文章编号：1001-4888(2020)04-0616-13

型钢-混凝土结构界面的损伤监测试验研究*

蒋田勇，肖敏，吴青霖

（长沙理工大学 土木工程学院，湖南长沙 410114）

摘要：型钢-混凝土结构连接界面的损伤监测具有重要实际意义。本文提出一种基于压电智能材料的型钢-混凝土结构界面损伤主动传感监测方法。在型钢上翼缘下表面连接件附近粘贴 6 套锆钛酸铅(Lead Zirconate Titanate，PZT)压电陶瓷片作为发射应力波的驱动器，并在翼缘板内对应位置处布设 7 个智能骨料传感器以采集经由损伤界面传来的响应信号。通过依次松动型钢-混凝土结构试件中对称布置的四颗螺栓，模拟连接界面的损伤状况，再对上述损伤状况下响应信号进行时域、频域以及小波包能量的对比分析。由试验结果分析可知，时域信号幅值、频域信号幅值以及小波包能量幅值都随着损伤状况的加剧出现了明显的降低，这主要是由于螺栓松动导致型钢与混凝土实际接触面积的减小，阻挡了应力波的传播。试验结果表明基于压电陶瓷的主动传感监测方法能够有效地监测和评价型钢-混凝土结构界面的损伤状况。

关键词：界面损伤；压电陶瓷；主动传感监测；螺栓连接件；小波包能量

中图分类号：U448.22　　**文献标识码**：A　　DOI：10.7520/1001-4888-19-061

0 引言

作为现代化建设中飞速发展的第五大类结构[1]，型钢-混凝土结构将混凝土桥面板通过剪力连接件对钢梁受压翼缘板起到约束作用，实现了上部翼缘板抗压性能和下部型钢抗拉性能的完美结合，提高了梁的抗弯强度和刚度。同时，型钢-混凝土结构可以实现现场的快速高效装配施工，极大地缩短了施工周期，在大跨度桥梁结构体系、多高层建筑、抗震结构以及加固工程中得到了广泛的应用[2,3]。但由于施工工艺、设备等的局限会在型钢-混凝土结构界面形成不可避免的初始微缺陷，这些先天缺陷在服役过程中也常受到时变荷载、疲劳老化、不均匀温变以及由于振动冲击、环境腐蚀造成的剪力连接件松动脱落等复杂因素的影响而不断发展演化，导致型钢-混凝土结构界面出现滑移、脱空、掀起等界面损伤而削弱其承载能力[4,5]。当界面损伤严重时，将导致结构失效、直接危及结构安全。而剪力连接件及型钢-混凝土结构界面在工程建设中属于隐蔽性工程，其损伤与否不容易被及时发现[6]。因此采取一套成熟可靠的监测方法来识别型钢-混凝土结构界面的损伤状况，对提高此类结构的整体性能、延长其使用寿命和避免安全事故的发生具有应用价值。

当前，用于监测螺栓连接件健康状态的方法主要有振动分析法、压电阻抗法[7]、非线性动力学分析法和基于混沌理论法[8]等；用于监测型钢-混凝土结构界面损伤的方法除了传统的超声导波法[9]和红外热像法[10]，还有声发射法[11]、压电阻抗法[12]等。在此基础上国内外科研工作者又进行了一系列深入的研究，向志海等[13]基于受控敲击检测原理提出了一种螺栓松紧程度的检测方法，通过在加速度功率密

* **收稿日期**：2019-04-18；**修回日期**：2019-08-31

基金项目：湖南省自然科学基金项目(2019JJ40301)，湖南省教育厅科学研究重点项目(17A010)，2019 年湖南省研究生科研创新项目(CX20190671)，长沙理工大学双一流科学研究国际合作拓展项目(2018IC18)

通讯作者：蒋田勇(1978－)，男，博士，副教授。主要研究领域为桥梁结构智能监测。Email：363842987@qq.com

度谱中提取对拧紧力矩的敏感特征信息，结合支持向量机方法识别出了螺栓不同的松紧程度。王高平等[14]通过测量螺栓工作时的应变值来判断其松紧情况。屈文忠等[15]提取响应信号中的亚谐波共振分析成分实现了对螺栓连接件的损伤识别。杜飞等[16]利用透射的超声导波能量作为线性特征对单螺栓和多螺栓的预紧力进行了监测。特别地，最近在对于型钢-混凝土结构界面损伤监测的研究中，孙曼[17]首次采用光纤 Bragg 光栅传感方法实现了对型钢-混凝土桥面板界面滑移损伤的全过程监测。赵海亮[16]通过加速度传感器阵列所反映出来的各测点振动特性的异同，对型钢-混凝土结构界面损伤区域进行了识别。刘蒙[19]运用基于麦克风阵列的冲击共振损伤成像方法，采集激励点的声压响应信号并进行频谱分析，以判断型钢-混凝土结构界面是否存在大面积的脱空损伤。

上述方法虽在一定程度上能实现对螺栓松动及型钢-混凝土结构界面损伤的监测，但也存在操作复杂、测试费用高、传感器成活率低以及无法实现损伤发展过程的在线监测和提前预警等诸多弊端，而不能在实际工程领域中大范围推广应用。压电波动法作为土木工程结构健康监测中的主要方法之一，因具有成本低廉、可靠度高、可检测范围大、可分析的特征参量多等优点而被广泛应用于建筑和桥梁结构体系的损伤监测中。本试验设计了一个螺栓连接的型钢-混凝土组合结构，并将压电智能材料粘贴于型钢表面和嵌入混凝土翼缘板内部，该结构可以通过螺栓的松紧来模拟实际型钢-混凝土结构中的界面损伤，并采用基于压电陶瓷 PZT(Lead Zirconate Titanate)的界面损伤主动传感监测方法成功识别出了型钢-混凝土结构界面的损伤状况。

1　监测原理

本试验采用以压电波动法为基础的应力波分析法，基于压电智能材料良好的正逆压电效应，将 PZT 片制作成驱动器和传感器，分别布置于型钢与混凝土翼缘板中，监测螺栓连接件松动引起的型钢-混凝土结构界面的脱离损伤，其试验监测原理如图 1 所示。将粘贴于钢梁上翼缘的压电陶瓷片作为发出信号的驱动器，埋设于混凝土翼缘板内的压电智能骨料作为接收信号的传感器。混凝土翼缘板和型钢通过高强螺栓相连，当高强螺栓 A 发生松动时，型钢与混凝土翼缘的真实接触面积急剧减少，应力波传播路径受阻，导致混凝土翼缘板内智能骨料接收到的响应信号也相应减少。当螺栓 B 也松动时，界面损伤加剧，响应信号随之进一步衰减。因此，可以在钢梁中压电陶瓷驱动器发出同一输出信号的情况下，监测混凝土翼缘板中智能骨料所接收到的响应信号的变化，从而达到监测型钢-混凝土结构界面损伤程度的目的。

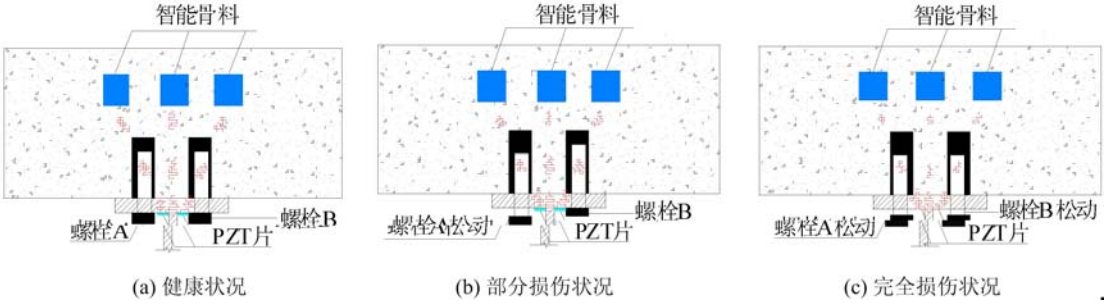


图 1　试验监测原理图

Fig. 1　The schematics of monitoring experiment

2　试验内容

2.1　压电智能材料

本试验依据试件的特点采用了 PZT-5H 压电陶瓷片来制作 PZT 驱动器和智能骨料传感器。该圆形压电陶瓷片半径为 5mm，厚度为 0.3mm，由上海市联能科技有限公司生产，主要性能参数见表 1。

表 1 压电陶瓷片材料特性

Tab. 1 Material properties of piezoelectric ceramic pieces

型号	泊松比 υ	压电常数 d_{33}/(C/N)	介电常数 ε/(F/m)	介质损耗 tgδ	机械品质因子 Q_m	机电耦合系数 k	居里温度 T_c/(℃)	密度 ρ/(g/cm^3)
PZT-5H	0.34	640	3400	1.3	75	0.68	250	7.6

2.2 试件的设计和压电智能材料的布置

本试验设计了一个由高强螺栓剪力键连接混凝土翼缘板和工字钢组成的型钢-混凝土结构。该结构以圆形的 PZT-5H 型压电陶瓷片作为驱动器,压电智能骨料作为传感器。为了研究剪力连接件造成的型钢-混凝土结构界面的损伤,所有压电陶瓷传感器均为对称布置,其中 6 个压电陶瓷片布置在钢梁翼缘板下表面的两侧,7 个智能骨料布设在混凝土翼缘板中的指定位置,试件尺寸以及智能材料布置如图 2 和图 3 所示。混凝土翼缘板的长、宽、高分别为 300mm、300mm、120mm。试件混凝土翼缘板采用人工搅拌混凝土,混凝土标号为 C25,混凝土轴心抗压强度 f_c=11.9MPa,弹性模量 $E=2.8\times10^4$MPa。钢梁采用 Q235 钢,型号为 20a,屈服强度 f=215MPa,弹性模量 $E=2.0\times10^5$MPa。该试件共布置 4 个型号为 M12 的高强螺栓连接件,剪力连接件在工字钢梁两侧翼缘成对设置,布置间距为 150mm。为了使型钢-混凝土结构中的螺栓剪力键与混凝土翼缘板连接更紧密,同时通过模拟螺栓松动达到界面损伤的目的,在工字钢翼缘两侧的混凝土构件内设置高度为 50mm 的钢套筒,该钢套筒内部带有螺纹。

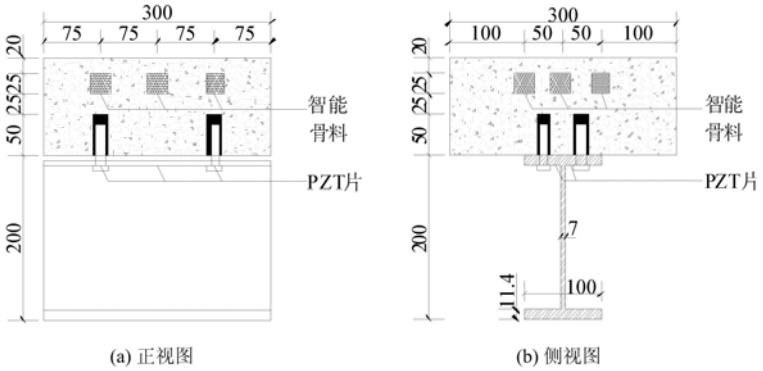


图 2 压电陶瓷材料布置图

Fig. 2 Piezoelectric ceramic materials layout

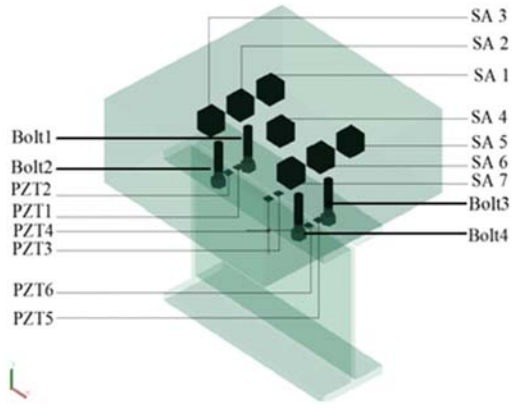


图 3 螺栓及压电材料在型钢-混凝土结构中的布置图

Fig. 3 Layout of bolts and piezoelectric materials in steel-concrete structure



图 4 已固定好压电陶瓷的模具

Fig. 4 Mould fixed with piezoelectric ceramics

在对压电智能骨料进行定位时,为使其埋置于翼缘板内的指定位置,首先将如图 4 所示的木条固定在模板上,再用环氧树脂胶将智能骨料固定在图 4 中的木条上,最后一并浇筑混凝土,以便于浇混凝土

过程中不会扰动智能骨料的位置。

2.3　试验过程及监测方法

由于本试件中的翼缘板和型钢由 4 颗螺栓紧固连接，考虑到试件的整体稳定性，本试验的工况可按照下列状态划分：首先用扭力扳手将图 3 中的 4 颗 M12 的螺栓全部拧紧到扭矩 45N·m 作为一个拧紧状态。依次松动 Bolt1、Bolt2、Bolt3 螺栓至扭矩为 0 作为 3 个松动损伤状态。形成的 4 个不同工况分别为：健康状态、损伤状态 I、损伤状态 II、损伤状态 III。当所有的螺栓都处于紧密状态，没有一个螺栓松动时，这是健康状态；当试验中 Bolt1 发生松动时，这是损伤状态 I；当试验中 Bolt1、Bolt2 松动时，这就是损伤状态 II；当试件中 Bolt1、Bolt2、Bolt3 都松动时的构件损伤状态则被定义为损伤状态 III。根据不同的螺栓松动，模拟型钢-混凝土结构界面的不同损伤状态，其中螺栓松动的细节如表 2 所示。

表 2　不同损伤状态下螺栓松动细节表

Tab. 2　Bolts looseness details in different damage states

工况编号	试件状态	螺栓松动情况
1	健康状态	无
2	损伤状态 I	Bolt1
3	损伤状态 II	Bolt1、Bolt2
4	损伤状态 III	Bolt1、Bolt2、Bolt3

型钢-混凝土结构中压电材料布置如图 3 所示，其中 PZT1、PZT2、PZT3、PZT4、PZT5、PZT6 作为驱动器，发射激励信号；SA1、SA2、SA3、SA4、SA5、SA6、SA7 作为传感器工作，接收响应信号。该试件由“PZT1-SA1”、“PZT1-SA2”、“PZT2-SA3”、“PZT3-SA4”、“PZT5-SA5”、“PZT6-SA6”、“PZT6-SA7”这 7 组传感器组成单发单收的监测系统，通过对比不同工况下所采集到的响应信号的变化，判断该结构连接界面的损伤程度。

型钢-混凝土结构界面损伤监测试验方法采用基于压电陶瓷的主动监测法，首先将 NI-6363 与笔记本电脑相连，组成如图 5 所示的界面损伤监测系统。然后，利用数据采集器 NI-6363 激励粘贴在翼缘板下表面的 PZT 驱动器发射正弦扫频激励信号，该激励信号的扫频范围为 100Hz～150kHz，扫弦波的电压幅值和周期分别为 10V 和 1s，采样频率为 2MHz。由此绘制出的正弦扫频激励信号的时域和频域图，如图 6 所示。经型钢-混凝土结构界面传来的响应信号由埋在翼缘板内的智能骨料传感器感知并输送到装有 LabView 程序的电脑控制系统。最后通过分析螺栓紧固健康状态下与非健康松动状态下信号的差异，识别界面是否损伤及损伤程度，从而实现对型钢-混凝土结构连接界面的损伤监测。

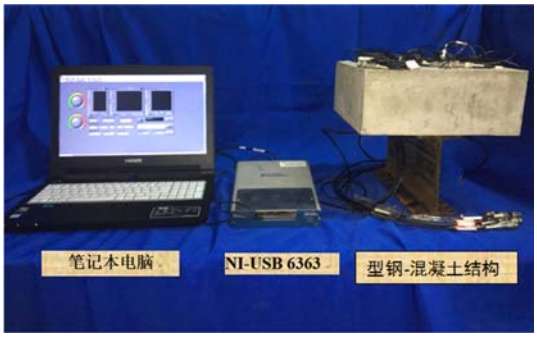


图 5　试验监测系统实物图

Fig. 5　Layout of the test monitoring system

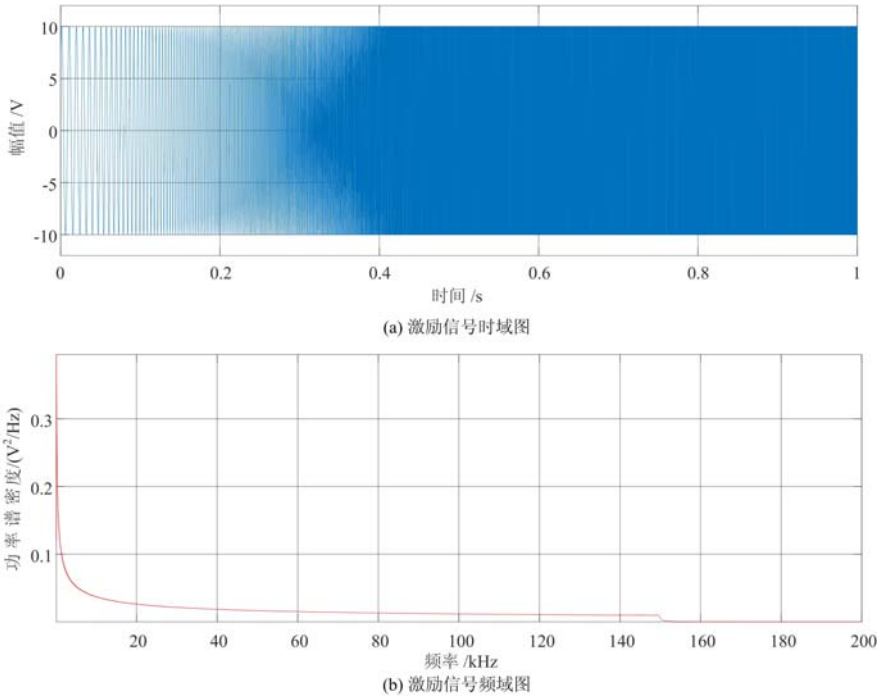


图 6 激励信号时域及频域图

Fig. 6 Time-domain and frequency-domain diagrams of the drive signal

3 结果分析与讨论

3.1 时域信号分析

根据实际试验中压电智能骨料所采集到的响应信号,通过 LabVIEW 和 MATLAB 分析,可得出相应的时域信号图,在图 7～图 13 中(a)、(b)、(c)和(d)分别为健康状态、损伤状态 I、损伤状态 II 和损伤状态 III 时域信号。图 7～图 13 分别显示了“PZT1-SA1”、“PZT1-SA2”、“PZT2-SA3”、“PZT3-SA4”、“PZT5-SA5”、“PZT6-SA6”和“PZT6-SA7”所监测到的时域信号。

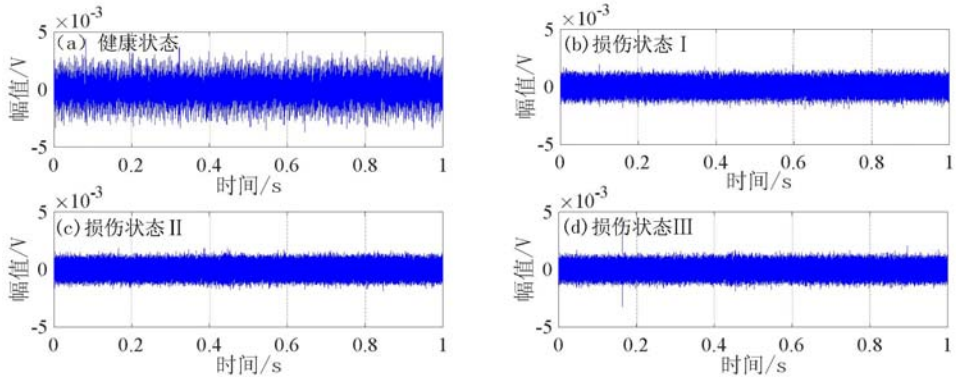


图 7 “PZT1-SA1”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 7 Time domain signal of “PZT1-SA1” at different damage states

从图 7～图 13 可以看出,各传感器接收到的时域信号随着螺栓连接件松动引起的界面损伤的加剧,总体呈现递减的趋势。其中,从“健康状态”到“损伤状态 I”幅值降低最明显,再到“损伤状态Ⅱ”和“损伤状态Ⅲ”,各传感器时域信号幅值的减小都不明显。

首先,第一颗螺栓的松动引起 PZT1-SA1 的信号损失量为健康状态的 60%,PZT1-SA2 的信号损失量为健康状态的 42%,产生差别的原因是从 PZT1 发出的部分应力波在第一颗螺栓松动后仍可沿螺杆经由套筒壁到达 SA2,而从 PZT1 到达 SA1 的应力波因传播路径未经过螺栓连接件,被损伤的界面

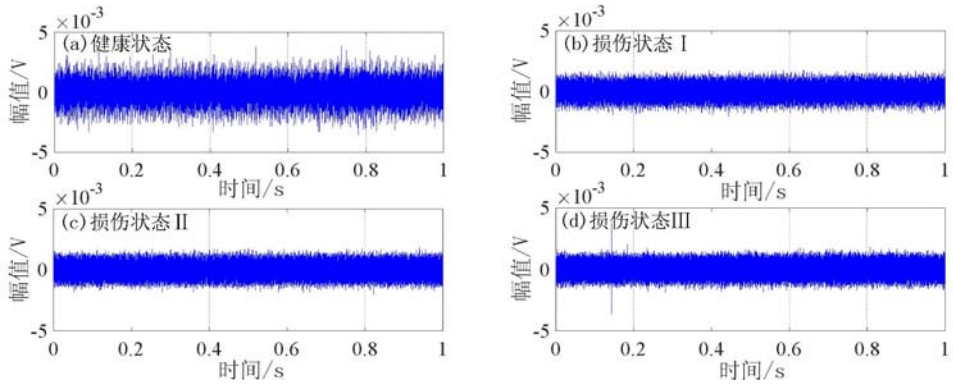


图 8　“PZT1-SA2”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 8　Time domain signal of “PZT1-SA2” at different damage states

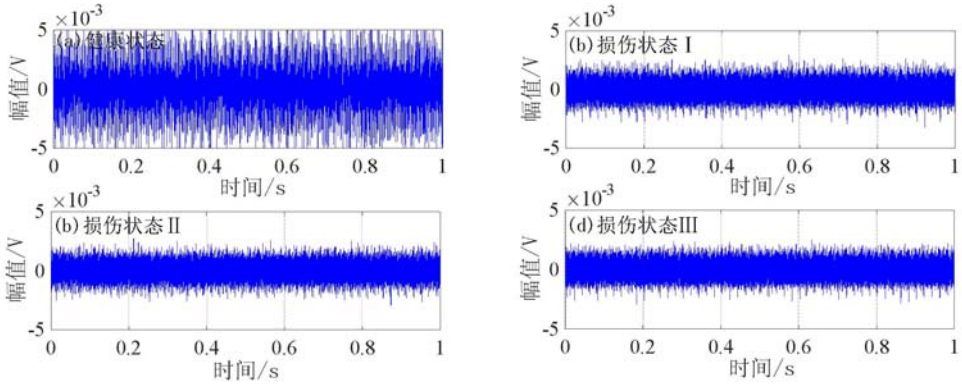


图 9　“PZT2-SA3”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 9　Time domain signal of “PZT2-SA3” at different damage states

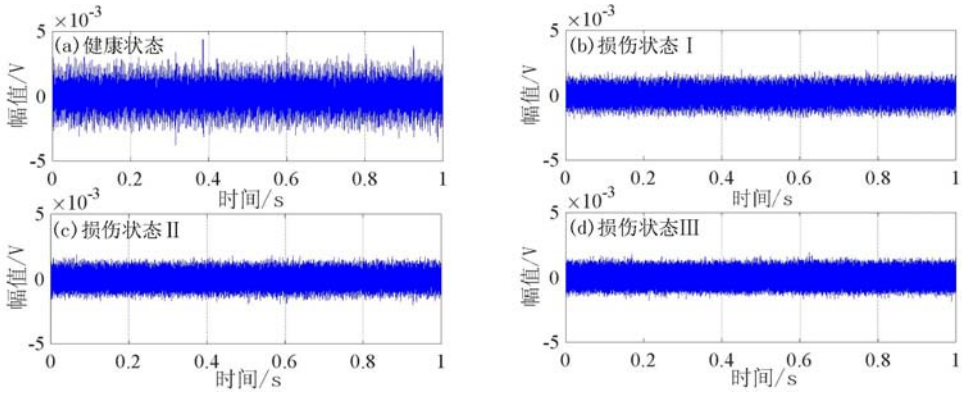


图 10　“PZT3-SA4”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 10　Time domain signal of “PZT3-SA4” at different damage states

阻隔而产生相对更大的损失。然后，第二颗螺栓松动时，所引起信号传播路径未经过螺栓的 PZT1-SA2 信号损失量达到 20%，而路径穿越所损伤螺栓的 PZT2-SA3 的信号损失量只有 14%。当第三颗螺栓松动时，PZT3-SA4、PZT6-SA6、PZT6-SA7 的信号衰减百分比分别为 5%、19%、12%，而 PZT5-SA5 几乎没衰减。同样是因为第三颗螺栓松动引起的界面损伤阻断了前 3 组传感器应力波的传播，而 PZT5-SA5 的部分应力波仍可沿着松动的螺栓连接件进行传播。另外，当“PZT5-SA5”、“PZT6-SA6”、“PZT6-SA7”这 3 组传感器应力波传播路径上的两颗螺栓（Bolt3 和 Bolt4）未松动，而远离传感器的螺栓（Bolt1）完全松动时，传感器的时域信号幅值分别减小了 50.0%、30.3%、37.0%，这说明了 3 组传感器信号的损失并非由传播路径上的螺栓松动引起，而是由界面的粘结力发生破坏所致，故应力波的衰减来源于螺栓松动及其导致的界面损伤。根据以上分析可知，压电材料能够很好地感知因螺栓松动引起的

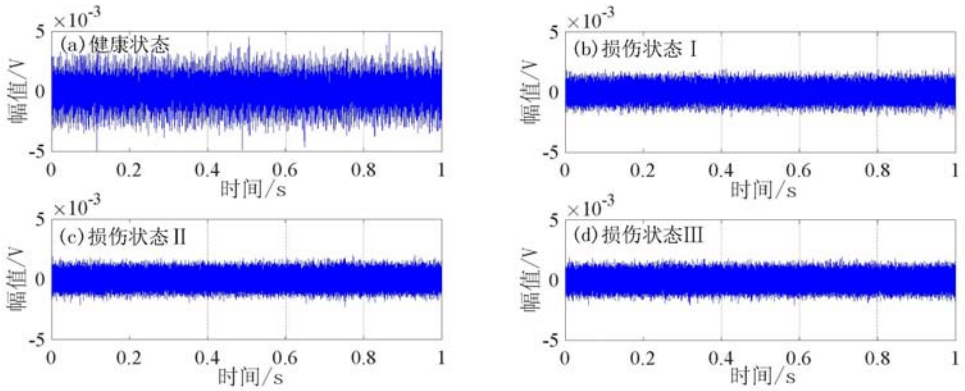


图 11 “PZT5-SA5”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 11 Time domain signal of “PZT5-SA5” at different damage states

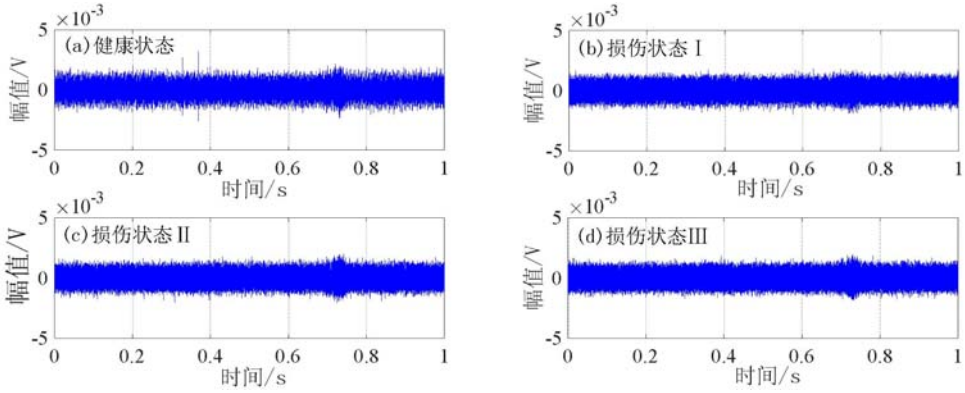


图 12 “PZT6-SA6”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 12 Time domain signal of “PZT6-SA6” at different damage states

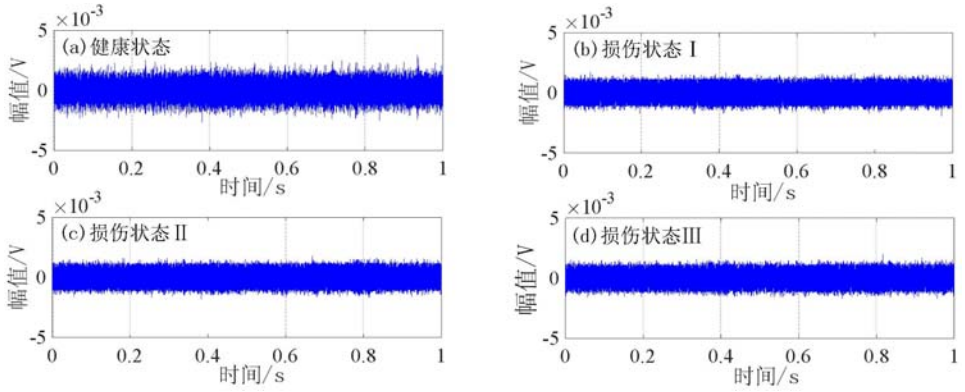


图 13 “PZT6-SA7”在不同损伤状态的时域信号

Fig. 13 Time domain signal of “PZT6-SA7” at different damage states

型钢-混凝土结构界面损伤情况,表明通过时域信号分析可以初步判断出压电智能材料对于型钢-混凝土结构界面的损伤监测有着较好的灵敏性。

3.2 频域信号分析

通过快速傅里叶变换(FFT)分析响应信号的频域特征,得到不同损伤状态下智能骨料所接收到的频域信号图,限于篇幅,选取有代表性的“PZT1-SA1”、“PZT1-SA2”、“PZT5-SA5”、“PZT6-SA6”、“PZT6-SA7”这 5 组信号进行频域分析,在图 14～图 18 中:(a)为健康状态下频域信号波形图;(b)、(c)、(d)分别为损伤状态 I、损伤状态 II、损伤状态 III 中的频域信号波形图。图 14 显示了“PZT1-SA1”所监测到的频域信号波形图。图 15 显示了“PZT1-SA2”中所监测到的频域信号波形图。图 16 显示了“PZT5-SA5”中所监测到的频域信号波形图。图 17 显示了“PZT6-SA6”中所监测到的频域信号波形

图。图 18 显示了“PZT6-SA7”中所监测到的频域信号波形图。

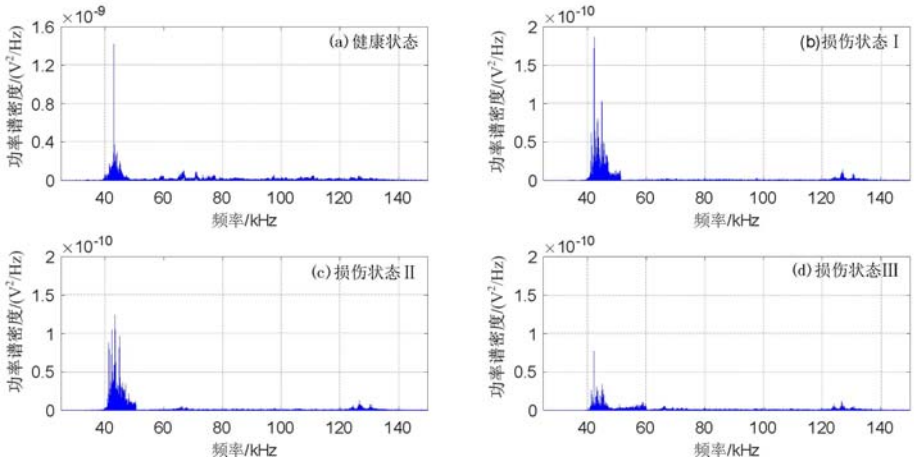


图 14　“PZT1-SA1”在不同损伤状态的频域信号

Fig. 14　Frequency domain signal of “PZT1-SA1” at different damage states

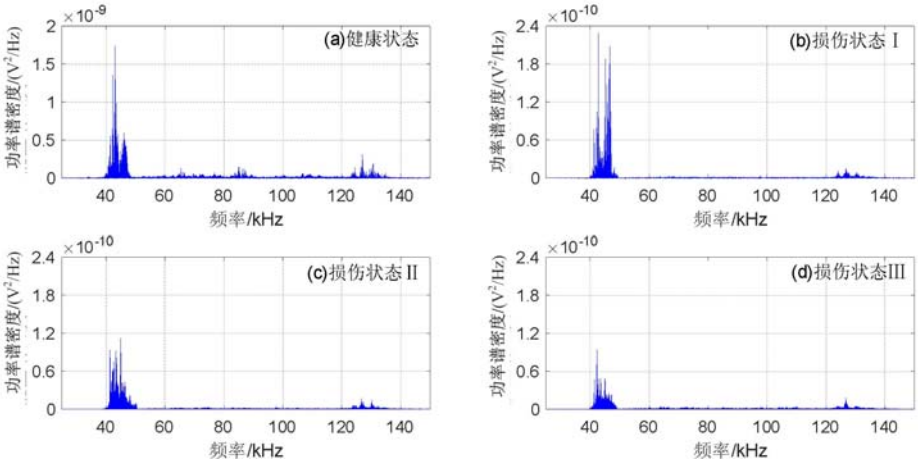


图 15　“PZT1-SA2”在不同损伤状态的频域信号

Fig. 15　Frequency domain signal of “PZT1-SA2” at different damage states

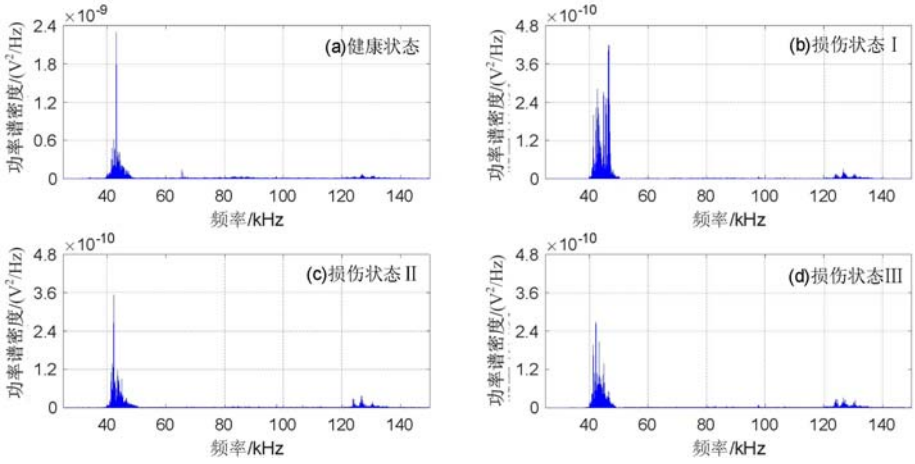


图 16　“PZT5-SA5”在不同损伤状态的频域信号

Fig. 16　Frequency domain signal of “PZT5-SA5” at different damage states

通过快速傅里叶变换将智能骨料传感器在各损伤状态下接收到的时域信号转换成对应的频域信号，由图 14 至图 18 可知，各智能骨料传感器的频率响应范围都在 40kHz 至 50kHz，各组传感器频率峰

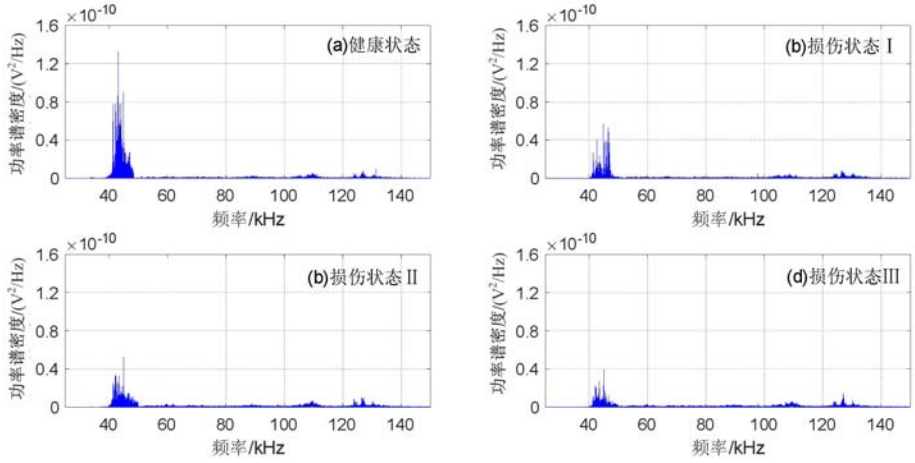


图 17 “PZT6-SA6”在不同损伤状态的频域信号

Fig. 17 Frequency domain signal of “PZT6-SA6” at different damage states

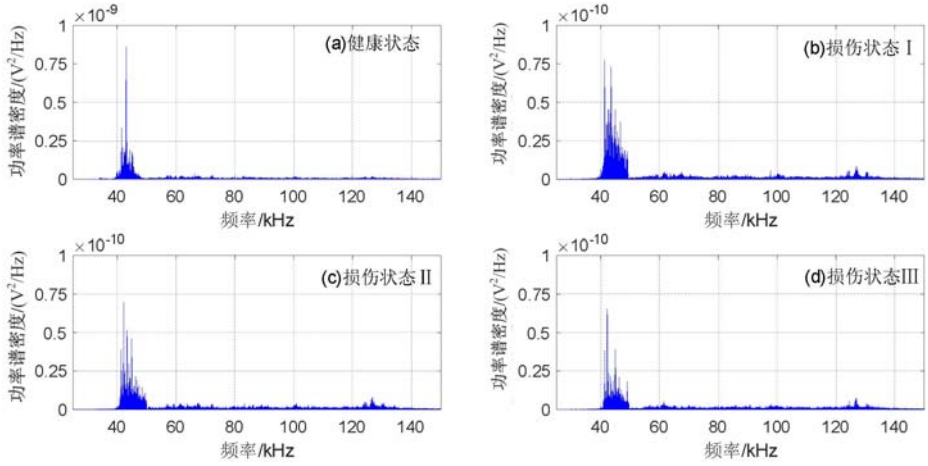


图 18 “PZT6-SA7”在不同损伤状态的频域信号

Fig. 18 Frequency domain signal of “PZT6-SA7” at different damage states

值的响应频率均不同,但是相同传感器在不同损伤状态下频率峰值的响应频率都一致;另外,随着型钢-混凝土结构界面损伤程度的增加、型钢与翼缘板实际接触面积减小,导致不同部位所接收到的频域信号峰值总体呈现出减小的趋势。首先,当第一颗螺栓松动引起界面损伤时,各传感器频域信号最大幅值均下降超过 55%;另外,传播路径经过螺栓连接件的传感器频域信号幅值的下降速度小于未经过连接件的幅值下降速度,然后,第二颗螺栓松动时,“PZT1-SA1”频域信号最大幅值减小 31%,应力波传播路径未经过螺栓连接件的“PZT1-SA2”减小量达到 50%;最后,第三颗螺栓损伤时,“PZT6-SA7”频域信号最大幅值减小 6%,应力波传播路径未经过螺栓连接件的“PZT6-SA6”减小量达到 25%。综上,根据损伤位置或损伤程度的不同,传感器频域信号峰值的变化规律与时域信号相同,但频域信号峰值变化得更加显著,从而验证出通过频域信号分析方法可以进一步对型钢-混凝土结构中的界面损伤进行有效监测。

3.3 小波包能量分析

根据小波分析理论,经小波变换多尺度细化的信号,通过小波分析能在时域和频域局部表征能量,因而小波包能量具有良好的时-频特性,可以聚焦信号的任何细节,是信号在时域和频域范围内的综合体现,故能与时域信号和频域信号一起表征界面损伤引起的信号变化。因此,可以通过对压电陶瓷传感器接收到的响应信号进行小波分析,再基于分析得出的小波包能量值定义出结构损伤指标,以合理评判因螺栓连接件松动引起的型钢-混凝土结构界面的损伤程度。图 19 为试件在健康状态、损伤状态 I、损伤状态 II、损伤状态 III 中各状态每组压电陶瓷材料所测得的小波包能量值变化图,其中,(a)为“PZT1-SA1”中 SA1 所测得小波包能量变化;(b)为“PZT1-SA2”中 SA2 所测得小波包能量变化;(c)为“PZT2-

SA3”中 SA3 所测得小波包能量变化；(d)为“PZT3-SA4”中 SA4 所测得小波包能量变化；(e)为“PZT5-SA5”中 SA5 所测得小波包能量变化；(f)为“PZT6-SA6”中 SA6 所测得小波包能量变化；(g)为“PZT6-SA7”中 SA7 所测得小波包能量变化。

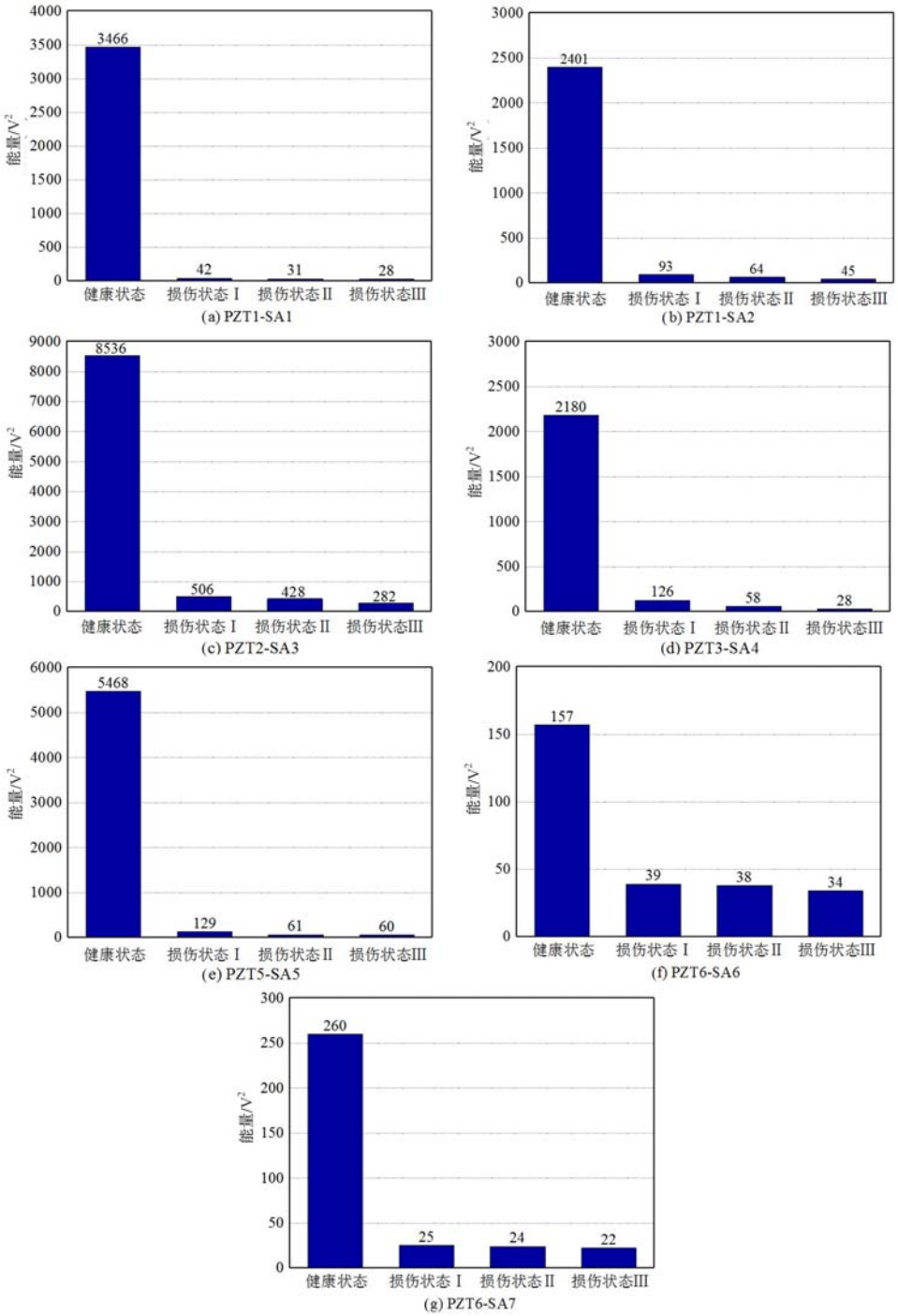


图 19　小波包能量变化图

Fig. 19　Wavelet packet energy variation diagram

分析图 19 可知，传感器采集的小波包能量大小与螺栓松动引起的型钢-混凝土结构界面损伤程度密切相关，随着界面损伤的加剧，小波包能量呈现出明显的递减趋势：试件在健康状态下所得到的小波包能量最大，并且随着界面损伤程度的增大，所测得的小波包能量不断减小，在损伤状态 III 中得到的小波包能量达到最小值。分析其原因，主要是螺栓一开始松动即引起了严重的界面损伤，型钢翼缘表面与混凝土的粘结力破坏导致接触面积急剧减小，大部分应力波无法穿过损伤的型钢-混凝土结构界面从

而引起图 19 中各传感器从“健康状态”到“损伤状态Ⅰ”接收的小波包能量出现骤减。小波包能量峰值减小量的变化与时域、频域信号具有相同的规律性,即应力波传播路径穿过螺栓连接件的小波包能量变化相对较小,如:第二颗螺栓损伤时,引起“PZT2-SA3”的小波包能量损失率为 15%,而应力波传播路径未通过螺栓连接件的“PZT1-SA1”、“PZT1-SA2”、“PZT3-SA4”损失率分别为 26%、31%、54%。在第三颗螺栓松动时,上述传感器的小波包能量衰减率大都达到 30%,比位于健康的第四颗螺栓附近的“PZT6-SA6”、“PZT6-SA7”约 8%左右的能量衰减率大得多。这也验证了压电材料监测因螺栓松动引起的型钢-混凝土结构界面损伤的灵敏性。为了更进一步判断出因螺栓松动引起的型钢-混凝土结构界面的损伤程度,本文采用一种以小波包能量值为变量的变异系数缺陷指标 EVC 来评价型钢-混凝土结构界面损伤程度,考虑到该损伤指标必须基于健康状态的小波包能量来量化损伤程度,定义如下[20]:

$$EVC=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i-\bar{E}_0)^2}{n\bar{E}_0^2}}\times 100\% \tag{1}$$

其中,E_i 是某损伤工况下各传感器所采集到的小波包能量值;n 为传感器的个数;$\bar{E}_0$ 为各传感器在健康状态下采集的小波包能量平均值。

分析(1)式可知,当型钢-混凝土结构界面处于健康状态时,各传感器所接收的小波包能量幅值的离散程度较小,所计算出的 EVC 理论上接近于 0,随着界面损伤程度的增大,部分传感器的小波包能量幅值减小,EVC 也随着离散程度的增加而增大,所以,型钢-混凝土结构界面损伤程度越大,EVC 的值也越大,从而可以根据 EVC 的大小对界面的损伤程度进行评价。

依据本次试验结果计算表明:在型钢-混凝土结构界面无损伤时,小波包能量值变异系数 EVC 在 86%以内;随着螺栓逐个松动导致的界面损伤加剧,EVC 的值也不断增大,当 EVC 的值增大到 96%时,界面损伤严重,EVC 的值超过 98%时,界面已完全损伤而不能继续使用该结构。通过分析各传感器采集到的响应信号中小波包能量值以及对应的损伤指标 EVC 的变化规律,可以准确评判螺栓连接件松动引起的型钢-混凝土结构界面的损伤状况,这也说明了压电波动法能够对型钢-混凝土结构界面损伤进行有效监测和准确的评价。

4 结论

本文基于压电波动法对型钢-混凝土结构的连接界面进行损伤监测试验研究。试验设计了一个带有 4 个螺栓连接件的型钢-混凝土结构试件,通过在型钢上翼缘下表面两侧粘贴 PZT 片作为驱动器,在翼缘板内部埋设智能骨料作为传感器,控制扭力扳手松动螺栓连接件以模拟型钢-混凝土结构界面不同程度的损伤状况,利用信号发生器在各损伤状况下产生一定幅值和频率的信号来激励压电陶瓷 PZT 片,以及控制埋在翼缘板内部特定位置的智能骨料采集信号。通过对比研究健康状态与各损伤状态下时域、频域信号以及小波包能量特征参量的差异,可以得出以下结论:

(1) 型钢-混凝土结构界面损伤会导致智能骨料接收到的时域信号幅值出现衰减的情况,损伤程度越大,幅值衰减越明显。且损伤状态Ⅰ中的时域信号相比健康状况衰减的速度最快,其原因是第一颗螺栓松动就破坏了型钢-混凝土结构界面的粘结力,导致了很严重的界面损伤,使得型钢与混凝土界面真实接触面积急剧减小,界面损伤区域阻断了应力波的传播所致,这也体现出了压电智能材料对型钢-混凝土结构界面损伤监测的敏感性;

(2) 结合频域信号分析,可以发现健康状态中频域信号的幅值最大,采集到的损伤状态Ⅰ中频域信号的幅值相比健康状态下的频域信号幅值下降了至少 1 个数量级,其他各损伤状态下频域信号的幅值也随着损伤程度的加大而减少。通过对比各级损伤状况下不同位置处传感器信号幅值减小程度不同的现象,得出传播路径经过螺栓连接件的频域信号幅值的下降速度小于未经过连接件的幅值下降速度,进一步说明了频域信号可以有效监测型钢-混凝土结构中连接界面的损伤;

(3) 采用小波包理论,对不同损伤状态下采集到的信号进行量化分析,其幅值随着界面损伤的变化规律与时域、频域部分相一致。同时,本文试验也验证了以小波包能量值为变量的变异系数缺陷指标

EVC 能够准确而有效地衡量型钢-混凝土结构界面的损伤程度：当 *EVC* 小于 86%时，该型钢-混凝土结构界面处于健康状态；当 *EVC* 大于 96%时，界面损伤严重；*EVC* 的值超过 98%时，界面已完全损伤而不能继续使用。综上所述，基于压电陶瓷的主动传感监测方法通过时域、频域并结合小波包能量分析，能实现对型钢-混凝土结构中界面损伤的有效监测。

参考文献：

[1] 夏文敏，刘雪梅. 钢-混组合梁的研究现状与展望[J]. 四川建筑，2010，30(2)：122－123（XIA Wenmin，LIU Xuemei. Research status and prospects of steel-concrete composite beams[J]. Sichuan Architecture，2010，30(2)：122－123 (in Chinese))

[2] 石启印，马波，李爱群. 新型外包钢-砼组合梁的受力性能分析[J]. 实验力学，2005，20(1)：115－122（SHI Qiyin，MA Bo，LI Aiqun. Anaiysis of flexural behavior of steel-encased concrete composite beams[J]. Journal of Experimental Mechanics，2005，20(1)：115－122 (in Chinese))

[3] 王达，付井平，陈方怀，等. 新型钢-混组合桥面系模型试验研究[J]. 交通科学与工程，2017，33(1)：38－45（WANG Da，FU Jingping，CHEN Fanghuai，et al. Experimental research on the model of new steel-concrete composite desk system model[J]. Journal of Transport Science and Engineering，2017，33(1)：38－45 (in Chinese))

[4] 许开成. 基于界面损伤的钢管混凝土粘结滑移性能研究[D]. 南昌大学，2013：108－120（XU Kaicheng. Study on bond-slip relationship of concrete-filled steel tube based on interface damage[D]. Nanchang University，2013：108－120 (in Chinese))

[5] 应武挡. 型钢高强混凝土界面黏结滑移试验研究与理论分析[D]. 南宁：广西大学，2014：1－10（YING Wudang. Experimental study and theoretical analysis on bond-slip performance between shaped-steel and high concrete in SRHC structures[D]. Nanning：Guangxi University，2014：1－10 (in Chinese))

[6] 谭婷. 钢-混凝土组合构件连接件损伤识别[D]. 长沙：湖南大学，2011：1－10（TAN Ting. Damage detection of shear connectors for a concrete-steel composite component[D]. Changsha：Hunan University，2011：1－10 (in Chinese))

[7] 徐超，周帮友，刘倍恩，等. 机械螺栓连接状态监测和辨识方法研究进展[J]. 强度与环境，2009，36(2)：28－36（XU Chao，ZHOU Bangyou，LIU Beien，et al. A review of vibration-based condition monitoring and identification for mechanical bolted joints[J]. Structure & Environment Engineering，2009，36(2)：28－36 (in Chinese))

[8] 叶亮，张友忱，丁克勤，等. 基于压电阻抗法的机械螺栓组松动监测及识别[J]. 科学技术与工程，2013，13(18)：5172－5173（YE Liang，ZHANG Youchen，DING Keqin，et al. Monitoring and localization of loosened bolts based on E/M impedance method[J]. Science Technology and Engineering，2013，13(18)：5172－5173 (in Chinese))

[9] Rucka M. Failure monitoring and condition assessment of steel-concrete adhesive connection using ultrasonic waves [J]. Applied Sciences，2018，8：320.

[10] Jeremy B R，James R L，Wathan M，et al. Thermographic inspection of pipes，tanks，and containment liners[J]. AIP Conference Proceedings，2015，1650：290－297.

[11] 陈维业，胡杰，刘光辉，等. 复合材料胶接修补界面损伤演化声发射监测[J]. 玻璃钢/复合材料，2016(7)：9－13（CHEN Weiye，HU Jie，LIU Guanghui，et al. Acoustic emission monitoring for damage evolution of composite bonding repair interface[J]. Glass Fiber Reinforced Plastics/Composite Materials，2016(7)：9－13 (in Chinese))

[12] 许斌，陈梦琦，余地华，等. 基于压电阻抗的钢管混凝土柱界面缺陷检测研究[J]. 施工技术，2015，44(11)：117－121（XU Bin，CHEN Mengqi，YU Dihua，et al. Experimental study on interface debonding detection of a large-scale irregular CFST column with electro-mechanical impedance of PZT[J]. Construction Technology，2015，44(11)：117－121 (in Chinese))

[13] 向志海，黄俊涛. 螺栓松紧程度的受控敲击检测方法[J]. 实验力学，2012，27(5)：545－551（XIANG Zhihai，HUANG Juntao. A controlled tap detection method for bolt tightness[J]. Journal of Experimental Mechanics 2012，27(5)：545－551 (in Chinese))

[14] 王高平，郭瑞，皮云晗，等. 基于结构应变的化工设备螺栓松动监测技术研究[J]. 化工设备与管道，2016，53(2)：25－31（WANG Gaoping，GUO Rui，PI Yunhan，et al. Research on bolt loosening monitoring technology of

chemical equipment based on structural strain[J]. Process Equipment & Piping, 2016, 53(2):25－31 (in Chinese))

[15] 屈文忠，张梦阳，周俊宇，等. 螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法[J]. 振动、测试与诊断，2017，37(2):279－283，403 (QU Wenzhong, ZHANG Mengyang, ZHOU Junyu, et al. Using sub-harmonic resonance to detect bolted joint looseness[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2):279－283, 403 (in Chinese))

[16] 杜飞，徐超. 螺栓连接松动的导波监测技术综述[J]. 宇航总体技术，2018，2(4):13－23 (DU Fei, XU Chao. A review on bolt preload monitoring using guided waves[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(4):13－23 (in Chinese))

[17] 孙曼. 光纤 Bragg 光栅传感技术用于工程结构安全监测的研究[D]. 成都：四川大学，2005:115－117 (SUN Man. Health monitoring of engineering structures using fiber bragg grating sensing technology[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005:115－117 (in Chinese))

[18] 赵海亮. 基于局部瞬态激励钢砼界面脱空实验研究[D]. 大连理工大学，2014:7－11 (ZHAO Hailiang. The experimental research of the void at the interface of the concrete-filled steel tube based on the transient excitation [D]. Dalian University of Technology, 2014:7－11 (in Chinese))

[19] 刘蒙. 基于麦克风冲击共振法的钢-混凝土组合结构脱空损伤诊断研究[D]. 长沙：湖南大学，2018:35－65 (LIU Meng. Diagnosis of interface debonding in steel-concrete composite structures using air-coupled impact resonance test[D]. Changsha: Hunan University, 2018:35－65 (in Chinese))

[20] 李震. 基于压电陶瓷的型钢混凝土柱界面缺陷识别研究[D]. 长沙：湖南大学，2015:38－39 (LI Zhen. Experimental study on interface debonding of steel reinforced concrete columns based on PZT[D]. Changsha: Hunan University, 2015:38－39 (in Chinese))

Experimental study on monitoring interface damage of steel-concrete composite structure

JIANG Tian-yong, XIAO Min, WU Qing-lin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Monitoring interface damage of steel-concrete composite structures becomes more and more important in applications. Here a piezoceramic-based active sensing monitoring method for interface damage detection of the composite structures is proposed. Six lead zirconate titanates (PZTs) patches bonded on the lower surface of the joist steel upper flange near the bolt joints are used as the actuators to generate stress waves. Seven smart aggregates(SAs), fabricated by sandwiching a shear type PZT patch between two protection marble pieces, are embedded at the corresponding positions in the concrete flange plate to collect response signals from the damaged interface. To simulate the interface damage, four bolt joints arranged symmetrically in the composite structure are loosened successively. The time-domain signal, frequency-domain signal and the wavelet packet energy are compared and analyzed under different damage conditions. According to the analysis of experimental results, the amplitudes of time-domain signal, frequency-domain signal and wavelet packet energy decrease obviously when the structure interface damage is enhanced. The reason mainly lies in the fact that the actual contact area between shape steel and concrete decreases due to the loosening of bolts, which blocks the propagation of stress waves. Experimental results demonstrate that the active sensing monitoring method based on PZT transducers can effectively monitor and estimate the damage status of steel-concrete interface.

Keywords: interface damage; lead zirconate titanate (PZT); active sensing monitoring; bolt connection; wavelet packet-based energy