



程家望, 苏正, 吴能友, 等. 2016. 天然气水合物降压开采储层内压力变化规律分析. 地球物理学进展, 31(5): 2072-2077, doi: 10.6038/pg20160525.

CHENG Jia-wang, SU Zheng, WU Neng-you, et al. 2016. Analysis for pressure variation of hydrate reservoir during gas production by depressurization. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 31(5): 2072-2077, doi: 10.6038/pg20160525.

天然气水合物降压开采储层内压力变化规律分析 Analysis for pressure variation of hydrate reservoir during gas production by depressurization

程家望^{1,2}, 苏正^{1*}, 吴能友^{3,4}, 黄丽^{1,2}, 吴雪婷^{1,2}

CHENG Jia-wang^{1,2}, SU Zheng^{1*}, WU Neng-you^{3,4}, HUANG Li^{1,2}, WU Xue-ting^{1,2}

1. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 国土资源部天然气水合物重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

4. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

摘要 以往的天然气水合物开采数值模拟研究大多集中于产能结果分析, 鲜见关于降压开采过程中储层内部压力变化规律的研究. 本文基于质量守恒、能量守恒和达西定律, 建立了水合物降压开采气、水和水合物三相一维模型, 并首次在模拟计算中引入压降半径公式, 利用有限差分法, 采用 IMPES(隐式压力-显式饱和度)方法求解模型. 文中对比研究了井口压力、温度、渗透率和水合物分解对储层内压力变化的影响, 结果表明: 降压开采水合物导致井口附近形成低温区, 可能引起水结冰和水合物再生的现象; 储层绝对渗透率越大, 压降在储层内的传播越快, 总产气量也越大; 水合物分解引起得水气两相相对渗透率变化和分解产生的水气是影响储层内压降传播速度的主要因素.

关键词 天然气水合物; 降压开采; 数值模拟; 压降半径; 压力变化

中图分类号 TK01, TE1, P736

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg20160525

Abstract Extensive numerical simulation study of natural gas hydrate is mainly limited to gas productivity, which seldom analyzes the pressure variation of hydrate reservoir during gas production. A three-phase, one-dimensional numerical model is developed to simulate gas production from hydrate reservoir with consideration of radius of pressure reduction for the first time. The model includes dissociation thermodynamics, kinetics, multiphase flow and conductive and convective heat transfer. A finite-difference scheme is used, which is implicit in pressure and temperature, and explicit in saturation (IMPES). Well pressures, temperature, permeability and hydrate dissociation were investigated to evaluate the influence on pressure variation distribution. The results suggest that gas production by depressurization may cause considerable decrease of temperature, which favors the formation of ice and reformation of hydrate. Increased permeability comes with efficient pressure reduction and better cumulative gas production. The variation of relative permeability of gas and water and hydrate dissociation effect have significant impact on the efficiency of pressure reduction in hydrate reservoir.

Keywords natural gas hydrate; depressurization; numerical simulation; radius of pressure reduction; pressure variation

收稿日期 2016-02-11; 修回日期 2016-06-11.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家专项课题(GHZ2012006003)、国家基金面上项目(41276057)和中国科学院广州能源研究所所长培育专项(Y407P51001)联合资助.

作者简介 程家望, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事天然气水合物开采储层稳定性的研究. (E-mail: chengjw@ms.giec.ac.cn)

* 通讯作者 苏正, 男, 1980 年出生, 研究员, 主要从事天然气水合物成藏机制和开采潜力评价、海洋地质和地质流体动力学、深层地热资源和增强型地热系统(EGS)研究. (E-mail: suzheng@ms.giec.ac.cn)

0 引言

天然气水合物广泛分布于永冻土区和海洋沉积层中,具有分布广、储量以及能量密度高等特点,其作为一种未来的替代能源而备受关注,成为了当今能源科学研究的热点。然而,水合物是否会在未来能源结构中有所贡献,关键在于能否被安全有效地开采 (Moridis *et al.*, 2004; 苏正等, 2012)。

天然气水合物的开采方法主要分为三类:降压法、注热法和注化学剂法。其中降压被视为最经济可行的方法 (Nazridoust and Ahmadi, 2007)。降压法主要通过开采并抽取水合物储层内的流体,达到降低储层内部压力的目的。当储层内压力低于水合物相平衡压力时,水合物就会失稳分解。具有开采潜力的水合物储层沉积物通常胶结差、抗剪强度弱,储层内压力的降低和水合物的分解会导致沉积层的沉降变形,甚至剪切破坏 (Moridis *et al.*, 2011)。因此,分析水合物降压开采过程中储层内部压力的变化规律,是研究水合物降压开采的重要课题。

实验模拟多孔介质中水合物的分解开采,物质和热量传递不易控制,尤其是水合物分解区域很难测定 (Sun and Mohanty, 2006)。因此,借助数值模拟研究水合物分解开采是非常重要的方法。国内外学者对水合物降压开采进行了大量的数值模拟研究。Makogon (1997) 和 Ji 等 (2001) 运用经典的 Stefan 方程描述水合物的分解, Ji 等 (2001) 在 Stefan 方程基础上,建立了水合物降压开采一维模型,并给出了解析解。Yousif 等 (1991) 通过考虑气、水和水合物三相质量和动量变化的等温过程,引入 Kim-Bishnoi 水合物分解动力学模型,提出了水合物降压分解的一维、三相数值模型。Moridis 等在流体渗流模拟器 TOUCH2 的基础上添加了 EOSH2YR2 程序,建立了三维多相多组分模型。该模型能够较全面的模拟水合物分解机理和复杂的水合物藏,同时考虑了非等温过程和盐份的变化 (Moridis and Collett, 2004; Moridis *et al.*, 2004)。Sun 和 Mohanty (2006) 基于平衡相变假设,提出了两组分 (甲烷和水) 四相 (水合物、气、水和冰) 非等温降压模型,质量传递考虑了两相流和分子扩散,热量传递过程包括热对流和热传导。Hong 等提出了二维圆柱坐标下的水合物开采模型,包括气水两相流动方程、能量守恒方程以及 Kim-Bishnoi 水合物分解动力学模型 (Hong, 2003; Hong and Pooladi-Darvish, 2005)。

以往的研究大多关注水合物开采的产能结果:如压力/温度的最终分布状态、水合物分解产气量/速率等,而对水合物储层降压内在机制的研究并不多见。为了研究天然气水合物降压开采过程中储层内部压力的变化规律,本文建立了水合物降压开采一维模型,通过控制变量研究影响储层压力变化的因素,探究水合物储层降压的内在机制。

1 数学模型

以油藏数值模拟中的黑油模型为基础建立起来的水合物降压开采模型在水合物开采数值模拟中被广泛的运用 (Sun *et al.*, 2005; 梁海峰, 2009; 阮徐可, 2012; 张新军, 2008), 许多学者将数值模拟结果与实验模拟结果进行对比

验证,证实了油藏模拟技术应用到水合物开采数值模拟中的可行性。在对比总结已有模型的基础上,本文建立了水合物降压开采的一维模型 (见图 1),以质量守恒、能量守恒和达西定律为基础,考虑了甲烷和水两组份以及气、水和水合物三相,并首次在模拟计算中引入压降半径公式。水合物分解开采涉及的物理过程复杂,主要是一个复杂的多相非等温渗流过程。当储层内的水合物温压平衡失稳后,分解产生水和气。流体在压力梯度的作用下流向降压端。模型做出以下假设:储层内多孔介质均质、各向同性;气相为甲烷,忽略甲烷在水中的溶解;不考虑甲烷气再生成水合物和水低温产冰的现象;流体流动过程中,不考虑分子扩散和水动力学扩散;流体相的流动都服从达西定律。

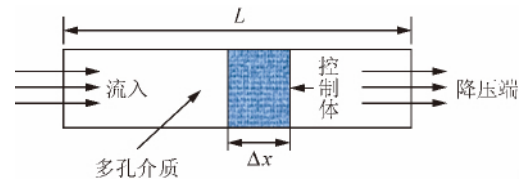


图 1 水合物储层降压开采一维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional model of hydrate reservoir for gas production by depressurization

1.1 质量守恒方程

以黑油模型为基础,气、水两相控制方程为

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho_l v_l) + \dot{q}_{ml} + \dot{m}_l = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_l S_l) \quad (l = g, w), \quad (1)$$

水合物相控制方程为

$$-\dot{m}_h = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_h S_h), \quad (2)$$

气、水两相流速 v_l 可由达西定律得到,即:

$$v_l = -\frac{kk_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial P_l}{\partial x}. \quad (3)$$

1.2 能量守恒方程

在天然气水合物降压开采过程中,热传导、热对流、水合物反应热以及外源热传递等是需要考虑的能量形式。利用能量守恒方程,以焓的形式可得到:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g v_g h_g + \rho_w v_w h_w) + \dot{Q}_h + \dot{Q}_m \\ & = \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \phi) \rho_r h_r + \phi S_h \rho_h h_h + \phi S_g \rho_g h_g + \phi S_w \rho_w h_w] + \\ & \quad \dot{m}_h \Delta h_D, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $k_c = k_r (1 - \phi) + \phi (k_h S_h + k_g S_g + k_w S_w)$,

$$\dot{m}_h \Delta h_D = \dot{m}_w h_w + \dot{m}_g h_g - \dot{m}_h h_h,$$

$$\text{水合物分解焓变: } \Delta h_D = 446.12 \times 10^3 - 132.638T.$$

1.3 水合物分解动力学模型

水合物分解的过程采用 Kim-Bishnoi 模型 (Kim *et al.*, 1987) 描述,采用此方程可以计算水合物分解量以及产气量,并根据水合物数得出产水量。模型计算公式为

$$\dot{m}_g = k_d M_g A_{dec} (f_c - f_g), \quad (5)$$

式中 \dot{m}_g 为水合物分解产气率, k_d 为水合物分解速率常数, A_{dec} 为水合物分解比表面积, f_c 、 f 分别为反应平衡逸度和局

部气体逸度 模拟计算中常用平衡压力和局部压力代替.

1.4 辅助方程

饱和度方程为

$$S_g + S_w + S_h = 1 \quad (6)$$

毛细管压力方程为

$$P_c(S_w) = P_w - P_g \quad (7)$$

水合物相平衡压力为

$$P_e = 1.15 \times \exp\left(49.3185 - \frac{9459}{T}\right) \quad (8)$$

相对渗透率和毛细压力模型为

$$k_{rw} = k_{rwo} \bar{S}_w^{1/2} [1 - (1 - \bar{S}_w^{1/m})^m]^2 \quad (9)$$

$$k_{rg} = k_{rgo} \bar{S}_g^{1/2} (1 - \bar{S}_w^{1/m})^{2m} \quad (10)$$

$$P_c = P_{co} (\bar{S}_w^{(-1/m)} - 1)^{1-m} \quad (11)$$

式中:

$$\bar{S}_w = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}} \quad (12a)$$

$$\bar{S}_H = \frac{S_w + S_H - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}} \quad (12b)$$

$$\bar{S}_g = \frac{1 - S_w - S_H - S_{gr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}} \quad (12c)$$

$P_{co} = 1 \text{ kPa}$, $m = 0.45$, $S_{wr} = 0.3$, $S_{gr} = 0.05$, $k_{rwo} = 0.5$, $k_{rgo} = 1.0$.

初始条件:

$$S_g = S_{g0}, S_h = S_{h0}, S_w = S_{w0}, t = 0$$

$$P_w = P_{w0}, P_g = P_{g0}, t = 0$$

$$T = T_0, t = 0$$

边界条件:

$$P_w = P_{out}, P_g = P_{out}, x = 0$$

$$\frac{\partial P_w}{\partial x} = 0, \frac{\partial P_g}{\partial x} = 0, x = L$$

$$T = T_{out}, x = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = L$$

其中下标 g, w, h, r 分别为气相、水相、水合物相和岩石骨架, ρ_i 为各相密度, S_i 为各相饱和度, P_i 为各相压力, ϕ 为孔隙度, k 为绝对渗透率, μ_i 为各相的黏度系数, k_{ri} 为各相相对渗透率, h_i 为各相的焓, \dot{q}_{mi} 为井注入项, \dot{m}_i 为水合物分解产项, P, T 分别表示压力和温度.

1.5 压降半径

在地下水开采和油藏开采研究中分别有影响半径和泄油半径的概念,其意义在于研究开采单井的影响范围,合理设计井网井距,避免井间干扰影响生产效果.在水合物藏开采数值模拟研究中,引入了类似的概念:压降半径(Shahbazi, 2012) (radius of pressure reduction),用以确定降压影响的有效范围.压降半径计算公式为

$$R_i = \sigma \sqrt{\eta t} \quad (13)$$

σ 为常数,取为 0.45, η 为水力扩散系数,公式为

$$\eta = \frac{k(k_{rg}/\mu_g + k_{rw}/\mu_w)}{\phi c_t} \quad (14)$$

式中: c_t 为总压缩率,

压降半径在水合物开采数值模拟技术中有重要作用,在数值模拟中划分网格,一般在边界处要设置边界条件,如第一类或第二类边界条件等.设置边界便规定了模拟区域的大小范围,然而实际降压开采过程中,随着开采的进行,降压影响的范围不断扩大.所以有必要先利用压降半径公式估算降压影响的范围,然后再设置空间步长和边界进行模拟计算.

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	取值	参数	取值
绝对渗透率 k (m^2)	1.0×10^{-13}	岩相比热 C_{pr} ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	840
储层初始温度 T_0 (K)	283	水相比热 C_{pw} ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	4211
井口温度 T_{out} (K)	285	气相比热 C_{pg} ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	2206
储层初始压力 P_0 (Pa)	9.2×10^6	水合物相比热 C_{ph} ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1800
井口压力 P_{out} (Pa)	3.7×10^6	水相导热系数 k_w ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.56
孔隙度 ϕ	0.4	气相导热系数 k_g ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.07
水合物初始饱和度 S_{h0}	0.3	岩相导热系数 k_r ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	3
气相初始饱和度 S_{g0}	0.1	水合物相导热系数 k_h ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.49
水相初始饱和度 S_{w0}	0.6	水相黏度 μ_w (Pa · s)	1.0×10^{-3}
水相密度 ρ_w ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000	气相黏度 μ_g (Pa · s)	1.0×10^{-5}
岩相密度 ρ_r ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2500	岩相压缩率 C_r (Pa^{-1})	5.0×10^{-7}
水合物相密度 ρ_h ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	919.7	通用气体常数 R ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	8.314

2 模型计算结果与讨论

在模型求解前,首先利用压降半径公式计算降压可能影

响的范围,依据压降半径划分网格和设置空间步长.模型求解借鉴油藏数值模拟中黑油模型的理论方法(Aziz and Settari, 1979; 韩大匡, 1993) 利用有限差分法,采用 IMPES

(隐式压力-显式饱和度)方法求解各流体相压力和饱和度,然后隐式求解温度场(图2)。模型模拟的储层初始压力略高

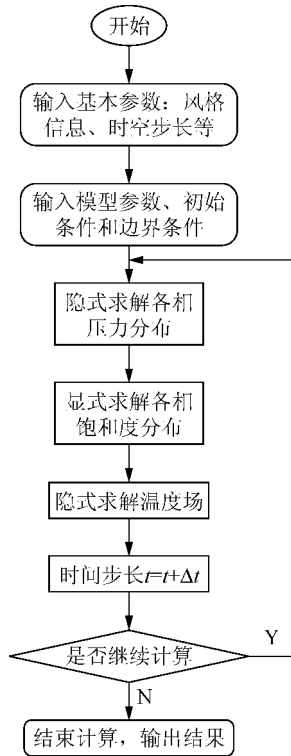


图2 模型求解流程图

Fig. 2 Algorithm procedure of model

于水合物的相平衡压力,同时假设储层内存在部分游离气。

2.1 井口压力和温度的影响

降低储层压力是通过抽取流体降低井口压力实现的,较低的井口压力不可能瞬间达到,需要经过抽取流体的过程。为了研究井口压力和温度对水合物降压开采影响,模拟计算以 184 kpa/day 的降压速率降压 30 天,之后保持井口压力不变 10 天,井壁温度设置为 285 K,得到图 3 中储层内压力和温度的分布变化。匀速降压的目的是观察井口压力降低对压

降传播效率的影响。在井口压力较低时保持不变,观察压降向储层内部进一步传播。在持续降低井口压力的 30 天中,储层内压力不断降低,压降向远处传播,在保持井口压力不变的 10 天中,压降进一步向储层内部传播。显然,较低的井口压力有助于储层整体压力的降低。由于水合物分解吸热以及流体持续向井口流动,储层内温度不断降低。尽管井壁温度略高于储层温度,但井壁附近的温度依然下降最快,形成明显的低温区。这是因为井壁附近压降梯度大,流体流速快,带走了大量的热量,导致热量无法有效地向储层内传递。由此可见,降压过程中,在开采井壁处加热,热量向储层内传导的效果并不理想。在 40 天时井附近温度降低到 272 K,这种低温条件会引起水结冰和水合物再生,冰体和水合物可能堵塞孔隙,进而影响压降向储层内的传播。另外,水合物分解是吸热反应,也会吸收周围岩层的热量。因此,降压开采水合物需要与加热相结合,而井壁加热传导的效率显然是无法满足的,需要更有效的加热手段。

2.2 渗透率和水合物分解效应的影响

为了简化问题,研究渗透率和水合物分解对压降的影响,这里不再考虑热量传递。

储层的绝对渗透率表征了储层介质允许流体在其中通过的能力,是储层自身的固有属性,不因通过其中流体的性质而改变(韩大匡,1993),是控制储层内流体流动的重要因素。在其他参数保持不变的情况下,这里通过改变储层的绝对渗透率,研究绝对渗透率对储层降压的影响。图 4a 为绝对渗透率分别为 $k = 10^{-13} \text{ m}^2$ 、 $k = 5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 和 $k = 10^{-12} \text{ m}^2$ 的储层降压 10 天后的压力分布,可以看出渗透率增大会显著地增大压降的传播效率,进而相应的提高水合物储层开采产气量(图 4b)。这在水合物勘探开发中有两方面的意义:一是水合物开采应优先选择绝对渗透率较大的水合物藏;二是水合物开采过程中可以考虑类似水力压裂的方式增大储层的绝对渗透率。有效渗透率是当多相流体共存时,储层介质允许其中某一相流体通过的能力,与岩石固有属性、孔隙度以及流体相的饱和度有关(韩大匡,1993),也是控制储层内流体流动的重要因素。图 5a、b 为两个水文地质参数(渗透率和孔隙度)相同的含水层压力分布变化,图 5a 为不含水合物的含水层,图 4b 为含水合物的含水层。尽管储层初始压力和井

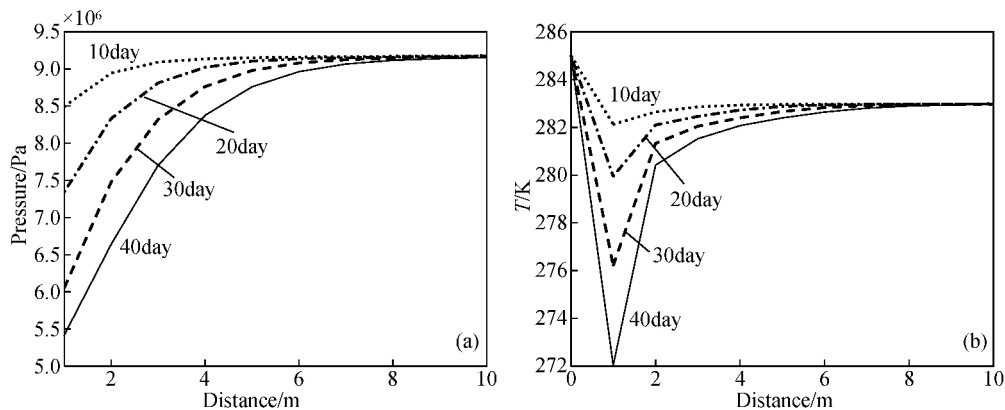


图3 井口均匀降压情况下储层压力和温度分布变化

Fig. 3 Pressure and temperature profiles with constant depressurizing rate for various time

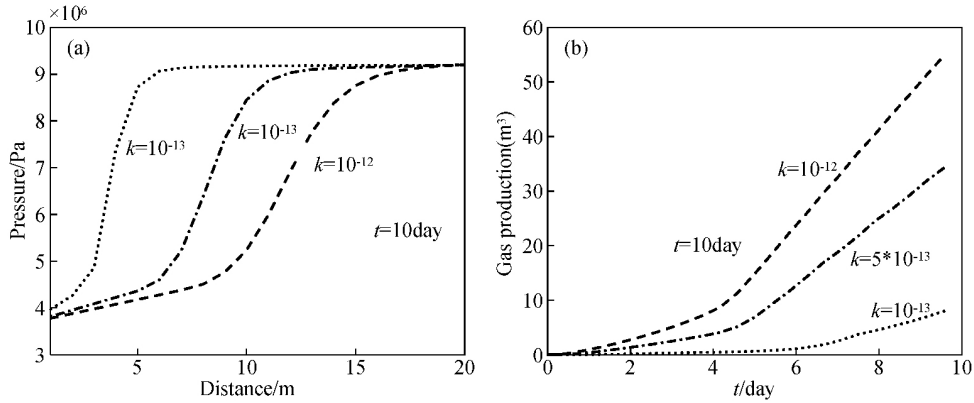


图4 不同渗透率条件下的压力分布和产气量变化
Fig. 4 Pressure profiles and gas production for different permeability

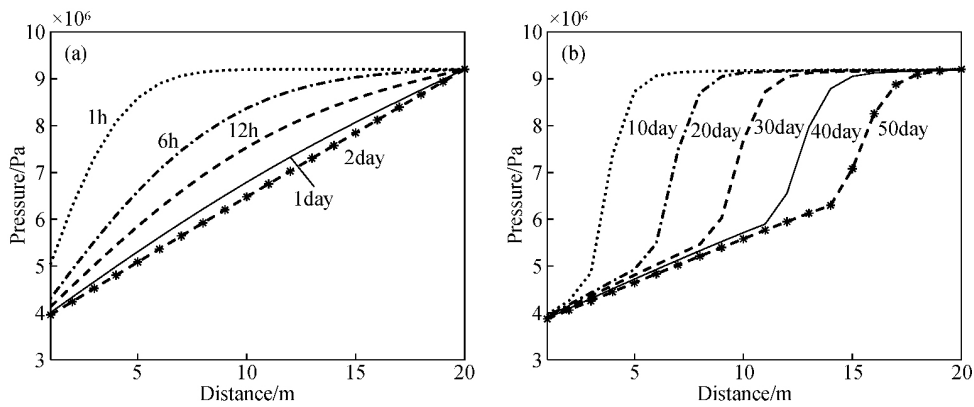


图5 压力分布变化: (a) 不含水合物储层 (b) 含水合物储层
Fig. 5 Pressure profiles comparison between reservoir without gas hydrate (a) and reservoir with gas hydrate (b)

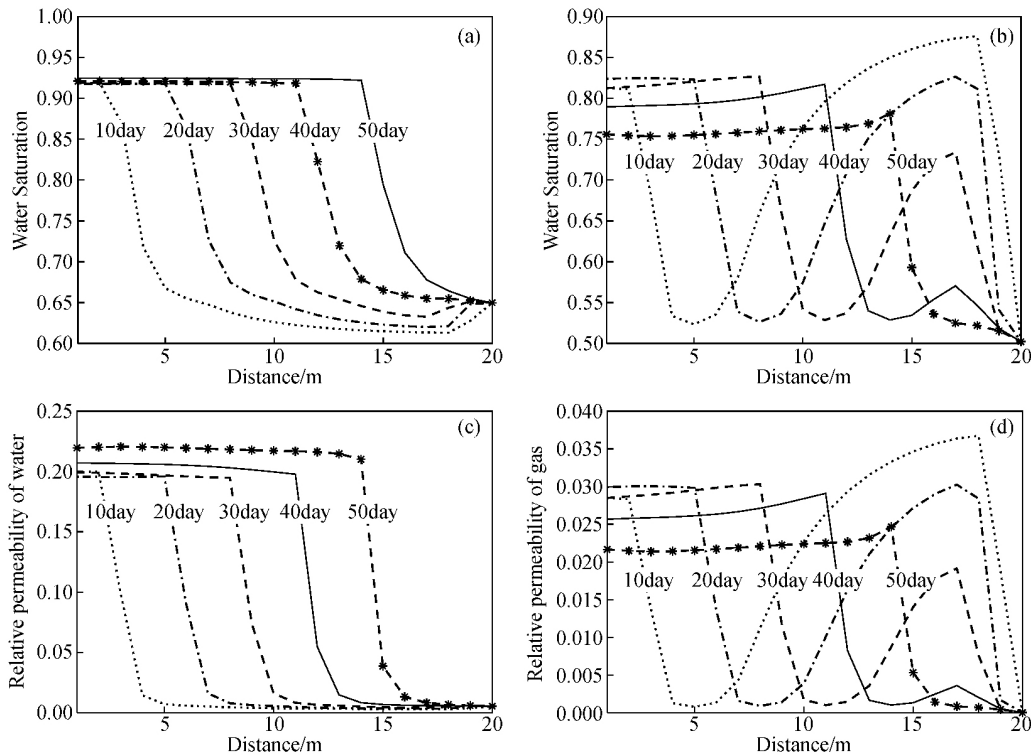


图6 水气两相饱和度和相对渗透率分布变化
Fig. 6 Saturation and relative permeability profiles for water and gas

口压力相同,但压降传播的速度和压力分布状态存在着极大的差别。压降传播速度方面,在图5a中压力传播到边界在数个小时内即可完成,而图5b中压力传播到相同距离的边界要长达数十天;压力分布状态方面,图5a中压力分布曲线平滑,而图5b中压力分布曲线变化较陡。

造成这种压降传播速度和压力分布曲线差异的原因有两个:一是水合物分解和流体流动引起水气两相相对渗透率的变化;二是水合物分解产水气对储层局部压力的影响。

水气两相相对渗透率与各相的饱和度相关。由6a、b、c和d四个图可以看出水气两相相对渗透率与两相饱和度具有相同的时空变化分布。在降压过程中,储层内未分解的水合物占据孔隙,水气两相饱和度较低,因而相对渗透率也较低,压降传播慢,当井口压力较低时形成较大的压降梯度。随着水合物发生分解,水气两相的饱和度增大,相对渗透率增大,压降进一步向储层内部传播。因此,图4b中各时刻压力分布曲线斜率最大区域反映了水合物分解区的前锋处,斜率最大区域随时间向前移动表现了水合物分解区向储层内部的扩大。此外,水气两相的黏滞性系数不同,气相黏度系数较小,在相同压差下气相流速较快,因而导致流动过程中水气两相饱和度的差异,进而影响两相相对渗透率的变化。

水合物分解产生的水气会补充降压抽取的部分流体,所以水合物分解区局部压力降低并不显著;而水气饱和度增大导致相对渗透率的增大,有助于压降向内传播。因此,水合物分解产生水气虽然会延滞水合物分解区局部压力的降低,但是不会影响压降向储层内部的传播。

上文讨论了井口压力、温度、绝对渗透率、相对渗透率和水合物分解产水气对储层压降传播的影响。相对渗透率变化和水合物分解在水合物开采过程中是不可避免的,而井壁加热无法有效的提高储层温度,所以在目前条件下,选择绝对渗透率较大的水合物储层有助于提高开采效率和总产气量。在粘土质、粉砂质和砂质三种常见水合物储层中,砂质储层的绝对渗透率最大,而其在相同情况下开采的产气率/量也是最高(Huang *et al.*, 2015)。因此,砂质水合物储层应作为水合物勘探开发的重点目标(Boswell and Collett, 2011)。

3 结论

本文基于质量守恒、能量守恒和达西定律,建立了水合物降压开采的气、水和水合物三相一维模型,首次在模拟计算中引入压降半径公式。根据模型计算,研究了水合物降压开采过程中储层内压力变化的内在机制,得到以下结论:

(1) 降压开采水合物会导致井口附近形成低温区,可能发生水结冰和再生水合物的现象。因此,开采水合物过程中,降压要与加热相结合,同时也需要更有效的加热技术。

(2) 储层绝对渗透率越大,压降在储层内的传播越快,总产气量也越大。

(3) 含水合物含水层的降压效率显著的低于无水合物含水层,主要原因是水合物分解引起得水气两相相对渗透率变化和分解产生的水气对储层局部压力的影响。

(4) 绝对渗透率较大的砂质储层内压降传播效率较高,可作为水合物降压开采的优选区域。

致谢 感谢审稿专家和编辑部老师大力支持

References

- Aziz K, Settari A. 1979. Petroleum Reservoir Simulation [M]. London: Applied Science Publishers.
- Boswell R, Collett T S. 2011. Current perspectives on gas hydrate resources [J]. Energy & Environmental Science, 4(4): 1206-1215.
- Hong H, Pooladi-Darvish M. 2005. Simulation of depressurization for gas production from gas hydrate reservoirs [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 44(11): 39-46.
- Hong H F. 2003. Modeling of gas production from hydrates in porous media [Ph. D. thesis]. Calgary: University of Calgary.
- Huang L, Su Z, Wu N Y. 2015. Evaluation on the gas production potential of different lithological hydrate accumulations in marine environment [J]. Energy, 91: 782-798.
- Ji C, Ahmadi G, Smith D H. 2001. Natural gas production from hydrate decomposition by depressurization [J]. Chemical Engineering Science, 56(20): 5801-5814.
- Kim H C, Bishnoi P R, Heidemann R A, *et al.* 1987. Kinetics of methane hydrate decomposition [J]. Chemical Engineering Science, 42(7): 1645-1653.
- Makogon Y F. 1997. Hydrates of Hydrocarbons [M]. Tulsa, Okla.: Pennwell Books.
- Moridis G, Collett T S, Pooladi-Darvish M, *et al.* 2011. Challenges, uncertainties, and issues facing gas production from gas-hydrate deposits [J]. Spe Reservoir Evaluation & Engineering, 14(1): 76-112.
- Moridis G J, Collett T S. 2004. Gas production from Class 1 hydrate accumulations [A]. // Taylor C E, Kwan J T. Advances in the Study of Gas Hydrates [M]. US: Springer, 83-97.
- Moridis G J, Collett T S, Dallimore S R, *et al.* 2004. Numerical studies of gas production from several CH₄ hydrate zones at the Mallik site, Mackenzie Delta, Canada [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 43(3-4): 219-238.
- Nazridoust K, Ahmadi G. 2007. Computational modeling of methane hydrate dissociation in a sandstone core [J]. Chemical Engineering Science, 62(22): 6155-6177.
- Shahbazi A, Pooladi-Darvish M. 2014. Behavior of depressurization in type III hydrate reservoirs [J]. SPE Journal, 19(2): 191-205.
- Sun X, Mohanty K K. 2006. Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media [J]. Chemical Engineering Science, 61(11): 3476-3495.
- Sun X, Nanchary N, Mohanty K K. 2005. 1-D modeling of hydrate depressurization in porous media [J]. Transport in Porous Media, 58(3): 315-338.
- Yousif M H, Abass H H, Selim M S, *et al.* 1991. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media [J]. SPE Reservoir Engineering, 6(1): 69-76.

附中文参考文献

- 韩大匡. 1993. 油藏数值模拟基础 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 梁海峰. 2009. 多孔介质中甲烷水合物降压分解实验与数值模拟 [博士论文]. 大连: 大连理工大学.
- 阮徐可. 2012. 多孔介质中水合物开采影响因素的实验和数值模拟研究 [博士论文]. 大连: 大连理工大学.
- 苏正, 何勇, 吴能友. 2012. 南海北部神狐海域天然气水合物热激发开采潜力的数值模拟分析 [J]. 热带海洋学报, 31(5): 74-82.
- 张新军. 2008. 天然气水合物藏降压开采实验与数值模拟研究 [博士论文]. 北京: 中国石油大学(北京).