

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.013

## 岩体裂隙面形貌特征对其渗流特性的影响研究\*

段玲玲, 邓华锋, 熊雨, 支永艳, 潘登, 齐豫

(三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 岩体裂隙面的形貌特征直接影响其渗流特性, 为了分析二者的相关关系, 采用劈裂法制备了单裂隙砂岩试样, 进行了裂隙面扫描分析和渗流试验, 基于分形维数在定量表达不规则曲线形貌特征方面的优势, 提出了考虑裂隙面形貌各向异性特征的分形维数计算方法。研究表明: (1) 基于矩阵理论的裂隙面综合分形维数, 相当于用矩阵网格去覆盖整个裂隙面, 可以较好地反映裂隙面的整体形貌特征; (2) 裂隙面的形貌特征对其渗流特性影响显著, 随着裂隙面综合分形维数逐渐增大, 裂隙岩体的渗透系数逐渐减小, 而且侧向应力越大, 渗透系数的减小趋势越明显; (3) 分析建立了裂隙岩样渗透系数 $k_f$ 与裂隙面综合分形维数 $\bar{D}$ 的相关关系, 验证分析表明, 该公式计算得到的裂隙岩样渗透系数与试验结果吻合较好。相关研究成果可为裂隙岩体渗流特性分析提供参考。

**关键词:** 裂隙; 形貌特征; 各向异性; 分形维数; 渗透系数; 相关关系

**中图分类号:** O357.3   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0110-08

## Study on the Influence of Morphology of Rock Mass Fracture Surface on Its Seepage Characteristics

DUAN Lingling, DENG Huafeng, XIONG Yu, ZHI Yongyan, PAN Deng, QI Yu

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The morphology of the fracture surface of the rock mass directly affects the seepage characteristics, and a single fracture sandstone sample was prepared by the splitting test to analyze their correlation. The fracture surface scanning analysis and seepage test were carried out to quantitatively express the morphological characteristics of irregular curves based on fractal dimension, and the fractal dimension calculation method was proposed considering the anisotropic characteristics of fracture surface morphology. The results show that: (1) The comprehensive fractal dimension of the fracture surface based on matrix theory is equivalent to covering the whole fracture surface with matrix grid, which can better reflect the overall topography of the fracture surface; (2) The morphological characteristics of the fracture surface have a significant influence on the seepage characteristics. As the fractal dimension of the fracture surface increases, the permeability coefficient of the fractured rock decreases gradually, and with the increase of the lateral stress, the decreasing trend of the permeability coefficient

\* 收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-03-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51679127)、国家自然科学基金重点项目(51439003)、三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放研究基金项目(2018KDZ04)、三峡大学硕士学位论文培优基金项目(2019SSPY018)资助

**作者简介:** 段玲玲(1991—), 女, 硕士研究生。主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: 201708521321010@ctgu.edu.cn

**通讯作者:** 邓华锋(1979—), 男, 教授, 博导。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

cient becomes more obvious. (3) The correlation between the permeability coefficient  $k_f$  of the fractured rock sample and the comprehensive fractal dimension  $\bar{D}$  of the fracture surface can be expressed, and the verification analysis shows that permeability coefficient of the fractured rock calculated by the proposed empirical formula agrees well with the experimental results. The related research results can provide reference for the analysis of seepage characteristics of fractured rock mass.

**Keywords:** fracture; topographic characteristics; anisotropy; fractal dimension; permeability coefficient; correlation

## 引言

自然界中的岩体经历了漫长的成岩运动及地质构造作用,岩体中含有大量节理、裂隙等宏观和微观的不连续结构面,成为岩体中地下水运移的主要通道,使裂隙岩体的渗透特性与一般岩石介质不同<sup>[1]</sup>。裂隙岩体的渗流特征直接影响岩体工程的变形稳定,一直是岩土工程领域研究的重点<sup>[2]</sup>。

裂隙岩体渗透性能的影响因素较多,如裂隙面粗糙度、开度、接触面积、应力等。M.Ломизе等<sup>[3-5]</sup>将裂隙面视为理想的光滑平行面,对裂隙渗流特性进行了试验研究,建立了著名的立方定理,但没有考虑裂隙面的粗糙特征。在此基础上,较多学者分析了不同因素对裂隙岩体渗流特性的影响,如贺玉龙等<sup>[6]</sup>研究发现不同粗糙度裂隙面的渗透系数随有效应力的增加呈负指数减小;王来贵等<sup>[7]</sup>采用三维分形维数作为裂隙粗糙度的表征参数,发现裂隙岩体渗流量随着裂隙面分形维数的增大逐渐减少;黄帆等<sup>[8]</sup>提出了裂隙开度与迹长的相关函数,分析了裂隙开度和迹长对裂隙网络渗流特性的影响;肖维民等<sup>[9]</sup>通过试验发现接触面积对裂隙渗流有影响,得到考虑接触面积影响的渗流计算公式;速宝玉等<sup>[10]</sup>研究了渗流—应力耦合特性,得到应力对渗流特性的影响规律,随着应力的增大,裂隙开度减少,渗透系数降低。

大量的试验研究表明裂隙面的形貌特征是影响裂隙渗流特性的重要原因<sup>[11-13]</sup>。许多学者从不同角度对裂隙面粗糙度与渗流特性的相关关系进行了研究<sup>[14-17]</sup>,并在裂隙面微观形貌特征定量分析基础上,建立了裂隙面形貌特征参数与裂隙岩体渗透系数的相关关系。王蓉<sup>[18]</sup>基于人工裂隙面渗流试验,分析建立了裂隙岩体渗透系数与裂隙面粗糙度系数、三维分形维数和裂隙面平均隙宽的相关关系;韩杨<sup>[19]</sup>、王聪超<sup>[20]</sup>采用数值模拟分析研究,建立

了渗透系数与粗糙度 JRC 之间的函数关系式;夏才初等<sup>[21]</sup>综合考虑裂隙透过率和表征裂隙形貌的分形维数等因素,提出了裂隙渗流经验公式。这些经验公式的建立为裂隙岩体的渗流特性计算分析奠定了较好的基础。

从上述研究成果来看,裂隙面的形貌特征与裂隙岩体渗流特性之间存在较好的相关性,但常用的裂隙面的形貌特征表达参数粗糙度系数 JRC 很难被直接测定,分形维数可以较好地定量表达不规则曲线形貌<sup>[22]</sup>,而且可以比较方便被准确确定,因此,周创兵等<sup>[23]</sup>、王刚等<sup>[24]</sup>尝试选取分形维数来表达裂隙面的微观形貌特征。但在裂隙面粗糙度系数或者分形维数的确定过程中,通常是沿着裂隙面某一方取多条剖面线的粗糙度系数或者分形维数的均值代表整个裂隙面的形貌特征<sup>[25]</sup>,而裂隙面上不同方向的形貌特征差异显著,各向异性特征明显<sup>[26]</sup>,这种取均值的方法可以在一定程度上反映裂隙面的形貌特征,但无法反应裂隙面形貌特征的各向异性特征。基于此,本文在以往裂隙面形貌特征参数取值方法基础上,通过分析 X、Y 两个方向上裂隙面分形维数,考虑形貌特征各向异性的特点,提出一种裂隙面分形维数的优化确定方法,并结合单裂隙岩样的渗流试验,分析建立裂隙岩体渗透系数与裂隙面分形维数的相关关系。

## 1 单裂隙岩样制备及试验方案

由于采集、制备包含天然节理、裂隙的岩样难度很大,本文采用巴西劈裂法制备单裂隙岩样。试验所用岩石取自三峡库区,为绢云母中粒石英砂岩,微风化,层理比较发育。对现场取回的岩块进行钻芯、切割、打磨制备成直径 50 mm,高度 100 mm 的标准圆柱形岩样,然后采用巴西劈裂法顺层理弱面将岩样从侧面中间劈裂开,剔除劈裂面局部掉块的岩样,选取 16 个试样作为单裂隙渗流试验样,其

中11个试样作为试验岩样,5个试样作为验证岩样。典型岩样照片如图1所示。



图1 典型岩样照片

Fig.1 Photograph of a typical sample

ST500 三维非接触式表面形貌仪是目前国际上用在科学研究和工业领域最先进的表面轮廓测量设备之一,采用激光共聚焦对样品表面进行快速、重复性、高分辨率的测试分辨,通过专业的三维分析软件可得到样品表面的任意参数,如二维高度曲线分布、二维高线分布,三维表面形貌、样品的波纹度、表面高度分层统计等,最小扫描分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ ,如图2所示。对制备好的单裂隙岩样,采用ST500 三维非接触式表面轮廓仪对裂隙面进行扫描分析,得到裂隙面的微观形貌参数及分形维数。

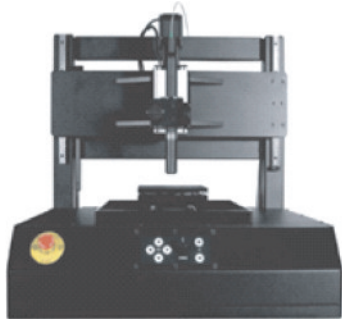


图2 ST500 三维非接触式表面轮廓仪

Fig.2 ST500 three-dimensional non-contact surface profiler

HYS-4型岩石渗透分析仪是用于渗透试验的恒压系统,能够测定岩石的渗透系数,反映岩石微裂缝的发育程度。如图3所示,采用HYS-4型岩石渗透分析仪进行单裂隙岩样的渗流试验,试验中,为了分析侧向应力和轴向渗透水压力的影响,侧向应力考虑了2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 MPa 5种情况,渗

透水压力考虑了0.5、1.0、1.5、2.0 MPa 4种情况。为了避免净围压较小时水从裂隙岩样侧面渗出,试验中采用的侧向应力相对较大。



图3 HYS-4型岩石渗透分析仪

Fig.3 HYS-4 rock permeability analyzer

## 2 裂隙面形貌特征分析

当水在裂隙中流动时,裂隙面形貌特征是影响裂隙应力-渗流特性的重要因素。典型岩样S7裂隙面的微观形貌如图4所示,裂隙面凹凸不平的起伏特征明显。在以往裂隙面形貌特征参数统计中,通常沿着某一方向提取多条剖面线,分析得到各剖面线的分形维数,但裂隙面的粗糙度存在明显的各向异性<sup>[27]</sup>,而且在渗流试验中,裂隙面的水流也不是简单的直线流动,因此,裂隙岩体渗流分析中单纯考虑一个方向形貌特征影响是不够的。

基于此,为了更好地表达裂隙面的形貌特征,在X、Y两个方向按照10%的间隔分别均匀提取11条剖面线,如图5、图6所示。

从图6可以看出,X、Y两个方向各条剖面线总体形态基本一致,但差异较明显,采用ST500 三维非接触式表面轮廓仪自带的分析软件,得到X、Y两个方向各剖面线的分维数 $D_{xt}$ 、 $D_{yt}$ ,见表1。

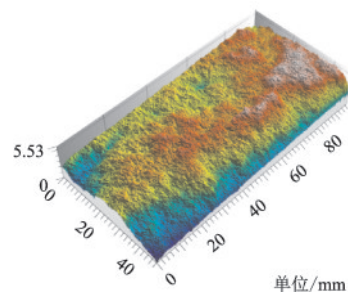


图4 岩样裂隙面微观扫描图

Fig.4 Microscopic scan of rock fissure surface

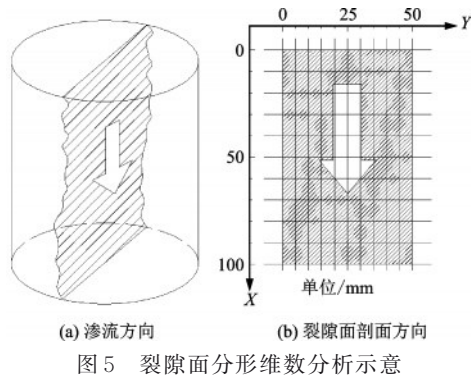


图5 裂隙面分形维数分析示意  
Fig.5 Schematic diagram of fractal dimension analysis of the fracture surface

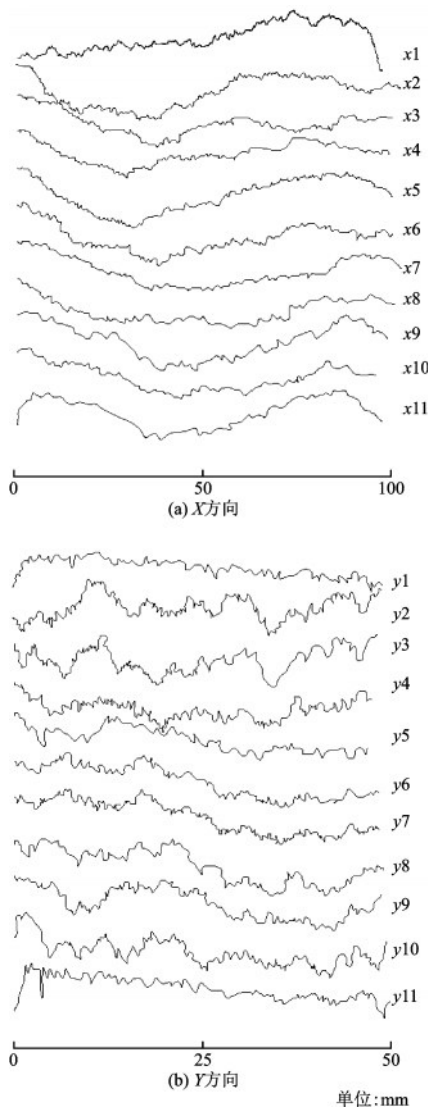


图6 X、Y方向剖面线  
Fig.6 Profiles in the X and Y directions

由表1可见,裂隙面沿X方向上的分形维数最大值、最小值、均值、标准差分别为1.47、1.10、1.22、0.30, Y方向上的分维数最大值、最小值、均值、标准

差分别为1.83、1.20、1.49、0.15。X、Y方向分形维数最大值和最小值的差别分别为33.64%、52.50%, X、Y方向分形维数均值的差别为18.12%,说明同一方向不同剖面之间以及不同方向各剖面之间的差异非常明显,具有明显离散性。如果用某一个方向的分形维数(或者JRC)均值去代表整个裂隙面的形貌特征,无法很好地反映裂隙面的整体情况。

基于此,为了同时考虑裂隙面X、Y两个方向形貌特征的影响,根据矩阵计算的特点,分别建立X、Y两个方向剖面线的分析维数矩阵,如式(1)所示,计算得到裂隙面的综合分形维数 $\bar{D}$ 。这种计算方法相当于用 $11 \times 11$ 的网格去覆盖整个裂隙面,每个点的形貌特征在裂隙面的综合分形维数 $\bar{D}$ 中均有体现,可以更好地反映裂隙面的整体形貌特征。另外,根据计算精度的需要,可以采用加密剖面线的方法,得到更细致的结果。

$$\bar{D} = \left( [D_{x1} \ D_{x2} \ \dots \ D_{xn}] \begin{bmatrix} D_{y1} \\ D_{y2} \\ \vdots \\ D_{ym} \end{bmatrix} \right)^{\frac{1}{2}} / n^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

采用分数维来描述节理粗糙度,裂隙表面粗糙度越大,则裂隙面分形维数越大。光滑的平面是2维,极度粗糙的裂隙面为3维,裂隙面的起伏特征介于二者之间;对于剖面,光滑的为1维,极度粗糙的为2维,实际裂隙面为1与2之间的分数维<sup>[28]</sup>。表2中采用劈裂法得到岩样裂隙面的分维数为1.27~1.48。通过式(1)计算得到该试样裂隙面综合分形维数为1.34,与X、Y方向分形维数的均值差异明显。采用分数维来描述节理粗糙度,裂隙表面粗糙度越大,则裂隙面分形维数越大,对于剖面,光滑的为1维,极度粗糙的为2维,实际裂隙面的剖面线为1与2之间的分数维<sup>[28]</sup>。计算得到各试样裂隙面的综合分形维数值见表2,介于1.27~1.48,说明采用劈裂法制备的各试样也存在明显差别。

### 3 裂隙面形貌特征与裂隙渗流相关性分析

#### 3.1 单裂隙岩样渗流试验结果分析

M. Ломизе等<sup>[3-5]</sup>对裂隙水力学特性进行试验及理论研究,建立了著名的立方定理,按照立方定律进行变形,得到水力开度为:

表1 典型岩样裂隙面分形维数

Table 1 Fractal dimension of typical rock fissure surfaces

剖面	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	均值	标准差
$D_{xi}$	1.47	1.19	1.19	1.19	1.10	1.20	1.15	1.26	1.21	1.24	1.17	1.22	0.30
$D_{yi}$	1.52	1.47	1.44	1.48	1.20	1.50	1.84	1.40	1.40	1.60	1.58	1.49	0.15

表2 裂隙面分形维数

Table 2 Fractal dimension of fracture surfaces

编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
$\bar{D}$	1.27	1.28	1.30	1.30	1.31	1.32	1.34	1.39	1.39	1.41	1.48

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{12\mu LQ}{gW\Delta H}} \quad (2)$$

假定裂隙渗流服从达西定律,可得到裂隙岩样的渗透系数为<sup>[29]</sup>:

$$k_t = gb_h^2/12\mu \quad (3)$$

式中,  $Q$  为单位时间内渗流量,  $m^3/s$ ;  $b_h$  为裂隙的等效水力开度,  $m$ ;  $W$  为裂隙宽度,  $m$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 m/s^2$ ;  $\Delta H$  为水压差,  $m$ ;  $\mu$  为运动黏度, 取  $0.897 \times 10^{-6} m^2/s$ ;  $L$  为裂隙长度,  $m$ ;  $k_t$  为裂隙岩样渗透系数,  $m/s$ 。

根据试验结果和公式(2), 计算绘制出裂隙岩样等效水力开度与裂隙面分形维数的相关关系, 如图7所示。

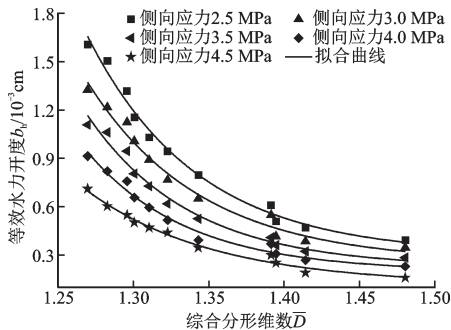


图7 裂隙岩样等效水力开度  $b_h$  与综合分形维数  $\bar{D}$  关系  
Fig.7 Relationship between equivalent hydraulic openings  $b_h$  and comprehensive fractal dimensions  $\bar{D}$  of fractured rock samples

由图7可以看出, 单裂隙岩体在不同侧向应力下的等效水力开度与裂隙面综合分形维数  $\bar{D}$  呈现出一种负相关的关系。随着综合分形维数  $\bar{D}$  增大, 裂隙面上不规则的凸起和凹槽增多, 节理表面相互咬合, 从而导致了裂隙岩体的等效水力开度逐渐减小。而且, 侧向应力越小, 等效水力开度  $b_h$  的减小趋势越明显, 随着侧向应力增大, 裂隙面闭合越好, 裂

隙面形貌特征对等效水力开度的影响逐渐减弱。

根据试验结果和公式(3)可计算得到各试样的渗透系数, 典型单裂隙岩样渗透系数和侧向应力的相关关系, 如图8所示。

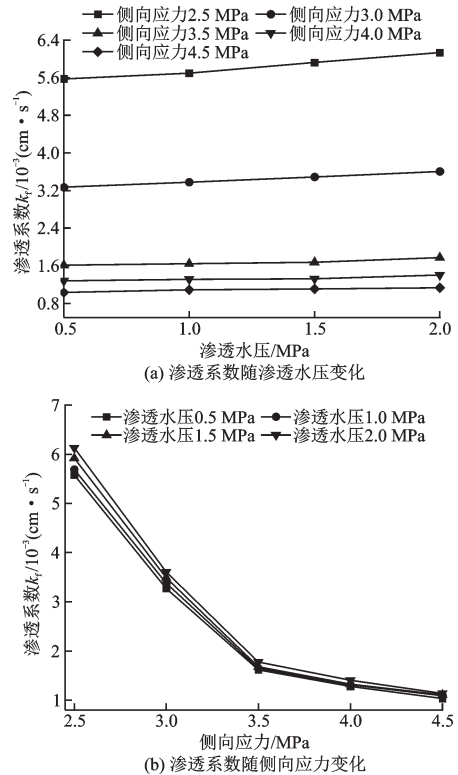


图8 典型单裂隙岩样渗透系数  $k_t$  随渗透水压和侧向应力的变化曲线

Fig.8 Curves of permeability coefficients  $k_t$  of typical single fractured rock samples with osmotic water pressure and lateral stress

从图8可以看出:

(1) 在侧向应力恒定时, 渗透水压从 0.5 MPa 增加到 2.0 MPa, 单裂隙岩样的渗透系数增大了 9.72%~9.99%, 侧向应力越大, 渗透系数增大幅度

越小。渗透水压由0.5 MPa逐渐增加到2.0 MPa过程中,裂隙岩样的渗透系数基本在同一个数量级内变化,渗透水压力对裂隙岩样渗透系数的影响较小。因此,在裂隙岩样渗透系数与裂隙面形貌参数相关性分析中,相同侧向应力情况下,取不同渗透水压下渗透系数的均值来表征单裂隙岩样的渗流特性。

(2)在渗透水压力恒定时,随侧向应力的增大,裂隙面渗透系数呈非线性减小。侧向应力从2.5 MPa增加到3.5 MPa,单裂隙岩样的渗透系数减小70.03%~70.66%;从3.5 MPa增加到4.5 MPa时,单裂隙岩样的渗透系数减小33.69%~36.15%,可见侧向应力对裂隙岩体渗流特性显著影响。在侧向应力大于3.5 MPa时,渗透系数逐渐趋于稳定值。

### 3.2 单裂隙岩样渗透系数经验公式分析

考虑岩样裂隙面的形貌特征和侧向应力的影响,绘制不同侧向应力下裂隙渗透系数与裂隙面分形维数的相关关系,如图9所示。

由图9可以看出:

(1)裂隙岩体在不同侧向应力下的渗透系数 $k_f$ 与裂隙面综合分形维数 $\bar{D}$ 呈现负相关。随着综合分形维数 $\bar{D}$ 增大,裂隙面上不规则的凸起和凹槽增多,渗透路径增长,增大了裂隙面的接触面积,减少了渗流通道,从而导致了裂隙岩体的渗透系数逐渐减小。

(2)侧向应力越小,渗透系数的减小趋势越明显,说明在侧向应力挤压作用下,侧向应力越大,裂隙面等效水力开度越小,裂隙面的渗透系数降低。因此,裂隙岩样的渗透系数不仅与裂隙面的分形维数有关,而且与渗流试验时所施加的侧向应力

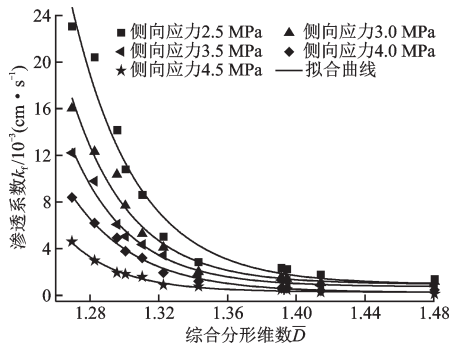


图9 裂隙岩样渗透系数 $k_f$ 与综合分形维数 $\bar{D}$ 关系

Fig.9 Relationship between permeability coefficients  $k_f$  of fractured rock samples and comprehensive fractal dimensions  $\bar{D}$

有关。

(3)裂隙岩样的渗透系数 $k_f$ 与裂隙面分形维数 $\bar{D}$ 的相关关系可以采用指数函数进行拟合,拟合函数关系式为:

$$k_f = a \times \exp(-\bar{D}/b) + c \quad (4)$$

式中, $k_f$ 为裂隙岩样渗透系数,cm/s; $\bar{D}$ 为裂隙面的综合分形维数; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为拟合系数,反映侧向应力和裂隙面分形维数对渗透系数的影响。

其中, $a$ 主要反应了侧向应力对渗透系数的影响,不同侧向应力 $\sigma_n$ 下的渗透系数拟合分析得到 $a = (18.023 \times 0.437^{\sigma_n}) \times 10^{10}$ ;  $b$ 的取值只与裂隙面的综合分形维数 $\bar{D}$ 有关,试验结果拟合分析得到 $b = 0.046$ ;不同侧向应力情况下,随着裂隙面分析维数的增大而逐渐趋于一个稳定值,而且该稳定值的大小与侧向应力相关,试验结果拟合分析得到 $c = (2.083 \times 0.418^{\sigma_n}) \times 10^{-3}$ 。

为了验证公式(4)的合理性,对另外的5个单裂隙岩样采用相同的试验流程,得到裂隙面参数和渗流参数,并采用公式(4)对各裂隙岩样的渗透系数进行计算见表3。

从表3可明显看出,单裂隙岩样渗透系数的试验值和计算值误差范围在-9.76%~4.41%,相对较小,说明本文所建立的单裂隙岩样渗流特性与裂隙面形貌特征之间的相关关系是合理的。

表3 裂隙岩样渗透系数验证

Table 3 Verification table of permeability coefficients of fracture rock samples

编号	侧向应力 $\sigma_n$ / MPa	$\bar{D}$	$k_f/10^{-3}(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		误差/%
			计算值	试验值	
S12	1.7	1.25	70.16	68.71	2.07
S13	2.2	1.33	8.39	8.62	-2.74
S14	3.4	1.37	1.36	1.30	4.41
S15	3.7	1.42	0.41	0.45	-9.76
S16	4.8	1.44	0.12	0.13	-8.33

## 4 结论

(1)在常规分形维数描述裂隙面形貌特征的基础上,基于矩阵理论,提出了考虑裂隙面形貌特征各向异性特征的分形维数计算方法,用 $11 \times 11$ 的网格去覆盖整个裂隙面,每个点的形貌特征在裂隙面综合分形维数 $\bar{D}$ 中均有体现,相比以往裂隙面形貌特征参数的取值方法,可较好地反映裂隙面的整体

形貌特征。

(2) 裂隙面形貌特征对其渗流特性影响显著, 随着裂隙面综合分形维数  $\bar{D}$  逐渐增大, 裂隙面的凸起和凹槽增多, 渗透路径增长, 裂隙面的接触面积增大, 渗水面积减少, 则裂隙岩体的渗透系数也逐渐减小; 而且在侧向应力挤压作用下, 侧向应力越大, 裂隙面越紧闭, 裂隙水力开度减少, 裂隙面渗透系数的减小趋势越明显。

(3) 不同侧向应力作用下, 单裂隙岩样的渗透系数随裂隙面综合分形维数的增大呈指数函数形式逐渐减小, 分析建立了裂隙岩样的渗透系数  $k_f$  与裂隙面综合分形维数  $\bar{D}$  的相关关系, 验证分析表明, 本文所建立经验公式计算得到的裂隙岩样渗透系数与试验结果吻合较好, 说明本文所提出的分析方法和经验公式是合理可行的。

## 参考文献:

- [1] 雷光伟. 岩体节理几何特征研究及三维网络模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
Lei G W. Study on rock mass joints geometric features and 3D network simulation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [2] 赵延林, 王卫军, 黄永恒, 等. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1):24-32.  
Zhao Y L, Wang W J, Huang Y H, et al. Coupling analysis of seepage-damage-fracture in fractured rock mass and engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 24-32. (in Chinese)
- [3] ЛОМИЗЕ М. Фильтрация в трещиноватых породах[M]. Москва: Госэнергоиздат, 1951.
- [4] Ромм Е С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород [M]. Москва: Издательство Недр, 1966.
- [5] Snow D. Anisotropic permeability of fractured media [J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [6] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):415-419.  
He Y L, Yang L Zh. Testing study on variational characteristics of rock mass permeability under loading-unloading of confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 415-419. (in Chinese)
- [7] 王来贵, 张阳, 刘向峰, 等. 单裂隙砂岩渗流特性实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5):1804-1812.  
Wang L G, Zhang Y, Liu X F, et al. Experimental research on seepage characteristics of sandstone with single fracture [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(5):1804-1812. (in Chinese)
- [8] 黄帆, 姚池, 周创兵, 等. 考虑裂隙迹长和开度相关性的随机裂隙网络数值模拟及渗流分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(2):35-42.  
Huang F, Yao Ch, Zhou Ch B, et al. Numerical simulation and seepage analysis of stochastic fracture network considering correlation between fracture trace length and aperture [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2):35-42. (in Chinese)
- [9] 肖维民, 夏才初, 王伟, 等. 考虑接触面积影响的粗糙节理渗流分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7):1913-1922.  
Xiao W M, Xia C Ch, Wang W, et al. Analysis of fluid flow through a rough joint considering effect of contact area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1913-1922. (in Chinese)
- [10] 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 B Y, Zhan M L, Wang Y. Experimental study on coupling characteristics of fracture seepage and stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4):73-77. (in Chinese)
- [11] 杨金保, 冯夏庭, 潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1629-1635.  
Yang J B, Fong X T, Pan P Zh. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1629-1635. (in Chinese)
- [12] Sheng T D, Chao J, Wei G Q, et al. Theoretical and experimental investigation of characteristics of single fracture stress-seepage coupling considering microroughness [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017(pt.7):1-12.
- [13] 段慕白, 李皋, 孟英峰, 等. 不同节理粗糙度系数的裂隙渗流规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5):41-44.  
Duan M B, Li G, Meng Y F, et al. Research on regulation of fracture seepage in different joint roughness coefficients [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5):41-44. (in Chinese)
- [14] 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 Zh L, Shen L F, Xu Z M, et al. Influence of

- roughness of rock fracture on seepage characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7):1262-1268. (in Chinese)
- [15] Luo J, Qi Y, Zhao Q, et al. Investigation of flow and heat transfer characteristics in fractured granite [J]. Energies, 2018, 11(5):1228.
- [16] 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(增1):3235-3240.  
He Y L, Tao Y J, Yang L Zh. Experimental study on seepage characteristics of single fracture with different joint roughness coefficients [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 3235-3240. (in Chinese)
- [17] 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): 2377-2386.  
Jiang Y J, Li B, Wang G, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fissures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12):2377-2386. (in Chinese)
- [18] 王蓉. 基于三维扫描技术的裂隙面重建及其渗流规律研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.  
Wang R. Based on the reconstruction of the fracture surface using 3d scanning technology and seepage law research [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017. (in Chinese)
- [19] 韩杨. 隧道裂隙岩体渗透系数试验研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.  
Han Y. Experimental study on permeability coefficient fractured rock mass of tunnel [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2015. (in Chinese)
- [20] 王聪超. 交叉裂隙岩样渗透特性试验研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.  
Wang C Ch. Experimental study on permeability characteristics of cross-fractured rock mass [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2015. (in Chinese)
- [21] 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):1297-1306.  
Xia C Ch, Wang W, Cao Sh D. Flow characteristics of joints different contact conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1297-1306. (in Chinese)
- [22] Chen Z, Liu Y, Zhou P. A comparative study of fractal dimension calculation methods for rough surface profiles [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2018, 112:24-30.
- [23] 周创兵, 熊文林. 不连续面的分形维数及其在渗流分析中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 1996(6):1-6.  
Zhou Ch B, Xiong W L. Fractal dimension of discontinuous surface and its application in seepage analysis [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996(6):1-6. (in Chinese)
- [24] 王刚, 黄娜, 蒋宇静, 等. 考虑分形特征的节理面渗流计算模型 [J]. 岩石力学与工程报, 2014, 33(增2): 3397-3405.  
Wang G, Huang N, Jiang Y J, et al. Seepage calculation model for rough joint surface considering fractal characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3397-3405. (in Chinese)
- [25] 王昌硕, 王亮清, 葛云峰, 等. 基于统计参数的二维节理粗糙度系数非线性确定方法 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2):565-573.  
Wang Ch Sh, Wang L Q, Ge Y F, et al. A nonlinear method for determining two-dimensional joint roughness coefficient based on statistical parameters [J]. Rock & Soil Mechanics, 2017, 38(2): 565-573. (in Chinese)
- [26] 陈世江, 朱万成, 刘树新, 等. 岩体结构面粗糙度各向异性特征及尺寸效应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1):57-66.  
Chen Sh J, Zhu W Ch, Liu Sh X, et al. Anisotropy and size effects of surface roughness of rock joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2015, 34(1):57-66. (in Chinese)
- [27] 孙辅庭, 余成学, 蒋庆仁. 一种新的岩石节理面三维粗糙度分形描述方法 [J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2238-2242.  
Sun F T, She Ch X, Jiang Q R. A new fractal description method for three-dimensional roughness surface of rock joint [J]. Rock & Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2238-2242. (in Chinese)
- [28] 陶玉敬. 不同JRC单裂隙渗流特征的试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.  
Tao Y J. Experimental research on hydraulic behaviors in a single joint with various values of JRC [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [29] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定理 [J]. 岩土力学, 1996(4):1-7.  
Zhou Ch B, Xiong W L. A generalized cubic law for percolation in rock joints [J]. Rock & Soil Mechanics, 1996(4):1-7. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)