国博士后科学基金项目(No.2017M610706).

作者简介:雷刚(1987—),男,博士后,主要从事缝洞型碳酸盐岩油藏开发方面研究.ORCID:0000-0002-7872-4784.
E-mail:lg1987cup@126.com

引用格式:雷刚,张东晓,杨伟,等,2017.缝洞型油藏井钻遇大尺度部分充填溶洞数学模型.地球科学,42(8):1413—1420.

ty in fractured-cavity reservoirs.

Key words: fractured-cavity reservoir; large-scale cavity; filling characteristics; cross flow characteristic curve; parameter analysis; petroleum geology.

塔河缝洞型油藏储集空间复杂，裂缝、大尺度溶洞并存，溶洞－裂缝具有空间配置关系复杂且充填类型、充填程度多样等特点，该油藏地层属于空间离散介质，油藏开发存在巨大困难（韩剑发等，2007；Popov *et al*.，2007；刘中春等，2009；李阳和范智慧，2011；李阳，2012，2013；潘建国等，2012；蔡建超等，2013；钱海涛等，2014；王敬等，2014；Cheng *et al*.，2015；霍志鹏等，2016）.前人研究表明由于大尺度溶洞的存在，三重连续介质渗流模型并不适用于研究塔河缝洞型油藏流动规律（康志江，2010；李鹂和李允，2010；姚军等，2010，2013；王敬等，2012）.国内外不少学者将岩块和裂缝系统视为渗流区域，将溶洞系统视为自由流动区域，建立流态耦合模型对缝洞型油藏渗流规律进行了研究（Arbogast and Gomez，2008；Peng *et al*.，2009；姚军等，2010）.熊伟等（2011）将溶洞视为扩大井筒，建立单井钻遇孤立溶洞模型，研究了基岩与孤立溶洞间的不稳定窜流规律.张福祥等（2009）和陈方方等（2015）建立了钻井打在大溶洞内的试井解释数学模型，给出了 Laplace 空间解，并对影响井底压力动态的主要因素进行了分析.刘洪等（2012）将溶洞视为等势体，利用溶洞质量守恒原理建立了含大尺度溶洞缝洞型油藏数学模型，使用直接边界元方法计算了溶洞压力响应，得到了不同参数对溶洞压力响应曲线的影响.

大尺度溶洞（洞穴）一般充填着疏松充填物质（如：砂、碎石和泥）（Popov *et al*.，2007；韩剑发等，2007；潘建国等，2012；胡向阳等，2014；钱海涛等，2014；金强等，2015），溶洞的充填程度是影响储层物性和流动规律的重要因素，而充填物中流体向溶洞未充填区域窜流规律对于缝洞型油藏大尺度溶洞中原油是否能够得到有效开发具有重大意义.而基质和未充填溶洞间流体交换也会对缝洞型油藏流体流动规律产生重大影响.目前，国内外学者对于不同缝洞介质间流体窜流规律还未进行深入研究（程倩等，2009；Gao *et al*.，2016）.为此，笔者根据缝洞型油藏大尺度溶洞充填特征，建立了缝洞型油藏井钻遇大尺度部分充填溶洞（洞穴）数学模型，采用 Laplace 变换和 Stehfest 数值反演，得到了大尺度溶洞窜流特征曲线，分析了各类参数对窜流量的敏感性.

1 模型的建立

1.1 物理模型

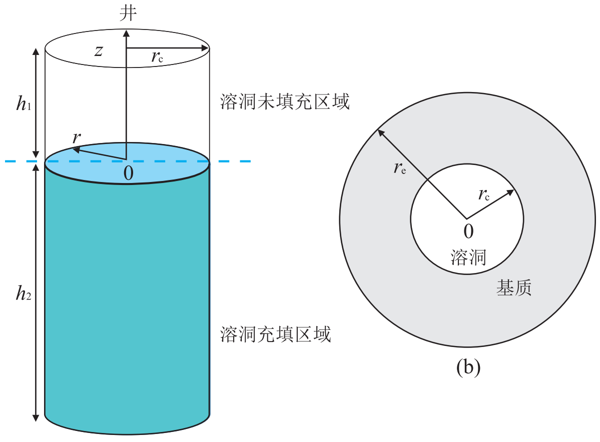
根据缝洞型油藏大尺度溶洞或洞穴（组构要素类型主要包括地下河、厅堂洞和竖井洞，特征尺度可达米级以上）充填特征（李阳和范智慧，2011；胡向阳等，2014；金强等，2015），部分充填溶洞可抽象为如图 1a 所示的物理模型，即溶洞由 2 个半径为 r_{c} 同心圆柱形区域组成.溶洞周围为具有一定渗流能力的基岩（基岩储渗能力主要由微裂缝贡献），如图 1b 所示.将溶洞充填区域及周围基岩等效为均匀介质，则部分充填溶洞流量主要由溶洞未充填区域周围基岩及等效均匀介质两部分贡献.油藏边界为有限大封闭边界，半径为 r_{e}，溶洞未充填区域周围基质渗透率为 k_{m}，孔隙度为 φ_{m}，综合压缩系数为 C_{tm}，等效均匀介质渗透率为 k_1，孔隙度为 φ_1，综合压缩系数为 C_{t1}，油藏有效厚度为 h，溶洞未填充部分厚度为 h_1，溶洞填充部分厚度为 h_2.

1.2 数学模型

根据物理模型，以溶洞充填区域－未充填区域交界面处为坐标原点，建立如图 1a 空间坐标系，考虑基岩发生平面径向流动，建立如下数学模型.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 p_{\mathrm{m}}}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial p_{\mathrm{m}}}{\partial r}=\dfrac{\varphi_{\mathrm{m}}\mu C_{\mathrm{tm}}}{k_{\mathrm{m}}}\dfrac{\partial p_{\mathrm{m}}}{\partial t}\Bigg| ; \\ \dfrac{\partial^2 p_1}{\partial z^2}=\dfrac{\varphi_1\mu C_{\mathrm{t1}}}{k_1}\dfrac{\partial p_1}{\partial t}\Bigg| ; \\ p_{\mathrm{m}}\big|_{t=0}=p_1\big|_{t=0}=p_{\mathrm{v}}\big|_{t=0}=p_{\mathrm{i}} ; \dfrac{\partial p_{\mathrm{m}}}{\partial r}\Bigg|_{r=r_{\mathrm{e}}}=0 ; \\ p_{\mathrm{m}}\big|_{r}=r_{\mathrm{c}}=p_{\mathrm{v}}\big|_{r=r_{\mathrm{c}}} ; p_1\big|_{z=0}=p_{\mathrm{v}}\big|_{z=0} ; \dfrac{\partial p_1}{\partial z}\Bigg|_{z=h_1}=0 ; \\ \dfrac{2\pi r h_1 k_{\mathrm{m}}}{\mu}\dfrac{\partial p_{\mathrm{m}}}{\partial r}\Bigg|_{r=r_{\mathrm{c}}}-\pi r_{\mathrm{c}}^2 h_1 C_{\mathrm{L}}\dfrac{\partial p_{\mathrm{v}}}{\partial t}\Bigg|_{r=r_{\mathrm{c}}}+ \\ \dfrac{\pi r_{\mathrm{c}}^2 k_1}{\mu}\left(\dfrac{\partial p_1}{\partial z}-\rho g\right)\Bigg|_{z=0}-\pi r_{\mathrm{c}}^2 h_1 C_{\mathrm{L}}\dfrac{\partial p_{\mathrm{v}}}{\partial t}\Bigg|_{z=0}=qB ; \end{cases} \tag{1}$$

其中，p 为地层压力，MPa；p_{i} 为原始地层压力，MPa；C_{tm} 为基质综合压缩系数，MPa^{-1}；r 为径向距离，m；r_{c} 为溶洞半径，m；k 为渗透率，$\mu\mathrm{m}^2$；h 为地层有效厚度，m；h_1 为溶洞未充填区域厚度，m；h_2 为溶洞充填区域厚度，m；r_{e} 为地层半径，m；C_{t1} 为等效均匀介质综合压缩系数，MPa^{-1}；C_{L} 为溶洞未充填区域流体压缩系数，MPa^{-1}；t 为生产时间，d；φ



(a)　　(b)

图 1　溶洞－基岩型缝洞油藏示意

Fig.1　The sketch of large size vug and matrix in fractured-vuggy reservoir

为孔隙度，%；μ 为流体黏度，mPa·s；q 为油井产量，m^3/d；B 为流体体积系数；ρ 为流体密度，kg/m^3；g 为重力加速度，N/kg；下标：m 为基岩；v 为溶洞未填充区域；1 为等效均匀介质.公式(1)为缝洞型油藏井钻遇大尺度部分充填溶洞定产量生产时控制方程及初始边界条件.其中公式(1)的最后一部分包括 4 项：左边第 1 项为基质－溶洞未填充区域窜流量；左边第 2 项为溶洞未填充区域对于基质系统弹性释放量；左边第 3 项为等效均匀介质－溶洞未填充区域窜流量；左边第 4 项为溶洞未填充区域对于等效均匀介质弹性释放量.

1.3　模型求解

引入如下无量纲量：

$$p_D=\frac{2\pi k_m h(p_i-p)}{q\mu B};t_D=\frac{k_m t}{\varphi_m \mu C_{tm} r_c^2};$$

$$r_D=\frac{r}{r_c};r_{eD}=\frac{r_e}{r_c};\eta=\frac{k_1}{k_m};\omega=\frac{k_m h^2\varphi_1 C_{t1}}{k_1 r_c^2\varphi_m C_{tm}};$$

$$C_D=\frac{C_L}{2\varphi_m C_{tm}};z_D=\frac{z}{h};h_{1D}=\frac{h_1}{h};h_{2D}=\frac{h_2}{h};$$

$$\delta=\frac{r_c^2 k_1}{2k_m h_1^2};g_D=\frac{\rho g\pi r_c^2 k_1}{qB\mu};$$

其中，p_D 为无因次压力；t_D 为无因次时间；r_D 为无因次半径；η 为等效均匀介质渗透率与基质渗透率比值；ω 反映等效均匀介质与基质系统能量比值大小；C_D 反映溶洞未充填部分与基质系统能量比值大小；z_D 为无因次厚度；δ 反映等效均匀介质与溶洞未充填区域流动比值大小；g_D 为无因次重力，反映了重力影响.

将式(1)进行无因次变换，可得：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2 p_{mD}}{\partial r_D^2}+\dfrac{1}{r_D}\dfrac{\partial p_{mD}}{\partial r_D}=\dfrac{\partial p_{mD}}{\partial t_D}\Bigg|\,; \\ \dfrac{\partial^2 p_{1D}}{\partial z_D^2}=\omega\dfrac{\partial p_{1D}}{\partial t_D}\Bigg|_{r_{cD}\le r_D\le r_{eD};-h_{2D}\le z_D\le 0}; \\ p_{mD}\big|_{t_D=0}=p_{1D}\big|_{t_D=0}=p_{vD}\big|_{t_D=0}=0;\dfrac{\partial p_{mD}}{\partial r_D}\Bigg|_{r_D=r_{eD}}=0; \\ \dfrac{\partial p_{1D}}{\partial z_D}\Bigg|_{z_D=h_{1D}}=0;p_{mD}\big|_{r_D=1}=p_{vD}\big|_{r_D=1}=p_{1D}\big|_{z_D=0}= \\ p_{vD}\big|_{z_D=0}; \\ \dfrac{\partial p_{mD}}{\partial r_D}\Bigg|_{r_D=1}-C_D\dfrac{\partial p_{vD}}{\partial t_D}\Bigg|_{r_D=1}+\delta\dfrac{\partial p_{1D}}{\partial z_D}\Bigg|_{z_D=0}-C_D\dfrac{\partial p_{vD}}{\partial t_D}\Bigg|_{z_D=0}= \\ \dfrac{-1-g_D}{h_{1D}}.\end{cases}\tag{2}$$

将方程组(2)进行 Laplace 变换，可得：

$$\begin{cases}\dfrac{d^2\bar{p}_{mD}}{dr_D^2}+\dfrac{1}{r_D}\dfrac{d\bar{p}_{mD}}{\partial r_D}=s\bar{p}_{mD}\Bigg|\,; \\ \dfrac{d^2\bar{p}_{1D}}{dz_D^2}=\omega s\bar{p}_{1D}\Bigg|\,; \\ \dfrac{d\bar{p}_{mD}}{dr_D}\Bigg|_{r_D=r_{eD}}=0;\dfrac{d\bar{p}_{1D}}{dz_D}\Bigg|_{z_D=h_{1D}}=0; \\ \bar{p}_{mD}\big|_{r_D=1}=\bar{p}_{vD}\big|_{r_D=1};\bar{p}_{1D}\big|_{z_D=0}=\bar{p}_{vD}\big|_{z_D=0}; \\ \dfrac{d\bar{p}_{mD}}{dr_D}\Bigg|_{r_D=1}-C_D s\bar{p}_{vD}\big|_{r_D=1}+\delta\dfrac{d\bar{p}_{1D}}{dz_D}\Bigg|_{z_D=0}- \\ C_D\,s\bar{p}_{vD}\big|_{z_D=0}=\dfrac{-1-g_D}{sh_{1D}}.\end{cases}\tag{3}$$

通过计算，可得到公式(3)在 Laplace 空间的解为：

$$\begin{cases}\bar{p}_{mD}=AI_0(r_D\sqrt{s})+BK_0(r_D\sqrt{s}); \\ \bar{p}_{1D}=Ce^{z_D\sqrt{\omega s}}+De^{-z_D\sqrt{\omega s}};\end{cases}\tag{4}$$

其中：

$$\begin{cases}B=\dfrac{-1-g_D}{sh_{1D}\left[\sqrt{s}M-C_D sN+E\cdot F\right]}; \\ A=B\left[K_1(r_{eD}\sqrt{s})/I_1(r_{eD}\sqrt{s})\right]; \\ C=B\cdot E;D=C\cdot\exp\left(2h_{1D}\sqrt{\omega s}\right); \\ M=\dfrac{K_1(r_{eD}\sqrt{s})}{I_1(r_{eD}\sqrt{s})}I_1(\sqrt{s})-K_1(\sqrt{s}); \\ N=\dfrac{K_1(r_{eD}\sqrt{s})}{I_1(r_{eD}\sqrt{s})}I_0(\sqrt{s})+K_0(\sqrt{s}); \\ E=\dfrac{N}{1+e^{2h_{1D}\sqrt{\omega s}}}; \\ F=\delta\sqrt{\omega s}\left[1-e^{2h_{1D}\sqrt{\omega s}}\right]-C_D s\left[1+e^{2h_{1D}\sqrt{\omega s}}\right].\end{cases}$$

根据公式(4)可知，溶洞未充填区域无因次井底

压力在 Laplace 空间解为：

$$\bar{p}_{\mathrm{wD}}=AI_0(\sqrt{s})+BK_0(\sqrt{s})\,. \tag{5}$$

基岩－溶洞未充填区域和充填物－溶洞未充填区域窜流量分别为：

$$\bar{q}_{\mathrm{cD1}}=-h_{\mathrm{1D}}\left.\frac{\partial\bar{p}_{\mathrm{mD}}}{\partial r_{\mathrm{D}}}\right|_{r_{\mathrm{D}}=1}=$$

$$-h_{\mathrm{1D}}\sqrt{s}\left[AI_1(\sqrt{s})-BK_1(\sqrt{s})\right]\,, \tag{6}$$

$$\bar{q}_{\mathrm{cD2}}=-\delta h_{\mathrm{1D}}^2\left.\frac{\mathrm{d}\bar{p}_{\mathrm{1D}}}{\mathrm{d}z_{\mathrm{D}}}\right|_{z_{\mathrm{D}}=0}-\frac{g_{\mathrm{D}}}{s}=$$

$$-\delta h_{\mathrm{1D}}^2\sqrt{\omega s}\,(C-D)-\frac{g_{\mathrm{D}}}{s}\,. \tag{7}$$

根据式(6)和式(7)，可以得到大尺度溶洞无因次流量为：

$$\bar{q}_{\mathrm{cD}}=\bar{q}_{\mathrm{cD1}}+\bar{q}_{\mathrm{cD2}}\,. \tag{8}$$

根据 Stehfest 数值反演方法可将 Laplace 空间解转换到实空间解，最终可得到基岩－溶洞未充填区域窜流量、充填物－溶洞未充填区域窜流量和大尺度溶洞无因次流量.

2 井钻遇大尺度部分充填溶洞流动特征

2.1 流动过程分析

图 2 选取参数为：$h_{\mathrm{2D}}=0.5$、$\omega=5$、$C_{\mathrm{D}}=20$、$r_{\mathrm{eD}}=60$、$\eta=15.8$、$\delta=100$、$g_{\mathrm{D}}=1\times10^{-4}$，通过计算可以得到井钻遇大尺度部分充填溶洞流动特征曲线，结果表明流动过程可以分为如下 4 个阶段：(1)窜流前期(基质中流体向溶洞未充填部分窜流量 q_{cD1} 较大，溶洞充填部分流体向溶洞未充填部分窜流量 q_{Cd2} 较小，窜流量 q_{cD1} 和 q_{cD2} 均随时间增加而线性增加，窜流特征曲线上出现第一个上升段)；(2)窜流中前期(随着流动不断进行，基质系统与溶洞未充填部分的压差逐步减小，基质－溶洞未充填部分流动达到拟稳态，此时基质系统中流体向溶洞未充填部分窜流速度为常数，q_{cD1} 仍然大于 q_{cD2}，窜流特征曲线上出现第一个平缓段)；(3)窜流中后期(基质系统中流体向溶洞未充填部分窜流速度进一步降低，溶洞充填部分流体向溶洞未充填部分窜流量 q_{cD2} 超过 q_{cD1}，窜流特征曲线上出现第二个上升段)；(4)窜流后期(整个系统流动达到拟稳态，窜流特征曲线上出现第二个平缓段).

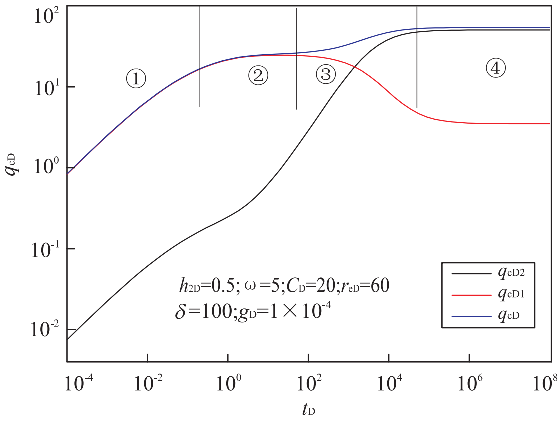


图 2 流动特征曲线

Fig.2 Typical crossflow characteristic curve for the model

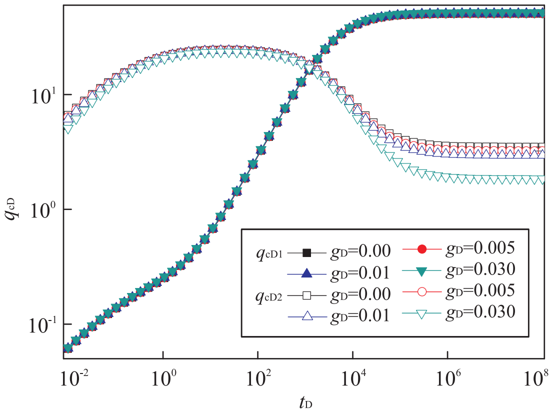


图 3 无因次重力对窜流特征曲线影响

Fig.3 Effect of dimensionless gravity on the crossflow characteristic curve

2.2 敏感性分析

2.2.1 重力对窜流特征曲线影响 大尺度溶洞(洞穴)中，重力是影响充填物中流体向溶洞未充填部分窜流的重要参数(李鹳和李允，2010；Cai *et al.*，2012).图 3 中选取参数分别为：$h_{\mathrm{2D}}=0.5$、$\omega=5$、$C_{\mathrm{D}}=20$、$r_{\mathrm{eD}}=60$、$\eta=15.8$、$\delta=100$，结果表明，基质－溶洞未充填部分窜流不受到重力影响，而溶洞充填物向溶洞未充填部分窜流量随着无因次重力 g_{D} 增大而减小，说明重力抑制了溶洞充填物中流体向溶洞未充填部分流动.主要原因是在重力影响下，溶洞充填物中流体向溶洞未充填部分窜流速度降低，造成窜流量减小.

2.2.2 无因次参数 C_{D} 对窜流特征曲线影响 无因次参数 C_{D} 反映了溶洞未充填部分与基质系统能量比值，而根据式(6)和式(7)可知，C_{D} 是影响充填物(或基质系统)中流体向溶洞未充填部分流动特征的重要因素(图 4).图 4 中选取参数分别为：$h_{\mathrm{2D}}=0.5$、$\omega=5$、$r_{\mathrm{eD}}=60$、$\delta=100$、$\eta=15.8$、$g_{\mathrm{D}}=1\times10^{-4}$，结果表明无因次参数 C_{D} 主要影响窜流初期，基岩－溶

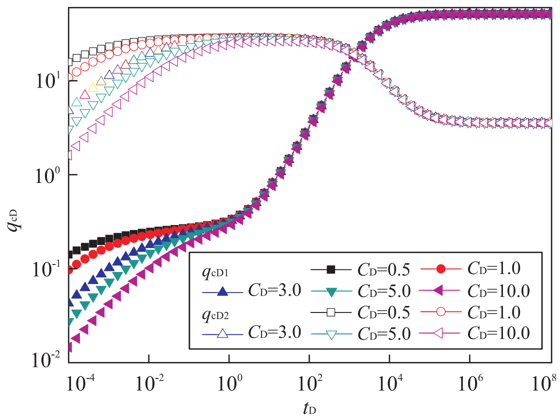


图 4　无因次变量 C_D 对窜流特征曲线影响

Fig.4　Effect of dimensionless variable C_D on the crossflow characteristic curve

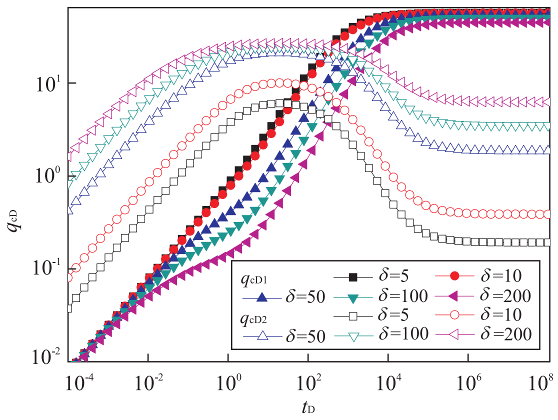


图 6　无因次变量 δ 对窜流特征曲线影响

Fig.6　Effect of dimensionless variable δ on the crossflow characteristic curve

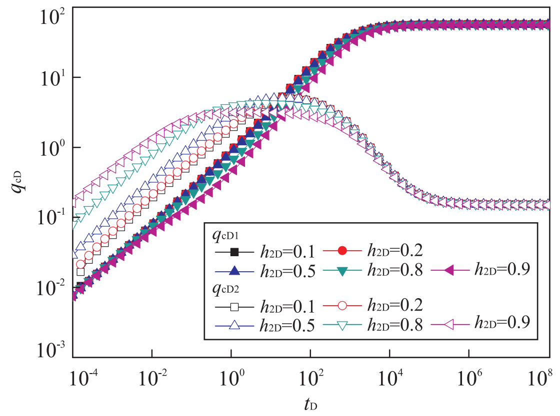


图 5　无因次变量 h_{2D} 对窜流特征曲线影响

Fig.5　Effect of dimensionless variable h_{2D} on the crossflow characteristic curve

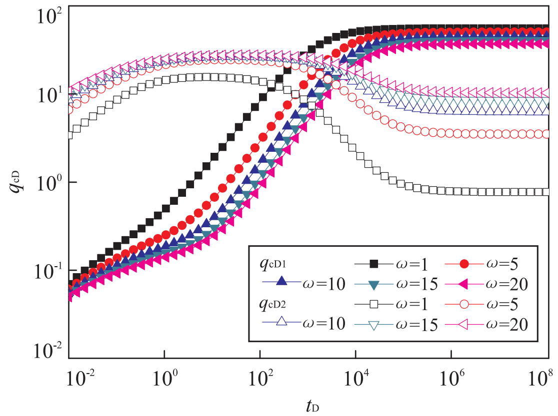


图 7　无因次变量 ω 对窜流特征曲线影响

Fig.7　Effect of dimensionless variable ω on the crossflow characteristic curve

洞未充填区域和充填物—溶洞未充填区域窜流量均随着无因次参数 C_D 增大而减小.主要原因是无因次参数 C_D 越大,溶洞未充填部分能量越大,溶基质系统和溶洞未充填部分能量差越小,基质系统中流体向溶洞未充填部分窜流量越小.

2.2.3　无因次参数 h_{2D} 对窜流特征曲线影响　无因次参数 h_{2D} 反映了溶洞充填程度大小,且溶洞充填程度对窜流特征曲线影响如图 5 所示,其中选取参数分别为:$\omega=5$、$C_D=20$、$r_{eD}=60$、$\delta=100$、$\eta=15.8$、$g_D=1\times10^{-4}$,结果表明无因次参数 h_{2D} 越大,充填物—溶洞未充填区域窜流量 q_{cD2} 越大,而基质中流体向溶洞未充填部分窜流量 q_{cD1} 越小.主要原因是无因次参数 h_{2D} 越大,无因次参数 h_{1D} 越小,溶洞充填程度越大,充填物能量越大,充填物中流体向溶洞未充填区域窜流量越大,基质中流体向溶洞未充填部分窜流量越小.

2.2.4　无因次参数 δ 和 ω 对窜流特征曲线影响

图 6 为无因次参数 δ 对窜流特征曲线影响,其中选取参数分别为:$h_{2D}=0.5$、$\omega=5$、$C_D=20$、$r_{eD}=60$、$\eta=15.8$、$g_D=1\times10^{-4}$,结果表明基岩—溶洞未充填区域窜流量 q_{cD1} 随着无因次参数 δ 增大而减小,而溶洞充填物—溶洞未充填区域窜流量 q_{cD2} 随着无因次参数 δ 增大而增大.主要原因是无因次参数 δ 越大,溶洞充填物—溶洞未充填区域流动能力越强,而基质—溶洞未充填区域流动能力越弱.

图 7 为无因次参数 ω 对窜流特征曲线影响,其中选取参数分别为:$h_{2D}=0.5$、$C_D=20$、$r_{eD}=60$、$\delta=100$、$\eta=15.8$、$g_D=1\times10^{-4}$,结果表明基岩—溶洞未充填区域窜流量 q_{cD1} 随着无因次参数 ω 增大而减小,而溶洞充填物—溶洞未充填区域窜流量 q_{cD2} 随着无因次参数 ω 增大而增大.主要原因是无因次参数 ω 越大,溶洞充填物能量越大,而基质系统

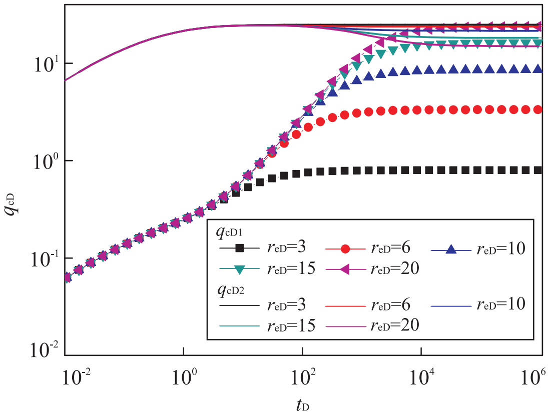


图 8　无因次变量 r_{eD} 对窜流特征曲线影响

Fig.8　Effect of dimensionless variable r_{eD} on the crossflow characteristic curve

能量越小.

2.2.5　无因次参数 r_{eD} 对窜流特征曲线影响　图 8 为无因次参数 r_{eD} 对窜流特征曲线影响，其中选取参数分别为：$h_{2D}=0.5$、$\omega=5$、$C_D=20$、$\delta=100$、$\eta=15.8$、$g_D=1\times10^{-4}$，结果表明无因次参数 r_{eD} 主要影响窜流中后期，且无因次参数 r_{eD} 越大，基岩－溶洞未充填区域窜流量 q_{eD1} 越大，溶洞充填物－溶洞未充填区域窜流量 q_{eD2} 越小．主要原因是无因次参数 r_{eD} 越大，基质系统能量越大，充填物能量越小．

3　结论

（1）基于缝洞型油藏大尺度溶洞充填特征，本研究建立了井钻遇大尺度部分充填溶洞数学模型，得到了基岩－溶洞未充填区域窜流量、充填物－溶洞未充填区域窜流量和溶洞无因次流量．

（2）溶洞窜流特征曲线可划分为 4 个流动阶段．其中前 2 个阶段主要为基质中流体向溶洞未充填部分窜流，而后 2 个阶段主要为溶洞充填物流体向溶洞未充填部分窜流．在流动前期，基质和未充填溶洞间流体交换对部分充填溶洞流量贡献较大；而流动后期，溶洞充填物和未充填溶洞间流体交换对部分充填洞流量贡献较大．

（3）整个窜流过程主要受到重力、溶洞未充填部分能量、溶洞充填程度和基质系统能量等因素影响．基质－溶洞未充填部分窜流不受到重力影响，重力抑制充填物中流体向溶洞未充填部分流动；溶洞充填物（或基质系统）和溶洞未充填部分能量差越小，溶洞充填物（或基质系统）中流体向溶洞未充填部分窜流量越小．

References

Arbogast, T., Gomez, M. S. M., 2008. A Discretization and Multigrid Solver for a Darcy-Stokes System of Three Dimensional Vuggy Porous Media. *Computational Geosciences*, 13(3): 331－348. doi: 10.1007/s10596－008－9121－y

Cai, J.C., Guo, S.L., You, L.J., et al., 2013. Fractal Analysis of Spontaneous Imbibition Mechanism in Fractured-Porous Dual Media Reservoir. *Acta Physica Sinica*, 62(1): 220－224 (in Chinese with English abstract).

Cai, J.C., Hu, X.Y., Standnes, D.C., et al., 2012. An Analytical Model for Spontaneous Imbibition in Fractal Porous Media Including Gravity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 414: 228－233. doi: 10.1016/j.colsurfa.2012.08.047

Chen, F.F., Zhang, F.X., Deng, X.L., et al., 2015. A Numerical Well Test Model for Wells Drilled out of Big-Size Cavity of Fractured Carbonate Reservoirs. *Science & Technology Review*, 33(9): 46－49 (in Chinese with English abstract).

Cheng, C.L., Perfect, E., Donnelly, B., et al., 2015. Rapid Imbibition of Water in Fractures within Unsaturated Sedimentary Rock. *Advances in Water Resources*, 77: 82－89. doi: 10.1016/j.advwatres.2015.01.010

Cheng, Q., Xiong, W., Gao, S. S., et al., 2009. Channeling Model of Non-Steady Flow from Matrix to Insular Cavity. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 16(3): 53－54 (in Chinese with English abstract).

Gao, B., Huang, Z.Q., Yao, J., et al., 2016. Pressure Transient Analysis of a Well Penetrating a Filled Cavity in Naturally Fractured Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 392－403. doi: org/10.1016/j.petrol.2016.05.037

Han, J.F., Mei, L.F., Pan, W.Q., et al., 2007. Complex Carbonate Hydrocarbon Reservoir Modeling and Reserve Calculating: Taking the Buried Carbonate Hill Oil-Gas Pool Reserve Calculation as an Example. *Earth Science*, 32(2): 267－272 (in Chinese with English abstract).

Hu, X.Y., Quan, L.S., Qi, D.S., 2014. Features of Cavern Filling in Fractured/Vuggy Carbonate Oil Reservoirs, Tahe Oilfield. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 21(1): 18－21 (in Chinese with English abstract).

Huo, Z.P., Jiang, T., Pang, X.Q., et al., 2016. Evaluation of Deep Carbonate Source Rocks with Low TOC and Contribution to Oil-Gas Accumulation in Tazhong Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 41(12): 2061－2074 (in Chinese with English abstract).

Jin, Q., Tian, F., Lu, X.B., et al., 2015. Characteristics of Collapse Breccias Filling in Caves of Runoff Zone in the Ordovician Karst in Tahe Oilfield, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(5): 729－735, 755 (in Chinese with English abstract).

Kang, Z.J., 2010. New Method of Coupling Numerical Simulation and Application to Fracture-Cavern Carbonate Reservoir. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(5): 514－516 (in Chinese with English abstract).

Li, S., Li, Y., 2010. An Experimental Research on Water Injection to Replace the Oil in Isolated Caves in Fracture-Cavity Carbonate Rock Oilfield. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 32(1): 117－120 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., 2012. Ordovician Carbonate Fracture-Cavity Reservoirs Identification and Quantitative Characterization in Tahe Oilfield. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(1): 1－8 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., 2013. The Theory and Method for Development of Carbonate Fractured-Cavity Reservoirs in Tahe Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 34(1): 115－121 (in Chinese with English abstract).

Li, Y., Fan, Z.H., 2011. Developmental Pattern and Distribution Rule of the Fracture-Cavity System of Ordovician Carbonate Reservoirs in the Tahe Oilfield. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 101－106 (in Chinese with English abstract).

Liu, H., Wang, X.H., Yang, F., et al., 2012. Pressure Response Characteristics of Large Size Cave. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 19(1): 99－102 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z.C., Li, J.L., Lü, C.Y., et al., 2009. Experimental Study on Effect of Reservoir Space Types on Water Cut of Wells in Karstic-Fractured Carbonate Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 30(2): 271－274 (in Chinese with English abstract).

Pan, J.G., Wei, P.S., Cai, Z.X., et al., 2012. Reservoir Architectural System in the Middle-Lower Ordovician Carbonate Rock of Tazhong Areas in Tarim. *Earth Science*, 37(4): 751－762 (in Chinese with English abstract).

Peng, X.L., Du, Z.M., Liang, B.S., et al., 2009. Darcy-Stokes Streamline Simulation for the Tahe-Fractured Reservoir with Cavities. *SPE Journal*, 14(3): 543－552. doi: 10.2118/107314－pa

Popov, P., Qin, G., Bi, L., et al., 2007. Multiphysics and Multiscale Methods for Modeling Fluid Flow through Naturally Fractured Carbonate Karst Reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 12(2): 218－231. doi: 10.2118/105378－PA

Qian, H.T., Sun, Q., Wang, S.J., 2014. Effects of Geo-Stress on Carbonate Dissolution and Karst Evolution. *Earth Science*, 39(7): 896－904 (in Chinese with English abstract).

Wang, J., Liu, H.Q., Ning, Z.F., et al., 2014. Experiments on Water Flooding in Fractured-Vuggy Cells in Fractured-Vuggy Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 67－73 (in Chinese with English abstract).

Wang, J., Liu, H.Q., Xu, J., et al., 2012. Formation Mechanism and Distribution Law of Remaining Oil in Fracture-Cavity Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 39(5): 585－590 (in Chinese with English abstract).

Xiong, W., Chang, B.H., Pan, M., et al., 2011. Impact of Water Injection on Water Content in Single Well Fractured-Vuggy System. *Fault-Block Oil & Gas Filed*, 18(4): 479－481 (in Chinese with English abstract).

Yao, J., Huang, Z.Q., Wang, Z.S., et al., 2010. Mathematical Model of Fluid Flow in Fractured Vuggy Reservoirs Based on Discrete Fracture-Vug Network. *Acta Petrolei Sinica*, 31(5): 815－819 (in Chinese with English abstract).

Yao, J., Wang, X., Wang, C.C., et al., 2013. The Influence of Carbonate Rocks Reservoir Parameters on Microscopic Flow. *Earth Science*, 38(5): 1047－1052 (in Chinese with English abstract).

Zhang, F.X., Chen, F.F., Peng, J.X., et al., 2009. A Well Test Model for Wells Drilled in Big-Size Cavity of Naturally Fractured Vuggy Carbonate Reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 912－915 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡建超，郭士礼，游利军，等，2013.裂缝－孔隙型双重介质油藏渗吸机理的分形分析.物理学报，62(1)：220－224.

陈方方，张福祥，邓兴梁，等，2015.井打在溶洞外的缝洞型油藏数值试井模型.科技导报，33(9)：46－49.

程倩，熊伟，高树生，等，2009.基岩－孤立溶洞不稳定窜流方程.特种油气藏，16(3)：53－54.

韩剑发，梅廉夫，潘文庆，等，2007.复杂碳酸盐岩油气藏建模及储量计算方法：以潜山油气储量计算为例.地球科学，32(2)：267－272.

胡向阳，权莲顺，齐得山，等，2014.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏溶洞充填特征.特种油气藏，21(1)：18－21.

霍志鹏，姜涛，庞雄奇，等，2016.塔中地区深层低丰度碳酸盐岩有效烃源岩评价及其对油气藏贡献.地球科学，41(12)：2061－2074.

金强，田飞，鲁新便，等，2015.塔河油田奥陶系古径流岩溶带垮塌充填特征.石油与天然气地质，36(5)：729－735，755.

康志江，2010.缝洞型碳酸盐岩油藏耦合数值模拟新方法.新疆石油地质，31(5)：514－516.

李鹳,李允,2010.缝洞型碳酸盐岩孤立溶洞注水替油实验研究.西南石油大学学报(自然科学版),32(1):117-120.

李阳,2012.塔河奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征.中国石油大学学报(自然科学版),36(1):1-8.

李阳,2013.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法.石油学报,34(1):115-121.

李阳,范智慧,2011.塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律.石油学报,32(1):101-106.

刘洪,王新海,杨锋,等,2012.大尺度溶洞压力响应特征.断块油气田,19(1):99-102.

刘中春,李江龙,吕成远,等,2009.缝洞型油藏储集空间类型对油井含水率影响的实验研究.石油学报,30(2):271-274.

潘建国,卫平生,蔡忠贤,等,2012.塔中地区中-下奥陶统碳酸盐岩孔洞-裂缝储集系统划分及其特征.地球科学,37(4):751-762.

钱海涛,孙强,王思敬,2014.地应力对碳酸盐岩溶解和岩溶发育的影响.地球科学,39(7):896-904.

王敬,刘慧卿,宁正福,等,2014.缝洞型油藏溶洞-裂缝组合体内水驱油模型及实验.石油勘探与开发,41(1):67-73.

王敬,刘慧卿,徐杰,等,2012.缝洞型油藏剩余油形成机制及分布规律.石油勘探与开发,39(5):585-590.

熊伟,常宝华,潘懋,等,2011.单井缝洞系统注水对含水率的影响分析.断块油气田,18(4):479-481.

姚军,黄朝琴,王子胜,等,2010.缝洞型油藏的离散缝洞网络流动数学模型.石油学报,31(5):815-819.

姚军,王鑫,王晨晨,等,2013.碳酸盐岩储层参数对微观渗流的影响.地球科学,38(5):1047-1052.

张福祥,陈方方,彭建新,等,2009.井打在大尺度溶洞内的缝洞型油藏试井模型.石油学报,30(6):912-915.