

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0501

周期振荡法在低渗透测量中的应用研究

李 康^{1,2}, 王 威^{1,2}, 杨典森¹, 陈卫忠¹, 齐宪寅³, 谭 彩⁴

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434000; 4. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘 要: 周期振荡法是一种新兴的多孔介质渗透率测量方法, 具有测量周期短、稳定性好、精度高等优点。然而, 由于缺乏对周期振荡法的系统研究, 该方法未能在低渗透测量领域得到推广应用。采用数值模拟方法, 分别研究了不同孔隙率、渗透率对周期振荡法气压测量结果的影响, 以及不同形式周期波在周期振荡法渗透率测量中的适用性。结果表明: 无论是孔隙率, 还是渗透率都会影响气体压力传递过程; 周期振荡法渗透率测量时不需要初始气压平衡过程, 一定时间后测量结果几乎不受初始气压状态影响; 与正弦波相比, 方波对下游气体压力响应的影响更明显, 而且方波、三角波和锯齿波具有容易加载的特点, 建议采用方波取代正弦波进行周期振荡法试验。研究成果对指导周期振荡法试验和解决低渗透测量难题有一定帮助。

关 键 词: 渗透率; 周期振荡法; 低渗透测量; 周期波; 数值模拟; 孔隙率

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 03-1086-09

Application of periodic oscillation method in low permeability measurement

LI Kang^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, YANG Dian-sen¹, CHEN Wei-zhong¹, QI Xian-yin³, TAN Cai⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434000, China; 4. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: Periodic oscillation method is a new method for permeability measurement of porous media. It exhibits advantages of short testing period, good stability and high precision. However, it has not been widely used for low permeability measurement in laboratory due to lack of systematic research. In this paper, the effects of different porosities and medium permeabilities on the permeability measurement results of the periodic oscillation method are numerically analyzed. In addition, the applicability of different forms of periodic waves in the permeability measurement is discussed. Conclusions from the study results can be drawn as follows. First, both the porosity and permeability can affect the process of gas pressure transfer. Second, the initial pressure equilibrium process in medium may not be needed for the periodic oscillation method as the measurement results are almost unaffected by the initial pressure distribution after a certain period of time. Third, compared with sinusoidal wave, square wave exhibits a more notable influence on the pressure response of the downstream gas. Moreover, it is observed that square wave, triangular wave and sawtooth wave are easier to be loaded in practice. Finally, based on the numerical analysis, it is suggested to use the square wave instead of sinusoidal wave in the periodic oscillation method. This study will be helpful to guide the application of the periodic oscillation method test in low permeability measurement.

Keywords: permeability; periodic oscillation method; low permeability measurement; periodic wave; numerical simulation; porosity

1 引 言

渗透率是油气藏开发、核废料地下处置等工程领域的关键技术参数之一。目前, 实验室测量渗透

率的方法主要分为两类: 瞬态法和稳态法, 其中稳态法常用于测量中、高渗透率, 而瞬态法主要测量低渗透率 ($<10^{-19} \text{ m}^2$)。其中瞬态法又分为压力脉冲法^[1]和周期振荡法^[2-3]。

收稿日期: 2019-03-12

修回日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51879260, No.41572290); 深圳市水务发展专项资金科技创新项目 (No.20170103)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51879260, 41572290) and Shenzhen Water Supplies Special Funds for Science and Technology Innovation Project (20170103).

第一作者简介: 李康, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土介质多场耦合方面的研究工作。E-mail: likang162@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 杨典森, 男, 1978 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土介质多场耦合多尺度效应方面的研究工作。E-mail: dsyang@whrsm.ac.cn

国内外学者在低渗透率测量方面已经开展了大量研究: 陈卫忠^[4]、孙军昌^[5]等采用稳态法研究了花岗岩、大理石、致密砂岩等材料的渗透特征, 最低测得 $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 的渗透率, 发现稳态法测量低渗介质时需要较长的流速稳定时间。李小春^[6-7]、王颖^[8]等详细介绍了压力脉冲法在岩石三轴试验中的运用, 提出了变容压力脉冲法的新思路, 增大了压力脉冲法测量范围。丁长栋等^[9]采用压力脉冲法和偏光显微镜研究了致密砂岩在不同围压和孔隙水压条件下渗透率的阶段演化特征以及微观机制。然而, 稳态法和压力脉冲法在低渗透测量方面还存在效率低、测量范围小、精度不高等问题, 需要探索更加高效的测量方法。

周期振荡法又称压力周期法, 本文简称周期法, 最早是由 Cowan^[3]用于多孔介质热扩散系数的测量。目前, 国内外关于周期法在低渗透测量应用方面的报道较少。Kranz 等^[2]最早采用周期法测量了岩芯的渗透率, 发现岩芯渗透率越低, 需要的振荡周期越长。Suri 等^[10]用周期法对具有不同渗透特性的岩石进行了渗透率测量, 发现用周期法具有良好的稳定性。Kanbe 等^[11]将周期法与稳态法和压力脉冲法进行了对比研究, 发现周期法大大减小了孔压的影响, 提高了测量灵敏度。吴曼^[12]、王小琼^[13]、薛华庆^[14]等利用自研设备使用周期法分别测量了致密砂岩、花岗岩、页岩等的渗透率, 发现通过调节周期波的振幅和周期, 周期法具有灵活性高、测量范围广的优点, 并且渗透率测量下限达到 $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 。Hasanov 等^[15]提出了使用周期法和分布式应变片测量岩石孔隙弹性属性的方法, 包括排水体积模量、Biot-Willis 系数、Skempton 系数和储水系数等。Yang 等^[16]系统地讨论了稳态法、压力脉冲法和周期法在低渗透测量中的优缺点, 并对比分析了解析解和数值解之间的差异。

综上所述, 周期法可以弥补稳态法和压力脉冲法在低渗透测量方面的一些不足, 研究周期法在低渗透测量中的应用具有重要意义。本文通过数值模拟对周期法试验过程中介质孔隙空间的影响进行了研究, 同时对比了不同形式周期波条件下试样下游气压变化模式, 在此基础上分析了各种周期波的适用性, 对实际测量试验具有一定的指导作用。

2 周期法原理

Fischer 等^[17-18]对周期法的基本原理和试验方法做了详细的介绍。首先, 在试样上下游各连接一

个密闭容器, 实时记录密闭容器内的压力值; 平衡后, 在开始施加压力的 t_0 时刻, 使上游密闭容器内的气体压力按照指定正弦周期波的形式变化; 透过岩芯, 将会在下stream观测到一个振幅衰减、相位延迟的同频率正弦波, 其中振幅衰减和相位延迟程度与试样渗透率有关。

由于气体和水在可压缩性、化学反应能力、流动性等方面的差异, 为提高测量效率, 常采用气体进行低渗透测量。本文以气体作为孔隙流体, 周期法试验过程类似于二维扩散, 其数学思想如下:

以试样上游端头中心点作为原点, 取试样轴向为 x 方向, 周期法的气体运移控制方程和初始条件分别如下:

$$\frac{k_a}{2\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} = \phi(1-S) \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

$$P(x, 0) = P_0, 0 \leq x \leq L \quad (2)$$

式中: $P(x, t)$ 为 t 时刻点 x 处气体压力值 (Pa); k_a 为试样渗透率 (m^2); μ 为流体动力黏滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); ϕ 为试样孔隙率; S 为试样饱和度; P_0 为试样内部初始平衡气体压力值 (Pa); L 为试样长度 (m)。

试样上游边界条件为狄利克雷边界条件, 可采用不同形式的周期性压力波表示, 下文统一简称周期波边界, 其表达式为

$$P(0, t) = f(t), x = 0 \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为周期波。其形式包括正弦波、三角波、方波、锯齿波等。

试样下游边界条件为诺伊曼边界条件, 不随上游周期波变化而变化:

$$\frac{dP_d}{dt} = -\frac{k_a A}{2\mu V_d} \frac{\partial P^2}{\partial x}, x = L \quad (4)$$

式中: P_d 为下游气体压力 (Pa); V_d 为下游容器体积 (m^3); A 为试样截面积 (m^2)。

假设试样渗透率 k_a 已知, 依据式 (1) ~ (4), 可通过数值模拟求解试样内部任意点和下游处气体压力变化情况。实际试验中, 将试样下游气体压力测量结果和数值模拟结果进行对比, 通过最小二乘法即可反算试样渗透率 k_a 。当试样上游边界为正弦波时, Fischer 等^[17-18]提出了试样内部任意点和下游处气体压力变化的解析解, 因此可以直接通过试样下游气体压力测量结果计算试样渗透率。

图 1 为周期法测量系统基本装置示意图, 其主要由周期波控制系统、压力传感器、恒温三轴试样夹持器、等效下游体积容器等组成。周期波控制系统又包括计算机系统、数字信号转模拟信号转换器、模拟电压模式泵控制器以及 ISCO 泵。周期法测量渗透率的步骤为: 将试样置于夹持器内, 确保管路连接正确, 在计算机控制终端设置周期波的

加载程序, 通过模拟电压模式泵控制器来控制 ISCO 泵的运行, 从而在试样上端施加周期性压力波; 其次通过压力传感器实时监测并记录试样上下游气体压力的变化情况; 最后对上下游气体压力变化情况进行分析计算, 即可求得试样的渗透率。图中, P_u 为上游气体压力, P_e 为试样初始平衡气体压力, ΔP 为周期波的振幅。

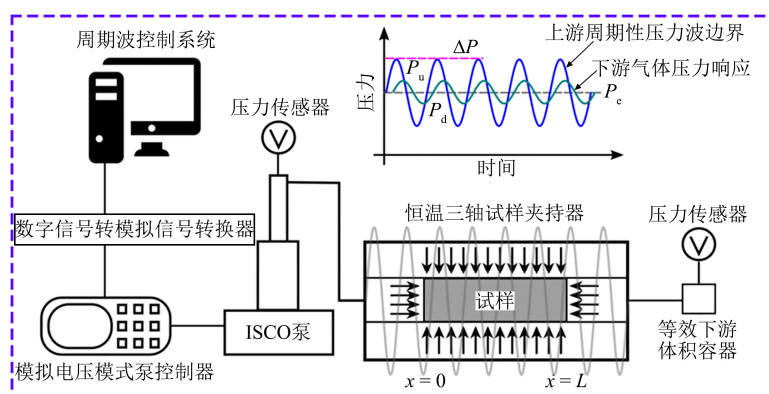


图 1 周期法基本装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of periodic oscillation method device

3 周期法数值模拟研究

本文数值模拟采用有限差分格式来近似表示气体流动控制方程和边界条件中的微分项, 对式(1)~(4)进行了求解, 数值解的求解域如图 2 所示。把试样离散成 N 等分, 并用单元 1~ N 表示, 上游密闭容器用单元 0 表示, 下游密闭容器用 $N+1$ 表示, 单元间距用 h 表示。为了平衡计算时间和计算精度, 模拟中数值解的时间步长不固定, 在设定好最大气压增量限值后, 根据某一计算步内最大气压增量 $\Delta P_{\max}$ 与最大气压增量限值 ΔP_{limit} 的关系, 动态调整时间步 Δt 的大小, t_{limit} 为模拟设定的试验时长, 数值计算的过程如图 3 所示。

表 1 给出了本文数值模拟中的关键参数, 参数大小依据低渗透测量领域已开展的试验确定[4-5, 8-13]。对于低渗透测量, 为了提高测量效率, 其岩芯尺寸相比标准样一般会适当缩小长度。同时, 为了增强试样下游气体压力响应信号、提高信噪比, 可以适当增大周期波的周期。本文在进行数值模拟时作了以下假设: ①渗流气体为氮气, 不考虑气体与多孔介质之间发生相互作用; ②气体压力较大, 忽略气体滑脱效应。

3.1 孔隙率和渗透率对周期法测量结果影响研究

孔隙率和渗透率是多孔介质的两个重要参数, 二者关系密切。然而, 目前还没有通用模型可以精

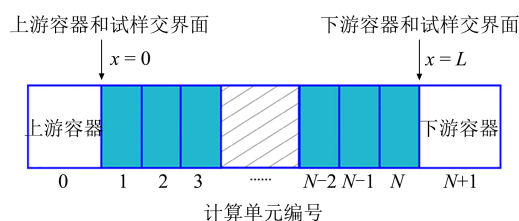


图 2 气体流动计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of gas flow calculation

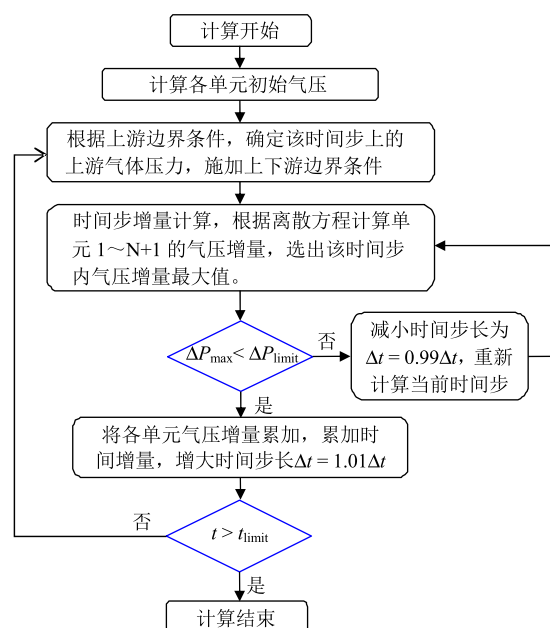


图 3 数值计算流程图

Fig.3 Flow chart of numerical computation

表 1 数值模拟相关参数
Table 1 Relevant parameters of numerical simulation

参数名称	环境温度 /℃	模拟时间 /h	下游容器体积 V_d/m^3	试样长度 L/m	试样直径 D/m	氮气动力黏滞系 数 $\mu/(Pa \cdot s^{-1})$	周期波的 周期/h	周期波平衡 位置/MPa	周期波振幅 /MPa	周期波角速 度/(rad $\cdot s^{-1}$)	周期波初始 相位/rad
参数值	20	48	1×10^{-5}	0.02	0.05	1.867×10^{-5}	8	6	0.6	$\pi/14\ 400$	0

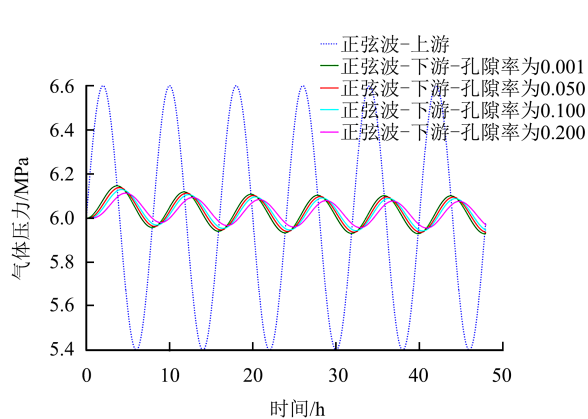
确描述二者之间的关系，一些经验模型计算结果和试验测量结果往往差别很大。

采用周期法进行试验时，通过对试验数据进行处理分析，不仅可以获得试样的渗透率，也可以获得试样的孔隙率^[16]。本节采用控制变量法分别研究试样孔隙率和渗透率变化对周期法测量结果的影响，加深对周期法的理解。

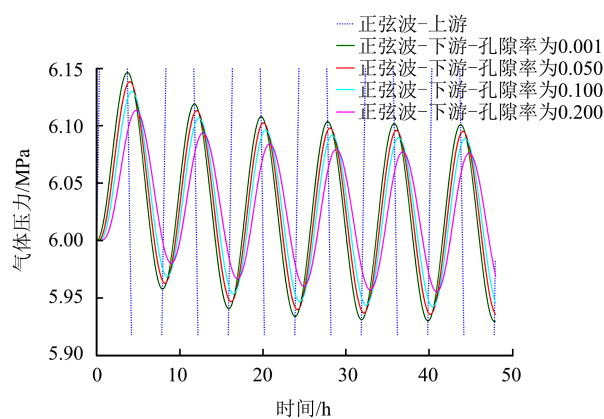
响，加深对周期法的理解。

3.1.1 不同孔隙率对比研究

本次研究试样上游边界采用正弦波，固定试样渗透率保持 $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 不变，依次研究试样孔隙率为 0.001、0.050、0.100 和 0.200 时试样下游气体压力的响应规律并进行对比。结果见图 4 所示。



(a) 孔隙率对下游气体压力响应的影响



(b) 图 4(a)局部放大图

图 4 孔隙率对下游气体压力响应的影响

Fig.4 Effect of porosity on pressure response of downstream gas

由图 4 可知，随着试样孔隙率增大，试样下游周期波振幅逐渐降低，相位延迟逐渐增大，且试验开始时下游气体压力上升越慢。这是因为多孔介质孔隙率越大，其内部储存的气体分子数越多，在上游周期波不变的情况下，试样内部孔隙空间的缓冲作用越强，从而导致试样下游密闭容器内气体压力响应减弱。

3.1.2 不同渗透率对比研究

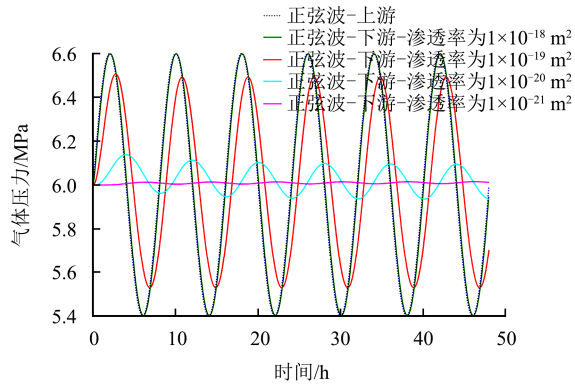
固定试样孔隙率保持 0.05 不变，依次研究试样渗透率为 1×10^{-18} 、 1×10^{-19} 、 1×10^{-20} 、 $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 时试样下游气体压力的响应规律并进行对比，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，基于表 1 中参数设计的模拟试验只适用于一定范围内的渗透率测量。随试样渗透率减小，试样的阻尼作用越来越强，下游气体压力响应减弱，且变弱速率较快。当试样渗透率较大时 ($1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$)，试样下游气体压力响应和上游周期波基本重合，没有明显的振幅衰减和相位延迟，此时试验数据是无效的。在实际试验中遇到此类问题，

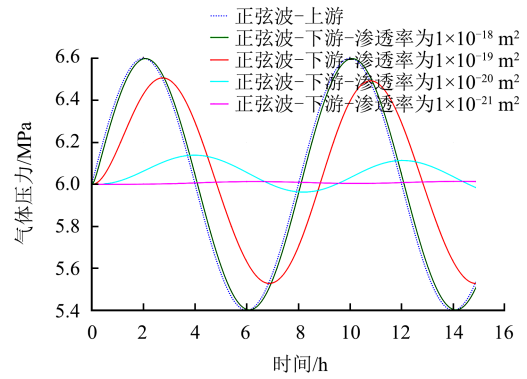
可以通过增加试样长度、增大下游容器体积等方式来减缓下游气体压力响应的变化速率，得到有效的试验曲线，测得更大的渗透率。

当渗透率特别小时 ($1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$)，下游气体压力响应基本为直线，此时试验数据无效，试验过程中系统噪声和随机噪声等可能是下游气体压力响应的主要组成部分。需要指出，当下游气体压力响应不明显时，一方面可能试样渗透率非常低；另一方面可能是上游周期波的频率太大，下游气体压力响应被前后相互抵消。实际试验中遇到此类问题，可以采用减小试样长度、减小下游密闭容器体积或者减小上游周期波频率等方法增强下游气体压力响应，测得更低渗透率。

一般情况下，随着孔隙率降低，渗透率随之降低，在实际试验过程中两者共同影响下游气体压力响应形式，同时受限于试验仪器的精度，孔隙空间的缓冲作用可能体现的不明显。因此，在对试验结果的分析中需要同时考虑孔隙率和渗透率的影响，其中以渗透率的影响为主。



(a) 渗透率对下游气体压力响应的影响



(b) 图 5(a)局部放大图

图 5 渗透率对下游气体压力响应的影响

Fig.5 Effect of permeability on pressure response of downstream gas

3.2 不同形式周期波对比研究

理论上周期法的上游边界条件可以采用任意形式的周期波,但实际试验时,常采用正弦波作为上游边界条件。一方面正弦波表达形式简单,另一方面当上游边界条件为正弦波时,通过三角变换和积分运算存在渗透率的解析解,虽然该解析解形式比较复杂。然而在上游边界处加载正弦波,对测量仪器的控制性能要求较高,也在一定程度上限制了周期法的应用。

本节固定试样孔隙率为 0.05 不变,依次改变上游周期波类型,研究了相应条件下下游气体压力响应的变化规律,比较了 4 种不同形式周期波在周期法渗透率测量中的适用性。

图 6 给出了 4 种周期波的示意图,分别是正弦波、方波、三角波和锯齿波,其中正弦波的表达式为

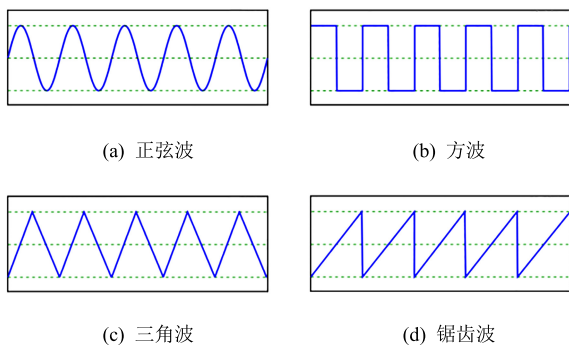


图 6 不同形式周期波示意图

Fig.6 Schematic diagram of different periodic waves

$$P(t) = P_0 + \Delta P \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中: $P(t)$ 为上游气体压力随时间的变化 (MPa); ω 为周期波的角速度 (rad/s)。

方波的表达式为

$$P(t) = P_0 + \Delta P \text{sign}(\sin \omega t) \quad (6)$$

三角波的积分表达式为

$$P(t) = P_0 - \Delta P + \frac{2\omega\Delta P}{\pi} \int_0^t \text{sign}(\sin \omega x) dx \quad (7)$$

或者通过使用分段函数,并结合周期函数的特点对时间做归一化处理:

$$\left. \begin{aligned} t_n &= \frac{\omega t}{2\pi} - \text{floor}\left(\frac{\omega t}{2\pi}\right) \\ P(t) &= P_0 - \Delta P + 4\Delta P t_n, t_n \leq 0.5 \\ P(t) &= P_0 + 3\Delta P - 4\Delta P t_n, t_n > 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: t_n 为等效时间; floor 为下限取整函数。需要注意,积分形式的三角波在较长的试验过程中容易因为累积误差而影响精度,因此本文采用分段形式的三角波,避免累积误差的影响。

与三角波的处理方式类似,锯齿波的表达式为

$$\left. \begin{aligned} t_n &= \frac{\omega t}{2\pi} - \text{floor}\left(\frac{\omega t}{2\pi}\right) \\ P(t) &= P_0 - \Delta P + 2\Delta P t_n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在试样内部初始气体压力大小保持为周期波平衡位置的条件下,图 7 表明上游周期波的初始相位只对试验初期下游气体压力响应有明显影响,随着试验持续进行,下游气体压力响应逐渐与上游周期波步调一致。由以上结论可以推知,试样内部初始气体压力分布对试样下游气体压力相应的影响随着试验进行,会越来越小。

本节中设定上游周期波的初始相位为 0, 试验

开始前, 试样内部气体压力大小均在各周期波的平衡位置, 试验开始后在试样上游加载不同形式的周期波。

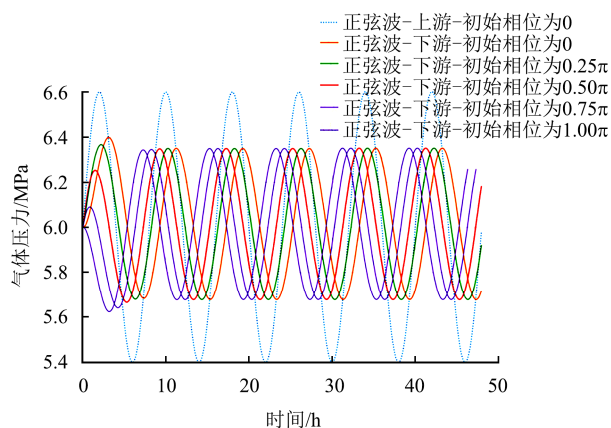
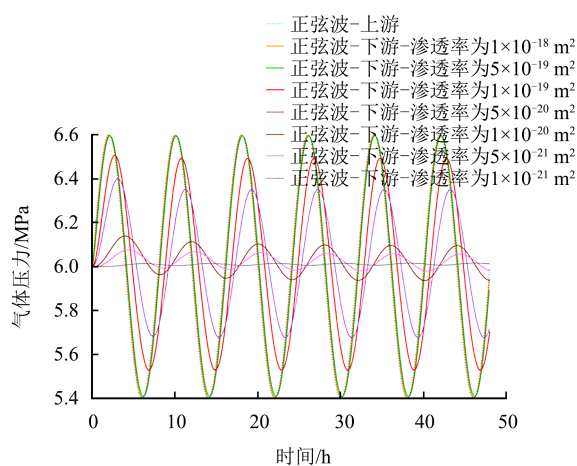


图7 初始相位对下游气体压力响应的影响

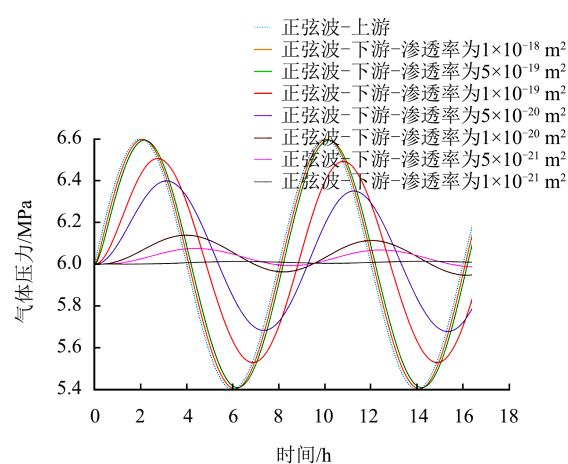
Fig.7 Effect of initial phase on pressure response of downstream gas

模拟结果如图8~11所示, 结果表明试样下游气体压力响应的形式与试样上游周期波的形式密切相关。当试样上游边界条件为方波或者锯齿波时, 由于两者在特殊点附近发生突变(突变点), 相当于在试样上游施加脉冲作用, 导致试样下游波形受到脉冲效应的影响, 从而可以观测到明显的不光滑极值点, 并且下游周期波极值点位置非常靠近上游周期波突变点, 说明脉冲效应的传递速度非常快。当试样上游边界条件为正弦波或者三角波时, 两者变化形式比较相似, 不存在气体压力突变点, 导致试样下游气体压力响应曲线没有不光滑极值点, 呈现出良好的周期性和对称性, 同时下游周期波极值点明显落后于上游周期波极值点。

同一形式周期波作用下, 渗透率变化引起下游气体压力响应的振幅发生变化。当试样渗透率大于 $5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 时, 下游气体压力响应与上游周期波几



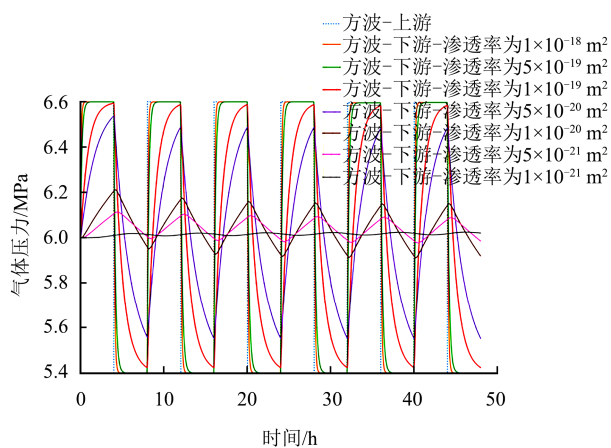
(a) 正弦波作用下下游气体压力响应



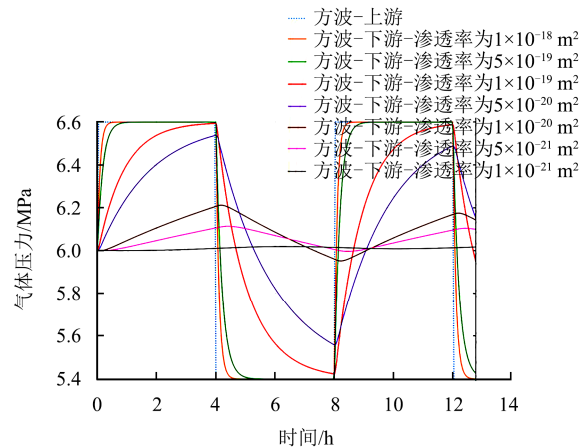
(b) 图8(a)局部放大图

图8 正弦波作用下下游气体压力响应

Fig.8 Pressure response downstream gas under sinusoidal wave



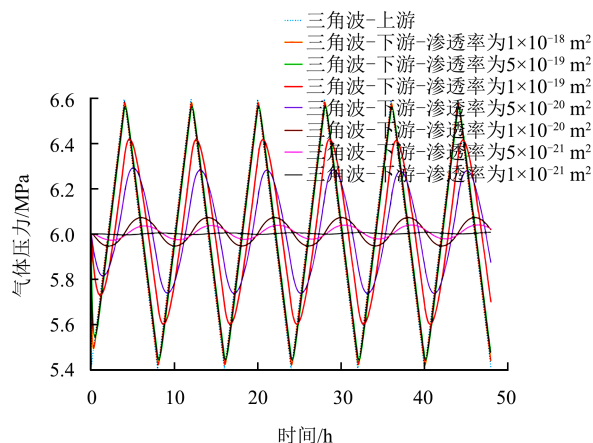
(a) 方波作用下下游气体压力响应



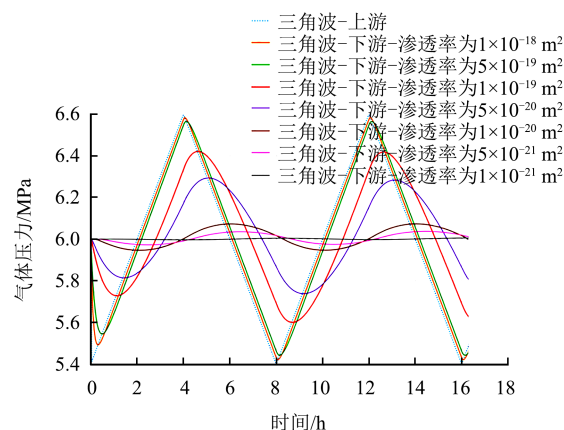
(b) 图9(a)局部放大图

图9 方波作用下下游气体压力响应

Fig.9 Pressure response downstream gas under square wave



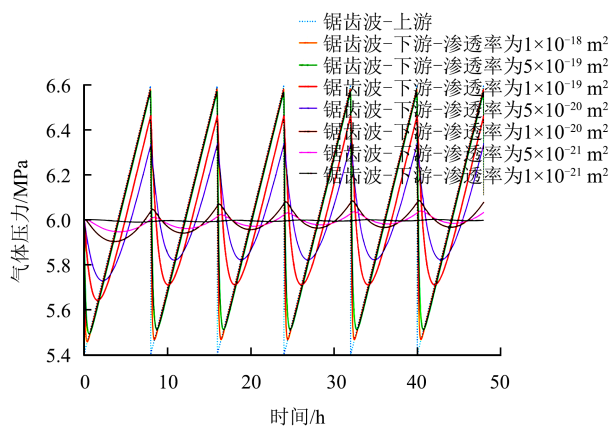
(a) 三角波作用下下游气体压力响应



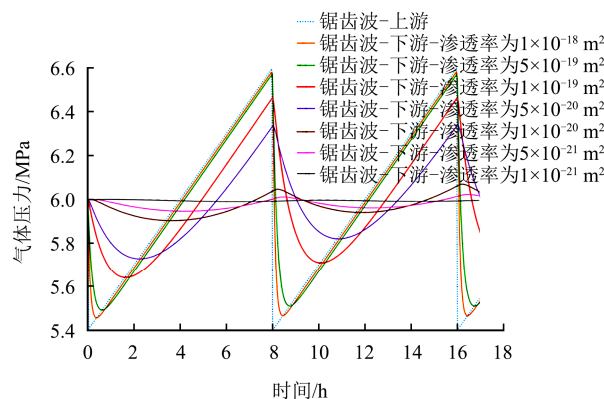
(b) 图10(a)局部放大图

图 10 三角波作用下下游气体压力响应

Fig.10 Pressure response downstream gas under triangular wave



(a) 锯齿波作用下下游气体压力响应



(b) 图11(a)局部放大图

图 11 锯齿波作用下下游气体压力响应

Fig.11 Pressure response of downstream gas under sawtooth wave

乎同步, 所得数据无效; 当试样渗透率为 $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 时, 下游气体压力响应接近直线, 此时误差较大, 需要调整周期波参数。

此处引入振幅比 η 来描述周期法渗透率测量时下游气体压力响应程度, 定义为下游气体压力响应的振幅与上游周期波振幅之比:

$$\eta = \frac{\lambda_d}{\lambda_u} \quad (10)$$

式中: η 为振幅比; λ_d 为下游气体压力响应的振幅 (MPa); λ_u 为上游周期波的振幅 (MPa)。图 12 给出了不同形式周期波作用下振幅比随渗透率的变化规律。结果表明: 试样渗透率越低, 振幅比越小, 试样下游气体压力响应越弱, 测量越困难。同一渗透率下, 振幅比由大到小依次是方波、正弦波、三角波、锯齿波, 说明上游边界条件采用方波时下游

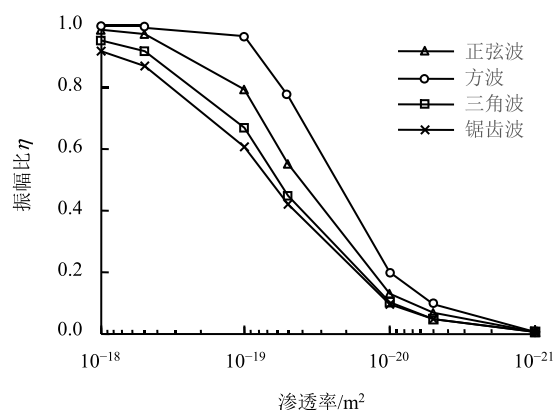


图 12 振幅比随渗透率变化的关系曲线

Fig.12 Relationships curve of amplitude ratio and permeability

气体压力响应最明显。

从前文研究可知, 下游气体压力响应的振幅在

一定范围内试验数据才有效, 振幅太大或太小都会导致渗透率测量结果不可靠。因此本文提出, 实际试验过程中, 应当控制振幅比在 0.1~0.9 之间, 方可测得有效的渗透率数据。

综上所述, 周期法测量渗透率时, 选择合适的周期波加载形式, 有利于提高测量效率。与传统正弦波相比, 其他 3 种周期波的加载形式容易实现, 而且方波在低渗透测量中更容易测得有效数据, 在实际试验中值得推广应用。

4 结 论

(1) 与脉冲法相比, 周期法渗透率测量结果几乎不受上游周期波初始相位和试样内部初始气压分布影响, 不需要初始平衡过程, 可直接进行试验, 提高了测量效率。

(2) 周期法试验中, 试样孔隙率对气体压力传递起缓冲作用, 试样孔隙率越大, 下游气体压力响应的振幅越小、相位延迟越大; 试样渗透率对气体压力传递起阻尼作用, 渗透率越小, 下游气体压力响应越不明显。周期法在低渗透测量上优势显著, 实际试验中可以通过调整周期波参数、试样尺寸、下游密闭容器体积等方法提高测量精度和效率。

(3) 下游气体压力响应形式与上游周期波形式密切相关。保持其他条件相同, 上游边界条件采用不同形式周期波时, 下游气体压力响应的振幅从大到小依次是: 方波、正弦波、锯齿波和三角波。

(4) 测量超低渗透率 ($<1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$) 时, 采用方波更容易观测到下游气体压力响应信号, 测得有效数据。与正弦周期波相比, 方波在试验过程中容易实现加载, 设备控制要求相对较低, 具有一定的推广价值。

(5) 实际试验时, 为保证测量结果有效, 一般将振幅比控制在 0.1~0.9 之间较为合适。振幅比过高时, 可适当增大周期波频率。

参 考 文 献

- [1] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(6): 2225-2236.
- [2] KRANZ R L, SALTZMAN J S, BLACIC J D. Hydraulic diffusivity measurement on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1990, 27: 345-352.
- [3] COWAN R D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(4): 926-927.
- [4] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 236-243.
CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 236-243.
- [5] 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 Jun-chang, YANG Zheng-ming, GUO He-kun, 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.
- [6] 李小春, 高桥学, 吴智深, 等. 瞬态压力脉冲法及其在岩石三轴试验中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增刊 1): 1725-1733.
LI Xiao-chun, GAO Qiao-xue, WU Zhi-shen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Suppl.1): 1725-1733.
- [7] 李小春, 王颖, 魏宁. 变容压力脉冲渗透系数测量方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2482-2487.
LI Xiao-chun, WANG Ying, WEI Ning. Research on measuring method of permeability by using storage-variable transient pulse method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2482-2487.
- [8] 王颖, 李小春, 魏宁. 变容压力脉冲法渗透系数测量技术测量范围的实验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊 1): 3113-3121.
WANG Ying, LI Xiao-chun, WEI Ning. Experimental study of storage-variable transient pulse method for permeability measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Suppl.1): 3113-3121.
- [9] 丁长栋, 张杨, 杨向同, 等. 致密砂岩高围压和高孔隙水压下渗透率演化规律及微观机理研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(9): 1-10.
DING Chang-dong, ZHANG Yang, YANG Xiang-tong, et al. Study on permeability evolution under high confining pressure and high pore pressure and

- microscopic mechanism of tight sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 1-10.
- [10] SURI P, AZEEMU M, ZAMAN M, et al. Stress-dependent permeability measurement using the oscillating pulse technique[J]. **Journal of Petroleum Science & Engineering**, 1997, 17(3-4): 247-264.
- [11] KANBE R J, WANG Y. Permeability characterization on tight gas samples using pore pressure oscillation method[J]. **Petrophysics**, 2011, 52(6): 437-443.
- [12] 吴曼, 杨晓松, 陈建业. 超低渗透率测量仪的测试标定及初步测量结果[J]. **地震地质**, 2011, 33(3): 719-735.
- WU Man, YANG Xiao-song, CHEN Jian-ye. The calibration of ultralow permeability measurement apparatus and preliminary experimental results[J]. **Seismology and Geology**, 2011, 33(3): 719-735.
- [13] 王小琼, 葛洪魁, 陈海潮. 利用周期振荡法测试超低渗透层的渗透率[J]. **岩土力学**, 2015, 36(增刊 2): 237-244.
- WANG Xiao-qiong, GE Hong-kui, CHEN Hai-chao. Ultralow permeability measurements with periodic oscillation method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.2): 237-244.
- [14] 薛华庆, 姜培学, 胥蕊娜, 等. 孔隙压力振动法渗透率测试研究[J]. **工程热物理学报**, 2016, 37(10): 2150-2154.
- XUE Hua-qing, JIANG Pei-xue, XU Rui-na, et al. Determination on permeability by pore pressure oscillation method[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2016, 37(10): 2150-2154.
- [15] HASANOV A, BATZLE M, PRASAD M. The determination of reservoir poroelastic properties from oscillating pore pressure method[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Australia: Society of Exploration Geophysicists, 2015.
- [16] YANG D, WANG W, CHEN W, et al. Revisiting the methods for gas permeability measurement in tight porous medium[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2019, 11(2): 263-276.
- [17] FISCHER G J. The determination of permeability and storage capacity: pore pressure oscillation method[J]. **International Geophysics**, 1992, 51(8): 187-211.
- [18] FISCHER G J, PATERSON M S. Measurement of permeability and storage capacity in rocks during deformation at high temperature and pressure[J]. **International Geophysics**, 1992, 51(9): 213-252.
- [18] HU D W, ZHOU H, ZHANG F, et al. Modeling of short- and long-term chemomechanical coupling behavior of cement-based materials[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2014, 140(1): 206-218.
- [19] GENS A, VAUNAT J, GARITTE B, et al. In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading: observations and interpretation[J]. **Geotechnique**, 2007, 57(2): 207-228.
- [20] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K, MARTIN C D. Modelling brittle failure of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(6): 731-741.
- [21] CORKUM A G, MARTIN C D. The mechanical behaviour of weak mudstone (opaline clay) at low stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(2): 196-209.
- [22] OLIVIER C. Poromechanics[M]. England: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [23] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- LIU He-nian. hydromechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [24] MARTIN C D, LANYON G W. Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(7-8): 1077-1088.
- [25] LANYON G W, MARSCHALL P, TRICK T, et al. Self-sealing experiments and gas injection tests in a backfilled microtunnel of the Mont Terri URL[C]//5th Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. France: Montpellier, 2012.

上接第 1064 页