【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

复合梁张开型反射开裂行为声发射特征及损伤表征

王威娜^{1,2}, 周圣雄¹, 秦煜^{1,3}, 蔡盛辉¹

1) 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2) 重庆交通大学交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074; 3) 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023

摘要: 为探究沥青加铺层张开型反射裂缝的发展过程, 开展了水泥混凝土加铺沥青层的复合梁三点弯曲试验研究, 采用声发射技术对复合梁的损伤过程进行动态监测, 利用开源数字图像软件 Ncorr 获取损伤过程的水平向应变场, 以荷载、声发射(acoustic emission, AE)振幅、AE 振铃计数和 AE 能量研究复合梁的损伤过程. 试验结果表明, AE 技术对沥青加铺层内部微裂缝及宏观裂缝的发展均具有良好的识别效果. 基于 AE 参数, 可将张开型反射开裂过程划分为静寂期、上升期、发展期和残余期 4 个阶段. 静寂期基本没有 AE 信号; 上升期和发展期损伤快速增长, 表现为 AE 信号密集且活跃, 与荷载曲线具有良好的一致性, 呈现出单峰型特征; 残余期复合梁已临近破坏, 损伤趋于平缓. 张开型反射裂缝扩展过程先沿着接缝两侧, 以多裂缝的形式发展, 随后其中一条裂缝发展成主裂缝, 并持续垂直向上扩展, 次裂缝进入停滞状态. 研究结果可为反射开裂行为分析提供参考.

关键词: 沥青混合料; 声发射; 张开型反射裂缝; 加铺; 损伤评估; 三点弯曲; 复合梁

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.04393

Acoustic emission characteristics and damage characterization of opening-mode reflection cracking behavior of composite beams

WANG Weina^{1,2}, ZHOU Shengxiong¹, QIN Yu^{1,3}, and CAI Shenghui¹

1) School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China

2) National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China

3) CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chongqing 400023, P. R. China

Abstract: In order to explore the cracking behavior of opening-mode reflective cracks in asphalt overlays, we carry out the three-point bending test of composite beams with cement overlay asphalt layer. We quantitatively evaluate the damage based on the acoustic emission (AE) characteristic parameters. Firstly, we dynamically monitor the damage process of composite beams using AE technique, then, analyze the horizontal strain of the damage process through open source digital imaging software Ncorr, and finally, study the damage process of the composite beam by AE amplitude, AE ringing counts and AE energy. The test results show that AE technology has a good recognition effect

Received: 2020-06-15; **Accepted:** 2020-10-21; **Online (CNKI):** 2021-06-28

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52078091, 51978114); Chongqing Natural Science Foundation (cstc2020jcyj-msxmX0624)

Corresponding author: Senior engineer QIN Yu. E-mail: qybridge@163.com

Citation: WANG Weina, ZHOU Shengxiong, QIN Yu, et al. Acoustic emission characteristics and damage characterization of opening-mode reflection cracking behavior of composite beams [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(4): 393-399. (in Chinese)

on the development of micro-cracks and macro-cracks in the asphalt overlay. According to the AE parameters, the opening-mode reflection cracking process can be divided into four stages: silent period, ascending period, development period and residual period. There is basically no AE signal in the silent period. In the ascending and developing periods, the damage increases rapidly, showing that the AE signal is dense and active, which is consistent with the load curve, showing a single-peak type characteristic. In the residual period, the composite beam is approaching failure. The damage tends to be gentle. Opening-mode reflective cracks firstly spread along both sides of the joint, in a multi-fracture development form, and then one of the cracks develops into a main crack and continues to extend vertically upward, and the secondary crack enters a stagnation state. We propose a method for characterizing damage evolution based on the amount of AE ringing counts damage of the opening-mode reflection cracking behavior of composited beams. It can provide a reference for the analysis of reflection cracking behavior.

Key words: asphalt mixture; acoustic emission (AE); opening-mode reflective crack; overlay; damage assessment; three-point bending; composite beam

旧水泥路面加铺沥青混凝土是实际工程中常用的旧路修复方法,但旧水泥路面通常存在大量的接裂缝,在外荷载作用下,位于接裂缝上方的加铺层极易出现反射裂缝^[1-2].有研究表明,张开型反射裂缝在反射裂缝的萌生阶段起主导作用,即弯拉应力是诱导反射裂缝萌生的主要因素^[3].因此,开展张开型反射裂缝的相关研究,对于掌握沥青加铺层反射裂缝形成及损伤演化过程有重要意义.

以往关于反射裂缝的主要分析指标较粗糙和主观,如裂缝长度与宽度.声发射(acoustic emission, AE)作为一种新型无损检测技术,对材料内部裂缝发展变化识别敏感,可用于监测沥青加铺层内部的裂缝发展^[4].目前,已有研究人员开展基于 AE 技术的沥青混合料研究. ZHE 等^[5]研究认为声发射特征参数对沥青混合料的氧化老化程度识别敏感. BEHNIA 等^[6]提出了基于声发射技术的沥青混合料低温开裂评价方法. JIAO 等^[7-8]研究认为 AE 能量对透水沥青试件的损伤识别效果理想,且能有效识别沥青混合料的不同断裂模式.符刘旭^[9]验证了 AE 技术应用于透水沥青混合料中的可行性.张萌谔^[10]通过振幅、能量和振铃计数等 AE 参数表征了沥青混合料断裂过程.以上研究表明 AE 参数能很好地反应沥青混合料的内部裂缝发展情况.还有研究开展了基于 AE 参数的损伤研究.杨永杰等^[11]基于 AE 累计振铃计数描述了灰岩在三轴压缩下的损伤过程.袁明等^[12]通过三次多项式模型建立 AE 参数与应力水平之间的定量关系.王兵等^[13]通过事件计数、振铃计数、能率和幅频极值等 AE 参数多角度分析了三点弯曲作用下混凝土梁损伤演化特征.基于 AE 参数的损伤演化研究已成功应用于混凝土和岩石领域.由上述研究可知,通过 AE 特征参数

研究沥青加铺层张开型反射开裂行为的损伤演化过程具有可行性,AE 技术可有效监测沥青加铺层内部裂缝发展的动态过程,为反射开裂行为的定量分析与表征研究提供了新思路.为此,本研究开展了基于 AE 技术的带缝水泥混凝土板加铺沥青层结构的三点弯曲试验,同时结合数字图像技术对水平方向的应变场进行分析,引入 AE 特征参数定性分析复合梁的破坏过程,基于以累计 AE 参数为参量的损伤变量,探究复合梁张开型反射裂缝的损伤演化规律.

1 试验设计与方法

1.1 试件制备

复合梁试件尺寸为 300 mm × 100 mm × 100 mm;水泥混凝土板厚 50 mm;水泥、集料、砂和减水剂采用的质量比(配合比)为 364:1 238:648:5.05;沥青混凝土加铺层厚 50 mm;根据实际路面行车荷载与接裂缝的关系,为模拟张开型反射裂缝,水泥混凝土板采用贯穿型接缝,置于水泥混凝土板中部,预设裂缝宽度为 5 mm^[2,14-15](图 1).加铺层的沥青混合料采用 AC-13,选用级配中值,通过马歇尔试验得最佳沥青质量分数为 4.9%.

1.2 试验平台及参数

基于声发射技术的三点弯曲试验系统如图 2.试验系统有两部分.第 1 部分是 MTS 万能试验机的加载及采集系统,主要采集参数为荷载、挠度和时间;支点距离为 250 mm,加载速率为 0.05 mm/s,试验温度为 25 °C^[2].第 2 部分是北京声华声发射监测系统,参考现有研究在沥青混合料中的声发射采集参数设置^[9-10],声发射信号采集的门限值设为 40

图1 复合梁试件示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of composite beam
(unit: mm)

dB, 采集频率为22 ~ 220 kHz, 采样频率为5 MHz. 试验过程中通过索尼 HDR-PJ790E 相机进行图像采集, 然后通过基于 Matlab 的开源数字图像软件 Ncorr 获取开裂过程的水平向应变场.

图2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

1.3 试验步骤

1) 布设声发射仪器和笔记本电脑, 然后将耦合剂均匀涂抹在传感器上, 黏贴在复合梁试件接缝上方的沥青加铺层表面.

2) 将试件对正放置于 MTS 万能试验机的支座上, 然后将试验机压头对正复合梁试件预设接缝上方, 将压力机压头加载至与试件表面接触.

3) 启动声发射软件, 设置参数, 在试验开始前进行断铅试验, 检查各通道信号是否接收正常.

4) MTS 万能试验机选用位移控制加载, 加载速率设为 0.05 mm/s, 同步启动试验机和声发射监测软件, 至试件破坏时停止试验.

2 基于声发射特征参数的损伤演化分析

本研究选用以往试验研究中常用的声发射参数 (振幅、振铃计数和能量) 对张开型反射开裂行为

进行分析^[9-11]. 试验共设3组平行试验 (A-1、A-2和A-3), 每组均安装两个传感器, 6个传感器数据变化规律整体基本一致. 限于篇幅, 仅选取A-1组的1号传感器数据进行分析. 绘制AE振幅、AE振铃计数、AE能量、荷载与挠度的关系曲线 (图3), 分析复合梁损伤过程中声发射参数的变化及响应关系, 将其损伤过程划分为如下4个阶段.

静寂期 I: 由荷载-挠度曲线可知, 此阶段属于弹性变形阶段, 荷载主要由沥青胶浆承受, 跨中上半部沥青加铺层处于弹性压密状态, 跨中下半部的沥青加铺层处于弹性弯拉状态, 内部没有或仅有极少的微裂缝产生, 与之对应的也基本没有声发射信号产生.

上升期 II: 此阶段对应于荷载-挠度曲线的塑性变形阶段, 受力主体不再是沥青胶浆. 靠近压头附近的集料颗粒相互挤压, 承受压缩荷载. 接缝上方的沥青加铺层因弯拉作用产生不可逆的塑性变形, 加铺层内部萌生大量的微裂缝, 并不断持续扩展, 从而释放出大量的能量, 导致 AE 信号密集出现, 呈现明显的上升趋势. 荷载和 AE 振幅、AE 能量和 AE 振铃计数的极值也基本出现在此阶段, 且几乎是同一时间出现, 呈现出单峰型特征, 表明损伤正在快速增加.

发展期 III: 达到荷载峰值后, 荷载-挠度曲线开始下降, 说明加铺层内部的微裂缝已相互连通, 形成宏观裂缝. 该时期内 AE 参数持续密集产生, 表现为出现较多的声发射信号突变点, 表明损伤仍在快速增长. 发展期荷载和 AE 参数幅度整体上表现为逐渐下降的趋势, 至阶段末时, 3种 AE 参数均呈现较大幅度的下降, 荷载下降速度也逐渐平缓.

残余期 IV: 前3个阶段损伤程度已经很高, 复合梁已临近破坏, 故该阶段损伤增长趋于平缓. 荷载和 AE 参数均处于较低水平, 偶尔出现的声发射信号推测为靠近压头周围的集料相互挤压、破碎所产生的少量能量, 致使零星的声发射信号出现.

根据声发射参数、荷载与挠度的变化规律, 将复合梁张开型反射裂缝的损伤演化规律总结如下.

1) 整体而言, 复合梁三点弯曲下张开型反射开裂过程可划分为4阶段: 静寂期、上升期、发展期和残余期. 沥青加铺层是由集料、空隙和沥青胶浆组成的三相复合材料, 是一种典型的非均质、不连续的颗粒性质的材料^[16]. 静寂期主要沥青胶浆承受荷载, 处于弹性变形阶段, AE 信号稀少. 此后的3个时期均为集料和沥青胶浆共同承受荷载,

图3 三点弯曲试验振幅、AE 振铃计数、AE 能量、荷载与挠度的关系

Fig. 3 AE amplitude, AE ringing counts, AE energy and load versus deflection of three-point bending test

AE 参数呈现出明显的阶段特征。

2) AE 振幅、AE 振铃计数和 AE 能量柱状图与荷载曲线对应良好, 均呈现出明显的“单峰型”特征, 表明声发射参数能有效的反映出沥青加铺层内部微裂缝的发展情况。但 AE 能量数值波动大, 作为分析参数效果不太理想。

3) 在上升期 AE 参数与荷载曲线显示出良好的一致性, 且荷载极值与 AE 参数极值基本同一时间出现, 这一特征对于张开型反射裂缝的出现预警研究具有重要意义。

3 结合二维数字图像技术的损伤分析

为研究复合梁张开型反射开裂过程中沥青层层底拉伸位移及加铺层断裂演化路径, 通过开源二维数字图像处理软件 Ncorr 对复合梁断裂过程的图像进行分析, 获取水平方向的应变场随挠度变化关系 (图4)。由图4 可知, 从静寂期到上升期 (图4 (a) 和(b)), 主要变化为压头和接缝周围应变的局部增大。发展期 (图4 (c)) 是裂缝发展的活跃阶段, 接缝上方的加铺层处于多裂缝发展时期, 可观测到接缝两侧正形成两条裂缝, 应变大的为主裂缝, 应变小的是次裂缝。AE 参数以密集和较高数值的形式出现, 与复合梁弯曲开裂的响应关系良好, 能够较好的反应裂缝发展情况。残余期 (图4 (d)) 时次裂缝处于停滞状态, 基本不再扩展。荷载集中作用于薄弱侧 (主裂缝), 致使主裂缝持续垂直向上扩展, 并导致复合梁的最终弯曲拉裂。同时由图4 (d) 可知, 由于跨中上半部分的加铺层处于受压状态, 即便复合梁已失去承载能力, 宏观裂缝已贯通, 但仅凭外观仍难以分辨裂缝是否产生。因此以往反射裂缝研究中所采用的裂缝长度和宽度等指标, 不适合用于进行张开型反射裂缝分析。

由于3种 AE 参数变化规律基本相同, 在此选取 AE 振铃计数进行分析。基于水平向应变云图, 获取沥青加铺层层底位移数据, 绘制加铺层层底拉伸位移、AE 振铃计数与挠度的关系曲线 (图5)。由图5 可知, 层底水平应变随着挠度的增加而增加, 挠度在6 mm 前, 即静寂期和上升期, 层底拉伸位移以较为缓慢的速度线性增加; 挠度大于6 mm 后, 即发展期和残余期, 增长速度大幅增加, 斜率为上一阶段的4.33 倍。

4 基于损伤量的损伤演化分析

4.1 损伤评估方法

目前, 尚未发现关于沥青混凝土加铺层的反射开裂行为损伤研究, 文献[11, 17] 研究表明, 以 AE 振铃计数或 AE 能量为特征参数, 能较好地反应材料损伤破坏情况, 因此, 本研究以 AE 累计振铃

图4 不同挠度下的横向位移分布 (单位: mm)

Fig. 4 Lateral displacement under different deflections (unit: mm)

计数及 AE 累计能量为特征参数, 对张开型反射裂缝的损伤演化特性进行描述^[18,19].

损伤变量 D ^[20] 定义为

$$D = A_d/A \quad (1)$$

其中, A_d 为材料发生损伤后, 即裂缝产生后的有效承载面积; A 为材料初始无损伤时的承载面积; 假

图5 AE 振铃计数、层底拉伸位移与挠度的关系

Fig. 5 Relationship among AE ringing counts, bottom layer tensile displacement, and deflection

设初始时 $D = 1$ (未加载时), 破坏后 $D = 0$ (加载破坏后).

引入声发射参数在岩石损伤分析中的定义^[11,17], 定义沥青加铺层没有损伤时完全破坏的累计 AE 参数 (振铃计数、能量) 为 N_0 , 则单位面积微元破坏时的 AE 参数 N_w 为

$$N_w = N_0/A \quad (2)$$

当损伤面积达 A_d 时, 对应的累计 AE 参数 N_d 为

$$N_d = N_w A_d = N_0 A_d/A \quad (3)$$

将 A_d 代入式(1), 可得到以累计 AE 振参数为参量的损伤变量为

$$D = N_d/N_0 \quad (4)$$

4.2 损伤演化分析

通过式(4)分别得到以累计 AE 振铃计数和累计 AE 能量为特征参量的损伤变量. 为方便对比, 将横向挠度坐标进行归一化处理. 绘制三点弯曲条件下复合梁试件的损伤变量与挠度关系曲线, 如图6. 由图6可见, 三点弯曲加载条件下, 复合梁张开型反射开裂行为的损伤演化过程可划分为3个时期. 基于损伤变量划分的损伤演化过程与 AE 参数所划分的4个时期不同, 以损伤变量划分的损伤突增期合并了 AE 参数的上升期和发展期, 呈现出一个完整和渐近的损伤突增阶段. 损伤平静期 I: 加铺层内部几乎没有损伤产生. 损伤突增期 II: 此阶段损伤变量呈线性急剧增长, 持续范围约是最大挠度的 5% ~ 60%, 却有 85% 以上的损伤在该阶段产生. 损伤平稳期 III: 相比上一阶段, 该时期损伤

图 6 荷载-损伤变量-挠度曲线

Fig. 6 Relationship among load, damage variable, and deflection

变量增速大幅放缓,约 10% 的损伤和 40% 的变形(挠度)在此阶段产生。

从复合梁的弯曲损伤演化过程可知,张开型反射裂缝的萌生、扩展至贯通,可视为一渐进发展演化的过程^[11]。同时由于 AE 能量参数的数值波动幅度过大,常出现跨越数量级的波动,导致能量损伤量曲线呈现出阶梯型的上升趋势,无法较好地反映损伤演化过程。因此相比于能量损伤量,以累计振铃计数为参量的损伤变量能够更好的反应这一渐进过程。同时由于损伤破坏过程是连续演化的过程,不存在绝对的损伤界限,具体的阶段划分指标还待研究。

5 结 论

结合声发射技术和数字图像技术,对复合梁在三点弯曲作用下的张开型反射开裂行为的损伤演化过程进行试验研究,可知:

1) 基于声发射参数、荷载与挠度变化规律将复合梁的张开型反射开裂过程分为 4 阶段:静寂期、上升期、发展期和残余期。静寂期基本没有 AE 信号产生,处于弹性变形阶段;上升期和发展期 AE 信号活跃,呈现单峰型特征,损伤急剧增长;发展期整体上呈现下降趋势,过渡至残余期,AE 信号稀少,损伤趋于平缓。

2) AE 振幅、AE 振铃计数和 AE 能量对沥青加铺层内部微裂缝及宏观裂缝的发展识别敏感,不可逆的塑性变形大量产生时,AE 信号表现活跃,荷载极值与声发射参数极值基本同一时间出现。

3) 张开型反射裂缝的扩展路径首先沿着接缝两侧,以多裂缝的形式发展,随后其中一条裂缝发展成主裂缝并持续垂直向上扩展,其他的次裂缝进入停滞状态。

4) 提出基于振铃损伤量的复合梁张开型反射开裂行为损伤演化表征方法,演化过程为:损伤平静期、损伤突增期和损伤平缓期。以声发射累计振铃计数为参量的损伤变量能较好地表征反射裂缝的萌生、扩展和贯通的渐进演化过程。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078091, 51978114);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2020jcyj-msxmX0624)

作者简介:王威娜(1983—),重庆交通大学副教授、博士。研究方向:路面结构设计理论。E-mail: wwn0816@yeah.net

引 文:王威娜,周圣雄,秦煜,等.复合梁张开型反射开裂行为声发射特征及损伤表征[J].深圳大学学报理工版,2021,38(4):393-399.

参考文献 / References:

- [1] 卢佳. 复合式路面强加筋防裂夹层结构分析及性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
LU Jia. The structure analysis and performance research on composite pavement with anti-cracking interlayer [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [2] SUN Y, YAN T, WU C, et al. Analysis of the fatigue-crack propagation process of the stress-absorption layer of composite pavement based on reliability [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2093.
- [3] 李盛,刘朝晖,李宇峙. 刚柔复合式路面沥青层荷载疲劳损伤特性及开裂机理[J]. 中南大学学报自然科学版, 2013, 44(9): 3857-3862.
LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Fatigue damage characteristics and cracking mechanism of asphalt concrete layer of rigid-flexible composite pavement under load [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2013, 44(9): 3857-3862. (in Chinese)
- [4] 倪迎鸽,杨宇,吕毅,等. 声发射在复合材料损伤机理研究的应用现状及发展趋势[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(8): 115-126.
NI Yingge, YANG Yu, LÜ Yi, et al. Application status and development trend of acoustic emission in research on damage mechanism of composite materials [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019 (8): 115-126. (in Chinese)
- [5] ZHE S, BEHZAD B, WILLIAM G B, et al. Acoustic emission quantitative evaluation of rejuvenators to restore embrittlement temperatures to oxidized asphalt mixtures

- [J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 913-923.
- [6] BEHNIA B, BUTTLAR W G, REIS H M, et al. Nondestructive low-temperature cracking characterization of asphalt materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(5): 04016294.
- [7] JIAO Y, FU L, SHAN W, et al. Damage fracture characterization of pervious asphalt considering temperature effect based on acoustic emission parameters [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210: 147-159.
- [8] JIAO Y, ZHANG Y, ZHANG M, et al. Investigation of fracture modes in pervious asphalt under splitting and compression based on acoustic emission monitoring [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 211: 209-220.
- [9] 符刘旭. 高黏改性型透水沥青混合料路用性能及声发射特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- FU Liuxu. Study on road performance and acoustic emission characteristics of high viscosity modified pervious asphalt mixture [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [10] 张萌谔. 基于声发射参数的沥青混合料断裂特性表征方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- ZHANG Mengdeng. Fracture characterization of asphalt Mixtures based on acoustic emission parameters [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [11] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98-104.
- YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104. (in Chinese)
- [12] 袁明, 黄练, 彭卓, 等. 基于声发射技术的混凝土梁桥弯剪受力状态下损伤试验[J]. 长安大学学报自然科学版, 2019, 39(2): 73-81.
- YUAN Ming, HUANG Lian, PENG Zhuo, et al. Experimental investigation of static damage of concrete beam under bending shear based on acoustic emission technology [J]. Journal of Chang'an University Natural Science, 2019, 39(2): 73-81. (in Chinese)
- [13] 王兵, 刘泽良, 卓晓晖, 等. 基于声发射的三点弯曲混凝土梁损伤演化表征[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3663-3669.
- WANG Bing, LIU Zeliang, ZHUO Xiaohui, et al. Damage evolution characterization of concrete beams under three-point bending based on acoustic emission [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(11): 3663-3669. (in Chinese)
- [14] 钱劲松, 陈欣然, 郑毅, 等. 基于MMLS3设备的土工布防治反射裂缝效果研究[J]. 同济大学学报自然科学版, 2018, 46(8): 1042-1048.
- QIAN Jinsong, CHEN Xinran, ZHENG Yi, et al. MMLS3-based on anti-reflective cracking performance of geotextile [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2018, 46(8): 1042-1048. (in Chinese)
- [15] 毛青洋. 基于DEM的旧水泥混凝土路面加铺ATB层破坏模式与评价方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- MAO Qingyang. Destruction mode and evaluation method of asphalt treated base layer on old cement concrete pavement based on discrete element [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 肖凯. 沥青混合料集料颗粒行为及区域划分研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- XIAO Kai. Aggregates behavior analysis and district division of asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [17] 张强星, 刘建锋, 曾寅, 等. 膏岩三轴压缩声发射特征及损伤演化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1323-1330.
- ZHANG Qiangxing, LIU Jianfeng, ZENG Yin, et al. Investigation on deformation characteristics and damage evolution of gypsum rock under triaxial loading test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1323-1330. (in Chinese)
- [18] 刘海霞, 侯斌, 王刚, 等. 基于声发射参数及分形理论的岩石损伤模型[J]. 中国科技论文, 2018, 13(22): 94-98.
- LIU Haixia, HOU Bin, WANG Gang, et al. Characteristics of rock damage based on acoustic emission parameters and fractal theory [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(22): 94-98. (in Chinese)
- [19] 程爱平, 戴顺意, 张玉山, 等. 胶结充填体损伤演化尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 3053-3060.
- CHENGAiping, DAISHunyi, ZHANGYushan, et al. Study on size effect of damage evolution of cemented backfill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Suppl.1): 3053-3060. (in Chinese)
- [20] KACHANOV L M. Time of the rupture process under creep conditions [J]. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk, 1958, 8: 26-31.

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之隼】