

多孔介质低渗测试气体周期振荡法理论研究

王 威^{1,2,3}, 陈卫忠⁴, 杨典森⁵, 杨光华^{1,2}, 周小文³,

袁明道¹, 史永胜¹, 刘宜杰¹

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510640;
3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 4. 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;
5. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 目前, 多孔介质低渗测试主要采用高精度气体稳态法和气体脉冲衰减法, 缺少对气体周期振荡法的深入探讨和分析。基于气体周期振荡法基本原理和试验方法, 提出了 3 种基于不同控制方式模拟生成周期波气压边界条件的方法, 以及在试样上游和下游分别设置 1 个体积可调的气体储存容器的试验设备方案。基于孔隙流体介质的讨论, 将 Fischer 等提出的以不可压缩流体为渗流介质的周期法理论解, 推广到以可压缩流体为渗流介质的情况, 扩大了周期法理论解的适用范围, 并讨论了各参数之间的物理意义及其联系。基于气体周期振荡法理论解, 进行了 2 个特例分析, 优化了理论解中复杂分项的处理。通过一系列正交对照计算案例, 对比了气体周期振荡法理论解和数值解的计算结果, 讨论了渗透率、孔隙率、下游容器体积、试样直径和长度等对试验过程的影响, 验证了理论解的准确性和可靠性, 并对理论解的不足进行了说明, 在此基础上, 给出了气体周期振荡法试验的优化设计策略。

关 键 词: 气体周期振荡法; 渗透率; 储存系数; 理论研究

中图分类号: TE 319

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 07-1939-18

Theoretical study of gas periodic oscillation method for low permeability testing in porous media

WANG Wei^{1,2,3}, CHEN Wei-zhong⁴, YANG Dian-sen⁵, YANG Guang-hua^{1,2}, ZHOU Xiao-wen³,
YUAN Ming-dao¹, SHI Yong-sheng¹, LIU Yi-jie¹

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510610, China;

2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 5. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The high-precision gas steady-state method and the gas pulse decay method are widely used in the permeability measurement of tight porous media. However there is a lack of in-depth discussion and analysis of the gas periodic oscillation method (POM). The basic principle of POM is introduced, and three practical methods for simulating periodic pressure waves are proposed. Additionally, an experimental equipment scheme is recommended, which includes two adjustable gas storage containers on each side of the specimen. The theory proposed by Fischer regarding the periodic oscillation method is expanded in this study to include the scenario where the seepage medium is a compressible fluid, as opposed to only considering incompressible fluids. This extension allows for a wider range of applications for the periodic oscillation method. Additionally, the study examines the physical significance of this method and analyzes the relationships between different parameters involved. Based on the generic theoretical solution of POM, two special cases are analyzed and the treatment of some complex sub-terms is optimized. The calculation results of the theoretical and numerical solutions of POM are compared through a series of orthogonal cases, and the effects of permeability,

收稿日期: 2023-09-06

录用日期: 2024-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52108366); 中国博士后科学基金 (No. 2020M672557); 广东省水利科技创新项目 (No.2022-04)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52108366), the China Postdoctoral Science Foundation (2020M672557) and the Science and Technology Innovation Program from Water Resources of Guangdong Province (2022-04).

第一作者简介: 王威, 男, 1990 年生, 博士后, 主要从事多孔介质渗透测试和边坡工程稳定计算方面的研究工作。E-mail: growup_wei@qq.com

通讯作者: 杨典森, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 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@whu.edu.cn

porosity, downstream container volume, specimen diameter and length on the experimental process are discussed respectively. The numerical solutions are used to verify the accuracies and stabilities of the theoretical solutions, and to illustrate some shortages of the theoretical solutions. Based on the case study, a better design strategy of POM experiment is given.

Keywords: gas periodic oscillation method; permeability; storage coefficient; theoretical study

1 引 言

渗透率是衡量多孔介质渗透特性的关键参数之一,在岩土工程中应用广泛。在能源开采领域,如在煤层气的抽采中需要测量煤岩的渗透率^[1],在非常规天然气的生产过程中需要测量致密砂岩的渗透率^[2],在页岩气开采中需要测量页岩的渗透率并通过水力压裂形成压裂缝网提高储层内页岩气流动能力^[3-4]。在发展清洁能源的过程中,需要对天然气盐岩储气库中围岩的渗透率^[5]、二氧化碳地质封存中盖层的渗透率^[6]、高放射性核废料地质处置库中缓冲层和围岩的渗透率等进行测量^[7-8],相应岩土介质的渗透率越小,工程的密封性越好,工程的安全性越高。

目前对于低渗多孔介质的渗透率测量主要采用气体稳态法和气体脉冲衰减法,气体周期振荡法(periodic oscillation method,简称 POM)提出相对较迟、应用还比较少。气体稳态法设备简单、应用非常广泛,通过控制试样入口端和出口端的压力或者流量进行渗透率测量^[9],同时可以采用高精度的压力泵提高渗透率测量范围下限^[10]。Cowan^[11]基于热力学非稳态测量原理,提出了脉冲衰减法的概念,用于多孔介质热扩散系数的测量。Brace 等^[12]提出了脉冲衰减法的理论解,将其用于花岗岩的水渗透率和气体渗透率测量。随后,基于脉冲衰减法的渗透率测量理论逐渐完善^[13-15],其试验测量方法和数据处理方法更加多样^[16],实际应用包括泥岩^[17]、黏土岩^[18]和页岩^[19]等。

与脉冲衰减法相似,周期振荡法起源于热力学非稳态测量原理。Kranz 等^[20]借鉴多孔介质热扩散系数的测量方法,将周期振荡法用于砂岩和花岗岩的孔隙水扩散系数和渗透率测量,指出对不同类型的砂岩和花岗岩需要采用不同周期的正弦波。Fischer 等^[21-22]对周期振荡法的理论基础、理论解形式、数据处理方法等进行了系统研究,并与稳态法、脉冲衰减法进行了对比,将其用于大理石、石灰岩和砂岩的渗透率测量。Zhang 等^[23]使用周期振荡法研究了细粒方解石高温压制过程中试样孔隙率、渗透率以及储存系数(比储容量)等的变化过程。Suri 等^[24]使用周期振荡法研究了印第安纳石灰岩在不同三轴应力路径中的应力、应变以及渗透率演化特

征。Faulkner 等^[25]使用周期振荡法研究了组成地质断层的砂岩在不同有效应力水平下,试样水渗透特性和气体渗透特性的差异。Bernabe 等^[26]对周期振荡法进行了系统分析,指出其具有连续测量以及可同时测得试样渗透率和比储容量等优点。Wang 等^[27]将周期振荡法与稳态法和脉冲衰减法进行了比较,指出周期振荡法大大降低了孔压变化对渗透率测量结果的影响,提高了渗透率测量的灵敏度和准确性。Hasanov 等^[28]提出联合使用周期振荡法和分布式应变片进行岩石孔隙弹性属性测量的方法,测量结果包括岩石排水体积模量、Biot-Willis 系数、Skempton 系数和储水系数等。Sander 等^[29]对稳态法、脉冲衰减法、周期振荡法以及压力下降法进行了系统地分析和总结,分析了不同方法的优势和不足,指出周期振荡法的复杂性最高,但是其固有缺陷相对较少、适应性更强、发展空间较大。Yang 等^[30]系统地讨论了稳态法、脉冲衰减法和周期振荡法在多孔介质低渗透测量中应用,总结了各种方法的试验原理和数据处理方法,分析了不同方法理论解和数值解之间的差异,指出数值解的通用性更强。国内开展周期振荡法研究相对较晚,其中吴曼^[31]、王小琼^[32]、薛华庆^[33]等利用自研试验设备对砂岩、花岗岩、页岩等的渗透率进行了测量,并与稳态法、脉冲衰减法测量结果进行了对比,总结了周期振荡法的试验原理、测试方法和数据处理方法。李康等^[34]通过数值模拟研究了周期振荡法试验中试样孔隙率和渗透率对孔隙气体压力传递过程的影响,以及使用不同类型的周期波对试样下游容器气体压力变化过程的影响。

为方便不同渗透率测量方法的比较,在文献调研的基础上,现将稳态法、脉冲衰减法和周期振荡法的示意图汇总如图 1 所示,并将各种方法的优缺点总结于表 1。图 1 中, P_u 和 P_d 分别为上游和下游气体压力边界, P_0 为初始气体平衡压力, dP 为上下游气体压力差, P_e 为气体最终平衡压力, F_u 和 F_d 分别为上游和下游气体流量边界。图中将稳定法分为恒定压力控制方法(STM-I)和恒定流量控制方法(STM-II)。图中将脉冲衰减法分下游压力衰减方法(PDM-I)、上游压力衰减方法(PDM-II)和上下游压力衰减方法(PDM-III),此处压力衰减均指上下游之间的差压随时间逐渐衰减。图 1 中

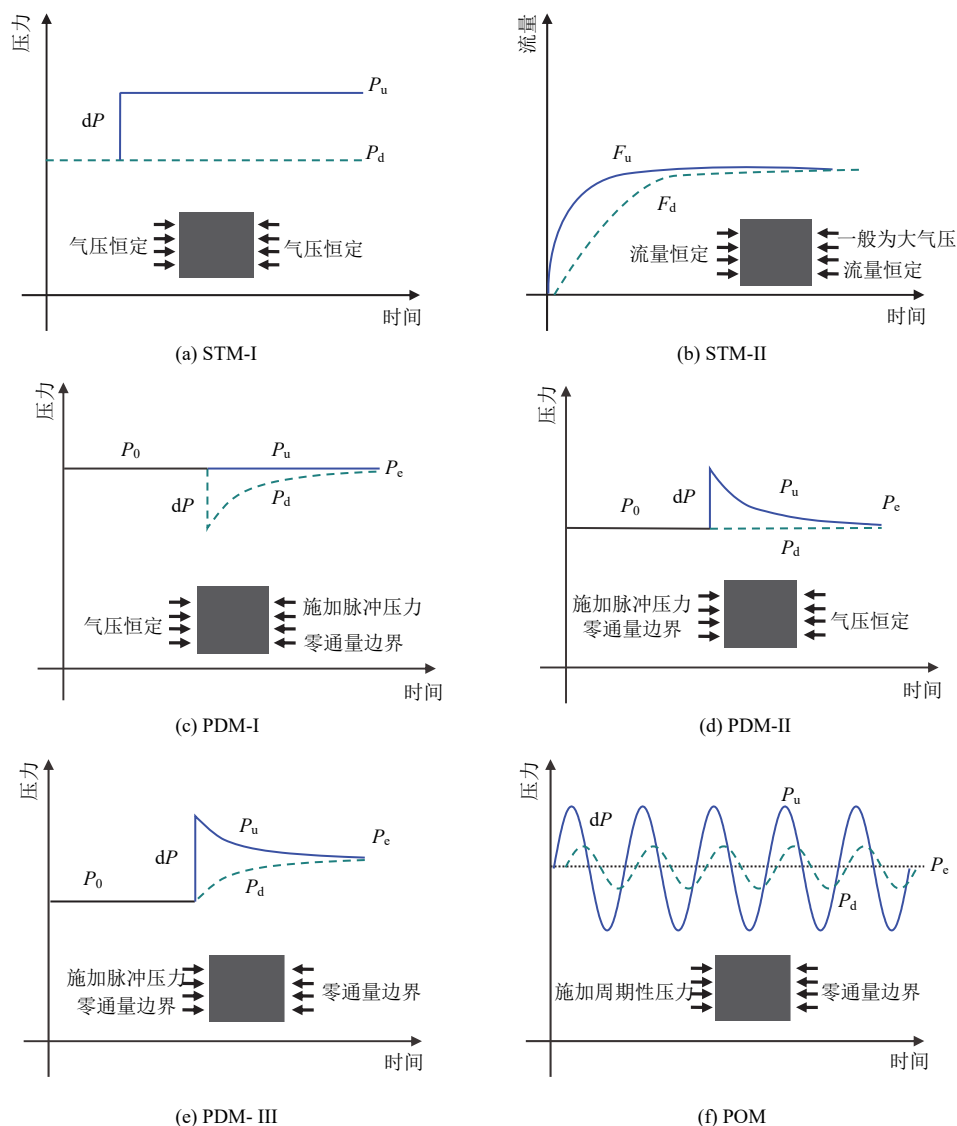


图1 多孔介质渗透率测量稳态法、脉冲衰减法和周期振荡法示意图

Fig.1 Schematic diagrams of steady-state method, pulse decay method, and periodic oscillation method for measuring the permeability of porous media

表1 多孔介质渗透率测量稳态法、脉冲衰减法和周期振荡法特征比较

Table 1 Comparison of characteristics of steady-state method, pulse decay method, and periodic oscillation method for measuring the permeability of porous media

试验方法	上游边界和气压激励	下游边界和气压响应	设备要求和应用范围	自动化程度	理论研究程度	环境影响	系统缺陷影响	渗透率范围	储存系数	测量稳定性	测量精度	测量效率	其他
稳态法	恒定气压, 或恒定流量	恒定气压, 或恒定流量	设备要求低, 应用广泛	可开展连续数据采集分析, 容易控制压力	非常成熟	难以去除, 影响偏小	难以去除	适合高渗透率范围	无法测量储存系数	稳定, 离散性低, 平衡状态容易判断	精度高, 数据简单, 可实时判断精度	效率高, 围效率低	流体用量大, 可模拟地下水流动、岩芯驱替等现象
脉冲衰减法	零通量边界加脉冲压力激励, 或恒定压力边界	零通量边界加脉冲压力响应, 或恒定压力边界	设备要求比较低, 应用广泛	每次测量需要初始压力平衡和主动施加脉冲压力, 不易控制压力	非常成熟, 各种测试形式均有理论解	难以去除, 影响比较大	难以去除	适合低渗透率范围	可以测量储存系数, 一般与孔隙率相关	一般, 离散性高, 恒定压力下初始平衡状态不容易判断	精度一般, 易受环境和系统的影响	效率较高, 流体用量小, 可测量平衡阶段和脉冲阶段用时	可测量极低渗透率范围
周期振荡法	周期性压力波激励	零通量边界加周期性压力波响应	气压驱动设备要求比较高, 应用较少	可开展连续数据采集分析, 可以控制压力	一般, 仅在特定边界条件下有理论解 (正弦波波动、设备等)	可去除一定范围的试验噪声 (环境温度波动、设备体泄露等)	可去除一定范围的试验噪声 (环境温度波动、设备体泄露等)	调节周期, 波频率可一定程度上适应高渗透率和低渗透率范围	可以测量储存系数, 一般与孔隙率相关	稳定, 离散性低, 可通过信号处理方法提高结果的稳定性	精度高, 可通过信号处理提高结果的精度	效率高, 可调节周期, 频率适应不同渗透率范围	流体用量小, 可研究气压频率相关试验现象

未将周期振荡法进行分类,然而其边界条件非常灵活,更多形式的周期振荡法边界可以参考图 2。需要注意表 1 中稳态法、脉冲衰减法的特征分析是基于其一般形式,稳态法和脉冲衰减法已有一些改进

的试验设备、试验方法以及数据分析方法,克服了其中的一些不足^[9,16,35]。在具体的渗透率测量试验过程中,可以根据试验设备条件和待研究问题选择合适的方法开展研究。

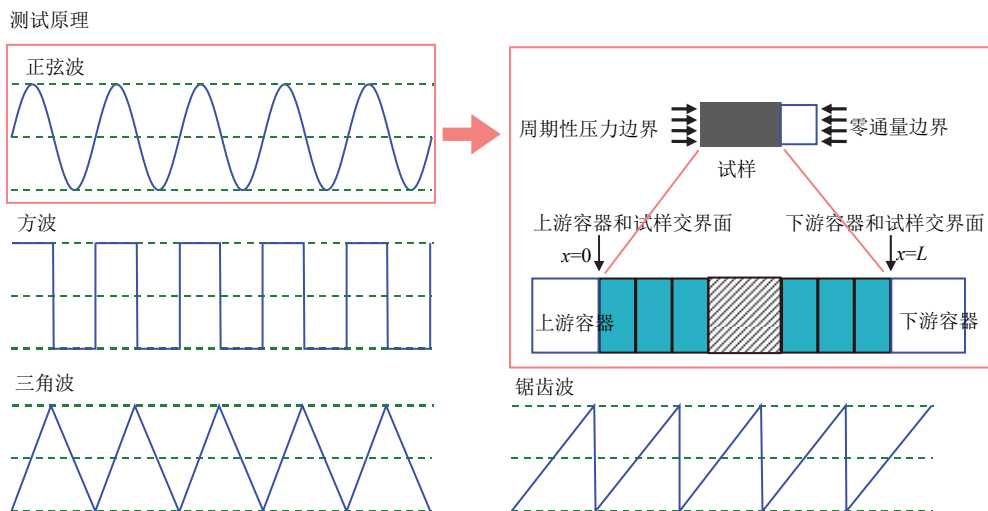


图 2 气体周期法试验原理

Fig.2 Experimental principle of gas periodic oscillation method

目前,随着试验设备的迭代更新,尤其是流体压力驱动设备的自动化水平逐渐提高,限制周期振荡法推广的关键问题逐渐得到解决,周期振荡法未来应用空间比较大,然而国内对周期振荡法的介绍、分析、计算研究仍比较少。本文首先介绍了周期振荡法的试验原理、试验设备和测试方法,讨论了不可压缩孔隙流体和可压缩流体在多孔介质中运移相关数学物理模型的关系,随后基于试验测量中广泛采用的气体渗透形式^[1,3,36],推导了周期振荡法理论解形式以及 2 个特例,最后基于 9 个局部正交的案例分析,提出了周期法渗透率测试优化设计方法,有望促进周期振荡法在多孔介质渗透测量中的应用。

2 气体周期振荡法渗透率测试原理

一般情况下,多孔介质渗透率测量试验可分为 2 种基本类型,其渗透介质分别为不可压缩流体介质和可压缩流体介质。其中不可压缩流体介质包括蒸馏水、地下水、盐溶液、酒精等,可压缩流体介质包括干燥空气、氢气、氮气、氦气、氖气、二氧化碳、甲烷等。在常温常压条件下,此处不可压缩流体介质一般指液体介质,可压缩流体介质一般指气体介质。在具体试验设计过程中,渗透介质的选择和待研究物理化学现象、核心问题等密切相关,需要考虑渗透介质与试样固体骨架之间的物理化

学作用,以及试样饱和状态、孔隙网络通道等对渗透介质流态的影响,包括可能发生的化学反应现象、吸附和解析附现象、气液驱替现象、路径扩容现象、劈裂现象、气体滑脱现象等。当采用气体介质时,如需避免气体介质和试样发生物理化学反应,可采用一种均质惰性气体;若需减少可能发生的气体泄露的影响,可采用一种分子量较大的气体;如需提高测量效率,可采用一种动态黏滞系数较低的气体;如需降低滑脱效应的影响,可采用一种分子自由程较低的气体。在具体试验设计过程中,应综合考虑上述因素的影响,从气体的惰性、均质性、储藏性和经济型考虑,一般可使用氮气进行初步试验探索。

对于低渗多孔介质,当使用液体介质作为渗透介质时,一般将试验所测渗透率记为固有渗透率,又称本征渗透率、绝对渗透率或液测渗透率,当使用气体介质作为渗透介质时,将试验所测渗透率记为气体表观渗透率,又称视渗透率或气测渗透率。在试样渗透测量前后无明显物理化学性质变化的条件下,两种渗透率的区分主要由气体滑脱效应引起,在渗透率使用过程中需特别关注,相关研究可见文献[37-39]。本文重点研究一种渗透率测量理论,对于试验过程中可能出现的物理化学现象需结合具体试验过程进行讨论;对于气体滑脱效应,需在试验测量结果的基础上,通过克式方程等计算试

样固有渗透率, 同时在理论研究中一般使用气体表观渗透率表述更加方便, 故一般不在理论研究中引入固有渗透率。

针对低渗多孔介质, 目前渗透率测量试验广泛采用气体渗透形式^[1,3,36], 本节以气体作为渗透介质, 研究周期振荡法渗透率测量的试验原理、试验设备和测试方法。为叙述方便, 文中所指渗透率除特殊说明外均指气体表观渗透率, 在不引起歧义时, 以下将脉冲衰减法简称脉冲法, 将周期振荡法简称周期法, 将孔隙气体压力简称孔隙气压或者孔压。

2.1 试验原理

一般情况下, 可将多孔介质渗透率测量方法分为稳态法和非稳态法(又称瞬态法), 其中脉冲法和周期法属于非稳态法。在一般的试验条件下, 对于低渗多孔介质, 非稳态法的渗透率测量效率和准确性优于稳态法, 同时相比液体介质, 气体介质更容易在多孔介质内进行渗透。周期法中周期波的形式包括正弦波(含余弦波)、方波、三角波、锯齿波等, 其中正弦波的研究比较成熟。本文后续基于正弦波开展研究, 并采用圆柱形试样进行轴向气体渗透试验, 如图2所示。

低渗多孔介质内孔隙气体运移过程, 一般假设符合达西定律和理想气体状态方程^[15,40]。在此基础上, 可得气体周期法的孔隙气体流动控制方程, 结合初始条件和边界条件, 可计算试样内部气压变化。

假设试验过程中试样横截面积不变, 设试样的轴向为 x 方向, 试样上游边界面为 $x=0$, 试样下游边界面为 $x=L$, 其中 L 为试样长度(m)。多孔介质孔隙气体运移控制方程表示如下^[30]:

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

$$\phi_e = \phi(1-S) \quad (2)$$

式中: k_a 为试样的表观气体渗透率(m^2); ϕ_e 为试样的有效孔隙率; P 为孔隙气压(Pa); t 为时间(s); μ 为气体动态黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$); ϕ 为试样孔隙率; S 为试样孔隙水饱和度。

设 $P(x, t)$ 为试样 x 点 t 时刻的孔隙气压, 气体周期法的初始条件($0 \leq x \leq L$)可以表示为

$$P(x, 0) = P_0 \quad (3)$$

气体周期法中上游容器处($x=0$)的边界条件为狄利克雷边界条件, 本文使用初始相位 $\delta=0$ 的正

弦波, 可表示为

$$P(0, t) = P_0 + \Delta P \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: ΔP 和 ω 分别为正弦波振幅(Pa)和角速度(rad/s)。

气体周期法中下游容器不与大气连通, 属于零通量边界, 下游容器交界面处左右两侧气体流量相同, 与脉冲法下游边界相同。考虑下游容器交界面处($x=L$)的质量交换过程, 以气体从试样内流入下游容器内为正, 基于质量守恒原理可得^[27,30]

$$\frac{dP_d}{dt} = -\frac{k_a A}{2\mu V_d} \frac{\partial P^2}{\partial x} \quad (5)$$

式中: V_d 为下游容器体积(m^3); A 为试样横截面积(m^2)。

综合以上气体周期法的控制方程、初始条件和边界条件, 通过求解相应的方程组, 可得试样内部任意一点孔隙气压变化过程, 以及任意时刻试样内部各点孔隙气压分布情况。

2.2 试验设备和测试方法

目前国内对气体周期法的研究和应用还比较少, 相关试验设备的介绍不多。气体周期法与气体脉冲法相比, 主要区别是上游边界条件不同, 气体周期法采用一个周期波气压边界。因此, 气体周期法需一套周期波信号生成系统和一套气压控制系统, 为适应周期波信号随时间逐渐变化的特点, 该气压控制系统需要有良好的PID控制设计。

为便于搭建气体周期法试验设备, 本文提出3种基于不同控制方式的模拟生成周期波气压边界条件的方法, 其中气压控制均通过高精度注射泵实现, 如图3所示。由于注射泵接受电压信号控制并同步产生特定大小的气压, 因此周期波信号生成系统的实现主要有3种方法, 其中方法1是通过电脑编程输出周期性数字信号再转电压信号; 方法2是通过示波器生成周期性电压信号; 方法3是通过特定型号的注射泵控制器进行循环状态下的多步线性内插操作设置, 模拟生成周期性电压信号。

对气体周期法而言, 注射泵的气压控制能力非常重要, 主要体现在气压控制响应速度和气压控制精度两方面。在试验状态下, 注射泵压力室的体积大小与其气压控制能力密切相关。当压力室体积较大时, 气压控制响应速度会变慢, 气压控制精度会增加; 当压力室体积较小时, 气压控制响应速度会变快, 气压控制精度会降低。为提高注射泵的气压

控制能力,可在试样上游设置一个由多个小容器并联组成的体积可调的气体储存容器,并在试验开始前进行抽真空操作,随后关闭所有小容器阀门;试验开始后,可按需打开或者关闭多个小容器阀门,

使小容器参与或者退出气压调节作用,平衡注射泵的气压控制响应速度和气压控制精度。在试验过程的任意时候,上游容器总有效体积为注射泵压力室体积、管路体积、阀门打开的小容器体积之和。

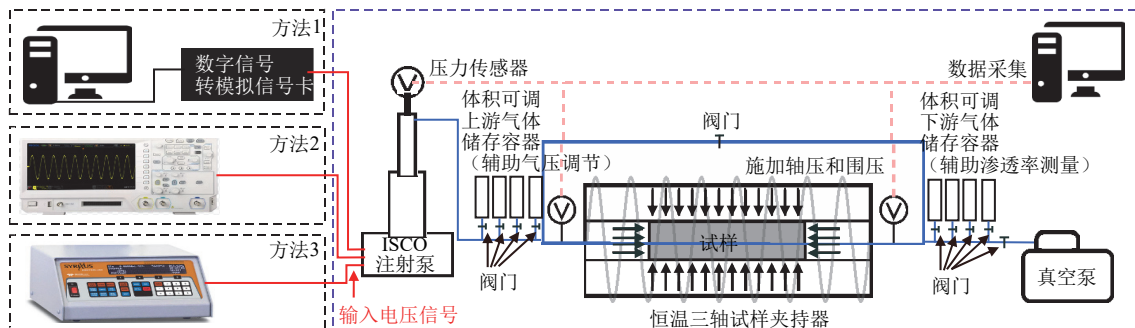


图3 气体周期法试验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment for gas periodic oscillation method

气体周期法试验过程中,试样下游容器的体积与其气压变化敏感度相关。当下游容器体积较大时,其气压变化敏感度较低,气压测量结果变化不明显;当下游容器体积较小时,其气压变化敏感度较高,气压测量结果变化比较明显。为提高试验设备对不同渗透率试样的适应性,可在试样下游设置一个由多个小容器并联组成的体积可调的气体储存容器,并在试验开始前进行抽真空操作,随后关闭所有小容器阀门。对于相同大小的试样,当渗透率较高时,可按需打开一个或多个小容器;当渗透率较低时,可按需关闭一个或多个小容器,从而调节下游容器气压变化速率。在试验过程的任意时候,下游容器总有效体积为管路体积、阀门打开的小容器体积之和。然而,由于脉冲法和周期法上游边界明显不同,脉冲法中关于试样孔隙体积与下游容器体积之间的讨论不一定适用^[16]。

气体周期法渗透率测试试验步骤。在试验开始阶段,先营造一个恒温环境,将环境温度波动对气压的影响降低到最小,这一点对于长周期渗透测量试验非常重要。将试样放入三轴夹持器中,设置一定的围压和轴压固定好试样。打开所有阀门,对气体管路、试样、上游气体储存容器(以下简称上游容器)、下游气体储存容器(以下简称下游容器)等进行抽真空操作,避免空气对试验过程的影响。关闭连接真空泵的阀门,关闭试样两端所有小容器阀门,打开连接试样上下游的阀门。将注射泵与气罐连接,设置一定的初始气压,调整当前状态下注射泵压力室体积为总体积的 $1/2 \sim 2/3$,为后续生成

周期性压力波预留调整空间。维持该压力状态一定时间,当试样内部气压达到平衡后,断开注射泵与气罐的连接,关闭连接试样上下游的阀门。在上游容器处施加周期性压力波,使用压力传感器记录上下游气压变化。随着试验的进行,在上游周期性压力波的作用下,下游容器会产生相应的周期性和脉冲性气压变化,下文将进行详细分析。在试验过程中,可根据具体情况,适当使用试样上游体积可调的气体储存容器,辅助注射泵进行气压调节;适当使用试样下游体积可调的气体储存容器,辅助下游压力传感器数据采集。

2.3 孔隙流体介质的讨论

气体周期法上游边界条件为周期性气压边界,其理论解相对复杂,相关研究比较少。Fischer 等^[21-22]以孔隙水等不可压缩流体为渗流介质,提出了周期法试样内部任一点孔隙流体压力变化理论解,在此之上得到下游容器流体压力变化理论解。目前,在周期法相关试验研究中,无论渗流介质的种类,均以 Fischer 提出的理论解为基础进行计算分析,较少讨论其理论解的来源和适用范围。然而,多孔介质孔隙水运移控制方程上是一个线性方程,多孔介质孔隙气体运移控制方程是一个非线性方程(见式(1)),两者存在一定的差异。

针对渗透介质不同引起的 Fischer 所提理论解的适用范围问题,Wang 等^[27]进行了比较全面的讨论,指出对于不同周期波频率下振幅衰减系数计算,该理论解计算结果和气体周期法试验测量结果(直接测量值)是一致的,同时对于克式渗透率计

算, 4 种压力梯度下稳态法的试验测量结果 (经过稳态法理论解计算) 和气体周期法试验测量结果 (经过周期法理论解计算) 是一致的。Wang 等^[27] 因此指出当流体介质为气体时, 如果气压变化范围不大从而保证气体密度基本不变、气体压缩性基本不变, Fischer 所提理论解是适用的; 同时, 在气体周期法试验中, 通过控制周期波振幅, 试样内部气压梯度更小, 试样应力状态更均匀, 可以避免稳态法测试时产生的较大气压梯度的影响。

从上一节可知多孔介质孔隙气体运移控制方程可以表示为式 (1)。基于达西定律和质量守恒原理, 多孔介质孔隙水运移控制方程可以表示为^[21-22,27]

$$\frac{k_w}{\beta_w \mu_w} \frac{\partial^2 P_w}{\partial x^2} = \frac{\partial P_w}{\partial t} \quad (6)$$

式中: k_w 为多孔介质孔隙水渗透率 (m^2); P_w 为孔隙水压力 (Pa); μ_w 为孔隙水动态黏滞系数 ($Pa \cdot s$); β_w 为单位体积多孔介质-孔隙水系统储存系数 (Pa^{-1})。一般认为 k_w 为多孔介质固有渗透率, β_w 为衡量多孔介质孔隙水储存能力的指标。

在周期法中限制周期性压力波的振幅 (一般不高于平衡压力的 10%), 当 P 取值较大时, 由于气体滑脱效应不明显, 一般认为孔隙水和孔隙气体的流态基本相同, 都属于连续层流。

引入单位体积试样-孔隙气体系统储存系数 β_g ($1/Pa$), 表示为

$$\beta_g = \frac{\phi_c}{P} \quad (7)$$

假设 β_w 和 β_g 计算方式相同, β_w 可表示为

$$\beta_w = \frac{\phi_c}{P_w} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (6) 可得

$$\frac{k_w}{2\mu_w} \frac{\partial^2 P_w^2}{\partial x^2} - \frac{k_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} \right)^2 = \phi_c \frac{\partial P_w}{\partial t} \quad (9)$$

由于 P 的变化范围受到限制, 去掉二阶小项 $(\partial P / \partial x)^2$ 可得

$$\frac{k_w}{2\mu_w} \frac{\partial^2 P_w^2}{\partial x^2} = \phi_c \frac{\partial P_w}{\partial t} \quad (10)$$

式 (10) 和式 (1) 形式相同。

综上, 在周期法中限制周期性压力波的振幅 (一般不高于平衡压力的 10%), 当 P 取值较大时, 引入 β_w 的计算公式, 忽略二阶小项后, 可以令多孔介质孔隙水运移控制方程和孔隙气体运移控制方程的形式相同。由于初始条件和边界条件与渗流介

质无关, 故 Fischer 提出的理论解可以适用于气体渗透试验, 该假设或可以解释文献^[27] 的主要结论 (见 2.3 节第 2 段)。

在上述推导过程中, 引入了一个关键假设, 即 β_w 和 β_g 计算方式相同, β_g 的有效性可见下文分析, β_w 的有效性和适用范围仍需要进一步试验研究, 本文不做更深入的探讨。

将 β_w 和 β_g 合称为单位体积试样-孔隙流体系统储存系数 (Pa^{-1}), 使用 β_i 表示, 物理含义为在给定的孔隙流体密度条件下, 单位孔隙流体压力增量导致的单位体积试样储存的孔隙流体体积增量与相应孔隙空间的比值。需要指出, 在理论情况下, β_w 和 β_g 表示的物理现象有明显区别, 对于不可压缩孔隙流体, β_w 表示随着孔隙流体压力增大, 试样发生变形, 试样孔隙率增加, 在给定的孔隙流体密度条件下, 计算所得试样储存孔隙流体体积增大; 对于可压缩孔隙流体, β_g 表示随着孔隙流体压力增大, 试样不发生变形, 孔隙流体密度增加, 在给定的孔隙流体密度条件下, 计算所得试样储存孔隙流体体积增大。在实际的试验过程中, β_w 和 β_g 表示的物理现象可能区别不明显。

非稳态气体渗透试验包括气体脉冲法、气体周期法以及其他方法^[29]。以气体脉冲法的理论解为例, 一般会引入气体压缩系数, 但是上述推导过程没有涉及气体压缩系数, 原因是气体压缩系数和单位体积试样-孔隙气体系统储存系数有关。在文献中, 气体压缩系数一般使用 β 表示, 本文为了与储存系数的概念进行区分, 使用 C_g 表示, 计算方式如下

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dP} \quad (11)$$

式中: C_g 为气体压缩系数 (Pa^{-1}); Z 为气体压缩因子 (Pa)。气体压缩因子 Z 属于气体固有属性, 主要与气体压力和环境温度相关, 通过气体性质参数表可插值计算。

一般在气体渗透试验中, C_g 的大小主要与第 1 项 $1/P$ 有关, 第 2 项的影响很小。事实上, 当气体满足理想气体定律时^[15], $Z=1$, $C_g = 1/P$ 。因此, 在气体脉冲法和气体周期法中, 可以将 C_g 用 $1/P$ 表示^[40]。在此基础上, 考虑试样的有效孔隙率, 从气体压缩系数可得单位体积试样-孔隙气体系统储存系数, 这种计算的物理意义非常明确。

由于上述推导过程中涉及参数较多, 为了更清晰地表示气体周期法理论中涉及的控制方程、储存系数、气体压缩系数、气体压缩因子等之间的关系, 将上述推导过程汇总到图 4 中。

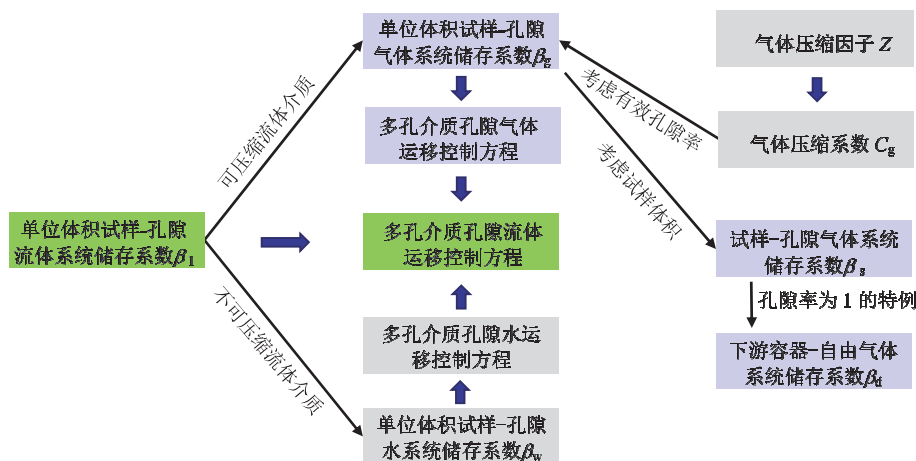


图 4 气体周期法相关控制方程、储存系数以及气体压缩系数等关系图

Fig.4 Relationship diagram of governing equations, storage coefficients and gas compression coefficient associated with gas periodic oscillation method

3 气体周期振荡渗透率测试理论解

基于气体周期法试验原理,当试验系统达到初始气压平衡后,切断上下游容器之间的通路,在试样上游施加一个周期性压力波,试样内部气压将会随之发生变化。根据叠加原理,试样内部气压变化

规律主要受两个激励因素的影响,一个激励因素是上游周期性压力波产生的试样内部周期性孔隙气压变化,另一个激励因素是突然改变上游气压产生的试样内部脉冲性孔隙气压变化,后者随着试验进行会逐渐减弱,直到可以忽略其影响。

图 5 为气体周期法理论解研究框架。

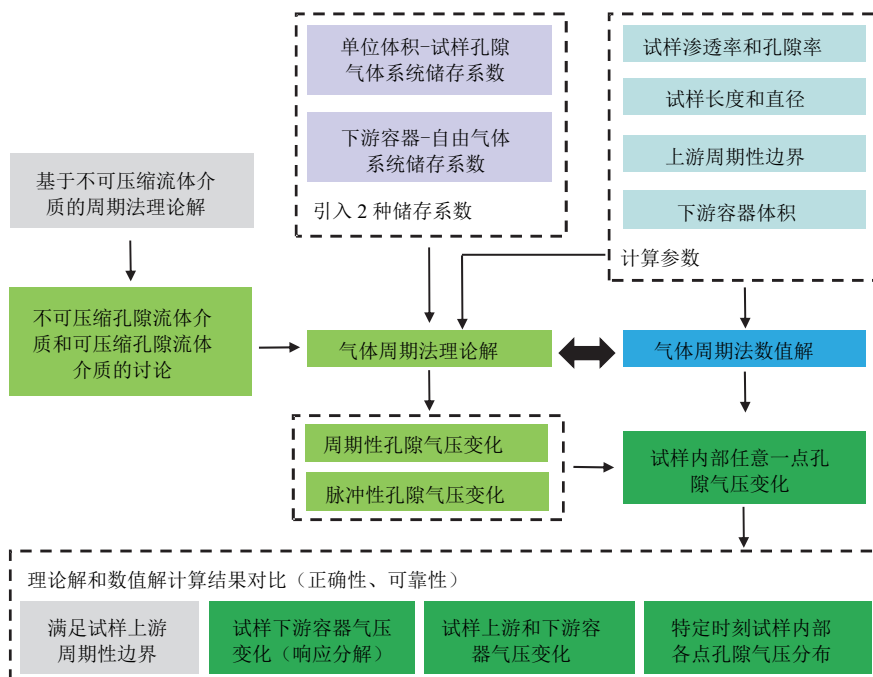


图 5 气体周期法理论解研究框架

Fig.5 Analysis framework for theoretical solutions of gas periodic oscillation method

3.1 试样孔隙气压变化理论解

基于正弦波压力边界条件,设定其初始相位为 0,分析试样孔隙气压变化理论解。基于 Fischer 等^[21-22]提出的以孔隙水等不可压缩流体为渗流介质的周

期法理论解,结合上节孔隙流体介质的讨论,将其推广到以孔隙气体等可压缩流体为渗流介质的情况。

假设试样渗透率和孔隙率已知,试验过程中试

样 x 点处孔隙气压随时间 t 的变化规律 $P(x, t)$ 可以表示为

$$P(x, t) = P_{\text{periodic}}(x, t) + P_{\text{pulse}}(x, t) \quad (12)$$

式中: P_{periodic} 为试样 x 点处周期性孔隙气压变化 (Pa); P_{pulse} 为试样 x 点处脉冲性孔隙气压变化, 以下分别进行讨论。

3.1.1 周期性孔隙气压变化

试样 x 点处周期性孔隙气压变化方程可以表示为

$$P_{\text{periodic}}(x, t) = P_0 + \alpha(x) \Delta P \sin[\omega t - \theta(x)] \quad (13)$$

式中: $\alpha(x)$ 为试样 x 点处正弦波幅值比; $\theta(x)$ 为试样 x 点处正弦波相位延迟 (rad), 又称相位移。

为方便计算 $\alpha(x)$ 和 $\theta(x)$, 在试样 x 点处引入一个无量纲复数变量 $N(x)$, 表示如下:

$$\left. \begin{aligned} N(x) &= \frac{N_1(x)}{N_2(x)} \\ N_1(x) &= \zeta(1+i) \cosh[\zeta(1+i)(L-x)] + \frac{\beta_d i \omega}{KA} \sinh[\zeta(1+i)(L-x)] \\ N_2(x) &= \zeta(1+i) \cosh[\zeta(1+i)L] + \frac{\beta_d i \omega}{KA} \sinh[\zeta(1+i)L] \\ \zeta &= \sqrt{\frac{\omega \beta_g}{2K}} \\ K &= \frac{k_a}{\mu} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: β_d 为下游容器-自由气体系统储存系数 (m^3/Pa); ζ 为孔隙气压变化周期相关参数 (m^{-1}); K 为试样渗透特性相关参数 ($\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$)。 K 在 FLAC^{3D} 手册中称为迁移渗透率 (mobility permeability), 在渗透率测量试验中使用较少, 此处形式和文献[21-22]保持一致。其他参数表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \beta_s &= AL\beta_g \\ \beta_d &= \frac{V_d}{P_0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: β_s 为试样-孔隙气体系统储存系数 (m^3/Pa)。

$N(x)$ 的直接计算比较繁琐, 但可以直观地表示 $\alpha(x)$ 和 $\theta(x)$ 为

$$\alpha(x) = \text{abs}[N(x)] \quad (16)$$

$$\theta(x) = -\arg[N(x)] \quad (17)$$

式中: $\alpha(x)$ 的计算范围为 0 到 1 之间; $\theta(x)$ 的计算范围为 0 到 2π 之间。本文在 $\theta(x)$ 计算式右侧添加了

负号以保持符号平衡^[21]。由此可知对试样内部任意一点 x , $N(x)$ 和 $\alpha(x)$ 、 $\theta(x)$ 在极坐标系内一一对应, 将 $N(x)$ 求出后, 代入周期性孔隙气压变化方程可得

$$P_{\text{periodic}}(x, t) = P_0 + \text{abs}[N(x)] \Delta P \times \sin\{\omega t + \arg[N(x)]\} \quad (18)$$

3.1.2 脉冲性孔隙气压变化

试样 x 点处脉冲性孔隙气压变化可以表示为

$$P_{\text{pulse}}(x, t) = 2\Delta PK \beta_g^2 AL^3 \omega \Phi(x, t) \quad (19)$$

式中: $\Phi(x, t)$ 为试样 x 点处孔隙气压衰减过程。

$\Phi(x, t)$ 可以表示为级数形式:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{n,1}(x)}{\Phi_{n,2}(x)} \psi_n^2 e^{-K \psi_n^2 t / (\beta_g L^2)} \\ \Phi_{n,1}(x) &= \cos(\varepsilon \psi_n) - \frac{\beta_d \psi_n}{\beta_g AL} \sin(\varepsilon \psi_n) \\ \Phi_{n,2}(x) &= (K^2 \psi_n^4 + \beta_g^2 L^4 \omega^2) \times \\ &\quad [(\beta_d \psi_n^2 - \beta_g AL) \cos \psi_n + (\beta_g AL + 2\beta_d) \sin \psi_n] \\ \varepsilon &= 1 - \frac{x}{L} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: ε 为归一化坐标; ψ_n 为级数项系数。

ψ_n 为下述方程的正实数解

$$\psi = \arctan\left(\frac{\beta_g AL}{\beta_d \psi}\right) \quad (21)$$

式 (21) 为一个隐式方程, 从中可知的解主要受试样直径、长度、孔隙率、饱和度、下游容器体积等影响, 与多孔介质的渗透率、正弦波的角速度和振幅等无关, 下文将讨论其求解方法和解的特性。将求出后, 可得试样内部脉冲性孔隙气压变化。

综合试样内部周期性孔隙气压变化和脉冲性孔隙气压变化, 可得试样内部任意一点的孔隙气压变化过程, 以及任意时刻试样内部各点孔隙气压分布状态。此处给出气体周期法理论解及其计算流程, 如图 6 所示。

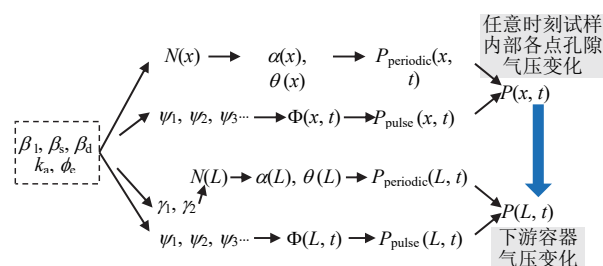


图6 上游边界条件为正弦波时气体周期法理论解计算流程图
Fig.6 Flowchart for calculating theoretical solution of gas periodic oscillation method using a sine wave as the upstream boundary condition

3.2 理论解的 2 个特例

基于试样内部任意一点的孔隙气压变化过程, 可得试样上游边界面以及试样下游边界面的气压变化过程, 其中前者应和上游边界条件匹配, 后者应和试验测量结果匹配。

3.2.1 试样上游边界面气压变化过程

作为气体周期法理论解的特例之一, 将 $x=0$ 代入式 (12) 可得

$$P(0,t) = P_{\text{periodic}}(0,t) + P_{\text{pulse}}(0,t) \quad (22)$$

由于 $N(0)=1$, 因此 $P_{\text{periodic}}(0,t)=P_0+\Delta P \sin(\omega t)$ 。同时, 由于级数项系数 ψ 的解方程 $\psi - \arctan(\beta_g AL / \beta_d \psi) = 0$ 的左侧, 正好是脉冲性孔隙气压变化中级数项分子的一部分, 因此每一个级数项均为 0, 可得 $P_{\text{pulse}}(0,t)=0$ 。由此可知, 气体周期法理论解中试样上游边界面处的孔隙气压变化, 仅受周期性气压变化影响, 不受脉冲性气压变化影响, 可表示为

$$P(0,t) = P_0 + \Delta P \sin(\omega t) \quad (23)$$

式 (23) 和上游边界条件式 (4) 相同, 因此气体周期法理论解在 $x=0$ 处是有效的。

3.2.2 试样下游边界面气压变化过程

作为气体周期法理论解的另一个特例, 将 $x=L$ 代入周期性孔隙气压变化方程, 对 $N(x)$ 进行化简可得

$$\left. \begin{aligned} N(L) &= \frac{N_{L1}}{N_{L2}} \\ N_{L1} &= \zeta(1+i) \\ N_{L2} &= \zeta(1+i) \cosh[\zeta(1+i)L] + \frac{\beta_d i \omega}{KA} \sinh[\zeta(1+i)L] \\ \alpha(L) &= \text{abs}[N(L)] \\ \theta(L) &= -\arg[N(L)] \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: $N(L)$ 为试样下游边界面处无量纲复数变量; $\alpha(L)$ 为相应的正弦波幅值比; $\theta(L)$ 为相应的正弦波相位延迟。

将 $N(L)$ 化简可得

$$\left. \begin{aligned} N_{L1} &= 1 \\ N_{L2} &= \cosh[\gamma_1(1+i)] + \gamma_1 \gamma_2 (1+i) \sinh[\gamma_1(1+i)] \\ \gamma_1 &= \zeta L = \sqrt{\frac{\omega \beta_g}{2K}} L = \sqrt{\frac{\mu \omega \beta_g}{2k_a}} L \\ \gamma_2 &= \frac{\beta_d}{AL \beta_g} = \frac{\beta_d}{\beta_s} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: γ_1 和 γ_2 为替换参数, 其中 γ_1 与孔隙气压变化周期相关, γ_2 为下游容器-自由气体系统储存系数与试样-孔隙气体系统储存系数之比。

将 $x=L$ 代入脉冲性孔隙气压变化方程, 对 $\Phi(x,t)$ 进行化简可得

$$\left. \begin{aligned} \Phi(L,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_{n,1}}{\Phi_{n,2}} \psi_n^2 e^{-K \psi_n^2 t / \beta_s L^2} \\ \Phi_{n,1} &= 1 \\ \Phi_{n,2} &= (K^2 \psi_n^4 + \beta_s^2 L^4 \omega^2) [(\beta_d \psi_n^2 - \beta_s AL) \cdot \cos \psi_n + (\beta_s AL + 2\beta_d) \sin \psi_n] \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中: $\Phi(L,t)$ 为试样下游边界面处级数项。

将 $N(L)$ 和 $\Phi(L,t)$ 代入式 (12), 可得试样下游边界面处气压变化过程

$$\left. \begin{aligned} P(L,t) &= P_{\text{periodic}}(L,t) + P_{\text{pulse}}(L,t) \\ P_{\text{periodic}}(L,t) &= P_0 + \alpha(L) \Delta P \sin[\omega t - \theta(L)] \\ P_{\text{pulse}}(L,t) &= 2\Delta P K \beta_s^2 AL^3 \omega \Phi(L,t) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式 (27) 即为试样下游边界面处气压变化过程理论解。通过与试验采集的下游容器气压变化数据进行对比, 可作为多孔介质渗透性相关参数反演计算的理论基础。

4 气体周期振荡法渗透率测试优化设计

目前气体周期法的试验数据比较少, 基于试验数据开展系统研究比较困难。为对气体周期法进行系统研究, 开展气体周期振荡法渗透率测试优化设计, 基于图 3 所示试验装置, 设计了一系列计算案例, 将其汇总于表 2。通过开展一系列理论解和数

表 2 气体周期法理论解和数值解计算案例参数表

Table 2 Parameters of calculation cases adopted in theoretical and numerical solutions of gas periodic oscillation method

案例	$k_d/(10^{-20} \text{m}^2)$	$\phi_c/1$	$V_d/(10^{-6} \text{m}^3)$	L/m	D/m
C1	1.0	0.050	10	0.02	0.050
C2	10.0	0.050	10	0.02	0.050
C3	0.1	0.050	10	0.02	0.050
C4	1.0	0.100	10	0.02	0.050
C5	1.0	0.025	10	0.02	0.050
C6	1.0	0.050	15	0.02	0.050
C7	1.0	0.050	5	0.02	0.050
C8	1.0	0.050	10	0.05	0.050
C9	1.0	0.050	10	0.10	0.050
C10	1.0	0.050	10	0.02	0.025
C11	1.0	0.050	10	0.02	0.100

注: D 为直径。

值解计算, 对计算结果进行了对比分析, 验证了理论解的可靠性和准确性, 以及理论解的不足之处, 并提出了相应的渗透率测试优化设计建议。气体周期法的数值模拟方法和实现可以参考文献[34,40]。

4.1 计算案例

气体周期法试验涉及参数较多, 本次案例研究采用局部正交对照设计。以案例 C1 为基础, 首先考虑了多孔介质固有属性即渗透率和有效孔隙率的影响, 其次考虑了下游容器体积的影响, 最后分析了试样长度和直径的影响, 通过与案例 C1 进行对比, 基本可以确定各对照参数的独立影响。模拟环境温度为, 使用氮气作为孔隙流体, 氮气的动态黏滞系数根据环境温度和气体初始平衡压力确定。试验中上游周期波边界条件采用相同的正弦波, 本次不考虑上游边界条件变化对试验过程的影响。试

验中气体初始平衡压力为 6 MPa, 振幅为 0.6 MPa, 初始相位为 0, 周期为 8 h, 总计算时间为 6 个周期。

气体周期法试验中, 下游容器气压变化过程是最重要的测量数据之一, 也是开展试样渗透特性分析的基础。同时, 试验中试样内部各点孔隙气压分布状态与试样渗透特性密切相关, 可以用来衡量相关渗透理论的准确性, 然而孔隙气压分布状态很难进行直接测量, 目前研究还比较少。基于上述计算案例, 本次使用理论解和数值解对此进行了研究, 并对理论解中无穷级数项的计算方法进行了分析。

首先基于计算案例相关参数, 采用下游容器气压变化理论解式(27), 分别计算周期性气压变化和脉冲性气压变化, 再通过叠加计算得到下游容器气压变化。为方便计算和分析, 将一些重要的理论解中间值计算结果汇总在表 3 中。

表 3 气体周期法理论解计算结果

Table 3 Results of theoretical solution of gas periodic oscillation method

案例	储存系数			周期性孔隙气压变化					脉冲性孔隙气压变化		
	$\beta_l/(\text{Pa}^{-1})$	$\beta_d/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1})$	$\beta_g/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1})$	γ_1	γ_2	$N(L)$	$\alpha(L)$	$\theta(L)$	ψ_1	ψ_2	ψ_3
C1	8.33×10^{-9}	3.27×10^{-13}	1.67×10^{-12}	0.824	5.09	$(-0.011\ 3-0.133\text{i})$	0.133	1.66	0.56	3.16	6.29
C2	8.33×10^{-9}	3.27×10^{-13}	1.67×10^{-12}	0.261	5.09	$(0.637-0.492\text{i})$	0.805	0.657	0.56	3.16	6.29
C3	8.33×10^{-9}	3.27×10^{-13}	1.67×10^{-12}	2.61	5.09	$(-0.007\ 43+0.001\ 57\text{i})$	0.007\ 6	3.35	0.56	3.16	6.29
C4	1.67×10^{-8}	6.56×10^{-13}	1.67×10^{-12}	1.17	2.55	$(-0.036-0.117\text{i})$	0.122	1.87	0.69	3.18	6.29
C5	4.17×10^{-9}	1.64×10^{-13}	1.67×10^{-12}	0.583	10.2	$(0.003\ 8-0.138\text{i})$	0.138	1.54	0.451	3.15	6.29
C6	8.33×10^{-9}	3.27×10^{-13}	2.50×10^{-12}	0.824	7.64	$(-0.011\ 8-0.090\ 3\text{i})$	0.091\ 1	1.7	0.493	3.15	6.29
C7	8.33×10^{-9}	3.27×10^{-13}	8.33×10^{-13}	0.824	2.55	$(0.008\ 56-0.245\text{i})$	0.245	1.54	0.69	3.18	6.29
C8	8.33×10^{-9}	8.18×10^{-13}	1.67×10^{-12}	2.06	2.04	$(-0.034\ 7-0.015\ 1\text{i})$	0.037\ 8	2.73	0.736	3.19	6.3
C9	8.33×10^{-9}	1.64×10^{-12}	1.67×10^{-12}	4.12	1.02	$(0.000\ 422+0.004\ 85\text{i})$	0.004\ 87	4.8	0.891	3.24	6.31
C10	8.33×10^{-9}	8.18×10^{-14}	1.67×10^{-12}	0.824	20.4	$(-0.006\ 59-0.034\ 6\text{i})$	0.035\ 2	1.76	0.361	3.15	6.28
C11	8.33×10^{-9}	1.31×10^{-12}	1.67×10^{-12}	0.824	1.27	$(0.089\ 8-0.4\text{i})$	0.41	1.35	0.839	3.22	6.3

4.2 理论解无穷级数项计算分析

下游容器气压变化理论解式(27)形式比较复杂, 通过分块计算再整合的方式可以降低计算复杂性。其中, 周期性气压变化计算比较直观, 脉冲性气压变化的计算过程比较复杂, 需要求解无穷级数项系数 ψ_n 和脉冲变化过程 $\Phi(L, t)$ 。对于 ψ_n , 可以使用图解法或者数值求根算法计算。其中使用数值求根算法时, 可以使用的现成算法很多, 如 Mathematica 中 FindRoot 函数、scipy 函数库中 optimize.fsolve 函数、sympy 函数库中 dsolve 函数等, 其成功求解的关键是给 ψ_n 设置恰当的初始值。 ψ_n 的初始值一般可以设为 $\tan \psi_n = 0$ 时候的解, 即 $\psi_n = n\pi$, 其中 n 为自然数。

图解法求解 ψ_n 的情况如图 7 所示。图中各交点即为 ψ_n 前 4 项的值, 由于篇幅有限, 此次只展示案例 C1 (C2 和 C3 与 C1 相同)、C4 和 C5 的计算结

果, 其他案例的计算结果与此高度相似。表 3 中列出了各计算案例 ψ_n 前 3 项的值, 从表中可以看出, 除第 1 项外, 其他项的值都是高度相似的, ψ_n 解的这种特性跟求解曲线形状变化相关, 可见图 7 中各曲线交点位置变化情况。一般情况, 只需要计算 ψ_n 前 1 项或者前 2 项值, 即可满足计算要求, 下文将进行详细分析。

4.3 下游容器气压变化分析

上游周期波边界条件采用相同的正弦波, 气体周期法下游容器气压变化如图 8 所示。其中, 理论解可分别计算周期性气压变化和脉冲性气压变化, 数值解只能直接计算气压变化。图中蓝色实线表示周期性气压变化和前 2 项脉冲性气压变化的叠加, 橙色虚线表示周期性气压变化情况, 4 条圆点标记的虚线分别表示考虑前 1 项、前 2 项、前 3 项、前

9 项脉冲性气压变化情况。从图中总体可知, 周期性气压变化在下游容器气压变化中占主导, 随着时间推移, 脉冲性气压变化将逐渐消失。同时可知, 对脉冲性气压变化影响最大的是第 1 项和第 2 项, 第

3 项及以后各项的影响几乎可以忽略不计, 因此在使用理论解过程中, 可以直接使用数值求根算法, 并将 ψ_n 前 2 项的初始值分别设为 0 和 π , 得到 ψ_1 和 ψ_2 用于后续计算分析。

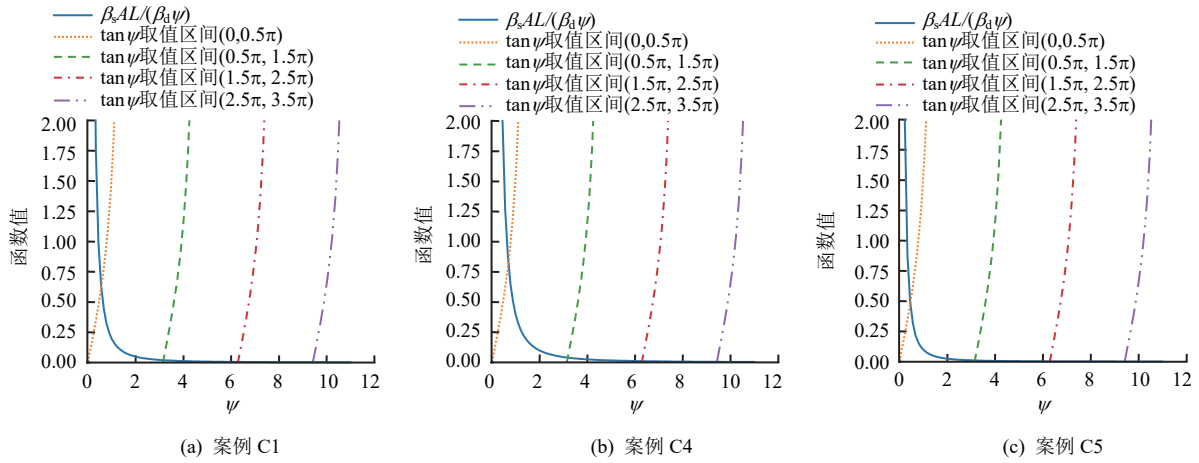


图 7 无穷级数项系数计算图解法

Fig.7 Graphical solutions of coefficients of infinite series terms

案例 C1、C2 和 C3 研究试样渗透率对下游容器气压变化的影响。图 8(a)为案例 C1 的计算结果, 从中可知, 脉冲性气压变化在试验起始阶段影响较大, 随后影响快速降低。图 8(b)为案例 C2 的计算结果, 此时渗透率较大, 周期性气压变化幅值比较大、相位延迟较低, 几乎可以忽略脉冲性气压变化的影响。图 8(c)为案例 C3 的计算结果, 此时渗透率较小, 周期性气压变化幅值非常小、相位延迟非常高, 脉冲性气压变化的持续时间更长, 同时其不同级数项之和出现了明显的分叉, 考虑前 1 项的曲线仍为典型的脉冲衰减变化, 考虑前 2 项、前 3 项的曲线则表现出衰减先快速增大再缓慢增大, 直到和考虑前 1 项的曲线重合并逐渐缓慢衰减, 该现象说明前 1 项高估了试验开始时的初始脉冲效应 (注意此时渗透率较小), 其他级数项对此进行了一定的修正。该脉冲性气压变化曲线的分叉现象在案例 C8 和 C9 中同样出现, 案例 C8 和 C9 增大了试样长度, 说明当试样渗透性总体较小时, 下游容器脉冲性气压变化更复杂。此外, 需要注意案例 C3、C8 和 C9 中前 2 项、前 3 项、前 9 项修正后的脉冲性气压变化曲线起始部分低于 0, 说明脉冲性气压效应从上游容器传递到下游容器的过程中, 其变化大小不是单调的, 该现象还需要进一步研究。

案例 C1、C4 和 C5 研究试样有效孔隙率对下游容器气压变化的影响。图 8(d)和 8(e)分为案例 C4 和 C5 的计算结果, 比较可知当有效孔隙率较大,

周期性气压变化的幅值比较低、相位延迟较高, 脉冲性气压变化的影响较大、持续时间较长, 说明试样的孔隙空间起到了更明显的气压缓冲作用。

案例 C1、C6 和 C7 研究下游容器体积对下游容器气压变化的影响。图 8(f)和 8(g)分为案例 C6 和 C7 的计算结果, 比较可知下游容器体积越小, 下游容器作为一个自由气体储存系统的气压缓冲作用越不明显, 对上游边界气压变化越灵敏, 导致周期性气压变化的幅值较大、相位延迟较低, 脉冲性气压变化的影响较大、持续时间则较短。

案例 C1、C8 和 C9 研究试样长度对下游容器气压变化的影响。图 8(h)和 8(i)分为案例 C8 和 C9 的计算结果, 比较可知随着试样长度增加, 周期性气压变化幅值比明显变小、相位延迟明显增大, 脉冲性气压变化影响更大、持续时间更长, 说明试样长度对下游容器气压变化影响非常显著。

案例 C1、C10 和 C11 研究试样直径对下游容器气压变化的影响。图 8(j)和 8(k)分为案例 C10 和 C11 的计算结果, 比较可知当试样直径越大, 周期性气压变化的幅值比越大、相位延迟越小, 脉冲性气压变化的影响更大、持续时间则更短。

上游周期波边界条件采用相同的正弦波, 气体周期法理论解和数值解计算下游容器气压变化对比情况如图 9 所示。图中蓝色实线为上游气压边界, 橙色实线为理论解计算下游容器气压变化, 绿色实线为数值解计算下游容器气压变化。图 9(a)~9(k)分

别表示案例 C1~C11, 图中上游气压边界相同, 从中可以清晰地看出各案例中不同控制变量对下游容器气压变化整体结果的影响。在试验过程中, 考虑压力传感器的精度大小, 下游容器气压应在 4~6 个周期内发生比较明显的周期性变化, 保证采集数据的准确性, 同时由于采集数据有明显周期性特征, 通过一些信号处理方法, 采集数据的可靠性很高。

图 9 显示在试验初始阶段, 理论解和数值解存在一定差异, 随着时间的推移, 理论解和数值解的吻合

度越来越高。其中, 数值解计算曲线均从初始平衡气压位置开始, 变化过程更平缓, 理论解计算曲线则从一个突变点开始, 同时注意到, 理论解曲线总处于数值解曲线之下, 在试验初始阶段该现象更加明显。案例 C3 和 C9 表明, 当试样渗透性非常低时, 理论解和数值解之间的差异会一直存在同时越来越明显, 其数值解计算结果存在随时间缓慢增大的趋势, 该原因可能是试样渗透性非常低时, 试样内部气压分布存在一定的累积滞后效应 (见图 10)。

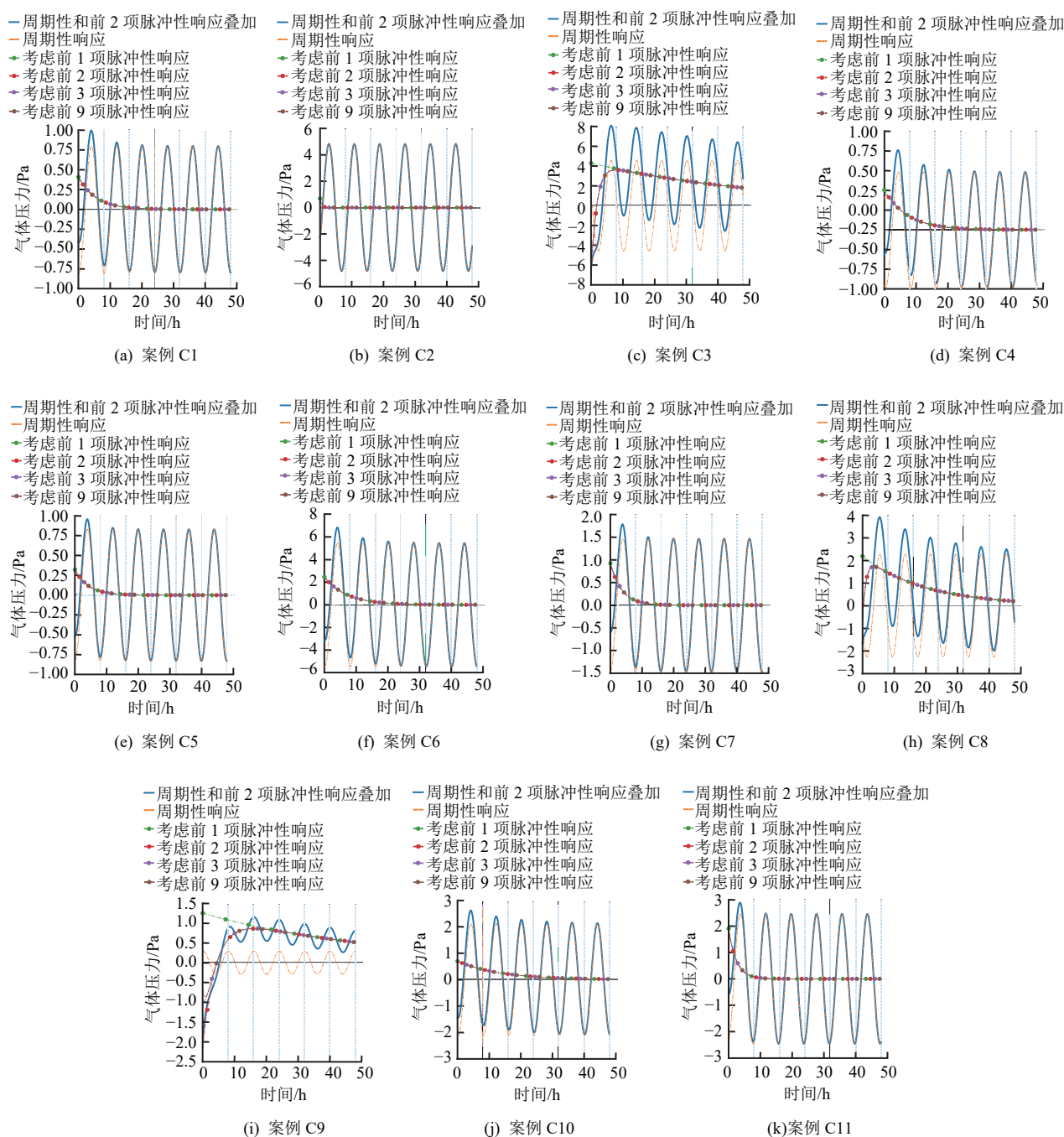


图 8 气体周期法下游容器周期性和脉冲性气压变化 (周期性部分已减去初始平衡气压)

Fig.8 Periodic and impulsive gas pressure response of downstream reservoir in gas periodic oscillation method (The initial equilibrium gas pressure has been subtracted from the periodic part)

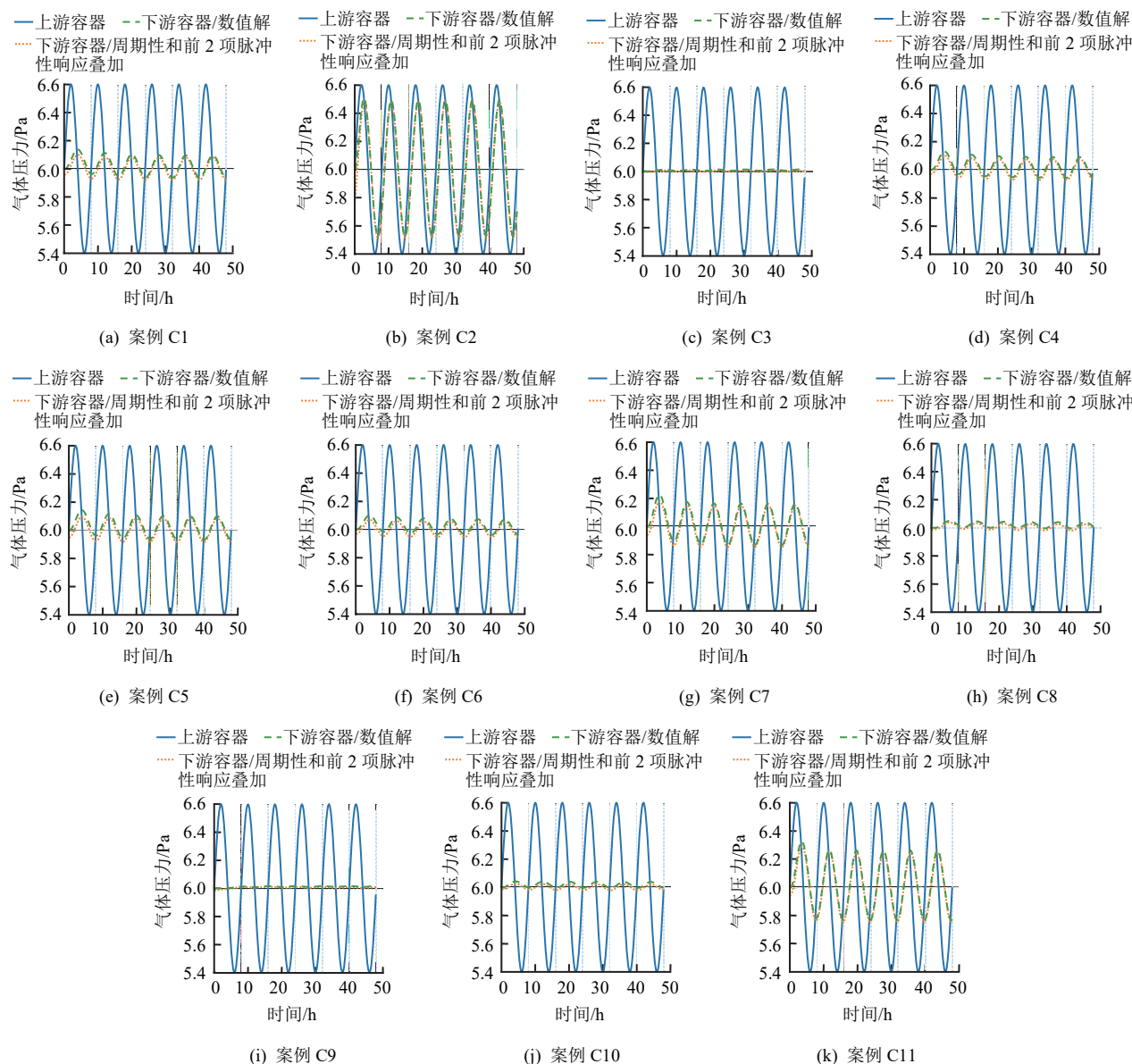


图9 气体周期法下游容器气压变化理论解和数值解对比

Fig.9 Comparison of theoretical and numerical solutions of downstream reservoir gas pressure response in gas periodic oscillation

总体而言,理论解和数值解均反映了气体周期法的试验原理,体现了试验过程中下游容器周期性和脉冲性气压变化的叠加效果,基本验证了理论解的准确性和可靠性。由于数值解引入的假设较少,因此数值解的曲线更符合实际情况,而理论解推导过程中引入了一些近似假设,在试验初始阶段理论解的计算结果略有不足。

4.4 试样内部气压分布分析

试样内部任意一点孔隙气压变化过程是相关渗透理论的核心,在此之上可得试样内部各点孔隙气压分布状态变化,但在试验过程中直接测量气压分布难度较高,对试验设备、试样长度、直径和渗透性等要求较高。然而,通过理论解和数值解可以计算试验过程中试样内部气压分布状态变化,用来

衡量理论解的可靠性和准确性。

图10为试验结束时试样内部气压分布状态的理论解和数值解计算结果。图中蓝色实线表示理论解计算结果,橙色实线表示数值解计算结果。由于此时脉冲性气压变化几乎可以忽略(见图8),故理论解只考虑了周期性气压变化。从图中可知,理论解和数值解总体保持一致,其中曲线左侧起点(试样上游边界面)气压大小与上游边界条件保持一致,两者区别不大,曲线右侧终点(试样下游边界面)气压大小存在一定差异,此处数值解受网格尺寸和气压增量计算阈值的影响,数值解曲线有一点波动。

从图10可知,试样内部各点孔隙气压分布是不均匀的,试样上游各点气压分布差异较大,说明在上游边界条件作用下各点气压变化更迅速,试样

下游各点气压分布差异则比较小。需要注意的是，案例 C8 和 C9 的试样长度与其他案例不同，其中案例 C9 曲线右侧各点的气压分布接近水平，说明各点气压变化非常小，体现在下游容器气压变化非常弱，如图 9(i)所示。同时可知，当试样渗透率较高或者有效孔隙率较低时（案例 C2 和 C5），试样内

部各点气压分布接近线性分布。值得注意的是，图 10 中试样内部各点孔隙气压分布情况在一定程度上反映了下游容器周期性气压变化相位延迟的大小，从中可知，各案例相位延迟均小于 2π ，即试样内部各点气压分布是一个周期内各影响因素作用的结果。

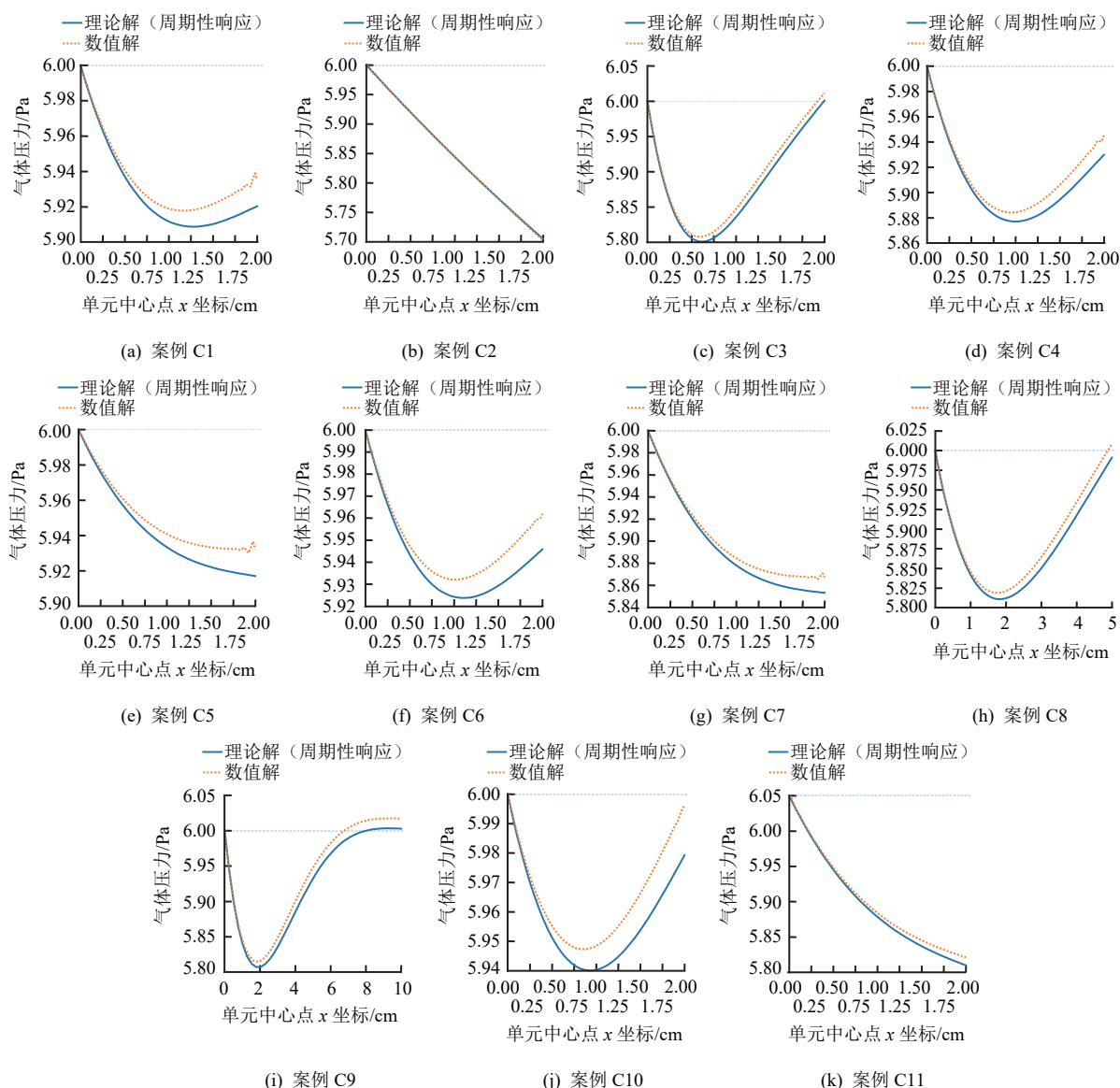


图 10 气体周期法试验结束时试样内部气压分布理论解和数值解对比

Fig.10 Comparison of theoretical and numerical solutions of pore gas pressure distribution inside the sample at the end of gas periodic oscillation method

综合上述分析，对于气体周期法渗透率测试，渗透率、有效孔隙率、下游容器体积、试样长度和直径都会影响下游容器气压变化。对于特定试样，其渗透率和有效孔隙率是固定的，需要协调其他影响因素将下游容器气压变化控制在一定范围内，保证测量结果的准确性和可靠性。其中，影响最显著的做法是调整试样长度，同时依据本文提出的体积

可调的气体储存容器设计方案，可以适当调整下游容器体积，此外可以调整正弦波的周期和振幅大小，但需要控制正弦波的振幅与初始平衡气压的比值大小，保证气体周期法理论解的适用范围。

5 结 论

基于多孔介质孔隙气体运移理论，介绍了气体

周期法的试验原理、试验设备和测试方法,讨论了不可压缩流体介质和可压缩流体介质的区别和联系,扩大了周期法理论解的适用范围,给出了试样内部任意一点孔隙气压变化理论解,并分析了理论解的 2 个特例,最后通过 1 组计算案例,对理论解进行了全面对比分析,在此之上提出了气体周期法渗透率测试优化设计建议,主要结论如下:

(1) 为简化气体周期法试验设备搭建,基于注射泵的气压控制机制,提出了 3 种采用不同控制方式模拟生成周期波的方法;为提高试验设备上游边界气压控制能力,提高下游容器气压采集数据的准确性,增强对试样渗透率的适应性,提出了在试样上游和下游分别设置 1 个体积可调的气体储存容器的试验设备方案。

(2) 在孔隙流体介质的讨论中,指出在周期法中限制周期性压力波的振幅(一般不高于平衡压力的 10%),当孔压取值较大时,可将 Fischer 等提出的以不可压缩流体为渗流介质的周期法理论解,推广到以可压缩流体为渗流介质的情况,扩大周期法理论解的适用范围。需要指出,此处引入的单位体积试样-孔隙水系统储存系数的有效性和适用范围仍需要进一步试验研究。讨论了单位体积试样-孔隙水系统储存系数、单位体积试样-孔隙气体系统储存系数、试样-孔隙气体系统储存系数、下游容器-自由气体系统储存系数、气体压缩系数、气体压缩因子等的物理意义及其联系,在此之上简化了气体周期法理论解形式。

(3) 基于气体周期法理论解,将试样内部各点孔隙气压变化过程分为周期性孔隙气压变化过程和脉冲性孔隙气压变化过程,总结了两个过程的计算方法,通过退化为上游边界条件的特例 1 验证了理论解在上游边界的有效性,指出退化为下游容器气压变化过程的特例 2 是进行试验数据反演计算的基础。

(4) 基于 1 组局部正交的计算案例,提出了理论解无穷级数项的图解法和数值求根法,指出只需要计算前 1 项或者前 2 项级数和即可满足计算要求,开展了 11 个案例的下游容器气压变化计算和试样内部气压分布计算,依次分析了渗透率、有效孔隙率、下游容器体积、试样直径和长度等对理论解中周期性气压变化和脉冲性气压变化的影响,以及对试验结束时试样内部气压分布状态的影响,对比了理论解和数值解的计算结果,验证了理论解的可靠性和准确性,指出数值解计算结果更符合实际情况,理论解在试验初始阶段的计算结果略有不足。

(5) 为保证气体周期法渗透率测试效果,需要平衡各影响因素,比较方便的方法包括调整试样长度、下游容器体积、正弦波的周期、正弦波的振幅(一般不高于平衡压力的 10%)等,可参照文中各个案例的计算结果进行试验设计和参数优化。

参 考 文 献

- [1] 段淑蕾,李波波,李建华,等.含水煤岩渗透率演化规律及动态滑脱效应的作用机制[J].岩石力学与工程学报,2022,41(4):798-808.
DUAN Shu-lei, LI Bo-bo, LI Jian-hua, et al. Permeability evolution of water-bearing coal considering dynamic slippage effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(4): 798-808.
- [2] 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制[J].岩土力学,2019,40(9):3300-3308.
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): 3300-3308.
- [3] YANG D S, WANG W, CHEN W Z, et al. Experimental investigation on the coupled effect of effective stress and gas slippage on the permeability of shale[J]. **Scientific Reports**, 2017, 7(1): 44696.
- [4] 考佳玮,金衍,付卫能,等.深层页岩在高水平应力差作用下压裂裂缝形态实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1332-1339.
KAO Jia-wei, JIN Yan, FU Wei-neng, et al. Experimental research on the morphology of hydraulic fractures in deep shale under high difference of in-situ horizontal stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(6): 1332-1339.
- [5] 杨春和,王同涛.深地储能研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(9):1729-1759.
YANG Chun-he, WANG Tong-tao. Advance in deep underground energy storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [6] 许雅琴,张可霓,王洋.基于数值模拟探讨提高咸水层CO₂封存注入率的途径[J].岩土力学,2012,33(12):3825-3832.
XU Ya-qin, ZHANG Ke-ni, WANG Yang. Numerical investigation for enhancing injectivity of CO₂ storage in

- saline aquifers[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3825-3832.
- [7] LIU J F, MA S J, NI H Y, et al. Quantitative two/three-dimensional spatial characterization and fluid transport prediction of macro/micropores in Gaomiaozi bentonite[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2022, 14(5): 1568-1579.
- [8] LIU J F, WU Y, CAI C Z, et al. Investigation into water retention and gas permeability of opalinus clay[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2018, 77(5): 213.
- [9] 刘江峰, 倪宏阳, 浦海, 等. 多孔介质气体渗透率测试理论、方法、装置及应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2021, 40(1): 137-146.
- LIU Jiang-feng, NI Hong-yang, PU Hai, et al. Test theory, method and device of gas permeability in porous media and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(1): 137-146.
- [10] BOULIN P, BRETONNIER P, GLAND N, et al. Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media[J]. **Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies Nouvelles**, 2012, 67(3): 387.
- [11] COWAN R D. Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures[J]. **Journal of Applied Physics**, 1963, 34(4): 926-927.
- [12] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. **Journal of Geophysical Research (1896-1977)**, 1968, 73(6): 2225-2236.
- [13] HSIEH P A, TRACY J V, NEUZIL C E, et al. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks—I. theory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(3): 245-252.
- [14] NEUZIL C E, COOLEY C, SILLIMAN S E, et al. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks—II. application[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(3): 253-258.
- [15] DICKER A I, SMITS R M. A practical approach for determining permeability from laboratory pressure-pulse decay measurements[C]//International Meeting on Petroleum Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1988.
- [16] JONES S C. A technique for faster pulse-decay permeability measurements in tight rocks[J]. **SPE Formation Evaluation**, 1997, 12(1): 19-25.
- [17] YANG Y, APLIN A C. Permeability and petrophysical properties of 30 natural mudstones[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2007, 112(B3): 1-14.
- [18] FEDOR F, HÁMOS G, JOBBIK A, et al. Laboratory pressure pulse decay permeability measurement of Boda Claystone, Mecsek Mts., SW Hungary[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2008, 33(1): 45-53.
- [19] 张闯, 任松, 吴斐, 等. 循环荷载下含层理页岩渗透特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2022, 43(3): 649-658.
- ZHANG Chuang, REN Song, WU Fei, et al. Experimental study on the permeability characteristics of laminated shale under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 649-658.
- [20] KRANZ R L, SALTZMAN J S, BLACIC J D. Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1990, 27(5): 345-352.
- [21] FISCHER G J. The determination of permeability and storage capacity: pore pressure oscillation method[M]. [S. l.]: Academic Press, 1992.
- [22] FISCHER G J, PATERSON M S. Measurement of permeability and storage capacity in rocks during deformation at high temperature and pressure[M]. [S. l.]: Academic Press, 1992.
- [23] ZHANG S, PATERSON M S, COX S F. Porosity and permeability evolution during hot isostatic pressing of calcite aggregates[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1994, 99(B8): 15741-15760.
- [24] SURI P, AZEEMUDDIN M, ZAMAN M, et al. Stress-dependent permeability measurement using the oscillating pulse technique[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 1997, 17(3): 247-264.
- [25] FAULKNER D R, RUTTER E H. Comparisons of water and argon permeability in natural clay-bearing fault gouge under high pressure at 20°C[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2000, 105(B7): 16415-16426.
- [26] BERNABÉ Y, MOK U, EVANS B. A note on the oscillating flow method for measuring rock permeability[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(2): 311-316.
- [27] WANG Y, KNABE R J. Permeability characterization on

- tight gas samples using pore pressure oscillation method[J]. **Petrophysics**, 2011, 52(6): 437-443.
- [28] HASANOV A, BATZLE M, PRASAD M. The determination of reservoir poroelastic properties from oscillating pore pressure method[M]. [S. l.]: [s. n.], 2015.
- [29] 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 and Engineering**, 2017, 37: 248-279.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 李康, 王威, 杨典森, 等. 周期振荡法在低渗透测量中的应用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1086-1094.
- LI Kang, WANG Wei, YANG Dian-sen, et al. Application of periodic oscillation method in low permeability measurement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 1086-1094.
- [35] FENG R, HARPALANI S, PANDEY R. Evaluation of various pulse-decay laboratory permeability measurement techniques for highly stressed coals[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50: 297-308.
- [36] 亓宪寅, 李家卓, 王威. 基于不同方向模量损失率的含瓦斯煤各向异性渗透模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 635-643.
- QI Xian-yin, LI Jia-zhuo, WANG Wei. An anisotropic permeability model of coal containing methane based on different directional modulus reduction ratios[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 635-643.
- [37] KLINKENBERGE L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. **Drilling and Production Practice**, 1941: 200-213.
- [38] JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone)[J]. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, 2009, 48(8): 16-21.
- [39] DARABI H, ETTEHAD A, JAVADPOUR F, et al. Gas flow in ultra-tight shale strata[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2012, 710: 641-658.
- [40] LIU M M, CHEN Y F, WEI K, et al. Interpretation of gas transient pulse tests on low-porosity rocks[J]. **Geophysical Journal International**, 2017, 210(3): 1845-1857.