



贾石川,胡立强,肖智勇,等.不同因素对脉冲压力响应的影响规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(3):152-158. doi:10.16186/j.cnki.1673-9787.2020100007

JIA S C, HU L Q, XIAO Z Y, et al. Effects of different factors on pulse pressure response[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2022, 41(3): 152-158. doi:10.16186/j.cnki.1673-9787.2020100007

## 不同因素对脉冲压力响应的影响规律研究

贾石川<sup>1</sup>, 胡立强<sup>1</sup>, 肖智勇<sup>1</sup>, 王刚<sup>1,2</sup>, 姜枫<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为了研究不同因素下脉冲压力响应规律,本文采用有限差分法求解多孔可压缩介质的一维瞬态流动控制非线性偏微分方程,结合边界条件的有限差分形式和初始条件,基于 MATLAB 进行编程研究。结果表明:压力平衡的时间与渗透率呈负相关关系,且随着渗透率增加,气流达到稳定状态所需时间逐渐减少;脉冲压力在大孔隙试样中将经历两个阶段:快速减少阶段和缓慢减少阶段,孔隙体积与平衡压力的大小呈负相关关系,与压力平衡的时间呈正相关关系;对于相同的上下游储层体积,平衡所需时间和平衡压力与储层体积呈正相关关系,气流达到稳定状态时间与储层体积呈负相关关系。研究结果对于深入理解非常规储层的渗透率具有理论指导意义。

**关键词:**有限差分法;脉冲压力响应;渗透率;孔隙度;储层体积

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:1673-9787(2022)3-152-6

### Effects of different factors on pulse pressure response

JIA Shichuan<sup>1</sup>, HU Liqiang<sup>1</sup>, XIAO Zhiyong<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1,2</sup>, JIANG Feng<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the law of pulse pressure response under different factors, the finite difference method was adopted to solve the one-dimensional transient flow nonlinear partial differential control equation of porous compressible medium. Combined with the finite difference form and initial condition of boundary conditions, the influence of parameters contained in the model on the pressure response was studied in MATLAB environment. The results showed that the time of pressure equilibrium was negatively correlated with the permeability, and with the increase of permeability, the time required for the airflow to reach a stable state decreased; The pulse pressure would go through two stages in the macropore specimen, the rapid reduction stage and the slow reduction stage, the pore volume was negatively correlated with the equilibrium pressure, and the pressure equilibrium time was positively correlated; For the same upstream and downstream reservoir volume, the equilibrium time and equilibrium pressure were positively correlated with reservoir volume, and the time of airflow

收稿日期:2020-10-08;修回日期:2021-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079077,51479108)

第一作者简介:贾石川(1995—),男,河南濮阳人,硕士生,主要从事裂隙岩体渗流方面的研究。Email:17839164930@163.com

通讯作者简介:王刚(1976—),男,山东阳谷人,教授,博士生导师,主要从事多场耦合理论与应用、岩石力学与工程方面的教学和研究工作。Email:wanggang1110@gmail.com

reaching stable state was negatively correlated with reservoir volume. The study was of theoretical significance for further understanding the permeability of unconventional reservoirs.

**Key words:** finite difference method; pulse pressure response; permeability; porosity; reservoir volume

## 0 引言

自从北美成功开发页岩气以来,页岩气等非常规能源受到了能源界的广泛关注<sup>[1]</sup>。中国页岩气可采资源量为  $1.5 \times 10^{13} \sim 2.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,与美国资源量相当,现采用大规模水力压裂和微地震监测技术进行开采<sup>[2]</sup>。中国在页岩气开发探索中形成了新的开采机制,提高了单井产能<sup>[3]</sup>。非常规能源包括煤层气、致密砂岩气和页岩气,为了减少对常规能源的依赖,非常规能源的商业化开发变得越来越迫切,渗透率通常被认为是开采的关键参数之一,是决定非常规能源商业开采可行性的的重要因素<sup>[4]</sup>。实验室测量渗透率分为稳态法和非稳态法<sup>[5]</sup>,渗流介质有煤油、水、气体等多种<sup>[6]</sup>。稳态法在不同驱替压力下监测流量,通过滑脱效应改进,得到绝对渗透率;非稳态法中的脉冲衰减法根据脉冲压力与时间的关系得到渗透率。在测量渗透率方法的发展过程中,由于脉冲法测量致密岩石渗透率( $10^{-6} \sim 10 \text{ mD}$ )<sup>[7]</sup>花费时间少,精度高,一直被广大学者采用和发展<sup>[8-13]</sup>。

脉冲法和稳态法的区别在于脉冲法不需要测量流速,只需要记录压力随时间的变化关系就可以测出渗透率<sup>[14]</sup>,同时脉冲法在高围压条件下进行,更加符合现场情况。然而脉冲压力响应受到多种因素影响,包括岩样渗透率、孔隙度、横截面积、岩石体压缩性、基质压缩性以及测量所用的上下游储层体积等。页岩渗透率极低,即便采用脉冲法测量也需要很长的时间,且脉冲法对气密性要求很高。此外,孔隙度测量以及反映压力变化的压力传感器精度也会影响压力响应,实验装置的局限性也使得实验室研究各种因素对压力响应的影响变得困难。为了更好地分析压力响应,数值模拟方法更加实际可行。

LIN W<sup>[15]</sup>采用解析解和数值解求解了渗透率岩石的一维流体流动微分方程,然而在解析解中并未考虑下游储层的影响,其数值解直接采用 TRUMP 代码,未给出详细的推导;F. Civan<sup>[16]</sup>提出了用实用有限分析法求解微分方程的空间/时间解的数值方法,与基于分离变量和拉普拉斯变换的原始有限解析求解方法所产生的繁琐离散化格式相比,可以得到更加简便的离散化格式;王自

明等<sup>[17]</sup>利用有限元与有限差分法求解流固耦合方程,交替迭代求解得到参数的解;刘文超等<sup>[18]</sup>通过有限差分法研究了不稳定渗流边界数值解,算法简单,但局限于低渗非达西流等。

综上所述,在多孔介质的渗流计算问题中,有限差分法求解偏微分方程研究较少。本文在 F. Civan<sup>[16]</sup>提出的实用有限分析法求解微分方程的基础上,将其应用于多孔可压缩介质的一维瞬态流动的偏微分控制方程,提出用有限差分法求解非线性偏微分方程。此外,在 MATLAB 环境下编制计算程序代码,模拟求解脉冲压力随时间和空间的变化趋势。通过改变模型中的参数值,重点研究渗透率、孔隙度和上下游储层体积对脉冲压力响应的影响,以期非常规储层能源商业化开采提供指导意见。

## 1 模型建立

在测量花岗岩渗透率时,W. F. Brace 等<sup>[9]</sup>首先提出可压缩流体通过多孔可压缩介质的一维瞬态流动控制偏微分方程,将压力简化为距离  $x$  和时间  $t$  的函数,即

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = c \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}, 0 < x < L, t > 0, \quad (1)$$

其中, $L$ 为试样长度, $c$ 与地质材料的储存性能有关,是一个与储层内部连接的孔隙度、基质和岩体压缩性、流体性能有关的函数<sup>[19]</sup>。

利用达西定律和质量守恒原理,试样在上下游储层的初始值可以简化为

$$p(x,0) = p_0, 0 < x < L, \quad (2)$$

$$p(0,t) = p_u(t), t \geq 0, \quad (3)$$

$$p(L,t) = p_d(t), t \geq 0, \quad (4)$$

式中, $p_u(t)$ , $p_d(t)$ 分别为  $t$  时刻上下游储层的压力。

式(2)表示  $t$  为 0 时岩心内部初始压力为  $p_0$ ,式(3)表示  $t$  时刻  $x=0$  处的压力为  $p_u(t)$ ,式(4)表示  $t$  时刻  $x=L$  处的压力为  $p_d(t)$ ,其中  $p_d(0) = p_0$ , $p_u(0) = p_0 + \Delta p_0$ 。

上下游储层的边界值可以简化为

$$\frac{\partial p_u}{\partial t} = \lambda_u \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0}, t > 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_d}{\partial t} = -\lambda_d \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L}, t > 0, \quad (6)$$

$$c = \frac{\mu}{k} [\varphi\beta + \beta_b - \beta_s(1 + \varphi)], \quad (7)$$

$$\lambda_u = \frac{Ak}{\mu V_u \beta}, \quad (8)$$

$$\lambda_d = \frac{Ak}{\mu V_d \beta}, \quad (9)$$

式中:  $A, k, \varphi$  分别为横截面面积, 渗透率和孔隙度;  $V_u, V_d$  分别为上下游储层体积;  $\mu$  和  $\beta$  分别为测试流体的黏度和压缩系数;  $\beta_b$  为试样体压缩系数;  $\beta_s$  为固体基质的压缩系数。

由于式(1)无法直接求解, 且给出的解析解形式复杂, 所以人们很难正确理解流体随时间和空间变化的流动行为。此外, 边界条件的复杂性也增加了解析解的难度。为了正确理解可压缩流体通过多孔可压缩介质的一维瞬态流动时空特性, 采用有限差分法分析偏微分控制方程, 并通过编制 MATLAB 程序将非线性偏微分方程代码化, 加入边界条件和初始条件进行数值计算。

压力响应  $p(x, t)$  是一个关于空间  $x$  和时间  $t$  的参数, 取一个空间  $[0, L]$ 、时间  $[0, S]$  的矩形控制域。将该控制域进行离散化处理, 即将  $[0, L]$  用  $n = 0, 1, 2, \dots, N$  分为  $N$  个等间隔区域,  $[0, S]$  用  $m = 0, 1, 2, \dots, M$  分为  $M$  个等时区域, 则矩形控制域网格节点为  $(N + 1) \times (M + 1)$ 。采用有限差分法得到的近似压力  $p_n^m$  表示  $x = n\Delta x, t = m\Delta t$  时的压力, 上标表示时间, 下标表示位置。其中  $\Delta x = L/N, \Delta t = S/M$ 。因此式(1)可以改写为

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}, 0 < x < L, t > 0. \quad (10)$$

压力  $p(x, t)$  对  $x$  进行泰勒多项式展开,

$$p(x_n + \Delta x, t_m) = p(x_n, t_m) + \frac{\partial p}{\partial x}(x_n, t_m) \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x_n, t_m) \Delta x^2 + o(\Delta x^3) + \dots, \quad (11)$$

$$p(x_n - \Delta x, t_m) = p(x_n, t_m) - \frac{\partial p}{\partial x}(x_n, t_m) \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x_n, t_m) \Delta x^2 - o(\Delta x^3) + \dots, \quad (12)$$

其中  $o(\Delta x^3)$  为  $x$  的三阶等价无穷小。将式(11)与(12)相加,

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = \frac{p(x_n + \Delta x, t_m) + p(x_n - \Delta x, t_m) - 2p(x_n, t_m)}{\Delta x^2} +$$

$$\frac{o(\Delta x^4)}{\Delta x^2} + \dots. \quad (13)$$

忽略  $x$  的高阶等价无穷小, 式(13)可改写为

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = \frac{p_{n+1}^m + p_{n-1}^m - 2p_n^m}{\Delta x^2}. \quad (14)$$

压力  $p(x, t)$  对  $t$  进行泰勒多项式展开,

$$p(x_n, t_m + \Delta t) = p(x_n, t_m) + \frac{\partial p}{\partial t}(x_n, t_m) \Delta t + o(\Delta t^2) + \dots. \quad (15)$$

忽略  $t$  的二阶等价无穷小, 将式(14)和(15)代入式(10), 则得到有限差分形式为

$$\frac{p_n^{m+1} - p_n^m}{\Delta t} = \frac{p_{n+1}^m + p_{n-1}^m - 2p_n^m}{c\Delta x^2}. \quad (16)$$

利用有限差分法计算岩心上下游边界条件的压力梯度<sup>[20]</sup>,

$$\frac{\partial p_0^m}{\partial x} = \frac{-3p_0^m + 4p_1^m - p_2^m}{2\Delta x}, n = 0, \quad (17)$$

$$\frac{p_N^{m+1} - p_N^m}{\Delta t} = -\lambda_d \frac{p_{N-2}^m - 4p_{N-1}^m + 3p_N^m}{2\Delta x}, \quad (18)$$

故上游边界条件式(5)有限差分形式为

$$\frac{p_0^{m+1} - p_0^m}{\Delta t} = \lambda_u \frac{-3p_0^m + 4p_1^m - p_2^m}{2\Delta x}, \quad (19)$$

下游边界条件式(6)有限差分形式为

$$\frac{p_N^{m+1} - p_N^m}{\Delta t} = -\lambda_d \frac{p_{N-2}^m - 4p_{N-1}^m + 3p_N^m}{2\Delta x}. \quad (20)$$

对式(16)、式(19)~(20)通过 MATLAB 编程进行时间步求解, 可得到压力随时间和空间的变化曲线。

## 2 模型参数分析

非常规储层中的一些参数如渗透率、孔隙度等, 对于不同岩石其数量级相差很大, 此外在实验室测量过程中, 试样尺寸、固体压缩性、基质压缩性和上下游储层体积大小均对压力响应具有一定影响。本文研究对象主要为煤岩, 采用氦气作为渗流介质, 数值模拟基本参数如表 1 所示。为了研究这些参数对压力响应的影响, 基于建立的数值模型, 在 MATLAB 环境下编程进行计算, 计算过程如图 1 所示: 首先根据表 1 输入初始计算参数, 选择合适的时间步长  $dt$  与距离步长  $dx$ , 计算中选取的最大时长为 10 000 s, 时间步长为 1 s,  $L = 10$  cm, 距离步长为 0.05 cm; 其次输入上下游的边界条件差分形式, 即式(19)~(20), 最后输入式(16), 得到时间域 1:  $t_{len-1}$  与空间域 1:  $x_{len-1}$  上的压力值。

试样  $\beta_b, \beta_s$  数值很小, 计算过程中对  $c$  的影

响可以忽略不计。假设氦气压缩系数和黏度系数保持不变,本部分仅研究渗透率、孔隙度和储层体积 3 个因素对压力响应的影响。

表 1 数值模拟基本参数

Tab. 1 Basic parameters used in numerical simulation

参数	数值	描述
$\beta$	$0.29 \text{ MPa}^{-1}$	氦气压缩系数
$\beta_b$	$5.22 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ [21]	试样体压缩系数
$\beta_s$	$1.97 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ [21]	试样固体基质压缩系数
$\mu$	$2.0 \times 10^{-5} (\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ [19]	氦气黏度系数
$A$	$19.6 \text{ cm}^2$	试样横截面面积
$L$	$10 \text{ cm}$	试样长度
$\varphi$	$0.5\%$ [22]	试样孔隙度
$V_u$	$50 \text{ cm}^3$	上游储层体积
$V_d$	$50 \text{ cm}^3$	下游储层体积

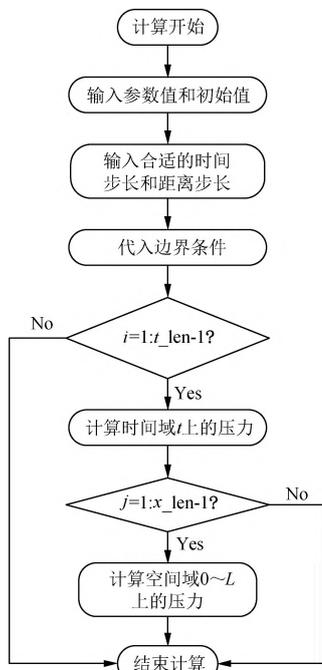


图 1 模型计算流程图

Fig. 1 Flow chart of model calculation

### 2.1 渗透率对脉冲压力响应的影响

数值模拟的介质为煤岩,渗透率为  $0.0001 \sim 100 \text{ mD}$  [22],分别选  $0.1, 0.5, 1, 2 \text{ mD}$  进行计算,结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,随着渗透率降低,压力减小的速度变缓,表明到达最终平衡的时间增长。由图 2(b)可以看出,不同渗透率下的压力响应均包含线性区域和非线性区域,且非线性区域出现的时间较短。非线性区域代表初始脉冲时,试样中的气流处于非稳流状态,随着脉冲进行,试样内的气流逐渐变成稳流状态,即图 2(b)中的线性区域。随着渗透率增大,线性拟合曲线

的斜率绝对值变大,表明所需平衡时间减小。此外,线性区域出现的时间随着渗透率降低而滞后,表明在其他因素相同的情况下,平衡压力在低渗透率的岩石中达到稳定梯度下降所需时间较长。不同渗透率下模拟所用各参数的值见表 2,可以看出渗透率同时影响  $c$  与  $\lambda_u, \lambda_d$ ,并与这 3 个数值呈负相关关系。

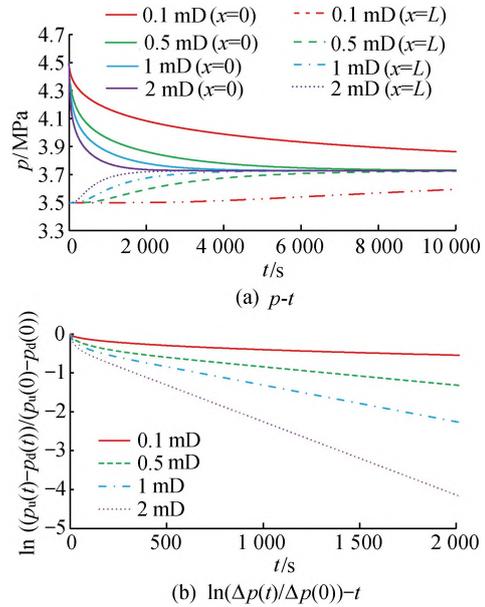


图 2 渗透率对脉冲压力响应的影响曲线

Fig. 2 Effect curves of permeability on pulse pressure response

表 2 不同渗透率下模型中各参数的值

Tab. 2 Values of various parameters of the model under different permeability

$k/\text{mD}$	$c/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	$\lambda_u/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$\lambda_d/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
0.1	359.51	1 496.53	1 496.53
0.5	71.90	299.31	299.31
1.0	35.95	149.65	149.65
2.0	17.98	74.83	74.83

### 2.2 孔隙度对脉冲压力响应影响

由式(7)可知,当渗透率保持不变时,随着孔隙度增大, $c$ 也逐渐增大,数值模拟中选择  $0.5\%, 2\%, 5\%$  3 组孔隙度进行计算,模拟所用参数如表 3 所示。图 3(a)显示了不同孔隙度下的脉冲压力响应, $\varphi = 0.5\%$  时,脉冲压力下降速度最慢,但其平衡时间明显小于其他两组数据。随着孔隙度增大,脉冲压力在前期下降速度逐渐增大,当上下游储层脉冲压力接近时,孔隙度较大的岩样脉冲压力平衡所需时间明显变长。

一般认为孔隙度对渗透率有一定影响,为了简化分析,本文仅考虑单变量造成的影响,即不考虑各因素间的相互影响。当渗透率保持不变时,

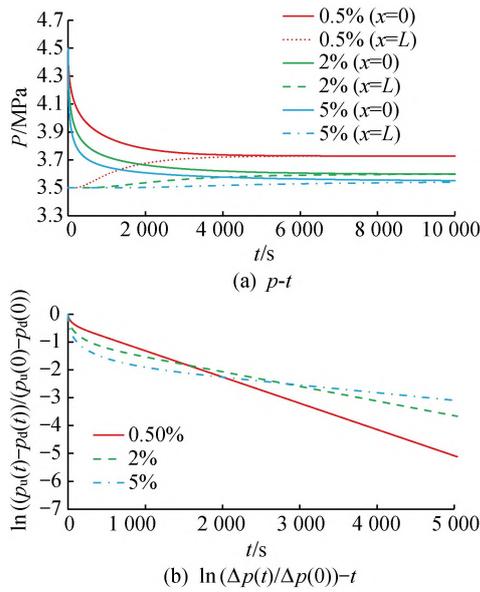


图3 孔隙度对脉冲压力响应的影响曲线

Fig. 3 Effect of porosity on pulse pressure response

孔隙度增加势必会引起其他改变。分析认为,岩样内的孔隙主要分为贯通的孔隙和封闭的孔隙。结合图3(b)可知,孔隙度较大时,气体渗透岩心过程达到稳流状态所需的时间更长,表明相同渗透率下,孔隙度大的岩心其内部孔隙构造更复杂,上下游压差较小时,平衡所需时间更长。孔隙度较大使得气体在最初渗透过程中脉冲压力变化更为明显。

表3 不同孔隙度下模型中各参数的值

Tab. 3 Values of various parameters in the model under different porosity

$\varphi/\%$	$c/(s \cdot m^{-2})$	$\lambda_u/(s \cdot m^{-1})$	$\lambda_d/(s \cdot m^{-1})$
0.5	35.95	149.65	149.65
2.0	124.04	149.65	149.65
5.0	300.23	149.65	149.65

### 2.3 储层体积对脉冲压力响应影响

相对于不同的上下游储层体积,相同的储层体积不仅可以简化计算方法,还能够减少实验时间<sup>[23]</sup>。常规的压力脉冲装置上下游储层体积相同,因此,本部分主要研究上下游储层体积相同时,不同的储层体积对脉冲压力响应的影响。模拟选用实验室常用储层体积5,50,200 cm<sup>3</sup>进行计算,其他参数如表4所示。图4(a)为储层体积对脉冲压力响应的影响,当上下游储层体积为5 cm<sup>3</sup>时,脉冲压力下降速度最快,且平衡所需时间最短,随着储层体积增大,压力变化幅度逐渐减少,最终平衡时间也随着储层体积增加而增加,表明较小的储层体积可以缩短平衡时间。储层体积小也会存在一些弊端,如图4(b)所示,储层体积

越小,达到稳流状态所需时间越长,并且较小的储层体积对于试样的非均质性更加敏感,当采用小的储层体积时,脉冲压力变化引起的温度变化以及外界扰动等因素对测量结果造成的影响将更加显著。此外,当孔隙体积保持不变时,储层体积较小时相同的孔隙体积误差引起的渗透率计算误差更大<sup>[24]</sup>,因此,在实验室进行致密岩石渗透率实验时应选择合适的储层体积进行测量。

表4 不同储层体积下模型中各参数的值

Tab. 4 Values of parameters in the model under different reservoir volumes

$V_u$ 或 $V_d/\text{cm}^3$	$c/(s \cdot m^{-2})$	$\lambda_u/(s \cdot m^{-1})$	$\lambda_d/(s \cdot m^{-1})$
5	35.95	14.97	14.97
50	35.95	149.65	149.65
200	35.95	598.61	598.61

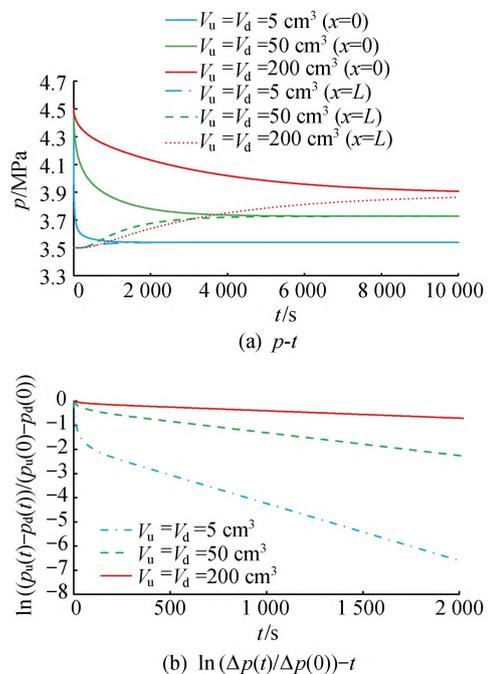


图4 储层体积对脉冲压力响应的影响曲线

Fig. 4 Effect curves of reservoir volume on pulse pressure response

## 3 结论

(1)提出了采用有限差分法计算可压缩流体通过多孔可压缩介质的一维瞬态流动非线性偏微分方程,并在MATLAB环境下研究了渗透率、孔隙度、储层体积对脉冲压力响应的影响。

(2)随着渗透率增加,压力减小速度变快,所需平衡时间变短。在脉冲过程中,气体达到稳流状态的时间随着渗透率增加而减少。

(3)脉冲压力在孔隙度较大的试样中前期变化更大,上下游储层压力差较小时,平衡时间与孔

隙度成正比,表明渗透率、横截面面积、上下游储层体积保持不变时,孔隙度越大,其内部孔隙越复杂,脉冲压力主要经历快速减少阶段和缓慢减少阶段。

(4)上下游储层体积相同时,随着储层体积增加,平衡所需时间变长,最终平衡压力增大,气流达到稳定状态时间变短。

#### 参考文献:

- [1] 毕海滨,孟昊,高日丽,等.页岩气未开发区单井可采储量评估方法[J].石油学报,2020,41(5):565-573.  
BI H B, MENG H, GAO R L, et al. Evaluation method of recoverable reserves of single well in undeveloped area of shale gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (5):565-573.
- [2] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.  
JIA C Z, ZHENG M, ZHANG Y F. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):129-136.
- [3] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J].石油勘探与开发,2016,43(2):166-178.  
ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects ( II ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43 (2):166-178.
- [4] 赵军,范家宝,代新云,等.复杂非均质储层渗透率模型的综合评价方法[J].天然气地球科学,2017,28(2):183-188.  
ZHAO J, FAN J B, DAI X Y, et al. A classification method for permeability model in complex anisotropy reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2):183-188.
- [5] 李康,杨典森,陈卫忠,等.不同应力和孔隙压力作用下致密煤岩渗透率演化规律[J].太原理工大学学报,2019,50(3):265-271.  
LI K, YANG D S, CHEN W Z, et al. Study on permeability evolution of tight coal under different stress and pore pressure conditions [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(3):265-271.
- [6] 孙军昌,杨正明,郭和坤,等.致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究[J].岩土力学,2013,34(4):1009-1016.  
SUN J C, YANG Z M, GUO H K, et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4):1009-1016.
- [7] SANDER R, PAN Z, CONNELL L D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 37: 248-279.
- [8] 杨宇,周伟,周文,等.页岩柱塞脉冲衰减测试的渗流机理再认识[J].天然气工业,2019,39(5):71-78.  
YANG Y, ZHOU W, ZHOU W, et al. Recognitions on the flow mechanism of shale during the plug pulse decay measurement [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (5):71-78.
- [9] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure [J]. Journal Geophysical Research, 1968, 73(6):2225-2236.
- [10] CAO C, LI T, SHI J, et al. A new approach for measuring the permeability of shale featuring adsorption and ultra-low permeability [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 30:548-556.
- [11] FENG R M. An optimized transient technique and flow modeling for laboratory permeability measurements of unconventional gas reservoirs with tight structure [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017: S1875510017303566.
- [12] 沈维克.非常规储层脉冲衰减渗流试验研究及其优化[D].重庆:重庆大学,2018.  
SHEN W K. Unconventional reservoir pulse-decay seepage experimental study and the optimized [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [13] 杨召.页岩储层非稳态气测渗透率方法研究[D].成都:西南石油大学,2019.  
YANG Z. Study on unsteady gas permeability measurement for shale reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [14] 张宏学.页岩储层渗流-应力耦合模型及应用[D].徐州:中国矿业大学,2015.  
ZHANG H X. Seepage and stress coupling model for shale reservoir and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [15] LIN W. Compressibility fluid flow through rocks of variable permeability [R]. California: University of California. doi:10.2172/7080925
- [16] CIVAN F. Practical finite-analytic method for solving differential equations by compact numerical schemes [J]. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2009, 25(2):347-379.

- [17] 王自明,杜志敏. 油藏热流固耦合渗流问题的有限元方法[J]. 西南石油学院学报,2002(2):28-30.  
WANG Z M, DU Z M. An improved finite element method to solve the coupling model of hot fluid & reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2002(2):28-30.
- [18] 刘文超,姚军,王建忠. 低渗透多孔介质非达西渗流动边界界面追踪[J]. 计算物理,2012,29(6):823-827.  
LIU W C, YAO J, WANG J Z. Front tracking for moving boundary of non-Darcy seepage flows in low-permeability porous media[J]. Chinese Journal of Computational Physics,2012,29(6):823-827.
- [19] FENG R M, LIU J, HARPALANI S. Optimized pressure pulse-decay method for laboratory estimation of gas permeability of sorptive reservoirs: Part 1-Background and numerical analysis[J]. Fuel, 2017, 191(1):555-564.
- [20] CIVAN F, RAI C S, SONDERGELD C H. Determining shale permeability to gas by simultaneous analysis of various pressure tests[J]. SPE Journal,2012,17(3):717-726.
- [21] LIU S, HARPALANI S. Compressibility of sorptive porous media: Part 2-Experimental study on coal[J]. AAPG Bulletin,2014,98(9):1773-1788.
- [22] PALMER I, MANSOORI J. How Permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering,1996,1(6):539-544.
- [23] DICKER A I, SMITS R M. A practical approach for determining permeability from laboratory pressure-pulse decay measurements [C]//International Meeting on Petroleum Engineering, Nov. 1-4, 1988, Tianjin, China.
- [24] JONES S C. A technique for faster pulse-decay permeability measurements in tight rocks[J]. SPE Formation Evaluation,1997,12(1):19-26.

(责任编辑 郭倩倩)

(上接第151页)

- silty soil in the Yellow River flooded area[J]. Journal of Henan University(Natural Science),2020,50(3):332-340.
- [14] 张振华,黄向春,毕庆涛,等. 初始剪应力和相位差对饱和砂土动力特性的影响[J]. 人民长江,2017,48(3):70-74.  
ZHANG Z H, HUANG X C, BI Q T, et al. Effect of initial shear stress and phase difference on dynamic characteristics of saturated sand[J]. Yangtze River,2017,48(3):70-74.
- [15] 吕海波,董均贵,吴畏. 不同成样方式下含水率与非饱和膨胀土抗剪强度的关系[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(4):123-129.  
LYU H B, DONG J G, WU W. Relations between water content and shear strength of unsaturated expansive soils based on different sample-preparing method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),2018,37(4):123-129.
- [16] 杨利国,骆亚生,李焱,等. 初始应力条件对压实黄土土强度影响的研究[J]. 岩土力学,2010,31(1):87-91.  
YANG L G, LUO Y S, LI Y, et al. Research on effect of initial stress conditions on dynamic strength of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(1):87-91.
- [17] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975,537:1-17.
- [18] 黄娟,彭立敏,袁铁映,等. 分级加载条件下泥炭质土滞回曲线演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1753-1759.  
HUANG J, PENG L M, YUAN T Y, et al. Experimental study on evolution law of hysteretic curves of peaty soil under stepped axial cyclic loading[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2018,49(7):1753-1759.
- [19] 谢定义. 土动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011:279-288.  
XIE D Y. Soil dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press,2011:279-288.

(责任编辑 郭倩倩)