

不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究

贺玉龙¹, 陶玉敬², 杨立中¹

(1. 西南交通大学 环境科学与工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 实际岩石裂隙的裂隙面具有不同的粗糙度, 难以满足立方定律的使用条件。根据 N. Barton 和 V. Choubey(1977年)提出的 10 条节理粗糙度(JRC)标准剖面轮廓曲线, 本试验运用数控电火花线切割技术, 加工出具有不同节理粗糙度系数(JRC = 0~20)的 10 个钢模板, 制作出 10 个包含不同 JRC 值单裂隙的圆柱形水泥试样(直径 ϕ 50 mm, 高度 100 mm), 采用 RCCP 联测系统测试不同 JRC 值单裂隙在不同应力水平下的渗透性。试验结果表明: (1) 在低应力水平下, JRC 值对单裂隙的渗流特性有较大影响; 随应力水平的增大, JRC 值对单裂隙渗流特性的影响迅速减小; (2) 不同 JRC 值单裂隙的渗透率与有效应力之间的关系可用负指数函数描述, 并表现出明显的非线性特征, 低有效应力阶段试样渗透率随有效应力的变化速度大于中高有效应力阶段的变化速度。

关键词: 岩石力学; 单裂隙; 节理粗糙度系数; 有效应力; 渗流

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3235 - 06

EXPERIMENTAL RESEARCH ON HYDRAULIC BEHAVIORS IN A SINGLE JOINT WITH VARIOUS VALUES OF JRC

HE Yulong¹, TAO Yujing², YANG Lizhong¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Fluid flow through rock joints is commonly described by the smooth parallel plate model, which includes cubic law. However, the real rock joint surfaces are rough, and the fluid flow through a single fracture is not always consistent with the cubic law. Based on the typical joint roughness profiles proposed by N. Barton and V. Choubey(1977), the templates with different joint roughness coefficients(JRCs) are manufactured by using numerical control wire cut electron discharge machining, and then, ten single-fracture column concrete samples with various JRCs from 0 to 20 are produced(50 mm in diameter and 100 mm in height). The single fracture's permeability tests were conducted at various effective stresses using RCCP test system. The test results show that: (1) The JRC has significant effect on the permeability of a single joint under low effective stress, and the effect of JRC on the permeability of a single joint decreases rapidly with the increasing effective stress. (2) The relationship between the permeability and the effective stress of a single joint follows the law of negative exponent, showing an obvious nonlinear behavior. For a single joint, the rate of change in the permeability versus the effective stress under low stress level is greater than that under middle-high stress level. Moreover, under the low stress level, the permeability of a single joint has a trend of decreasing with the increase of JRC at the same effective stress conditions.

Key words: rock mechanics; single fracture; joint roughness coefficient(JRC); effective stress; fluid flow

收稿日期: 2009 - 12 - 26; **修回日期:** 2010 - 03 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40702040, 40472133); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU09CX058, SWJTU09ZT26)

作者简介: 贺玉龙(1975 -), 男, 博士, 1997年毕业于西南交通大学水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事岩体热 - 水 - 力耦合方面的教学与研究工作。E-mail: yulonghe@163.com

1 引言

裂隙岩体渗流场与应力场耦合作用对工程作用下岩体的响应具有重要影响，单裂隙渗流与应力关系的建立，是裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析研究的基础性课题和关键。G. M. Lomize 等^[1~3]通过光滑平行板缝隙水流试验，提出了著名的立方定律。基于光滑平行板模型的立方定律已广为岩石力学界所接受，然而天然岩体裂隙均为粗糙裂隙，很难满足平行板模型光滑裂隙的假定。许多学者就立方定律对实际粗糙裂隙的适用性进行了大量研究，试验结果^[4]表明，当法向应力较低时，裂隙表面粗糙度对立方定律几乎没有影响。Y. W. Tsang^[5]根据电阻模拟试验结果，认为立方定律对粗糙裂隙的误差在1~2个数量级。S. R. Brown^[4]还利用雷诺方程和裂隙表面形态分形模型，就裂隙表面粗糙度对裂隙水流的影响进行了数值模拟研究，认为裂隙表面粗糙度对立方定律的影响在2倍以内。

基于仿天然裂隙的试验成果，B. Amadei 等^[6~13]对立方定律提出了各种各样的修正。由于裂隙粗糙面的复杂多样性和各自试验条件的差别，研究者给出的修正立方定律各不相同，王媛等^[14~17]对立方定律修正方法及粗糙裂隙渗流研究的最新进展进行了总结。

值得注意的是，在目前的试验研究中，绝大多数采用劈裂或直剪方式形成岩样试验裂缝，以模拟张性裂缝或剪切裂缝。然而，对于同一岩性的岩石而言，劈裂或直剪所得到的裂隙的起伏粗糙程度差别不大，难以得到各种粗糙度的裂隙。郑少河等^[9]所制试件的 $JRC = 6 \sim 12$ 。由于现场采取的裂隙和人工劈裂或直剪得到的裂隙仅能反映某种或某几种特定粗糙度的裂隙，这些试验结果因而难以完全反映实际裂隙的水力特性，在实际工程的应用中存在一定的局限性。

N. Barton 和 V. Choubey^[18]通过分析 136 个节理面的起伏粗糙程度，按平滑到最粗糙，将所有节理面的粗糙程度分为 10 级， $JRC = 0 \sim 20$ ，并给出了典型粗糙度剖面图。该图涵盖的节理面粗糙程度范围广，更接近于实际裂隙。考虑到在工程实践中，裂隙的 JRC 值比裂隙的隙宽更容易获得可靠值，因此，基于 N. Barton 和 V. Choubey^[18]给出的 JRC 标

准剖面轮廓曲线，本文制作出能更加真实反映实际情况的 10 组不同 JRC 值的水泥单裂隙试样，运用 RCCP 联测系统考察其在不同应力条件下的渗流特性，以探究 JRC 值对单裂隙渗流 - 应力耦合特性的影响。

2 不同 JRC 单裂隙试件的制备

不同粗糙度裂隙试样的制备，是本试验的基础和难点所在。根据 N. Barton 和 V. Choubey^[18]提出的 JRC 标准剖面轮廓曲线，将其数字化后，先运用数控电火花线切割技术，加工出 JRC 钢模板，再用水泥浇注出含有不同粗糙度裂隙的试样，然后用直径 $\phi 50$ mm 的水钻钻芯。试样制备流程图如图 1 所示。

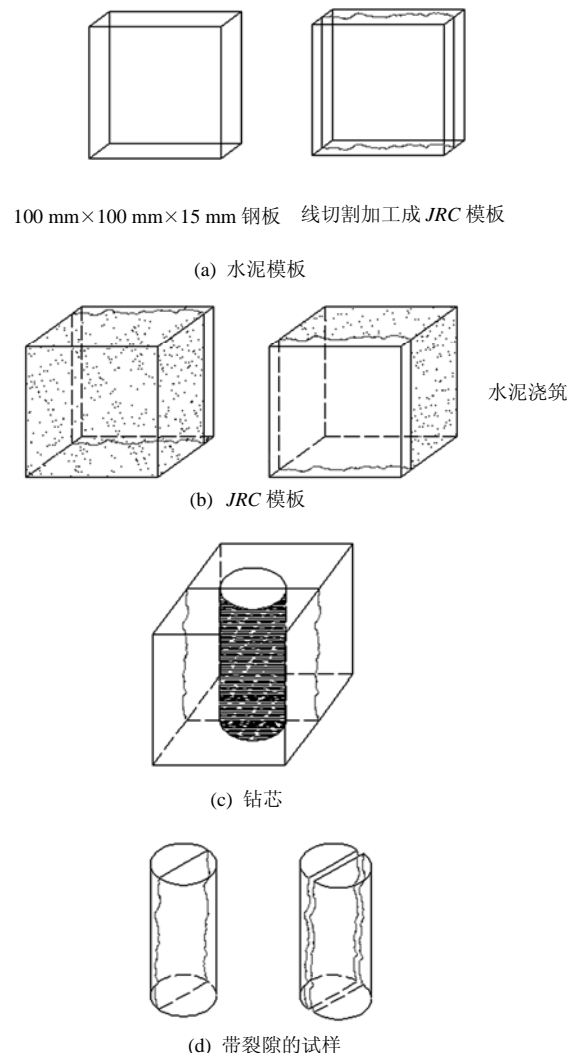


图 1 试样制备流程图

Fig.1 Flow charts of manufacture of samples

2.1 JRC 标准轮廓曲线数字化

用 AutoCAD 软件将 N. Barton 和 V. Choubey^[18]中给出的 *JRC* 标准轮廓曲线数字化(见图 2)。

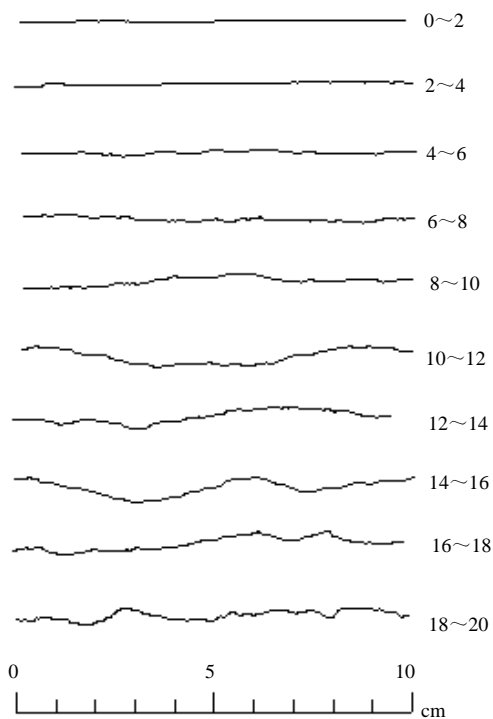


图 2 数字化 *JRC* 标准轮廓曲线图

Fig.2 Digitization and normalized roughness profiles of *JRC*

2.2 数控电火花线切割技术加工试样模板

数控电火花线切割技术利用线状电极(细钼丝或铜丝)靠火花放电对工件进行切割,按预先编制的数控程序控制线状电极运行轨迹,从而得到相应形状的工件。将数字化的 *JRC* 标准轮廓曲线图输入线切割控制机,在 10 块 100 mm×100 mm×15 mm 的钢板上切出不同 *JRC* 值的钢模板(见图 3)。



图 3 不同 *JRC* 值钢模板制作现场

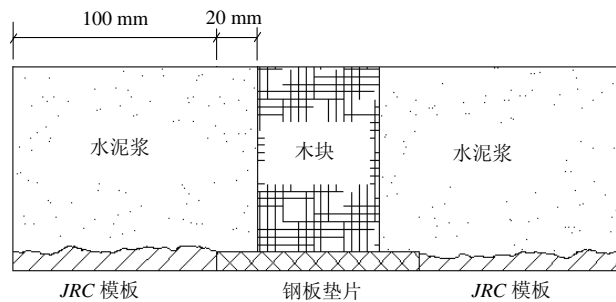
Fig.3 The site of manufacture of templates with various *JRC*s

2.3 水泥浇注试样及养护

试样制备采用 42.5R 普通硅酸盐水泥,高效减水剂添加量为 1.1%,水灰比为 0.28。为了便于下一步的钻芯切割,浇注的试件尺寸为 100 mm×100

mm×120 mm,沿 *JRC* 轮廓曲线方向为 120 mm。浇筑工艺示意图和试样浇筑现场如图 4 所示。

2.4 试件的钻芯切割



(a) 示意图

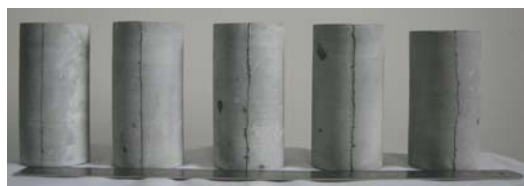


(b) 试样浇筑现场

图 4 浇筑工艺示意图和试样浇筑现场

Fig.4 Schematic diagram and site of samples moulding

试件的钻芯采用直径 $\phi 50$ mm 的水钻。将浇注好的试件裂隙面吻合好后固定,在端部黏结上直径 $\phi 50$ mm 硬质岩片,以固定钻头、减小钻头机械振动引起的误差,防止钻进过程中岩芯发生断裂。制作完成的单裂隙水泥试样见图 5。



(a) *JRC* = 0~10(从左至右)



(b) *JRC* = 11~20(从左至右)

图 5 不同 *JRC* 值单裂隙水泥试样

Fig.5 Cement samples of single joint with various *JRC*s

3 试验过程

采用美国 Core Lab 公司生产的 RCCP 联测系统装置进行试验。RCCP 联测系统由驱替系统、压力传感系统、岩心夹持器、温度传感系统、计量系统和数据处理系统 6 个部分组成(见图 6)。



图 6 RCCP 联测系统
Fig.6 RCCP testing system

试验主要为了研究较低围压水平下的裂隙渗透规律，为了简化试验条件，减少其他因素对试验结果的影响，设定试样处于只受围压和水压状态，轴向不施加荷载，进口水压设为定值 0.1 MPa，出口通大气，只变动围压。为保证试样外壁与橡胶套之间不漏水，施加的围压不小于 0.9 MPa，即有效应力最小为 0.8 MPa。根据试验研究目的和试验设备条件，设定了 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 8.0 和 13.0 MPa 九个有效应力点。

试验前，将试样烘干，抽真空 3.5 h，并用蒸馏水饱和 48 h，以保证试验过程中试样中的渗流为单相流。试验开始后，将驱替系统的泵调到恒压模式下，调节设定驱替进口压为 0.1 MPa，出口通大气，稳定一段时间后，用秒表和量筒测量并记录该级围压下岩样的稳定渗流量；然后加下一级围压测其稳定渗流量。试验流程如图 7 所示。

4 试验结果及讨论

4.1 试验结果

10 组不同 JRC 值的单裂隙试样有效应力 - 渗流试验结果如图 8 所示。图例中的 1, 3, 5, …, 19 分别表示 JRC 值为 0~2, 2~4, 4~6, …, 18~20 的单裂隙。

4.2 试验分析及讨论

4.2.1 不同 JRC 值裂隙的试验结果分析

对于每条不同 JRC 值单裂隙的试验点，通过非线性拟合，可用下式描述有效应力 - 渗透率关系：

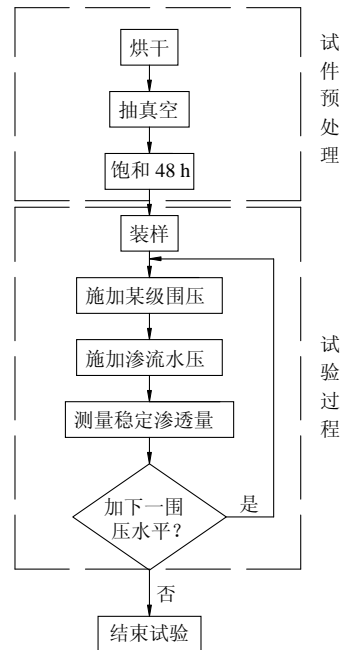


图 7 试验流程图
Fig.7 Flow chart of test

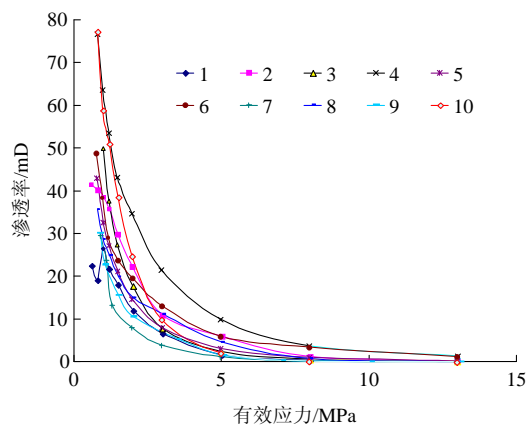


图 8 不同 JRC 值单裂隙有效应力 - 渗透率试验结果
Fig.8 Test results of permeability change versus effective stress of the single joint with various JRCs

$$k = \alpha e^{\beta\sigma} \tag{1}$$

式中： k 为试样渗透率(mD)； σ 为有效应力(MPa)； α, β 均为拟合常数(其中 α 单位为 mD, β 单位为 MPa^{-1})。

对于 $JRC = 0\sim 2$ 的试样，由于开始施加围压过

小, 出现试样密封不好的情况, 故剔除压力过小 (0.6, 0.8 MPa) 的 2 个点。

由图 9 可以看出, 10 条曲线中拟合相关系数 R 最小为 0.974 1, 表明用负指数关系方程式(1)的拟合是合理的。由此可知, 不同 JRC 值单裂隙的渗透率

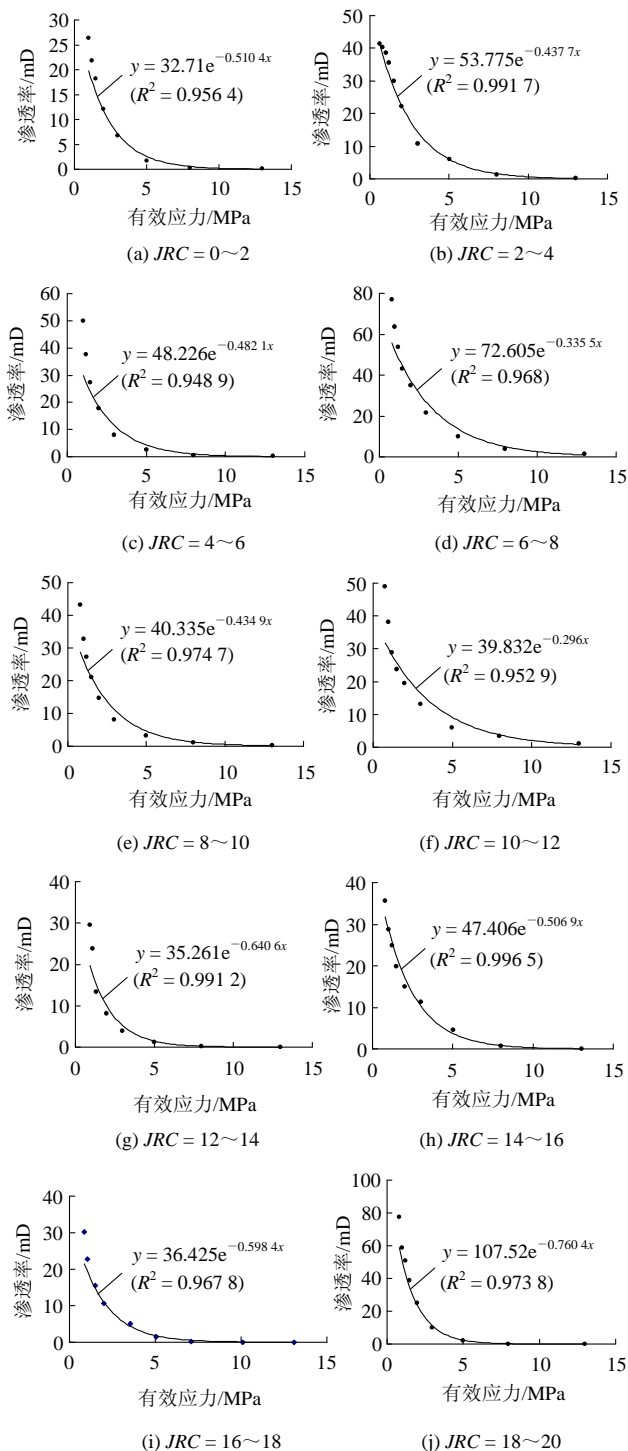


图 9 不同 JRC 值单裂隙有效应力 - 渗透率拟合曲线图
Fig.9 Fitting curves for permeability change versus effective stress of the single joint with various JRC s

随有效应力增大呈负指数规律减少, 并表现出明显的非线性特征, 低有效应力阶段试样渗透率随有效应力的变化速度大于高有效应力阶段。当有效应力小于 3 MPa 时, 试样渗透率随有效应力的增大急剧降低; 大于 3 MPa 时, 随有效应力增加渗透率降低速度迅速减小, 渗透率趋于稳定。

4.2.2 同一有效应力条件下渗透率与 JRC 值的关系

由图 9 还可以看出:

(1) 在中低有效应力状态, 有效应力相同条件下, 单裂隙渗透率随其 JRC 值增大而减小的趋势, 但规律性不是很强, 离散性比较大。推测原因: ① 单裂隙渗透率与其 JRC 值之间可能并不存在单调变化关系。② 与试验中试样的差异有关, 比如裂隙试样加工过程中存在的误差、水泥浇筑时裂隙面上不可避免的麻面气孔对单裂隙渗流的影响等。

(2) 随应力增大, JRC 值对单裂隙渗透率的影响减小。其原因可能是由于随着 JRC 值的增大, 渗透路径增长, 裂隙面上的凸起和凹槽增多, 增大了裂隙两壁面的接触面积, 进而减小了过水面积, 使得渗透率减小^[19]。

特别需要说明的是, 在本试验已经完成的情况下(2007 年 4 月初), 获得 L. Scesi 和 P. Gattinoni^[20]关于 JRC 值对裂隙渗透性影响的试验研究论文, 其试验中裂隙的 $JRC \geq 12$, 渗流方向与 JRC 剖面垂直(见图 10), 未加围压。

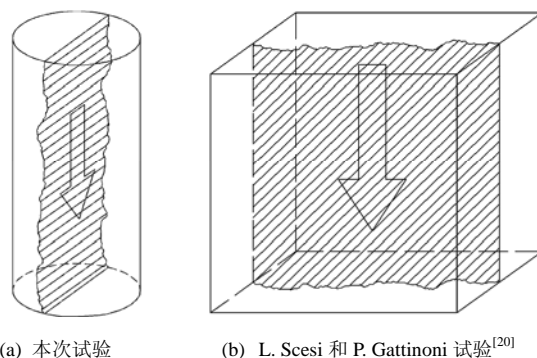


图 10 渗流方向与 JRC 剖面关系示意图

Fig.10 Sketch of relationship between water flow direction in a single fracture and its JRC profile

5 结 论

不同 JRC 值单裂隙渗流特性试验结果表明:

(1) 在低应力水平下, JRC 值对单裂隙的渗流

特性有较大影响, 随应力水平的增大, *JRC* 值对单裂隙渗流特性的影响迅速减小。

(2) 不同 *JRC* 值单裂隙的渗透率与有效应力之间的关系可用负指数函数描述, 并表现出明显的非线性特征, 低有效应力阶段试样渗透率随有效应力的变化速度大于高有效应力阶段。

本试验模拟的单裂隙处于无填充物、裂隙面相吻合、完全贯通状态。而天然状态下的裂隙多数存在填充物, 裂隙面不相吻合、非完全贯通等情况, 且处于复杂的三维应力状态, 只有加强试验研究, 提高物理模型试验模拟相似程度, 才能更好地理解粗糙裂隙岩体渗流 - 应力耦合作用的实质。

参考文献(References):

- [1] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks[M]. Moscow: Gesenergoizdat, 1951.
- [2] ROMM E S. Flow Characteristics of fractured rocks[M]. Moscow: Nedra, 1966.
- [3] LOUIS C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [4] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(B2): 1 337 - 1 348.
- [5] TSANG Y W. The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture[J]. Water Resources Research, 1984, 20(9): 1 209 - 1 215.
- [6] AMADEI B, ILLANNASEKARE T A. Mathematical model for flow and solute transport in nonhomogenous rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Goemechanics, 1994, 18(6): 719 - 731.
- [7] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(4): 299 - 318.
- [8] 速宝玉, 詹美礼, 王媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 73 - 77.(SU Baoyu, ZHAN Meili, WANG Yuan. Experimental study of the coupling characteristics of seepage and stress in fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 73 - 77.(in Chinese))
- [9] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 133 - 136.(ZHENG Shaohu, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian. An experimental study of the permeability law of natural fracture under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 133 - 136.(in Chinese))
- [10] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FU Shaolan. Testing study of seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(in Chinese))
- [11] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Goemechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121 - 140.
- [12] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 74 - 79.(XU Guangxiang, ZHANG Yongxing, HA Qiuling. Super-cubic and sub-cubic laws of rough fracture seepage and its experiments study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 74 - 79.(in Chinese))
- [13] 胡昱, 叶源新, 刘光廷, 等. 多轴应力作用下砂砾岩单裂隙渗流规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1 009 - 1 013.(HU Yu, YE Yuanxin, LIU Guangting, et al. Experiment research on laws of seepage in calcirudite rock within single fracture under multiaxial stresses[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1 009 - 1 013.(in Chinese))
- [14] 王媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 83 - 87.(WANG Yuan. Coupling characteristic of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 83 - 87.(in Chinese))
- [15] 蒋宇静, 李博, 王刚, 等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 377 - 2 386.(JIANG Yujing, LI Bo, WANG Gang, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 377 - 2 386.(in Chinese))
- [16] 蔡金龙, 周志芳. 粗糙裂隙渗流研究综述[J]. 勘察科学技术, 2009, (4): 18 - 23.(CAI Jinlong, ZHOU Zhifang. Review of seepage research in rough fractures[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009, (4): 18 - 23.(in Chinese))
- [17] 熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 839 - 1 847.(XIONG Xiangbin, ZHANG Chuhan, WANG Enzhi. A review of steady state seepage in a single fracture of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 839 - 1 847.(in Chinese))
- [18] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1 -

2): 1 - 54.

- [19] 陶玉敬. 不同 *JRC* 单裂隙渗流特征的试验研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2007.(TAO Yujing. An experimental study of hydraulic behavior in a single joint with various *JRCs*[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.(in Chinese))
- [20] SCESI L, GATTINONI P. Roughness control on hydraulic conductivity in fractured rocks[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(2): 201 - 211.