

孙欢, 刘晓丽, 王恩志, 等. 碳酸盐岩破裂过程中管道—裂隙水非线性流动特性试验研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 500-508.
DOI: 10. 11932/karst20200405

碳酸盐岩破裂过程中管道—裂隙水非线性流动特性试验研究

孙欢^{1,2}, 刘晓丽¹, 王恩志¹, 刘驰¹, 张建民¹

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 海南大学土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要: 本文聚焦碳酸盐岩微观渗流特性与破裂机制的研究, 开展了岩石破裂过程中管道—裂隙水流动可视化试验, 基于岩石块体尺度试验结果定量分析管道流体向裂隙流体过渡的流态演化过程, 研究多级荷载对管道—裂隙水流动特性的影响。试验结果表明: 碳酸盐岩流态稳定性与破裂状态相关, 管壁破坏初期管道流主要以层流为主, 局部管壁劈裂造成管道流体时域性流态交替, 管道流体向裂隙流体转变的前兆特征主要表现为过渡流态临界转换点。碳酸盐岩破裂过程中管道流体向裂隙流体过渡过程具有分数演化特征, 分数指数能够定量刻画管流和裂隙流的临界过渡过程。

关键词: 碳酸盐岩; 管道破裂; 裂隙水; 非线性流动; 分形演化

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2020)04-0500-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国西南岩溶山区大型滑坡灾害多发于层状碳酸盐岩, 地下岩溶水动力学作用下极易诱发地质灾害^[1-2]。例如, 暴雨季岩溶管道内水位暴涨、流速增加^[3], 管道内部形成超压水和气压波动, 极易造成管道流体明满流交替现象, 形成气爆、气蚀和水力冲击等作用, 诱发岩溶山体内部管道结构系统性破坏^[4-5], 这些研究结论均是从宏观岩溶管道系统所涉及的水力学、流体力学及结构力学等方面给出的解释。然而, 地下水动力学作用下岩溶管道—裂隙—孔隙多重介质的力学响应是复杂的非线性系统科学问题^[6-7], 其所涉及的内在演化机制涵盖了多孔介质渗

流力学、岩石力学及非线性数学等理论, 其中有关岩土体渗流问题的研究成果主要集中在单裂隙^[8]或裂隙网络的水力传导特性^[9-12]、孔隙率或孔隙结构分形对渗流的影响^[13]、非达西因子与等效渗透率^[14]、管道与基岩裂隙之间的水力交换^[15]等方面, 而较少考虑岩石管道流向裂隙流的过渡流态和不同破碎程度下裂隙水非线性流动及过渡流态演化问题。

本文以明确岩溶山区岩溶地下水动力作用及灾变过程为目的, 针对碳酸盐岩完整状态至破碎状态下管道流体向裂隙流体过渡的物理问题, 开展了岩石破裂过程中管道—裂隙水流动可视化试验, 获取了应力、声发射、管道流量及流体X射线影像, 具体分析碳酸盐岩破裂过程中管道流量和流体过渡流态变

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504801); 中国博士后科学基金项目(2018M641370); 海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-20104)

第一作者简介: 孙欢(1990—), 博士, 博士后, 岩石力学与地下工程。E-mail: sunhuan66@yeah.net。

通信作者: 刘晓丽(1978—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事水岩力学研究。E-mail: xiaoliliu@tsinghua.edu.cn。

收稿日期: 2020-05-20

化,同时结合分形理论量化描述管道—裂隙水非线性流动演化机制,以期为揭示地下水动力学作用下岩溶山体滑坡机理提供依据。

1 碳酸盐岩管道—裂隙流体可视化试验

1.1 现场采样与试件制备

现场采集典型岩溶山区碳酸盐岩试样,加工制备成如图 1 所示的立方体试件(尺寸:70 mm×70 mm×70 mm)。同时需要在碳酸盐岩试件中心取直径 4 mm 导流孔,孔深 70 mm。为了尽可能不破坏原有试件材料完整性,对试件采用水射流方法进行 1 次完整取孔,用于室内条件下开展碳酸盐岩试件破裂过程中管道—裂隙流体可视化试验。本次试验

共准备了 9 个试件,本文分析的试验数据主要来自 KR-01 至 KR-04 试件测试结果。试件材料成分较为单一,以方解石和白云石矿物为主,基本物理参数如表 1。

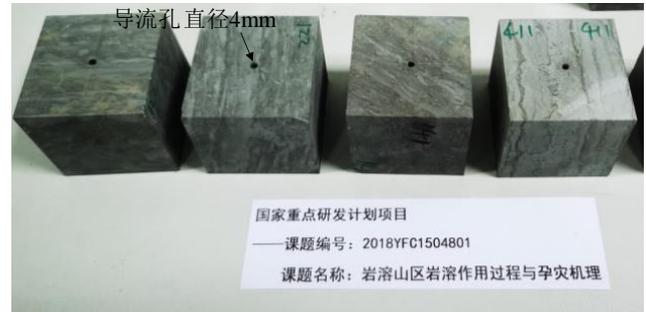


图 1 试验中碳酸盐岩试件制备

Fig. 1 Preparation of carbonate rock specimens for the experiment

表 1 试验中声发射测试门限基本参数

Table 1 Threshold parameters of acoustic emission tests

类别	通道门限/ mV	采集频率/MHz	撞击鉴别时 间/ μ s	峰值鉴别时 间/ μ s	滤波控制		
					滤波门限/mV	上限频率/kHz	下限频率/kHz
参数值	100	6	2 000	500	20	400	100

1.2 试验设计与系统构建

为了观测岩石破裂过程中裂隙水流动演化过程,设计和开展了碳酸盐岩管道—裂隙水流动可视化试验^[16]。基于 X 射线数字化平板影像平台(Digital Radiography),设计研发配套 DR 平台工作的岩石多级加载装置,同时采用医学心血管造影技术,动态拍摄和获取碳酸盐岩管道流体向裂隙流体过渡的 X 射线影像,同步采集岩石破裂过程中应力、声发射(Acoustic Emission)及管道流量等数据。整个试验设计与系统平台构建如图 2 所示,系统平台主要包括了两大功能和三套监测系统,具有 X 射线平板拍摄和应力加载功能,同步实现应力、声发射和管道流量的集成监测。

本次试验中使用 4 个声发射传感器,将不同通道

所接收到的信号进行相互验证,试验结果 3#和 4#声发射传感器信号活动性较强,因此确定提取 4#通道声发射数据进行分析,AE 信号主要参数解释如图 3 所示,试验数据结果,AE 信号能够描述碳酸盐岩多阶段破坏过程,因此确定使用振铃计数作为主要参数,试验中所使用的基本门限参数如表 2 所列。

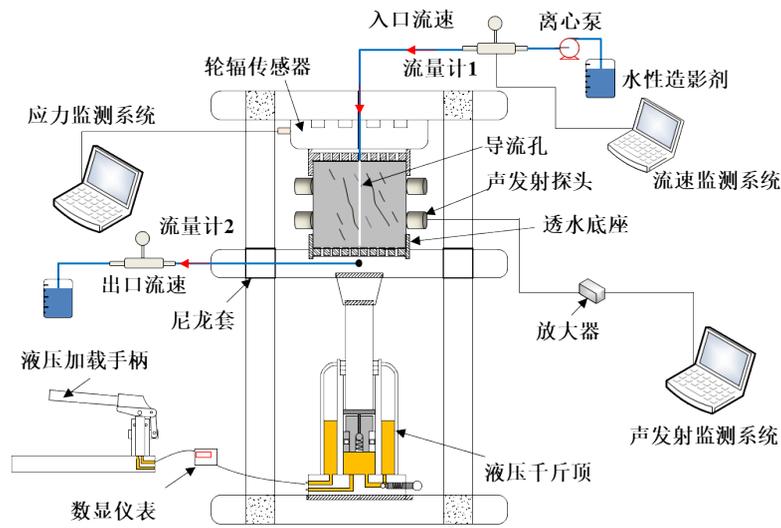
1.3 图像处理与数据分析

每组试验获取得到碳酸盐岩破裂过程中应力、声发射、管道流量及 X 射线影像,其中 X 射线影像是表征管道流向裂隙流的演化过程。为了准确描述管道破裂前兆信息特征与破裂后裂隙水流动分布,采用拉普拉斯—高斯图像算法对原始 X 射线图像(图 4a,图 4b)进行特征图像边缘识别,得到如图 4 所示裂

表 2 碳酸盐岩多阶段破裂过程中应力荷载比

Table 2 Stress loading ratio of carbonate rocks in different failure stages

荷载比	σ_2/σ_1	σ_3/σ_2	σ_4/σ_3	σ_5/σ_4	σ_6/σ_5	σ_7/σ_6	σ_8/σ_7	σ_9/σ_8	σ_{10}/σ_9	σ_{11}/σ_{10}
KR-01	1.112	1.261	1.345	1.290	1.252	1.187	1.132	1.336	1.200	1.296
KR-02	1.490	1.413	1.359	1.775	1.529	1.274	1.223	N/A	N/A	N/A
KR-03	1.734	2.127	1.627	1.388	1.222	1.071	1.090	1.085	1.086	N/A
KR-04	1.906	1.593	1.384	0.126	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A



a. 岩石裂隙流体可视化试验设计方案



b. 碳酸盐岩破裂过程中管道—裂隙水流动可视化试验平台

图2 碳酸盐岩管道破裂过程中管道—裂隙水流动可视化试验设计方案与平台构建

Fig. 2 Visible flow experiment design and platform construction on pipe-fissure water in carbonate rocks during failures

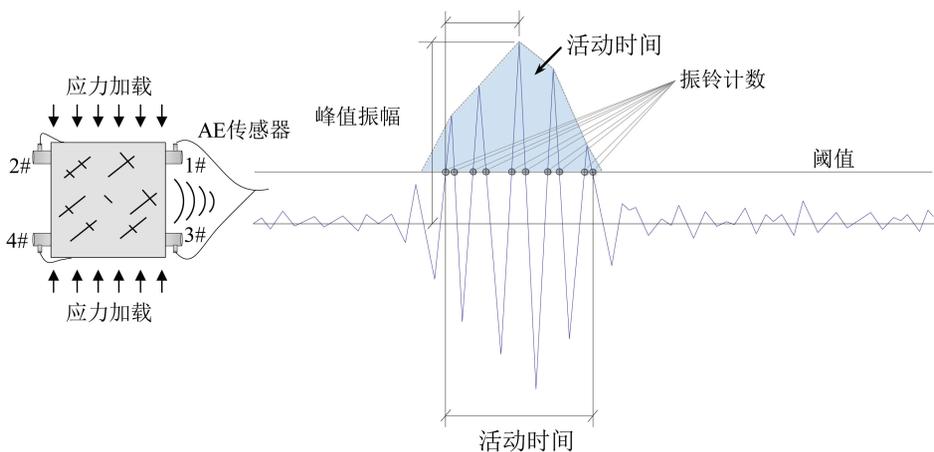


图3 岩石试件破裂过程中声发射波形特征

Fig. 3 Waveform characteristics of acoustic emission signals during to rock failures

隙水特征的 LOG 图像,并基于二值化图像处理计算分形维数,每张 LOG 图像对应唯一的分形维数(D_f),岩石裂隙水图像特征的计算维数求解原理如图 5 所示。

到与之对应的盒数 $N(r)$,当边长 r 无限趋于 0 时,即可得到特征图像的分形维数值 D_f ,计算公式如下:

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log_2 N(r)}{\log_2 1/r} \tag{1}$$

通过上式计算能够得到如图 5b 所示 $\log_2 N(r) - \log_2 1/r$ 的双对数图像,线性拟合得到直线斜率即为 D_f 。

2 碳酸盐岩管道破裂应力—声发射耦合关系

声发射检测技术为量化描述岩石破裂过程提供了有效手段^[17]。将试验获得碳酸盐岩破裂过程中应力荷载与声发射指标进行耦合分析,以多级应力荷载比值界定碳酸盐岩强度区间,分析碳酸盐岩管道破裂的声发射前兆信息特征。图 6 中 a 至 d 所示为 KR-01 至 KR-04 试件测试结果,可以得知碳酸盐岩管道破裂前兆活跃性 AE 信号主要出现在历史应力荷载峰值前,岩石内部裂纹多阶段扩展过程对应出现多次 AE 振铃计数峰值,对应荷载比值普遍大于 1.22。碳酸盐岩管道正常导流情况下 AE 信号活跃性较差,这与弹性波在流体介质中频散、衰减及折反

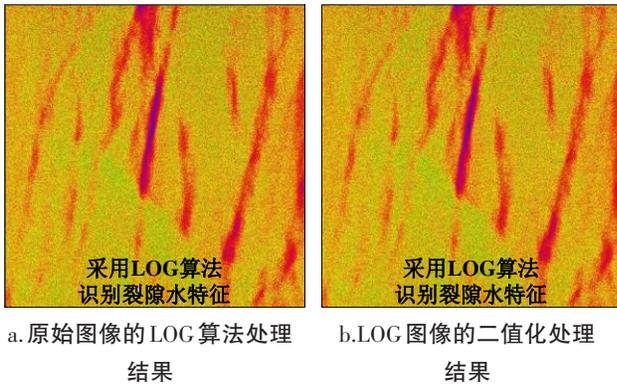
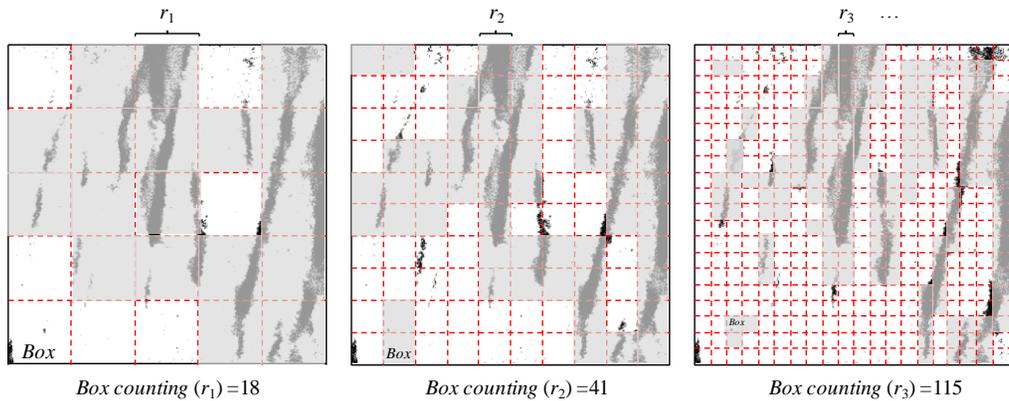


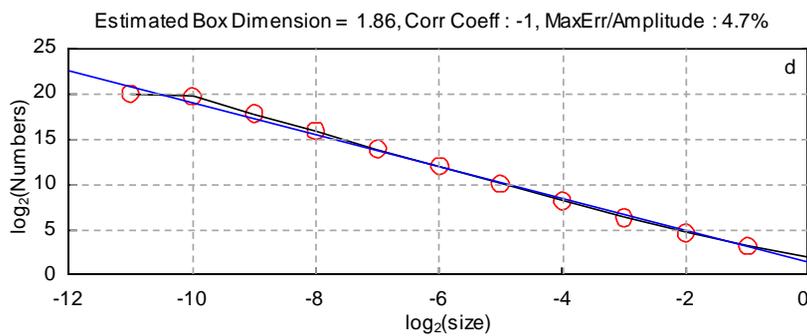
图 4 岩石裂隙水特征的 X 射线图像识别方法

Fig. 4 Identification of fissure-water in rocks by x-ray images

对岩石裂隙水 LOG 图像进行二值化处理后,采用计盒维数方法对二值化图像进行分析,当采用边长为 r 的方盒覆盖图像特征区域(图 5a),此时能够得



a. 采用方盒覆盖裂隙水图像特征区域



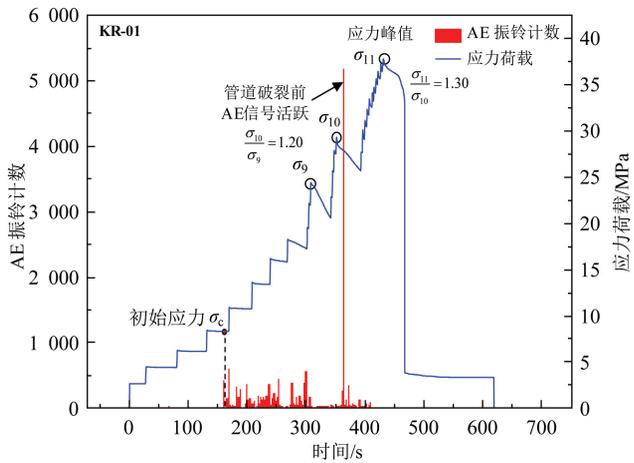
b. $\log_2 N(r) - \log_2(1/r)$ 的双对数拟合关系

图 5 岩石裂隙水图像的分形维数求解原理与方法

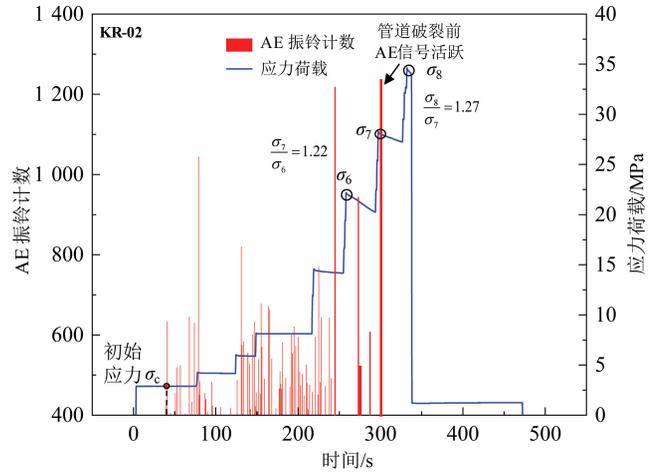
Fig. 5 Principle and calculation method on fractal dimensions of fissure water on rock images

射现象相关,而当管道破裂前管壁劈裂或裂隙贯通导流,AE信号活跃性出现较为显著提升,多级加载路径与AE信号表现出较强耦合关系,岩石管道破裂前

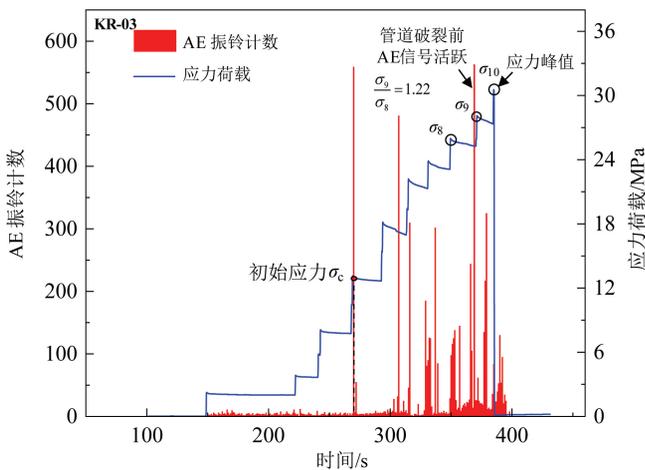
应力荷载比值显著降低,因此通过AE信号活跃性突变位置和荷载比值能够较好判断岩石管道完整性状态。



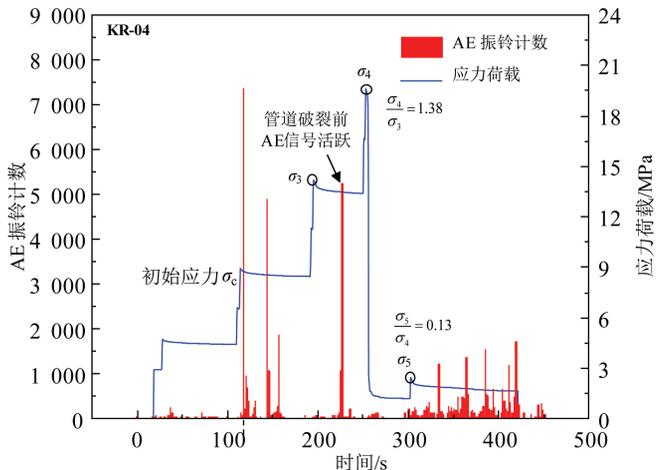
a.KR-01 试件测试结果



b.KR-02 试件测试结果



c.KR-03 试件测试结果



d.KR-04 试件测试结果

图6 碳酸盐岩试件破裂过程中应力荷载与AE事件振铃计数的演化关系

Fig. 6 Relations between AE counts and stresses loading during carbonate rocks failure

3 碳酸盐岩管道—裂隙水的过渡流态分析

地下岩层中流体介质运动流态与结构系统复杂性紧密关联^[18],岩溶山体内部管道—裂隙—孔隙多重介质系统始终处于动态演化,为了能够准确刻画岩溶管道破裂过程中地下水流量变化规律,开展碳酸盐岩块体尺度下管道流体向裂隙流体过渡的可视化试验,探索完整岩石至破碎岩石变化过程中流体流态演化机制,可为研究岩溶山区岩溶管道—裂隙—孔隙地下水动力作用及孕灾环境提供理论依据。

雷诺数是表征流体惯性力与黏性或摩擦力之间

的无量纲^[19],试验中利用流量监测仪表能够实时监测管道入口流速大小和出口流速大小,进而通过公式(2)可计算管道流体流态,计算得到碳酸盐岩管道—裂隙水过渡过程中雷诺数大小,依此界定岩石破裂过程中管道—裂隙水的过渡流态。

$$\begin{cases} Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \\ Q = v \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为管道流体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); v 为管道流体流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); d 为管道直径,试验中采用4 mm管径

(m); Q 为管道流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); η 为管道流体动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。试验在室内温度 $20 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下开展,纯水介质流体动力粘度取值为 $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,而碳酸盐岩管道水介质还有矿物杂质,因此考虑动力粘度取值为 $1.6 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 较为合理($5 \text{ }^\circ\text{C}$ 纯水介质的动力粘度为 $1.516 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。

图 7 所示为碳酸盐岩破裂过程中管道流体雷诺数变化情况,通常界定管道流体雷诺数 $\text{Re} < 2\,300$ 为层流, $\text{Re} = 2\,300 \sim 4\,000$ 为过渡流态, $\text{Re} > 4\,000$ 为湍流, $\text{Re} > 10\,000$ 为完全湍流状态,因此根据四组试验数据分析结果得知:无应力荷载作用下碳酸盐岩管道流

态稳定性与管壁粗糙程度有关,除 KR-01 试件初始流态为过渡流态以外,其它结果初始流态均为层流,表明管壁光滑、管道流态主要以层流为主;多级应力荷载加载初期,管道收缩、流体流速增加,同时局部管壁劈裂,脱落矿物杂质在水动力搬运作用下引起管道流态不稳定性,出现时域性流态交替区间,层流向过渡流态转变或过渡流态向紊流转变;管道流体向裂隙流体转变的前兆性特征主要表现为过渡流态临界转换点(图 7 曲线交叉点位置),因此,可考虑从岩溶管道上下游流量和流态演化方面,为岩溶山体滑坡灾害预警提供可靠依据。

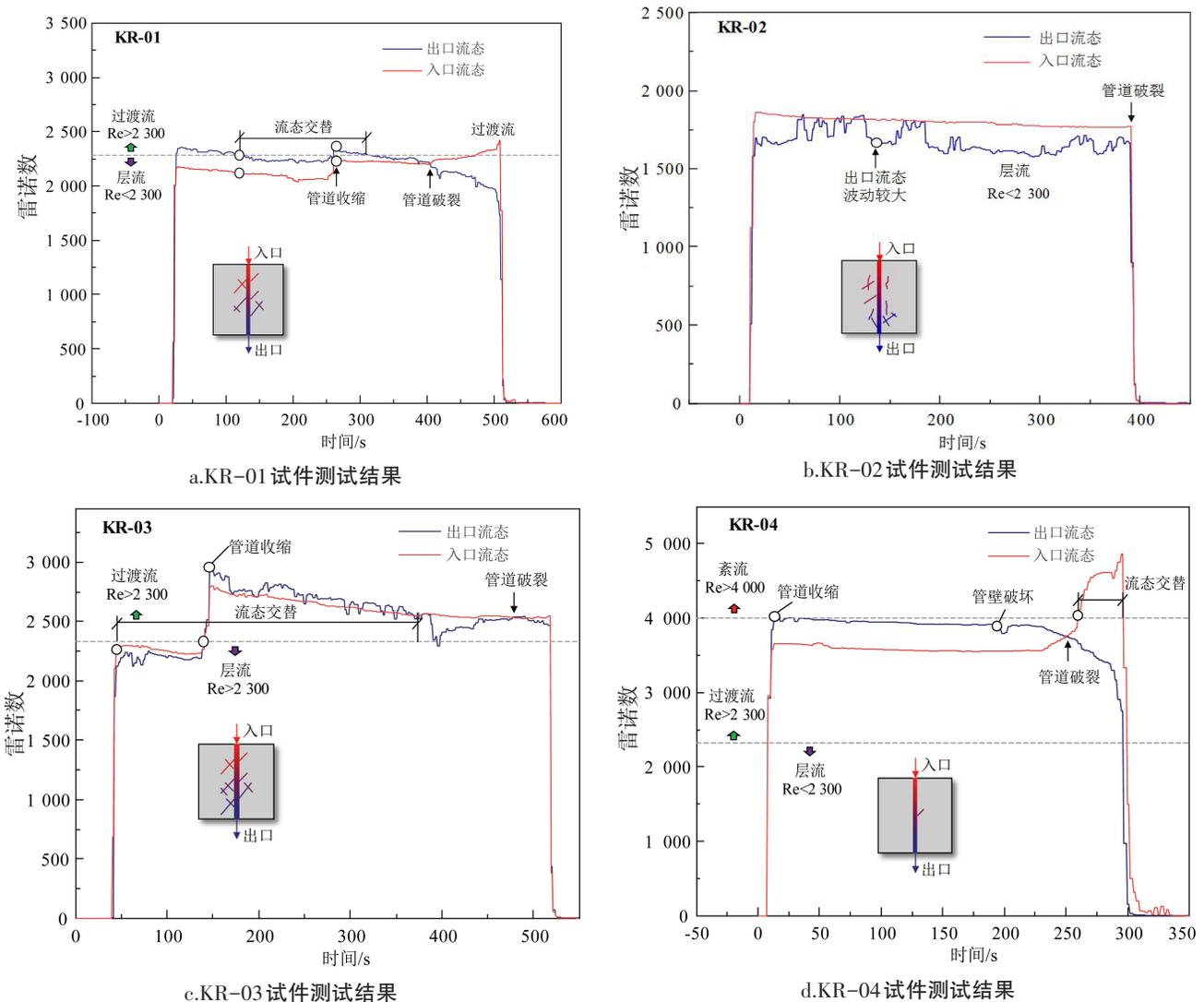


图 7 碳酸盐岩管道—裂隙水过渡流态分析

Fig. 7 Analysis of transition flow for pipe-fissure water in carbonate rocks

4 碳酸盐岩管道—裂隙水分形流动演化机制

几何分形维数通常用来量化几何尺度变换条

件下所具有的不变性^[20],因此可以考虑采用分形理论建立岩石块体尺度到岩溶山体尺度变换条件下管道—裂隙水流动演化过程的物理统一性。为此,

识别和提取碳酸盐岩管道—裂隙水流动的X射线影像特征,得到管道—裂隙水的拉普拉斯—高斯(LOG)图像,同时计算得到二值化图像的计盒维数(D_f),建立多级应力荷载峰值和特征图像计盒维数的分数关系,以分数指数界定碳酸盐岩管道—裂隙水流动的非线性演化过程。表3所列为多级应力荷载峰值与管道—裂隙水流动分形维数的计算结果,将管道—裂隙水流动分形维数与应力荷载比值作为因变量(D_f/σ_n),该变量所表示物理意义为单次应

力加载对管道—裂隙水图像分形维数的影响变化程度,计算得到变量 D_f/σ_n 和应力荷载 σ_n 的分数指数关系,公式如(3)所列。

$$\sigma_n = a \times \left(\frac{D_f}{\sigma_n} \right)^b \quad (3)$$

上式中 σ_n 为单次加载应力峰值(单位:MPa), D_f 为管道—裂隙水流动分形维数,a为常数,b为分数指数,均通过指数拟合能够求解得到。

表3 碳酸盐岩试件破裂过程中应力荷载峰值与管道—裂隙水流动分形维数

Table 4 Peak stress loadings and fractal dimensions of pipe-fissure water in carbonate rocks during specimen failures

试件编号	1st		2nd		3rd		4th		5th	
	D_{f1}	σ_1	D_{f2}	σ_2	D_{f3}	σ_3	D_{f4}	σ_4	D_{f5}	σ_5
	6th		7th		8th		9th		10th	
	D_{f6}	σ_6	D_{f7}	σ_7	D_{f8}	σ_8	D_{f9}	σ_9	D_{f10}	σ_{10}
KR-01	1.773	4.45	1.771	6.24	1.786	8.39	1.791	10.82	1.791	13.55
	1.812	16.08	1.810	18.20	1.855	24.31	1.651	29.18	1.632	37.82
KR-02	1.791	2.86	1.791	4.26	1.795	6.02	1.795	8.18	1.792	14.52
	1.813	22.2	1.622	28.28	1.604	34.60	N/A	N/A	N/A	N/A
KR-03	1.683	2.18	1.682	3.78	1.686	8.04	1.677	13.08	1.688	18.16
	1.689	22.20	1.690	23.78	1.698	25.92	1.643	28.12	1.646	30.55
KR-04	1.790	2.90	1.791	4.67	1.799	8.90	1.803	14.18	1.605	19.63
	1.614	2.47	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

如图8a所示为KR-03试件破坏过程中应力荷载峰值与管道裂隙水流动分形维数演化关系,随着应力荷载峰值逐级增大,碳酸盐岩具有显著的脆性破坏特征,峰值强度后管道—裂隙水流动分形维数骤然降低至1.643,表明管道流体在达到岩石极限强度时转变至裂隙流体。同时,通过引入管道—裂隙水流动分形维数与应力荷载比值(D_f/σ_n),指数拟合得到如图9b所示应力荷载与管道—裂隙水流动分形维数的分数指数 $|b|$,可以得知碳酸盐岩初始破裂阶段 $|b|<1$,表明此时管道水力传导行为占主导,而当碳酸盐岩发生管道局部破裂时 $|b|$ 逐渐逼近1,此时存在 $\sigma_n^2=a \cdot D_f$,表明此时管道流体与裂隙流体处于过渡阶段。碳酸盐岩发生脆性破坏、管道结构失去完整性,分数指数 $|b|$ 逐渐大于1,表明此时裂隙流体渗流行为占主导。综上所述,碳酸盐岩破裂过程中管道流体向裂隙流体的过渡过程,分数指数 $|b|$ 小于1、逐渐向 $|b|$ 大于1过渡,其本质是管道流体传导向裂隙

流体渗流的主导性发生转变。

5 结论

本文针对碳酸盐岩管道—裂隙水非线性流动特性,开展了岩块尺度下碳酸盐岩管道—裂隙水流动可视化试验,取得如下主要研究结论:

(1) 碳酸盐岩管道导流与局部破裂过程中声发射信号活跃性较弱,弹性波在流体介质中发生了频散、衰减及折反射,多级加载路径与AE信号表现出较强的耦合关系,岩石管道破裂前应力荷载比值降低;

(2) 碳酸盐岩管道流态稳定性与管壁粗糙程度相关,多级应力荷载加载初期,管道收缩、流体流速增加,局部管壁劈裂造成管道流体时域性流态交替,层流向过渡流态转变、过渡流态向紊流转变,管道流体向裂隙流体转变的前兆性特征主要表现为过渡流态临界转换点;

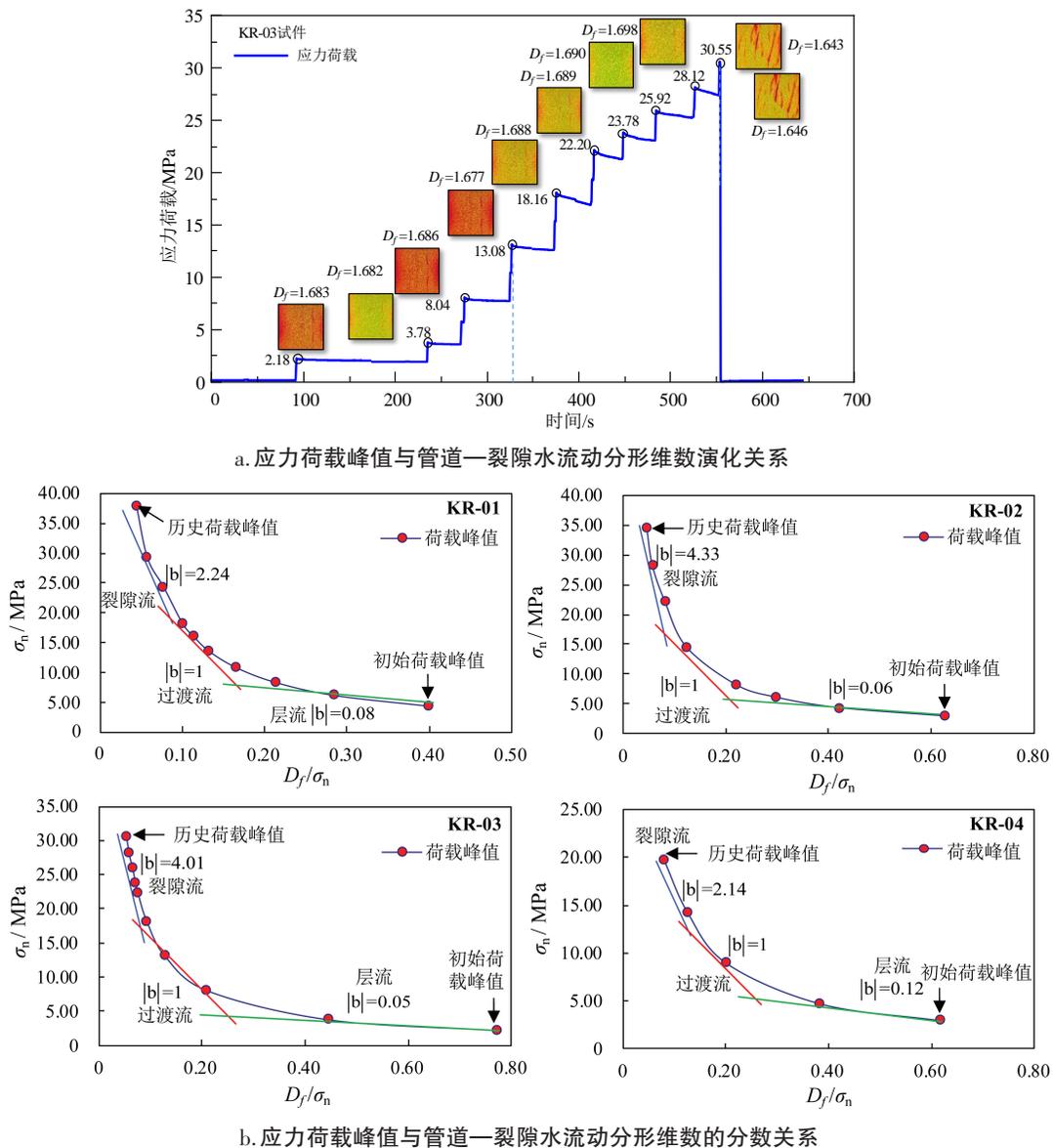


图 8 碳酸盐岩破裂过程中管道—裂隙水流动分数演化机制

Fig. 8 Fractional evolution mechanism of pipe-fissure water in carbonate rocks during failures

(3) 碳酸盐岩破裂过程中管道流体向裂隙流体过渡过程具有分数演化特征,分数指数 $|b|$ 小于1逐渐向 $|b|$ 大于1过渡,其本质是管道流体传导向裂隙流体渗流的主导性发生转变。

参考文献

[1] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩塌灾害研究的关键问题[J].水文地质工程地质,2020,47(4):5-13.
 [2] 黄波林,殷跃平,李滨,等.三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):51-61.
 [3] 易连兴.西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式:以关岭县大寨滑坡为例[J].水文地质工程地质,2020,47(4):43-50.
 [4] 周汉国,郭建春,李静,等.深层碳酸盐岩储层溶洞围岩应力

分布研究[J].地质力学学报,2018,24(1):35-41.

[5] Bai H, Ma D, Chen Z. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars [J]. Engineering Geology, 2013, 164: 101-106.
 [6] 陈崇希.岩溶管道—裂隙—孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J].地球科学,1995(4):361-366.
 [7] 陈余道,程亚平,王恒,等.岩溶地下河管道流和管道结构及参数的定量示踪:以桂林寨底地下河为例[J].水文地质工程地质,2013,40(5):11-15.
 [8] 鞠杨,张钦刚,杨永明,等.岩体粗糙单裂隙流体渗流机制的实验研究[J].中国科学:技术科学,2013,43(10):1144-1154.
 [9] Ren F, Ma G, Wang Y, et al. Unified pipe network method for simulation of water flow in fractured porous rock[J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 80-96.

- [10] Xu C, Fidelibus C, Dowd P, et al. An iterative procedure for the simulation of the steady-state fluid flow in rock fracture networks[J]. *Engineering Geology*, 2018, 242: 160-168.
- [11] 王晋丽,陈喜,张志才,等. 基于离散裂隙网络模型的裂隙水渗流计算[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(4): 363-371.
- [12] 高阳,邱振忠,于青春. 层流—紊流共存流场中岩溶裂隙网络演化过程的数值模拟方法[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(6): 831-838.
- [13] 杨赫,程卫民,刘震,等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1279-1286.
- [14] Ma D, Rezaia M, Yu H, et al. Variations of hydraulic properties of granular sandstones during water inrush: Effect of small particle migration[J]. *Engineering Geology*, 2017, 217: 61-70.
- [15] 赵良杰. 岩溶裂隙—管道双重含水介质水流交换机理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- [16] 孙欢. 采动煤岩应力—裂隙—渗流耦合机理研究及应用[D]. 西安:西安科技大学, 2017.
- [17] Sun H, Liu X L, Zhu J B. Correlational fractal characterisation of stress and acoustic emission during coal and rock failure under multilevel dynamic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 117: 1-10.
- [18] 张蓉蓉,束龙仓,闵星,等. 管道流对非均质岩溶含水系统水动力过程影响的模拟[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(S2): 386-392.
- [19] 赵延林,张盛国,万文,等. 基于流态转换理论巷道前伏溶洞突水的流固耦合—强度折减法分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1852-1862.
- [20] 王登科,魏强,魏建平,等. 煤的裂隙结构分形特征与分形渗流模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(1): 103-109.

Experimental study on nonlinear flow properties of pipe–fissure water in carbonate rocks during failures

SUN Huan^{1,2}, LIU Xiaoli¹, WANG Enzhi¹, LIU Chi¹, ZHANG Jianmin¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract This study focus on nonlinear flow properties of pipe–fissure water in carbonate rocks during failures. A visible flow experiment was carried out to observe pipe–fissure water during rock failures. Flow transition patterns of pipes and fissures water were quantitatively described according to the experiment data of flows in rocks under multi-level loading. The results show that the pipe fluid pattern is closely related to the roughness of the pipe–wall. The laminar flow at primarily cracks changes gradually into the transition flow at broken rocks. Pipe spalling can induce fluid pattern alternation with time duration. The precursory characteristics of transition fluid patterns of the pipe and fissure express as the critical point of flows. Pipe flow transforms into fissure flow with a feature of fractional evolution during carbonate rocks failure. The fractional index can be quantitatively used to define the critical transition process of the pipe into fissure flow.

Key words carbonate rocks, pipe rupture, fissure water, non-linear flow, fractal evolution

(编辑 张玲)