

低渗透介质温度 - 应力 - 渗流耦合三轴仪 研制及其应用

杨建平, 陈卫忠, 田洪铭, 伍国军

(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)

摘要: 详细介绍研制的低渗透介质温度 - 应力 - 渗流耦合三轴仪, 该试验系统可以在常温~90 °C 范围、三轴室活塞最大轴向力 1 000 kN、围压 40 MPa 内对直径 50 和 100 mm 的标准试样进行轴向和径向渗透试验。解决长时间、高温(<90 °C)条件下试样气体渗透密封性、微流量气体体积量测以及长时间试验温度保持均匀、恒定等技术问题, 确保复杂条件下低渗透介质渗透性测试。应用研制的三轴仪, 对雅砻江锦屏 II 级电站辅助洞白山组大理岩进行渗透性测试。试验结果表明: 研制的三轴仪可以满足温度 - 应力 - 渗流耦合试验的要求, 试验过程稳定、试验数据精度较高, 可用于石油/天然气地下能源储存、低渗透油气田开发、高瓦斯矿井瓦斯抽放、放射性废料地质深埋处置等工程中围岩介质渗透特性研究, 可为工程安全和环境评估提供基本参数。

关键词: 岩石力学; 低渗透介质; 渗透仪; 温度 - 应力 - 渗流耦合

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)12 - 2377 - 06

DEVELOPMENT OF THERMO-GASEOUS-MECHANICAL COUPLING TRIAXIAL TESTING SYSTEM OF LOW PERMEABILITY MEDIUM AND ITS APPLICATION

YANG Jianping, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, WU Guojun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: A new thermo-gaseous-mechanical coupling laboratory apparatus measuring rock properties is developed and used to measure gas flow rate for two different specimen sizes of 50 mm and 100 mm in diameter. Either axial or radial permeability way can investigate gas transport properties in rocks. The maximum test temperature is 90 °C, the maximum axial force of triaxial piston can be 1 000 kN and the maximum confining pressure is 40 MPa. Difficult techniques for permeability test of low permeability medium such as long testing time (lasting one week), sample sealing performance under high temperature (less than 90 °C), accuracy of micro-flow measuring, uniformity and constancy of testing temperature during test are solved. Tests are carried out on dense marble samples taken from Jinping II hydropower station. Test results show that the apparatus can satisfy the requirement for thermo-gaseous-mechanical coupling test for low permeability medium. Using this equipment, transport parameters of surrounding rock are available for environment evaluation and steady analysis in important projects such as oil/gas storage in depth, oil/gas exploitation in low permeability oil/gas field, gas drainage in gas mine and geological disposal of high radioactive waste.

Key words: rock mechanics; low permeability medium; low permeability test machine; thermo-gaseous-mechanical coupling

收稿日期: 2009 - 04 - 14; **修回日期:** 2009 - 07 - 07

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(40772184); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724603)

作者简介: 杨建平(1982 -), 男, 博士, 2004 年毕业于中国地质大学(武汉)地球科学学院地质学专业, 现任助理研究员, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: jpyang@whrsm.ac.cn

1 引言

渗透性对岩石工程、工程水文地质、工程地球物理、地球化学研究具有极其重要的意义,然而由于岩石渗透性试验的特殊性和复杂性,目前无论在国际上或在国内,针对低渗透岩石的试验和理论研究还远远没有达到工程安全性评估所需要的水准。目前,国外低渗透性测试设备可以测到渗透率为 $10^{-22} \text{ m}^{2[1\sim4]}$ 的介质,主要是应用脉冲法测试,其应用主要集中于用于核废料、能源储存的盐岩等方面;国内低渗透率介质的测试精度基本在 $10^{-17} \text{ m}^{2[5\sim12]}$,主要集中在砂岩、泥岩、页岩、灰岩、煤岩等油气田、煤矿瓦斯等领域。

李小春等^[5]介绍的渗透系数-变形耦合试验系统可以测量岩石变形过程中渗透系数的变化;张铭^[6]设计开发了高精度通用渗透试验装置,可以采用定水位法、定流量法或压力脉冲法测试岩石的渗透系数;郑少河等^[7]采用太原理工大学采矿工艺研究所研制的MDS-200型(大岩样)三轴渗透试验台研究了三维应力作用下裂隙的渗流规律;张守良等^[8]使用美国TerraTek公司生产的高温高压岩石三轴试验仪研究了岩石变形过程中渗透率变化;姜振泉等^[9, 10]利用从美国引进的815-02型岩石力学电液伺服系统研究了岩石试样应力-应变全过程阶段的渗透系数的变化;李小春等^[11]开发的变容脉冲法装置的渗透系数理论测量范围为 $2 \times 10^{-4} \sim 30 \text{ mD}$;黄润秋等^[12]开发的岩石高压渗透装置可以在一定围压、轴压情况下进行渗出水体积的测定获得岩石的渗透系数。

J. C. Stormont 和 J. J. K. Daemen^[1]对渗透率低

于 10^{-17} m^2 的盐岩使用气体压力脉冲法进行了测量,24 h的测量精度达到 $5 \times 10^{-22} \text{ m}^2$; E. Spangenberg等^[2]使用卤水作为渗透介质,对渗透率低于 10^{-17} m^2 的盐岩进行测量。P. Consenza等^[3]在法国Amelie Mine现场安装了渗透试验装置,通过卤水和气体对盐岩的渗透性进行现场量测,得出渗透率为 $2 \times 10^{-21} \text{ m}^2$; O. Schulze等^[4]用Karman型压力试验机对盐岩进行了力学试验,同时测量了超声波速的变化和渗透率的变化,得出的渗透率为 10^{-19} m^2 。

目前,我国实施与规划中的石油(天然气)地下能源储存、低渗透油气田开发、高瓦斯矿井瓦斯抽放、放射性废料地质深埋处置等工程,都涉及到在复杂的地质结构中建造地下工程。其中,对低渗透岩石渗透率的测试及其对环境影响的评估是一个重要方面。而国内尚未具备研究不同应力、不同地温条件岩石介质(如盐岩低至 10^{-20} m^2)渗透特性的试验设备。针对低渗透试验时间长、密封难、测量精度要求高等难点,作者研制了低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪,可实现一定温压条件下低渗透介质的渗透特性研究。本文主要对所研制三轴仪的结构及主要性能进行说明,最后通过试验对其可靠性和稳定性进行验证。

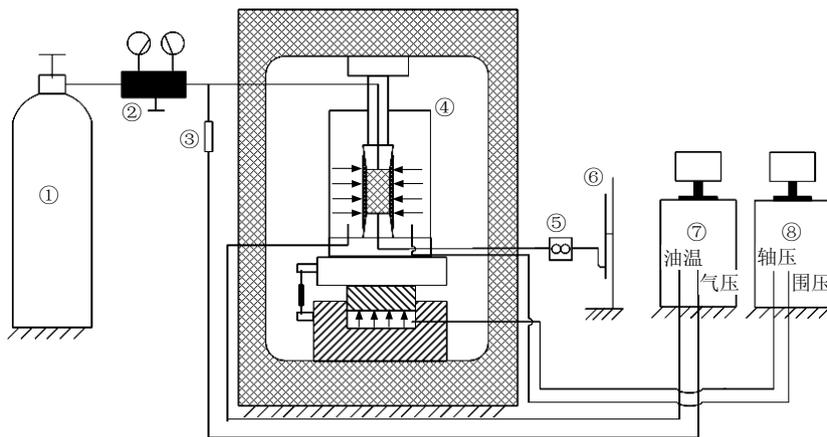
2 低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪组成

低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪示意图见图1,它主要由4个部分组成:(1)轴压、围压伺服系统;(2)三轴室加温、恒温系统;(3)气体渗透系统;(4)数据采集记录系统。

2.1 轴压、围压伺服系统



(a) 仪器实物图



①—高压氮气；②—气体减压阀；③—气压传感器；④—温度 - 应力 - 渗透三轴室；⑤—微流量计；⑥—皂泡流量计；
⑦—温度 - 气体压力数据采集控制系统；⑧—轴压 - 围压数据采集控制系统
(b) 工作原理图

图 1 低渗透介质温度 - 应力 - 渗流耦合三轴仪示意图

Fig.1 Sketches of developed triaxial thermo-gaseous-mechanical coupling triaxial testing system

三轴室轴压、围压伺服系统采用成熟的 RMT - 201 岩石与混凝土力学试验系统。该系统是专为岩石和混凝土一类的工程材料进行力学性能试验而设计的，功能齐全，操作方便，自动化程度高，试验完全在计算机控制下进行。温度 - 应力 - 渗透三轴试验仪轴向允许加载力为 1 000 kN，三轴室油压允许压力为 40 MPa，误差不超过显示值的 0.5%。在试验过程中，轴压、围压曾在 2 个星期保持稳定，误差不超过 0.1%，良好的伺服性能保证了低渗透介质渗透性试验过程中试样应力状态的恒定。

2.2 加热、恒温系统

加热、恒温系统给试样提供恒定的温度。加热电阻元件布置在三轴室腔体外侧给腔体里面的液压油加热，腔底靠近试样的位置安装有热电偶，温度 - 气体压力数据采集控制系统⑦安装有温度测量仪表和温度微控制器，温度测量仪表显示三轴室内油温，微控制器可以在常温~90 °C 范围内控制油温，精度为 0.1 °C。试验表明，从 25 °C(室温)加热到 40 °C，在 2 h 的恒温条件下，油温达到稳定。

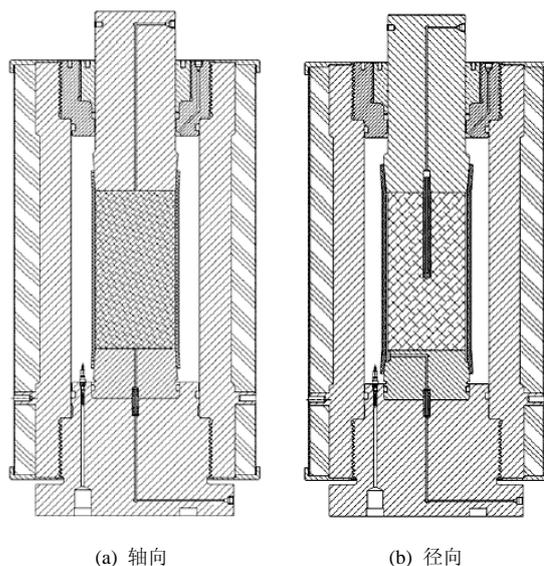
2.3 气体渗透系统

气体渗透系统包括注气系统、试样渗透系统和气体流量测量系统，其关键是试样渗透系统气体的密封性和气体流量测量系统内微流量的测量精度保证。

注气系统包括高压氮气①和气体减压阀②，由上海减压器厂定制的高压氮气减压阀可以将氮气瓶中的氮气减压至一个大气压~10 MPa，并且保持出气压力恒定；为了实时采集高精度的注气压力数据，

在气体减压阀后面连接了进口气压传感器③，量程为 25 MPa，测量精度为满量程的 1%。

试样渗透系统包括 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ， $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 尺寸试样的轴向、径向渗透测试系统各一套，图 2 为试样的轴向和径向渗透系统示意图。轴向渗透的活塞和底座的表面有凹槽且在中心轴线处有直径 2 mm 的空心通道，保证试样上表面有均布的注气压力以及试样下表面渗出气体的流动采集。图 3 为轴向渗透活塞表面照片。径向渗透活塞以及底座表面平整，在活塞中心有直径 6 mm 的孔和试样中加工的深 100 mm 的孔通过连接管对接(对 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试验，钻孔深 50 mm)，气体



(a) 轴向 (b) 径向
图 2 轴向、径向渗透系统示意图

Fig.2 Sketches of axial and radial permeability testing system



图3 轴向渗透活塞表面照片

Fig.3 Photo of axial permeability piston surface

通过试样中心小孔向周围渗透，在试样和胶套中间有一层玻璃纤维，气体通过这部分通道汇集流向底座侧面的环向凹槽，然后流向气体测量系统。

气体流量测量系统包括图1中的微流量计⑤和皂泡流量计⑥，微流量计由 Gilmont 公司生产，量程为 0.02~10 mL/min，对空气流量的测量精度达到 0.001 mL/min；皂泡流量计通过测量一段时间内气体渗透流量来计算单位时间内气体的流量，对低渗透介质需要足够长的测试时间，目前测试的致密大理岩渗透率低至 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。

试样密封胶套使用高强度有机硅制模橡胶 SILASTIC S 在特定的模具中制作而成。制成的胶套见图4，2套定制的模具分别用于制作 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ， $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 尺寸试样的胶套，制成的胶套厚 7 mm。胶套具有很好的弹性，在较高温度下也有较长的使用寿命，但在 200 °C 以上长期使用会造成其弹性下降。胶套的弹性和耐温性能能够满足试验温度 90 °C 内多次使用的要求。试样上、下端和活塞、底座连接的部位采用倒圆台挤压密封技术，(见图2)。

2.4 数据采集控制系统

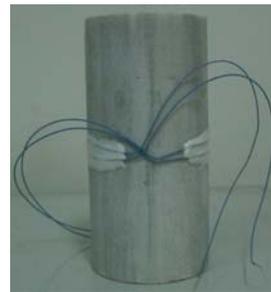
数据采集控制系统包括温度 - 气体压力数据采集控制系统⑦和轴压 - 围压数据采集控制系统⑧。轴压 - 围压数据采集控制系统主要由位移传感器、压力传感器、高性能 A/D, D/A 数据采集板等组成。试验过程中，操作者可以进行干预，转换控制方式和试验参数；也可以预先设置试验步骤，由计算机自动完成。试验结束后，系统可以自动退回到初始状态，并能方便地给出试验结果。温度 - 气体压力数据采集控制系统主要采集气体注气压力、三轴室油温、三轴室内试样上用应变片测试的轴向应变和环向应变，并且能设定三轴室油温值进行温度控制。



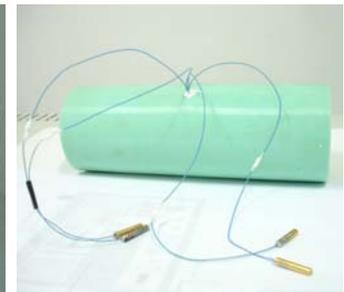
(a) 试样 B1 - 1



(b) 试样 D - 12



(c) 试样 B1 - 1 应变片黏贴



(d) 胶套安装

图4 试样、应变片黏贴及胶套安装图片

Fig.4 Pictures of samples, stucked strain gauge and installed rubber jacket

Metrolog 软件可以在计算机屏幕上显示各测量值的实时变化，进行监控。

3 温度 - 应力 - 渗流耦合试验

对试验系统进行了调试与检测。试样取自锦屏 II 级电站辅助洞白山组大理岩(试样 B1 - 1, D - 12, 见图4)。渗流方式为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试样轴向渗流。

在试样上黏贴好环向应变片后，将试样装进密封胶套，从胶套中间部位开一个小孔，引出应变片导线，再将小孔用耐高温的硅胶封闭。在三轴室内安装直径 $\phi 50 \text{ mm}$ 的轴向渗透的活塞和底座。连接应变接线后安装好三轴室上面的封盖，即完成了三轴室内试样安装。

三轴室安装完成后，连接上三轴室的数据采集导线、电阻丝加热线，并将三轴室与注气系统、气体流量测量系统连接好，即可进入试验阶段。

试验步骤：(1) 关闭注气系统连接三轴室的阀门，以防加压过程中意外发生，如三轴室内高压油进入气路系统。(2) 静水压力下加载轴压、围压至试验的围压值，再加载轴压至试验设置值。(3) 设

定试验温度, 给三轴室内液压油进行升温, 待油温恒定后进入下一个步骤。(4) 打开高压气瓶, 通过减压阀获得恒定的注气压力, 打开注气系统连接三轴室的阀门, 进行气体渗透试验。(5) 在气体测量系统读取一定时间内的气体流量值, 得到渗流速度。每隔一个时间段读一次数据, 待前后几次渗流速度不变时, 试样中气体渗流即为稳态渗流, 此时记录的数据为一定温度、一定注气压力下试样中气体的稳态渗流速度。(6) 改变注气压力, 得到不同注气压力下试样中气体的稳态渗流速度。(7) 按照试验设定改变油温、试样应力值, 得到不同条件下试样中的气体稳态渗流速度。(8) 关闭三轴室与注气压力系统、气体测量系统的阀门, 卸三轴室围压、轴压, 卸下试样, 试验完成。

在轴压 10 MPa、围压 10 MPa、出气压力 0.1 MPa 下, 测量了不同注气压力、不同油温条件下试样 B1 - 1 的稳态渗流值。试验结果见图 5。

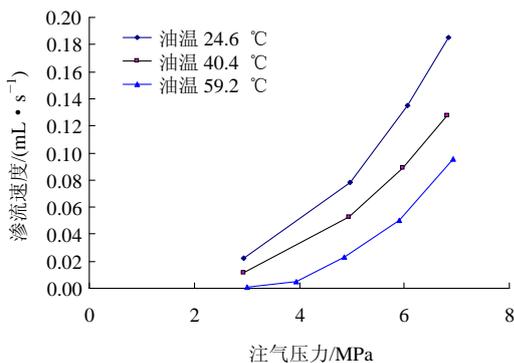


图 5 不同油温下试样 B1 - 1 渗流速度 - 注气压力关系图
Fig.5 Relationships between gas flow rate and input gas pressure of sample B1 - 1 under different oil temperatures

在围压 10 MPa、出气压力 0.1 MPa, 26 °C 油温下, 测量了不同注气压力、不同轴压条件下试样 D - 12 的稳态渗流值。试验结果见图 6。

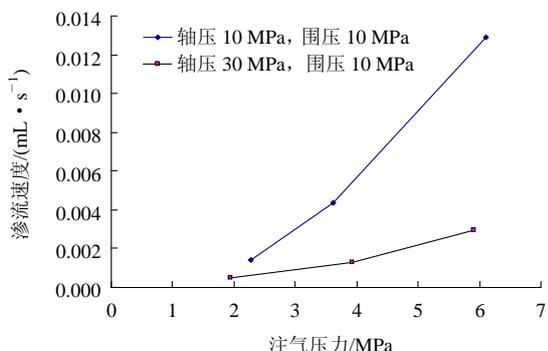


图 6 不同应力状态下试样 D - 12 渗流速度 - 注气压力关系图
Fig.6 Relationships between gas flow rate and input gas pressure of sample D - 12 under different stress conditions

4 试验结果分析

用考虑气体渗透的 Klinkenberg 效应分析方法对试验结果进行分析^[13], 可以得出试样 B1 - 1, D - 12 在不同温度和不同应力状态下的渗透率(见图 7, 8)。

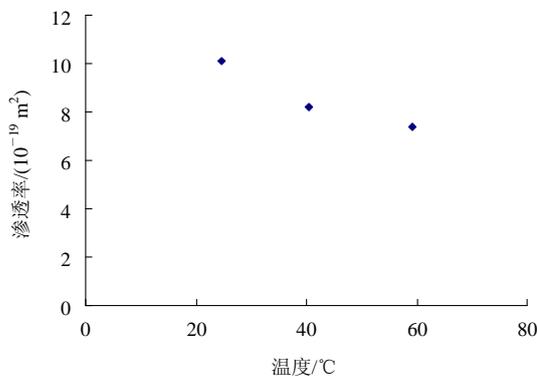


图 7 不同温度下试样 B1 - 1 的渗透率

Fig.7 Intrinsic permeability of sample B1 - 1 under different temperatures

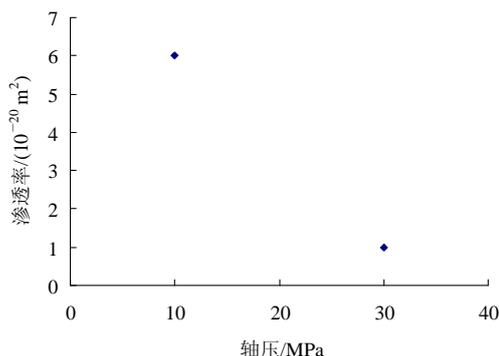


图 8 不同应力状态下试样 D - 12 的渗透率

Fig.8 Intrinsic permeability of sample D - 12 under different stress conditions

由计算结果分析可知:

(1) 在弹性压密阶段, 不产生热破裂时^[14, 15], 岩石升温过程中发生热膨胀并且弹性模量降低, 导致岩石内部渗流通道孔径减小, 表现为渗透率随着温度升高而降低。

(2) 温度不变时, 岩石在弹性受压条件下, 岩石渗透率随着压应力的增大而减小。测得试样 D - 12 在 30 MPa 轴压、10 MPa 围压的渗透率为 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 较轴压、围压均为 10 MPa 时降低了 7 倍。

(3) 试样 B1 - 1 和 D - 12 的试验结果对比发现, 试样 B1 - 1 比 D - 12 的渗透率高出一个量级。从图 4 也可以看出, 试样 B1 - 1 平行于轴向有多组成分结

构面,这可能是造成试样 B1-1 轴向渗透性较大的原因。

5 结 论

本文介绍了一套由作者自行研制的低渗透介质温度-应力-渗流耦合三轴仪。该三轴仪整体性能良好,具有强大的伺服控制功能和数据采集功能,综合性能较高,具有以下特点:

(1) 解决了低渗透介质渗透性测试装置长期试验过程中气体密封困难和气体微流量测试精度低等问题,可以进行不同应力和温度条件下低渗透岩石类介质渗透率的高精度测定,可以进行三轴压缩条件下的温度-应力-渗流耦合试验。利用该系统,已经成功得到锦屏大理岩块在不同温度、应力条件下,不同注气压力时的稳态渗流速度。

(2) 试验装置采用全数字液压伺服控制,轴向最大加载压力 1 000 kN,最大围压 40 MPa,最大注气压力 15 MPa,试样尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 或 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,试验最高温度可达 90 °C,既可以实现径向渗透测试也可以实现轴向渗透测试。测试得到的渗透率低至 10^{-21} m^2 。

(3) 稳定的轴压、围压恒压系统、先进的温控技术、性能良好的试样密封胶套以及试样密封技术保证了低渗透介质长时间试验的要求,试验测得的锦屏大理岩的渗透率低至 $1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。

(4) 对大理岩进行的温度-应力-渗流耦合试验得出:在弹性受压阶段,岩石未发生热应力微破裂、未进入扩容阶段时,大理岩渗透率随着温度升高而降低,随着压力增大而降低。

参考文献(References):

- [1] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(4): 325 - 342.
- [2] SPANGENBERG E, SPANGENBERG U, HEINDORF C. An experimental study of transport properties of porous rock salt[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23(3): 367 - 371.
- [3] CONSENZA 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(4): 509 - 526.
- [4] SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. Engineering Geology, 2001, 61(2): 163 - 180.
- [5] 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 1): 1 725 - 1 733.(LI Xiaochun, TAKAHASHI M, WU Zhishen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 1 725 - 1 733.(in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 郑少河, 赵阳升, 段康康. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 133 - 136.(ZHENG Shaohe, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian. An experimental study on the permeability law of natural fracture under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 133 - 136.(in Chinese))
- [8] 张守良, 沈 琛, 邓金根. 岩石变形及破坏过程中渗透率变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 885 - 888.(ZHANG Shouliang, SHEN Chen, DENG Jingen. Testing study on the law of permeability variation in process of rock deformation and damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 885 - 888.(in Chinese))
- [9] 姜振泉, 季梁军, 左如松, 等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1 442 - 1 446.(JIANG Zhenquan, JI Liangjun, ZUO Rusong, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servo-controlled condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1 442 - 1 446.(in Chinese))
- [10] 王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1 703 - 1 708.(WANG Huanling, XU Weiya, YANG Shengqi. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1 703 - 1 708.(in Chinese))
- [11] 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): 2 482 - 2 487.(LI Xiaochun, 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): 2 482 - 2 487.(in Chinese))
- [12] 黄润秋, 徐德敏, 付小敏, 等. 岩石高压渗透试验装置的研制与开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 1 981 - 1 992.(HUANG Runqiu, XU Demin, FU Xiaomin, et al. Development and research of high pressure permeability testing system for rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 1 981 - 1 992.(in Chinese))
- [13] 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 Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, 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))
- [14] 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东. 温度对岩石渗透率影响的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 51 - 53.(LIU Junrong, QIN Jishun, WU Xiaodong. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability[J]. Journal of University of Petroleum(Natural Science), 2001, 25(4): 51 - 53.(in Chinese))
- [15] HEARD H C. Thermal expansion and inferred permeability of climax quartz monzonite to 300 °C and 17.6 MPa[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1980, 17(2): 289 - 296.