

基于柔性压电材料传感器的法兰螺栓松动检测

沈意平¹, 翁 晶¹, 刘 翊², 蒋 帅^{1,4}, 阳雪兵³

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湘潭 411201;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 株洲 412001;

3. 哈电风能有限公司, 湘潭 411104; 4. 湖南铁道职业技术学院 智能制造学院, 株洲 412001)

摘 要: 采用柔性压电复合材料传感器进行法兰螺栓松动检测, 研究 PZT 粒径对复合材料压电和介电性能的影响。制备的复合材料压电电压常数 g_{33} 达到 $117 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$ 。采用柔性复合材料传感器接收单个和多个螺栓在不同松动程度下的超声波, 获得超声波透射信号首达波幅值随螺栓松动变化规律。结果表明, 随着单个法兰螺栓松动程度加剧, 超声波透射信号首达波幅值减小; 法兰螺栓在相同预紧力矩情况下, 超声波透射信号首达波幅值随着螺栓松动个数增加而减小。研究可为法兰螺栓松动定量检测提供理论依据。

关键词: 法兰螺栓松动; 压电复合材料; PZT 粒径; 超声波首达波幅值; 预紧力矩

中图分类号: TH878 ; TB551; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)09-0016-06

Flange bolt looseness detection based on flexible piezoelectric material sensor

SHEN Yiping¹, WENG Jing¹, LIU Yi², JIANG Shuai^{1,4}, YANG Xuebing³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

3. Hadian Wind Energy Co., Ltd., Xiangtan 411104, China;

4. School of Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Flange bolt loosening can be detected by using the flexible piezoelectric composite sensor. The effect of PZT particle size on the piezoelectric and dielectric properties of the composites was experimentally studied. The piezoelectric voltage constant g_{33} of the prepared composites reached $117 \text{ mV} \cdot \text{N}^{-1}$. The flexible composite material sensor was used to receive ultrasonic waves with different loosening degrees of single and multiple bolts, and the variation law of the first arrival wave amplitude of the ultrasonic transmission signal with the loosening of the bolts was obtained. The experimental results have shown that as the loosening degree of a single flange bolt increases, the amplitude of the first arrival wave of the ultrasonic transmission signal decreases. Under the same pre-tightening torque of flange bolts, the first arrival wave amplitude of ultrasonic transmission signal decreases with the increase of the number of loose bolts, which shall provide a theoretical basis for quantitative detection of flange bolt looseness.

Key words: flange bolt loose; piezoelectric composite; PZT particle size; ultrasonic wave amplitude at first; pre-tightening torque

收稿日期: 2022-02-14

基金项目: 湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2019RS2062, 2020RC3049); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6029, 2021JJ60007, 2022JJ30260); 湖南省教育厅重点项目(21A0310)

作者简介: 沈意平(1981—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新型压电传感技术、结构健康监测

通信作者: 沈意平, yiping1011@163.com

法兰螺栓连接是风电机组分段塔筒的连接方式, 在随机风载作用下塔筒振动容易导致螺栓松动, 进而影响整机运行的可靠性和安全性, 甚至引发风电机组倒塌事故^[1-2]。目前螺栓松动检测方法主要有振动法、机电阻抗法和超声波法^[3]。传统的振动法中, 风电塔筒固有频率等振动特性对法兰螺栓松

动并不敏感,检测灵敏度较差。阻抗法需要采用体积大且昂贵的机电阻抗测量仪器,不适用于野外服役环境。超声波法利用螺栓松动界面对结构中超声波传播特性的影响进行松动检测,具有灵敏度高、检测范围大等优点,已被应用于螺栓连接结构的松动检测^[4-5]。

WANG^[6]将PZT(锆钛酸铅)压电片布置在螺栓连接板结构的表面,提出利用超声导波幅值作为拧紧指标对单个螺栓的预紧力进行监测。ZAGRAI等提出通过测量穿过螺栓连接处的导波相位延迟来估计螺栓扭矩,研究表明螺栓扭矩与导波信号的相移成正比。杜飞等^[7]将PZT压电片粘贴在法兰连接的两段筒壁表面,采用透射信号的均方根偏差作为螺栓松动指标,研究了螺栓松动时均方根偏差的变化规律。以上研究均为法兰螺栓松动识别提供了理论依据。现有研究通常采用PZT压电片作为传感器,往往仅聚焦单个螺栓松动程度的检测,而低频重载的风电塔筒法兰结构复杂,极限应力/应变大,螺栓分布数目多,给螺栓松动检测所需的传感器与检测方法带来了新的挑战。

PZT压电片质地硬脆、易碎、极限应变非常小,不能满足风电塔筒野外恶劣服役环境及法兰结构螺栓松动检测的要求。0-3型压电复合材料将不连续的PZT颗粒分散于三维连通的聚合物中,具有制备简单、柔性好、应变大、压电性能优良等优点。ZHANG^[8]较早地将PZT/环氧树脂复合材料用于振动和声传感器中接收薄板振动和声发射信号。杨照光等^[9]基于0-3型PZT/PVDF(偏聚氟乙烯)压电复合薄膜研制声发射传感器并进行了断铅试验。KANG等^[10]将制备的PNN-PZT/环氧树脂复合材料(PNN为铌镍酸铅)应用于风电叶片,以进行鸟撞声发射信号检测。项目组前期研究了PZT/环氧树脂复合材料性能的影响因素,并探讨其对于曲面板和钢轨等结构超声导波传感的适用性和有效性。研究表明其具有良好的线性灵敏度和环境适应性^[11-12]。

现有PZT/聚合物复合材料研究较多地关注两相材料类型及其质量比、极化参数等因素对压电复合材料性能的影响。特别地,PZT粒径大小也是影响压电复合材料传感性能的重要因素。如龚红宇等^[13]探索了不同粒径范围PZT对PZT/水泥复合材料压电和力学性能的影响,结果表明,随着PZT粒径增大,复合材料压电常数与介电常数均增大,但其稳定性变差,弯曲强度降低。ABOUBAKR^[14]根

据极化效率来确定PZT/PU复合材料的PZT粒径大小,也发现采用大尺寸PZT粒径有利于提高复合材料压电和介电性能。

文章将进一步研究PZT粒径对PZT/环氧树脂复合材料压电和介电性能的影响,制备传感性能良好的柔性压电复合材料;将该复合材料粘贴于法兰结构表面,作为超声波接收传感器,通过改变单个或多个螺栓的预紧力矩,研究法兰结构中螺栓松动程度和松动数目对超声波透射信号的影响,从而为法兰螺栓松动定量检测提供理论依据。

1 PZT/环氧树脂复合材料制备

采用固相法制备PZT/环氧树脂复合材料,原材料PZT粉体由烟台兴陶电子科技有限公司提供,环氧树脂由奥斯邦有限公司提供。将PZT粉体与无水乙醇混合后放入电阻炉中烧结,烧结温度为150℃,烧结时间为2h。烧结后的PZT块体采用球磨机研磨成粉,通过标准筛进行筛分,以得到不同粒径区间的PZT粉体。采用的标准筛目数为150~170目,130~150目,110~130目,90~110目,70~90目。筛分得到PZT粒径区间为90~106 μm,106~113 μm,113~123 μm,123~160 μm,160~212 μm,不同粒径区间的PZT粉体如图1所示,分别以编号I、II、III、IV、V表示。

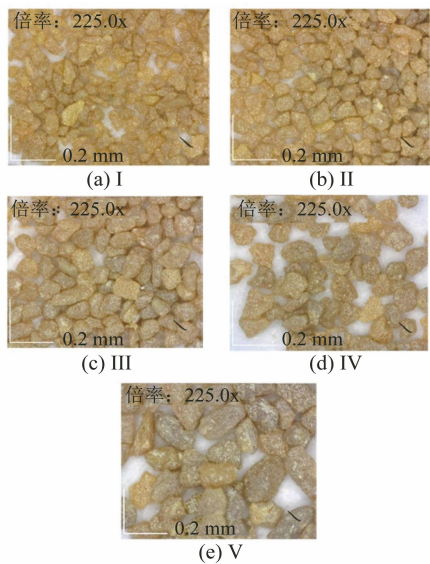


图1 不同粒径区间的PZT粉体

将PZT粉体与环氧树脂按7:1的质量比混合,搅拌均匀后涂抹于成型模具中,常温固化后所制成的复合材料如图2所示,其直径为25mm,厚度为1mm。

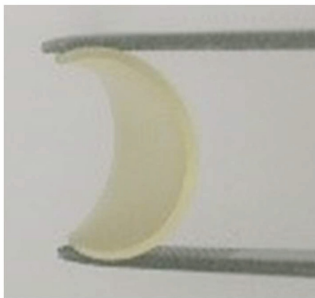


图2 PZT/环氧树脂复合材料

PZT/环氧树脂复合材料采用油浴极化,极化电压为 3 kV/mm,极化时间为 20 min,极化温度为 100 ℃^[12]。压电电压常数 g_{33} 能够表征压电复合材料的传感性能,直接关系到传感透射电压的灵敏度,其表达式为

$$g_{33} = d_{33} / \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1)$$

式中: d_{33} 和 ϵ_r 分别为压电复合材料的压电应变常数和介电常数; ϵ_0 为真空介电常数。

采用 ZJ-6A 型准静态测量仪测试压电应变常数 d_{33} ,采用 TH-2838 型精密阻抗仪测试复合材料的介电常数 ϵ_r 与介电损耗 $\tan \delta$ 。PZT 粒径与 PZT/环氧树脂压电复合材料压电应变常数和介电性能的关系如图 3 和图 4 所示,根据式(1)计算得到的压电电压常数如图 5 所示。从图 3~5 可以得出以下结论。

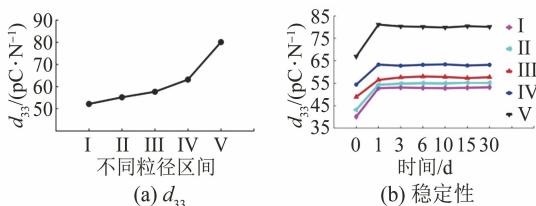


图3 PZT 粒径与复合材料 d_{33} 的关系

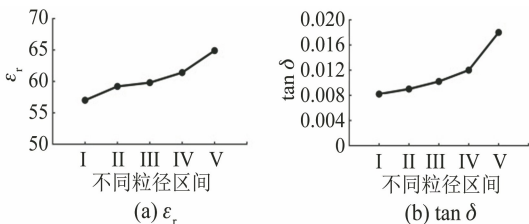


图4 PZT 粒径与复合材料 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 的关系

(1) 随着 PZT 粒径增大,PZT/环氧树脂复合材料的压电应变常数 d_{33} 增大,采用 V 号 PZT 粒径制备的复合材料 d_{33} 达到 80 $\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$ 。这是由于 PZT 粒径增大,部分 PZT 颗粒接触概率增大,形成局部电场导通,能够提升 PZT 相的极化效果。压电复合材料极化后压电应变常数 d_{33} 略有增大,1 d 后

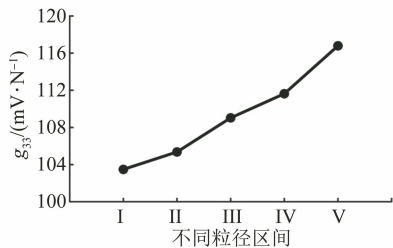


图5 PZT 粒径与复合材料 g_{33} 的关系

保持较好的稳定性。

(2) 随着 PZT 粒径增大,压电复合材料的介电常数 ϵ_r 增大,介电损耗 $\tan \delta$ 增加,采用 V 号 PZT 粒径制备的复合材料介电常数 ϵ_r 达到 65。这是由于 PZT 粒径增大,PZT 颗粒表面积与体积之比减小,其表面介电常数低于颗粒内部的介电常数,复合材料的介电常数增大。随着 PZT 粒径增大,复合材料气孔增多,介电损耗增加。

(3) 随着 PZT 粒径增大,压电电压常数 g_{33} 增大。这是由于 PZT 粒径增大,压电复合材料的压电应变常数 d_{33} 与介电常数 ϵ_r 都增大,且 d_{33} 的增长率大于 ϵ_r 增长率,两者共同作用使得 g_{33} 增大。

根据 PZT 粒径与 PZT/环氧树脂复合材料压电电压常数 g_{33} 的关系,选择 V 号 PZT 粒径来制备压电复合材料。所制成的柔性压电材料 g_{33} 达到 117 $\text{mV} \cdot \text{N}^{-1}$,能够更为灵敏地接收到法兰结构中的超声波信号。

2 基于超声波技术的法兰螺栓松动检测原理

风电塔筒采用均布多个螺栓的法兰连接结构,超声波在法兰结构中传播时,在上下法兰连接界面处产生透射和反射波。随着螺栓连接松动程度的变化,界面接触状态将发生变化,导致超声波在界面处的透射和反射特性发生改变。超声波法的检测原理为:利用螺栓松动造成的法兰界面超声波透射信号变化来表征螺栓松动程度。

取单个螺栓连接法兰结构为例(见图 6),上下法兰界面间接触压力 p 与螺栓预紧力矩 T 的关系为

$$p = \frac{T}{\lambda d} \quad (2)$$

式中: λ 为预紧力矩系数,一般取为 0.2; d 为螺栓公称直径。

随着螺栓产生松动,法兰界面接触压力将发生改变,界面刚度也随之发生变化。BIWA 等^[15]通过大量试验建立了界面刚度 K 与压力的关系,其表达

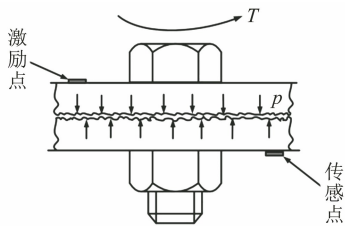


图6 法兰结构示意图(单个螺栓)

式为

$$K = Cp^m \tag{3}$$

式中: \$C\$ 和 \$m\$ 为常数, 由试验测试所得。

焦敬品等^[16]推导了纵波垂直入射界面时透射系数 \$S\$ 与界面刚度 \$K\$ 的关系式, 得到

$$S = \frac{2K}{\rho c \omega \sqrt{1 + \frac{4K^2}{\rho^2 c^2 \omega^2}}} \tag{4}$$

式中: \$\rho\$ 为材料密度; \$c\$ 为纵波波速; \$\omega\$ 为频率。

类似地, 法兰结构中超声波在界面处的透射系数 \$S_f\$ 也将正比于界面刚度 \$K\$, 其表达式可写为

$$S_f = \frac{2BK}{\rho c_s \omega_s \sqrt{1 + \frac{4K^2}{\rho^2 c_s^2 \omega_s^2}}} \tag{5}$$

式中: \$B\$ 为常数, 与激励点和传感点间超声波传感路径上的界面刚度相关; \$c_s\$ 为超声波波速; \$\omega_s\$ 为频率。

法兰结构中有多个螺栓连接, 界面接触压力为 \$n\$ 个螺栓施加预紧力矩产生界面压力的总和。由式(2)~(5)知, 随着螺栓松动程度和松动个数的变化, 法兰界面接触压力和接触刚度将发生变化, 使得超声波穿过法兰螺栓界面的透射系数发生改变。提取超声波透射信号首达波幅值来表征螺栓松动情况, 通过试验研究螺栓不同松动程度和松动个数下声波透射特性的变化情况。定义法兰螺栓松动系数为

$$R = \frac{A_i}{A_0} \tag{6}$$

式中: \$A_i\$ 为螺栓设定的最大预紧力矩下任意传感路径的超声波透射信号首达波幅值; \$A_0\$ 为螺栓不同松动程度和松动个数下该传感路径的首达波幅值。

3 螺栓松动检测

采用的法兰螺栓连接结构, 其上下法兰为 10 个 M12(螺纹外径为 12 mm)螺栓连接成一体, 外径为 134.25 mm, 内径为 84.25 mm, 上法兰结构厚度为 10 mm, 下法兰结构厚度为 14 mm。在 PZT/环氧

树脂复合材料上下表面涂刷导电银胶制作电极, 并引出导线, 作为超声波传感器。激励压电片来自 Piezo 公司, 直径为 12.7 mm, 厚度为 0.1 mm。激励信号采用汉宁窗调制的五周期正弦窄带信号, 激励中心频率为 70 kHz, 经功率放大器 ATA-66210 驱动压电片。柔性压电传感器接收超声波信号, 经过 PXPA3 前置放大器, 利用 NI USB-6366 数据采集卡进行超声波采集, 试验设备如图 7 所示。试验过程中设定的螺栓最大预紧力矩为 30 N·m, 预紧力矩变化范围为 5~30 N·m(以 5 N·m 递增)。

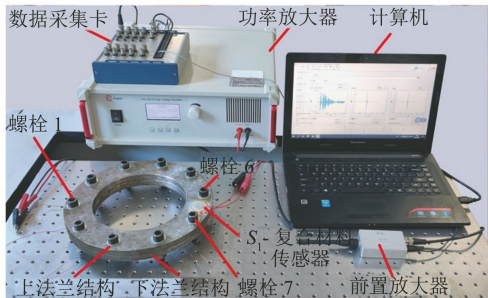


图7 法兰螺栓松动检测试验设备

柔性压电传感器 \$S_1\$ 布置在上法兰结构螺栓 6 和螺栓 7 之间, 6 个激励压电片 \$P_1 \sim P_6\$ 均匀布置在下法兰结构螺栓 1~螺栓 7 之间(见图 8)。

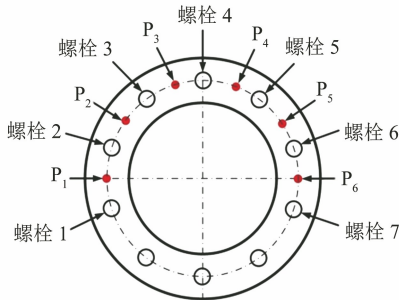


图8 法兰螺栓松动检测试验激励器布置示意

依次激励 \$P_1 \sim P_6\$ 压电片, 柔性压电传感器 \$S_1\$ 接收超声波信号, 接收的超声波信号经过低频滤波后, 得到 \$P_1-S_1\$、\$P_2-S_1\$、\$P_3-S_1\$、\$P_4-S_1\$、\$P_5-S_1\$ 和 \$P_6-S_1\$ 等 6 条传感路径的信号。采集的超声波信号存在电信号, \$P_1-S_1\$、\$P_2-S_1\$、\$P_3-S_1\$ 传感路径的首达波具有较好的时域分辨率, 通过匹配追踪法得到其到达时间^[17], 计算得到波速为 3 321 m/s。\$P_4-S_1\$、\$P_5-S_1\$ 和 \$P_6-S_1\$ 传感路径的首达波与电信号存在混叠(见图 9)。为了避开电信号干扰, 以 \$P_3\$ 为激励点, 开展 \$P_3-S_1\$ 传感路径上螺栓 4、螺栓 5 和螺栓 6 松动状态对法兰结构中超声波透射特性的影响研究。

首先开展单个螺栓松动检测试验, 采用力矩扳手控制螺栓 6 的预紧力矩, 依次增加 5 N·m, 最大

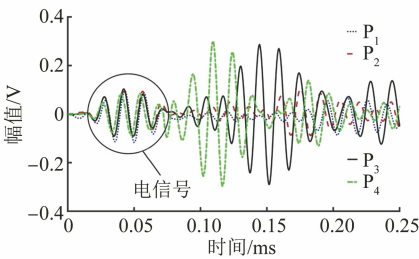


图 9 P₁、P₂、P₃、P₄ 到 S₁ 的透射图

预紧力矩为 30 N·m。测试得到其在不同松动状态下 P₃-S₁ 传感路径的透射信号首达波(见图 10)，由图 10 可见，随着螺栓松动程度加大，首达波幅值逐渐减小。根据第 2 节理论分析可知，这主要是界面接触刚度下降，超声波透射系数变小引起的。根据式(6)，将螺栓 6 最大预紧力矩(30 N·m)的透射信号首达波幅值进行归一化，得到螺栓松动系数变化曲线(见图 11)。由图 11 可知，随着螺栓松动程度增加，界面接触刚度下降，螺栓松动系数变小。

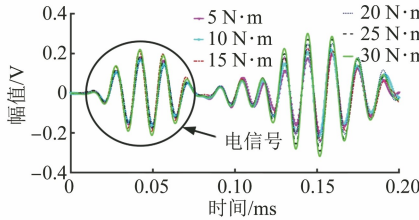


图 10 螺栓 6 在不同预紧力矩下的透射信号首达波

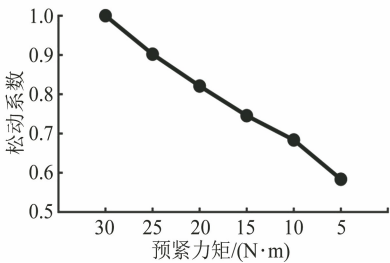


图 11 螺栓松动系数的变化曲线

为了研究螺栓松动个数对超声波透射信号的影响，分别改变螺栓 4、螺栓 5 和螺栓 6 的松动状态。松动数目工况设计如表 1 所示(表中“*”表示该螺栓松动，预紧力变化范围为 5~30 N·m)。试验测试得到不同螺栓松动状态下的透射信号，图 12 为工况 3 的透射信号，图 13 为工况 5 的透射信号，可以看出首达波幅值随着螺栓松动程度加剧而减小。计

表 1 松动数目工况设计

螺栓	工况				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
螺栓 4	—	—	—	*	*
螺栓 5	—	*	*	*	*
螺栓 6	*	—	*	—	*

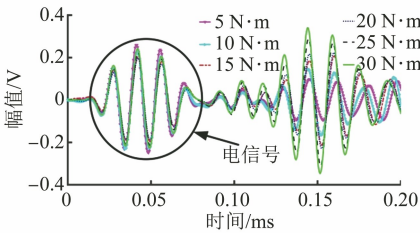


图 12 工况 3 的透射信号

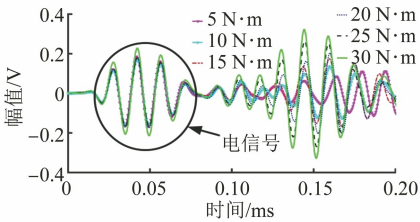


图 13 工况 5 的透射信号

算得到不同工况下螺栓松动系数的变化曲线(见图 14)。

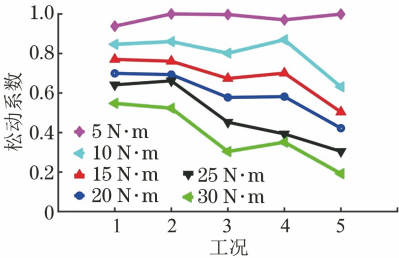


图 14 不同工况下螺栓松动系数的变化曲线

从图 14 可知，螺栓在相同预紧力矩情况下，超声波透射信号首波幅值随着螺栓松动个数增加而变小；螺栓松动个数相同时，螺栓松动位置对透射信号也有一定的影响，能够为螺栓松动定位提供理论依据。

4 结论

- (1) 随着 PZT 粒径增大，压电应变常数、压电电压常数、介电常数增大。采用粒径为 160~212 μm PZT 制备 PZT/环氧树脂复合材料，其压电电压常数达到 117 mV·N⁻¹。
- (2) 基于超声波透射信号对法兰螺栓松动界面的敏感性，采用柔性压电复合材料传感器接收单个螺栓不同松动程度及多个数目螺栓松动的超声波透射信号。结果表明，随着单个法兰螺栓松动程度加剧，超声波透射信号首达波幅值减小。法兰螺栓在相同预紧力矩情况下，超声波透射信号首达波幅值随着螺栓松动个数增加而减小，为法兰螺栓松动定量检测提供了理论依据。

参考文献:

[1] 戴靠山,赵志,毛振西. 风力发电塔筒极端动力荷载作用下破坏的对比研究[J]. 振动与冲击,2019,38(15): 252-257,272.

[2] 史文博,杜静,龚国伟. 风电机组主轴法兰螺栓连接疲劳损伤分析[J]. 机械设计与制造,2020(4):226-229.

[3] 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.

[4] 周迪生. 在役高压双头螺栓的超声波检测[J]. 无损检测,1999,21(12):563-564,571.

[5] HUO L S, CHEN D D, KONG Q Z, et al. Smart washer-a piezoceramic-based transducer to monitor looseness of bolted connection[J]. Smart Materials and Structures,2017,26(2):025033.

[6] WANG T, SONG G B, WANG Z G, et al. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(8):087001.

[7] 杜飞,张子涵,徐超. 法兰螺栓松动的超声导波监测方法[J]. 压电与声光,2019,41(5):679-684.

[8] ZHANG Y F. In situ fatigue crack detection using piezoelectric paint sensor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2006,17(10):843-852.

[9] 杨照光,张涛允,温定筠,等. 基于 0-3 型压电复合材料的声发射传感器的研制[J]. 电子元件与材料,2014,33(6):69-71.

[10] KANG S H, KANG L H. Development of wireless bird collision monitoring system using 0-3 piezoelectric composite sensor on wind turbine blades[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2018,29(17):3426-3435.

[11] 沈意平,刘缘,王钢,等. 基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用[J]. 仪器仪表学报,2019,40(12):19-25.

[12] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):62-70.

[13] 龚红宇,张玉军,车松蔚,等. 粒度对水泥基压电复合材料的压电性能和力学性能的影响[J]. 人工晶体学报,2011,40(1):213-217.

[14] ABOUBAKR S, HAJJAJI A, RGUITI M, et al. Effect of fillers size on the dielectric and piezoelectric characteristics of a piezoelectric composite[J]. The European Physical Journal Applied Physics,2018,81(2):20901.

[15] BIWA S, NAKAJIMA S, OHNO N. On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness[J]. Journal of Applied Mechanics,2004,71(4):508-515.

[16] 焦敬品,曾宪超,刘文华,等. 承压界面接触特性超声检测[J]. 北京工业大学学报,2012,38(6):807-812.

[17] 王送来,吴万荣,沈意平,等. 基于压电纤维传感器 Lamb 波方向检测的裂纹识别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(10):2739-2748.



(上接第 15 页)

[2] 于霞. 飞机发动机叶片缺陷的电磁检测技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.

[3] 宋凯,王冲,张丽攀,等. 航空发动机涡轮叶片裂纹的自动仿形涡流检测系统设计及试验研究[J]. 航空制造技术,2018,61(19):45-49,57.

[4] 马海全,甘勇,张卫,等. 高温合金叶片常见缺陷的射线检测[J]. 失效分析与预防,2020,15(3):159-163,178.

[5] 徐亚亚,李泽,刘兴勇. 某机高压涡轮叶片荧光渗透检测工艺改进[J]. 无损检测,2015,37(9):69-71.

[6] 徐可北,周俊华. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告