

干湿界面状态下混凝土-环氧胶泥复合体黏结损伤演化过程

唐建辉¹, 陈徐东¹, 白 银², 宁英杰³

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 南京 210029;

3. 浙江交工集团股份有限公司, 杭州 310051)

摘 要: 为了揭示干湿界面状态下混凝土与环氧胶泥黏结损伤演化机理, 采用轴拉试验研究了环氧胶泥-混凝土复合体的黏结强度, 并通过声发射技术获得了复合体拉伸过程中振铃计数、 b 值以及声发射源空间位置, 分析了复合体黏结损伤的空间演化过程。通过数字图像相关法获得了干湿界面状态下复合体断裂表面的应变和位移损伤演变特征。结果表明: 干燥界面下黏结强度相比潮湿界面下高约 60%。潮湿界面下混凝土-环氧胶泥的声发射源空间位置集中在界面处, 并在界面处形成 1 条规则的应变集中带, 表现出界面破坏特征; 而干燥界面下混凝土内部出现大量的声发射源, 断裂面存在多条不规则的应变集中带, 整体表现为混凝土基体破坏模式。

关键词: 环氧胶泥; 混凝土; 干湿界面; 黏结强度; 声发射特征; 表面应变

中图分类号: TV46 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2877-09

网络出版时间: 2022-09-29



Bonding Damage Evolution Process of Concrete-Epoxy Grout Composite Under Dry-Wet Interface Condition

TANG Jianhui¹, CHEN Xudong¹, BAI Yin², NING Yingjie³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: The bonding strength of epoxy grout-concrete composite was investigated by axial tensile test to reveal the bonding damage evolution mechanism between epoxy grout and concrete under dry and wet interface condition. The ringing count, b value and the spatial position of acoustic emission (AE) source during the tensile process of composite were obtained by AE technique, and the spatial evolution process of bonding damage of composite was analyzed. The evolution characteristics of strain and displacement damage on the fracture surface of the composite under wet and dry interface condition were obtained by a digital image correlation method. The results show that the bonding strength under dry interface condition is 60% higher than that under wet interface condition. Under wet interface condition, the AE source of epoxy grout-concrete is concentrated at the interface, and a regular strain concentration zone is formed at the interface, showing the characteristics of interface failure. Under dry interface condition, however, there are a lot of AE sources in the concrete, and there are several irregular strain concentration zones on the fracture surface, indicating the failure mode of the concrete matrix as a whole.

Keywords: epoxy grout; concrete; dry-wet interface; bonding strength; acoustic emission characteristics; surface strain

在我国基建行业持续发展的同时, 对既有建筑物病害的预防和治理也越来越引起人们的重视^[1-2]。

采用表面修复材料是一种快速提高混凝土结构耐久性能的有效措施, 这其中环氧树脂类修复材料因其

收稿日期: 2022-05-06。 修订日期: 2022-05-19。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600200); 国家自然科学基金面上项目(5179090; 51779085)。

第一作者: 唐建辉(1994—), 男, 博士研究生。

通信作者: 陈徐东(1985—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-05-06. Revised date: 2022-05-19.

First author: TANG Jianhui (1994—), male, Doctoral candidate.

E-mail: tangjianhui1994@163.com

Correspondent author: CHEN Xudong (1985—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: cxdong1985@163.com

早期强度高、黏结力强、抗渗性能好等众多优点而备受关注^[3-6]。

根据使用填料的类型,环氧树脂类修复材料可分为环氧灌浆材料、环氧腻子(胶泥)、环氧砂浆、环氧混凝土等,依据材料的特性分别用在裂缝封堵^[3]、混凝土结构加固^[4]、水工抗冲磨修补^[5]、海工防腐^[6]等工程中。在这些应用中,修复材料与混凝土间的黏结性能是重点关注的性能^[7]。二者的界面黏结性能受多种因素的影响,其中混凝土的基面状态,包括潮湿程度、粗糙度、洁净度等,是修复工程中首要考虑的因素^[8]。在这方面,刘方等^[9]发现在干燥情况下,黏结界面的粗糙度对环氧修补砂浆与水泥砂浆的抗折强度无影响,但界面的潮湿程度与环氧修补砂浆的黏结能力呈负相关。刘娜等^[10]研究表明水分降低了聚合物底漆与混凝土的附着性能,但黏结强度随着混凝土基面粗糙度的增加及晾置时间的延长而增大。Kamil 等^[11]研究了 17 种不同的混凝土表面处理方式对环氧树脂涂层拉拔强度的影响,发现通过压印的方式获得的黏结强度最大。Agnieszka 等^[12]的研究表明灰尘的存在通常会显著降低涂层和基材之间的附着力。

除了黏结强度外,修复材料与混凝土在不同因素下的黏结损伤特征也大不相同。修复材料与混凝土的黏结破坏模式可分为混凝土破坏、修复材料破坏、黏结界面破坏、界面和混凝土复合破坏、界面和修复材料复合破坏 5 种形式^[13]。Shin 等^[14]研究了温度对环氧修复砂浆破坏模式的影响,发现随着温度的升高,破坏模式由砂浆破坏转变为环氧树脂与界面的混合破坏。熊小斌^[15]发现随着混凝土含水率增大,环氧砂浆与混凝土的界面破坏模式由混凝土内聚力破坏模式逐渐转变为混合破坏模式,饱和含水率情况下,发生黏结面破坏模式。

由此可见,混凝土基面状态,尤其是基面潮湿状态对环氧修复材料黏结性能影响很大。然而这些研究多注重于对黏结损伤结果的分析,缺少对损伤演变过程的研究。在这方面,数字图像相关法(DIC)可实现对试样表面全场变形的无损测量^[16],声发射技术(AE)常被用于实时动态监测试样内部损伤及裂缝开展情况^[17]。为此,本工作以自主研发的环氧胶泥为研究对象,该材料具有良好的黏结和耐水侵性能可适用于潮湿环境下的混凝土修补工程中,通过制备干燥和潮湿界面状态下的混凝土-环氧胶泥复合体试样,采用轴拉试验对复合体试样的黏结性能进行研究,结合 3D-DIC 和 AE 空间定位测试技术

分析复合体表面损伤和内部裂纹扩展特征,以揭示复合体黏结损伤的演化机理,研究成果可为环氧胶泥防护材料的推广应用提供参考依据。

1 实验

1.1 材料

所用的试样由混凝土基体和环氧胶泥组成。混凝土的配合比如表 1 所示,水灰比为 0.4,砂率为 45%。其中采用的水泥为普通硅酸盐 P.O 42.5 海螺水泥,砂子的细度模数为 2.3,粗骨料为 5 到 20 mm 连续级配的碎石,减水剂为粉体聚羧酸减水剂,掺入比例为 0.15%。混凝土拆模后放入标准养护室养护 28 d,混凝土 28 d 平均抗压强度为 45.6 MPa,标准差为 1.57 MPa。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of concrete $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Cement	Coarse aggregate	Sand	Water	Water reducer
418	1 000	816	168	6.27

采用的环氧胶泥是 1 种以双酚 A 环氧树脂、改性增韧固化剂及多种无机填料复合而成的高强度、抗流挂、触变性能良好的新型修补材料,其中双酚 A 环氧树脂的环氧值为 5.20~5.50 eq/kg,环氧当量为 182~192 g/eq;采用的固化剂为无溶剂改性胺固化剂,25 °C 的黏度为 30~90 mPa·s,胺值为 290~320 mg KOH/g。环氧树脂与固化剂的质量比例为 100:40。采用水泥、滑石粉和膨润土作为无机填料,其中水泥为 42.5 的波兰特水泥,细度为 38 μm ;膨润土选用钠基膨润土;膨润土和滑石粉的细度为 10 μm 。根据前期材料研发的成果,无机填料中水泥、滑石粉和膨润土的比例为 0.5:0.3:0.2,无机填料与拌合好的环氧树脂比例为 1:1^[18]。环氧胶泥的抗压强度为 68.46 MPa,抗拉强度为 10.89 MPa,20 °C 的黏度为 15.87 Pa·s,剪切变稀指数为 2.09。在实际工程应用中,可以基于不同的需求调整填料的种类和掺量,以获得不同性能的环氧胶泥修补材料。

1.2 试样制备

为了能够更好地分析修补材料与混凝土的拉伸黏结损伤过程,制备了直径 75 mm,高 150 mm 环氧胶泥-混凝土复合体试样,其中一半为混凝土基体,另一半为根据 1.1 节配比浇筑的环氧胶泥。

混凝土基体表面状态分为干燥和潮湿 2 种,将混凝土放入 50 °C 的烘箱中 48 h 获得表面相对湿度 0%干燥状态的混凝土,将混凝土放入水中浸泡 48 h

获得表面相对湿度 100%潮湿状态的混凝土。环氧胶泥浇筑完成后放入 (20 ± 2) °C, 相对湿度 $60\%\pm 5\%$ 的养护室内。在养护 3、7、14 d 和 28 d 时通过直接拉拔法测试黏结强度, 每个龄期测试 3 块试样。对 28 d 后的轴拉试样进行 AE 和 DIC 数据采集, 采集过程如 1.3 节所示。

1.3 试验过程

采用 MTS322 试验机对复合体试样进行轴拉试验。首先将复合体试样与 MTS 试验机上的球绞相连, 保证处于同一轴线上。之后将 3 个夹式引伸计通过试件侧面位置上的固定端子均匀分布安装于试件上, 用于控制加载速率, 加载速率为 1×10^{-6} /s。最后安装 AE 探头和调整 DIC 设备, 具体细节如下:

数字图像数据运用 DIC-3D 软件进行系统采集, 首先将相机用三脚架固定, 垂直放置在距离岩石试件测试面 1 m 处, 相机两边各有一个 LED 冷光灯作为光源。相机每秒钟采集 5 张照片, 与 MTS 加载过程同时开始, 直至试件破坏结束采集。通过相关算法, 将变形前图像与变形后图像进行匹配分析, 从而得到复合体试件损伤表面全场变形特征。

声发射数据采集仪器使用美国物理声学公司生产的声发射监测系统, 型号为 Sensor Highway II。在试样表面共布置 4 个声发射探头, 为保证探头与试件的耦合效果, 在二者接触部位涂凡士林, 再把探头固定在试样侧面。为消除噪音干扰, 前置放大器增益设为 35 dB, 阈值值设为 30 dB, 采样频率为 1 MHz。

2 结果与讨论

2.1 黏结强度

通过直接拉拔法获得的环氧胶泥与混凝土黏结强度随龄期的变化如图 1 所示, 总体来看, 界面干湿状态对环氧胶泥与混凝土黏结强度有很大影响。在潮湿界面状态下, 3 d 黏结强度为 1.62 MPa, 7 d 黏结强度相比 3 d 有较大幅度增加, 达到 2.3 MPa。而在干燥基面状态下, 环氧胶泥与混凝土 3 d 黏结强度为 3.36 MPa, 到 7 d 时的黏结强度为 3.51 MPa, 相比 3 d 而言仅略微增加了 0.15 MPa。这与文献[9-10]获得的试验规律一致, 界面水分的存在阻碍了环氧胶泥与黏结界面的接触, 降低了环氧与混凝土之间的相互作用效果, 这也进一步导致了潮湿基面黏结强度较干燥界面低。

观察 2 种界面状态下 14 d 和 28 d 的黏结强度, 与 7 d 时相比并没有持续上升, 而是呈现上下浮动

的特征, 表明环氧胶泥与混凝土的黏结强度发展主要在早期, 环氧树脂与固化剂反应完全后对黏结强度的影响很小。以 28 d 黏结强度进行对比来看, 干燥界面下的黏结强度相比潮湿界面下高约 60%。

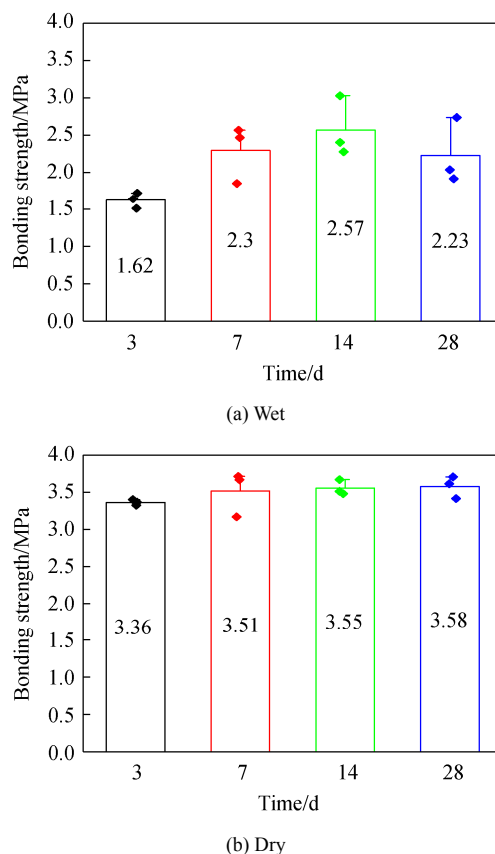


图 1 干燥和潮湿界面下环氧胶泥与混凝土的黏结强度
Fig. 1 Bond strength between epoxy grout and concrete under dry and wet interface

2.2 声发射特征

声发射信号参数与环氧胶泥-混凝土黏结破坏裂纹的萌生、扩展、贯通等演化过程密切相关, 常用的声发射信号参数包括振铃计数、振幅、能量等^[19-20]。振铃计数与声发射信号的活跃程度呈正相关, 在一定程度上反映了黏结破坏部裂纹扩展程度。由于不同类型的裂纹会产生不同的声发射信号, 其信号频率和振幅有很大差异^[21]。学者通过对声发射信号的振幅进行处理, 形成了 b 值分析法^[22], b 值的计算公式如下:

$$\lg N = a - b(A_{ab} / 20) \quad (1)$$

式中, N 为幅值大于 A_{ab} 的 AE 事件数; A_{ab} 为 AE 事件的幅值; a 为经验常数; b 为 AE 事件的 b 值。为了避免在一定时间内由于声发射数太少而导致测试 b 值计算出现过大误差, 将 b 值计算的滑动窗口

设置为 100。事实上, b 值表示的是声发射弱信号与强信号的比值, 微裂纹产生大量弱声发射, 导致 b 值相对较高, 而宏观裂纹产生大量强声发射信号, 导致 b 值相对较低^[23], 通过 b 值可分析裂纹的扩展规律。因此文中利用声发射振铃计数以及 b 值对环氧胶泥-混凝土拉伸加载过程的声发射特征进行分析。

如图 2 所示为环氧胶泥与混凝土的黏结破坏的声发射特征, 通过荷载-累计振铃计数-时间关系曲线, 可以将整个黏结破坏过程分为 3 个阶段, 即裂纹萌发阶段 S1、快速扩展阶段 S2 和贯通失效阶段 S3。以图 2a 潮湿界面为例, 在 S1 阶段随着拉伸荷载的持续增加, 环氧胶泥-混凝土试样由弹性逐渐向塑性发展, 此刻微裂纹开始萌发、聚集, 累计振铃计数呈现线性递增特征; 在 S2 阶段, 微裂纹快速扩展为大裂纹, 荷载急剧下降, 振铃计数的数值相比 S1 阶段大幅上升, 累计计数也呈现陡增的上升趋势。与此同时, 声发射 b 值剧烈波动, 表明在复合体内部微裂纹扩展成大裂纹的同时又有大量新的微裂纹产生; 在 S3 阶段, 荷载-累计振铃计数-时间曲线趋于平稳, 但仍有高的振铃计数出现, 甚至超过了 S2 阶段的振铃计数值, 而 b 值也在波动中逐渐减小。这一阶段主要是大裂纹贯通形成宏观裂纹, 环氧胶泥和混凝土之间脱黏, 最终表现为界面破坏模式。该过程中微裂纹占总裂缝的比例减小, b 值因此降低。

对比图 2a 和图 2b, 可以看出干燥界面状态下的环氧胶泥-混凝土试样在 3 个阶段的特征与潮湿界面下基本一致, 但也存在不同之处。首先干燥界面下的振铃计数的数量和累计振铃计数的总值均远高于潮湿界面, 其中干燥界面的累计振铃计数达 201×10^3 , 是潮湿界面下 60×10^3 的累计振铃计数的 3.35 倍; 其次, 干燥界面下试样在 S2 阶段的荷载-累计振铃计数-时间曲线没有表现出如图 3a 所示的陡降或陡升特征, 而是连续的变化; 此外, 就声发射 b 值而言, 图 3b 在 S1 阶段的 b 值在 1.4 附近, 较图 2a 中 S1 阶段 1.2 左右的 b 值大, 并且干燥界面下 S2 阶段的 b 值波动幅度和频率均比潮湿界面大。上述这些差异性源于 2 种黏结破坏模式的不同, 如图 3 所示为干燥和潮湿界面状态下环氧胶泥和混凝土的黏结破坏模式。在潮湿界面下环氧胶泥和混凝土在界面处破坏, 且环氧胶泥粘附有少量混凝土。干燥界面下则表现为明显的混凝土基体破坏, 内部断裂面沿着混凝土内骨料和砂浆的界面过度区不规则分布, 这使得混凝土内部有更多的微裂纹产

生, 也就有更高的累计振铃计数。微裂纹沿着薄弱区扩展为大裂纹, 这个过程包含了砂浆的内聚破坏和砂浆-骨料的分离, 扩展过程相比界面破坏而言更加复杂和剧烈, b 值也因此波动中不断降低, 直至混凝土形成贯穿裂缝而破坏。

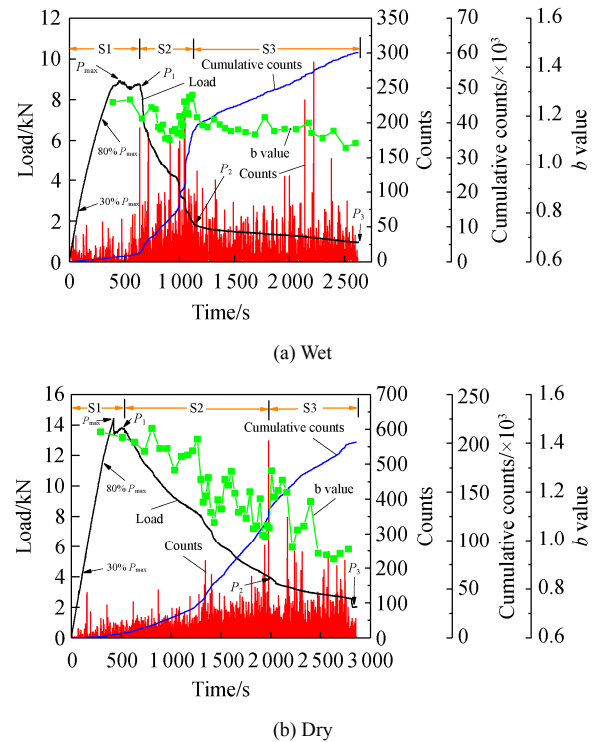
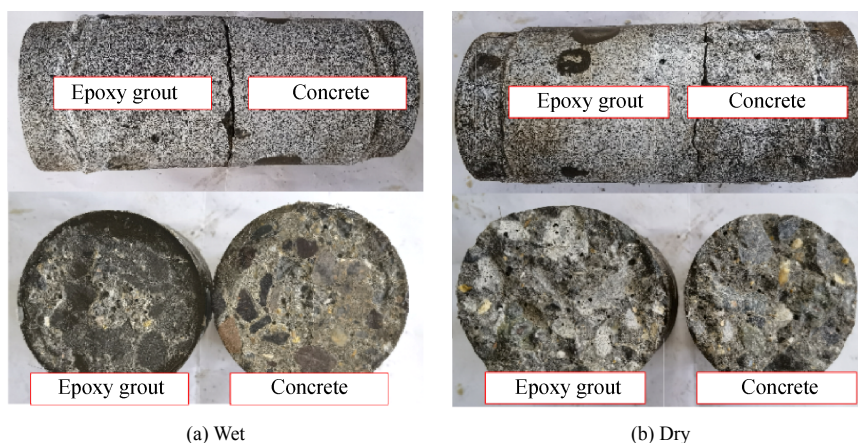


图 2 环氧胶泥与混凝土的黏结破坏的声发射特征
Fig. 2 AE characteristics of bonding failure between epoxy grout and concrete

通过声发射信号的空间位置可以很好的揭示复合体三维空间损伤演化过程, 而声发射能量 E_{AE} 的高低可以表征声发射源活动的剧烈程度^[24]。为了易于辨识声发射能量的高低, 将声发射能量分为 4 个等级: (1) $E_{AE} < 1$; (2) $1 \leq E_{AE} < 10$; (3) $10 \leq E_{AE} < 100$; (4) $E_{AE} \geq 100$ 。本文选取了图 2 中 3 个阶段的 3 个特征点(P_1 、 P_2 和 P_3)的声发射能量及声发射源位置来分析环氧胶泥-混凝土黏结损伤的空间演变机理, 如图 4 和图 5 所示, 上部分为混凝土, 下部分为环氧胶泥, 中央处为黏结界面。就图 4 的潮湿界面而言, 在 P_1 荷载处声发射源分散在界面处, 且数量很少; 在 S2 阶段的 P_2 荷载处, 声发射源数量明显增多, 空间位置集中在界面处; 在 S3 阶段的末端 P_3 荷载处, 声发射源除了在界面处外还有部分显示在混凝土中, 这个现象与图 3a 的破坏模式一致。反观图 5 的干燥界面状态下, P_1 荷载处也仅有少量的声发射源, 并分散于上部混凝土中; 继续施加拉

伸荷载至 P_2 时, 混凝土内部出现大量的声发射源, 而黏结界面处的声发射源很少; 到 P_3 时, 混凝土中

的声发射源更加集中, 集中的位置与图 3b 的混凝土断裂位置相似。



(a) Wet (b) Dry

图 3 环氧胶泥与混凝土的黏结破坏形态

Fig. 3 Bond failure form of epoxy grout and concrete

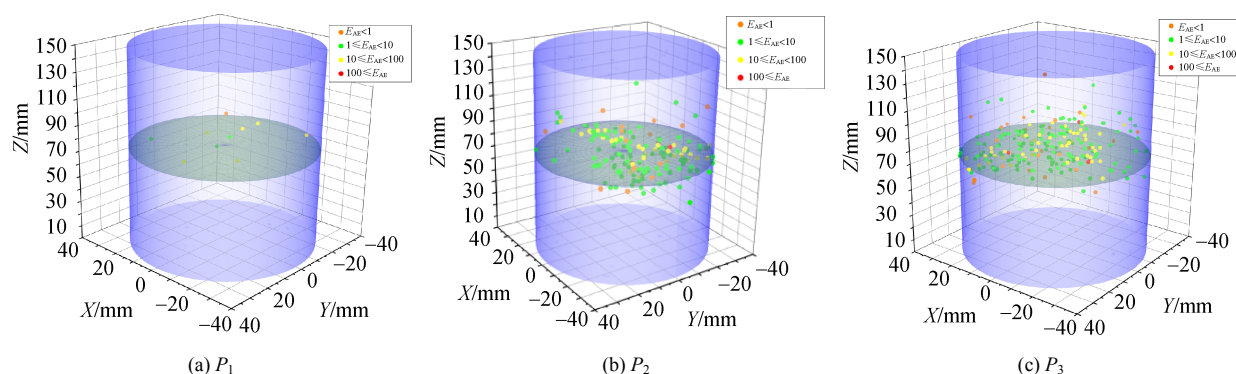


图 4 潮湿界面下声发射源位置

Fig. 4 Location of AE source under wet interface

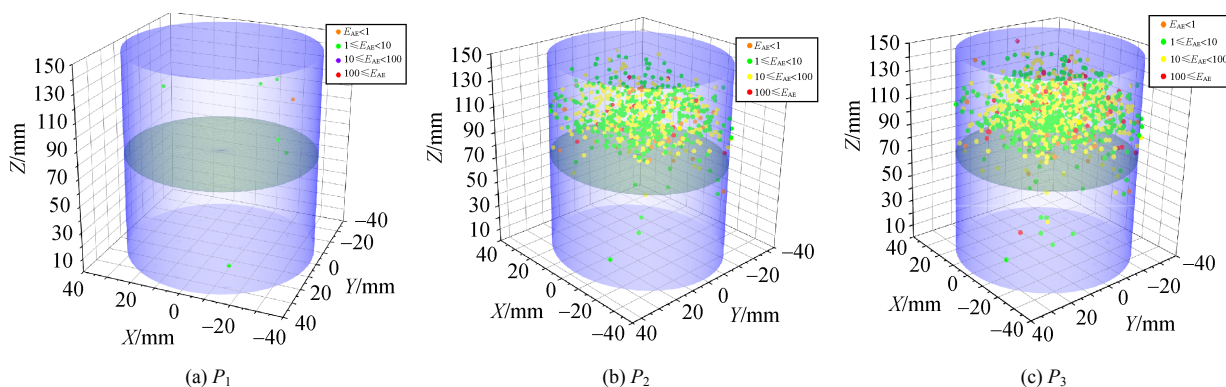


图 5 干燥界面下声发射源位置

Fig. 5 Location of AE source under dry interface

经分级识别获得的声发射能量等级比率与加载阶段的关系如图 6 所示, 从图 6 可以很清晰的看出不同加载阶段的声发射能量活动演变特征。对于潮湿界面, $E_{AE} < 1$ 的声发射源在整个黏结损伤过程中基本维持不变, $1 \leq E_{AE} < 10$ 的声发射源比率在后期有明显的下降, 相应的 $E_{AE} \geq 10$ 的高声发射能量源

所占比率增加。对于干燥界面, $E_{AE} < 1$ 的声发射源在峰后 P_2 和 P_3 阶段的占比相比峰前 P_1 有明显的降低, 并且 $1 \leq E_{AE} < 10$ 的声发射源比率也随着荷载的施加而降低, $E_{AE} \geq 10$ 的高声发射能量源比率呈上升趋势。这种现象从另一方面也证实了前述的黏结损伤机理, P_1 处于微裂纹的萌发阶段, 没有 $E_{AE} \geq$

100 的声发射源; P_2 处于快速扩展阶段, 大裂纹数量增多, 高声发射能量占比也就增加; P_3 为贯通阶段, 宏观断裂裂纹形成, 使得高声发射能量比率进一步增多。对比潮湿和干燥界面工况, 不难看出整个加载阶段干燥界面下 $E_{AE} \geq 10$ 的声发射源比率均大于潮湿界面条件下的, 也即是说混凝土内聚破坏比黏结界面破坏具有更高的能量波动。

2.3 表面应变和位移特征

为了进一步揭示环氧胶泥-混凝土复合体在拉伸荷载下断裂表面应变的演化, 通过 DIC 获得了如图 7 和图 8 所示潮湿和干燥界面下复合体断裂表面的垂直方向应变场分布, 图 7 和图 8a~图 8f 对应着

图 3 中所标示的不同阶段的荷载, 其中 P_{max} 为最大峰值荷载。在潮湿界面下, 当荷载处于峰前 30% P_{max} 时, 整个断裂表面的应变分布较为均匀; 增大荷载至 80% P_{max} 时, 应变开始在黏结界面处聚集; 当达到最大峰值荷载 P_{max} 时, 聚集在黏结界面附近的应变集中区域范围增大; 继续加荷至 P_1 时, 最大应变值也随之增大; 在峰后 P_2 荷载处可以看到应变集中区域的范围和应变值进一步扩大, 并且有贯通趋势; 在最后的 P_3 荷载处观察到 1 个与前述相反的现象, 即在表面右侧区域的应变为负, 表明该时刻此处的断裂面由受拉状态转变为受压状态, 这是因为试样拉伸过程中因黏结界面处受力不均产生了偏心现

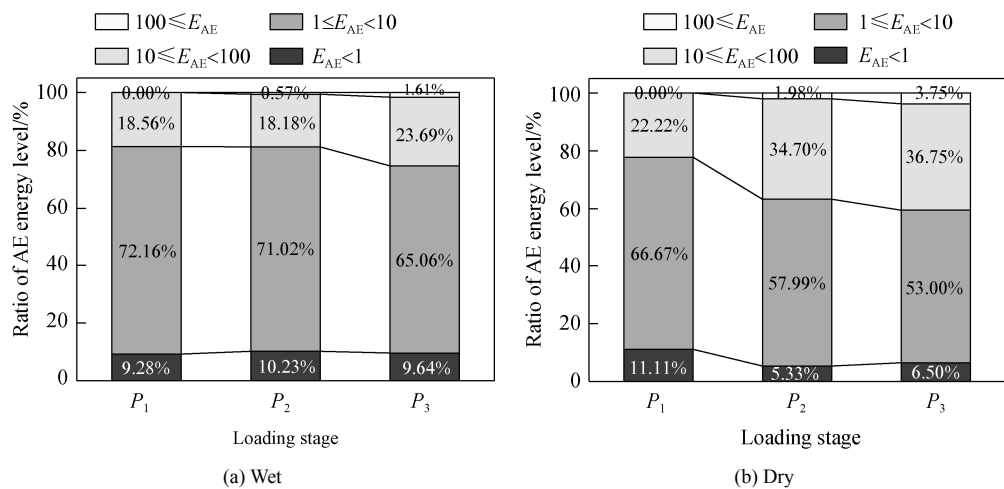


图 6 不同加载阶段对应的声发射能量等级比率
Fig. 6 Ratio of AE energy level corresponding to different loading stages

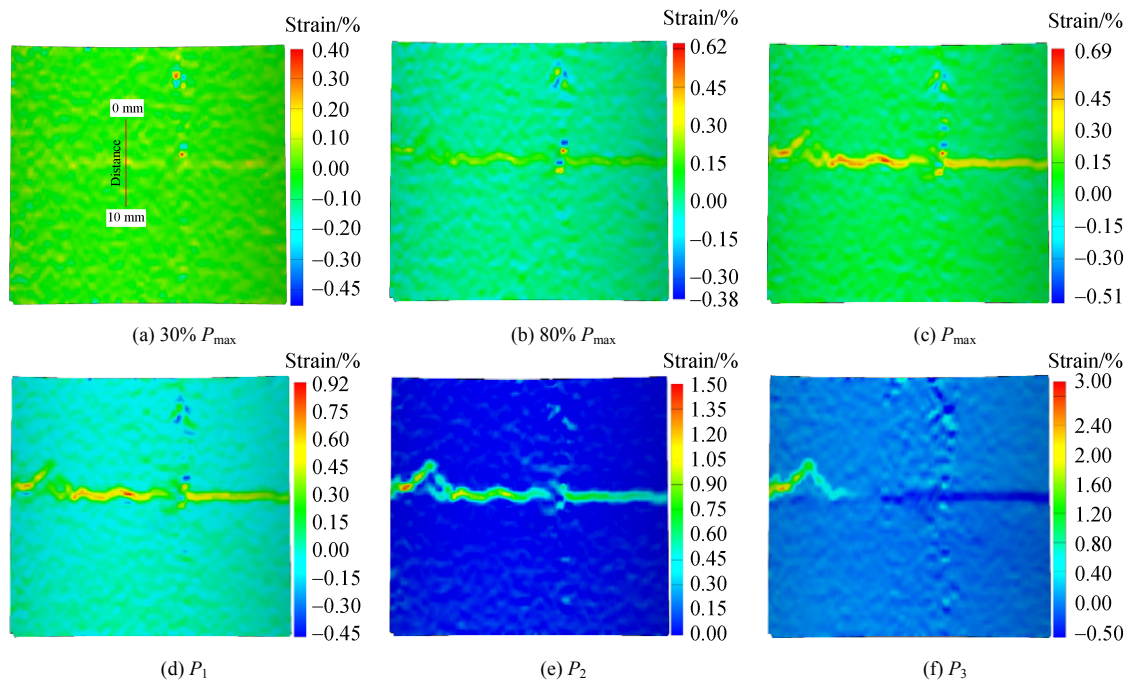


图 7 潮湿界面下复合体拉伸断裂表面应变场
Fig. 7 Strain field on tensile fracture surface of composite sample under wet interface

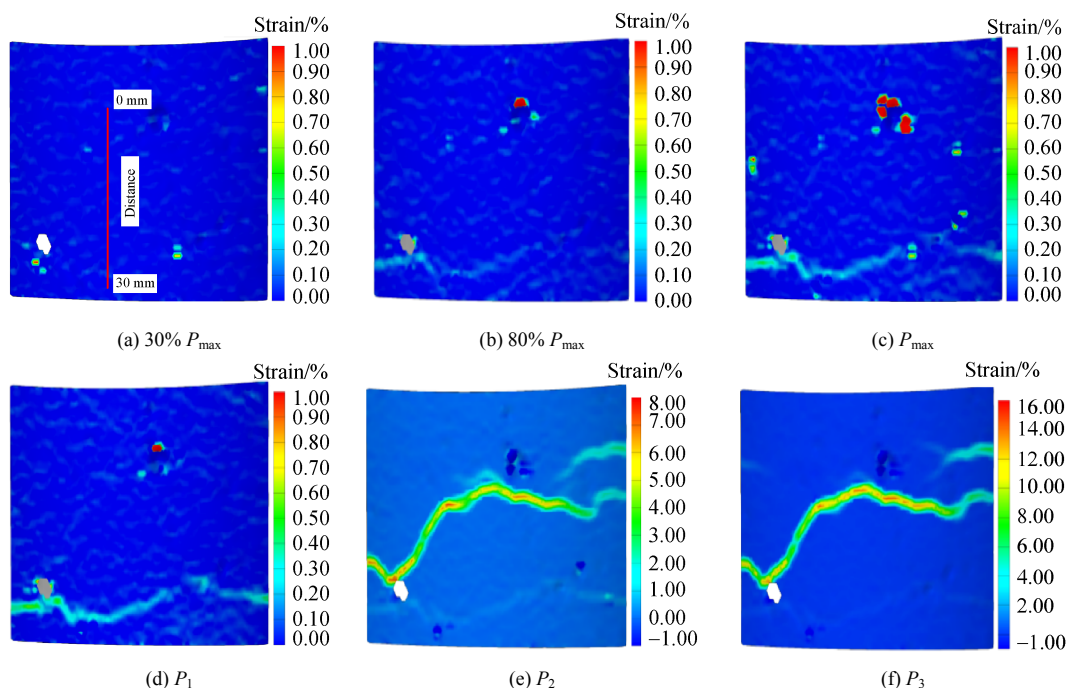


图 8 干燥界面下复合体拉伸断裂表面应变场

Fig. 8 Strain field on tensile fracture surface of composite sample under dry interface

象。为了能够量化表征断裂表面的应变发展规律,如图 7a 所示沿着垂直于黏结界面损伤方向选取了长度 10 mm 的线段,通过提取该线段在不同时刻的应变数据,绘制了如图 9a 所示图形。可以明显观察到横坐标 5 mm 位置处的应变值最大,该处实际为黏结界面损伤的中心。随着荷载的施加,中心点处的应变值逐渐增大,在荷载 $P_{\max}$ 处的中心应变为 0.45%,峰后 P_1 和 P_2 的应变增加至 0.56% 和 0.82%,而因偏心的影响 P_3 的应变降低至 -0.17%。

如图 8 所示的干燥界面下复合体拉伸断裂表面应变场分布与图 7 潮湿界面下的有明显的不同。在峰前 30% $P_{\max}$ 处的表面应变分布均匀,没有应力集

中现象;继续加载至 80% $P_{\max}$ 时,在选取断裂表面的下部有轻微的应变集中区域产生,表明了混凝土内部微裂纹的萌发;到最大荷载 $P_{\max}$ 和峰后 P_1 时,应变集中程度由左向右进一步扩大;而到峰后 P_2 和 P_3 荷载时,混凝土表面出现了一条新的更加曲折的应变集中分布带,而且应变值相比之前有明显的增加。这说明环氧胶泥-混凝土复合体在达到峰值荷载后,已产生的微裂纹沿着混凝土内部新的薄弱面相互连接贯通,并取代之前的微小应变集中区域形成了主要断裂变形区。同样的沿着垂直于黏结界面损伤方向选取了长度约 30 mm 的线段(图 8a),绘制了如图 9b 所示的表面应变沿直线分布的曲线。可以

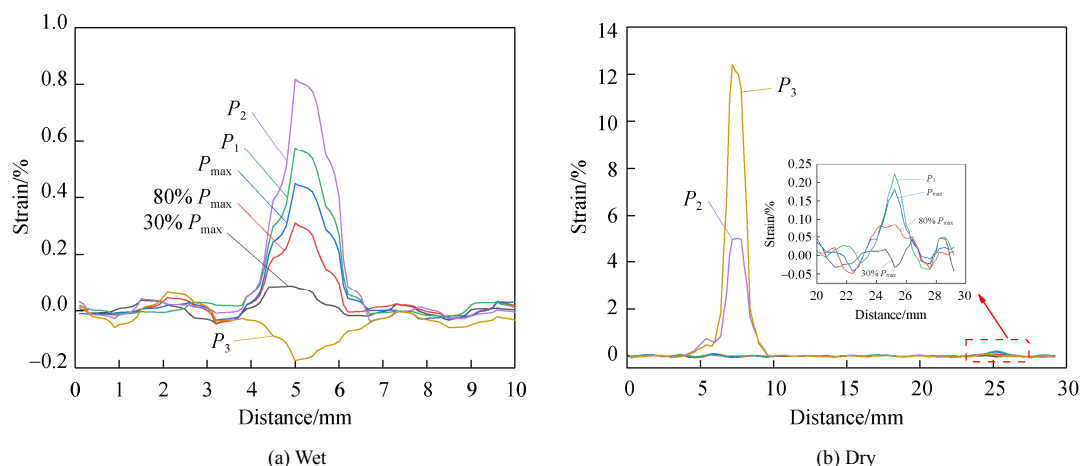


图 9 不同荷载下表面应变沿断裂面分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of surface strain along fracture surface under different loads

看到直线上有 2 个应变峰值集中区域, 分别在 7.5 mm 和 25 mm 附近, 这与表面的 2 条应变分布带一致。在 25 mm 附近的应变峰值中, 30% $P_{\max}$ 荷载下的应变在 0 处波动, 该荷载处的复合体处于弹性变形阶段; 80% $P_{\max}$ 时的峰值应变为 0.08%, 说明混凝土产生了塑性变形; 继续加载至 P_1 时, 应变峰值也增加到 0.22%, 塑性变形进一步增大。之后的峰后加载阶段, 混凝土内部的应力在薄弱面重新分布, 荷载 P_2 和 P_3 的应变峰值出现在 7.5 mm 位置处, 应变峰值分别达到 4.97% 和 12.41%。

除了表面应变外, 断裂面的裂纹宽度也是 1 个重要的损伤评判指标。采用与图 9 相同的分析方法, 获得的不同荷载下表面位移沿断裂面分布特征如图 10 所示。在图 10a 潮湿界面下, 峰前 30% $P_{\max}$ 处的表面位移呈线性变化, 这一阶段复合体处于弹性阶段, 没有微裂纹的产生; 当加载至 80% $P_{\max}$ 及之后的荷载处时, 可以看到在 5 mm 位置两侧出现 1 个

明显的非线性变化段, 也即是图中 AB 段。A 点和 B 点的位移差 ΔU_{AB} 为断裂裂纹宽度, 它的出现表明在黏结界面产生了损伤。通过计算可得, 在 80% $P_{\max}$ 、 $P_{\max}$ 、 P_1 和 P_2 处的裂纹宽度分别为 0.002 9 mm、0.006 0 mm、0.008 0 mm 和 0.011 3 mm, 断裂裂纹宽度随荷载在持续增加。而 P_3 的裂纹宽度为 -0.002 3 mm, 这是复合体在加载后期因偏心受压产生的。在图 11b 的干燥界面下, 峰前 30% $P_{\max}$ 处的表面位移同样呈线性变化; 80% $P_{\max}$ 、 $P_{\max}$ 和 P_1 处的表面位移在 0~22 mm 区间内呈线性变化, 但在 22~26 mm 内处于混凝土底部的断裂带, 其表面位移表现为突然下降, 之后保持平稳, 这一段变化的位移差在 0.002 5mm~0.003 8 mm 之间。之后的 P_2 和 P_3 荷载处, ΔU_{AB} 分别为 0.078 7 mm 和 0.167 0 mm, 远大于峰值前的裂纹宽度。

3 结论

1) 干湿界面状态对环氧胶泥与混凝土的黏结强度影响很大, 干燥界面下黏结强度相比潮湿界面下高约 60%。潮湿界面下两者的破坏模式为界面破坏, 而干燥界面下表现为混凝土基体破坏, 断裂面沿着混凝土内骨料和砂浆的界面过度区不规则扩展。

2) 环氧胶泥-混凝土复合体的黏结破坏过程可分为 3 个阶段, 即裂纹萌发阶段 S1、快速扩展阶段 S2 和贯通失效阶段 S3。潮湿界面下 S2 阶段荷载-累计振铃计数-时间曲线表现出明显的陡降或陡升特征, 而干燥界面下 S2 阶段呈现连续的变化, 并且干燥界面下 S2 阶段的 b 值波动幅度和频率均比潮湿界面大。

3) 潮湿界面下声发射源空间位置集中在界面处, 而干燥界面下混凝土内部出现大量的声发射源。整个加载阶段干燥界面下 $E_{AE} \geq 10$ 的声发射源比率均大于潮湿界面条件下的, 表明混凝土内聚破坏比黏结界面破坏具有更高的能量波动。

4) 潮湿界面下复合体拉伸断裂表面仅在黏结界面处形成 1 条规则的应变集中带, 且裂纹宽度较小; 干燥界面下复合体在混凝土中存在多条不规则的应变集中带, 并且破坏时的最大应变和位移远大于潮湿界面状态。

参考文献:

- [1] 张鹏, 郭得阳, 鲍玖文, 等. 基于微生物矿化作用的混凝土自愈合性能研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 544-554.
ZHANG Peng, GUO Deyang, BAO Jiwen, et al. J Chin Ceram Soc,

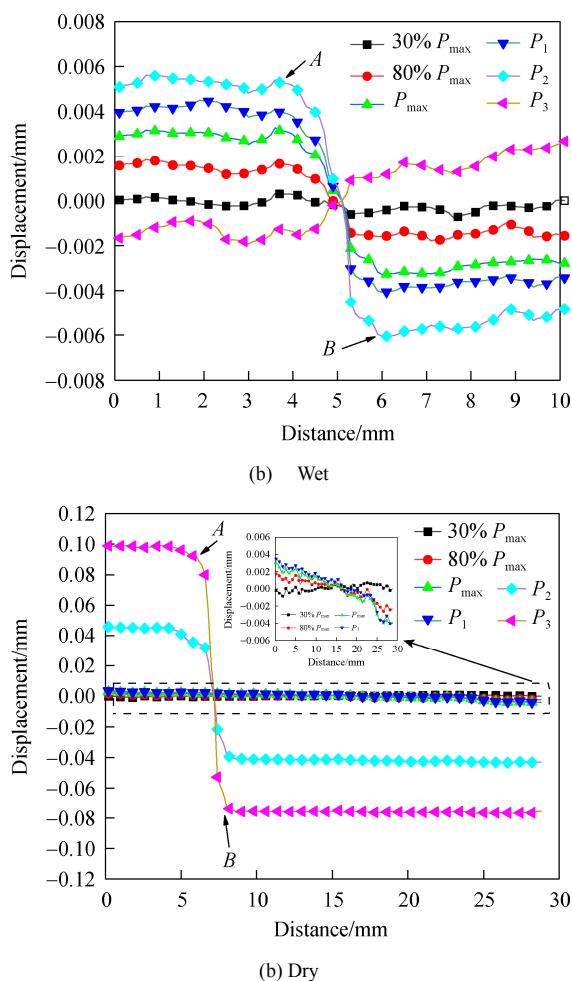


图 10 不同荷载下表面位移沿断裂面分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of surface displacement along fracture surface under different loads

- 2022, 50(2): 544–554.
- [2] 杨苹, 李伟华, 赵铁军. 不同表面涂层对混凝土的防护效果[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(11): 1613–1617.
YANG Ping, LI Weihua, ZHAO Tiejun. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(11): 1613–1617.
- [3] 王信刚, 周镇, 赵华, 等. 环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的渗透机理[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1200–1207.
WANG Xingang, ZHOU Zhen, ZHAO Hua, et al. J Build Mater (in Chinese), 2021, 24(6): 1200–1207.
- [4] SOMARATHNA H, RAMAN S N, MOHOTTI D, et al. Behaviour of concrete specimens retrofitted with bio-based polyurethane coatings under dynamic loads[J]. Constr Build Mater, 2021, 270(8): 121860.
- [5] 于晶晶, 赵文杰, 王德亮, 等. 液-固两相流环境中环氧树脂抗冲刷磨损研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(6): 594–601.
YU Jingjing, ZHAO Wenjie, WANG Deliang, et al. Mater Chin (in Chinese), 2019, 38(6): 594–601.
- [6] 李世宇, 王玉龙, 刘志勇, 等. 养护条件与聚灰比对增韧水性环氧水泥基涂层性能的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1621–1628.
LI Shiyu, WANG Yulong, LIU Zhiyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(11): 1621–1628.
- [7] GARBACZ A, PIOTROWSKI T, Courard L, et al. On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis[J]. Constr Build Mater, 2017, 134(1): 311–323.
- [8] 刘志伟, 张雷, 王中林, 等. 水性环氧砂浆修复混凝土的黏接界面性能[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 256–261.
LIU Zhiwei, ZHANG Lei, WANG Zhonglin, et al. J Ground Improv (in Chinese), 2021, 3(3): 256–261.
- [9] 刘方, 徐玲玲, 唐明述. 黏结界面的粗糙度和潮湿程度对环氧修补砂浆修补效果的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 36–41.
LIU Fang, XU Lingling, TANG Mingshu. J Nanjing Univ Technol (in Chinese), 2013, 35(5): 36–41.
- [10] 刘娜, 刘玉亭, 周进俊, 等. 不同聚合物体系在潮湿基面的粘结性研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(9): 56–59.
LIU Na, LIU Yuting, ZHOU Jinjun, et al. New Build Mater (in Chinese), 2017, 44(9): 56–59.
- [11] KRZYWIŃSKI K, SADOWSKI Ł, ŻAK A. The effect of texturing of the surface of concrete substrate on the pull-off strength of epoxy resin coating[J]. Coatings, 2019, 9(2): 143.
- [12] CHOWANIEC A, SADOWSKI Ł, ŻAK A. The chemical and microstructural analysis of the adhesive properties of epoxy resin coatings modified using waste glass powder[J]. Appl Surf Sci, 2020, 504(28): 144373.
- [13] JKP A, MIN O. The effect of different exposure conditions on the pull-off strength of various epoxy resins - ScienceDirect[J]. J Build Eng, 2021, 38: 102223.
- [14] Shin H C, Miyauchi H, Tanaka K. An experimental study of fatigue resistance in epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the temperature effect[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(3): 1316–1324.
- [15] 熊小斌. 寒冷地区环氧砂浆—混凝土界面性能演化规律试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
XIONG Xiaobin. Experimental study on evolution law of epoxy mortar-concrete interface performance in cold region (in Chinese, dissertation). Xian: Xi'an University of Technology, 2021.
- [16] 高鹏, 陈阳, 黄浩良, 等. 干燥环境下混凝土内部损伤的量化[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 312–322.
GAO Peng, CHEN Yang, HUANG Haoliang, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 312–322.
- [17] 冯璐, 陈徐东, 张锦华, 等. 基于声发射技术的非标准自密实混凝土三点弯曲梁动态断裂特性[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 630–640.
FENG Lu, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Acta Mater Compos Sin (in Chinese), 2021, 38(2): 630–640.
- [18] TANG J, BAI Y, CHEN X. An investigation of inorganic fillers on rheological properties and tensile strength of epoxy repair coating using mixture design method[J]. Constr Build Mater, 2021, 307(8): 124866.
- [19] OHNO K, OHSTU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(12): 2339–2346.
- [20] 郭玉柱, 陈徐东, 胡良鹏, 等. 花岗岩-喷射混凝土梁损伤的声发射可视化表征[J]. 哈尔滨工业大学学报: 2022, 54(8): 90–99.
GUO Yuzhu, CHEN Xudong, HU Liangpeng, et al. J Harbin Inst Technol (in Chinese), 2022, 54(8): 90–99.
- [21] SHIOTANI T. Evaluation of long-term stability for rock slope by means of acoustic emission technique[J]. NDT&E Int, 2006, 39(3): 217–228.
- [22] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, PUZZI S. From criticality to final collapse: evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0[J]. Chaos Solitons Fractals, 2009, 41(2): 843–853.
- [23] SHAH S G, KISHEN J C. Use of acoustic emissions in flexural fatigue crack growth studies on concrete[J]. Eng Fract Mech, 2012, 87: 36–47.
- [24] OHNO K, UJI K, UENO A, et al. Fracture process zone in notched concrete beam under three-point bending by acoustic emission[J]. Constr Build Mater, 2014, 67(30): 139–145.