

工程岩体渗流演化原位评价：理论模型、装备研制与现场先导性试验

刘江峰*, 赵一旭, 王志鹏, 倪宏阳, 马士佳, 孙瑞年

(中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 工程尺度下岩体的原位渗透率评测对于深部能源开采和深部能源物质封储(如储碳、储氢和储废)具有重要意义, 更能真实反映岩体在原位赋存环境下的渗流特性。研究推导一种适用于工程尺度岩体原位渗透率计算的理论模型, 系统分析影响渗透率计算结果的关键参数, 重点探讨有效测试半径的确定方法及其敏感性特征。通过模拟原位工况下的工程尺度测试, 并与岩心尺度结果进行对比, 发现两者渗透率测试结果差异整体控制在3倍左右。这种差异主要与岩心尺度所施加的0.8 MPa围压效应, 以及模型浇筑过程中局部气泡引发的连通孔隙和微裂缝结构有关, 属于合理可接受范围, 验证该理论模型与测试方法的可行性与准确性。在此基础上, 依托自主研发的便携式原位气体渗透率测试装备, 分别在某地下实验室、山东某煤矿煤巷及岩巷开展现场先导性试验。结果表明, 该方法及成套技术在不同工程场景下表现出良好的适应性、稳定性与可重复性, 可有效评估岩体渗透特性及注浆效果。研究成果为深部储层可采性及深部能源物质封储屏障系统密封性原位评价提供一种新的技术路径和理论支撑。

关键词: 岩石力学; 工程岩体; 深部能源开采; 深部能源物质封储; 气体渗透率; 原位评价

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2026)02-0366-15

*通信作者: 刘江峰(1984-), 现任教授, 主要从事低渗岩体渗流力学方面的研究工作。E-mail: jeafliu@hotmail.com

In-situ evaluation of gas permeability in engineering rock masses: Theoretical model, equipment development and field pilot testing

LIU Jiangfeng*, ZHAO Yixu, WANG Zhipeng, NI Hongyang, MA Shijia, SUN Ruinian

(State Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In-situ permeability evaluation of rock masses at the engineering scale is crucial for deep energy extraction and subsurface energy material sequestration, including CO₂, hydrogen, and nuclear waste storage. Compared to laboratory-scale tests, this approach more accurately reflects the seepage behavior of rocks under their original in-situ conditions. This study proposes a theoretical method for calculating the in-situ gas permeability of rock masses at the engineering scale, systematically analyzing key parameters that influence permeability results. Special emphasis is placed on determining and conducting sensitivity analyses of the effective testing radius. Through simulated engineering-scale permeability tests under in-situ conditions and comparative analysis with core-scale results, it is observed that permeability values differ by no more than a factor

收稿日期: 2025-08-20; **修回日期:** 2025-10-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474155); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20240107); 中央高校青年教师科研创新能力支持项目(SRICSPYF-ZY2025043)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52474155), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK20240107) and Scientific Research Innovation Capability Support Project for Young Faculty (Grant No. SRICSPYF-ZY2025043)

of three. This discrepancy is primarily attributed to the confining pressure of 0.8 MPa applied during core-scale tests and the presence of interconnected pores and microcracks induced by local air bubbles during the casting process. Based on these findings, a series of pilot field tests were conducted in a deep underground laboratory and in both coal and sandstone roadways of a coal mine in Shandong Province, utilizing a self-developed portable in-situ gas permeability testing system. The results demonstrate that the proposed method and integrated system exhibit strong adaptability, stability, and repeatability across diverse engineering scenarios, thereby facilitating effective evaluation of rock mass permeability and grouting effectiveness. This research offers a novel technical pathway and theoretical foundation for the in-situ assessment of reservoir exploitability and the sealing performance of barrier systems in deep subsurface energy material sequestration projects.

Key words: rock mechanics; engineering rock mass; deep energy extraction; deep subsurface energy material sequestration; gas permeability; in-situ evaluation

***Corresponding author:** LIU Jiangfeng (1984 -), professor, is engaged in research on seepage mechanics of low-permeability rock masses. E-mail: jeafliu@hotmail.com

1 引言

随着深地、深海和深空(简称“三深”)目标的不断推进,尤其在“双碳”目标的驱动下,作为深部能源开采和深部能源物质封储(如储碳、储氢和储废)的关键指标,岩体渗流特性作为衡量储层可采性及屏障密封性能的关键参数,对于指导工程实践至关重要^[1-3]。在岩心尺度方面,刘江峰等^[4]前期推导了基于压力演化和流量监测的 4 种稳态法和压力脉冲法(瞬态法)。然而,现有的取样和室内测试基本上都是在解除原位应力与赋存环境条件下开展的,难以真实再现岩体周围的真实赋存环境,导致测试结果在实际应用中的适用性受限^[5]。尽管部分研究尝试通过在室内施加应力、温度与渗流边界条件等手段来模拟原位环境,但受限于试验规模、加载方式与控制精度等因素,仍难以完全复现真实地下复杂环境下岩体渗流行为的演化规律。

对于工程岩体渗流力学,亟需突破现有研究局限,在微观尺度、岩心尺度和工程尺度,特别是原位尺度,开展系统的基础理论、试验方法和工程技术研究,为深部能源开采和能源物质封储提供更为可靠的理论依据和技术支持,具有重要的科学价值与工程应用前景。

总体而言,工程尺度岩体渗流测试原理与室内岩心渗流测试类似,可分为稳态法和瞬态法(又称压力脉冲法)。其中,稳态法一般在恒定压差下测量通过样品的稳定流量,以计算渗透率;而瞬态法则通过瞬时施加压差后,利用压力衰减方程求解渗透率。

值得指出的是,目前更为普遍的是采用近似稳态法求解,即通过压力衰减采用稳态法计算^[4],当然该方法需要一定的前提条件,这里就不详细阐述。从流体介质角度来说,一般采用水或者气体。目前,压水法、抽水法和示踪试验等已广泛应用于水利和能源工程等,用于评价岩体的水力学特征和透水能力^[6-9]。然而,对于富含黏土矿物(如蒙脱石)的岩体,水与岩体可能发生物理化学反应,进而影响测试结果的准确性。

对于气体渗透率测试,通常采用惰性气体作为介质,以避免气体与岩体材料发生化学反应。根据测试方式的不同,原位气体渗透率测试可分为钻孔测试和无损测试。前者通过预先钻孔构建测试空间,是当前研究与应用的主要形式;后者通过探针直接接触岩体,扰动小,但测试范围有限,通常应用于浅层材料的渗透性评估^[10-12]。此外,依据渗流路径的差异,原位气体渗透率测试还可分为正压注气法(或钻孔注气法)与负压抽气法(或钻孔抽气法)^[13-18]。二者渗流机制基本一致,但正压法在操作上更为便捷,而负压抽气的研究多集中在煤层领域,用于评价煤层中瓦斯的渗流特性^[14-15, 18]。

本文提出了一种适用于一般岩性的工程岩体的原位气体渗透率测试方法。该方法在前期所建立的岩心尺度近似稳态法中入口端压力梯度模型基础上^[4],将其推广至工程尺度,构建了一个基于压力梯度的一维稳态径向渗流理论模型。与传统稳态法相比,该方法仅需监测孔内压降情况,即可计算压力梯度与渗透率,无需配备高精度流量控制装置与稳压系统,从而显著简化测试系统。在渗流测试中,

相较于流量信号，压力响应更为灵敏，计算结果更稳定，并在一定程度上缩短测试时间，提高测试效率和准确度。

为验证所提方法的可靠性，本文首先基于所推导的一维稳态径向渗流理论模型，研制了一套便携式原位气体渗流测试装置及配套的数据分析软件。随后，开展室内验证试验，采用尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm 的大尺度浇筑岩样，模拟工程尺度条件下的气体渗透率测试，并将测试结果与岩心尺度的渗透率数据进行了对比分析。在此基础上，进一步在某地下实验室与山东某矿区巷道开展了现场工程应用测试。现场结果表明，该测试方法在不同场景下均表现出良好的可操作性、稳定性与工程适用性，具有较高的实用价值。

2 工程岩体渗透率原位测试原理

2.1 理论推导

图 1 展示当前工程岩体原位渗流测试方法的分类及技术演化路径，该体系在节 1 中已作简要说明。本文聚焦于其中基于钻孔测试的正压注气法，作为开展气体渗流特性原位评测的核心技术路线。

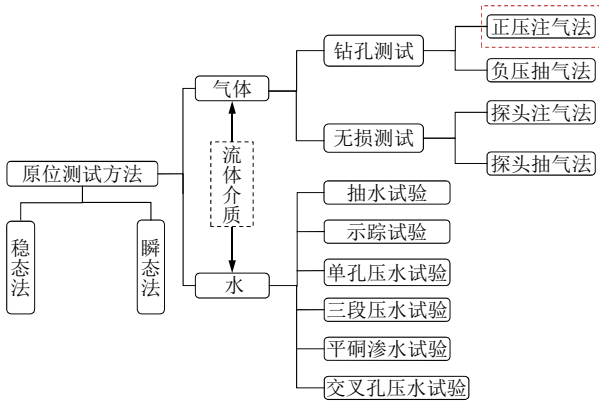


图 1 工程岩体渗流演化原位评测方法体系

Fig.1 In-situ evaluation system for fluid flow evolution in engineering rock masses

通过将岩心渗透率测试和工程尺度岩体渗透率测试进行对比(见图 2)，可发现二者在压力边界条件上具有高度一致性：均为注入端施加压力，沿渗流路径逐渐衰减至大气压(岩心测试)或趋近于区域孔隙压力(岩体测试)。

然而，二者的渗流路径不同：岩心测试气体是沿试样的轴向(长度方向)流动，而原位测试气体则是沿钻孔径向地质体中扩散。因此，在构建工程

岩体气体渗透率原位测试的理论模型时，需要重点解决 2 个问题：其一是积分边界条件的转化(轴向→径向)；其二是气体扩散范围的确定。

基于上述分析，本文在岩心尺度近似稳态法理论框架基础上系统推导了原位气体渗透率测试理论模型。

(1) 稳态法控制方程建立

如图 2 所示，气体经由注气管注入试验区域后，首先填充整个密封空间，随后在压差作用下开始向岩体内部沿径向向四周扩散。根据气体质量守恒方程，在忽略源汇项(无气体生成或消耗)且假设系统稳定的前提下，可建立如下控制方程：

$$\nabla(\rho \cdot v) = 0 \tag{1}$$

式中： ρ 为气体密度(kg/m³)， v 为气体渗流速度(m/s)， $\nabla(\rho \cdot v)$ 为单位体积内的质量通量变化率。

假设气体满足理想气体状态方程，即

$$PV = nRT \tag{2}$$

式中： P 为气体压力(Pa)， V 为气体体积(m³)， n 为物质的量(mol)， R 为气体常数(8.314 J/(mol·K))， T 为绝对温度(K)。

根据物质的量、质量和摩尔质量间的关系，以及质量、体积和密度的关系可进一步得

$$\rho = \frac{PM}{RT} \tag{3}$$

将该状态方程代入气体质量守恒表达式，并结合达西定律：

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \tag{4}$$

式中： k 为岩体渗透率(m²)； μ 为气体黏度(Pa·s)； ∇P 为压力梯度，即单位长度上的压力变化率。

将式(3)，(4)代入式(1)，可将式(1)简化为

$$\Delta P^2 = 0 \tag{5}$$

式中： Δ 为拉普拉斯算子。

(2) 稳态径向渗流模型推导

原位测试中，由于钻孔两端被密封塞隔断，气体主要通过钻孔从孔内向外扩散，构成“径向流”，整个渗流场退化为仅依赖“ r ”方向的变量。在圆柱坐标系中，式(5)可简化为一维径向形式：

$$\frac{d^2 P^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP^2}{dr} = 0 \tag{6}$$

为方便计算将式(6)改写为以下形式：

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rP \frac{dP}{dr} \right) = 0 \tag{7}$$

将式(7)径向积分后化简可得

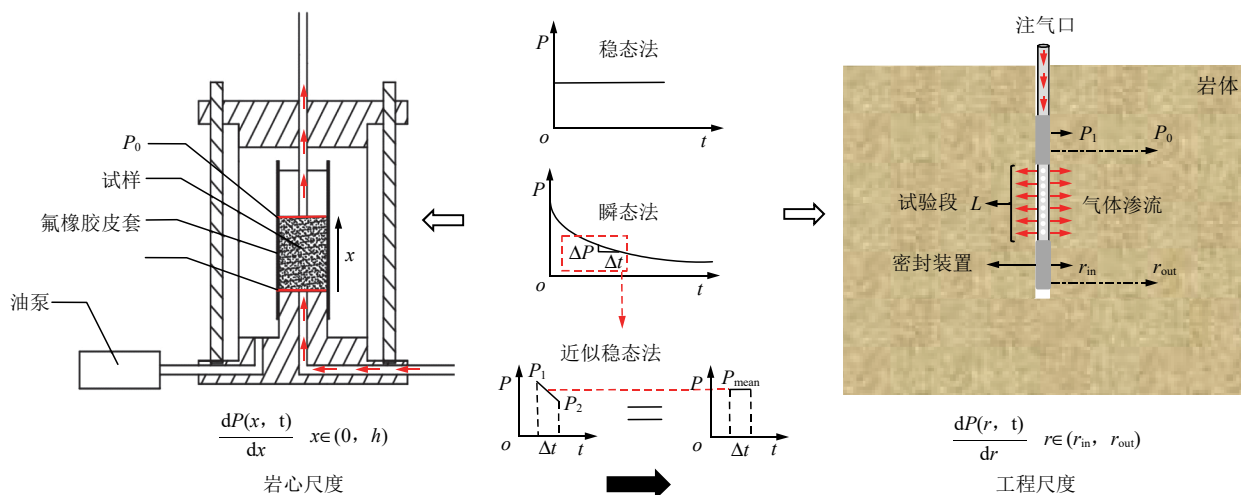


图 2 气体渗透率测试从岩心尺度推广到工程尺度示意图

Fig.2 Schematic diagram of scaling gas permeability tests from core to engineering scale

$$\frac{dP}{dr} = \frac{C}{rP} \quad (8)$$

式中：C 为积分常数，r 为距钻孔中心的径向距离 (m)。再对式(8)进行调整后等号两边进行积分：

$$\int PdP = \int \frac{C}{r} dr \quad (9)$$

由式(9)可得 P² 的解析解：

$$P^2 = C_1 \ln r + C_2 \quad (10)$$

式中：C₁，C₂ 为积分常数。

(3) 边界条件代入

稳态法测试过程中压力边界条件为 P|r_{in} = P₁，P|r_{out} = P₀。然而在工程尺度实测中发现，传统稳态法存在一定局限。该方法依赖稳压装置以维持恒定入口压力，并需借助高精度流量计获取稳定流量，从而导致测试系统复杂度较高。此外，入口压力为人为设置，难以确保在面对不同渗透性的岩体时均能建立稳定流动状态，若需多次试错则会导致较高的时间成本。

针对上述问题，近似稳态法提供了有效解决思路。试验开始时向孔内注入压力大小为 P₁ 的气体，经过 Δt 时间后试验段内气体压力下降 ΔP，当 Δt 非常小时，下降 ΔP 相对于 P₁ 可以忽略不计，这个区间可以近似为稳态(见图 2)，因此试验段内平均气体压力可表示为

$$P_{mean} = \frac{P_1 + P_1 - \Delta P}{2} = P_1 - \frac{\Delta P}{2} \quad (11)$$

其渗流过程可等效为入口端压力为 P_{mean} 的稳态过程，式(1)~(10)自动满足。

设试验段孔壁即 r_{in} 处气体压力为 P_{mean}；距试验段轴心 r_{out} 处孔隙压力为 P₀；由此可得近似稳态

法的边界条件 P|r_{in} = P_{mean}，P|r_{out} = P₀。将其代入式(10)可得

$$C_1 = \frac{P_{mean}^2 - P_0^2}{\ln r_{in} - \ln r_{out}} \quad (12)$$

$$C_2 = P_{mean}^2 - \frac{P_{mean}^2 - P_0^2}{\ln r_{in} - \ln r_{out}} \ln r_{in} = P_{mean}^2 - C_1 \ln r_{in} \quad (13)$$

(4) 近似稳态法渗透率计算公式推导

对于近似稳态法，试验段内气压经过 Δt 时间下降 ΔP，可由理想气体状态方程得

$$\Delta n = \frac{\Delta P V_0}{RT} \quad (14)$$

式中：Δn 为试验段中减少的气体物质的量(mol)，V₀ 为试验段有效体积(m³)。

对该测试过程来说，又有：

$$\Delta n = \frac{V'}{V'_m} \quad (15)$$

式中：V' 为经过孔壁进入岩体的气体体积(m³)，V'_m 为测试条件下的理想气体莫尔体积(m³/mol)。V'_m 和 V' 可分别由下式得到：

$$V'_m = \frac{V_0}{n_0} \quad (16)$$

$$V' = Q_{mean} \Delta t \quad (17)$$

式中：Q_{mean} 为 Δt 时间内的平均气体流量(m³/s)，n₀ 为试验空间中的物质的量(mol)。

对此过程来说，t = 0 时，由理想气体状态方程可得

$$n_0 = \frac{P_{mean} V_0}{RT} \quad (18)$$

将式(16)~(18)代入式(15)可得

$$\Delta n = \frac{P_{mean} Q_{mean} \Delta t}{RT} \quad (19)$$

联立式(14), (19)可得近似稳态法的气体质量守恒方程:

$$P_{\text{mean}} Q_{\text{mean}} \Delta t = \Delta P V_0 \quad (20)$$

由达西定律可得此时间段内通过的平均流量:

$$Q_{\text{mean}} = -\frac{kA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (21)$$

由式(10)可得

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{1}{2} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{C_1}{\ln r_{\text{in}} + \frac{C_2}{C_1}}} \quad (22)$$

试验段处取 $r = r_{\text{in}}$, 可得

$$\frac{\partial P}{\partial r_{\text{in}}} = -\frac{1}{2} \frac{1}{r_{\text{in}}} \sqrt{\frac{C_1}{\ln r_{\text{in}} + \frac{C_2}{C_1}}} \quad (23)$$

将式(23)代入式(21)有

$$Q_{\text{mean}} = -\frac{kA}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} = \pi L \frac{k}{\mu} \sqrt{\frac{C_1}{\ln r_{\text{in}} + \frac{C_2}{C_1}}} \quad (24)$$

联立式(12), (13), (20)及(24)可得气体有效渗透率:

$$k = \frac{\mu V_0}{\pi L} \frac{\ln D}{P_{\text{mean}}^2 - P_0^2} \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (25)$$

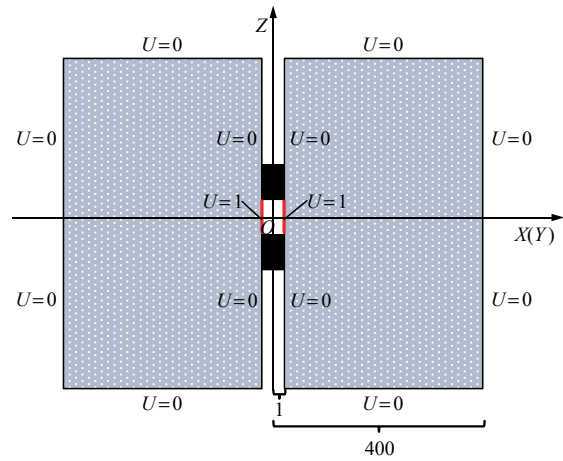
式中: D 为反映钻孔内径 r_{in} 和气体扩散外径 r_{out} 之间关系的参量, $D = r_{\text{out}} / r_{\text{in}}$, 后文将会重点讨论气体扩散边界的确定方法。

由于本研究多在工程尺度进行, 测试压力普遍高于 0.2 MPa, 且注气/抽气孔径较大, 因此滑脱效应相对较弱。对于微孔发育岩体或在低压 (<0.1 MPa) 测试条件下, 需引入滑脱修正项。

2.2 气体扩散半径边界判定及最优取值数学依据

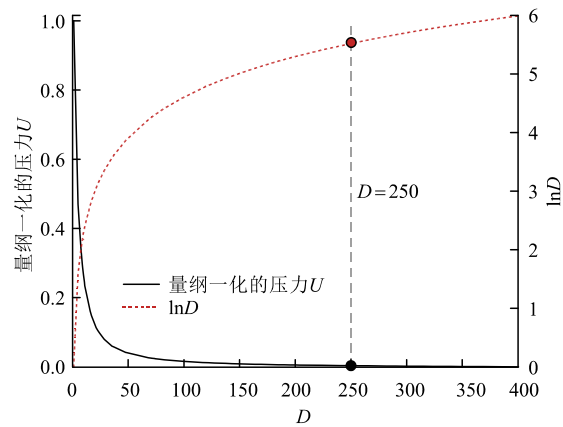
在原位气体渗透率测试中, 钻孔半径、试验段长度、有效试验体积以及注气压力等参数一般为定值, 因此 D (主要由扩散半径 r_{out} 确定) 为渗透率计算中的唯一变量, 其取值直接影响渗透率 k 计算结果。为此, 本文对 r_{out} 的取值敏感性进行了分析, 并探讨如何确定更具代表性和可靠性的有效测试范围。

首先, 对有效测试范围的上限进行了初步界定。工程现场钻孔直径为 30~40 mm, 结合现场实践, 气体在岩体中扩散范围通常不会超过 400 倍钻孔半径, 扩散边界的确切取值仍有待进一步系统研究。为评估扩散距离对渗透率计算结果的影响, 本文构建了一个长、宽、高均为钻孔半径 800 倍的工程尺度三维渗透模型(见图 3(a)), 并对压力分布和扩散距离进行了量纲一化处理, 以便统一分析与结果进



(a) 工程尺度渗透率测试模型边界条件

(a) Boundary conditions of engineering-scale permeability test model



(b) $\ln D$ 变化趋势及量纲一化的压力分布

(b) Variation of $\ln D$ and distribution of dimensionless pressure

图 3 三维渗流模型量纲一化的压力 U 分布

Fig.3 3D flow model and distribution of dimensionless pressure U

行对比:

$$U = \frac{P^2 - P_0^2}{P_1^2 - P_0^2} \quad (26)$$

$$U = f(D) \quad (27)$$

式中: U 为量纲一的压力函数。进一步地, 将式(26)代入式(5), 可得

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (28)$$

基于式(28)和所建立的三维稳态渗流模型, 结合设定的边界条件, 利用有限元软件对压力场进行求解, 获得了钻孔周围区域量纲一化的压力分布结果(见图 3(b)), 同时给出了 $\ln D$ 和 D 之间的演化关系。

结果表明, 当 $D > 250$ 时, 压力函数 U 已趋近于 0, 表明该区域气体压降基本衰减至周围岩体中原有孔隙压力。因此, 通过该过程的分析将气体扩散外边界 D 缩小至 250, 即有效测试半径上限为钻

孔半径的 250 倍。

需要说明的是, 本节关于量纲一化的压力场求解并未采用将式(10)代入式(26)的方式进行。这是因为式(10)为压力分布的解析解, 是在稳态控制方程基础上, 将式(5)简化为式(6)后推导得出的。然而, 在有效测试范围上限的评估中, 直接使用式(10)会忽略一部分实际存在的压力损耗, 从而导致计算结果中量纲一化的压力 U 整体偏高。因此, 在本研究中基于式(28)采用有限元数值求解获取量纲一化的压力分布, 以更真实地反映工程现场的气体扩散特征与边界效应。

为进一步确定有效测试范围 r_{out} 的合理取值, 对函数 $\ln(D)$ 作进一步分析:

$$F(D) = \ln(D) \quad (29)$$

可以看出, 在该定义域内函数 $F(D)$ 为单调递增函数, 而其一阶导数 $F'(D)$ 始终大于 0 但随 D 增大而单调减小, 表明函数增长速度随比例放大而逐渐放缓。因此, 存在某一临界值 D_0 , 当 $D > D_0$ 时, D 的微小变化对 $\ln(D)$ 值的增量影响极小, 从而对基于 $\ln(D)$ 构成的渗透率表达式的影响也可忽略。为进一步分析增长速度的变化趋势, 引入一阶导数的变化量:

$$\Delta F'(D) = |\Delta F'(D+1) - \Delta F'(D)| = \left| \frac{1}{D+1} - \frac{1}{D} \right| \quad (30)$$

设定误差阈值 $\varepsilon_1 = 10^{-3}$ 。令 $F'(D)$ 的变化量 $\Delta F'(D) < \varepsilon_1$, 即

$$\Delta F'(D) = \left| \frac{1}{D+1} - \frac{1}{D} \right| < 10^{-3} \quad (31)$$

解得 $D > 31.12 \approx 32$ 。因此, $D \geq 32$ 时可满足精度控制要求, 即当有效测试半径取值大于等于钻孔半径的 32 倍时, 其取值变化对 $\ln(D)$ 即渗透率 k 的计算结果影响非常小, 在工程尺度上可以忽略不计。因此, 将有效测试半径的取值范围进一步缩小至 $[r_{in}, 32r_{in}]$ 。在实际测试中, 可灵活选取误差阈值以满足工程对精度的实际需求。

基于前述分析, 本文将有效测试半径取值范围限定在 $[r_{in}, 32r_{in}]$ 。通常在工程实践中还需预估一个合理的气体扩散边界, 以减少该参量对渗透率计算结果的敏感性。在数学处理方法中, 对数均值和几何均值通常被用于具有指数或对数规律的系统提取特征值。鉴于气体在多孔介质中的稳态径向扩散过程中, 压力分布呈现对数型衰减特征, 且渗透率计算公式中的关键项同样为对数函数形式, 因此从数学合理性和物理表征角度出发, 采用对数均值

作为有效测试半径的代表值更具说服力。

对于任意 2 个正数 a 和 b , 它们的对数均值 $LM(a, b)$ 定义为

$$LM(a, b) = \frac{b-a}{\ln b - \ln a} \quad (32)$$

将 $a = r_{in}$, $b = 32r_{in}$ 代入式(32)中, 可得有效测试半径的对数均值为

$$LM(1, 32)r_{in} = \frac{32-1}{\ln 32 - \ln 1} r_{in} \approx 9r_{in} \quad (33)$$

为验证选取 $r_{out} = 9r_{in}$ 所得的渗透率计算结果的代表性与稳定性, 进一步将基于此值计算所得的渗透率 k_0 与不同 r_{out} 取值所计算结果 k 进行对比, 结果如图 4 所示。

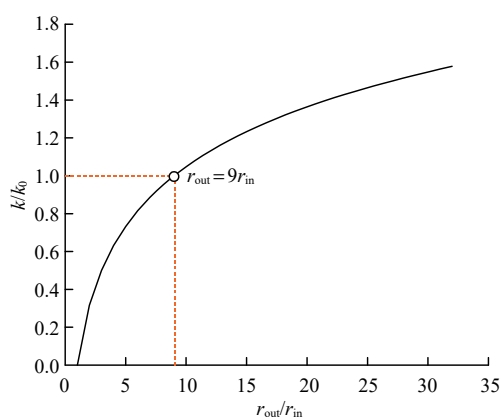


图 4 不同 r_{out} 取值下 k 与对数均值法结果 k_0 对比
Fig.4 Comparison of k under different r_{out} values with logarithmic mean method result k_0

通过图 4 可知, 选取 $r_{out} = 9r_{in}$ 所得的渗透率结果与其他取值下的结果差异较小, 且 $k/k_0 < 1.6$, 其差异远小于一个数量级。而在工程尺度上, 渗透率常以数量级作为精度划分标准, 因此以 $9r_{in}$ 作为代表性扩散半径, 既可兼顾物理意义, 又具备实际可操作性, 计算结果具有较高可靠性。

2.3 工程岩体渗流演化原位评测装置研制

基于前述理论模型, 本文研制了一套适用于工程尺度的原位气体渗透率评测装置, 涵盖硬件系统与配套计算机软件两大模块(见图 5)。

硬件部分包括: 便携式储气模块、调压单元、缓冲钢瓶、钻孔密封装置及数据采集模块。其中, 数据采集模块可实时记录压力与温度, 并结合前期研究提出的温度波动压力自校准方法, 实现温度对压力影响的在线修正, 显著提升渗透率测试的准确性与稳定性^[4]。整套装置的加压范围为 0~20 MPa, 压力控制精度可达 1 mbar。



图 5 工程岩体渗流演化原位评测装置研制及配套测试软件示意图

Fig.5 Schematic of in-situ evaluation device and supporting software for engineering rock mass permeability evolution

软件部分基于本文推导的近稳态径向渗流理论模型，用户仅需输入孔径、试验段长度及有效测试半径等基础参数，系统即可结合采集的动态压力数据，自动计算渗透率结果。

整体装置具有结构紧凑、携带便捷、操作简易等特点，适用于各类复杂场地的现场原位测试，可为深部能源物质封储等复杂工程场景提供精准可靠、可重复的渗透性演化原位测试与评价数据支撑。

3 室内模型试验验证

3.1 试验方案

为验证该原位测试方法的可行性与准确性，设计并浇筑尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm 的大试样，模拟工程尺度下的渗流测试。模型中预设钻孔直径为 35 mm。根据前面理论推导可知有效测试半径为 $r_{out} = 9r_{in}$ ，该模型尺寸可满足测试要求。

尽管室内岩心测试与现场原位测试在应力赋存环境上存在差异，但是岩心测试技术相对成熟、重复性高，因此本文亦结合岩心尺度测试结果进行对比分析。同时，为增强数据对比的可靠性，岩心尺度所采用的试样取自所浇筑的大尺度模型，确保材料的一致性。各尺度测试装置及试样制备过程如图 6 所示，其中岩心尺度测试系统是基于前期提出的入口端压力衰减法^[4]，而工程尺度测试系统采用

的是本文所提出的测试方法。

3.1.1 制样方案

(1) 模拟工程尺度模型采用尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm 的模具浇筑而成，所用材料水灰比为 0.7，以保证模型强度与可加工性；

(2) 岩心尺度试样从浇筑模型的前面、左侧和底面，每个面均取 3 个试样，共计 9 个。为确保试样完整性与代表性，试样尺寸分别为 25 mm×50 mm(试样 1~3)和 25 mm×25 mm(试样 4~9)。在取样过程中，正面取样高度为 50 mm，由于左侧面和底面取 50 mm 高度试样较困难，所以选择取 25 mm。具体取样位置如图 6 所示。

3.1.2 测试方案

首先进行模拟工程尺度渗透性测试，随后将岩心尺度试样移入三轴仪中进行渗透性测试。

(1) 模拟工程尺度测试：试验段两端通过采用相关措施对孔口进行密封，注气压力分别设为 0.2、0.3 和 0.4 MPa。为确保密封效果，测试过程中在模型外表面适量喷水，观察孔口周围是否有气泡逸出，以判断密封状态是否有效。

(2) 岩心尺度测试：由于该原位测试方法是基于岩心尺度近似稳态方法推广而来，故岩心尺度测试仍采用我们前期推导的基于入口端压力衰减法进行测试和计算^[4]。注气压力也设置为 0.2、0.3 和 0.4 MPa。为防止气体沿试样 - 套筒间隙泄漏，施加 0.8

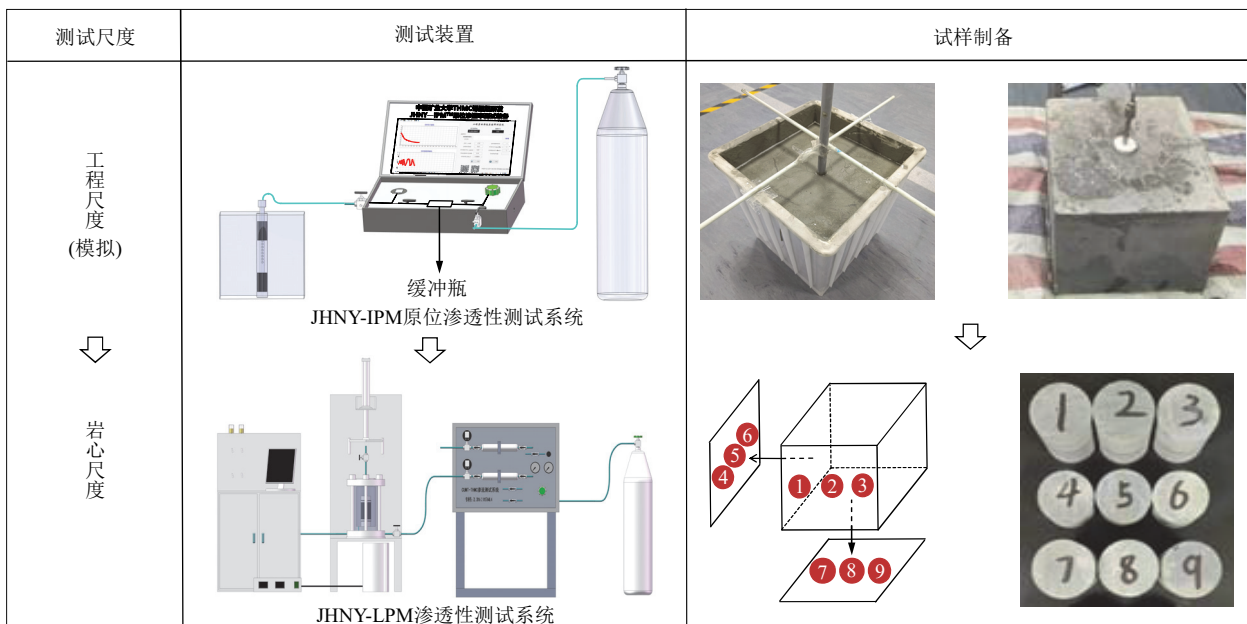


图 6 各尺度测试装置及试样制备示意图

Fig.6 Schematic of multi-scale testing devices and specimen preparation

MPa 的围压以增强密封性，同时避免过大围压影响岩心孔隙结构，确保测试结果的有效性与可比性。

3.2 试验结果与分析

(1) 模拟工程尺度试验结果分析

渗透率测试：表 1 列出了模拟工程尺度各注气压力下的渗透率测试结果。可见，该方法测得有效渗透率为 $(0.81\sim 1.19)\times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。尽管在 0.3 MPa 注气压力下所获得的渗透率略低于其他压力水平，但其差异并不显著。具体表现为：与 0.2 MPa 注气压力下的渗透率相比，二者差距为 1.49 倍；与 0.4 MPa 注气压力下的渗透率相比，差距为 1.47 倍。

表 1 模拟工程尺度渗透率测试结果

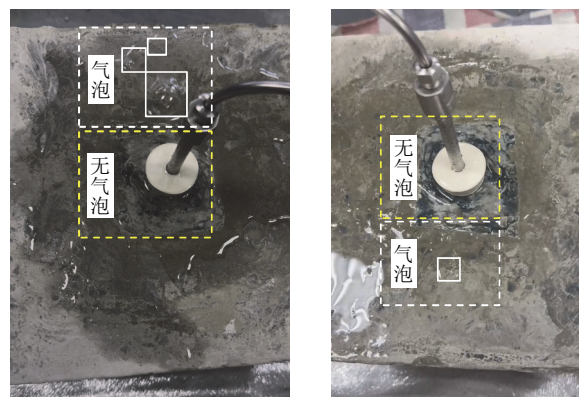
Table 1 Simulated engineering-scale permeability test results

注气压力 (injection pressure)/MPa	渗透率 (permeability)/(10^{-14} m^2)
0.2	1.21
0.3	0.81
0.4	1.19

密封性检测：为验证测试过程中密封效果的可靠性，试验中对钻孔实施了有效密封处理，其效果如图 7 所示。通过在试样表面喷洒清水，观察孔口及密封部位是否有气泡逸出，以判断是否存在气体泄漏，从而评估密封性能。

(2) 岩心尺度

表 2 列出了岩心尺度渗透率的测试结果。由表可知，各试样的有效渗透率普遍处于 10^{-15} m^2 的数



(a) 试验过程 1
(a) Test process 1
(b) 试验过程 2
(b) Test process 2

图 7 孔口密封性检测结果图

Fig.7 Detection results of orifice sealing performance

量级，整体数值较为接近，说明所制备岩心试样的一致性较好。

值得注意的是，部分岩心试样的渗透率测试结果存在一定差异，尤其是取自正面的岩心试样 1，其渗透率显著高于其余 2 个方向的试样。在相同注气压力下，该试样的渗透率计算结果与其他试样最高相差达 6.3 倍。

造成这一差异的主要原因在于制样过程中的扰动效应。岩心试样 1 在取样过程中受力不均，形成了局部裂缝，导致气体在测试过程中优先沿裂缝流动，引起入口端压力快速下降，最终导致渗透率计算结果偏高。如图 8 所示，岩心试样 1, 2 在裂隙形态上存在明显差异。

(3) 整体对比分析

表 2 岩心尺度渗透率测试结果
Table 2 Core-scale permeability test results

取样位置 (sampling position)	试样编号 (sample No.)	渗透率 (injection pressure)/m ²			各面均值(剔除试样 1 均值) (average value of each surface(excluding sample 1))/m ²
		P ₁ = 0.20 MPa	P ₁ = 0.30 MPa	P ₁ = 0.40 MPa	
正面	1	8.51 × 10 ⁻¹⁵	6.78 × 10 ⁻¹⁵	7.89 × 10 ⁻¹⁵	3.63 × 10 ⁻¹⁵ (1.59 × 10 ⁻¹⁵)
	2	1.64 × 10 ⁻¹⁵	3.31 × 10 ⁻¹⁵	1.25 × 10 ⁻¹⁵	
	3	1.22 × 10 ⁻¹⁵	1.02 × 10 ⁻¹⁵	1.07 × 10 ⁻¹⁵	
正面各气压均值 (剔除试样 1 均值)	-	3.79 × 10 ⁻¹⁵ (1.43 × 10 ⁻¹⁵)	3.70 × 10 ⁻¹⁵ (2.17 × 10 ⁻¹⁵)	3.41 × 10 ⁻¹⁵ (1.16 × 10 ⁻¹⁵)	-
左面	4	3.55 × 10 ⁻¹⁵	2.92 × 10 ⁻¹⁵	2.31 × 10 ⁻¹⁵	3.06 × 10 ⁻¹⁵
	5	2.59 × 10 ⁻¹⁵	1.94 × 10 ⁻¹⁵	1.74 × 10 ⁻¹⁵	
	6	5.05 × 10 ⁻¹⁵	4.31 × 10 ⁻¹⁵	3.08 × 10 ⁻¹⁵	
左面各气压均值	-	3.73 × 10 ⁻¹⁵	3.06 × 10 ⁻¹⁵	2.38 × 10 ⁻¹⁵	-
底面	7	4.87 × 10 ⁻¹⁵	4.02 × 10 ⁻¹⁵	5.81 × 10 ⁻¹⁵	3.43 × 10 ⁻¹⁵
	8	3.48 × 10 ⁻¹⁵	2.74 × 10 ⁻¹⁵	2.27 × 10 ⁻¹⁵	
	9	3.21 × 10 ⁻¹⁵	2.10 × 10 ⁻¹⁵	2.36 × 10 ⁻¹⁵	
底面各气压均值	-	3.85 × 10 ⁻¹⁵	2.95 × 10 ⁻¹⁵	3.48 × 10 ⁻¹⁵	-
各气压均值 (剔除试样 1 均值)	-	3.79 × 10 ⁻¹⁵ (3.20 × 10 ⁻¹⁵)	3.24 × 10 ⁻¹⁵ (2.79 × 10 ⁻¹⁵)	3.09 × 10 ⁻¹⁵ (2.49 × 10 ⁻¹⁵)	整体均值 3.73 × 10 ⁻¹⁵ (2.69 × 10 ⁻¹⁵)



图 8 正面岩心试样 1, 2 的裂缝差异对比图

Fig.8 Fracture differences between core sample 1 and sample 2(front view)

通过对比模拟工程尺度与岩心尺度的渗透率测试结果可以看出, 两者所得渗透率均处于 10⁻¹⁵ m² 数量级或相近范围。其中, 模拟工程尺度试样在注气压力为 0.3 MPa 的有效渗透率落入 10⁻¹⁵ m² 数量级, 在 0.2 与 0.4 MPa 条件下的测试结果虽略高, 但差异不显著, 最大倍差未超过 1.5。

进一步比较发现, 在注气压力为 0.2, 0.3 和 0.4 MPa 时, 模拟工程尺度气体渗透率分别为岩心尺度

渗透率的 3.79, 2.50 和 3.85 倍。不同取样面的岩心尺度渗透率均值与模拟工程尺度气体渗透率均值的对比如图 9 所示, 差异整体在 3 倍左右, 反映出 2 种尺度下测试结果具有一定的一致性, 但也存在尺度效应影响。

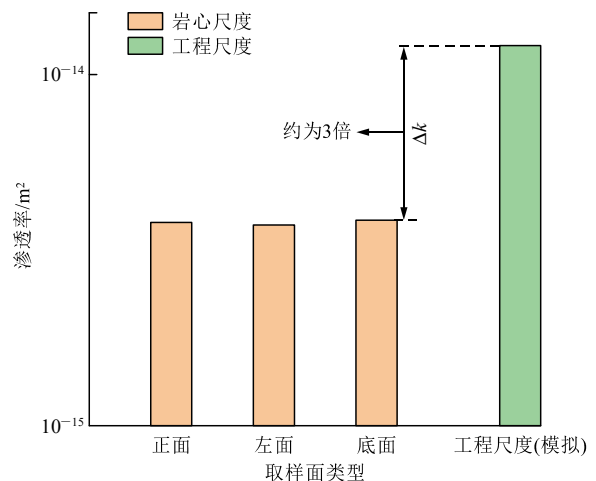


图 9 模拟工程尺度与岩心尺度渗透率测试结果对比图
Fig.9 Comparison between simulated engineering-scale and core-scale permeability test results

值得注意的是, 岩心尺度测试中施加 0.8 MPa 的围压, 尽管压力不高, 但仍可能引起岩体孔隙结构的局部收缩, 导致渗透通道变窄, 从而略微降低渗透率测试结果; 而工程尺度模型未施加围压, 气

体流动受限较少。因此，这一差异可能是造成 2 种尺度下测试结果略有偏差的原因之一。

此外，由于工程尺度试样体积较大，浇筑过程中难以实现完全均匀混合，易产生气泡及较多孔隙，气体在渗流过程中更容易沿连通孔隙或局部微裂缝快速逸散，也会导致渗透率偏高。

总体而言，模拟工程尺度与岩心尺度渗透率测试结果差异整体在 3 倍左右，可满足工程精度要求，验证了所提出原位气体渗透率测试方法的可靠性与适用性。本研究采用人工浇筑试样主要用于验证所提测试模型与方法的准确性与适用性。尽管其渗流力学行为与天然裂隙岩体存在一定差异，但试样具备较好的结构一致性与参数可控性，为理论模型的验证及后续现场原位测试奠定了基础。

4 现场先导性试验

为进一步验证所提出原位气体渗透率测试方法在复杂工程环境中的适用性，本研究选取某地下实验室与山东某煤矿 2 个典型工程现场，开展了初步的原位测试先导性试验。硐室及巷道内测试现场如图 10 所示。

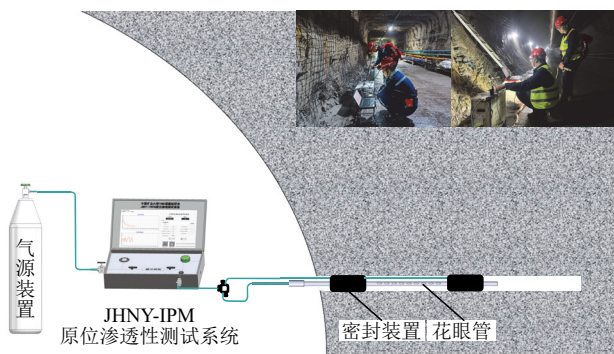


图 10 硐室及巷道内测试示意图

Fig.10 Schematic of test layout in chamber and tunnel

4.1 某地下实验室现场注浆试验效果原位评测

随着该地下实验室竖井掘进深度达到-280 m，根据现场需求，拟在特定试验段开展围岩注浆现场试验研究。注浆材料为研制的一种低 pH 值高性能注浆材料，注浆压力为 1.0 MPa。为配合评估注浆加固效果，本文采用所研制的原位渗透率测试装置对该地下实验室围岩注浆前后进行了原位评测。

4.1.1 试验方案设计

(1) 测试节点设置

为明确注浆试验对围岩渗透率的影响，分别在注浆前后设置测试节点，即在钻孔和洗孔后测试一次，在注浆后封孔之前再测试一次。

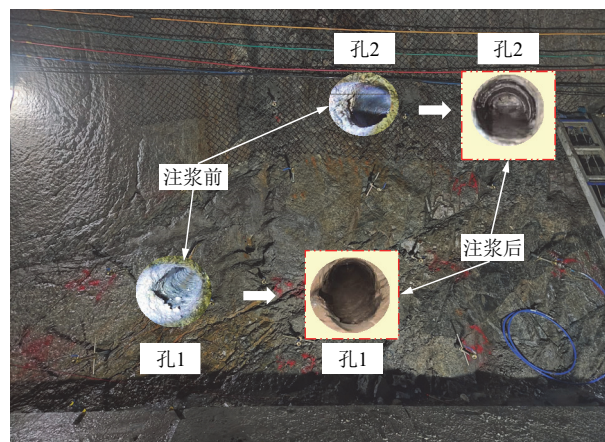
(2) 测孔位置布置

测试孔位的选择综合考虑孔口内壁平整度、孔道通直性、孔内渗水情况以及与目标注浆区域及周边钻孔的连通性等因素。为确保测试密封效果及操作便利性，优先选取孔口平整、孔道通畅的钻孔作为测试对象。最终布设 2 个测试孔，分别命名为“孔 1”和“孔 2”（见图 11）。



(a) 某地下实验室现场评测

(a) Field evaluation in underground laboratory



(b) 注浆前后

(b) Before and after grouting

图 11 现场测试及各测孔与注浆塞空间布置示意图

Fig.11 Field test and spatial layout of boreholes and grouting packers

此外，通过注水试验确认，所选测孔与注浆通道之间具有良好连通性，有利于准确反映注浆对目标区域的渗透性改善效果。特别说明，考虑到注浆后将围绕“孔 2”进行压水试验评估，为避免干扰后续测试，未对“孔 2”进行再次钻孔，而是通过其邻近的“检查孔”进行原位测试，用以间接反映“孔 2”在注浆后的渗透率变化。

(3) 测试方案设置

每个测孔在测试过程中均设定 4 个不同的注气压力梯度(气体为氩气), 注气压力依次从 0.2 MPa 递增至 0.8 MPa, 步长为 0.2 MPa。试验段长度为 15 cm, 孔径为 4 cm, 密封塞长度为 4 cm。具体测试步骤如下:

① 在目标岩体区域钻取测试孔, 并进行彻底清孔处理;

② 通过喉箍将密封塞固定于注气管预定位置, 并将注气软管及密封塞共同插入测试孔的指定深度; 通过便携式原位测试装置向膨胀塞注入预定压力气体, 观察压力变化, 待压力保持稳定, 表明试验段已实现有效密封; 调节便携式原位测试装置的注气压力, 待压力表读数达到设定值后, 打开注气阀门向封隔试验段注气, 同时使用数据采集装置实时记录试验段内气体压力随时间的变化过程;

③ 当试验段内气压自然衰减至某一特定值时, 则本轮测试结束。随后调整注气压力, 重复步骤②;

④ 待所有设定注气压力条件下的测试完成后, 该测孔的测试工作全部结束。

4.1.2 试验结果与分析

孔 1, 2 在注浆前后的渗透率测试结果如表 3 所示。结果显示, 注浆处理对 2 个测孔在不同注气压力下的有效渗透率均产生了明显影响, 均表现为不同程度的下降, 说明注浆在一定程度上改善了围岩的密封性, 抑制了气体的渗流通道。各测孔在不同注气压力下渗透率的变化趋势如图 12 所示。

除渗透率以外, 还可通过压降曲线变化更为直

表 3 不同孔注浆前后渗透率测试结果

Table 3 Permeability test results before and after grouting for different boreholes

孔名称 (borehole name)	注气压力(injection pressure)/MPa	渗透率 (permeability)/m ²	
		注浆前 (before grouting)	注浆后 (after grouting)
孔 1	0.2	4.72 × 10 ⁻¹⁵	2.33 × 10 ⁻¹⁵
	0.4	1.56 × 10 ⁻¹⁵	7.99 × 10 ⁻¹⁶
	0.6	6.37 × 10 ⁻¹⁶	3.14 × 10 ⁻¹⁶
	0.8	9.26 × 10 ⁻¹⁶	7.09 × 10 ⁻¹⁶
孔 2	0.2	1.43 × 10 ⁻¹⁴	5.03 × 10 ⁻¹⁵
	0.4	4.65 × 10 ⁻¹⁵	1.10 × 10 ⁻¹⁵
	0.6	4.48 × 10 ⁻¹⁵	9.77 × 10 ⁻¹⁶
	0.8	4.57 × 10 ⁻¹⁵	9.57 × 10 ⁻¹⁶

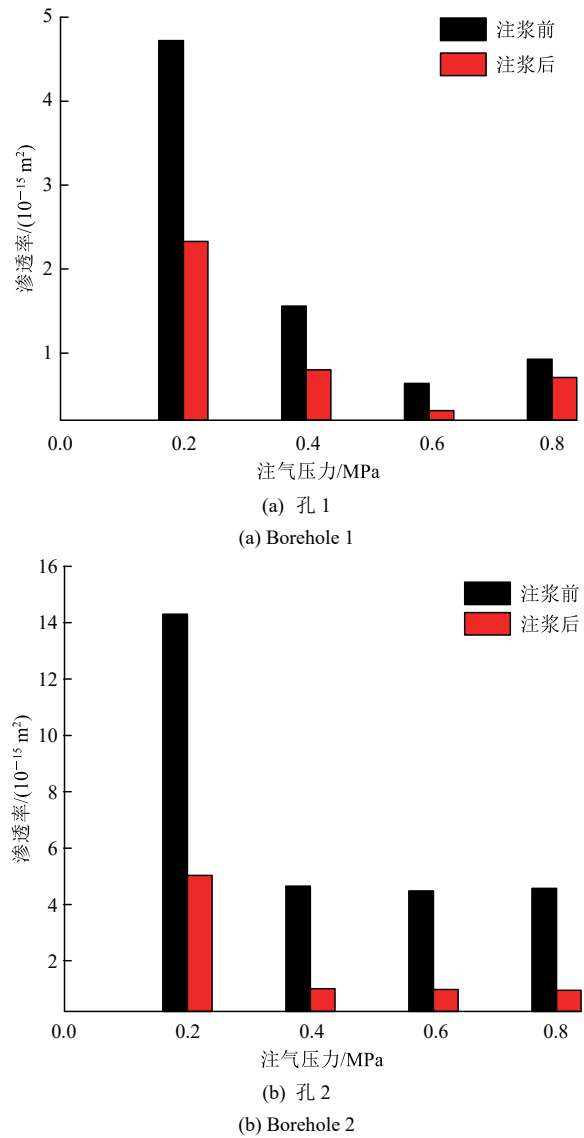


图 12 不同测孔注浆前后渗透率变化示意图

Fig.12 Permeability changes before and after grouting for different boreholes

观地反映注浆区域围岩渗透性的变化。随着围岩渗透率的降低, 气体在岩体中扩散速度减缓, 表现为注浆后不同注气压力条件下的压降曲线更加趋于平缓, 气体压力衰减速率明显下降, 具体如图 13 所示。

在现场测试中发现, 注浆后同一区域的压水试验所得渗透率要高于气体渗透率。其主要原因在于气体与水的运移机制存在显著差异: 水作为连续相, 可在高饱和度和高压下渗入微细孔隙, 而气体在非饱和介质中流动时易受孔隙水封堵, 导致可通流通道减少, 表现出更低的有效渗透率^[4, 19-20]。此外, 注浆后的岩体含有残余水分, 进一步阻碍气体通道连通, 而液体则可能沿着注浆扰动产生的新孔隙渗流, 造成其渗透率偏高。

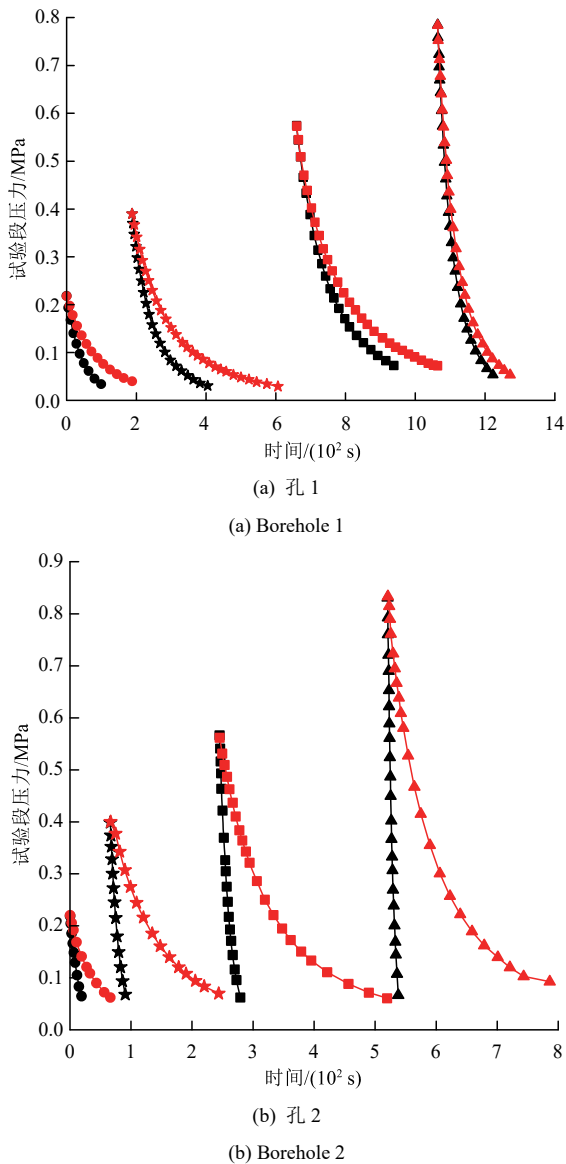


图 13 不同孔注浆前后压降曲线变化示意图

Fig.13 Pressure drop curve changes before and after grouting for different boreholes

从长期运行环境来看，处置库封闭后将逐步累积气体，气体渗流特性将成为屏障系统密封性能评价的关键指标之一。相较而言，气体渗透率测试在刻画微渗通道与评估注浆封堵效果方面更具敏感性和代表性，适用于现场密封性原位评估；而压水试验更适合用于宏观抗渗验证。两者联合应用，可实现注浆效果的多尺度、全方位综合评价。

4.2 山东某煤矿巷道渗透性原位评测

本次煤矿现场试验选取该矿一典型掘进区段为验证区域，所在位置位于主采区中部，具备代表性地质条件和施工环境，适合作为原位渗透率测试方法的现场应用验证场地。该巷道同时穿越煤层与砂岩层，为全面获取该区段岩体的渗透性特征，分别

在煤层段与砂岩段同步开展了工程尺度气体渗透率原位测试。测试所钻孔径为 30 mm，孔深为 1 m。

4.2.1 试验方案

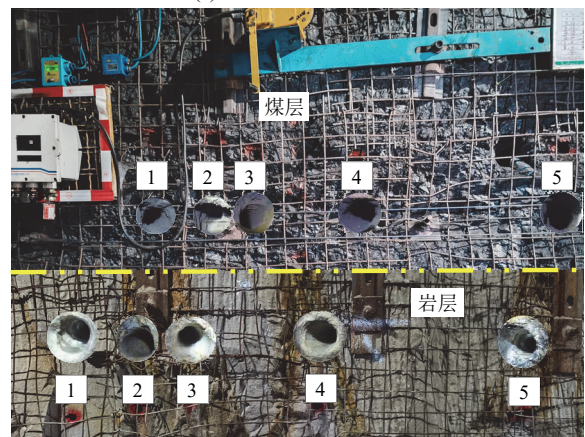
(1) 测孔位置设置

该区段巷道穿越煤层与岩层 2 个地质单元。为全面评估其渗透性，在煤层段与岩层段各水平布设 5 个测试孔，具体位置如图 14 所示。



(a) 煤矿现场测试

(a) Field test in coal mine



(b) 煤层和岩层

(b) Coal and sandstone layers

图 14 现场测试及煤层和岩层测孔位置布置图

Fig.14 Field test and borehole layout in coal and rock layers

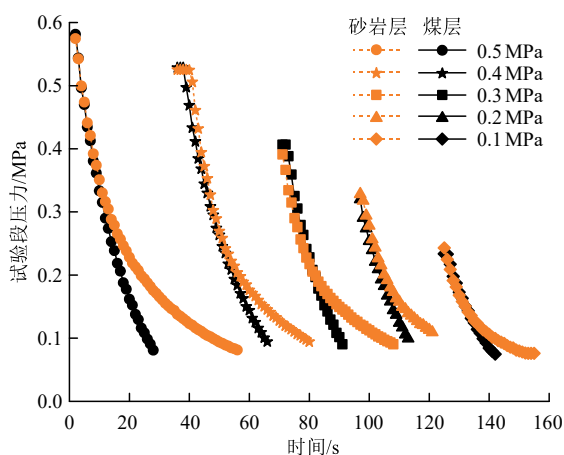
(2) 测试方案设置

每个测试孔分别采用 5 个注气压力阶梯，范围为 0.2~0.6 MPa，梯度为 0.1 MPa。测试段长度为 20 cm，孔径为 3 cm，密封塞长度为 4 cm。测试步骤参照节 4.1 所述流程进行。

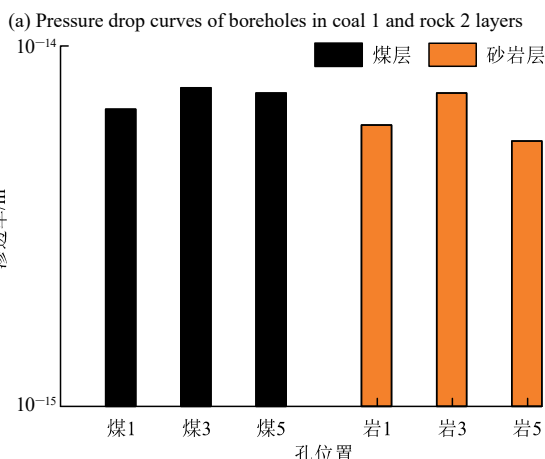
4.2.2 试验结果与分析

从压降曲线(见图 15(a))来看，煤层(以煤 1 为例)在各个注气压力下的压力衰减速率整体快于砂岩层(以岩 2 为例)，表明煤层的气体运移能力更强，具有更高的渗透通道连通性与渗流效率。

进一步从定量数据分析来看，图 15(b)和表 4



(a) 煤层(煤1)和砂岩层(岩2)测试孔压降曲线



(b) 煤层和砂岩层渗透率

(b) Permeability of coal and sandstone layers

图 15 煤层与岩层各测试孔渗透率测试结果

Fig.15 Pressure drop curves and permeability results of boreholes in coal and rock layers

表 4 煤层及岩层渗透率测试结果

Table 4 Permeability test results of coal and rock layers

岩性 (lithology)	孔名 (borehole name)	渗透率 (permeability)/m ²	渗透率平均值(average permeability)/m ²
煤	煤 1	6.68 × 10 ⁻¹⁵	7.25 × 10 ⁻¹⁵
	煤 3	7.66 × 10 ⁻¹⁵	
	煤 5	7.41 × 10 ⁻¹⁵	
砂岩	岩 1	6.04 × 10 ⁻¹⁵	6.30 × 10 ⁻¹⁵
	岩 3	7.41 × 10 ⁻¹⁵	
	岩 5	5.45 × 10 ⁻¹⁵	

注：表中各孔渗透率计算结果均为不同注气压力计算所得有效渗透率的平均值。

展示了煤层与砂岩层不同测试孔的渗透率测试结果。结果显示，煤层渗透率在(6.68~8.15) × 10⁻¹⁵ m²范围，平均值为 7.25 × 10⁻¹⁵ m²；而砂岩层的渗透率范围为(5.45~7.41) × 10⁻¹⁵ m²，平均值为 6.30 × 10⁻¹⁵ m²。尽管 2 个岩性层段的渗透率数量级相近，

煤层的整体渗透能力略高于砂岩层。

该差异一方面反映了煤层天然发育的裂隙结构提供了更多的气体流动通道；另一方面，也可能受到该区域布设的泄压孔影响——泄压孔改变了局部应力场，引发微裂缝扩展，导致局部渗透率上升。这种应力扰动效应在煤层中更为敏感，故在本次试验中体现为煤层整体渗透率略高于岩层。

值得指出的是，煤层中广泛存在气体吸附现象，尤其甲烷以吸附状态赋存(本研究采用的是惰性气体)，对渗流过程具有一定影响。本文采用近似稳态注气法所测试的气体通量，在一定程度上已包含吸附与解吸共同影响下的有效渗透能力，未来可结合煤样的等温吸附试验，进一步分析吸附效应在煤层渗流演化过程中的定量贡献。

综上，结合压降曲线变化与渗透率数值结果，验证了本方法在揭示不同岩性渗透特征方面的有效性，并可为类似矿区支护优化、注浆区域选择与煤层 CO₂ 封存提供相关依据。

5 结 论

本文基于岩心尺度近似稳态法的理论基础，推导并构建了适用于工程尺度原位气体渗透率测试的计算模型，并开发配套测试装置。通过室内验证与典型工程现场先导性试验，分别在某地下实验室的注浆效果原位评价和山东某煤矿巷道渗透性原位测试中进行了初步应用。主要结论如下：

(1) 推导建立了适用于工程尺度岩体原位测试的气体渗透率计算理论模型，并系统分析了有效测试半径对计算结果的影响。结合相对误差阈值设定与对数均值法，分别从物理、数值与统计角度来确定气体扩散边界，使得所取有效半径在数学上具备合理性，在物理上能够较好反映气体扩散边界特征，为原位渗透率测试方法提供了可靠的参数基础。后续，将进一步通过试验对气体扩散边界的取值进行验证与修正，提升模型在复杂现场条件下的适应性。

(2) 在此理论上，自主研发了适用于不同测试环境和岩性条件的工程岩体原位渗流评测装置，具备注气稳压、分段封隔、变压加载与数据自动采集等功能，可实现多压力梯度条件下岩体渗透率的精准测试与动态分析，显著提升了现场测试的效率与可靠性。

(3) 通过室内模拟试验，分别对 30 cm × 30 cm ×

30 cm 的工程尺度模型和相同材质的岩心试样进行了气体渗透率测试, 结果表明, 两者渗透率均处于 10^{-15} m^2 数量级内, 差异整体在 3 倍左右, 验证了工程尺度测试方法的准确性与适用性。需要注意的是, 岩心试样在测试过程中施加了 0.8 MPa 的围压, 导致渗透率略低; 而工程尺度模型由于浇筑过程中原料均匀性难以完全控制, 局部可能存在微裂隙或连通孔隙, 可能导致测试结果略有偏高。两者之间的差异整体控制在工程可接受范围内。

(4) 本文所提出的原位测试方法在某地下实验室和山东某煤矿成功开展现场先导性试验, 验证了其在复杂工程环境下的适应性与有效性。该地下实验室注浆前后测试结果显示, 围岩渗透率显著降低, 表明注浆效果良好; 煤矿试验区煤层与砂岩层渗透率普遍处于 10^{-15} m^2 数量级, 泄压孔布置对局部渗流特性存在一定扰动, 但整体渗透性分布合理。

(5) 此外, 该测试方法和模型对中低渗透率岩体及弱裂隙岩体具有较好的适应性, 对于裂缝发育岩体, 需要进一步完善模型, 比如引入修正项或采用裂隙-基质双重渗流模型, 这也是笔者团队目前正在开展的研究内容。整体而言, 该原位测试技术可为深部能源物质封存工程中屏障系统密封性评价及场地筛选提供可靠依据, 具备良好的工程应用价值与推广前景。

致谢: 论文撰写过程中得到核工业北京地质研究院刘健教授级高级工程师, 中国矿业大学孟庆彬教授, 山东能源集团肥城矿业公司申海龙总工、中国水利水电科学研究院周建华、赵卫全正高级工程师等的协助和支持, 在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 肖智勇, 王刚, 刘杰, 等. 热-流-固耦合作用下含水煤层渗透率模型建立及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 3 044 - 3 057.(XIAO Zhiyong, WANG Gang, LIU Jie, et al. A permeability model of water-bearing coal seams under thermo-hydro-mechanical coupling effect and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(12): 3 044 - 3 057.(in Chinese))
- [2] 杨春和, 王贵宾, 施锡林, 等. 中国大规模盐穴储氢需求与挑战[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 1 - 19.(YANG Chunhe, WANG Guibin, SHI Xilin, et al. Demands and challenges of large-scale salt cavern hydrogen storage in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 1 - 19.(in Chinese))
- [3] LIU J F, NI H Y, SHAO J F, et al. Gas permeability evolution of unsaturated GMZ bentonite under thermo-mechanical effects[J]. Engineering Geology, 2023, 313: 106966.
- [4] 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 Jiangfeng, NI Hongyang, PU Hai, et al. Test theory, method and device of gas permeability of porousmedia and the application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 137 - 146.(in Chinese))
- [5] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217 - 232.(XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217 - 232.(in Chinese))
- [6] 李炳蔚, 吴吉春. 防渗墙钻孔压水试验渗流参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 396 - 402.(LI Bingwei, WU Jichun. Study of seepage parameters measured in water pressure test inside boreholes in cut-off wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 396 - 402.(in Chinese))
- [7] 付安学. 高放废物处置预选区结构面导水特性试验研究[硕士学位论文][D]. 南京: 南京大学, 2013.(FU Anxue. The experimental study on hydraulic conductivity characteristics of structural plane in the preselected area for Chinese high-level radioactive waste disposal[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.(in Chinese))
- [8] 徐含英, 姜振蛟, 许天福, 等. 基于单井注抽试验的增强型地热系统储层近井渗透率原位测试方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 50 - 58.(XU Hanying, JIANG Zhenjiao, XU Tianfu, et al. Single well injection withdraw (SWIW)-based tracer test approach for in-situ permeability estimation in an enhanced geothermal system[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2023, 50(4): 50 - 58.(in Chinese))
- [9] MATSUMOTO N, SHIGEMATSU N. In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations[J]. Earth, Planets and Space, 2018, 70(1): 13.
- [10] TORRENT R, DENARIE E, JACOBS F, et al. Specification and site control of the permeability of the cover concrete: the swiss approach[J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(12): 1 127 - 1 133.
- [11] MULTON S, VERDIER J, VILLAIN G, et al. Non-destructive measurements for the evaluation of the air permeability of concrete structures[J]. Measurement, 2022, 196: 111204.
- [12] 李喜安, 薛泉, 庞涛, 等. 基于原位渗气试验的黄土潜蚀地层渗气率研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1 027 - 1 034.(LI Xi'an,

- XUE Quan, PANG Tao, et al. A new in-situ test method of gas permeability and its utility on the field of suffosion loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1 027 - 1 034.(in Chinese)
- [13] HASAN M F, RAHMAN M M, BULBUL M A U, et al. Assessment of coal permeability using injection fall-off test and effect of temperature and skin factor on it: a case study for coal seams of Jamalganj coalfield, Bangladesh[J]. The Dhaka University Journal of Earth and Environmental Sciences, 2022, 10(3): 103 - 112.
- [14] YU S Y, SU X B, SONG J X, et al. Insight into gas threshold pressure gradient and permeability of coal seam: principle and method for field test[J]. Journal of Energy Engineering, 2023, 149(6): 1 - 10.
- [15] 李 伟, 杨世龙, 周红星, 等. 重复注气压降法煤层渗透率模型与原位测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 193 - 202.(LI Wei, YANG Shilong, ZHOU Hongxing, et al. Study on the permeability model and in-situ testing of coal seams using repeated injection pressure drop method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 193 - 202.(in Chinese))
- [16] 牛冠毅, 曹 渊, 王铁良. 原位气体渗透率测量试验公式推导及分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1 705 - 1 709.(NIU Guanyi, CAO Yuan, WANG Tieliang. Deduction of in-situ gas permeability test equation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1 705 - 1 709.(in Chinese))
- [17] XIE H P, LIU T, GAO M Z, et al. Research on in-situ condition preserved coring and testing systems[J]. Petroleum Science, 2021, 18(6): 1 840 - 1 859.
- [18] 杨小鹏. 负压抽采条件下孔隙率对动态加载构造煤渗透率影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 4 - 7.(YANG Xiaopeng. Experiment on effect of porosity and dynamic loading on permeability of tectonic coal under negative pressure drainage[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9): 4 - 7.(in Chinese))
- [19] TANIKAWA W, SHIMAMOTO T. Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 229 - 238.
- [20] DUAN Q B, CHEN J Y, YANG X S. A comparison of gas and water permeability in clay-bearing fault and reservoir rocks: experimental results and evolution mechanisms[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(7): e2019JB018278.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

综述

(1) 岩质边坡倾倒变形地质特征、灾变机制与稳定性分析方法；

基础理论和试验研究

(2) 复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备研制及实例分析；

(3) 岩体压力型锚杆灌浆体受压承载力计算；

(4) 东营凹陷深部砂岩三轴应力加载下气体渗透率响应规律研究；

岩土工程应用

(5) 复合坚硬顶板工作面末采顶板爆破防冲调控技术；

(6) 考虑双向应变软化的压气储能洞室围岩力学响应解析方法；

工程地震学

(7) 近断层速度型脉冲波作用下高山峡谷复杂场地地震响应研究；

(8) 凸起地形与上覆土层对地震动特性的影响。

土工基础