

文章编号:1673-2049(2018)05-0233-08

基于压电主动传感技术的高温后 PVA-ECC 梁冲击损伤监测研究

齐宝欣^{1,2,3}, 李 茉⁴, 刘 东³, 宋钢兵³

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 休斯顿大学 机械工程学院, 德克萨斯 休斯顿 TX77204; 4. 加利福尼亚大学欧文分校 亨利萨缪尔工程学院, 加利福尼亚 欧文 CA92697)

摘要:研究了低速冲击荷载作用下具有高温损伤的聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)梁的损伤特征,对比分析不同温度损伤与室温下的 PVA-ECC 梁,在同一跌落高度和落锤质量上进行了一系列的落锤低速冲击试验,模拟冲击能量对梁的影响结果。采用压电陶瓷智能骨料传感器的主动监测方法和扫频波信号,监测落锤低速冲击作用下 PVA-ECC 梁的裂纹产生、发展、断裂全过程与波衰减的规律。基于小波包能量法分析重复冲击试验下的 PVA-ECC 梁裂缝发展演化。建立了 PVA-ECC 梁三维有限元模型,通过有限元分析得出 300 ℃ 高温加热后的 PVA-ECC 梁低速冲击裂纹开展全过程,并与实测结果进行对比。结果表明:高温损伤造成 PVA-ECC 梁的抗冲击性能减弱;室温下的 PVA-ECC 梁有一定抗冲击能力,但当温度达到 PVA 纤维的熔点(230 ℃)时, PVA-ECC 梁中的 PVA 纤维消失,产生孔隙,形成素水泥砂浆梁,不具有抗冲击能力;高温损伤造成 PVA-ECC 丧失了高强度、韧性、耐疲劳的能力特性。

关键词:高温损伤;PVA-ECC 梁;冲击性能;小波包分析;压电陶瓷智能骨料;健康监测

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Research on Impact Damage Monitoring of PVA-ECC Beam After High Temperature Based on Piezoelectric Active Sensing Technology

QI Bao-xin^{1,2,3}, LI Mo⁴, LIU Dong³, SONG Gang-bing³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. College of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston TX77204, Texas, USA; 4. The Henry Samueli School of Engineering, University of California, Irvine, Irvine CA92697, California, USA)

Abstract: The damage characteristics of PVA-ECC beams with high temperature damage under low velocity impact load were studied. A series of low speed impact tests were carried out to simulate the impact energy on the beam by comparing the temperature damage with the PVA-ECC beam at room temperature, the same drop height and drop hammer quality. The rule of crack evolution and wave attenuation were detected by the active detection method and frequency sweep signal of piezoelectric ceramic intelligent aggregate of PVA-ECC beam under falling hammer and low velocity impact. The PVA-ECC beam crack development quantization based on

收稿日期:2018-06-15

基金项目:沈阳市科学技术计划项目(17-231-1-89);海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817);

沈阳建筑大学博士后基金重点项目(SJZUBSH201706)

作者简介:齐宝欣(1982-),男,吉林双辽人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:bxqi@sjzu.edu.cn。

the wavelet packet energy analysis repeated impact test. The three dimensional finite element of PVA-ECC beam was established. Based on the finite element analysis method, the whole process of crack development of PVA-ECC beam after 300 °C high temperature was obtained. The results show that the impact resistance of PVA-ECC beam is weakened by high temperature damage, and the PVA-ECC beam has a certain anti-impact ability at ambient temperature, but when the temperature is 230 °C, it reaches the melting point of PVA fiber, the PVA fiber in PVA-ECC beam disappears, the pore is produced, and the cement mortar beam is formed. It does not have the ability of resisting impact, so high temperature damage results take the strength, toughness and fatigue resistance in PVA-ECC away.

Key words: high-temperature damage; PVA-ECC beam; impact performance; wavelet packet analysis; piezoelectric ceramic intelligent aggregate; structural health monitoring

0 引言

混凝土是世界上应用广泛、用量最大的建筑材料。混凝土应用于基础建设时仍存在不足之处,主要包括:极端荷载作用下的脆性破坏,如开裂、剥落冲击、爆炸荷载作用下的破碎;正常工作荷载下的破坏,混凝土开裂引发钢筋锈蚀造成结构耐久性不足。此外,针对钢筋混凝土结构的可持续性问题,未来混凝土材料需要满足高延展性、高耐久性以及可持续性。当前,材料复合化是建筑材料发展的重要途径,在“均匀配筋”的理念指导下,产生了纤维增强水泥基复合材料(ECC),显著改善了混凝土材料的韧性、耐久性和抗冲击性。20 世纪 90 年代初,美国密歇根大学 Li 等^[1]提出纤维增强水泥基复合材料。该种材料在基础设施建设中具有独特的开裂特性,即具有多点开裂、高韧性、高抗拉应变能力,饱和状态下的多点开裂裂缝间距小于 3 mm^[2]和具有良好的抗剪切性能^[3-8]。ECC 作为一种新型材料被广泛应用于实际工程中,例如桥面板连接、大坝修补和高层建筑抗震组合连梁^[9-11]。ECC 可以提高结构的安全性、耐久性和环境的可持续性,具有广泛的应用前景^[11-12]。近年来,在面对爆炸、冲击等非设计荷载作用时的安全性正日益受到关注,其次生灾害对建筑结构造成严重的破坏事件也屡见报道。聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)在土木工程领域的应用得到广泛的关注和深入研究。PVA-ECC 材料具有良好的抗冲击性能^[12-15],然而对火灾发生后 PVA-ECC 材料性能的研究较少,主要集中在火灾后 PVA 纤维含量比率与温度的对应关系^[16-17],且 PVA 纤维耐热性较差,作为结构材料,高温后的性能研究尤其重要,特别是对具有高温损伤的 PVA-ECC 梁抗冲击性能及冲击损伤裂缝的形成和

发展监测缺乏详细的研究。

基于上述原因,本文研究了具有高温损伤的 PVA-ECC 梁在低速冲击下的损伤特性。在不同高温损伤工况下,采用相同落锤高度和相同落锤质量进行了一系列的冲击试验。将高温损伤后的 PVA-ECC 梁两端横截面中心处粘贴一对压电陶瓷智能骨料传感器,将一端压电陶瓷智能骨料传感器作为驱动器,另一端压电陶瓷智能骨料传感器作为接收器,通过监测衰减的传播信号诊断裂纹的演化,获得 PVA-ECC 梁的抗冲击性能。此外,基于小波包的能量法分析压电陶瓷智能骨料传感器接收的信号,可为重复落锤低速冲击的 PVA-ECC 梁的裂纹演化提供一个冲击损伤定量指标。

1 基于小波包的信号能量分析

1.1 基本原理

小波包分析在信号处理、图像处理、量子力学、理论物理等领域有着广泛的应用。本文研究了基于小波损伤特征在结构健康监测中的应用^[14,18]。小波包分解(WPD)是从小波分解(WD)扩展而来的。小波分解只将频率轴锁定到低频,小波包分解是一个广义谐波^[18]保持完好的高频频段。小波包分解广泛应用于信号处理的领域^[19]。

1.2 分析方法

通过所有小波包的能量总和来计算信号的总能量,信号的总能量可以被表达成:传感器信号 S 通过 n 级小波包分解为 2^n 个信号子集 $\{X_1, X_2, \dots, X_{2^n}\}$,分解子集 X_j (j 为频带, $j=1, 2, \dots, 2^n$) 的表达式为

$$X_j = \{X_{j,1}, X_{j,2}, \dots, X_{j,m}\} \quad (1)$$

式中: m 为采样数据的数量。

另外,时间指数分解信号的总能量 E_{ij} 可以表

示为

$$E_{ij} = X_{j,1}^2 + X_{j,2}^2 + \cdots + X_{j,m}^2 \tag{2}$$

因此,分解信号的总能量可以通过所有信号集的求和来计算。信号的总能量 E 可以采用式(3)计算

$$E = \sum_{k=1}^m X_{j,k} \tag{3}$$

本文基于小波包的能量分析方法为获得接收信号的能量值提供了一个简单而有效的途径。基于小波包的不同损伤裂缝信号的能量值可以直接进行比较。

2 试验方案

2.1 高温损伤后的 PVA-ECC 梁制备方法

为了研究高温损伤后 PVA-ECC 梁的抗冲击性能,在实验室中浇筑了 5 根 PVA-ECC 梁。梁的截面尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm,试验试件的组成如图 1 所示。在浇筑 PVA-ECC 梁的过程中使用正方形振动台振捣,并将 PVA-ECC 梁压实进行表面平整处理,将 PVA-ECC 梁养护 28 d。将养护 28 d 后,选取 1 根 PVA-ECC 梁进行室温下落锤低速冲击试验与其他高温损伤后的 PVA-ECC 梁的落锤冲击试验进行对比。剩余其他 4 根 PVA-ECC 梁分别放入加热炉中,将 PVA-ECC 梁分别加热至 100,200,230,300 ℃ 后,将 PVA-ECC 梁试件随炉冷却至室温,时间为 12 h。最后,进行高温损伤后 PVA-ECC 梁落锤低速冲击试验,并与室温下的 PVA-ECC 梁落锤低速冲击试验进行对比。采用美国新泽西州 Med Chem Express(MCE)公司生产的 PVA 纤维、美国标号 C30 的水泥砂浆、白色细沙、粉煤灰、减水剂和水共同搅拌。

2.2 试验步骤

将室温 PVA-ECC 梁和具有高温损伤的 PVA-ECC 梁两端中心处分别粘贴压电陶瓷智能骨料,如图 2 所示。将 PVA-ECC 梁放置在落锤试验装置上进行落锤冲击试验,如图 3 所示。

基于压电陶瓷智能骨料传感器监测裂缝演化过程的数据采集系统如图 4 所示。落锤冲击高度为 1 m,落锤采用比赛标准铅球,其质量为 7.257 kg,进行多次重复落锤冲击加载试验,直到 PVA-ECC 梁断裂,试验工况如表 1 所示。试验 PVA-ECC 梁两端分别固定到 3 个 L 形角钢构成的夹具中,形成两端铰接约束的边界条件,并且防止 PVA-ECC 梁的横向运动。为了更好地观察 PVA-ECC 梁低速冲击

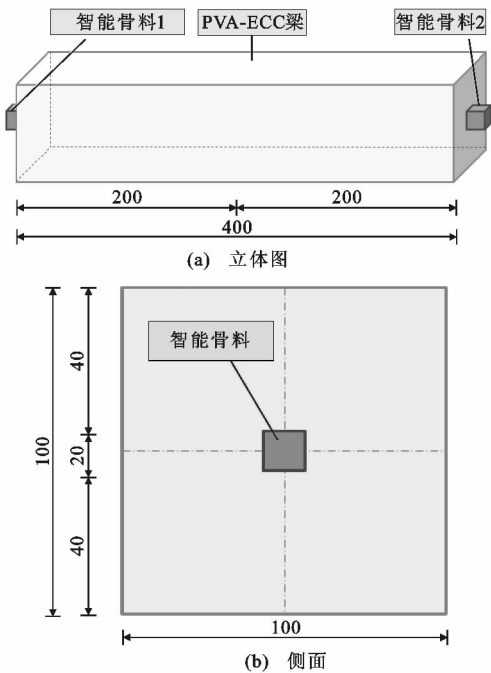


图 1 压电陶瓷智能骨料布置(单位:mm)

Fig. 1 Arrangement of Piezoelectric Ceramic Smart (Unit:mm)



图 2 不同温度加热后 PVA-ECC 梁

Fig. 2 PVA-ECC Beam After Heating at Different Temperatures

损伤裂缝的位置,在梁跨中分别向左右两侧每隔 1 cm 距离标注一格,左右两侧分别标注 3 cm。数据采集系统包括一个 NI-6363 数据采集板、功率放大器和相应的监测信号数据终端。每个落锤冲击试验后,用 2 个压电陶瓷智能骨料传感器进行 PVA-ECC 梁的裂缝监测。初始压电陶瓷智能骨料的传播信号是一个扫频正弦波,参数如表 2 所示。该信号由功率放大器放大 50 倍,通过智能骨料 1 传感器传播。数据采集系统随后记录智能骨料 2 传感器的传播信号响应。数据采集系统中智能骨料 2 传感器

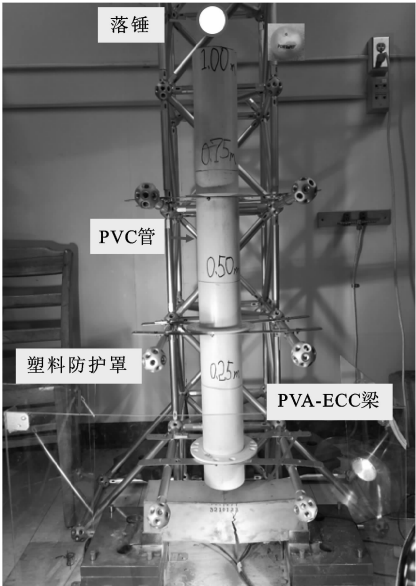


图 3 落锤冲击试验装置

Fig. 3 Drop Hammer Impact Test Device



图 4 落锤冲击试验数据采集系统

Fig. 4 Data Acquisition System of Drop Hammer Impact Test

表 1 试验工况

Tab. 1 Test Conditions

工况	试验梁	温度/℃	落锤质量/kg	落锤高度/m
1	PVA-ECC-1	20	7.257	1.0
2	PVA-ECC-2	100	7.257	1.0
3	PVA-ECC-3	200	7.257	1.0
4	PVA-ECC-4	230	7.257	1.0
5	PVA-ECC-5	300	7.257	1.0

表 2 激励扫频正弦波信号参数

Tab. 2 Parameters of Excitation Sweep Frequency Sine Wave Signal

信号幅值/V	初始频率/Hz	终止频率/kHz	周期/s
10	100	250	0.5

的采样频率为 2 MHz。

3 试验结果与分析

3.1 抗冲击性分析

对室温下的 PVA-ECC 梁和不同高温损伤后的

PVA-ECC 梁分别进行多次落锤低速冲击试验,直至梁完全断裂,结束落锤试验,结果如图 5 所示。

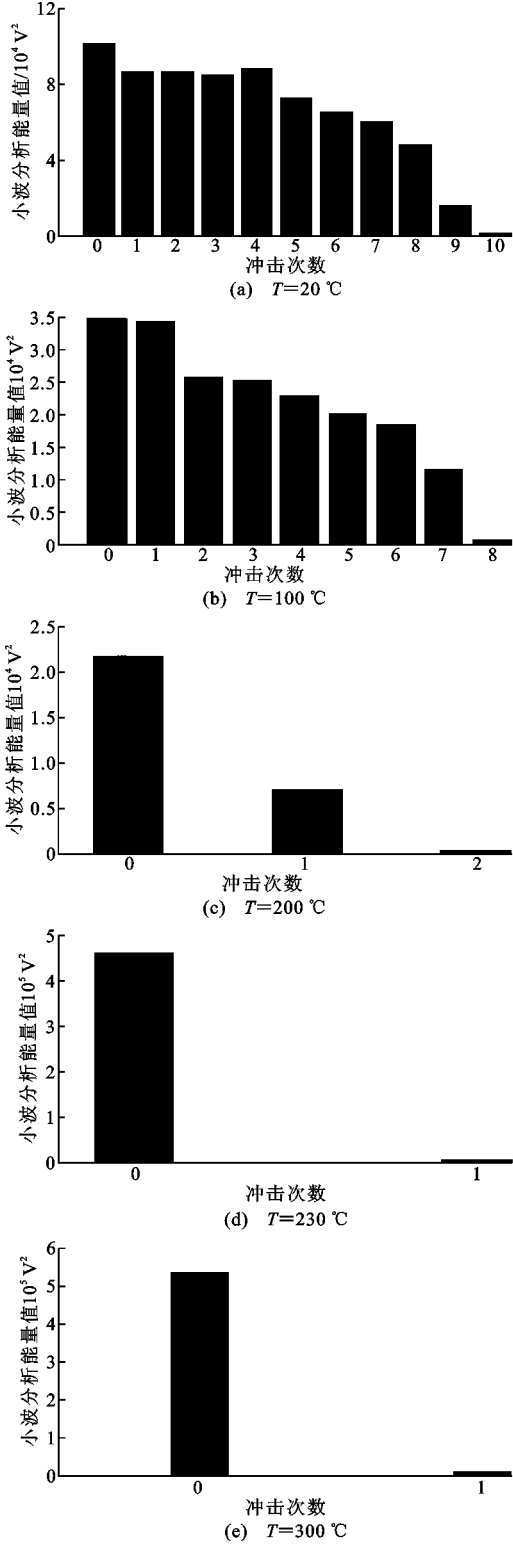


图 5 小波分析能量值与冲击次数的关系

Fig. 5 Relation of Wavelet Analysis Signal Energy Values and Impact Times

当 PVA-ECC-1 梁在室温 20 °C 时,经过 10 次落锤低速冲击后完全断裂;当 PVA-ECC-2 梁加热

至温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,经 12 h 恢复至室温,经过 8 次落锤低速冲击完全断裂;当 PVA-ECC-3 梁加热至温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,经 12 h 恢复至室温,经过 2 次落锤低速冲击后完全断裂;当 PVA-ECC-4 梁加热至温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,经过 1 次低速冲击完全断裂;当 PVA-ECC-5 梁加热至温度 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,经 12 h 恢复至室温,经过 1 次落锤低速冲击后完全断裂。落锤低速冲击试验中,PVA-ECC 梁由智能骨料 2 传感器接收时域信号,基于小波包的信号能量图提供了一个定量的分析,当 PVA-ECC 梁将近断裂时,接收的信号能量损失较大,接近 0,因为应力波不能通过一个断裂的裂缝传播。当 PVA-ECC 梁未开裂时,应力波在 PVA-ECC 材料均匀弹性条件下保持匀速传播,随着传播距离的增加,应力波幅值呈线性衰减;在 PVA-ECC 梁裂缝开展过程中,压电智能骨料输出的信号随着单裂缝深度的增加而呈线性减小。

如图 5(c) 所示,加热温度 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PVA-ECC-3 梁第 1 次冲击后梁没有完全断裂,智能骨料 2 传感器接受时域信号,基于小波包分析后,接收的信号能量为 $0.55\times 10^4\text{ V}^2$,根据试验判断该梁还能够承受 1 次落锤低速冲击作用,最终导致 PVA-ECC-3 梁断裂,接收信号能量接近 0。如图 5(d), (e) 所示,PVA-ECC-3 梁和 PVA-ECC-5 梁落锤低速冲击试验后,分别由智能骨料 2 传感器接收时域信号。可以看出,相比于加热至温度 $T\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 PVA-ECC 梁,所有加热温度 $T\geq 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 PVA-ECC 梁在第 1 次冲击时完全断裂,并没有信号由智能骨料传感器 2 检测响应。

综上所述,加热温度 $T\leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,经 12 h 恢复至室温的 PVA-ECC 梁具有较好的抗冲击性,主要是由于振捣均匀,使得 PVA 纤维在 PVA-ECC 梁内分布均匀,PVA 纤维对水泥、白沙、粉煤灰和水混合均匀搅拌构成的水泥基复合材料内部起到“拉结钢筋”的作用,增强了 PVA-ECC 梁的密实性和抗弯曲变形能力,初始阶段落锤低速冲击作用下,PVA-ECC 梁先沿着梁的跨中受拉区对称均匀地分布微小裂缝,随着冲击次数的增加,跨中冲击点处的裂缝逐渐变大,最后造成 PVA-ECC 梁完全断裂成 2 段。

图 6 为基于压电主动传感技术记录下来相应时间段的裂纹开展过程和由压电陶瓷智能骨料传感器接收到的扫频波时域信号,压电陶瓷智能骨料传感器的扫频波时域信号选取为冲击前、第 3 次冲击、第 8 次冲击以及最后第 10 次冲击的损伤监测时频信号。可以看出压电陶瓷智能骨料传感器接收到的时

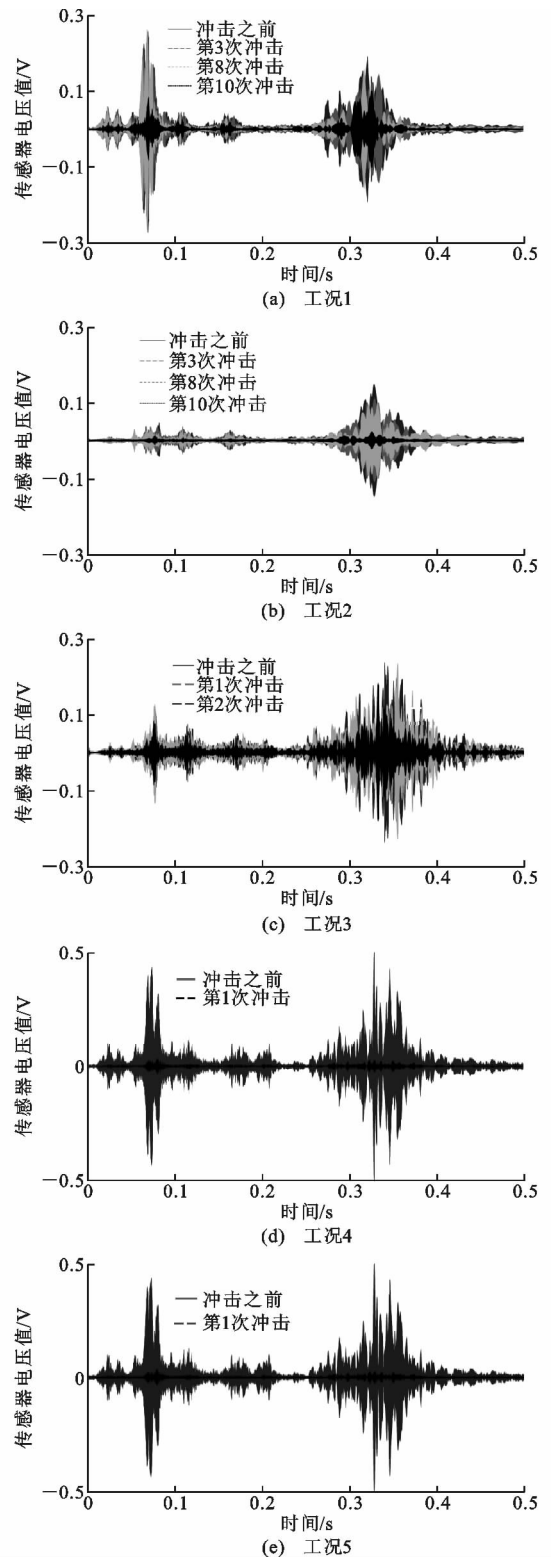


图 6 智能骨料在不同工况下接收的时域信号

Fig. 6 Time-domain Signal Received by Smart Aggregate Under Different Conditions

域信号(压电幅值)随着落锤低速冲击试验次数的增加而减小。因此,采用压电陶瓷智能骨料传感器能够监测到落锤低速冲击裂纹损伤扩展与时域信号的

对应关系,显示了工况 2~5 的监测情况。图 5 与图 6 所描述情况相同。

3.2 低速冲击破坏模式

图 7 为不同温度损伤后 PVA-ECC 梁的内部 PVA 纤维含量及次生孔隙分布。从图 7 可以看出,当加热温度 $T \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PVA-ECC 梁断裂后,其水泥基复合材料内部还含有大量白色的 PVA 纤维;当加热温度 $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PVA-ECC 梁断裂后,其水泥基复合材料内部含有的 PVA 纤维由于高温热效应变成棕色,已经不具备室温时 PVA 纤维的

高强度和高黏合强度。当加热温度 $T \geq 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PVA-ECC 梁断裂后,其水泥基复合材料内部产生次生空隙,随着加热温度的升高,其孔隙率增大;当 $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,达到 PVA 纤维熔点,其 PVA 纤维在水泥基复合材料中心部分已不存在,只是在 PVA-ECC 梁断裂边缘处有少量已经因高温热效应变成深棕色的 PVA 纤维;当 $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PVA-ECC 梁断裂后,其水泥基复合材料内部不再含有 PVA 纤维,由于高温加热造成原来的 PVA 纤维消失,形成次生孔隙。

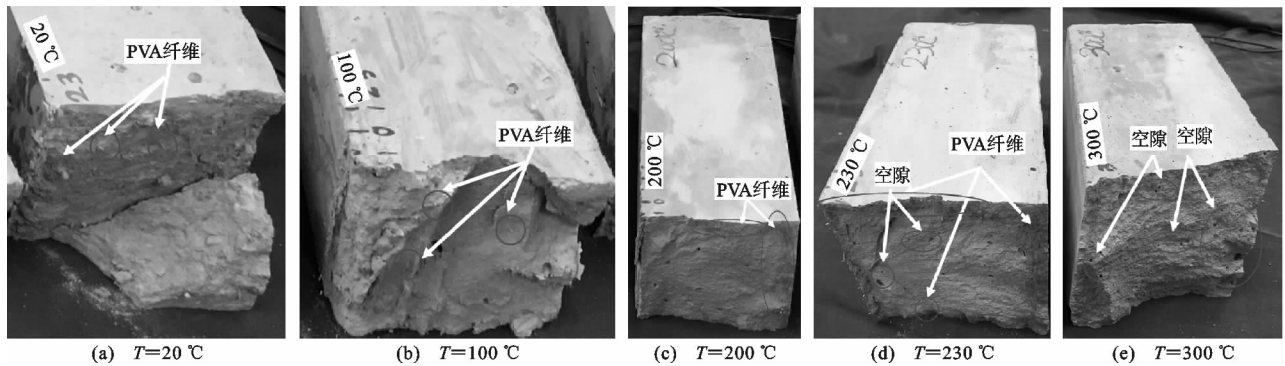


图 7 不同温度下 PVA 纤维含量及次生孔隙分布

Fig. 7 PVA Fiber Content and Secondary Pore Distribution at Different Temperatures

不同高温损伤后 PVA-ECC 梁与室温 PVA-ECC 梁多次重复落锤低速冲击试验后的破坏模式可以看出 PVA-ECC 梁的最终断裂处在受多次重复落锤冲击的 PVA-ECC 梁的跨中处。试验表明,PVA-ECC 梁的抗冲击性能随着温度的升高而减弱,尤其是当温度达到 PVA 纤维熔点时,PVA-ECC 梁仅能承受 1 次落锤低速冲击荷载作用,PVA 已经失去了高强度、高韧性的材料特性。

3.3 数值模拟 PVA-ECC 梁的裂纹演化

由于 PVA 纤维的熔点是 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,选取表 2 中 PVA-ECC-5 梁进行数值模拟,即 PVA 纤维已超过熔点。本文试验结果可知,高温损伤后,PVA-ECC 梁内部 PVA 纤维已经消失,因此对 PVA-ECC-5 梁的数值模拟可以将 PVA-ECC 梁简化考虑成素水泥砂浆梁。采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对落锤低速冲击作用下具有高温损伤的 PVA-ECC 梁进行数值模拟^[20-21],为了描述 PVA-ECC 梁落锤低速冲击的非线性变形及断裂特性,在计算中选用 MAT_CSCM_CONCRETE 材料模型,高温损伤后的 PVA-ECC-5 梁的密度为 $2\,320\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,剪切模量为 25 GPa ,体积模量为 28.43 GPa 。落锤采用自由落体刚体球模拟,刚体球材料模型为 *MAT_RIGID,刚体球的密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量

为 210 GPa ,泊松比为 0.3 。数值模型如图 8 所示。

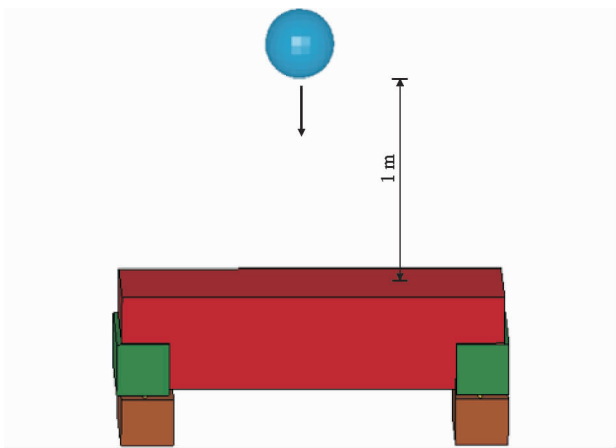


图 8 PVA-ECC-5 梁落锤低速冲击数值模型

Fig. 8 Numerical Model of PVA-ECC-5 Under Low Velocity Impact Loading

图 9 为 PVA-ECC-5 梁在冲击荷载下的破坏模式。PVA-ECC-5 梁的数值模拟结果与落锤低速冲击试验结果相一致,说明本文数值模拟方法的正确性。图 10 为 PVA-ECC-5 梁落锤低速冲击裂纹演化全过程数值模拟,其中 t 为时间。由数值模拟结果可知:落锤冲击撞击点在 PVA-ECC-5 梁跨中上表面处,裂纹首先从垂直跨中冲击点的下端处产生裂纹,裂纹沿着冲击点的垂直方向继续竖向延伸;当

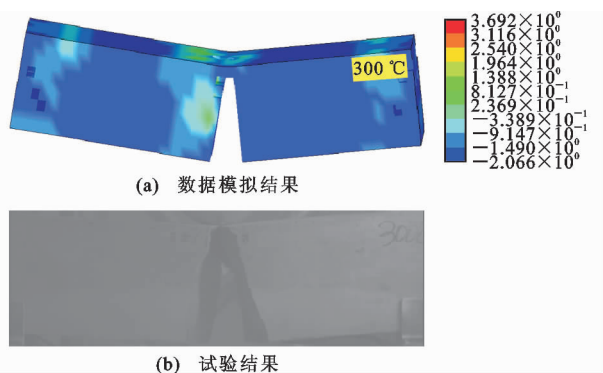


图 9 PVA-ECC-5 梁在冲击荷载下的破坏模式 (300 °C)

Fig. 9 Failure Mode of PVA-ECC-5 Beam Under Impact Loading (300 °C)

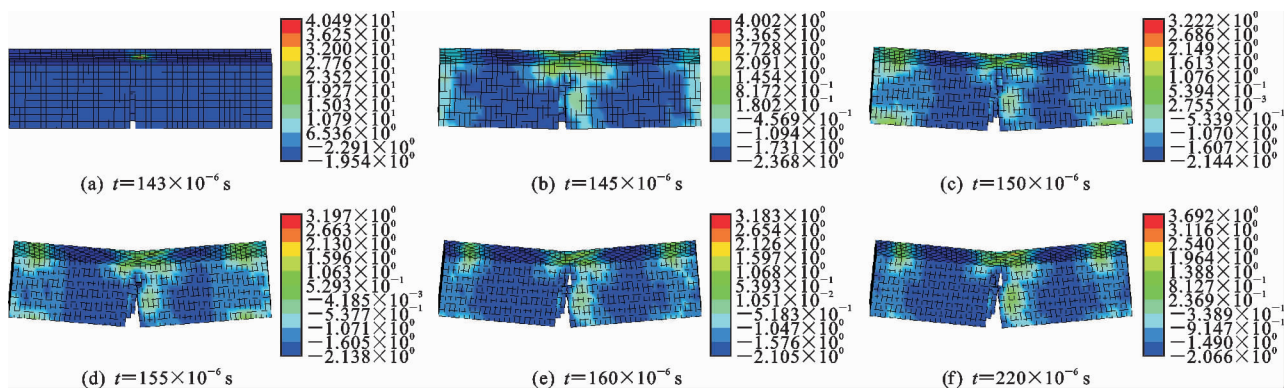


图 10 PVA-ECC-5 梁落锤低速冲击裂纹演化全过程

Fig. 10 Whole Process of Crack Evolution PVA-ECC-5 Beam Under Low Velocity Impact Loading

值能量的下降趋势显示了 PVA-ECC 梁裂纹逐渐扩展的过程。

(3) 高温损伤造成 PVA-ECC 梁抗冲击性能减弱。室温下的 PVA-ECC 梁有一定抗冲击能力,但当温度 $T \geq 230$ °C 时,达到甚至超高 PVA 纤维的熔点,PVA-ECC 梁中的 PVA 纤维消失,产生孔隙,形成素水泥砂浆梁,不具有抗冲击能力;因此,高温损伤造成 PVA-ECC 丧失了高强度、韧性、耐疲劳的特性。

(4) 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,可以有效地模拟落锤低速冲击下 PVA-ECC 梁裂纹演化全过程。

参考文献:

References:

- [1] LI V C, WANG S, WU C. Tensile Strain-hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [2] ZHU Y, ZHANG Z C, YAO Y, et al. Analysis of Crack Microstructure, Self-healing Products, and De-

裂纹竖向向上延伸至 PVA-ECC-5 梁截面高度的 2/3 时,裂纹开始沿着横向扩展;随后,梁跨中的冲击点处产生挠度变形,随着刚体球继续下落,PVA-ECC-5 梁裂纹继续沿着横向扩展,裂缝竖向向上继续延伸,直到 PVA-ECC-5 梁完全断裂。

4 结 语

(1) 压电陶瓷智能骨料能够检测低速冲击作用下 PVA-ECC 梁裂纹演化全过程,随着裂缝的扩展、传播波衰减,基于小波能量分析能够计算和量化压电陶瓷智能骨料传感器检测到的压电幅值能量。

(2) 在连续冲击荷载作用下,计算传感器压电幅

gree of Self-healing in Engineered Cementitious Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(6): 04016017.

- [3] ATAHAN H N, PEKMEZCI B Y, TUNCEL E Y. Behavior of PVA Fiber-reinforced Cementitious Composites Under Static and Impact Flexural Effects[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(10): 1438-1445.
- [4] YUAN F, PAN J L, DONG L T, et al. Mechanical Behaviors of Steel Reinforced ECC or ECC/Concrete Composite Beams Under Reversed Cyclic Loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014047.
- [5] YILDIRIM G, SAHMARAN M, AHMED H U. Influence of Hydrated Lime Addition on the Self-healing Capability of High Volume Fly Ash Incorporated Cementitious Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(6): 04014187.
- [6] ABUSHAWASHI N, VIMONATIT V. Material Classification and Composite Elastic Modulus of Hybrid PVA Fiber Ferrocement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(9): 04016073.

- [7] AHMED S F U, MAALEJ M, PRAMASIVAM P. Analytical Model for Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking Behavior of Hybrid Fiber-engineered Cementitious Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(7): 527-539.
- [8] 王 衍. 高韧性纤维增强水泥基复合材料物理力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
WANG Yan. Experimental Research on Physical and Mechanical Properties of High Toughness Fiber Reinforced Cementitious Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [9] 李启宏, 张 君, 赵金平. 纤维增强水泥薄板及其复合梁抗弯性能研究[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 135-142.
LI Qi-hong, ZHANG Jun, ZHAO Jin-ping. Flexural Properties of Fiber Reinforced Cement Board and Composite Beams[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 135-142.
- [10] 卜良桃, 汪文渊, 何放龙. RC 伸臂梁采用 PVA-ECC 加固抗剪试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 52-56.
BU Liang-tao, WANG Wen-yuan, HE Fang-long. Shear Behavior of RC Overhanging Beams Strengthened with PVA-ECC[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 52-56.
- [11] 卜良桃, 马益标. PVA-ECC 钢筋网加固钢筋混凝土梁截面刚度计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 514-519.
BU Liang-tao, MA Yi-biao. Section Stiffness Calculation of the RC Beams Strengthened with PVA-ECC Steel Mesh[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 514-519.
- [12] KAI M F, XIAO Y, SHUAI X L, et al. Compressive Behavior of Engineered Cementitious Composites Under High Strain-rate Loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(4): 04016254.
- [13] MAALEJ M, QUEK S T, ZHANG J. Behavior of Hybrid-fiber Engineered Cementitious Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(2): 143-152.
- [14] QI B X, KONG Q Z, QIAN H, et al. Study of Impact Damage in PVA-ECC Beam Under Low-velocity Impact Loading Using Piezoceramic Transducers and PVDF Thin-film Transducers[J]. Sensors, 2018, 18(2), 671.
- [15] NEMATOLLAHI B, SANJAYAN J, SHAIKH F U A. Tensile Strain Hardening Behavior of PVA Fiber Reinforced Engineered Geopolymer Composite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 04015001.
- [16] MUSTAFA S, ERDOGAN O, HASAN E. Y, et al. Effect of Fly Ash and PVA-ECC Fiber on Microstructural Damage and Residual Properties of Engineered Cementitious Composites Exposed to High Temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(12): 1735-1745.
- [17] YU K, DAI J G, LU Z D, et al. Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites Subjected to Elevated Temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 04014268.
- [18] SONG G B, GU H C, MO Y L. Smart Aggregates: Multi-functional Sensors for Concrete Structures — A Tutorial and a Review[J]. Smart Material and Structure, 2008, 17(3): 33001.
- [19] SUN Z, CHANG C C. Structural Damage Assessment Based on Wavelet Packet Transform[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 1354-1361.
- [20] 唐 微. PVA-ECC 受压构件计算理论及有限元分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
TANG Wei. Research on Computing Theory and Finite Element Analysis of PVA-ECC Compression Member[J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [21] KYRIAKIDES M A, HENDRIKS M A N, BILLINGTON S L. Simulation of Unreinforced Masonry Beams Retrofitted with Engineered Cementitious Composites in Flexure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(5): 506-515.