

基于压电陶瓷的法兰连接中高强螺栓松动 损伤监测试验研究

蒋田勇¹, 方麟¹, 梁仕杰²

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要:针对法兰连接构件中高强螺栓的松动问题,该文提出基于压电陶瓷的法兰连接中高强螺栓松动损伤监测方法,采用压电波动法对法兰连接中高强螺栓松动损伤进行监测试验研究,两个钢法兰通过4颗高强螺栓连接,在钢管表面预定位置粘贴压电陶瓷片,其中1个作为驱动器发射应力波信号,另外3个作为传感器接收应力波信号。试验包括健康状态、松动1颗、2颗、3颗、4颗高强螺栓共5个工况,法兰连接试件采用横向和竖向两种放置方式。试验中判断螺栓的松动损伤程度分析方法包括时域分析、频域分析以及小波包能量分析。结果表明:随着法兰连接试件之间的紧密性减小,时域、频域信号幅值均逐渐降低,小波包能量也会逐渐减少。

关键词:压电陶瓷;波动法;高强螺栓;结构损伤监测;法兰螺栓连接

1 引言

钢结构的发展促进了桥梁行业的发展,而其中钢管结构以其良好的承载力和截面特性广泛应用于钢管混凝土拱桥和支架等结构。法兰盘是钢管结构常用的连接装置,多用于受轴力作用构件的连接。法兰连接是螺栓连接的一种形式,依靠高强螺栓压紧法兰,从而把垫片压紧达到密封效果。高强螺栓在循环载荷的冲击和长期的风致振动作用下会出现不同程度的松动情况,其松动可能会导致毁灭性的后果和重大财产损失^[1],为了避免法兰连接中健康状况不良的高强螺栓带来灾难性后果,对法兰连接中高强螺栓健康状况进行实时在线监测显得尤为重要^[2]。

为了更好地了解构件中高强螺栓的健康状况,很多学者对此做了大量工作,并研究出多种检测方法。传统的方法有敲击法、声发射法和超声波法^[3-4]等。随着研究的深入,又出现了图像处理法^[5]和压电阻抗法等新方法。当前,针对螺栓松动问题,屈文忠等^[6]提出了螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法,当亚谐波产生所需的激励频率在2倍固有频率附近就能有效识

别螺栓松动;吴冠男等^[7]提出了基于混沌超声波激励的螺栓连接松动监测研究,发现特征参量ALAVR能够有效检测出早期的螺栓松动;王子斌等^[8]提出了基于模型的螺栓松动状态监测方法,在现有的模型损伤识别技术基础上,研究出一种两阶段的螺栓状态长期在线识别方法。

综上所述,目前对于法兰连接中高强螺栓松动损伤监测的研究很少,而且现有方法对操作水平有着较高的要求,导致监测结果并不理想。该文根据压电陶瓷具有响应速度快、频率范围宽、耗能低以及成本低廉等优点,提出采用压电波动法对法兰连接中高强螺栓健康状况监测进行试验研究,并验证压电波动法对法兰连接中高强螺栓松动损伤监测的有效性。

2 监测原理

试验采用基于压电陶瓷的压电波动法,利用压电陶瓷的双重性将压电陶瓷PZT作为驱动器和传感器,粘贴在法兰连接试件的表面与其共同构成压电智能结构监测系统。考虑在工程实际情况中螺栓松动后,在重力影响下,其法兰连接在横向和竖向布置时表现出

收稿日期:2021-09-23(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFC1511002);国家自然科学基金资助项目(编号:51778068,52078058);湖南省自然科学基金创新研究群体项目(编号:2020JJ1006);湖南省教育厅科学研究重点项目(编号:21A0196)

作者简介:蒋田勇,男,博士,教授。E-mail:363842987@qq.com

不同的受力,其应力波传播的路径表现也不一样,因此试验将分为横向放置和竖向放置。试验监测原理如图 1、2 所示。

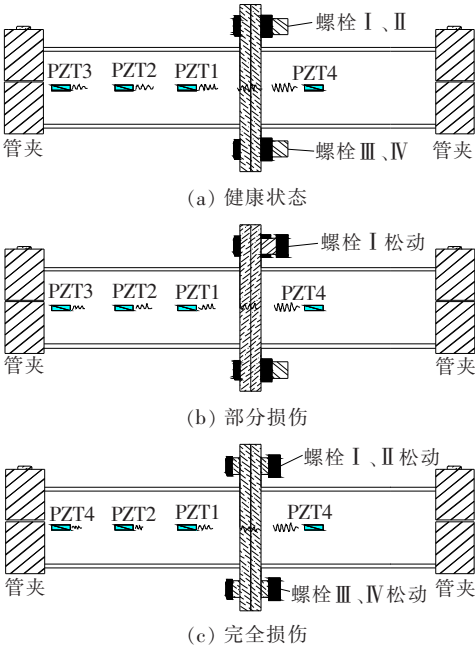


图 1 试件横向放置时松动损伤监测原理图

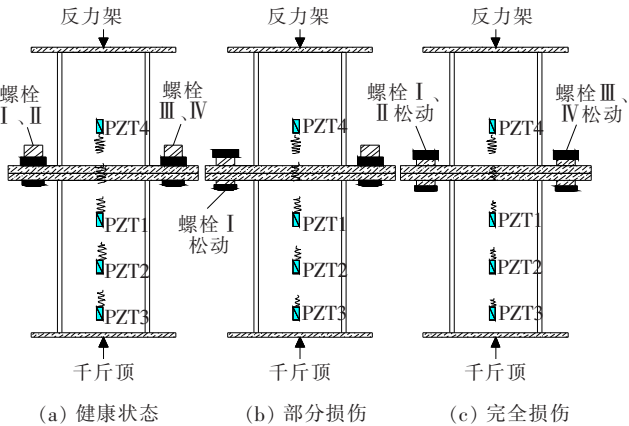


图 2 试件竖向放置时松动损伤监测原理图

将粘贴在法兰连接试件交界面一侧的 PZT4 作为驱动器发射应力波信号,另一侧的 PZT1、PZT2 和 PZT3 作为传感器接收应力波信号。两个法兰通过 4 颗高强螺栓进行连接,当高强螺栓 I 发生松动时,法兰试件连接界面的紧密性会下降,从而对应力波的传播造成影响,出现发散、反射和折射等现象,最终使得传感器接收到的响应信号也对应减少。当 4 颗高强螺栓全部松动时,法兰连接界面的紧密性大幅度下降,交界面损伤加剧,传感器接收到的响应信号也随之进一步衰减。因此,通过对比损伤状态下的响应信号与健康状态下的响应信号,会发现两者之间的差异,即随着法

兰连接界面的紧密性降低,应力波呈现出衰减的趋势,故而可以判断法兰连接中高强螺栓的松动损伤情况。

3 试验内容

3.1 试验试件

为了对法兰连接中高强螺栓松动损伤监测进行研究,试验设计了一个由高强螺栓连接的两个带颈法兰的组合结构。法兰材质为 WCC 碳钢,螺栓采用 M16 高强螺栓,法兰连接试件具体尺寸如图 3 所示。

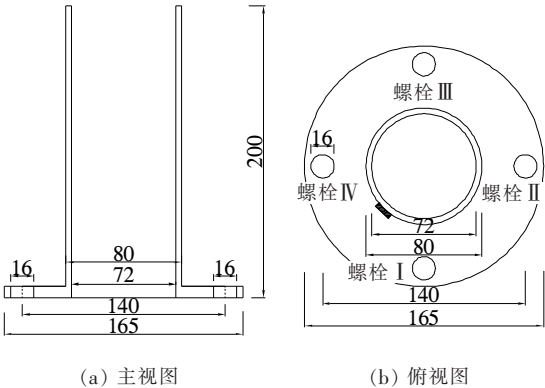


图 3 法兰构件示意图(单位:mm)

在法兰连接试件的钢管上粘贴了 4 片压电陶瓷 PZT,其中 PZT1、PZT2 和 PZT3 三个作为传感器,PZT4 作为驱动器。PZT1、PZT2 和 PZT3 之间的中心距离为 50 mm,PZT1 和 PZT4 沿结构中心面对称布置,其中心距离结构中心面的距离为 50 mm(图 4),粘贴好的压电陶瓷传感器/驱动器,如图 5 所示。

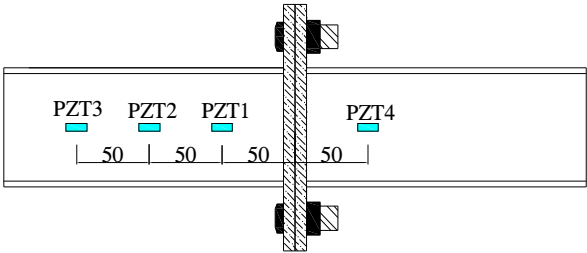


图 4 法兰连接试件的压电陶瓷 PZT 布置形式(单位:mm)

3.2 试验工况

试验将两个法兰通过 4 颗 M16 的 8.8 级高强螺栓进行连接,通过拧松螺栓的个数来进行工况的拟定,此次试验每次只松动一颗螺栓,共包含 5 个试验工况:① 工况 0 为健康状况;② 工况 1 为松动高强螺栓 I;③ 工况 2 为松动高强螺栓 I、II;④ 工况 3 为松动高强螺栓 I、II、III;⑤ 工况 4 为松动高强螺栓 I、II、III、IV。

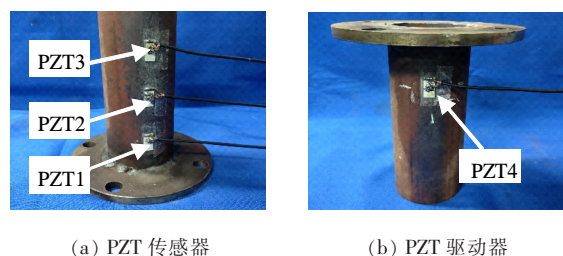


图5 粘贴好后的 PZT 传感器/驱动器

3.3 试验过程

测试仪器采用 NI USB-6363, 用 USB 数据线与笔记本电脑端相连, 通过 BNC 接头分别连接 PZT 传感器/驱动器, 其中发射端连接 PZT 驱动器, 接收端连接 PZT 传感器。试验采取横向和竖向两种放置方式, 试件横向放置时, 法兰连接试件通过重型铝合金管夹将两端固定, 然后用高强胶水将重型铝合金管夹的底座固定在混凝土块上, 这样可以有效地防止在松动螺栓时法兰连接试件产生转动。此时, 法兰连接试件交界面只受螺栓预紧力的作用。

试件竖向放置时, 法兰连接试件不变, 将放置方向由横向转变为竖向, 其中法兰连接试件固定装置包括千斤顶和反力架等, 可以防止螺栓松动过程中试件出现偏差, 影响试验结果的精确性。

3.4 应力波信号加载

试验的驱动激励信号采用扫频正弦波信号, 该信号扫频范围为 100 Hz~150 kHz, 正弦波的振幅和持续时间分别为 10 V 和 1 s。测试中, 将预先确定的输入信号(激励信号)由 NI USB-6363 发送到粘贴在法兰连接试件上一侧的压电陶瓷驱动器, 然后再通过数据采集器 NI USB-6363 收集记录另一侧的压电陶瓷传感器接收到的响应信号。

4 结果分析与讨论

4.1 时域分析

时域信号图是以时间为自变量, 幅值为因变量。时域分析主要是通过信号幅值的大小来对损伤进行判断。当法兰连接试件横向放置时, 压电陶瓷 PZT1、PZT2 和 PZT3 的时域信号图, 如图 6~8 所示。

从图 6~8 可以看出: ① 随着高强螺栓松动个数的增加, 时域信号幅值也会发生改变, 而且 PZT1 至 PZT3 接收到的幅值变化幅度具有一致性。当松动 1 颗高强螺栓时, 幅值相对于健康状态有所降低, 这是因为松动 1 颗螺栓使得法兰之间的接触紧密性下降。当

松动 2 颗高强螺栓时, 幅值相对于健康状态有所降低, 但是相对于松动 1 颗高强螺栓又有所增加, 这是因为当同时松动法兰边侧的 2 颗高强螺栓时, 由于重力的影响, 会使得法兰试件高强螺栓松动损伤程度比松动 1 颗螺栓时小。当松动 3 颗高强螺栓时, 幅值相比于之前的工况都有所下降。当松动 4 颗高强螺栓时, 信号幅值明显下降, 相比于健康状态下的幅值峰值降低 30% 左右; ② PZT1 和 PZT2 的变化幅度较 PZT3 更为明显, 这是因为在一定的距离范围内, PZT1 和 PZT2 的位置距离驱动器 PZT4 较近, 接收到的响应信号也较强。

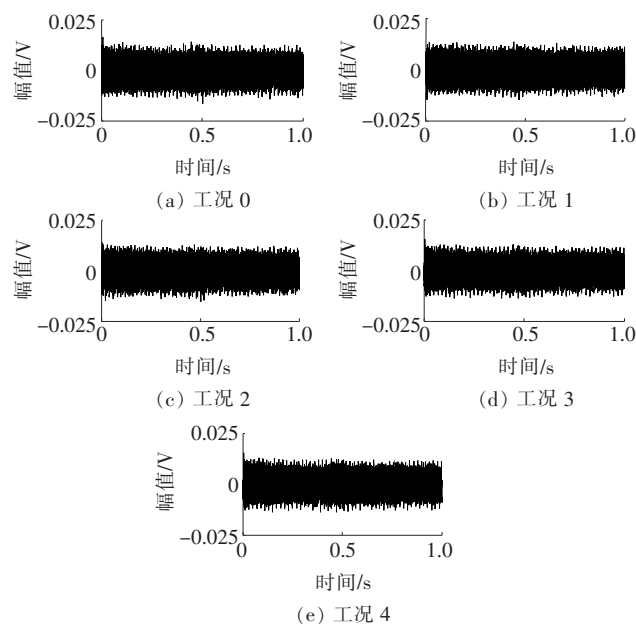


图6 法兰连接试件横向放置时压电陶瓷 PZT1 的时域图

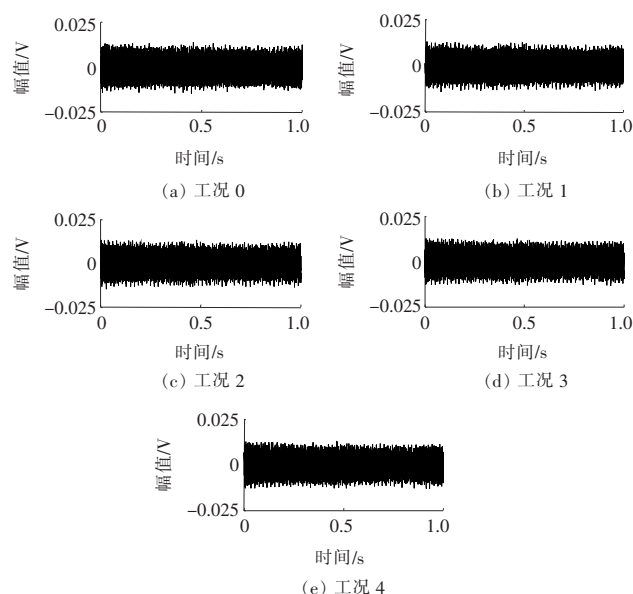


图7 法兰连接试件横向放置时压电陶瓷 PZT2 的时域图

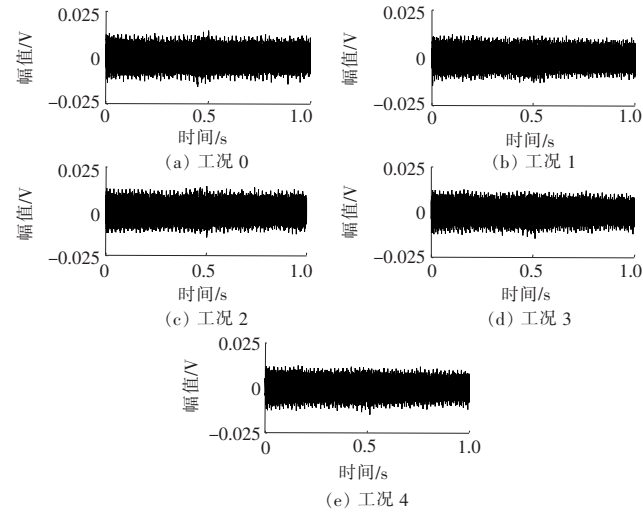


图 8 法兰连接试件横向放置时压电陶瓷 PZT3 的时域图

当法兰连接试件竖向放置时,压电陶瓷 PZT1、PZT2 和 PZT3 的时域信号图,如图 9~11 所示。

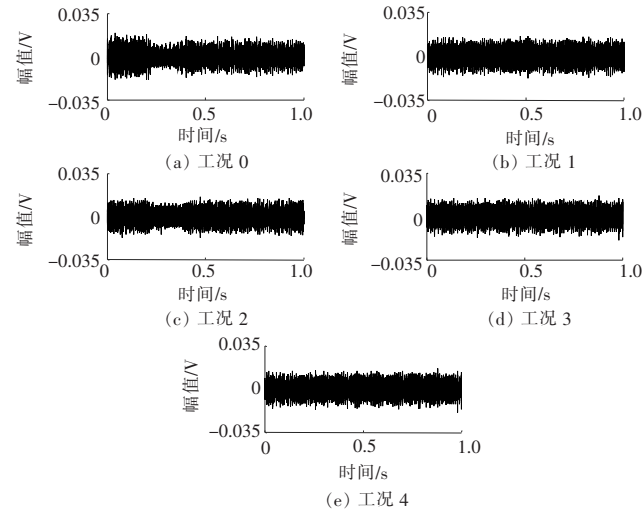


图 9 法兰连接试件竖向放置时压电陶瓷 PZT1 的时域图

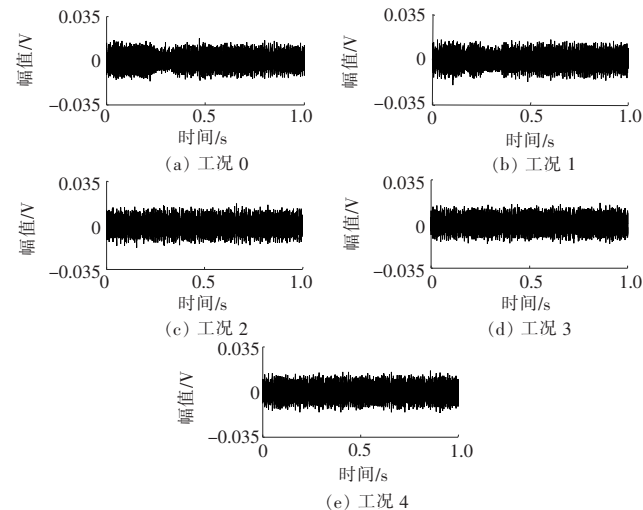


图 10 法兰连接试件竖向放置时压电陶瓷 PZT2 的时域图

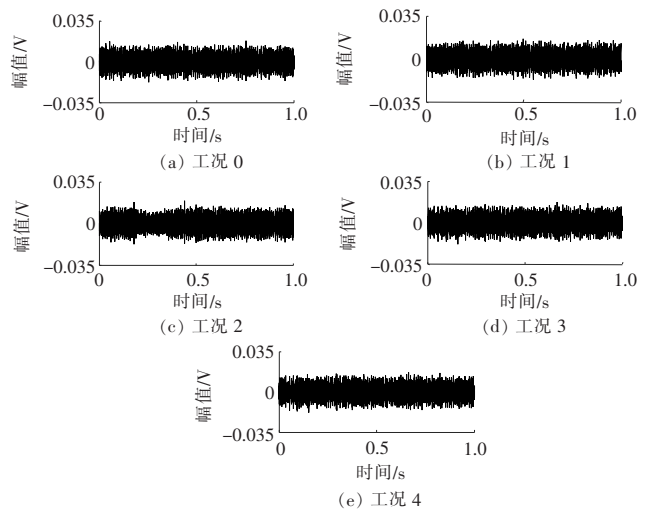


图 11 法兰连接试件竖向放置时压电陶瓷 PZT3 的时域图

从图 9~11 可以看出:随着法兰连接试件之间的紧密性减小,幅值整体呈现出下降的趋势。在松动 1 颗、2 颗以及 3 颗高强螺栓时,应力波幅值均只有一个轻微的减少过程,说明松动这几颗高强螺栓后,对法兰连接的紧密性影响不是很大。而只有在松动全部高强螺栓后,幅值才有大幅度降低,约为健康状态幅值的 2/3,说明在松动全部的高强螺栓后,对法兰连接的紧密性有很大程度的削弱,从而导致了幅值的明显降低。与试件横向放置相比,由于竖向放置时法兰连接试件受到重力作用和千斤顶压力作用,其紧密性更大,时域幅值也更高。

4.2 频域分析

采用快速傅立叶变换(FFT)对时域信号进行处理生成频域信号图。频域信号主要反映频率的组成、幅值、相位的变化。通过频域信号图可以看到 PZT 传感器所接收到的 PZT 驱动器激励信号的主要振动频率范围。考虑篇幅影响,对横向放置和竖向放置均只选取压电陶瓷 PZT1 进行分析。当法兰连接试件横向放置时,压电陶瓷 PZT1 的频域信号图见图 12。

由图 12 可以看出:幅值峰值在 40~125 kHz 时较为明显,其中在健康状态下,幅值峰值为 $2.25 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 左右,在松动 1 颗高强螺栓后降低到 $1.9 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$,说明 PZT4 发出的应力波信号传播受阻,导致 PZT1 接收到的响应信号也被削弱。在松动 2 颗螺栓后,又增加到了 $2.0 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$,PZT1 接收到的响应信号较松动 1 颗螺栓强,说明法兰试件的紧密性较松动 1 颗螺栓大。随后在松动第 3 颗螺栓后,幅值大致为 $1.7 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$,应力波信号传播受阻加剧,法兰试件紧密性减小。当第 4 颗高强螺栓松完后,

发现幅值明显降低至 $1.0 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$, 应力波信号传播严重受阻, 法兰试件紧密性大幅减小。

当法兰连接试件竖向放置时, 压电陶瓷 PZT1 的频域信号图如图 13 所示。

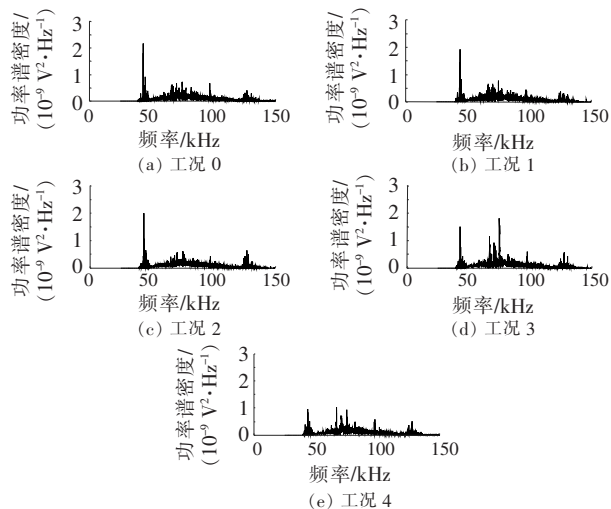


图 12 法兰连接试件横向放置时压电陶瓷 PZT1 的频域图

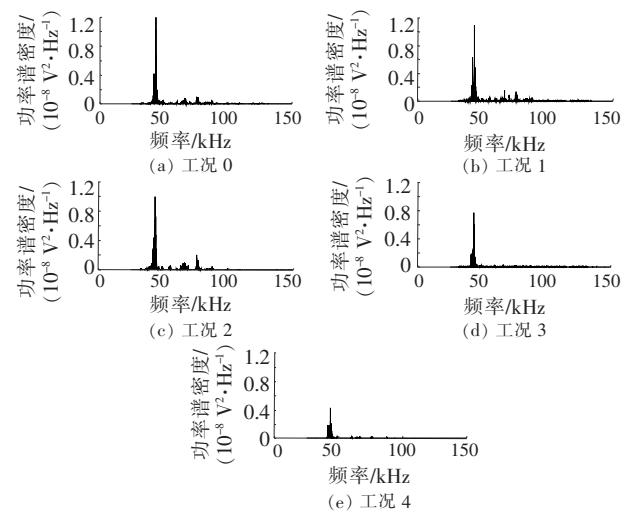


图 13 法兰连接试件竖向放置时压电陶瓷 PZT1 的频域图

通过对图 13 进行频域信号分析可以看出: 幅值峰值在 25~80 kHz 时较为明显。频域幅值峰值随着高强螺栓松动个数的增加而降低。从健康状态到松动全部高强螺栓时, 幅值峰值由 $1.2 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 下降到 $4.4 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$, 峰值下降了 63% 左右, 说明法兰连接中高强螺栓松动损伤严重。其中在松动 1 颗、2 颗高强螺栓后幅值降低幅度较小, 较前一工况下降 10% 左右, 说明松动 1 颗、2 颗高强螺栓对应力波传播影响不是很大。随后当松完第 3 颗螺栓后, 幅值降低幅度较大, 峰值降低至 $8 \times 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$, 法兰连接的紧密性因螺栓松动有一个较大的降低。相比横向放置,

竖向放置由于法兰试件受力不同, 应力波传播路径存在差异, 导致频域峰值以及响应频率也不一样。

4.3 小波包能量分析

能量是结构动力分析进行损伤识别的重要物理量, 当结构所受外部激励量的向量一定时, 若结构存在损伤, 则由损伤引起的结构动力特性变化必然会引起结构动力响应的能量变化, 从而导致输出信号在不同频段某些频率成分被抑制, 另一些频率成分增强。由此可知, 结构损伤将会引起结构动力响应能量在不同频带的能量重分布^[9-10]。利用小波包对法兰连接试件损伤前后的动力响应信号进行分解、重构, 从而得到信号在各个尺度上的能量分布情况, 并以此作为法兰连接试件损伤识别的依据。通过小波包能量对信号进一步分析, 即进行量化分析, 更能体现出信号的变化。同样, 先对横向放置的法兰连接试件进行分析。

当法兰连接试件横向放置时, 压电陶瓷 PZT1、PZT2 和 PZT3 的小波包能量图, 如图 14 所示。

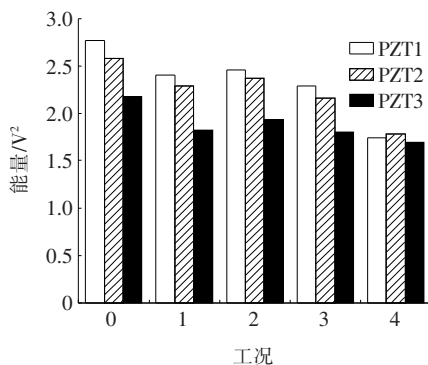


图 14 法兰连接试件横向放置时压电陶瓷小波包能量图

由图 14 可以看出: 随着高强螺栓松动个数的增加, 三者出现相同的变化规律, 即在松动第 1 颗高强螺栓后, 由于法兰连接试件交界面的紧密性下降, 导致应力波传播路径受阻, 接收到的响应信号也相应发生衰减, 使得小波包能量值减小, 其中 PZT1、PZT2 和 PZT3 接收到的能量损失率分别为 13%、11%、16%。在松动第 2 颗高强螺栓后, 能量又突然升高, 但是都低于健康状态下的能量值, 说明在松动第 2 颗高强螺栓后, 法兰连接试件的紧密性比松动第 1 颗高强螺栓的紧密性要高, 但是比健康状态下的紧密性低, 这也与法兰连接试件自身重力的影响有关。接着在松动第 3 颗螺栓后能量降低较小, PZT1、PZT2 和 PZT3 接收到的能量损失率分别为 7%、8%、7%。最后松动第 4 颗螺栓后, PZT1 和 PZT2 接收到的能量值大幅度下降, 其能量损失率分别为 24%、18%, 但是 PZT3 的损失率

却只有 6%。

当法兰连接试件竖向放置时,压电陶瓷 PZT1、PZT2 和 PZT3 的小波包能量图,如图 15 所示。

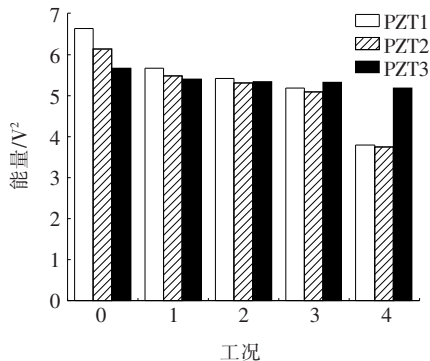


图 15 法兰连接试件竖向放置时压电陶瓷小波包能量图

由图 15 可以看出:PZT1 和 PZT2 接收到的能量值随着高强螺栓松动个数的增加而下降,在松动第 1 颗高强螺栓后,能量值下降较为明显,PZT1 和 PZT2 接收到的能量损失率分别为 15%、11%。在松动第 2 颗、第 3 颗高强螺栓后,PZT1 和 PZT2 的能量损失率都为 4%左右。当松动第 4 颗高强螺栓时,能量值下降最为明显,PZT1 和 PZT2 的能量损失率都为 26%左右,说明当松动全部的高强螺栓时,法兰连接试件交界面的紧密性急剧下降。同时,与 PZT1、PZT2 相比,PZT3 随着螺栓松动虽然能量值也有所下降,但是能量变化不在同一个数量级,所以 PZT3 难以反映出高强螺栓松动下的规律。

另外,由图 14、15 可知:竖向放置的能量值整体上都比横向放置时的能量值高,这是由于放置方式的不同导致法兰连接试件的受力存在差异,竖向放置的法兰连接试件紧密性比横向放置要好。

5 结论

(1) 时、频域信号幅值以及小波包能量变化与法兰连接试件损伤状态密切相关,呈现出一定的规律性,即损伤越大,幅值越低,小波包能量值越小。

(2) 试验考虑到实际工程中法兰结构所处位置不同,分为横向放置和竖向放置,得出了不同的规律,且不同放置方式下,时域和频域峰值范围分布不一样,小波包能量值的大小也不一样;通过时域、频域以及小波包能量分析,对于横向放置的法兰连接构件,在松动第 2 颗螺栓后,幅值有所上升,小波包能量也增大,这

是由于在自身重力作用下,法兰接触更加紧密;竖向放置时,传感器接收到的响应信号要比横向放置时强,这是因为竖向放置时法兰交界面的紧密性比横向放置大。

(3) 在横向法兰连接试件装置监测中,通过对比压电陶瓷 PZT1、PZT2 和 PZT3 的时域信号图、频域信号图以及小波包能量变化图可以看出,传感器与驱动器的距离对监测也有影响,且在一定距离范围内,距离越远,灵敏度越低。

(4) 对于法兰连接中高强螺栓松动损伤,时域信号分析、频域信号分析和小波包能量分析均能反映试件损伤的程度,所以基于压电陶瓷的法兰连接中高强螺栓松动损伤监测具有可靠性。

参考文献:

- [1] 刘景良,陈飞宇,郑文婷,等.基于归一化频响函数曲率差的钢-木组合梁螺栓松动定位方法[J].铁道科学与工程学报,2020,17(2):451-459.
- [2] JIANG Tianyong, WU Qinglin, Wang Lei, et al. Monitoring of Bolt Looseness-Induced Damage in Steel Truss Arch Structure Using Piezoceramic Transducers[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6 677-6 685.
- [3] Amerini F, Meo M. Structural Health Monitoring of Bolted Joints Using Linear and Nonlinear Acoustic/Ultrasonic Methods[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(6): 659-672.
- [4] Jhang K Y, Quan H H, Ha J, et al. Estimation of Clamping Force in High-Tension Bolts through Ultrasonic Velocity Measurement[J]. Ultrasonics, 2006, 44(Suppl 1): e1 339-e1 342.
- [5] 张金敏,冯映科,王思明.基于 WLD-LPQ 特征的心盘螺栓故障图像检测算法[J].铁道科学与工程学报,2018,15(9):2 349-2 358.
- [6] 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.
- [7] 吴冠男,徐超.基于混沌超声波激励的螺栓连接松动检测研究[J].振动与冲击,2018,37(9):208-213.
- [8] 王子斌,郭勤涛,展铭.基于模型的螺栓松动状态监测方法[J].振动、测试与诊断,2019,39(2):53-57,213.
- [9] 辛晨.基于小波包能量比的桥梁损伤识别[D].西南交通大学硕士学位论文,2017.
- [10] Jiang Tianyong, Zhang Yaowen, Wang Lei, et al. Monitoring Fatigue Damage of Modular Bridge Expansion Joints Using Piezoceramic Transducers [J]. Sensors, 2018, 18(11): 3 973.