

DOI: 10.11779/CJGE201703018

基于钻孔充气试验的岩石渗透率原位测量研究

曹 渊, 牛冠毅, 王铁良

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 基于稳态气体渗流理论推导了岩石渗透率原位测量公式, 基于巴甫洛夫斯基雷诺数公式给出了工程中达西渗流的粗略判断方法, 研制了一套由气源子系统、气体质量流量控制子系统、封孔子系统、气体压力测量子系统组成的岩石渗透率原位测量系统, 介绍了各子系统的组件及功能, 给出了测量步骤和流程, 形成了基于钻孔充气试验测量岩石原位渗透率的完整方法, 在某场地花岗岩介质中开展了原位钻孔充气试验, 得到了现场钻孔的原位渗透率数据, 并对试验中的钻孔压力历程、达西渗流判断、充气流量影响、胶塞膨胀压力影响、测量结果代表范围等关键环节进行了深入分析。试验结果表明该系统稳定性好, 测量结果合理且代表范围大, 能够应用于岩石渗透率的原位测量中。

关键词: 钻孔; 充气试验; 岩石; 渗透率; 原位测量

中图分类号: TU41; O357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0534-06

作者简介: 曹 渊(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事渗流力学方面的研究工作。E-mail: caoyuan@nint.ac.cn。

In-situ measurement of rock permeability based on pneumatic tests in boreholes

CAO Yuan, NIU Guan-yi, WANG Tie-liang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The in-situ measurement formula for rock permeability is derived based on the theory of steady gas seepage. A rough judgement method for Darcy seepage in engineering is given based on the Pavlovsky's Reynolds number formula. An in-situ system to measure rock permeability is established, which consists of gas source subsystem, gas mass flow control subsystem, sealing subsystem and gas pressure measurement subsystem, and the components and functions of each subsystem are introduced. The measurement flow and steps are given. The complete method of in-situ measurement of rock permeability based on pneumatic tests in boreholes is formed. The in-situ pneumatic tests in boreholes are performed in granite medium at a certain site. The in-situ permeability of field holes is got, and some key aspects in the tests are analyzed, such as pressure course in boreholes, judgment of Darcy seepage, influence of pneumatic mass flow, influence of stopper's expansion pressure and representative area of measurement data. The results show that the stability of this system is good, and the measurement data are reasonable and have a large representative range. The proposed system can be applied to the in-situ measurement of rock permeability.

Key words: borehole; pneumatic test; rock; permeability; in-situ measurement

0 引 言

岩石渗透率(本文指绝对渗透率), 是衡量岩石渗透流体能力的重要指标, 只与岩石本身性质有关, 与流体性质无关。岩石渗透率的准确测定对于油气田勘探开发、高放废物地质处置、环境工程中的气体渗流研究都具有重要意义。

按照测量流体划分, 岩石渗透率测量可分为液测法和气测法两类。液测法采用水或其他液体作为测试流体, 主要适合研究地下水位以下岩体的渗水性能及原油运移等液体渗流环境问题; 但由于在测量过程中试样两端压差较大(达数个量级), 可能会对介质微观孔隙或裂纹结构造成破坏, 加上液体容易和测量对

象的相关成分发生水化反应等物理化学反应, 从而降低了液测法测量结果的可靠性。而气测法采用气体作为测试流体, 由于气体压力较小不会破坏岩石微观结构且测量气体一般不与介质发生反应, 因此测量结果可靠性较高; 气测法目前在岩石渗透率测量中已经被广泛采用, 但对较低渗透介质(渗透率低于 10^{-16} m^2)采用气测法时气体滑脱效应明显^[1], 需要进行修正。

按照测量原理划分, 岩石渗透率测量可分为稳态法和非稳态法两类。稳态法是在试样的两端施加稳定的压力差, 待试样中渗流稳定后通过测量渗透流量来

计算试样的渗透率, 或者在试样两端施加固定流量, 然后测量稳态压力进而计算试样的渗透率, 通常认为稳态法适合渗透率高于 10^{-16} m^2 的岩石介质^[2], 因为其渗流稳定时间较短, 便于试验实施。而对于渗透率较低的岩石介质, 采用稳态法可能会出现稳定时间过长的情况, 因此稳态法不再适合, 通常采用非稳态法。非稳态法的原理是向试样的一端加压力脉冲, 通过测量试样两端的压力差随时间的变化来计算试样的渗透率。非稳态法大幅度缩短了试验时间, 因此更适合于测量渗透率低于 10^{-16} m^2 的岩石介质^[3], 而对于渗透率稍高的岩石介质, 由于渗流稳定时间较短, 瞬态压力数据不足, 因此不利于非稳态法的测量, 更适合采用稳态法测量。

按照试验条件划分, 岩石渗透率测量可分为实验室测量和现场原位测量两类。实验室测量法需要先采集现场的岩石或岩芯样品, 然后加工成一定尺寸的试件(一般为直径5 cm, 高10 cm的圆柱体), 然后放入室内测试设备上测量。目前国内关于岩石渗透率的测量研究主要集中在实验室测量方面, 特别是针对低渗透岩石研发了多种室内测试设备, 并采用气体渗透稳态法或非稳态法在室内测试设备上对不同岩石样品的渗透特性进行了试验研究, 测量精度较高(可达 10^{-22} m^2), 并且能够考虑温度、应力等对岩石渗透率的影响^[4-9]。但由于试件尺寸较小, 导致测量结果代表范围有限, 且能加工成型的试件一般都来自较完整密实的岩石或岩芯样品, 因此测量结果一般比现场介质低数个量级, 导致实验室测量结果在应用上有一定的局限性。与实验室方法相比, 现场原位试验方法在现场实施, 不需要采集岩芯或岩块, 避免了样品采集、运输、加工过程中可能对岩石固有结构的破坏, 还可真实反映岩体所处环境的实际特点, 研究尺度更大, 数据代表性更好。原位渗透率测量法在国外已得到了较大的关注和应用^[10-14], 如美国地质勘探局设计了原位渗透率测量方法及装置, 并在YUCCA山进行了岩石渗透率的原位测量^[15-16], 效果较好, 其不足之处主要有: 胶塞膨胀采用充气方式, 使得胶塞膨胀压力较小, 封堵效果欠佳, 会在一定程度上影响测量结果的准确性; 仅给出了试验装置和结果, 未对试验中出现的降压、非达西渗流等重要现象进行深入分析; 主要侧重于凝灰岩等软岩介质的研究, 未见针对花岗岩等硬岩介质的相关研究。

本文基于稳态气体渗流理论, 建立了一套更加完善的岩石渗透率原位测量系统, 利用该系统在某场地花岗岩介质中开展了原位钻孔充气试验, 并对试验中的一系列关键现象和影响因素进行了深入分析。试验结果表明该系统的重复性和稳定性较好, 能够应用于

岩石渗透率的现场原位测量中。

1 系统原理及公式

1.1 基于稳态渗流理论的岩石渗透率推导

在岩体壁面钻孔, 利用双塞封孔器封隔出试验段腔室, 以固定质量流量向试验段内压气, 待试验段内气体压力稳定时, 记录气体流量与压力, 再根据下述公式计算岩石渗透率。

基本假设: ①气体在岩体中渗流符合达西定律; ②气体满足理想气体状态方程; ③试验过程在等温条件下进行; ④岩体为均匀各向同性介质。

在此假设下, 多孔介质中气体渗流的质量守恒方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

式中, 气体密度 ρ 可以用理想气体状态方程表示:

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (2)$$

式中, M 为气体的摩尔质量, R 为摩尔通用气体常数, T 为气体温度。

气体渗流速度 \mathbf{v} 用达西渗流方程描述:

$$\mathbf{v} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p. \quad (3)$$

将方程(2)、(3)代入方程(1), 并根据假设条件——渗透率 κ 、气体动力黏性系数 μ 都为常数, 则方程(1)可化简为关于气体压力 p 的方程:

$$\Delta p^2 = 0. \quad (4)$$

当试验段长度远大于试验孔径时, 可将模型简化为柱坐标系下一维径向模型, 则方程(4)写成柱坐标系下一维径向形式:

$$\frac{d^2 p^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp^2}{dr} = 0. \quad (5)$$

通过推导, 可以得到其解析解。再结合流量 Q :

$$Q = -2\pi r L \frac{\kappa}{\mu} \frac{dp}{dr}, \quad (6)$$

可求得岩石渗透率为^[17]

$$\kappa = \frac{p_{sc} Q_{sc} \mu}{\pi L (p_1^2 - p_0^2)} \ln \left(\frac{r_{out}}{r_{in}} \right). \quad (7)$$

式中 κ 为岩石渗透率; p_{sc} 为标准状况下气压; Q_{sc} 为标准状况下气体体积流量; μ 为气体动力黏性系数; L 为试验段长度; p_1 为试验段压气稳定时气压; p_0 为环境气压; r_{out} 为试验影响半径, 工程应用中可取为 $L + b/2$, 其中 b 为单根胶塞长度^[17]; r_{in} 为钻孔半径。

1.2 达西渗流的粗略判断

根据稳态气体渗流理论的基本假设, 当气体在岩体中渗流符合达西定律时, 采用式(7)计算较为准确, 否则计算结果会有偏差。在实际测量试验中, 需对气

体渗流是否满足达西渗流作粗略判断。

根据巴甫洛夫斯基提出的 Reynolds 表达式^[18-19]:

$$R_e = \frac{1}{0.75n + 0.23} \frac{vd_e}{\nu}, \quad (8)$$

式中, R_e 为雷诺数, n 为岩石孔隙度, ν 为流体的运动黏滞系数, d_e 为岩石颗粒的平均粒径, 根据

$$\nu = \mu / \rho, \quad (9)$$

$$\nu = Q_{sc} / S, \quad (10)$$

可得

$$R_e = \frac{1}{0.75n + 0.23} \frac{\rho Q_{sc} d_e}{\mu S}, \quad (11)$$

式中, S 为试验段圆柱体的侧面积。

对于多孔介质中的气体渗流而言, 巴甫洛夫斯基给出层流的临界雷诺数为 7~9, 意即雷诺数低于此值时气体渗流为层流, 此时按照式 (7) 测得的岩石渗透率较为准确。

2 测量系统及试验过程

2.1 岩石渗透率原位测量系统

基于上述稳态气体渗流理论, 建立岩石渗透率原位测量系统。系统由气源子系统、气体质量流量控制子系统、封孔子系统、气体压力测量子系统 4 部分组成。

气源子系统包括空气压缩机和气体过滤器: 空气压缩机用于压缩空气, 产生高压气源; 气体过滤器用于将空气压缩机输出气体中的粉尘、水汽、油气等过滤掉, 使得输出气体干燥、洁净, 避免对气体质量流量控制器等精密仪器造成损坏。

气体质量流量控制子系统包括气体质量流量控制器和双显示仪: 气体质量流量控制器用于向试验段输出设定质量流量的气体; 由于气体质量流量控制器有量程限制, 因此可根据实际情况采用不同量程的控制器, 配合一台双显示仪使用。

封孔子系统由膨胀式双胶塞封孔器和手动压水泵组成: 双塞封孔器的规格要根据钻孔直径而定, 确保膨胀前封孔器最粗位置的直径小于钻孔直径 8~10 mm, 否则在试验过程中容易造成封孔器放不进去或者易被卡住的现象; 手动压水泵用于将水压入胶塞中, 使其膨胀后与孔壁紧密接触, 并维持膨胀状态, 从而将钻孔封隔出试验段腔室, 这里要确保膨胀后封孔器的最大直径至少大于钻孔直径 20 mm, 否则容易造成封孔失败或漏气。

气体压力测量子系统包括绝压气体传感器和双通道无纸记录仪: 气体压力传感器用于测量环境气压以及试验中的钻孔内气压; 无纸记录仪用于实时记录压力测量数据, 并在试验中显示压力变化情况。

整套设备的连接如图 1 所示。

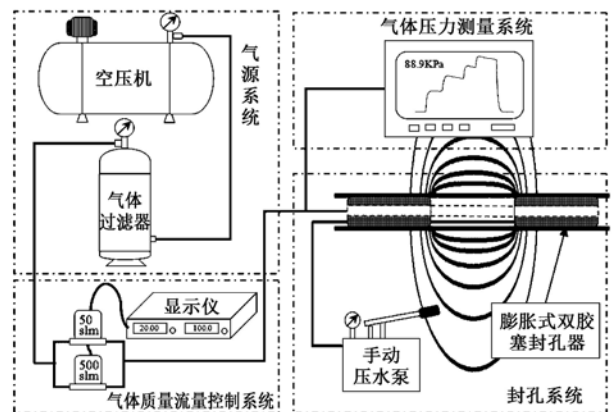


图 1 岩石渗透率原位测量系统

Fig. 1 In-situ measurement system of rock permeability

2.2 试验过程

试验前由台车或手工钻在坑道中指定位置的岩石壁面进行钻孔, 之后采用手工方式对钻孔进行清孔, 要求钻孔内无碎石等细小颗粒, 然后按照下述步骤进行原位渗透率试验:

(1) 将封孔器塞入钻孔内指定位置, 记录环境气压值。

(2) 压动手压泵使封孔器的胶塞膨胀, 同时观察手压泵上压力表读数使胶塞内压力达到设定值, 然后停止加压, 观察压力表读数情况: 若读数稳定, 说明封孔器系统完好, 封孔成功; 否则说明封孔器系统存在漏点, 需及时泄压并取出封孔器检查维修。

(3) 设定气体质量流量控制器至某一固定值, 开启阀门向试验段内充气。观察无纸记录仪上压力变化情况, 当钻孔内气体压力充分稳定 (压力读数不变且保持至少 1 min) 后, 记录气体流量及压力值。

(4) 调高气体流量, 重复步骤 (2)。

(5) 最后一次压力稳定后, 关闭充气阀门。待钻孔内压力降至常压后, 对手压泵泄压, 抽出封孔器, 结束该孔试验。

3 原位测量研究

3.1 试验数据

针对某坑道花岗岩介质, 开展了现场原位渗透率测量试验 (见图 2), 共实测了 10 个钻孔的原位渗透率数据。根据以往资料, 该坑道位置远高于地下水面, 为干燥花岗岩介质, 介质粒径约为 1 mm, 孔隙度约为 0.01。以其中两个钻孔为例进行说明, 记其钻孔编号分别为 #1, #2。两孔均采用手工风钻在岩石壁面钻孔, 两孔直径均为 38 mm, 孔深均为 1.3 m, 胶塞膨胀压力均为 1.5 MPa, 试验段均位于距孔口 0.52 m 至 0.84 m 处, 采用量程为 5 L/min 的气体质量流量计。

试验过程中, 环境温度为 16℃, 依次按照 1, 2, 3, 4 L/min 的固定流量向两个钻孔内充入空气, 待试验段内压力充分稳定后按照下一个固定流量继续向两个钻孔内充气。4 组不同流量的渗透试验完成后, 关闭进气阀, 使试验段内气体压力自然降低。整个试验过程中, 通过无纸记录仪实时记录试验段内压力数据, 对每个钻孔测 4 组流量值, 其压力曲线分别见图 3, 4。

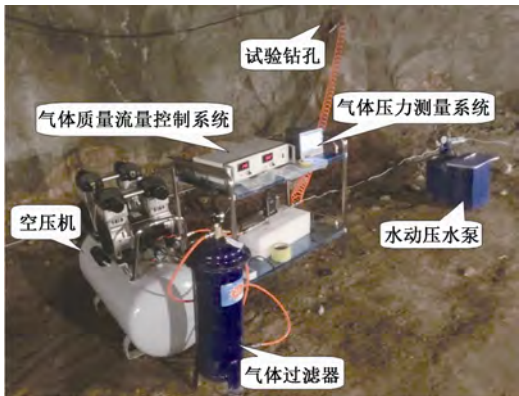


图2 原位试验现场图

Fig. 2 Field picture of in-situ tests

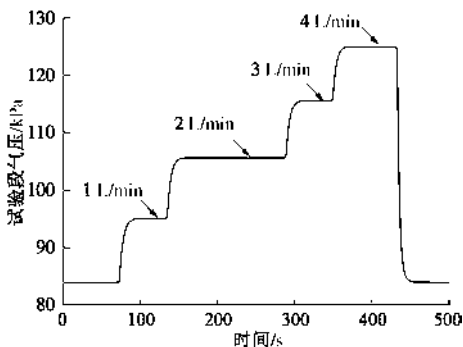


图3 #1 孔压力曲线

Fig. 3 Pressure curve of hole No. 1

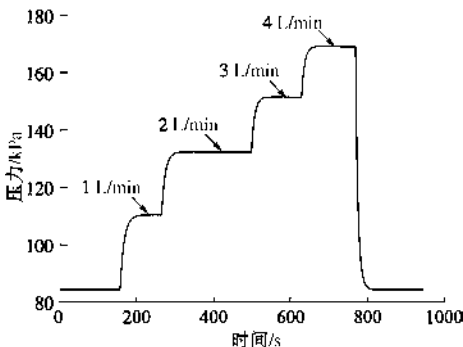


图4 #2 孔压力曲线

Fig. 4 Pressure curve of hole No. 2

最终测量结果见表 1, 其中渗透率由式 (7) 算出。将两孔的 4 组渗透率结果进行算术平均, 得到其渗透率的算术均值分别为 $4.01 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 和 $1.60 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 。根据文献中给出的花岗岩介质渗透系数为 $3.3 \times 10^{-6} \sim 5.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ^[20], 换算得到花岗岩介质的渗透率为

$6.06 \times 10^{-15} \sim 9.56 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, 因此本文方法所得花岗岩渗透率与文献认识相符。

表1 试验孔测试数据表

Table 1 Measured data of test holes

钻孔 编号	标况流量 /(L·min ⁻¹)	环境气压 /kPa	稳定气压 /kPa	渗透率 /m ²
#1	1	83.9	95.2	4.12×10^{-14}
	2	83.9	105.6	4.06×10^{-14}
	3	83.9	115.6	3.96×10^{-14}
	4	83.9	125.0	3.89×10^{-14}
#2	1	85.1	110.4	1.64×10^{-14}
	2	85.1	132.2	1.61×10^{-14}
	3	85.1	151.4	1.58×10^{-14}
	4	85.1	169.0	1.55×10^{-14}

3.2 试验数据分析

(1) 钻孔内气体压力历程分析

试验中, 气源以固定质量流量向钻孔内充气: 在初始阶段, 钻孔内的充气量大于孔壁的入渗量, 因此钻孔内压力升高; 同时随着孔内压力升高, 孔隙壁的气体压力梯度增大, 入渗量增大; 当孔壁的入渗量等于钻孔的充气量时, 整个试验达到稳定状态, 钻孔内的气体压力稳定。当改变充气流量时, 上述过程重复进行。当停止充气后, 钻孔内气体压力逐渐下降至环境气压。

(2) 达西渗流判断

本文试验系统及测试方法的理论基础是假定气体在岩体中渗流符合达西定律, 因此为确保结果的可靠性, 首先需要确认实际渗流过程是否符合达西渗流。

根据钻孔直径 0.0038 m, 试验段长度 0.32 m, 计算可得试验段圆柱体侧面积为 0.00382 m^2 ; 将不同试验对应的温度、稳态气压代入理想气体状态方程, 可得其对应的钻孔空气密度; 再将岩石孔隙度 0.01、岩石粒径 0.001 m、标况流量等代入式 (11), 可得到各次试验的雷诺数值 (由于实际渗流过程及参数复杂, 因此该雷诺数为粗略估计值), 见表 2。

表2 各次试验的雷诺数

Table 2 Reynolds number of tests

钻孔 编号	标况流量 /(L·min ⁻¹)	气体流速 /(m·s ⁻¹)	空气密度 /(kg·m ⁻³)	雷诺 数
#1	1	0.0044	1.15	1.18
	2	0.0088	1.27	2.61
	3	0.0132	1.39	4.29
	4	0.0176	1.51	6.22
#2	1	0.0044	1.33	1.37
	2	0.0088	1.59	3.27
	3	0.0132	1.83	5.65
	4	0.0176	2.04	8.40

从以上结果看, 各次试验的气体渗流雷诺数均小于 9, 大部分小于 7, 符合巴甫洛夫斯基给出的层流判断条件, 即气体在岩体中渗流符合达西定律的假设条

件成立, 试验所得岩石渗透率数据有效。

(3) 充气流量对测量结果的影响

理论上, 对于同一测量位置, 岩石介质的渗透率是确定的, 与测量所采用的气体流量大小无关。但是多次实测结果均表明, 对同一测量位置采用不同流量进行充气试验得到的岩石渗透率略有差异, 此现象在国外气测渗透率研究中同样存在。具体到本文所列各次试验, 随着气体流量增大, 得到的渗透率测量结果略有减小。

原因可能有: ①模型假设气体在岩体中渗流符合达西定律, 虽然通过粗略计算, 各次试验在理论上均符合达西层流的特征, 但在实际渗流过程中, 层流与紊流并没有十分清晰的界限, 而是一个渐变的过程, 意味着即使是在层流范畴内, 随着流量和流速增大, 采用层流模型导致的误差也会有所增加。②随着气体流量增大, 渗透率测量结果减小, 未必是一个确定的规律, 也可能仅仅是测量样本量较小导致的现象, 国外类似研究中发现随着气体流量增大, 渗透率测量结果既有减小又有增大的情况。

不管是什么原因导致的岩石渗透率测量结果随着气体流量变化有所差异, 总之这个差异较小, 因此在可接受的范围。工程应用中可将不同流量充气试验所得渗透率的平均值作为测量结果, 从而使得测量结果更加合理。

(4) 胶塞膨胀压力对试验结果影响

为保证试验安全, 防止试验过程中封孔器从孔中射出, 要求试验段充气压力小于胶塞膨胀压力的 $2/3$ 。试验所采用的空压机输出压力最高可达到 0.7 MPa , 因此胶塞膨胀压力至少需要 1 MPa 。而在试验中, 希望达到较好的封孔效果, 将胶塞膨胀至 1.5 MPa 的压力。

试验中发现胶塞膨胀压力的改变, 对试验中钻孔内稳定气体压力有微小影响。理论上, 胶塞膨胀压力增大, 封孔效果更好, 试验测量结果准确性更高。由于采用手工压水泵产生的静水压力远大于常规空压机产生的气体压力, 因此对胶塞膨胀封孔而言, 本文采用的压水方式比国外类似试验中采用的充气方式效果更好, 试验系统更加完善。

(5) 测试数据代表范围

通过前期研究可知, 该原位渗透率测量方法的数据代表区域为: 以试验段中心为中心, 半径为试验段长度加上半个胶塞长度的球体^[17]。对该试验, 胶塞长度 0.30 m , 试验段长度 0.32 m , 那么测量数据的有效代表范围可达 0.4349 m^3 。本试验中采用的胶塞封孔器尺寸较小, 如果采用尺寸更大的封孔器, 那么测量结果的代表范围更大。室内试验由于受到试验仪器尺寸

限制, 通常试件尺寸较小, 例如常规岩石渗透测量仪要求的试件为直径 0.05 m , 高 0.10 m 的圆柱试件, 其测量数据的有效代表范围仅约 0.000196 m^3 。本文方法所测的渗透率代表范围为实验室测量的 2219 倍, 充分说明了原位测量方法的数据代表性更好。

(6) 数据对比验证

对以上各次试验, 均进行多轮重复性试验, 结果表明: 在相同气体质量流量的情况下, 其钻孔内稳定压力完全一致, 即所得岩石渗透率完全一致, 从而证明了数据具有较好的重复性。另外, 也说明渗透率测量结果与测量顺序无关。

为进一步验证测量结果的准确性, 理论上应与其他测量方法如实验室测量方法进行比较。但是由于原位渗透率测量方法针对的对象是现场岩体, 而实验室测量方法针对的对象是岩芯或加工好的岩石样品, 两者在岩石代表性上有较大差异, 因此直接比较意义并不大, 本文未进行与实验室方法的直接对比研究。

4 结 语

本文基于稳态气体渗流理论, 建立了一套更加完善的岩石渗透率原位测量系统, 在某场地花岗岩介质中开展了原位试验, 并对一系列关键试验环节进行了深入分析。试验结果表明, 该系统具有较好的重复性和稳定性, 测试结果较为合理且代表范围更大, 能够应用于岩石介质渗透率的现场原位测量中。该测量方法对于评估洞室壁局部区域及地质体的渗透特性具有独特优点, 适用于较大尺度的现场气体渗流研究。需要说明的是, 本文试验系统及方法针对的是非饱和带岩石渗透率的测量, 对于饱和带岩石渗透率测量可采用液测法实施。

对于原位气体渗透试验中一旦出现非达西流的情况, 该如何对测量结果进行修正, 本文暂未考虑, 将在今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44 - 47. (ZHU Guang-ya, LIU Xian-gui, LI Shu-tie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 44 - 47. (in Chinese))
- [2] 李 萍, 王新征, 牛冠毅, 等. 类混凝土材料气体渗透率测量方法研究[C]//第 23 届全国结构工程学术会议. 兰州, 2014: 56 - 66. (LI Ping, WANG Xin-zheng, NIU Guan-yi, et al. Measurement methods of gas permeability for similar-concrete materials[C]// The 13th National Conference

- on Structural Engineering. Lanzhou, 2014: 56 - 66. (in Chinese))
- [3] 胡昌蓬, 宁正福. 室内渗透率测量方法对比分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, **14**(1): 75 - 78. (HU Chang-peng, NING Zheng-fu. A comparative analysis of permeability measuring methods in laboratory[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2012, **14**(1): 75 - 78. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [5] 杨建平, 陈卫忠, 田洪铭, 等. 低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(12): 2377 - 2382. (YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, TIAN Hong-ming, et al. Development of thermo-gaseous-mechanical coupling triaxial testing system of low permeability medium and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(12): 2377 - 2382. (in Chinese))
- [6] 李关虎. 定压稳态气测渗透率仪的研制[D]. 荆州: 长江大学, 2012. (LI Guan-hu. The measuring instruments of core gas permeability based in steady pressure[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012. (in Chinese))
- [7] 张 铭. 低渗透岩石试验理论及装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(6): 919 - 925. (ZHANG Ming. Theory and apparatus for testing low-permeability of rocks in laboratory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(6): 919 - 925. (in Chinese))
- [8] 万军凤. 非稳态气测渗透率新方法研究及实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2008: 9 - 11. (WAN Jun-feng. Research and implementation of a new unsteady state method of measuring gas permeability[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008: 9 - 11. (in Chinese))
- [9] 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, TAKAHASHI M, WU Zhi-sen, et al. Transient pulse technique and its application to convention triaxial compressive tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(S1): 1725 - 1733. (in Chinese))
- [10] CYNTHIA L D, FRED J M, JAMES W C. A new small drill hole minipermeameter probe for in situ permeability measurement: fluid mechanics and geometrical factors[J]. Water Resources Research, 2003, **39**(7): 1 - 13.
- [11] COSENZA P, GHOREYCHI M, BAZARGAN-SABET B, et al. In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**: 509 - 526.
- [12] WALTER A I, SHLOMO P N. Steady-state analysis of cross-hole pneumatic injection tests in unsaturated fractured tuff[J]. Journal of Hydrology, 2003, **281**: 36 - 54.
- [13] GUZMAN A G, GEDDIS A M, HENRICH M J, et al. Summary of air permeability data from single-hole injection tests in unsaturated fractured tuffs at the Apache Leap Research Site: Results of steady-state test interpretation[R]. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1996.
- [14] LECAIN G D. Pneumatic testing in 45-Degree-Inclined boreholes in Ash-Flow Tuff near Superior, Arizona[R]. Denver: U.S. Geological Survey, 1995.
- [15] LECAIN G D. Air-injection testing in vertical boreholes in Welded and Nonwelded Tuff, Yucca Mountain, Nevada[R]. Denver: U.S. Geological Survey, 1996.
- [16] COOK P. In situ pneumatic testing at Yucca Mountain[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000(7): 57 - 67.
- [17] 牛冠毅, 曹 渊, 王铁良. 原位气体渗透率测量试验公式推导[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1705 - 1709. (NIU Guan-yi, CAO Yuan, WANG Tie-liang. Deduction of in-situ gas permeability test equation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1705 - 1709. (in Chinese))
- [18] 孙东坡. 水力学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007: 187. (SUN Dong-po. Hydraulics[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2007: 187. (in Chinese))
- [19] 者建伦, 张春娟, 余金凤. 工程水力学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009. (ZHE Jian-lun, ZHANG Chun-juan, YU Jin-feng. Engineering hydraulics[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2009. (in Chinese))
- [20] 余钟波, 黄 勇, FRANKLIN W S. 地下水水文学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (YU Zhong-bo, HUANG Yong, FRANKLIN W S. Principle of groundwater hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))