

DOI:10.11918/202106018

花岗岩-喷射混凝土梁损伤的声发射可视化表征

郭玉柱¹, 陈徐东¹, 胡良鹏¹, 白银²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室(南京水利科学研究院), 南京 210024)

摘要: 为研究输水隧洞围岩-喷射混凝土衬砌结构的协同抗弯损伤特性, 制备两种花岗岩-喷射混凝土组合梁进行不同加载速率的四点弯曲试验, 并采用数字图像相关(DIC)和声发射(AE)两种无损监测技术对花岗岩-喷射混凝土组合梁的四点弯曲试验进行监测。结果表明: 在裂缝从喷射混凝土中扩展至花岗岩表面时, 荷载-应变曲线在峰后下降段出现明显的拐点, 该拐点可以作为花岗岩起裂的标志; 通过声发射技术对喷射混凝土中的损伤类型识别发现, 剪切损伤所占的比例随着应变率的提高而增加。为实现对组合梁内部损伤的可视化分析, 利用声发射损伤定位数据计算了空间 b 值。结合损伤定位在空间中的密度分布规律, 给空间 b 值附加系数后构建新的 Rb 值。与空间 b 值相比, Rb 值的云图对不同损伤程度的区分度更高, 改善了损伤可视化分析的效果。最后, 将 Rb 值定位的损伤云图与DIC监测到的裂缝云图进行对比, 验证了这种利用声发射技术对损伤进行可视化分析方法的有效性。

关键词: 花岗岩; 喷射混凝土; 损伤; 可视化; 声发射; 数字图像相关

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)08-0090-10

Visualized characterization of damage in granite-shotcrete beams based on acoustic emission

GUO Yuzhu¹, CHEN Xudong¹, HU Liangpeng¹, BAI Yin²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering (Nanjing Hydraulic Research Institute), Nanjing 210024, China)

Abstract: To study the synergistic flexural damage resistance characteristics of the surrounding rock-shotcrete lining structure of water transportation tunnel, two granite-shotcrete composite beams were prepared for four-point bending tests with different loading rates. The four-point bending tests of the granite-shotcrete composite beams were monitored by two nondestructive monitoring techniques: digital image correlation (DIC) and acoustic emission (AE). Results show that when the crack extended from the shotcrete to the granite surface, the load-strain curve showed an obvious inflection point in the post-peak descending section, which can be a sign of granite crack initiation. Through identifying the damage types in shotcrete by AE technology, we found that the proportion of shear damage increased with the increase in strain rate. For the visual analysis of the internal damage of the composite beam, the spatial b -value was calculated using the acoustic emission damage localization data. Then, a new Rb -value was constructed by attaching coefficients to the spatial b -value in combination with the density distribution law of damage localization in space. Compared with the spatial b -value, the cloud map of Rb -value had a higher differentiation of different damage degrees, which improved the visualization of damage. Finally, the damage clouds localized by Rb -values were compared with the crack clouds monitored by DIC, which verified the effectiveness of the proposed method for damage visualization using AE technology.

Keywords: granite; shotcrete; damage; visualization; acoustic emission; digital image correlation

为了满足地区用水和交通需求, 中国中西部地区修建了许多输水隧洞和公铁隧道, 其中不乏大埋深和穿越强震地带的线路^[1-4]。这些隧洞和隧道不仅承受着高地应力的作用, 还可能受到地震、山体滑

坡等地质灾害中外力的扰动。在复杂的应力状态下, 深层围岩在巨大的应力场变化中会产生塑性变形^[5-8]。此时, 围岩-喷射混凝土支护结构不仅会受到剪切和压缩破坏, 当支护体系的截面形状发生变形时, 局部区域承受较大的弯拉荷载, 会出现拉张破坏现象^[9]。因此, 围岩-喷射混凝土支护结构在复杂地质条件下存在弯拉损伤隐患。

近年来, 先进的无损监测技术逐渐被应用到混凝土和岩石等材料的力学试验中^[10-12]。赖于树等^[13]对混凝土的单轴受压研究表明, 混凝土在破损

收稿日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51739008, 51979090); 中央高校基本科研业务费专项资金(B200202076)

作者简介: 郭玉柱(1991—), 男, 博士研究生;
陈徐东(1985—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈徐东, cxdong1985@163.com

的不同阶段具有显著不同的声发射特征。根据不同断裂类型的声发射特征, 甘一雄等^[14]利用声发射参数特征对断裂类型进行了识别与评价。Yang 等^[15]采用数字图像相关技术研究了花岗岩的轴拉损伤, 对损伤过程中应变场变化特征的监测达到了理想效果。Lu 等^[16]开展了砂岩剪切开裂模式的试验研究, 发现不同水泥灌浆厚度的声发射特性有明显差异, 声发射的监测对识别其破坏模式起到了关键作用。

综上, 复杂地质条件下, 弯拉荷载引起的局部张拉破坏给输水隧洞支护结构带来的安全隐患不容忽视。而现有文献中针对围岩 - 喷射混凝土产生弯曲变形时的协同抗弯损伤特性的研究较少。本文结合声发射和 DIC 两种无损监测技术, 对花岗岩 - 喷射混凝土组合梁进行了四点弯曲试验。采用声发射监测结果建立一种损伤可视化表征方法, 并结合 DIC 监测到的表面裂缝扩展特征对建立的损伤可视化表征方法进行验证。这种损伤的可视化表征对认识围岩 - 喷射混凝土支护结构在弯曲荷载作用下的损伤演化及损伤监测具有重要意义。

1 试 验

1.1 试件制备

由于喷射混凝土的离散性较大且室内成型难度高, 为了尽可能反映围岩 - 喷射混凝土的共同工作性能, 采用了真实的 C50 喷射混凝土所用的原材料和配合比, 以室内浇筑的方式成型所需试块。胶凝材料采用海螺牌 P · O42.5 普通硅酸盐水泥, 细骨

料采用河砂, 细度模数为 2.3, 粗骨料采用 5 ~ 10 mm 的石灰岩碎石, 水为自来水, 减水剂为高效聚羧酸减水剂, 纤维为有机仿钢纤维, 形态尺寸如图 1 所示。有机仿钢纤维的基本性能见表 1, 两种喷射混凝土的配合比见表 2。

浇筑成型前, 首先加工了尺寸为 450 mm × 350 mm × 50 mm 的花岗岩石板, 为了增加与混凝土的接触面积, 在花岗岩石板上沿长度方向制作了 3 组 2 mm × 2 mm 的槽线, 每组槽线共 4 条, 间距为 20 mm, 以保证最终每根组合梁的界面上等间距分布有 4 条槽线。花岗岩 - 喷射混凝土组合板浇筑成型 24 h 后进行拆模, 拆模后移入标准养护室养护 28 d。最后, 将养护到龄期的组合板裁切为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的组合梁, 组合梁分上下两层, 喷射混凝土和花岗岩的厚度均为 50 mm。组合梁制作流程如图 2 所示, 测试的花岗岩及喷射混凝土的基本力学性能试验值见表 3。



图 1 有机仿钢纤维

Fig. 1 Organic imitation steel fiber

表 1 有机仿钢纤维基本性能

Tab. 1 Basic properties of organic imitation steel fiber

编号	材质	断面形状	公称长度/mm	当量直径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	断裂强度/MPa	初始模量/GPa
FG	丙纶	扁圆形	30	0.81	0.91	474	6.0

表 2 混凝土试件配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete specimens

编号	配合比/(kg·m ⁻³)						减水剂/%
	水泥	粗骨料	河砂	粗纤维	水		
NC	475	789	964	0	190	1.0	
FC	475	775	948	10	190	1.0	

表 3 岩石及喷射混凝土的基本性能

Tab. 3 Basic properties of rock and shotcrete

岩石及喷射混凝土	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
喷射混凝土(S)	52.5(28 d)	36.4
纤维喷射混凝土(FS)	52.3(28 d)	35.8
花岗岩(G)	130.3	48.9

1.2 试验装置

四点弯加载采用 500 kN 闭合回路 MTS322 电液伺服试验机。用于控制加载速率的引伸计夹持在组合梁底部的金属杆上, 金属杆锚固在两个金属端

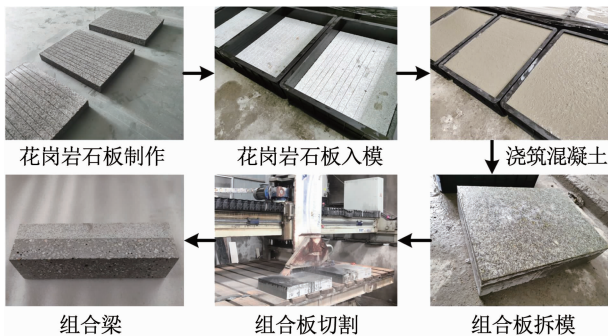


图 2 组合梁制作流程

Fig. 2 Fabrication process of composite beam

子中,金属端子的间距为 100 mm。为了分析不同应变率对组合梁的影响,共进行了 0.001、0.01 和 0.05 s⁻¹ 3 种应变率的加载,每种应变率的试验加载了 3 个试件。组合梁前后两侧共布置 6 个用于采集 AE 信号的探头,探头型号为 PK6I。数据采集系统是美国物理声学公司生产的 Sensor Highway III 全天候结构健康监测系统,信号采集阈值为 40 dB。DIC 数据采集系统是德国 GOM 公司生产的 ARAMIS Professional 系统,根据 DIC 软件系统的测量需求,在跨中纯弯段 100 mm × 100 mm 区域内喷涂有黑色随机散斑。试验装置及试件示意图如图 3 所示。

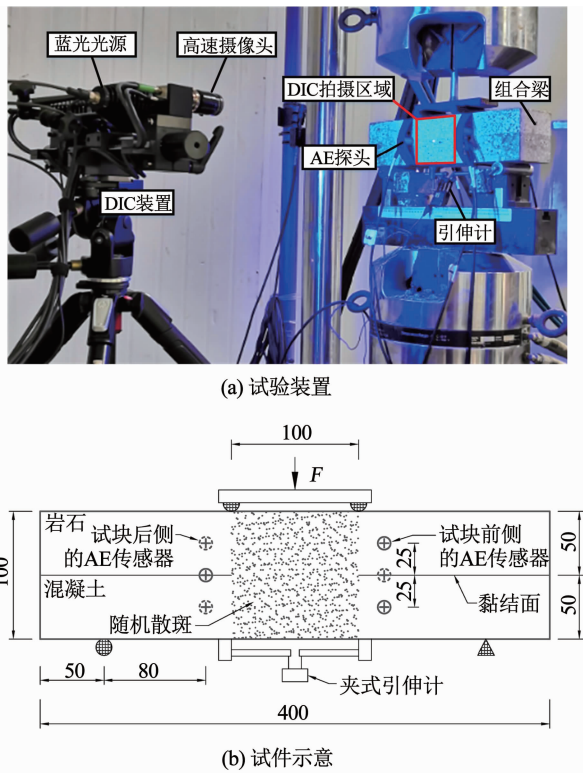


图 3 试验装置及试件示意 (mm)

Fig. 3 Test setup and schematic diagram of specimen (mm)

2 无损监测技术

2.1 AE 技术

声发射技术是一种声学无损监测技术。当材料内部产生损伤时,会释放出弹性波,安装在被测物体表面的声发射探头能够捕捉到弹性波信号。AEwin 软件系统通过分析采集到的电信号的波形、幅值、频率、振铃计数、事件定位等参数的特征,了解脆性材料内部的开裂行为和受损状态。

地震学中 b 值用于表征地震震级 - 频度关系,震级与累积频度对数呈线性关系,其斜率称为 b 值^[17]。研究发现,声发射的幅值 - 累积频度也存在

该 b 值关系。声发射的 b 值与材料内部微裂纹的扩展密切相关,是材料对所承受荷载的响应。大量研究表明,随着 b 值的降低,材料内部的微裂纹向宏观裂纹发展^[18]。在地震断裂带的相关研究中,空间 b 值用来判断空间断层的异常活动^[19]。为了探究裂缝的扩展与声发射 b 值之间的联系,在组合梁跨中平面内建立 100 mm × 120 mm 的网格模型,根据 AE 事件的空间坐标信息计算组合梁的声发射空间 b 值。计算空间 b 值的网格模型示意如图 4 所示,100 mm × 120 mm 网格所在区域为图 3 (b) 中声发射探头所包围区域。计算流程如图 5 所示,该计算流程以文献[20]的方法为主体,增加了时间参数和空间坐标参数筛选功能,并根据数据特征对计算流程进行了简化。具体计算流程如下:

1) 基于 AE 事件定位坐标的 (x, y) 范围选择跨中梁区域表面,生成计算空间 b 值的基准点,基准点间距为 L 。

2) 以基准点为圆心, r 为半径, 高为 H 画圆柱体。逐渐增大 r , 在空间中圈选固定数量的 AE 事件计算空间 b 值。 H 根据 AE 定位数据的总量选择, 在保证有足够 AE 数据用于计算的前提下, H 减小有利于提高程序运行速率。 N 为用于计算空间 b 值的 AE 事件数, R 为预设圆柱体底面半径 r 的最大值。

3) 采用 Aki 方法计算空间 b 值, 其公式如下^[21]

$$b = \frac{20 \lg e}{a - a_c} \quad (1)$$

式中: a 为平均幅值; a_c 为阈值幅值, 采集数据时设置的阈值幅值为 40 dB; e 为欧拉数。

4) 若个别位置出现 b 值为 0 的异常数据点, 用其相邻基准点 b 值的平均值替换该点的 b 值。最后, 绘制空间 b 值的热图。

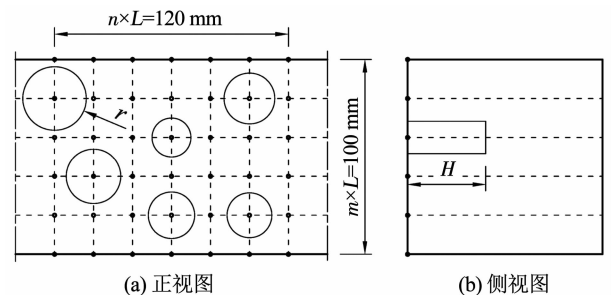


图 4 网格模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of mesh model

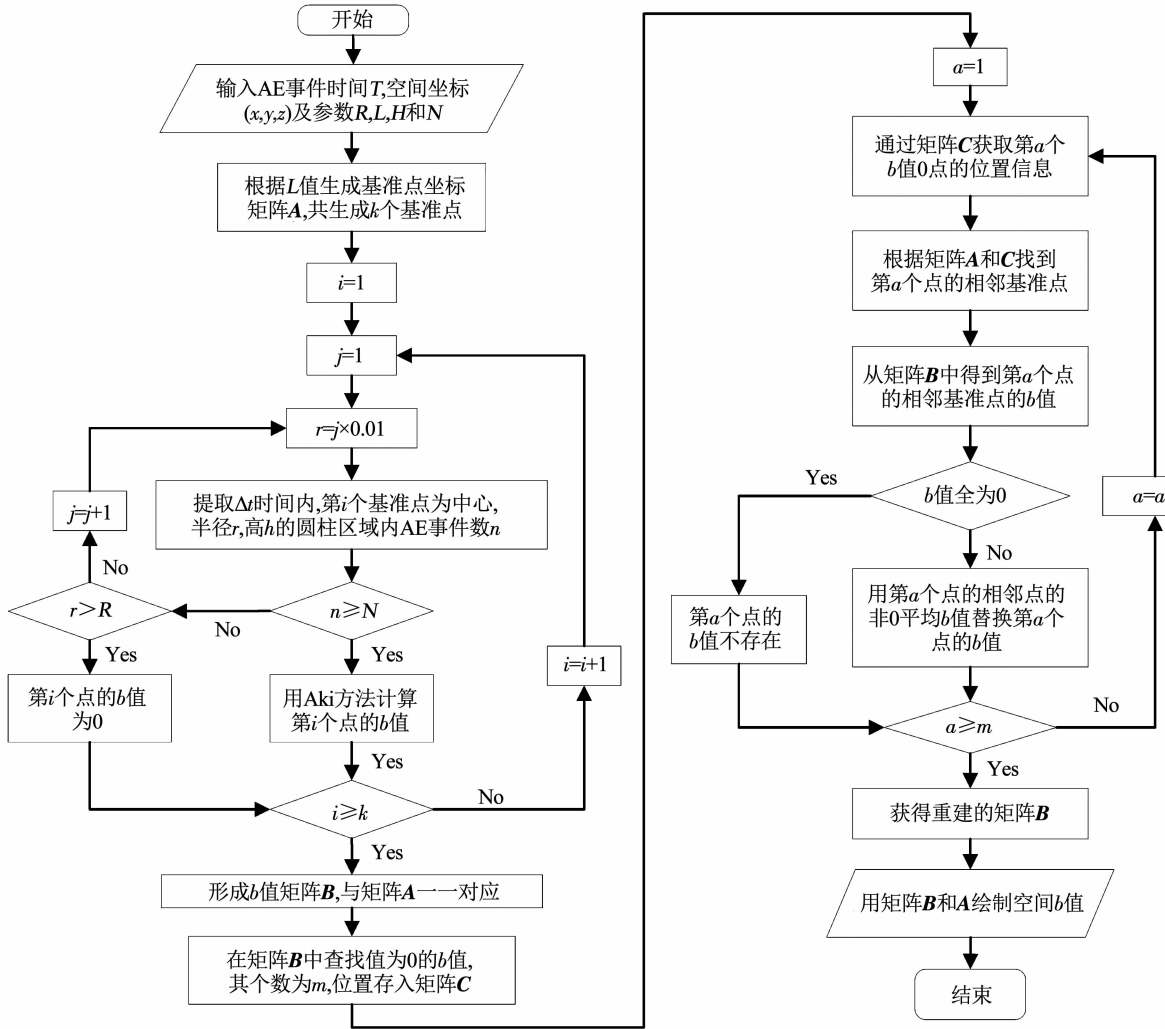


图 5 空间 b 值计算流程
Fig. 5 Flow chart of calculating spatial b-value

2.2 3D DIC 技术

DIC 技术是一种光学无损监测技术,其原理是基于高速摄像机拍摄的灰度数字图像对物体表面的变形进行定量表征,从而对物体表面的应变场和位移场进行实时监测^[22]。变形场的计算需要以物体表面具有非重复性、各向同性和高对比度的随机图案作为参照物。对于表面颜色对比度不高的材料,一般采用人工喷涂或粘贴水转印斑等方式在材料表面制作随机散斑。

荷载开始加载时,散斑会随着试件表面的变形而发生相对位置的变化,3D DIC 系统能够持续采集并记录试件表面散斑区域的灰度数字图像。在后处理过程中,所有图像被分别划为大量子区间,由代表各像素点灰度值的离散方程进行描述。由于图像产生了变形,不同图像上的同一子区间是利用相关系数进行判断的,不同图像上相关系数最大的子区间位置被判定为同一子区间,二者的位置坐标之差就

是变形产生的位移。相关系数由下式给出^[23]

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \quad (2)$$

式中: $C(u, v)$ 为相关系数,是关于水平位移 u 和竖直位移 v 的函数;网格坐标 (x_i, y_j) 和 (x'_i, y'_j) 通过两个灰度数字图像之间的平移关联; $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别为参考子区间和目标子区间的灰度梯度函数; \bar{f} 和 \bar{g} 分别为参考子区间和目标子区间的平均灰度值。

3 结果与讨论

3.1 荷载 - 应变曲线分析

根据表 3 中花岗岩和喷射混凝土的英文缩写对两种组合梁进行编号,在不同应变率下,两种组合梁

的典型荷载 - 应变曲线如图 6 所示。根据荷载曲线特征及相关阶段的 DIC 裂缝监测结果,图 6 中 G-S 和 G-FS 梁的荷载 - 应变曲线可分为 5 个阶段:A 为峰前阶段,组合梁中的喷射混凝土层位于下侧,该阶段其应变逐渐增大;B 为喷射混凝土裂缝扩展阶段,此阶段喷射混凝土的应变值大于其极限应变,局部发生应力集中,产生裂缝并逐渐向上扩展;C 为界面损伤阶段,裂缝在该阶段已经扩展至花岗岩和喷射混凝土的界面附近,由于弹性模量较大的花岗岩仍未起裂,荷载 - 应变曲线出现明显的拐点,荷载 - 应变曲线出现一个短暂的“平台”阶段,该现象可以作

为花岗岩即将起裂的标志;D 为花岗岩裂缝扩展阶段,该阶段花岗岩中出现裂缝,荷载 - 应变曲线再次进入快速下降阶段;E 为残余荷载阶段,该阶段作用在试块上的荷载较小,但应变快速变化。当应变值为 0.004 时,G-S 梁的残余应力约为 2.0 MPa,G-FS 梁的残余应力大于 4 MPa,证明纤维起到了很明显的增韧作用。此外,可以看出,组合梁的峰值荷载随应变率的增大而增大,说明组合梁的峰值应力存在应变率效应。当应变率达到 0.05 时,组合梁在 D 阶段发生脆断,此时组合梁没有残余荷载阶段。

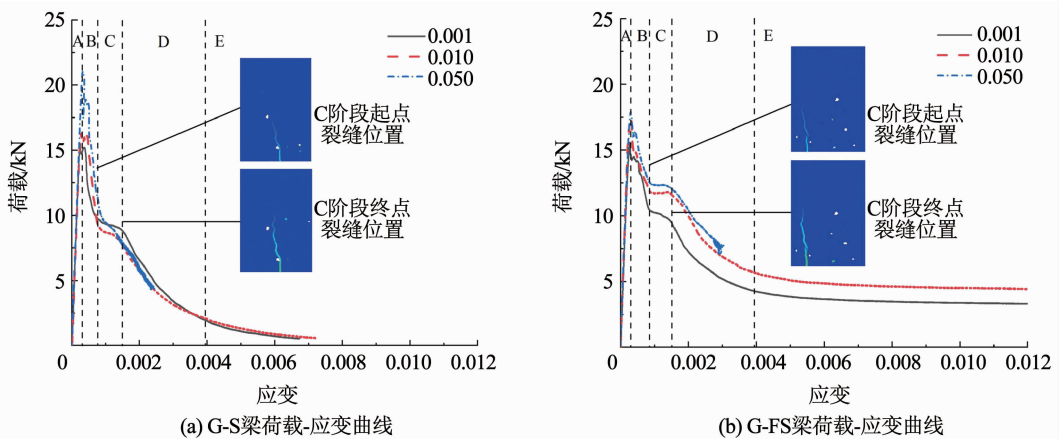


图 6 不同应变率下组合梁典型的荷载 - 应变曲线
Fig. 6 Typical load-strain curves of composite beams at different strain rates

3.2 声发射撞击数与裂缝宽度关系

撞击数分布表示单位时间内声发射撞击的次数,裂缝扩展迅速的阶段撞击数分布较多,其变化趋势能够直接反映试件内部损伤发展的剧烈程度。图 7 显示的是加载过程中,各组合梁的撞击数分布与试件裂缝宽度的关系。此处,喷射混凝土和花岗岩的裂缝宽度是指喷射混凝土和花岗岩起裂点的最大裂缝宽度,该宽度由 DIC 监测获得。可以看出,A 阶段没有监测到很多撞击数及明显的裂缝增长。在 A 阶段的末尾和 B 阶段开始后,喷射混凝土的裂缝宽度迅速增大,撞击数分布有一定的增幅。加载至 C 阶段时,花岗岩的裂缝宽度开始迅速增长,撞击数分布也有了明显的增长,且应变率越高增长越明显。组合梁损伤最剧烈的阶段几乎都是在 D 阶段,该结论可以直接从撞击数分布图中观察到。因此,当撞击数分布出现明显增长时,意味着损伤已经从喷射混凝土层发展到了花岗岩中,该规律有助于判断损伤部位。

3.3 损伤类型识别

根据测试,本试验中的花岗岩与混凝土弹模值相差约 13 GPa,在弯曲荷载作用下,两种材料变形不协调,可能同时产生张拉和剪切损伤。为了探究不同应变率下组合梁中的损伤类型,选取 0.001 和 0.01 两个应变率的组合梁,以 B、C 和 D 3 个阶段的损伤为例进行分析。根据国际材料与结构研究实验联合会的研究报告^[24],I 型裂纹应产生上升时间 (RT) 短、平均频率 (AF) 高的波形,而 II 型裂纹应产生 RT 较长、AF 较低的波形。通过 RT 与幅值计算 RA 值,绘制不同应变率下 G-S 和 G-FS 梁在 3 个不同阶段的典型 RA-AF 图,如图 8 所示。参考前期研究^[25] 选择剪切与拉伸裂纹的分界比例为 RA: AF = 10: 1。可以看出,B 和 C 阶段更多的是拉伸损伤,虽然随着应变率的提高,剪切损伤略有增加。对于 D 阶段,两种应变率下的 G-S 和 G-FS 梁的剪切损伤都有明显增加,这表明混凝土宏观裂纹发展的过程中,由于骨料的存在产生明显的剪切损伤。

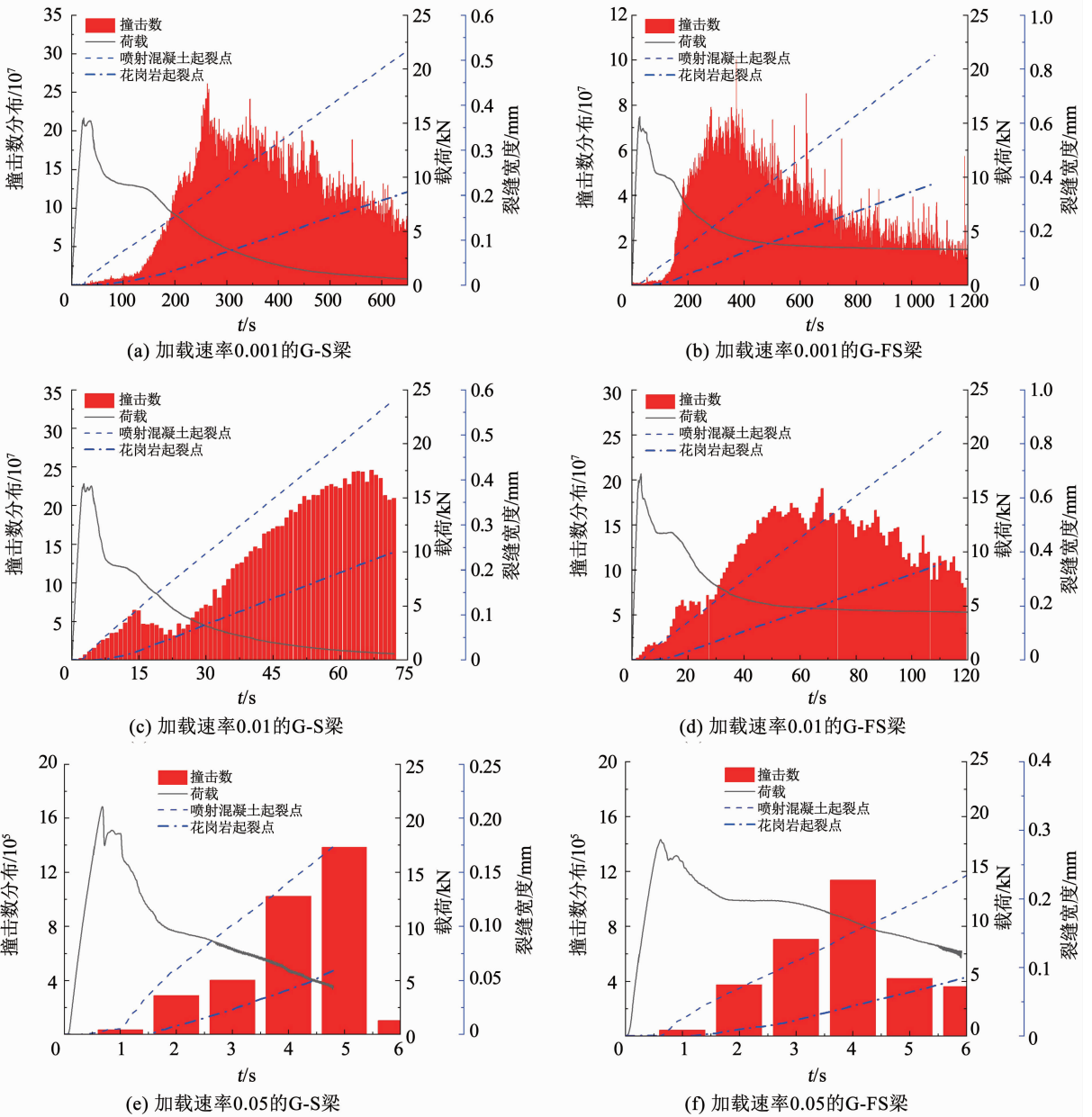


图 7 组合梁的撞击数分布与裂缝宽度特征

Fig. 7 Distribution of hit counts and characteristics of crack widths of composite beams

3.4 损伤的可视化分析

加载速率为 0.001 和 0.01 s⁻¹ 的试块采集到了足够的损伤定位数据, 选取这两种工况作为示例。首先, 需要对计算参数进行设定, 当 N 取 50 时, 已经满足 b 值计算结果的稳定性要求^[20], 考虑计算效率和图像分辨率, 测试了其他运行参数的适宜值, R 、 L 和 H 分别设置为 15、1 和 100 mm。 r 的循环递增梯度对结果有一定影响, 试验时声发射信号采集系统设置的空间坐标数据测量精度为 0.01 mm, 因此, r 的递增梯度设置为 0.01 mm。根据设定的计算参数, 采用声发射的损伤定位数据计算出各工况下组合梁 B、C、D 和 E 阶段的空间 b 值, 绘制热图如图 9 和 10 所示。 b 值的较小区域(深色区域)代表微观裂纹向宏观裂纹发展, 属于损伤严重区域。可

以看出, 随着加载阶段的推移, b 值较小的区域从梁底部逐渐往上移动, 这与组合梁梁中裂缝的发展趋势一致, 证明了这种损伤可视化在四点弯曲梁中是可行的。

损伤严重的位置会监测到更多的损伤定位数据。因此, AE 损伤定位点的密度分布与损伤程度密切相关。在进行空间 b 值计算时, 损伤定位数据密度大的位置半径 R 较小。因此, R 与损伤严重程度呈负相关。综合空间 b 值和半径 R 与损伤呈负相关的趋势, 给每个空间 b 值乘以计算该 b 值时的参数 R 的平方后构建了空间 Rb 值来表征损伤, 即

$$[Rb] = [b] \cdot [R^2] \quad (3)$$

图 11 和 12 为两种工况下不同加载阶段组合梁的裂缝云图(由 DIC 监测得到)与 Rb 值的对比。首

先,对比图 9 和 11、图 10 和 12 可以发现,与 b 值相比, Rb 值更加鲜明地表现出了损伤区域随加载阶段的移动趋势,且两种工况的 C 阶段损伤最严重的区域都位于界面附近,与 3.2 节中关于裂缝的分析结果一致,因此, Rb 值能够完整地表征组合梁的损伤演化过程。图中每个阶段的 Rb 值左侧对应的是该阶段末尾时刻的裂缝云图。不难发现,DIC 监测到的裂缝尖端一定长度范围内是试块损伤最严重的区域(对应于 Rb 值的深色区域)。这是由于在裂缝尖

端附近区域内,材料变形大于其极限应变后,产生应力释放,但由于骨料颗粒的桥连作用,仍然承受部分应力。随着裂缝的发展,裂缝附近区域内的损伤大量累积,导致该区域 Rb 值较小,从而形成上述深色区域。通过 DIC 监测到的裂缝云图对 Rb 值的验证可以发现,采用声发射数据构建的 Rb 值能够实现组合梁内部损伤的可视化监测。这种可视化监测方法不仅可以直观地显示组合梁的损伤部位,而且可以对损伤程度进行表征。

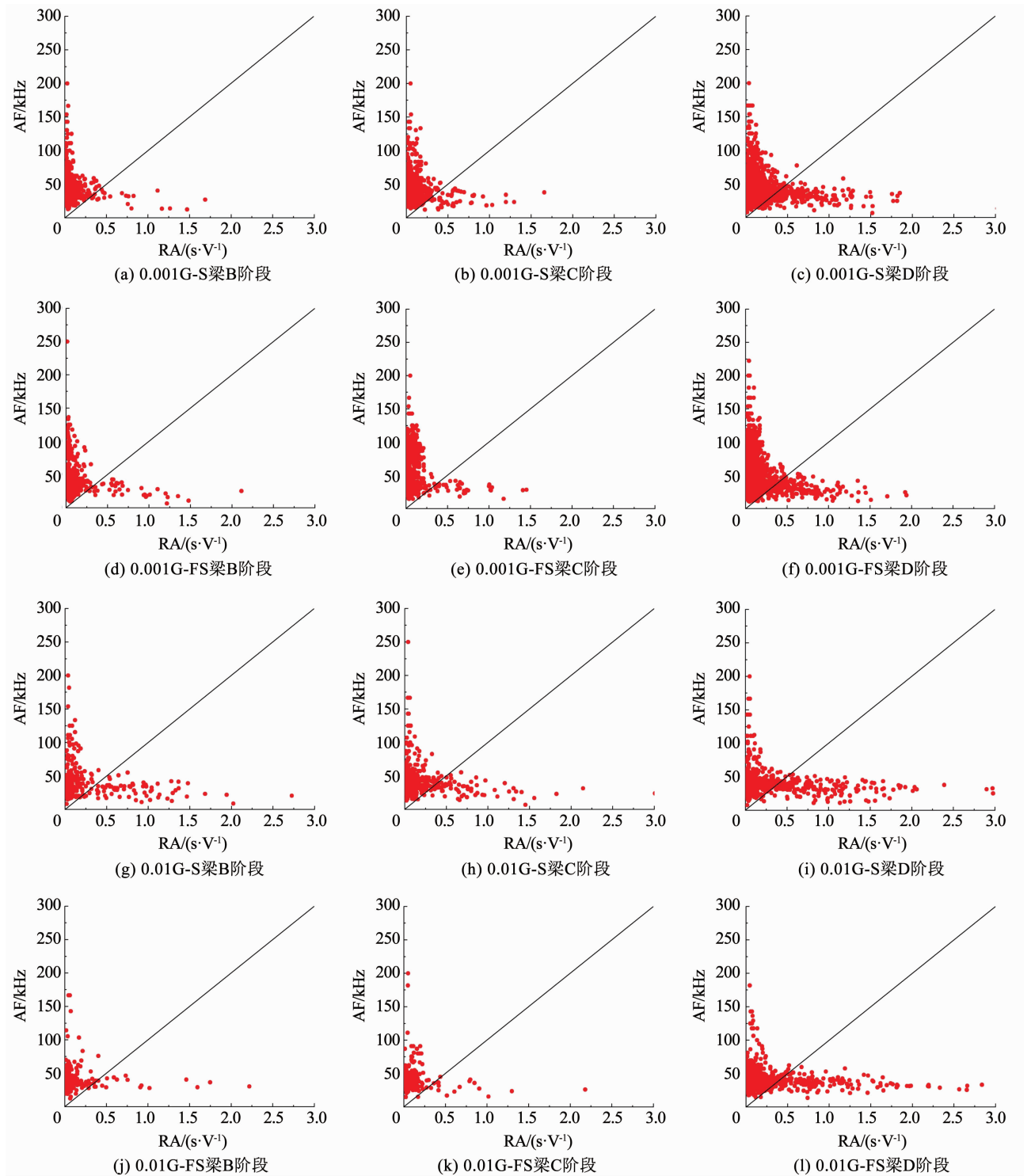


图 8 不同应变率下组合梁 5 个阶段的典型 RA-AF 图

Fig. 8 Typical RA-AF diagram of composite beams at five stages under different strain rates

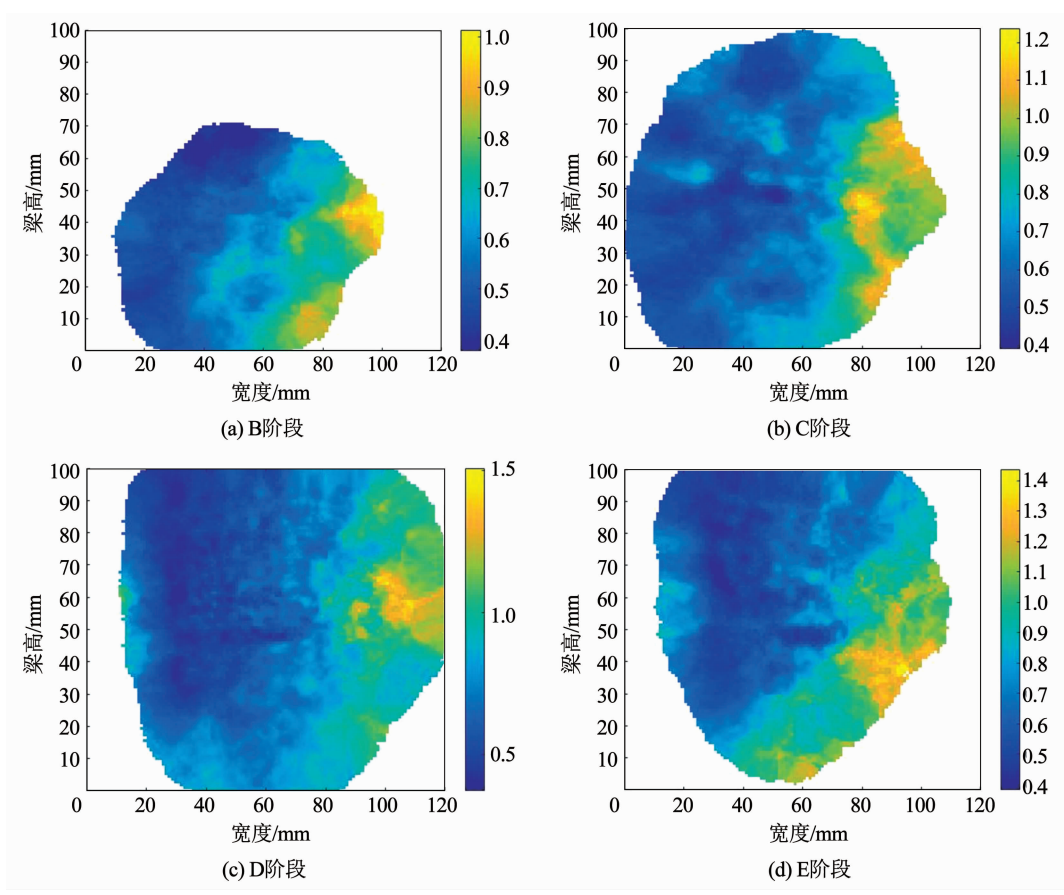


图 9 0.001G-S 梁的声发射空间 b 值投影

Fig. 9 AE spatial b -value projection of 0.001G-S beam

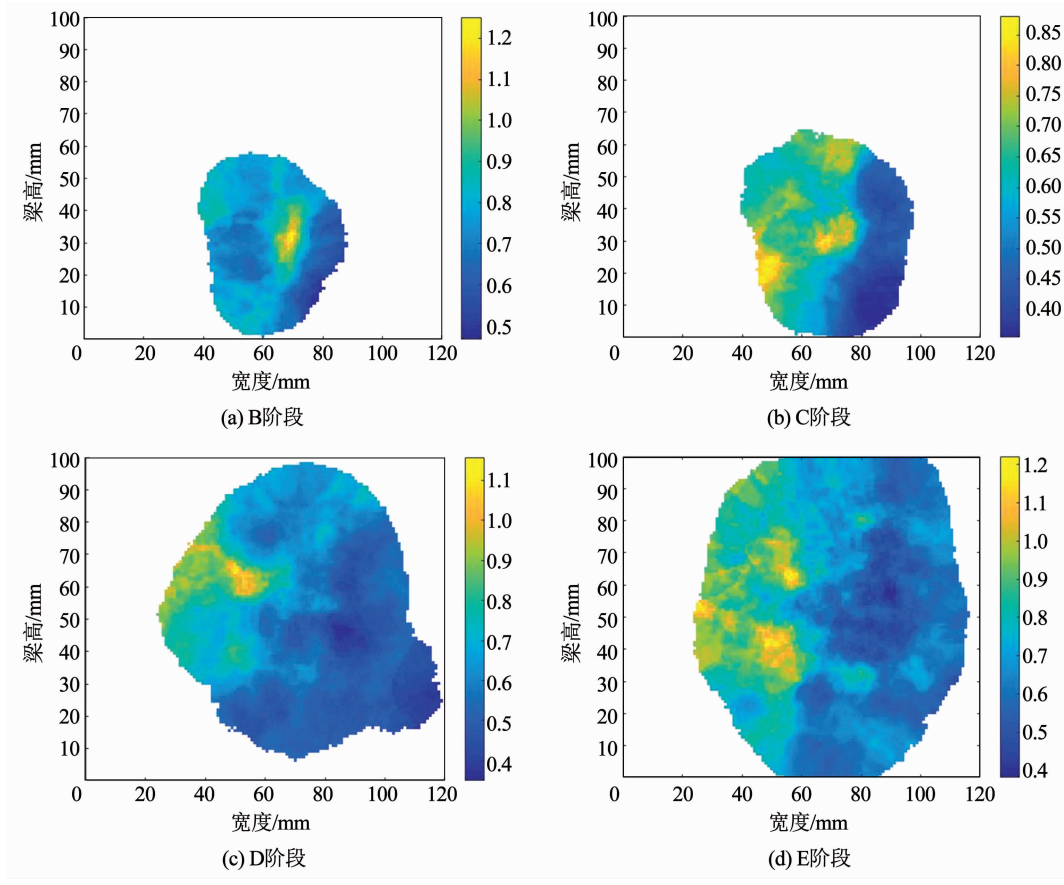


图 10 0.01G-S 梁的声发射空间 b 值投影

Fig. 10 AE spatial b -value projection of 0.01G-S beam

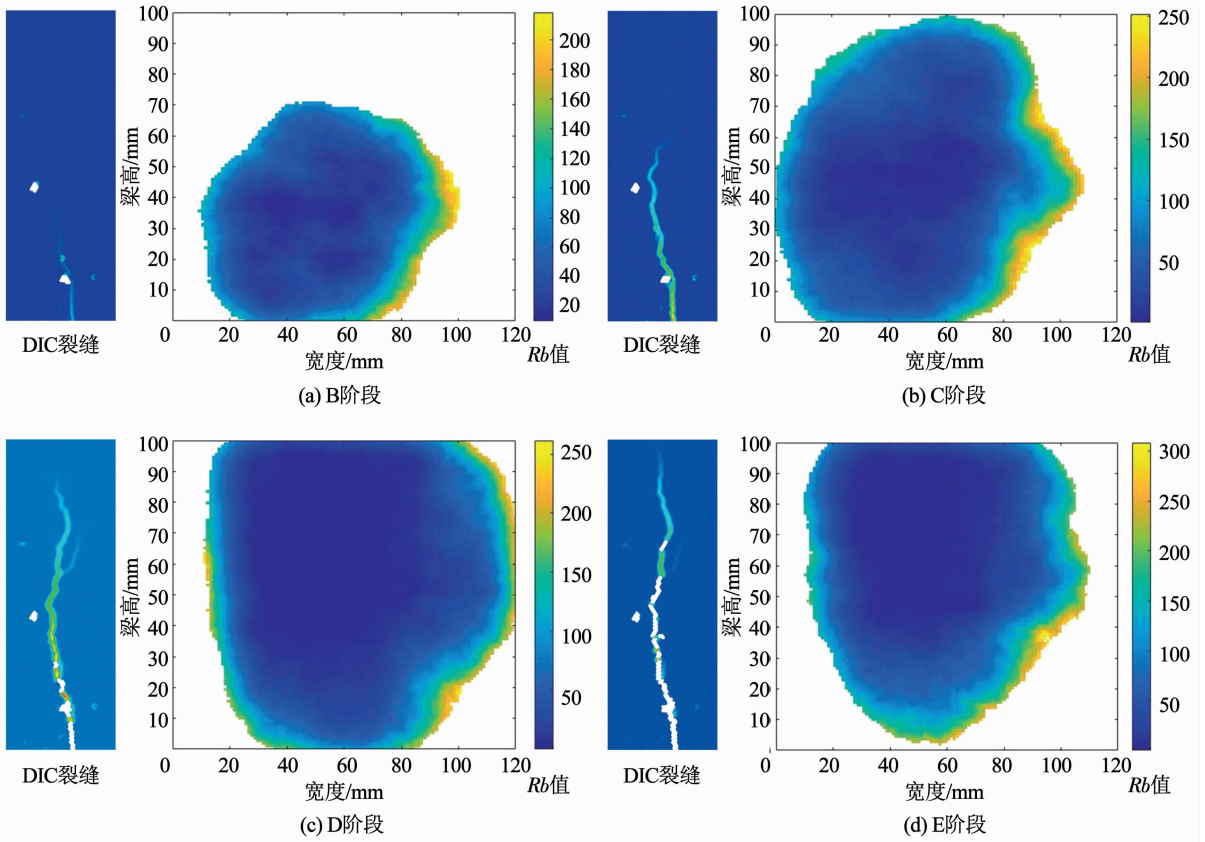


图 11 0.001G-F 试块的 DIC 裂缝云图与声发射 Rb 值对比

Fig. 11 Comparison of DIC crack clouds and AE Rb-value of 0.001G-F specimen

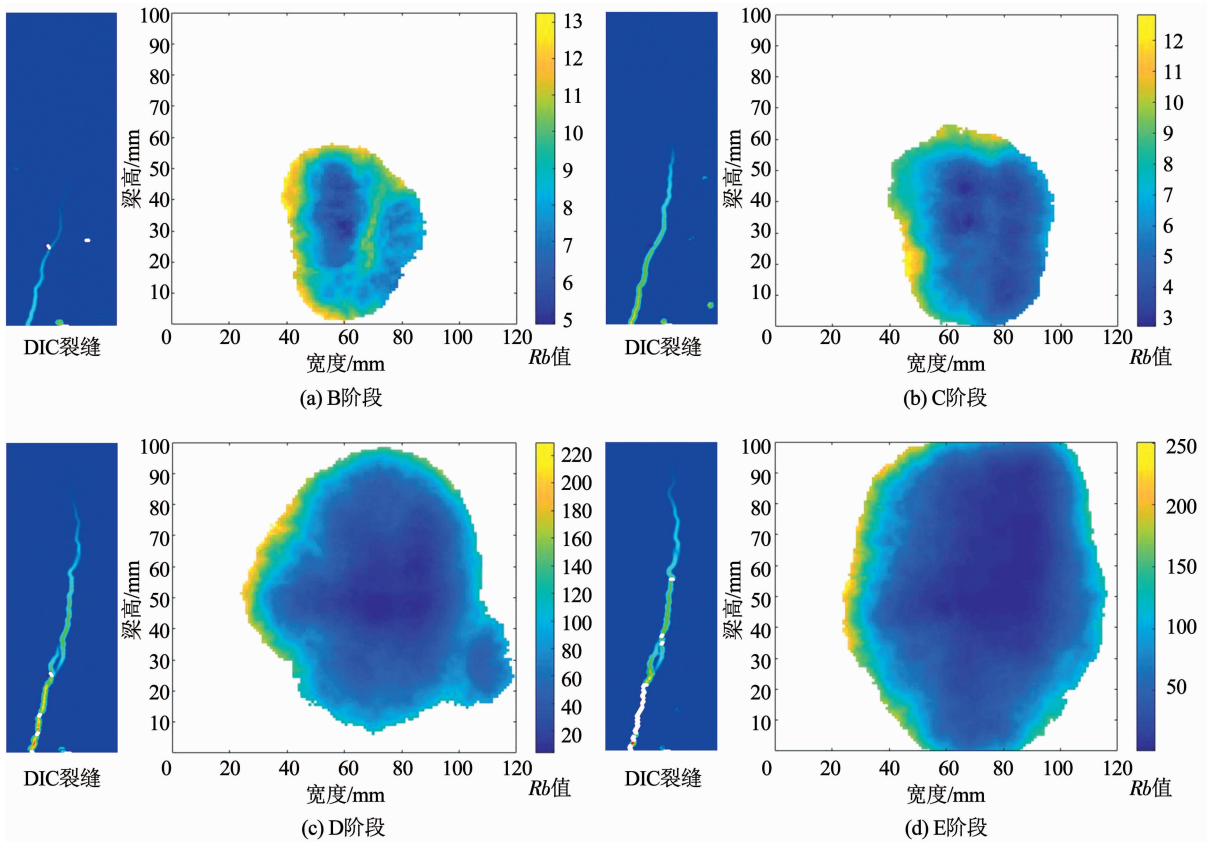


图 12 0.01G-F 试块的 DIC 裂缝云图与声发射 Rb 值对比

Fig. 12 Comparison of DIC crack clouds and AE Rb-value of 0.01G-F specimen

4 结 论

1) 花岗岩-喷射混凝土组合梁的裂缝扩展至花岗岩表面时,荷载-应变曲线在峰后下降段会出现明显的拐点,该拐点可以作为组合梁中花岗岩开裂的标志。

2) 喷射混凝土中的纤维可以显著提高残余应力,并不能明显增加剪切损伤的比例。但是,随着应变率的提高,组合梁剪切损伤的比例有所增加。

3) 采用 DIC 技术验证了声发射 Rb 值损伤可视化监测方法, Rb 值不仅可以直观地显示组合梁的损伤部位,而且可以对损伤程度进行表征。这为围岩-喷射混凝土支护结构的损伤监测提供了新的思路。

参考文献

[1] 王成虎,高桂云,杨树新,等. 基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2242
WANG Chenghu, GAO Guiyun, YANG Shuxin, et al. Analysis and prediction of stress fields of Sichuan-Tibet railway area based on contemporary tectonic stress field zoning in Western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2242. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0624

[2] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445
XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0737

[3] 郑宗溪,孙其清. 川藏铁路隧道工程[J]. 隧道建设, 2017, 37(8): 1049
ZHENG Zongxi, SUN Qiqing. Sichuan-Tibet railway tunnel project[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8): 1049

[4] 陈文华,黄火林,马鹏. 超高应力作用下锦屏二级水电站深部岩体变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3930
CHEN Wenhua, HUANG Huolin, MA Peng. Test study of deformation characteristics of deep rock mass in Jinping II hydropower station under ultra-high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3930. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1274

[5] MALAN D F. Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(2): 123. DOI: 10.1007/s006030050028

[6] MALAN D F. Simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(4): 225. DOI: 10.1007/s00603-002-0026-0

[7] 谢和平,彭苏萍,何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 205
XI EHeping, PENG Suping, HE Manchao. Basic theory and engineering practice of deep mining[M]. Beijing: Science Press, 2005: 205

[8] 康红普,范明建,高富强,等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2227
KANG Hongpu, FAN Mingjian, GAO Fuqiang, et al. Deformation and support of rock road way at depth more than 1000 meters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2227. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0859

[9] 李志鹏,徐光黎,董家兴,等. 高地应力下地下厂房围岩破坏特征及地质力学机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1568
LI Zhipeng, XU Guangli, DONG Jiaying, et al. Geomechanics mechanism and characteristics of surrounding rock mass failure for underground powerhouse under high geostress[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(6): 1568. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.06.021

[10] 门进杰,郭琳颖,兰涛,等. 钢筋混凝土板裂缝对声发射波传播特征影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 88

MEN Jinjie, GUO Linying, LAN Tao, et al. Influence of cracks in RC slabs on propagation properties of acoustic emission[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 88. DOI: 10.11918/201903002

[11] 田诺成,王志亮,熊峰,等. 循环冲击荷载下轴压对花岗岩动力学特性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 156
TIAN Nuocheng, WANG Zhiliang, XIONG Feng, et al. Influence of axial pressure on dynamic mechanical properties of granite under cyclic impact loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 156. DOI: 10.11918/201908134

[12] 苏晓波,纪洪广,裴峰,等. 单轴压缩荷载下含黏结面花岗岩能量演化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 161
SU Xiaobo, JI Hongguang, PEI Feng, et al. Study on energy evolution law of defective granite specimen under uniaxial compressive loading and unloading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 161. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201710130

[13] 赖于树,熊燕,程龙飞. 混凝土卸载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 380
LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 380. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2015.03.005

[14] 甘一雄,吴顺川,任义,等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2324
GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2324. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1460

[15] YANG G, CAI Z, ZHANG X, et al. An experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73: 46. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.04.004

[16] LU Y, WANG L, LI Z, et al. Experimental study on the shear behavior of regular sandstone joints filled with cement grout[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1321. DOI: 10.1007/s00603-016-1154-2

[17] 张朝鹏,张茹,张泽天,等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 770
ZHANG Zhaopeng, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 770. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.014

[18] GUO Y, CHEN X, YANG H, et al. Experimental study on direct tension behavior of concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2042. DOI: 10.1002/suco.201800354

[19] GOEBEL T H W, BECKER T W, SCHORLEMMER D, et al. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012, 117(B3). DOI: 10.1029/2011JB008763

[20] REN D, LIU B, CHEN S, et al. Visualization of acoustic emission monitoring of fracture process zone evolution of mortar and concrete beams under three-point bending[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118712. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118712

[21] AKI K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1965, 43: 237

[22] ORTEU J. Image correlation for shape, motion and deformation measurements[M]. Boston: Springer, 2009

[23] SRIKAR G, ANAND G, PRAKASH S S. A study on residual compression behavior of structural fiber reinforced concrete exposed to moderate temperature using digital image correlation[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(1): 75. DOI: 10.1007/s40069-016-0127-x

[24] OHTSU M. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete[J]. Materials and Structures, 2010, 43(9): 1183. DOI: 10.1617/s11527-010-9639-z

[25] CHEN C, FAN X, CHEN X. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117472