

节理粗糙度对应力-渗流耦合特性影响试验研究

尹立明¹,王刚²,孙文斌¹,陈绍杰¹

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室,山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木建筑学院,山东 青岛 266590)

摘要:通过对3种不同粗糙度的人造节理试件进行压剪条件下的应力-渗流耦合特性试验,分析了剪切应力、法向位移、节理水力开度及透过率在剪切过程中随剪切位移变化的趋势和规律,获得了节理粗糙度对应力-渗流耦合特性的影响规律。结果表明:节理表面粗糙度是节理特性中对岩体力学和水力学性质有重要影响的指标之一,当节理面在开始产生较小的剪切位移时,节理的应力、位移和水力开度及透过率等特性会产生较大变化,而节理表面粗糙度越大,对节理应力-渗流耦合特性影响越明显。

关键词:节理;粗糙度;应力-渗流耦合;剪胀;水力开度

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)06-0030-06

Experimental Study of Effect of Joint Roughness on Stress-seepage Coupling Characteristics

YIN Liming¹, WANG Gang², SUN Wenbin¹, CHEN Shaojie¹

(1. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the stress-seepage coupling experiment of three kinds of man-made joints with different roughness under compression and shear, law of shear stress, normal displacement, joint hydraulic opening and transmittance were analyzed as the shear displacement changed, obtaining the rule of influence of joint roughness on stress-seepage coupling characteristics. The results show that joint roughness has a great effect on the mechanical and hydraulic properties of rock; when the smaller range of shear displacement appears in the joint surface, such stress-seepage coupling characteristics as stress, displacement, hydraulic opening and transmittance will have larger changes, and the more roughness of joint surface, the more apparent effect on the joint stress-seepage.

Key words: joint; roughness; stress-seepage coupling; shear dilatation; hydraulic opening

地下岩体内部存在不同发育程度的节理和裂隙,由于节理的渗透系数和变形模量都远大于岩石基质,使得节理成为地下水流动的主要通道。而节理特性如粗糙度、连通度、渗径起伏度、吻合度、是否有充填物及其材料特性、倾向倾角及其分布、张扭性或压扭性等在很大程度上影响岩体的水力学性质。当地下水在节理中流动时,节理表面粗糙程度是影响节理应力-渗流特性的重要因素,因此实验室研究节理粗

收稿日期:2012-08-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51034003);国家自然科学基金项目(51104094,51274135);国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(2011CB411906);教育部博士学科点专项科研基金项目(20103718110001);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010NJ013);山东省高等学校科技计划项目(J10LE04)

作者简介:尹立明(1979—),男,山东平度人,讲师,博士,主要从事矿井水害防治和矿山压力方面的研究。

E-mail:yinliming@sdust.edu.cn

糙度对节理应力、位移和水力开度及透过率的影响,可为研究矿井突水形成过程中的突水孕育段、突水萌生段和突水爆发段流态灾变的演化特征和揭示开采节理岩体由损伤渐进扩展到突变断裂的突水机理提供依据。

节理表面粗糙度对渗流特性影响的研究方法很多,如:Witherspoon等^[1-3]提出的对隙宽密度分布函数进行修正的方法;周创兵等^[4]提出的面积接触率修正法;夏才初等^[5]综合考虑节理透过率以及表征节理形貌的分形维数等因素提出的节理渗流经验公式;蒋宇静等^[6-7]采用新型岩体节理剪切渗流耦合试验台分析节理表面粗糙度对渗流的影响;贺玉龙等^[8]对不同节理粗糙度系数的单裂隙渗流特性进行了试验研究;李顺才等^[9]对破碎岩体渗流试验及理论研究现状进行了总结。但目前的研究成果在实际应用中存在一定的局限性。本研究通过对3种不同粗糙度的人造节理试件进行压剪条件下的应力-渗流耦合特性试验,分析了剪切应力、法向位移、节理水力开度及透过率在剪切过程中随剪切位移变化的趋势和规律性。

1 试验系统及试件制备

1.1 试验系统

为研究节理表面粗糙度对节理试件法向位移、法向应力和渗流特性影响的规律,实验室对节理试件进行压剪条件下应力-渗流耦合特性试验,分析在恒定法向荷载(constant normal load, CNL)和恒定法向刚度(constant normal stiffness, CNS)两种边界条件和渗透水压力3 MPa、初始法向应力15.0 MPa试验条件下,随剪切位移变化节理试件的剪切应力、剪胀、节理水力开度及透过率变化趋势和特性,获得在压剪条件下节理粗糙度对应力-渗流耦合特性的影响规律。试验采用数控岩体节理剪切渗流试验系统^[7],其渗透压力伺服稳压系统,最大渗透水压力达3 MPa,水的最小和最大测量流量分别为0.001 mL/s和2 mL/s。试验台在节理试件法向方向上,可施加恒定法向应力、恒定法向位移、恒定法向刚度3类可控边界条件,在节理剪切方向上,可施加剪切力和渗透压力。渗透试验采用上下密封的剪切盒,在保持剪切盒密封的前提下,剪切位移可达沿剪切渗流方向试件长度的25%。在进、出水口分别设置流量测量装置以精确测量流量。试验系统如图1所示。

1.2 试件制备

为研究节理粗糙度对应力-渗流耦合特性的影响,试验选取了比较平滑、粗糙和很粗糙的三种节理粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)范围的节理试件,经激光测定装置测试后,运用Z2计算方法^[10],确定了节理粗糙面的JRC值范围,并以三组节理试件为原型,用树脂混凝土材料各复制出两组节理试件进行

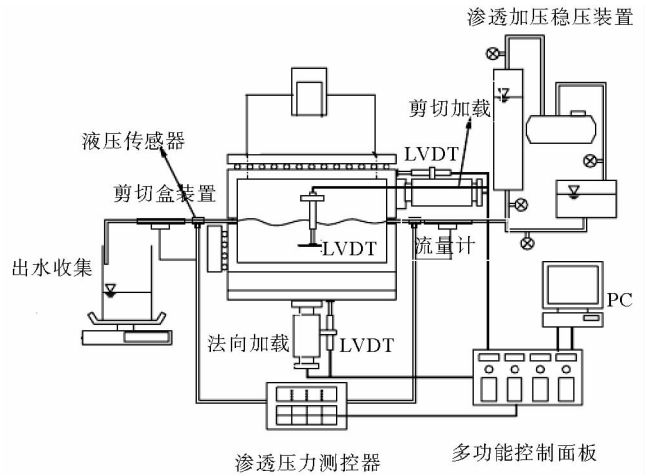


图1 剪切渗流耦合试验系统示意图^[7]

Fig.1 Sketch of coupled shear-flow test system

表1 试验试件的边界条件表

Tab.1 Boundary conditions of experimental specimens

试件编号	试件	节理表面粗糙度系数 (JRC 范围)	初始法向应力 /MPa	边界条件法向刚度 / (GPa · m ⁻¹)	渗透压 /MPa
S1	CNL S1_1	2~4	15.0	—	3.0
	CNS S1_2			5.0	
S2	CNL S2_1	10~12	15.0	—	3.0
	CNS S2_1			5.0	
S3	CNL S3_1	16~18	15.0	—	3.0
	CNS S3_2			5.0	

压剪渗流耦合试验, 试验边界条件如表 1 所示, 树脂混凝土节理试样如图 2 所示。

节理试样尺寸 200 mm×100 mm×100 mm, 其力学特性如表 2 所示。

2 试验结果及分析

2.1 节理粗糙度对节理应力和位移的影响

1) 节理粗糙度对法向荷载的影响

图 3 为 3 种节理试件在 CNS 条件下法向荷载随剪切位移变化的试验结果, 试验表明: CNS 条件下节理粗糙度对试件的法向荷载有明显的影响, 法向荷载随 JRC 值增加而增大, 试件 JRC 值越大法向荷载的波动越大, 试验曲线越不平滑。在试验剪切位移发生的范围内, 法向荷载随剪切位移增加而增大, 这是由于试件发生了剪胀效应。而节理试件越粗糙剪胀效应越明显, 剪胀时对应的剪切位移范围越大。也就是说, 平滑的节理试件主要靠节理面上粘结力来抵抗切向力的作用, 剪胀不明显。

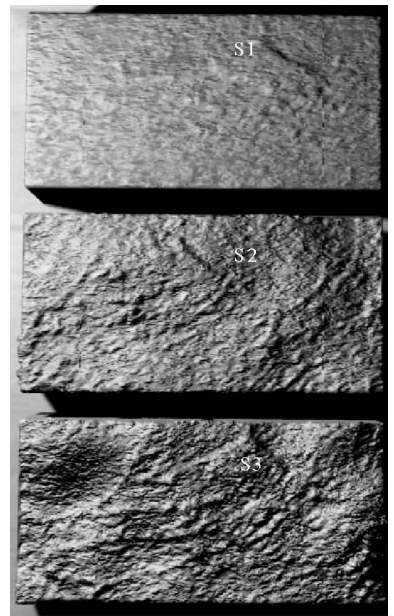


图 2 树脂混凝土节理试样图

Fig. 2 Resin concrete jointing test sample

表 2 试件的物理力学参数表

Tab. 2 Physico-mechanical properties of specimens

参数	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比 μ	抗拉强度 /MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$
取值	2506	28.19	29.27	0.24	2.56	19.3	57

2) 节理粗糙度对剪切应力的影响

图 4 为 3 种节理试件在 CNL 和 CNS 条件下剪切应力随剪切位移变化的试验结果, 试验表明: 在相同的边界和应力条件下, 试件节理粗糙度是影响试件剪切应力的主要因素, 节理粗糙度与剪切应力成正变化关系。相对平滑的节理试件对应的剪切应力较小, 剪切应力-剪切位移曲线较光滑, 剪切应力明显变化对应的剪切位移值范围要小; 从 CNL 和 CNS 两种边界条件对节理剪切应力的影响看, CNL 条件下剪切应力-剪切位移曲线相对平滑, 而在相同节理粗糙度条件下, CNL 的剪切应力要比 CNS 的稍小, 同时 CNL 的剪切应力变化总体上是一个减小的过程, 而在 CNS 边界条件下剪切应力变化总体上是先减小而后又稍微增大的过程。

3) 节理粗糙度对法向位移的影响

图 5 为 3 种节理试件在 CNL 和 CNS 条件下法向变形随剪切位移变化的试验结果, 试验表明: 节理粗糙度是研究节理法向变形的重要参数, 它对节理法向变形的影响显著。在相同的边界和应力条件下, 节理粗糙度与法向变形成正变化关系。在试验初期剪切位移很小的范围内, 由于试件受外界应力的作用而压紧密实, 法向变形为负, 而后迅速出现剪胀效应, 法向变形快速增加, 而且节理试件越粗糙对应的法向变形越大; 从 CNL 和 CNS 两种边界条件对节理法向变形的影响看, CNS 条件下的法向变形要比 CNL 条件下小得多。

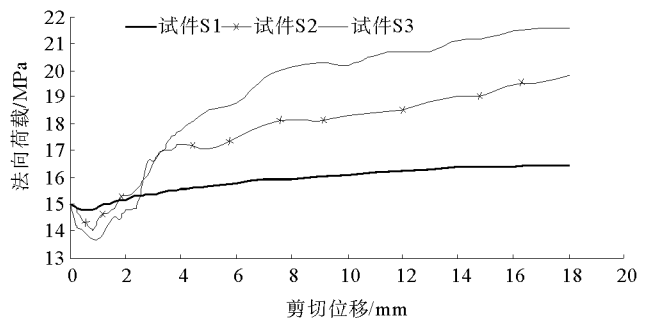


图 3 CNS 条件下法向荷载随剪切位移变化的试验结果图

Fig. 3 Normal load test results with shear displacement on condition of CNS

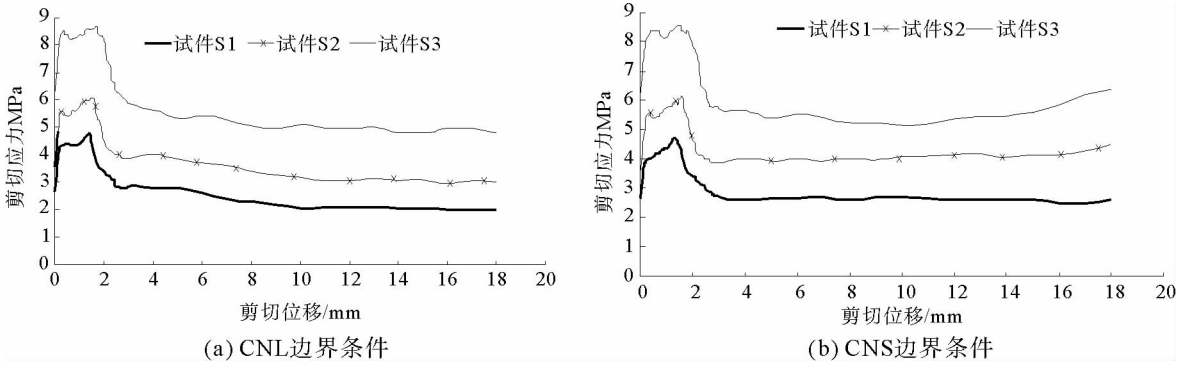


图 4 CNL 和 CNS 条件下剪切应力随剪切位移变化试验结果图

Fig. 4 Shear stress test results with shear displacement on condition of CNL and CNS

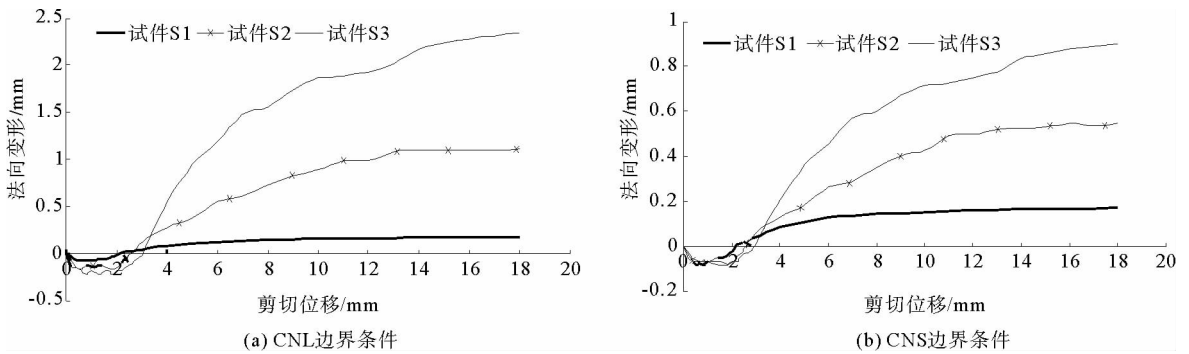


图 5 CNL 和 CNS 条件下法向变形随剪切位移变化试验结果图

Fig. 5 Normal displacement test results with shear displacement on condition of CNL and CNS

4) 试验结果分析

节理表面粗糙度反映了节理表面相对于参考平面的波度和波状起伏, JRC 值是岩体节理表面粗糙度系数, 是对节理表面粗糙性的一种描述和表征方式。节理表面有众多的凸起, 这些凸起高低交替不规则地排列在一起形成不同粗糙性的节理表面。试件 S3 的表面几何形状比较复杂, 大的凸起较多, 峰谷高低起伏大且不规则排列; 试件 S2 的表面存有少量的较大凸起和小凸起, 峰谷高低起伏较小; 试件 S1 比较平滑, 其表面几乎没有太大的凸起。

试验过程开始时, 受法向荷载的作用, 节理表面相互咬合, 剪应力随剪切位移变化迅速增大, 同时导致节理表面的凸起体不断被磨平或剪断。越粗糙的节理表面, 凸起体的数量越多、起伏度越大; 受到磨损的节理表面越大、过程越长, 磨损越严重。粗糙的试件, 在相同剪切位移时节理表面接触比越小, 剪胀效应越明显, 法向位移越大, 剪应力也越大, 体现在剪切应力-剪切位移曲线上就越不平滑。

2.2 节理粗糙度对节理水力开度值的影响

图 6、图 7 分别为在 CNL 和 CNS 两种边界条件下, 节理试件 S1, S2 和 S3 的水力开度值随剪切位移变

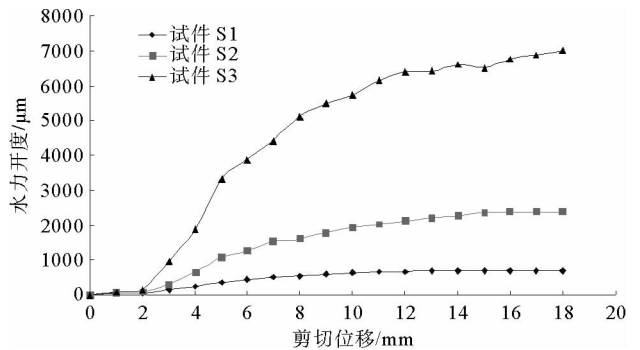


图 6 CNL 条件下 S1、S2 和 S3 的水力开度随剪切位移变化试验结果图

Fig. 6 Variation of hydraulic aperture of specimens S1, S2 and S3 with shear displacement on condition of CNL

化试验结果。

试验结果表明:节理试件表面粗糙度对试件水力开度值有较大影响。节理试件出现剪胀效应时,试件水力开度值随 JRC 值增大而增大,基本成单调正变化关系,但规律性不强。这是由于随 JRC 值增大,节理表面的不规则排列的峰谷增多,当发生剪胀时,法向变形增加而使得过水面积增大,节理的水力开度值也就越大。水力开度随剪切位移变化呈明显的三个阶段变化,即:在初始剪切位移为 2 mm 左右的范围内,节理试件负膨胀,这时水力开度几乎为 0,而后快速增大至水力开度峰值后,缓慢而略有下降并达到残余水力开度值。由图 6 和图 7 可以看出,试件节理表面越粗糙,峰值水力开度值越大,其残余水力开度值也越大,达到峰值水力开度值对应的剪切位移越大。比较两种边界条件下的试验结果可知,CNL 条件下的水力开度要比 CNS 条件下略大。

2.3 节理粗糙度对透过率的影响

图 8、图 9 为在 CNL 和 CNS 两种边界条件下,节理试件 S1, S2 和 S3 的透过率随剪切位移变化试验结果。

试件节理表面粗糙度对其透过率的影响非常明显,试件节理透过率随表面 JRC 值增大而增加,且是以数量级的形式迅速增大,在试验后期, S3 的透过率要比 S1 的透过率大 3 个数量级。节理表面粗糙度对试验过程中透过率的稳定性影响较大,试件表面越粗糙透过率的稳定性越差,透过率波动越明显。在 CNL 和 CNS 两种边界条件下,节理试件的透过率变化趋势较为一致,只不过 CNL 条件下的透过率要比 CNS 条件下大一些。

3 结论

节理表面粗糙度对节理应力-渗流耦合特性的影响显著,是节理特性中对岩体的力学和水力学性质有重要影响的指标之一,通过对人造节理试件进行压剪条件下的应力-渗流耦合特性试验,得到以下结论:

- 1) 随着剪切位移的发生,在试验剪切过程中不同粗糙度试件都出现剪胀效应。节理试件越粗糙,法向位移越大,剪胀效应越明显,剪切应力和增幅也越大,剪切应力变化明显的范围越大。
- 2) 试件节理表面越粗糙,其等效水力开度值越大,水力开度值增幅越大,其峰值水力开度值和残余水力

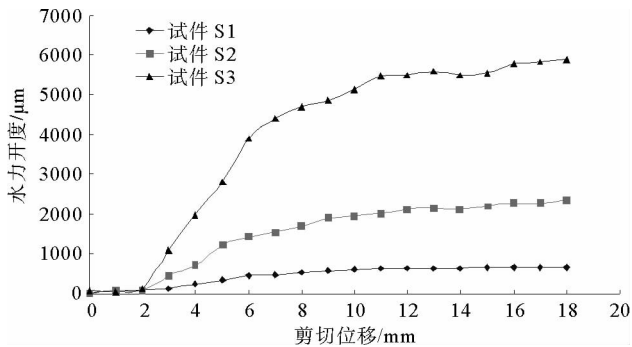


图 7 CNS 条件下 S1、S2 和 S3 的水力开度随剪切位移变化试验结果图

Fig. 7 Variation of hydraulic aperture of specimens S1, S2 and S3 with shear displacement on condition of CNS

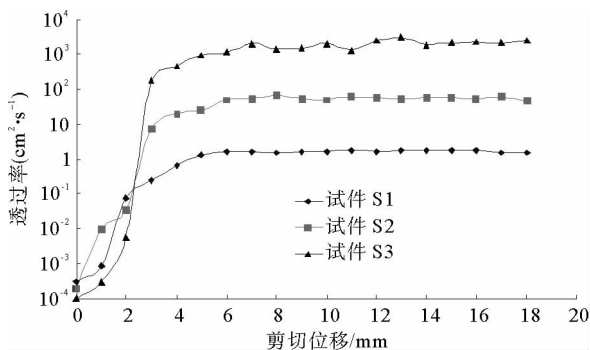


图 8 CNL 条件下 S1、S2 和 S3 的透过率随剪切位移变化试验结果图

Fig. 8 Transmissivity change of specimens S1, S2 and S3 with shear displacement on condition of CNL

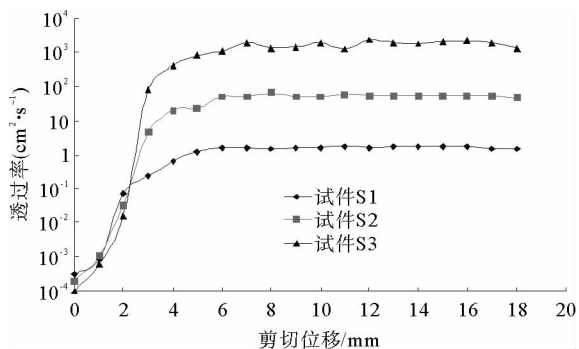


图 9 CNS 条件下 S1、S2 和 S3 的透过率随剪切位移变化试验结果图

Fig. 9 Transmissivity change of specimens S1, S2 and S3 with shear displacement on condition of CNS

开度值也越大,透过率值也越高,因不规则的裂隙表面几何形状引起的渗流场变化也就更为复杂。

3) 在节理发生剪胀效应时,节理表面粗糙度与节理的应力、位移和水力开度及透过率等成正比变化关系,当节理面刚开始产生较小的剪切位移时,节理的应力、位移和水力开度及透过率等应力-渗流耦合特性会产生较大变化。

参考文献:

- [1] WITHERSPOON P A. New approaches to problems of fluid flow in fractured rock masses[C]//The 22nd U. S. Symposium on Rock Mechanics. Cambridge: American Rock Mechanics Association, June 29-July 2, 1981: 57-76.
- [2] NEUZIL C E, TRACY J V. Flow through fracture[J]. Water Resources Research, 1981, 17(1): 191-194.
- [3] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B10): 9287-9298.
- [4] 周创兵, 熊文林. 不连续面渗流与变形耦合的机制研究[J]. 水文地质工程地质, 1996(3): 14-17.
ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. Research for coupling mechanism between permeability and deformation of geological discontinuities[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996(3): 14-17.
- [5] 夏才初, 王伟, 曹诗定. 节理在不同接触状态下的渗流特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1291-1306.
XIA Caichu, WANG Wei, CAO Shiding. Flow characteristics of joints under different contact conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1291-1306.
- [6] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253-2259.
JIANG Yujing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experimental study and analysis of shear flow coupling behaviors of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2253-2259.
- [7] 王刚, 蒋宇静, 王渭明, 等. 新型数控岩石节理剪切渗流试验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3200-3208.
WANG Gang, JIANG Yujing, WANG Weiming, et al. Development and application of an improved numeric control shear-fluid coupled apparatus for rock joint[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3200-3208.
- [8] 贺玉龙, 陶玉敬, 杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(s): 3235-3240.
HE Yulong, TAO Yujing, YANG Lizhong. Experimental research on hydraulic behaviors in single joint with various of JRC [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s): 3235-3240.
- [9] 李顺才, 陈占清, 缪协兴. 破碎岩体渗流的试验及理论研究综述[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 37-43.
LI Shunca, CHEN Zhanqing, MIAO Xiexing. Summarization on the experimental and theoretical researches of the vadose in broken lithosome[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(3): 37-43.
- [10] 许宏发, 李艳茹, 刘新宇, 等. 节理面分形模拟及 JRC 与分维的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1663-1666.
XU Hongfa, LI Yanru, LIU Xinyu, et al. Fractal simulation of joint profiles and relationship between JRC and fractal dimension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1663-1666.