

DOI: 10.11779/CJGE202011007

基于图像数字技术的砂岩裂隙可视化渗流特性试验研究

刘杰^{1,2}, 唐洪宇^{1,2}, 杨渝南^{*1,2}, 石谦^{1,2}, 李政^{1,2}, 黎照^{1,2}, 高进^{1,2}, 兰俊³

(1. 三峡大学湖北省地质灾害防治工程技术中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3. 武汉天华华中建筑设计有限公司, 湖北 武汉 430021)

摘要: 自主研发的可视化裂隙渗流试验装置, 应用颜色示踪的图像数字化处理技术, 在不同渗透压和法向应力分级加卸载耦合作用下, 进行空间垂直角度的砂岩裂隙可视化渗流试验。通过毫秒级分帧技术捕捉裂隙渗流状态并对渗流面积色域分区, 基于数字化图像技术进行二值化处理, 通过图层二次叠加渲染, 自识别渗流面积参数, 建立渗透压与法向应力作用下的渗流面积扩散规律。研究裂隙渗流优势路径各断面的过流宽度变化特征, 提出可视化渗流速度求取公式, 指出渗流速度沿流径变化为骤增、骤降、均匀损耗 3 个阶段, 建立最小断面宽度对应的峰值流速与渗透压和法向应力耦合作用下的函数模型。基于实测数据建立主渗流路径中法向应力、渗透压与雷诺数的幂函数关系, 标定渗流状态的惯性作用区与黏性作用区的转变临界点, 构建可视化裂隙渗流雷诺数预测模型, 对裂隙渗流中真实渗流路径识别、流速矢量实时变化、流体状态判定等关键科学问题提出了新的研究理论及方法。

关键词: 可视化渗流; 图像数字化处理; 渗流扩散面积; 过流断面宽度; 渗流速度; 雷诺数

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)11-2024-10

作者简介: 刘杰(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和水工结构研究。E-mail: liujieea@126.com。

Experimental research on visible seepage of sandstone fissure using digital image-based method

LIU Jie^{1,2}, TANG Hong-yu^{1,2}, YANG Yu-nan^{1,2}, SHI Qian^{1,2}, LI Zheng^{1,2}, LI Zhao^{1,2}, GAO Jin^{1,2}, LAN Jun³

(1. Engineering Technology Center for Geological Disaster Prevention of Hubei Province, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 3. Wuhan Tianhua Huazhong Architectural Design Co., Ltd., Wuhan 430021, China)

Abstract: The visual fracture seepage test devices independently developed apply the color tracer image digital processing technology to carry out the visual seepage tests on the sandstone fractures with vertical spatial angle under the coupling effects of loading and unloading with different osmotic pressure and normal stress gradations. By means of the millisecond frame division technology, the seepage state of the crack is captured and the color domain of the seepage area is partitioned. Based on the digital image technology, the binary processing is carried out. The parameters of the seepage area are identified by double overlay of layers, and the diffusion law of the seepage area under the action of osmotic pressure and normal stress is established. The characteristics of the change of the flow width of each section along the dominant seepage path of the fracture are studied, and the formula for calculating the visual seepage velocity is put forward. It is pointed out that the seepage velocity changes along the flow diameter into three stages: sudden increase, sudden decrease and uniform loss. A functional model for the peak velocity corresponding to the minimum section width is established under the coupling action of osmotic pressure and normal stress. Based on the measured data of the main seepage path, the power function for the stress normal, osmotic pressure and Reynolds number is established, the change point of seepage state in the inertia function area and viscous effect area is calibrated, and the prediction model for Reynolds number of visualized fissure flows is formulated. The new theories and research method for the key scientific issues such as identification of real seepage in fissure seepage path, real-time change of velocity vector and determination of fluid state are put forward.

Key words: visualized seepage; digital image processing; seepage diffusion area; cross section width; seepage velocity; Reynolds number

0 引言

由岩体裂隙渗流突水导致地质灾害对岩体边坡和

基金项目: 湖北省技术创新重点项目(2017ACA189); 国家自然科学基金项目(51579138); 湖北省自然科学基金杰出青年人才计划项目(2018CFA065); 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站开放基金项目(2018KTL08); 湖北省自然科学基金一般面上项目(2020CFB584)
收稿日期: 2020-03-09

*通信作者(E-mail: yangyunan_11@163.com)

隧道开挖、深基坑及油气田的开发等工程的安全稳定性造成了极大的影响。目前, 随着岩体裂隙渗流研究工作的不断深入, 从单相到多相、从线性到非线性, 从单一角度到空间多角度, 从简化的宏观平板模型发展为多因素的微观分析, 从不可视化到可视化, 随着研究的全面化, 取得了突破性的成果。

许多学者在数值模拟, 理论分析和试验探究等多种维度做了较多研究, 主要涉及立方定律的适用性及其修正^[1-3], 加载路径, 裂隙形貌等对渗流特性的影响机制和演化特征等^[4-6]。例如, Olsson 等^[7]对岩石和裂隙水耦合作用下的岩石节理进行试验分析, 并得出其渗流特性。胡昱等^[8]对岩石单裂隙的裂隙渗流规律进行了研究, 成果表明法向应力和侧向应力一同决定渗透系数的变化。刘才华等^[9]开展三轴应力下的渗流试验, 研究结果表明, 法向应力、侧向应力以及渗压对裂隙渗透系数有显著的影响。王志良等^[10]研究粗糙度与渗流压降的影响机制, 得出隙宽突变部位压力偏离线性趋势, 且 Qian 等^[11]研究了裂隙粗糙度和开度尺度效应对雷诺数和渗流流态的影响规律, Ranjith 等^[12]通过开展花岗岩裂隙渗流特性试验, 研究表明当雷诺数大于 10 时水流流态向线性偏离, Zhang 等^[13]发现吻合裂隙渗流特性基本契合立方定律, 但错动裂隙的水流流态需要引入非线性流动的 Forchheimer 方程来描述, 胡少华等^[14]通过试验分析提出了临界雷诺数模型来表征裂隙非线性渗流的变化趋势和影响机制。

基于传统的渗流试验研究, 因其试验介质的不透明性, 具体的渗流过程和流体在介质中的扩散及赋存规律并不能被直观清晰地认识。基于此, 许多学者开展了可视化试验研究。例如, 鞠杨等^[15]利用 CT 成像、3D 打印以及三维重构自主制备了含有复杂裂隙的天然煤岩模型, 并借助于光弹技术和三维应力冻结, 直观的分析了煤岩的单一裂隙特征结构。刘建军等^[16]提出了一种基于透明土相似材料, 并对比分析其与传统可视化渗流试验的优缺点。盛金昌等^[17]引入图像数字化技术的 I 值区分裂隙构造, 较真实地反映了裂隙化岩体的非稳态渗流过程。

综上所述, 岩石裂隙渗流领域的研究已取得丰富的成果, 精确反映裂隙面粗糙度、渗透压、法向应力等因素对渗流路径、渗流面积、渗流速度等参数影响规律的可视化裂隙渗流试验装置和技术有待深入研究。基于可视化图像的裂隙渗流场渗流速度的空间位置的求取方法、流体渗流状态雷诺数的求取以及渗流运动状态的界定研究还有待开展。

1 试样制备与试验装置

1.1 可视化试样制备

(1) 采样: 本试样取自三峡库区秭归县区域消落带砂岩, 孔隙渗透系数为 $3.23 \times 10^{-7} \sim 6.11 \times 10^{-7}$ cm/s, 工程中认为渗透系数小于 1.0×10^{-6} cm/s 的情况属于不透水, 故研究砂岩裂隙渗流规律时可忽略孔隙渗流影响。因此采用预制 V 形槽填充膨胀剂方法劈裂试样, 得到一条完全重合且平行于轴线方向的人工粗糙单裂隙面, 如图 1。

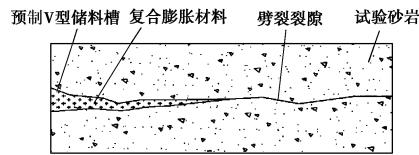


图 1 预制 V 形槽劈裂法

Fig. 1 Prefabricated V-shaped slot splitting method

(2) 制样及精确复模: 将劈裂后的试样切割成尺寸为 300 mm×250 mm×50 mm 的长方体试样, 利用硅胶二次翻模, 精确复刻岩石对立裂隙面, 制成模具备用 (见图 2)。

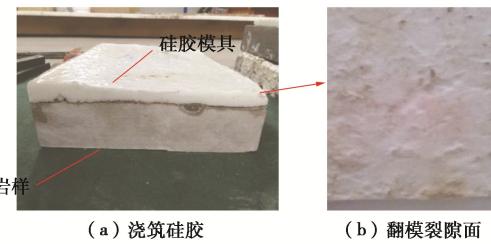


图 2 硅胶翻模

Fig. 2 Silica gel turning mould

(3) 可视化模型制备: 基于正交试验, 确定透明 ZJ-K39DG 不饱和树脂及添加剂的最佳用量和比例 (促进剂 0.8%、硬化剂 0.6% 和消泡剂 0.6%), 得到配比弹性模量近乎原岩的可视化材料。图 3 为 K39 树脂裂隙固化成型图, 下覆硅胶模具。



图 3 可视化试样制备

Fig. 3 Preparation of visualized sample

(4) 密封组装: 将复刻裂隙面的可视化 K39 树脂试样与劈裂对立面的砂岩裂隙贴合固定, 并采用硅胶密封, 上覆亚克力板, 见图 4。

1.2 试验装置及流程

自主研发的裂隙可视化渗流装置见图 5 (专利号 201620754007.7)。该装置通过耦合渗透压、法向应力、

空间多角度、水自重效应等多因素,从细观角度准确量测过流通道,并精确获取裂隙水渗流路径及面积、渗流速度、渗流量等相关参数,准确反映岩石裂隙渗流特性。可视化渗流试验流程见图 6。

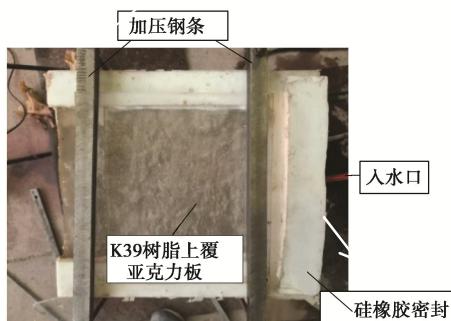


图 4 试样组装

Fig. 4 Assembly of sample

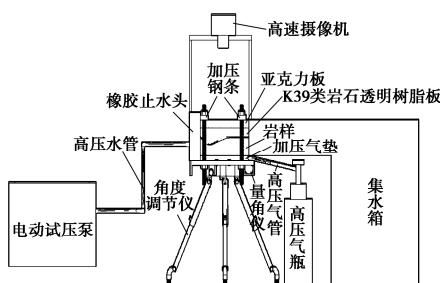


图 5 裂隙渗流可视化试验装置图

Fig. 5 Installation diagram of visualized fracture seepage tests

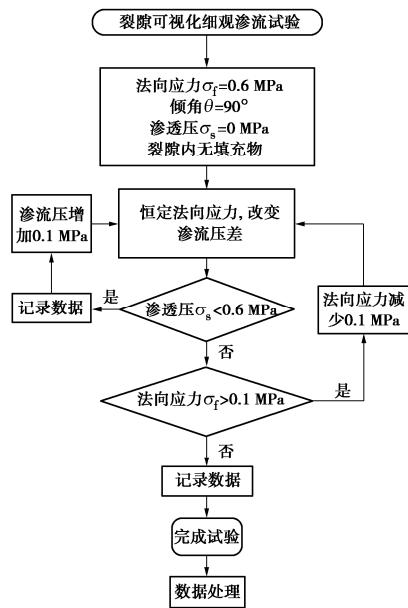


图 6 裂隙可视化渗流试验流程图

Fig. 6 Flow chart of visualized tests of fracture

2 可视化渗流试验数字化图像自识别分析技术研究

2.1 试验分析方法及处理技术

(1) 试验录制: 在清水中加入红色示踪颜料后注满水泵, 将试样倾角置于 90°, 调控法向应力, 渗透水压变化, 录制试验过程。

(2) 图像分帧及色域分区: 导出录制的试验视频, 捕捉 40 ms 时差的分帧图像, 根据图像表观渗流路径的色域深浅获取其相应 RGB 值, 统计其 RGB 值规律, 将真彩图像的渗流状态数值化标定为 3 个区域, 如图 7 所示。



图 7 分帧、分区、特征点提取图像示例

Fig. 7 Example of image extraction by frame, partition and feature points

(3) 灰度归一化: 为精确量化渗流面积分区, 使渗流原图的色域值 (R, G, B 三个值) 归一化为灰度值, 通过灰度直方图, 利用公式 ($I = \text{灰度值}/255$) 转化, 可将渗流区域进行精确划分。求取临界区域 I 值方法 (图 8): 选取将原图通过视觉分区, 每个面积区域选取 3~5 个具有代表性的小区域, 在每个小区域中再选取 4~6 个特征点, 将每个小区域的特征点的灰度 I 值求取平均数 (1 区域: $a_i \sim a_j$; 2 区域: $b_i \sim b_j$; 3 区域: $c_i \sim c_j$), 由此可得对应区域平均灰度 I 值, 将相邻两个小区域 I 值再求取平均数即为临界 I 值结果。计算示例如表 1、图 9 所示。

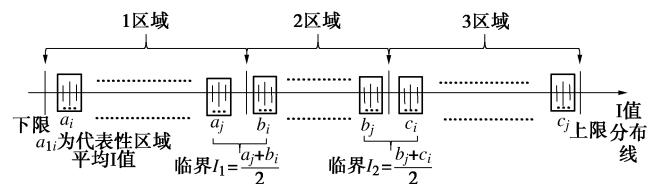
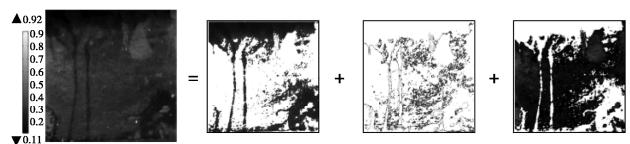


图 8 渗流面积临界 I 值求取示意图

Fig. 8 Schematic diagram of critical I value of contact area of fracture surface



(a) I值分布图 (b) 有效渗流面积 (c) 临界渗流面积 (d) 非渗流面积
(0.11~0.918) (0.11~0.32) (0.32~0.342) (0.342~0.918)

图 9 渗流面积 I 值划分

Fig. 9 Division of seepage area by I value

(4) 黑白高亮二值化处理: 利用临界 I 值归一简

表 1 渗流面积分类与 RGB 值对应表

Table 1 Classification of seepage area and values of RGB

区域命名	渗流面积分类	颜色表现	RGB 数值大小反映颜色的偏向			临界 I 值	归一化 I 值
			R	G	B		
1 区域	有效渗流面积	液体扩散区	70~105	40~85	35~85	0.32	0.11~0.32
2 区域	临界渗流面积	液体微过渡区	101~130	51~90	51~90	—	0.32~0.342
3 区域	非渗流面积	液体未扩散区	131~160	90~120	90~120	0.342	0.342~0.918

化分区后, 处理得到黑白高亮二值化图像, 黑色区表示液体过流区域, 为有效渗流面积与临界渗流面积, 白色表示非渗流区域, 限于篇幅, 部分数据如表 2 所示。

(5) 自识别数字化图像面积参数: 二值化图像识别面积参数时, 由于临界区域二值化颜色容差接近于 0, 软件识别会导致识别盲区与识别误区问题, 如图 10 所示, 极大影响了自识别面积参数的精度。

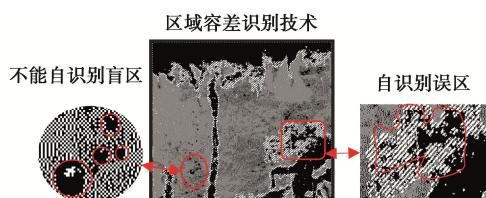


图 10 识别盲区与误区

Fig. 10 Identification blind and misunderstanding area of seepage area

因此提出采用二次图层叠加渲染, 处理结果如图 11 所示。示例如图 12, 将黑白高亮二值化的图像导入软件, 创建一个新的填充纯色图层 (RGB=255/0/0), 点击混合选项处理, 隐藏图像图层, 纯色图层显现, 即得图 12 (c)。

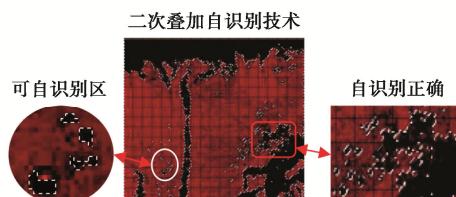
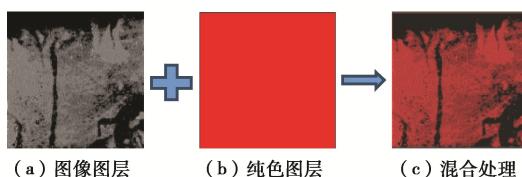


图 11 自识别正确

Fig. 11 Correctness of self identification

在图 12 的基础上对图像进行智能转换, 直方图显示源为整个图像即总像素值, 如图 13, 通过纯色图层渲染后的红色像素区域 (源为选中的图层) 为非渗流面积值, 如图 14, 则裂隙面液体过流通道水平面的投影面积像素值为两者之差。



(d) 混合选项处理精度选择

图 12 图层混合选项处理

Fig. 12 Processing of layer blending options

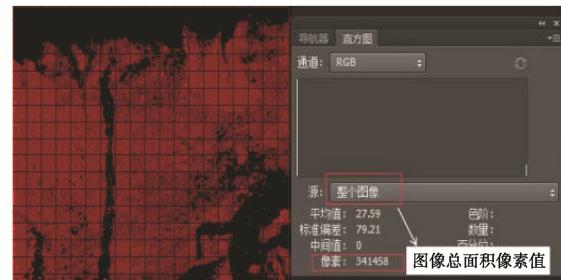


图 13 裂隙面图形总面积像素值

Fig. 13 Pixel values of total area of fracture surface

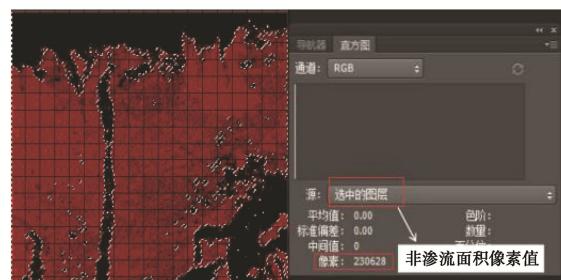


图 14 裂隙面图形非渗流面积像素值

Fig. 14 Pixel values of non-seepage area of fracture surface

(6) 计算渗流通道实际过流面积: 查看图像分辨率, 记录像素总数, 并用下式计算所选实际过流通道水平渗流面积 A (cm^2):

$$A = [(总像素数 - 非渗流面积像素数) / 分辨率^2] \times 2.54^2 \quad (1)$$

2.2 渗流面积扩散规律分析

利用式(1)获取各试验条件下真实渗流面积值结果如图 15 所示。

分析图 15 可知, 在法向应力一定时, 渗流面积与渗透压呈线性函数关系,

表 2 黑白高亮二值化图

Table 2 Black and white highlighted binarization diagram

法向应力/MPa	渗透压/MPa					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.1						
0.6						

$$A_{ij} = k\sigma_s + \delta \quad (2)$$

式中 A_{ij} 为裂隙水渗流水平投影扩散面积 (cm^2), i 表示第 i 个法向应力 σ_f (MPa), j 表示第 j 个渗透压 σ_s (MPa), k 为渗透压对渗流面积影响率, 其值受法向应力影响。当 $\sigma_s=0$ MPa 时, $A_{ij}=\delta$, δ 表征岩体裂隙固有的渗流储水能力的参数, 如表 3 所示。

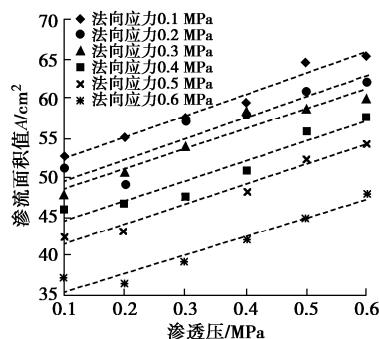


图 15 渗流面积与法向应力、渗透压的关系

Fig. 15 Relationship among seepage area and normal stress and osmotic pressure

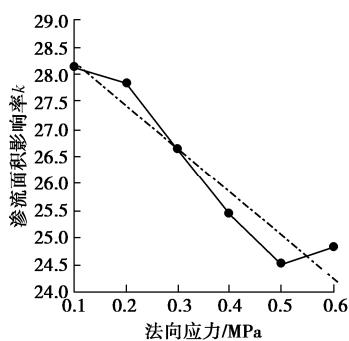
图 16 k 与法向应力的关系

Fig. 16 Relationship between k and normal stress

表 3 裂隙固有渗流参数 δ 值

Table 3 Values of intrinsic seepage parameter of crack

法向应力/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
δ 值	49.73	47.17	45.93	41.90	39.17	23.43

分析表 3 可知, 裂隙固有渗流储水参数随法向应力增加而减小, 原因是法向应力 σ_f 增加致使裂隙开度

减小, 渗流通道闭合程度增加, 裂隙固有过流能力逐渐降低。

分析图 16 可知, 渗流面积影响率 k 与法向应力 σ_f 呈递减趋势:

$$k = \beta_1 \sigma_f + \beta_2 \quad (3)$$

式中, β_1 表示法向应力对渗流面积影响率 k 的影响系数, 且 $\beta_1 < 0$ 。

当 $\sigma_f=0$ MPa, $k=\beta_2 > 0$, β_2 即 σ_f 为 0 时的 k 值; β_1 , β_2 初步定义为温度、粗糙度等因素的影响参量, 其值可通过后期可视化试验进一步分析量化。

联立式 (2), (3), σ_f 与 σ_s 耦合作用下:

$$A_{ij} = (\beta_1 \sigma_f + \beta_2) \sigma_s + \delta \quad (4)$$

图 15 可知渗流面积与渗透压呈线性递增关系, 6 个不同法向应力下的试验数据拟合程度均在 87% 以上 ($R^2=0.8715 \sim 0.9767$)。从图 16 可知, 线性函数能较好表征面积影响率 k 与 σ_f 之间关系 ($R^2=0.932$), 表明 σ_f 增加致使开度减小和渗流通道闭合, 降低裂隙的过流能力。

3 可视化裂隙渗流试验规律研究——算例分析

3.1 渗流瞬时流速公式的建立

假定同一法向应力 σ_f 和渗透压 σ_s 约束下岩样裂隙的平均开度为 e_h , 可得出该试验条件下流经整个岩样的平均渗流量 Q_1 ,

$$Q_1 = \frac{Ae_h}{t} \quad (5)$$

式中, t 为渗入和渗出的时差。根据水流的连续性原理, 经过同一过流断面的渗流量是恒定的, 可得

$$Q_2 = L_x e_h v_x(t) \quad (6)$$

式中, Q_2 为流经某 x 个断面的渗流量 (cm^3/s), L 为第 x 断面的过流断面宽度 (cm), $v_x(t)$ 为第 x 断面下的渗流速度 (cm/s), $x=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

根据同一时刻流经岩石试样的渗流量等效, 可得 $Q_1=Q_2$, 则

$$L_x e_h v_x(t) = \frac{A e_h}{t} , \quad (7)$$

即

$$v_x = \frac{A}{L_x t} , \quad (8)$$

式中, $v_x(t)$ 为某一过流断面处在 t 时刻的瞬时流速。从式(8)可以看出, 渗流面积 A 一定时, 渗流速度变化与过流断面宽度 L 和 t 有关。过流断面宽度 L 的求取方法: ①将表 2 的黑白高亮图片切线分区为 6 断面、5 等份, 如图 17; ②在软件信息窗口里获取渗流流径处两端点坐标, 使横向坐标相减即可得出过流断面宽度。(例: 图 17 中, 断面 2 的 A 点坐标 (6.84 cm, 2.91 cm)、B 点坐标 (8.55 cm, 2.91 cm), 故过流断面宽度为 1.71 cm)

利用上述方法求取各试验条件下各断面宽度, 如图 18 所示。

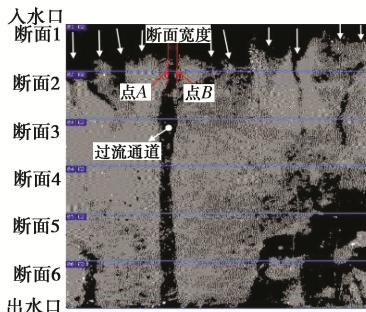


图 17 图像断面划分与宽度获取

Fig. 17 Division of image section and width acquisition

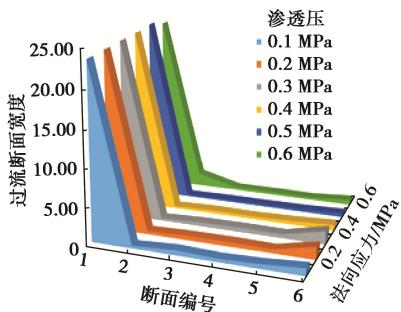


图 18 过流断面宽度变化

Fig. 18 Variation of cross-section width

图 18 结果表明: 在同一 σ_s , σ_f 下, 液体通过多个入水口进入岩样, 在断面 1 时裂隙开度较大, 几乎铺满整个断面, 过流宽度最大; 进入断面 2 时由于裂隙壁面粗糙度和开度闭合对渗流通道的制约, 渗流路径发生曲折, 选择易于过流的优势路径, 导致进入 2 断面过流宽度骤减。

3.2 不同断面下的渗流速度变化规律

根据试验结果, 通过式(8)计算得出各断面裂隙渗流速度与各断面位置的关系如图 19, 20 所示。

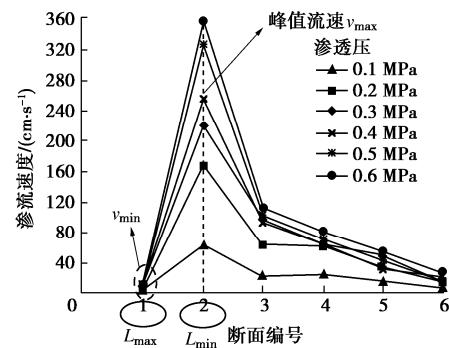


图 19 法向应力 0.1 MPa 时各断面速度关系

Fig. 19 Relationship between speed section at normal stress of 0.1 MPa

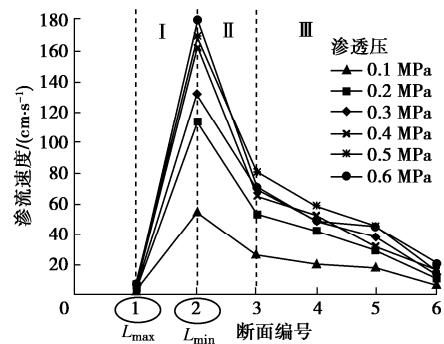


图 20 法向应力 0.6 MPa 时各断面速度关系图

Fig. 20 Relationship between speed sections at normal stress of 0.6 MPa

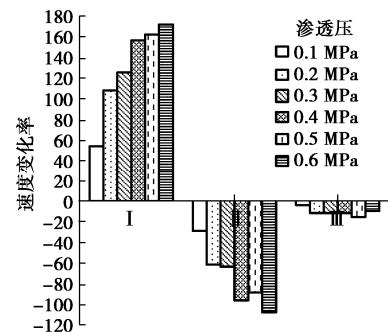


图 21 各分区速度变化率

Fig. 21 Change rates of various speed partitions

图 19, 20 表明渗流速度在不同断面表现出明显的阶段性特征, 将图 21 速度变化曲线分为骤增(I)、骤降(II)、均匀损耗(III)区, 统计各分区速度变化率, 如图 21 所示。

(1) 在骤增(I)区, 液体流经 1—2 断面时, 过流宽度骤减, 速度骤增, 速度增加速率最大, 且最大断面 $L(1)_{\max}$ 对应最小速度 v_{\min} , 最小断面 $L(2)_{\min}$ 对应最大速度 v_{\max} 。可见, 断面宽度 L 对渗流速度影响显著。

(2) 图 21 表明: 骤降(II)区速度下降速率介于 I、III 之间, 但速度损耗幅度最大, 其速度降幅比

达到 70%; 流经(III)区渗流速度降低速率逐渐趋于平缓, 流体进入相对均匀的水头损失阶段。

(3) 基于防渗堵漏的注浆工程角度分析, 断面 L(2)处宽度最窄, 所需注浆耗材量最小, 但封堵注浆压力和强度需求最大; 而断面 L(1)处所需注浆压力最小, 封堵的渗流断面最大, 耗费封堵材料更多。

3.3 法向应力和渗透压耦合下的渗流速度规律

为明确渗透压 σ_s 和法向应力 σ_f 耦合下对渗流速度的影响规律, 选取法向应力 0.1 MPa 下第二断面的峰值流速 v_{\max} 分析见图 22。

由图 22 可知, 法向压力 σ_f 增加, 开度 e_h 闭合, 导致的峰值流速 v_{\max} 变化表现为受 σ_1 , σ_2 两因素共同作用, σ_1 为开度 e_h 减小导致的裂隙整体进水量减弱、速度 v_{\max} 降低的效果, σ_2 为流径收束导致速度增加的效果, 即流量 Q 一定时, 通过同一断面 L(2)的速度 v_{\max} 会增加。 σ_1 , σ_2 效应相互交叠作用, 当开度 e_h 极小时, 作用效果 $\sigma_1 \gg \sigma_2$, 表现流速 v_{\max} 呈递减趋势。

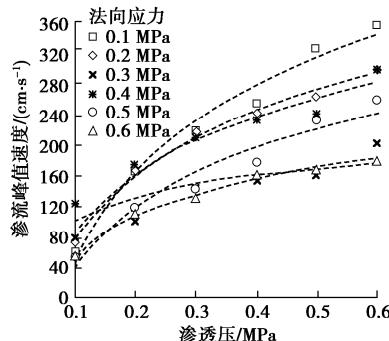


图 22 渗透压与峰值流速 v_{\max} 的影响关系

Fig. 22 Relationship between osmotic pressure and maximum velocity

结果表明峰值渗流速度 v_{\max} 与渗透压 σ_s 呈对数影响关系:

$$v_{\max} = a \ln(\sigma_s + 1) + b \quad , \quad (9)$$

式中, a 为速度随渗透压 σ_s 的增长率, 其值与法向应力 σ_f 有关, 当 $\sigma_s=0$ 时, 仅由试验岩样置于空间垂直角度的重力决定其速度参量, 即 $v=b$ 。

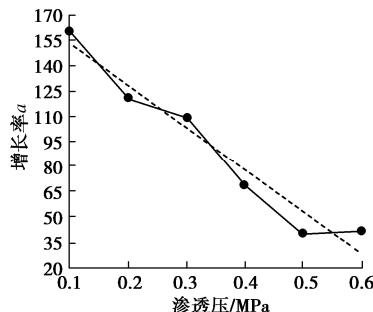


图 23 增长率 a 随法向应力的变化

Fig. 23 Change of growth rate with normal stress

为明确法向应力 σ_f 其对速度影响规律, 建立 a 与

σ_f 函数关系, 见图 23, 即有

$$a = \eta_1 \sigma_f + \eta_2 \quad , \quad (10)$$

式中, η_1 为 σ_f 对裂隙过流通道的影响效应, 且 $\eta_1 < 0$, 当 $\sigma_f=0$ 时, $a=\eta_2$, η_1 , η_2 均受温度、粗糙度等因素影响, 其值可通过可视化试验进一步量化。

联立式 (9), (10) 可得

$$v_{\max} = (\eta_1 \sigma_f + \eta_2) \ln(\sigma_s + 1) + b \quad . \quad (11)$$

式 (11) 表征峰值流速受控法向应力 σ_f 与渗透压 σ_s 影响下的规律, 当无外加法向应力作用, 即 $\sigma_f=0$ 时, 速度呈 $v=\eta_2 \ln(\sigma_s + 1) + b$ 对数关系。

4 可视化渗流流态的影响规律研究

4.1 定义渗流状态研究

雷诺数 Re 作为表征流体流动特性的重要参数, 是表征惯性力与黏滞力的比值, 为分析岩石裂隙流体的流动状态, 定义

$$Re = \frac{v_x l \rho}{\mu} \quad . \quad (12)$$

式中 v_x 为某 x 断面的渗流速度 (cm/s); ρ 为水的密度, 25°C 时的密度为 $0.997 \text{ g}/\text{cm}^3$; μ 为水的动力黏度, 水在压强为 101.325 kPa , 温度为 25°C 的条件下动力黏度为 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($10.1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)。 l 为特征长度, 对于裂隙流, 取裂隙等效隙宽的 2 倍^[18], 即 $l=2e_h$, 又 $Q=v e_h L$, 故

$$e_h = \left(\frac{12 \mu \Delta X Q}{\rho g L \Delta H} \right)^{1/3} = \left(\frac{12 \mu \Delta X L e_h v}{\rho g L \Delta H} \right)^{1/3} = \sqrt{\frac{12 \mu \Delta X v}{\rho g \Delta H}} \quad . \quad (13)$$

其中, Q 为单位时间流量 (m^3/s), μ 为水的动力黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), ρ 为液体密度 (g/cm^3), g 为重力加速度 ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$), ΔX 为渗流路径长度 (cm), ΔH 为水头 (cm), L 为裂隙渗流优势路径的过流断面宽度。

由式 (12) 可得法向应力 $0.1 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 不同渗透压下, 渗流路径长度 (选取的过流断面 2—6) 与雷诺数的变化关系, 限于篇幅, 仅列出法向应力 σ_f 为 0.1 MPa 的情况, 如图 24 所示。

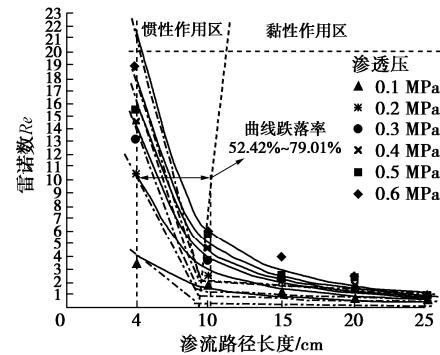


图 24 0.1 MPa 不同渗透压下渗流路径长度与雷诺数的关系

Fig. 24 Reynolds number of flow path under different osmotic pressures at normal stress of 0.1 MPa

在法向应力和渗透压恒定时, 雷诺数 Re 与渗流路径呈递减趋势, 其关系式为

$$Re = mX^{-n} \quad , \quad (14)$$

式中, X 为渗流路径, m , n 为参数, 表示渗流路径 X 对雷诺数 Re 的影响效应。

雷诺数表征惯性力与黏性力的比值, 根据图 25, 当渗流路径 $X < 10$ cm 时, 求取该阶段的雷诺数值跌落比率为 57.6%~64.4%, 表明该阶段惯性力作用对流体速度损失和运动状态的影响占据主导, 定义为惯性主作用区; 而当渗流路径 $X > 10$ cm 时, 雷诺数值降低缓慢, 流体状态开始转变, 惯性作用开始过渡并逐渐减弱, 曲线趋于平缓, 此时黏性力作用占据主导, 定义为黏性作用区。

为准确标定惯性作用区与黏性作用区的临界点, 提出一种客观方法: 确定渗透压 σ_s 一定, 分别绘制渗流主路径为 5 cm 处和 25 cm 处的切线, 再根据两条切线方程的交点来确定临界点的坐标。

渗流路径 $X_1=5$ cm 的切线方程:

$$Re - Re_1 = mnX_1^{n-1}(X - X_1) \quad . \quad (15)$$

渗流路径 $X_2=25$ cm 的切线方程:

$$Re - Re_2 = mnX_2^{n-1}(X - X_2) \quad . \quad (16)$$

联立两切线方程得交点 (X, Re) 为

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{mnX_1^n - mnX_2^n - Re_1 + Re_2}{mnX_1^{n-1} - mnX_2^{n-1}} \quad , \\ Re &= \frac{Re_2 X_1^{n-1} - Re_1 X_2^{n-1} + mnX_1^n X_2^{n-1} - mnX_2^n X_1^{n-1}}{X_1^{n-1} - X_2^{n-1}} \quad . \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

计算结果列于表 4, 可见, 随着渗透压的增加, 临界点的横坐标点后移, 达到临界点的雷诺数增大, 说明渗透压增加流速, 使得流动状态临界点的转变滞后。

表 4 主惯性与主黏性临界点

Table 4 Critical points of main inertia and main viscosity

临界点 坐标	渗透压/MPa					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$x (X)$	8.33	7.52	7.65	7.93	8.08	8.52
$y (Re)$	0.71	1.15	1.18	1.74	1.86	2.27

4.2 雷诺数与渗透压、法向应力的关系

为明确渗透压和法向应力对雷诺数拟合曲线系数的影响规律, 根据式(14), 建立参数 m 与渗透压 σ_s 的关系如图 25 所示, m 与渗透压 σ_s 的关系为

$$m = \mu\sigma_s + \lambda_1 \quad , \quad (18)$$

式中, μ 为渗透压 σ_s 对 m 的影响率, 其值受法向应力影响, 如图 26 所示, 影响率 μ 与法向应力 σ_f 呈指数关系, 即

$$\mu = w_1 e^{w_2 \sigma_f} \quad , \quad (19)$$

式(19)代入式(18)得

$$m = w_1 e^{w_2 \sigma_f} \sigma_s + \lambda_1 \quad . \quad (20)$$

m 与 σ_f 呈指数关系, m 与渗透压 σ_s 呈线性递增关系, w_1, w_2 为法向应力 σ_f 对 m 的影响系数, 且 $w_1 > 0$, $w_2 < 0$ 。

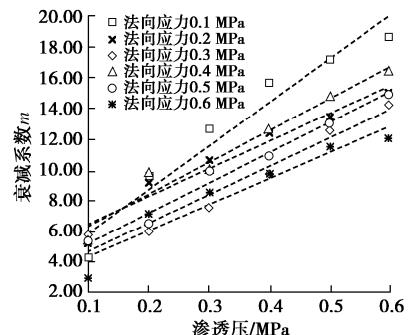


图 25 m 与渗透压的关系

Fig. 25 Relationship between m and osmotic pressure

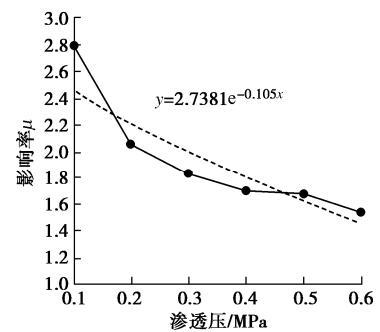


图 26 μ 和法向应力的关系

Fig. 26 Relationship between μ and normal stress

根据式(14)中计算的 n 值, 建立 n 与渗透压 σ_s 的关系如图 27 所示。

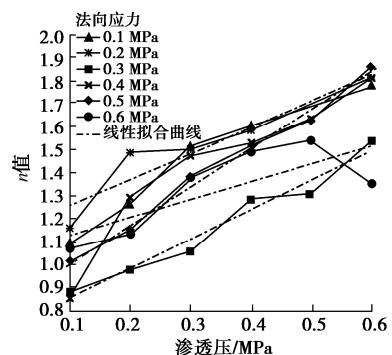


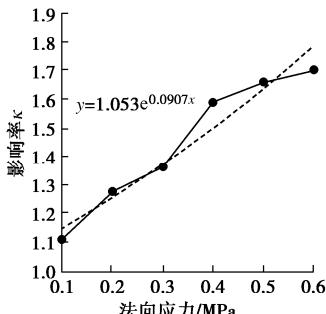
图 27 n 与渗透压的关系

Fig. 27 Relationship between n and osmotic pressure

由图 27 可知, n 与渗透压 σ_s 呈线性关系, 即

$$n = \kappa\sigma_s + \lambda_2 \quad . \quad (21)$$

式中, κ 为渗透压对 n 的影响率, 其值受法向应力影响, 见图 28。

图 28 κ 与法向应力的关系Fig. 28 Relationship between κ and normal stress

建立 κ 与 σ_f 关系为

$$\kappa = w_3 e^{w_4 \sigma_f}, \quad (22)$$

故有

$$n = w_3 e^{w_4 \sigma_f} \sigma_s + \lambda_2. \quad (23)$$

式(23)表明, n 与 σ_f 呈指数关系, n 与渗透压 σ_s 呈线性递增关系, w_3, w_4 为法向应力对 n 的影响系数, 且 $w_3 > 0, w_4 > 0$ 。

通过公式合并得可视化渗流试验的雷诺数预测公式, 即

$$\hat{Re} = (w_1 e^{w_2 \sigma_f} \sigma_s + \lambda_1) X^{-(w_3 e^{w_4 \sigma_f} \sigma_s + \lambda_2)}. \quad (24)$$

为定量刻画上述预测公式预测值与试验值的误差, 选用平均相对误差来表征: 设某法向应力条件下不同断面处的雷诺数试验值为 $Re(t)$, 预测值为 $\hat{Re}(t)$, $t=1, 2, \dots, N=30$, 则雷诺数平均相对误差为

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{Re(t) - \hat{Re}(t)}{\hat{Re}(t)} \right|. \quad (25)$$

不同法向应力对应的雷诺数平均相对误差列于表 5, 可见, 除法向应力 0.1 MPa 对应的情况外, 雷诺数的平均相对误差均在 20% 以内, 说明预测式(24)是有效的, 能表征可视化渗流试验中雷诺数在渗流路径 X 下受法向应力 σ_f 、渗透压 σ_s 、粗糙度和温度 (w_1, w_2, w_3, w_4) 等因素影响的规律, 可为后续可视化裂隙试验的流体运动状态和特性研究提供参考。

表 5 雷诺数预测值的平均相对误差

Table 5 Average relative errors of predicted values of Reynolds number

法向应力 /MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
平均相对误差 ε	0.2659	0.1442	0.1811	0.1872	0.2059	0.1667

5 结 论

(1) 基于自主研发的可视化渗流试验装置, 形成了一套可视化渗流试验及数据处理技术一体化的研究理论。利用硅胶精确复刻翻模的 K39 类岩石可视化材料, 在实现渗流过程可视化观测的同时, 精确反映了

裂隙面精确复刻的粗糙度、渗透压和法向应力等因素对渗流路径、渗流面积和渗流速度等参数的影响规律。

(2) 研究图像数字化处理技术, 捕捉裂隙渗流状态的分帧图像, 利用色域和灰度面积 I 值细化标定渗流区域, 黑白二值化处理和图层二次叠加自识别技术精确获取裂隙渗流场真实扩散面积参数。

(3) 建立法向应力 σ_f 和渗透压 σ_s 耦合下的渗流面积扩散模型, 得出裂隙岩体固有的渗流储水能力随法向应力增加而减小。

(4) 获取同一法向应力 σ_f 、渗透压 σ_s 下裂隙的过流优势路径各断面宽度的变化特征, 得出最小断面对应最大速度, 并以峰值流速为例建立可视化渗流速度定量分析公式, 标定不同断面的速度变化三阶段, 建立 v_{max} 与 σ_f 、 σ_s 耦合作用的函数关系。

(5) 标定惯性作用与黏性作用区的雷诺数转变临界点, 表征渗流路径下流体的流动状态的变化, 构建渗透压 σ_s 、法向应力 σ_f 影响下可视化裂隙渗流雷诺数预测模型, 证明其有效性, 为后续可视化裂隙试验的流体运动状态和特性研究提供参考。

参 考 文 献:

- [1] LOUIS C. Rock Hydraulics in Rock Mechanics[M]. New York: Springer-Verlag, 1974.
- [2] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 仿天然岩体裂隙渗流的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19–24. (SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHAO Jian. Study on fracture seepage in the imitative nature rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 19–24. (in Chinese))
- [3] 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 Guang-xiang, ZHANG Yong-xing, HA Qiu-ling. Super-cubic and sub-cubic law of rough fracture seepage and its experimental study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 74–79. (in Chinese))
- [4] SINGH K K, SINGH D N, RANJITH P G. Laboratory simulation of flow through single fractured granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 987–1000.
- [5] BABADAGLI T, REN X, DEVELI K. Effects of fractal surface roughness and lithology on single and multiphase flow in a single fracture: an experimental investigation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 68: 40–58.
- [6] BRUSH D J, THOMSON N R. Fluid flow in synthetic roughwalled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4): 1085–1100.

- [7] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydro mechanical coupling during shearing of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(3): 317 - 329.
- [8] 胡昱, 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): 1009 - 1013. (HU Yu, YUAN Xin, LIU Guang-ting, et al. Experiment research on the laws of seepage in calcirudite rock within single fracture under multiaxial stresses[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(6): 1009 - 1013. (in Chinese))
- [9] 刘才华, 陈从新. 三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性[J]. 自然科学进展, 2007, **17**(7): 989 - 994. (LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin. Seepage characteristics of single fracture under triaxial stress[J]. Advances in Natural Science, 2007, **17**(7): 989 - 994. (in Chinese))
- [10] 王志良, 申林方, 徐则民, 等. 岩体裂隙面粗糙度对其渗流特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1262 - 1268. (WANG Zhi-liang, SHEN Lin-fang, XU Ze-min, et al. Influence of roughness of rock fracture on seepage characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(7): 1262 - 1268. (in Chinese))
- [11] QIAN J, ZHAN H, LUO S, et al. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture[J]. Journal of Hydrology, 2007, **339**(3/4): 206 - 215.
- [12] RANJITH P G, DARLINGTON W. Nonlinear single-phase flow in real rock joints[J]. Water Resources Research, 2007, **43**(9): 146 - 156.
- [13] ZHANG Z, NEMCIK J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures[J]. Journal of Hydrology, 2013, **477**(16): 139 - 151.
- [14] 胡少华, 周佳庆, 陈益峰, 等. 岩石粗糙裂隙非线性渗流特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, **13**(1): 48 - 56. (HU Shao-hua, ZHOU Jia-qing, CHEN Yi-feng, et al. Laboratory research on nonlinear flow behavior of rough fractures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, **13**(1): 48 - 56. (in Chinese))
- [15] 鞠杨, 谢和平, 郑泽民, 等. 基于3D打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报, 2014, **59**(32): 3109 - 3119. (JU Yang, XIE He-ping, ZHENG Ze-ming, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bull, 2014, **59**(32): 3109 - 3119. (in Chinese))
- [16] 刘建军, 汪尧, 宋睿, 等. 基于透明岩土材料的可视化渗流实验及其应用前景[J]. 地球科学, 2017, **42**(8): 1287 - 1295. (LIU Jian-jun, WANG Yao, SONG Rui, et al. Visual seepage experiment based on transparent rock-soil material and its application prospect[J]. Earth Science, 2017, **42**(8): 1287 - 1295. (in Chinese))
- [17] 盛金昌, 刘继山, 赵坚. 基于图像数字化技术的裂隙岩体非稳态渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7): 1402 - 1407. (SHENG Jin-chang, LIU Ji-shan, ZHAO Jian. Analysis of transient fluid flow in fractured rock masses with digital image-based method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(7): 1402 - 1407. (in Chinese))
- [18] FOXRW, MCDONALD A T, PRITCHARD P J. Introduction to Fluid Mechanics[M]. 6th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2004: 348.