DOI: 10.3901/JME.2020.10.019

基于超声导波的压力容器健康监测 III: 纤维缠绕压力容器的在线监测*

杨斌 胡超杰 轩福贞 肖彪 项延训 罗承强
(华东理工大学机械与动力工程学院 上海 200237)

摘要: 基于超声导波的压力容器健康监测研究的第三部分, 主要考察所研究的健康监测技术在纤维缠绕压力容器损伤定位中的应用。开展纤维缠绕压力容器的疲劳和打压爆破试验, 设计远程在线监测系统以实时获取不同工况中纤维缠绕压力容器损伤定位结果。在打压和疲劳试验过程中, 采集压力容器在不同状态中的导波信号, 并分别测量金属内胆和复合材料层的应变变化, 建立导波幅值与压力容器疲劳状态和受压状态之间的关联。开展纤维缠绕压力容器在打压爆破过程中的损伤定位, 研究疲劳对损伤定位精度的影响规律。结果表明, 在疲劳试验中, 应变片能够连续记录并反映压力容器的应变状态, 但疲劳周期随残余应变的变化趋势不明显, 而导波幅值随疲劳周次的增加而线性下降; 对经过 5 700 周疲劳和未经过疲劳的纤维缠绕压力容器, 导波幅值随着其内部压力的增加而线性下降, 而应变值随着压力的增加线性增加, 二者的对应关系可用于判定纤维缠绕压力容器的受压状态; 利用所研发的在线监测系统可以远程获取纤维缠绕压力容器损伤位置信息, 5 700 周的疲劳在很大程度上影响定位精度, 而未经疲劳试验的压力容器的损伤定位误差较小。

关键词: 纤维缠绕压力容器; 超声导波; 远程监测; 水压疲劳; 水压爆破

中图分类号: TG156

Structural Health Monitoring of Pressure Vessel Based on Guided Wave Technology. Part III: Online Monitoring of Filament Wound Pressure Vessel

YANG Bin HU Chaojie XUAN Fuzhen XIAO Biao XIANG Yanxun LUO Chengqiang
(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: The third part of the guided wave based structural health monitoring of pressure vessel applies the aforementioned structural health monitoring technology in the damage localization of a filament wound pressure vessel. The hydraulic fatigue cycling and pressurization experiments of a full-scale composite pressure vessel are performed, and the damage localization results are transferred by a remote monitoring system. The guided wave signal as well as the strain of the tank and the composite layer during the mechanical tests are obtained, and the relationship between the amplitude of the guided wave signal and the fatigue and pressurization status of the pressure vessel are built. During the pressurization, the damage localization is performed by the system under different pressures, and the damage localization accuracy is analyzed. Results show that the fatigue status of the pressure vessel can be reflected by the strain, however, the strain tendency cannot reflect its status after fatigue. The amplitude of the guided wave decreases linearly with the fatigue cycles. After fatigue for 5 700 cycles, the amplitude decreasing with the inner pressure, while the strain shows an increasing tendency. Relationship between the two parameters could be used to measure the pressure vessel status. Fatigue affect the damage localization accuracy sharply, while the developed remote monitoring system could get the damage information of the filament wound pressure vessel before fatigue with high accuracy.

Key words: filament wound pressure vessel; guided waves; remote monitoring; hydraulic fatigue; bursting

0 前言

与金属压力容器相比, 纤维缠绕压力容器具有

质轻高强、特性系数高、抗疲劳性能好等诸多优势, 在水下舰艇、航空航天等重大产品及关键部件中有着广泛应用。在制造、存放、运输和使用过程中, 纤维缠绕压力容器易产生目视不可测损伤而极易造成在无提前预警情况下的突破坏^[1]。利用超声导波技术对复合材料健康状态的监、检测研究受到了国内外学者的极大关注^[2-3]。基于超声导波的纤

* 青年人才托举工程(2018QNRC001)、国家自然科学基金(11702097, 51835003)、国家重点研发计划(2018YFC0808800)和中央高校基本科研业务费(222201714015)资助项目。20190429 收到初稿, 20190905 收到修改稿

维缠绕压力容器的无损检测手段分为离线检测和在线监测^[4-6]。对在役纤维缠绕压力容器的在线监测能及时发现设备中的缺陷,排除安全隐患。通过监测这些缺陷的发展情况,可为离线检测方法提供指导。

国外对基于超声导波的复合材料结构健康监测的研究主要集中在美国、德国、法国、日本及韩国等,而国内的机构主要集中在科研院所、公司企业以及高等院校。法国 CASTAINGS 等^[7]考察了复合材料平板中冲击损伤尺寸大小对 S0 模态兰姆波信号的影响规律,发现利用兰姆波能够定量检测复合材料中分层损伤的尺寸。意大利 LUCA 等^[8]研究了复合材料低速冲击损伤特点与导波之间的相互作用,认为冲击造成的复合材料损伤形式复杂,在利用导波进行损伤定位时,会有结果失准或者精度不高等现象发生,二者之间的作用机制尚需进一步研究。GIANNEO 等^[2]验证了兰姆波在检测碳纤维复合材料层合板损伤的可行性。通过与基准信号比较,利用人工神经网络及概率椭圆成像算法,意大利 FENZA 等^[9]确定了复合材料层合板中损伤的位置及程度,建立了导波特征与层合板损伤指数之间的对应关系。HARB 等^[10]利用非接触式空耦探头和激光超声发生器在复合材料层合板中激发出了 A0 模态主导的兰姆波,并利用该模式导波检测了层合板中的损伤,结果证明这两种激发形式具有较高灵敏度和效率。HONG 等^[3]应用试验数据统计学原理,讨论了超声导波检测复合材料层合板中的损伤不确定性。YANG 等^[11]采用试验与三维仿真相结合的方法研究了兰姆波在编织玻璃纤维增强树脂基复合材料中的传播特性,阐明了兰姆波在面内正交各项异性复合材料层合板中的传播规律。利用有限元仿真技术,ZHANG 等^[12]考察了兰姆波与碳纤维复合材料分层及基体裂纹损伤之间的作用关系,提出对于复杂复合材料结构的检测尚需更深入的分析。基于此, RAMADAS 等^[13]和 SCHAAL 等^[14]分别考察了兰姆波在复合材料 T 型接头及变厚度复合材料板材中的波传导问题,详细讨论了 T 型接头中界面分层损伤及厚度变化对超声导波的影响机制。YANG 等^[15]利用三维有限元模拟及试验技术考察了复合材料螺栓连接接头形式、连接孔数目及载荷大小等参量对导波传导行为的影响机理,建立了导波特征信号与接头失效模式之间的关联关系。然而,对于纤维缠绕压力容器一类的承压结构,其结构形式为球形封头与中间圆柱段结合的闭合体,如何利用基于导波的监测技术

对纤维缠绕压力容器在真实工况下的损伤实现定位,仍是待解决的难点。

本文是基于超声导波的压力容器健康监测系列研究的第三部分,重点考察了基于导波的健康监测技术在纤维缠绕压力容器损伤定位中的应用。开展了打压和疲劳试验,采集了导波和应变信号并建立了二者在不同工况下的关联。在打压爆破过程中,对不同压力状态下的纤维缠绕压力容器开展了损伤定位研究,获得了疲劳对损伤定位精度的影响规律。

1 监测系统及测试方法

1.1 压力容器的制造及试验方法

纤维缠绕压力容器由纤维缠绕工艺制备得到,由金属内胆及外层缠绕的玻璃纤维增强环氧树脂复合材料两部分组成。金属内胆的材料为 30CrMo 钢,总长度 750 mm,具体参数在表 1 中给出。玻璃纤维纱线型号为 ECT468T-1200 型单向缠绕式玻璃纤维纱,单纤维直径为 $20\ \mu\text{m}\pm 5\ \mu\text{m}$ 。图 1 给出了制造纤维缠绕压力容器的玻璃纱缠绕工艺图。该纤维缠绕压力容器在上海容华高压容器有限公司制造。玻璃纤维在压力容器筒体段缠绕的层数为 40 层,铺层形式为 $[90^\circ_{10}/(\pm 15^\circ)_{20}/90^\circ_{10}]$ 。

表 1 金属内胆的参数

项目	参数
外径/mm	325
壁厚/mm	5
长度/mm	750
质量/kg	45.3
材料	30CrMo 钢
容积/L	55
工作压力/MPa	20
最大压力/MPa	34

图 1 纤维缠绕压力容器的制备过程

对纤维缠绕压力容器开展了水压疲劳及水压爆破两类试验。疲劳的最大周期为 5 700 周期,爆破试验在压力容器打爆时即停止。为了保证纤维缠绕压力容器在指定位置破坏,爆破试验中在纤维缠绕

压力容器中预制了人工缺陷。缺陷为穿透玻璃纤维复合材料层的预制裂纹, 长度和深度分别为 55 mm 和 6 mm。预制裂纹位于距离压力容器一端封头 170 mm 处。

打压爆破试验压力从 0 MPa 增加到最大爆破压力, 打压速率为 2 MPa/s。为了建立导波信号特征与纤维缠绕压力容器受压状态之间的关系, 在打压过程中, 利用两片 PZT 压电晶片采集导波信号, 利用在线监测系统对压力容器中的损伤进行定位并远程实时传输定位结果。水压疲劳试验中最大/最小疲劳压力分别设置为 25 MPa 和 2 MPa, 最大疲劳周数为 5 700 周。

1.2 传感器阵列形式及定位

PZT 压电片的阵列形式为粘贴在纤维缠绕压力容器筒体两端的 16 片均布压电片, 每端沿筒体周向均匀布置 8 片 PZT 压电传感器。利用改进椭圆定位算法对经过不同工况的纤维缠绕压力容器进行损伤定位。由于纤维缠绕压力容器的封头监测与本研究前两部分中所研究的金属内胆的封头相同, 故本文重点研究纤维缠绕压力容器的筒体的波传导特性及在线损伤定位方法。为了获取打压和疲劳试样中纤维缠绕压力容器的状态, 在金属内胆层和纤维层粘贴应变片以连续采集并记录应变信息。在疲劳试验中每间隔 300 个循环传感器阵列扫描一次导波信号及应变信号; 在打压爆破试验中, 每间隔 5 MPa 传感器阵列扫描一次导波信号及应变信号。

1.3 压力容器在线监测系统及远程结果传输

采用在线监测系统及远程用户端监测纤维缠绕压力容器状态并远程实时传输定位结果。在线监测系统除包含本研究第一部分所述的硬件和本文用到的改进椭圆定位算法外, 还包含相应的辅助软件。辅助软件主要由信号流程控制系统和远程在线通讯系统组成。图 2a 给出了基于 LabVIEW 编制的导波信号流程控制面板, 该面板的主要功能是控制导波信号按照定位算法需求全自动的激发和保存。面板上半部分为矩阵开关控制参数选项卡, 包括传感器配置数量、传感器对的连通时间及信号采集模式。面板下半部分为导波信号采集与保存参数设置选项卡, 包括示波器地址确定、文件类型选择、波形长度区间设置等。根据定位算法的需求, 设置了全冒泡法和半冒泡法两种传感器阵列扫描模式。全冒泡法是指压电片采集信号时, 所有的压电片既作为激发器又作为接收器, 按照一定顺序采集一次; 半冒泡法指采集信号时, 前一片压电片作为激发器激发信号, 后面的压电片接收信号, 而后前一片压

电片不再作为激发器或者接收器使用。具体描述如下: 假设传感器阵列包含 N 片 PZT 传感器, 全冒泡法扫描模式中第 $i(i=1\sim N-1)$ 片 PZT 分别与其余 PZT 连通, 因此一次全扫描共得 $N(N-1)$ 组导波信号; 半冒泡法扫描模式中第 $i(i=1\sim N-1)$ 片 PZT 分别与其后的 PZT 连通, 每次扫描共得 $N(N-1)/2$ 组导波信号。本文采用全冒泡法采集导波数据以满足改进椭圆定位算法的需求。分别利用 LabVIEW 和 E4A 语言编写了计算机和移动的远程用户端, 以实时传输纤维缠绕压力容器在线监测结果, 远程用户端界面如图 2b 和 2c 所示。在线监测过程中, 损伤定位结果通过计算机端软件即时传送到云端服务器中, 再以服务器为中转站, 将数据传输到远程在线通信系统。

(a) 导波信号控制系统界面

(b) PC端软件界面

(c) 手机APP界面

图2 控制系统及远程监控软件界面

2 结果与讨论

2.1 疲劳过程中纤维缠绕压力容器的应变及导波幅值

图3中给出了纤维缠绕压力容器在第2100~2400周打压疲劳试验过程中金属内胆及复合材料层上沿着压力容器轴向和周向监测得到的应变信号。同时,为了展示应变数据的细节,在图3中也给出了当疲劳时间介于1900~2000s时的放大图。从图3中可以看到,在纤维缠绕压力容器收到相同内压时,金属内胆和纤维层上沿着容器轴向的应变值要高于沿容器周向的应变值。具体来说,在疲劳测试中,压力容器的金属内胆的轴向和周向的应变分别在179~1295及48~334之间波动,而压力容器的纤维缠绕层的轴向和周向应变分别在70~1468和-546~-105之间变化。应该指出轴向应变的负值是由于在纤维层内部埋入应变片时,应变片受到树脂固化收缩应力而产生的。对比可见,在相同载荷作用下,纤维缠绕压力容器的纤维层的应变变化量较金属内胆更大,这主要是因为纤维增强树脂基复合材料的刚度远小于金属材料。由胡克定律可知,在相同载荷作用下弹性模量小的材料应变大。同时,由于纤维缠绕层位于金属内胆外部,其直径大于金属内胆,在内部压力作用下,也展现出较大的应变变化值。

图4给出了纤维缠绕压力容器在第5100~5700周打压疲劳过程中金属内胆和复合材料层上的应变变化图。从图中可以看出,金属内胆上最小和最大周向应变的分别为20和240,而金属内胆上轴向应变在120~993之间波动。复合材料层的周向和轴向应变分别在-505~-115及74~1165之间波动。

图3 纤维缠绕压力容器在第2100~2400周打压疲劳过程中不同位置的应变-疲劳时间关系图

图4 纤维缠绕压力容器在第5100~5700周打压疲劳过程中不同位置的应变-疲劳时间关系图

表2中列出了经过不同周期疲劳试验后,纤维缠绕压力容器的复合材料层及金属内胆层的残余应变。从表中可以看出,对于所有疲劳周期而言,纤维缠绕压力容器中复合材料层的残余应变要高于金属内胆的残余应变。表中的残余应变表明经过疲劳的纤维缠绕压力容器出现了损伤,但表中的残余应变数据代表的损伤程度无规律可

循,这主要是由于纤维缠绕压力容器在疲劳试验中复杂的失效机制造成的。基于此,接下来的工作中我们开展了基于导波的纤维缠绕压力容器健康监测研究。

表 2 纤维缠绕压力容器经过不同周期疲劳试验后的应变值

疲劳周期	复合材料层		金属内胆层	
	轴向	周向	轴向	周向
300	42.4	14.5	8.2	3
1 500	25.6	7.8	7.8	6.4
1 800	23.3	6.1	8.2	6.4
2 100	25.9	8.9	4.8	8.8
2 400	14.2	14.7	6.6	6
2 700	15.3	11.9	8	10.4
3 000	20.6	8.9	2.3	3.3
3 300	27.4	11.5	13.5	12
5 100	36.2	6.4	6.5	6.5
5 700	13.1	31.7	71	15.8

图 5 中给出了在经过不同疲劳周期试验后的纤维缠绕压力容器上沿着轴向圆柱段测试得到的 S0 和 A0 模态的导波幅值变化图。利用线性拟合曲线拟合的数据点及拟合参数在图 5 中也一并给出。从图中可以看出, S0 和 A0 模态的导波幅值随着纤维缠绕压力容器疲劳周期的增加而下降,且线性拟合结果较好。对于幅值较大的 S0 模态导波,当疲劳周期从 0 增加到 5 700 时,其幅值从 0.065 下降到 0.03,而 A0 模态的导波幅值从 0.053 下降到 0.026。与表 3 中的残余应变参数比较,基于导波的纤维缠绕压力容器的状态变化趋势更容易用图 5 中的导波幅值线性关系确定。

图 5 纤维缠绕压力容器在打压疲劳试验中 S0 和 A0 的幅值随疲劳周数的变化

2.2 打压过程中纤维缠绕压力容器的应变及导波幅值

对经过 5 700 周疲劳试验的纤维缠绕压力容器开展了打压爆破试验。图 6 给出了粘贴在金属内胆外表面上的应变片测试得到的应变随打压时间的变

化趋势。打压试验过程中,纤维缠绕压力容器内部的压力从 0 逐渐增长至 45.73 MPa 直至完全爆破破坏。压力-时间曲线在 $P=35$ MPa, $t=300$ s 的拐点处展示了近似双线性变化行为。测试得到的应变值首先从 0 线性增加至拐点处,随后这一线性趋势被破坏,应变值在 $t=600$ s 纤维缠绕压力容器爆破时突然下降至 0。在 35 MPa 之前,纤维缠绕压力容器的轴向/周向应变值分别从 0 线性增长至 1 887 和 616;当压力从 35 MPa 增加至爆破压力时,这两个应变值又分别增加至 3 502 和 2 082。

图 6 经过 5 700 周疲劳的纤维缠绕压力容器在打压爆破试验中的应变变化趋势

图 7 给出了经过 5 700 周疲劳的纤维缠绕压力容器在 0~30 MPa 打压试验中的导波幅值、应变随着疲劳压力的变化趋势。图 7 中的拟合参数在表 3 中给出。从图中可以看出, S0 和 A0 导波幅值随着压力容器内部压力的增加而线性下降,而铺设在纤维和金属内胆上的周向、轴向应变片测试得到的应变值随着内部压力的增加而线性增加。导波在压力容器中的传播是基于上下介质质点振动引起的,随着纤维缠绕压力容器内部压力的增加,压力容器应变值增加,而应变的增加会导致导波在其内部的幅值由于介质的松散而用于判定压力容器的受压状态。

图 7 经 5 700 周疲劳的纤维缠绕压力容器在打压 0~30 MPa 时 S0 和 A0 导波幅值、应变随压力的变化图

表3 图7中数据拟合参数及标准差

参数	斜率	标准差	截距	标准差
S0	-0.001 3	2.12×10^{-4}	0.104	0.004
A0	-5.69	2.13×10^{-4}	0.025	0.003 8
周向-金属	17.79	0.34	12	6.08
周向-复材	3.13	11.42	0.83	14.75
轴向-金属	55.75	1.19	0.13	21.04
轴向-复材	80.97	1.73	-29.15	30.56

图8给出了未经过疲劳试验的纤维缠绕压力容器在打压爆破试验中的应变变化趋势。从图中可以看出,健康状态的纤维缠绕压力容器的爆破压力为48.11 MPa,比经过5 700周疲劳的纤维缠绕压力容器的爆破压力高2.38 MPa。爆破压力的降低主要是由疲劳带来的残余应变造成的。未经疲劳的纤维缠绕压力容器在打压爆破试验中的应变变化趋势经过疲劳的压力容器的应变变化趋势相符,即:在30 MPa内压以下,应变值随着内压的增加而线性增加,当压力超过30 MPa时,纤维缠绕压力容器的应变出现波动直到压力达到爆破压力后而破坏。图9给出了未经疲劳的纤维缠绕压力容器在打压0~30 MPa时的超声导波幅值及应变变化趋势,图中拟合曲线的参数在表4中列出。从图中可以看出,与经过疲劳试验的压力容器相同,A0和S0模式的导波幅值随着内部压力的增加而线性下降,而金属内胆及纤维层的应变随着压力的增加而线性增加。

图8 未经疲劳的纤维缠绕压力容器在打压爆破试验中的应变变化趋势

2.3 承压状态下基于导波的纤维缠绕压力容器的损伤定位

图10和图11中分别给出了疲劳5 700周和未经疲劳的纤维缠绕压力容器在承受不同内压时的损伤定位结果图,图中右侧色带代表缺陷出现的可能性,其值越接近0,缺陷出现的可能性越大。两图中的成像结果是采用本研究第一部分中的提及的椭圆定位算法得到的。在打压测试时,该损伤定位结果利用本研究所开发的压力容器在线监测系统实时将定位结果远程传输到计算机端和移动端。表5列出

图9 未经疲劳的纤维缠绕压力容器在打压0~30 MPa时S0和A0导波幅值、应变随压力的变化图

表4 图9中数据拟合参数及标准差

参数	斜率	标准差	截距	标准差
S0	-0.001 1	1.64×10^{-4}	0.065 6	0.003
A0	-3.96×10^{-4}	7.74×10^{-5}	0.015 96	0.001 4
周向-复材	69	2.28	58.6	41.11
轴向-复材	121.89	2.55	52.75	45.95
轴向-内胆	52.89	3.36	-79.25	60.66
周向-内胆	41.15	1.28	-33.2	23.14

了不同压力下纤维缠绕压力容器的损伤定位误差,对比可以发现,对于经过5 700周疲劳后的纤维缠绕压力容器,利用在线监测系统得到的损伤定位精度在轴向上的误差较大,在30 MPa压力作用时的轴向误差可达87.69%;而对于未经过疲劳的压力容器在不同压力作用下的损伤定位结果精度较高,在30 MPa内压是的周向/轴向定位误差分别为0.36%和1.03%。压力容器在疲劳交变载荷作用下差生了微观损伤,这些微损伤影响了导波在容器里的传播速度,进而影响了定位精度。具体来说,由于导波在纤维缠绕压力容器中的波速取决于质点振动状态,如表2结果显示,疲劳过后金属内胆及外层的复合材料存在残余应变,这势必影响导波在纤维缠绕压力容器中传输的振动状态,进而影响波速。另外,与本研究第一、二部分研究的纯金属压力容器相比,导波在纤维缠绕压力容器中的传播还受到纤维层及纤维/金属界面层的影响,这进一步导致纤维缠绕压力容器损伤定位精度的降低。

图 10 疲劳 5 700 周后的瓶在打压不同内压下的损伤定位

图 11 未疲劳瓶在打压不同内压下的损伤定位

表 5 不同压力下纤维缠绕压力容器的损伤定位误差

压力 /MPa	疲劳				未疲劳			
	周向	误差 (%)	轴向	误差 (%)	周向	误差 (%)	轴向	误差 (%)
常压	0.465	15.45	351	80	0.747	35.81	182	6.66
5	0.736	33.81	355	82.05	0.667	21.27	181	7.17
10	0.712	29.45	361	85.13	0.632	14.91	194	0.52
15	0.708	28.72	350	79.48	0.632	14.91	195	0
20	0.704	28	339	73.84	0.724	31.64	189	3.07
25	0.709	28.91	335	71.79	0.524	4.73	178	8.72
30	0.403	26.72	366	87.69	0.548	0.36	193	1.03

3 结论

(1) 打压疲劳试验中, 利用应变片测试获得了纤维缠绕压力容器的金属内胆及复合材料层的应变变化, 建立了导波幅值与压力容器疲劳周期之间的关系。应变片能够连续记录并反映压力容器的疲

劳状态, 压力容器的残余应变随疲劳周期的变化关系不明显, 而导波幅值随着疲劳周次的增加而线性降低。

(2) 打压爆破试验中, 对于经过 5 700 周疲劳和未经过疲劳的纤维缠绕压力容器, S0/A0 导波幅值随着内部压力的增加而线性下降, 而纤维层和金属内胆的应变随着内部压力的增加而线性增加, 二者的对应关系可用于判定纤维缠绕压力容器的受力状态。

(3) 与纯金属内胆相比, 导波在纤维缠绕压力容器中的传播还受到纤维层及纤维/内胆界面层的影响, 基于导波的纤维缠绕压力容器损伤定位更复杂; 而经 5 700 周疲劳的压力容器的结构状态的变化也在很大程度上影响损伤定位精度; 利用所开发的在线监测系统可以远程获取不同压力的纤维缠绕压力容器的损伤状态, 且对于未疲劳的压力容器损伤定位精度高。

参 考 文 献

- [1] YAACOUBI S, DAHMENE F, BOUZENAD A, et al. Modal acoustic emission for composite structures health monitoring: Issues to save computing time and algorithmic implementation[J]. Composite Structures, 2018, 183: 338-346.
- [2] GIANNEO A, CARBONI M, GIGLIO M. Feasibility study of a multi-parameter probability of detection formulation for a Lamb waves-based structural health monitoring approach to light alloy aeronautical plates[J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(2): 225-249.
- [3] HONG Ming, ZHU Mao, TODD M D, et al. Uncertainty quantification for acoustic nonlinearity parameter in Lamb wave-based prediction of barely visible impact damage in composites[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 448-460.
- [4] 李丽菲, 沈功田, 王芳, 等. 压力容器氢损伤的监测与检测方法[J]. 压力容器, 2006, 23(2): 37-46.
LI Lifei, SHEN Gongtian, WANG Fang, et al. Monitoring and inspection methods for hydrogen damage of pressure vessels[J]. Pressure Vessel Technology, 2006, 23(2): 37-46.
- [5] 刘浩, 王黎, 高晓蓉. 电力机车受电弓离线检测技术的现状及展望[J]. 机车车辆工艺, 2004(6): 1-4.
LIU Hao, WANG Li, GAO Xiaorong. Current situation and prospects of the detection technology for the contact-loss of pantograph on electric locomotive[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2004(6): 1-4.
- [6] 藏铁军, 藏天红. 我国油气管道运输的发展概况[J]. 油气储运, 1997, 16(7): 1-3.
ZANG Tiejun, ZANG Tianhong. China's pipeline industry

- [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16(7): 1-3.
- [7] CASTAINGS M, SINGH D, VIOT P. Sizing of impact damages in composite materials using ultrasonic guided waves[J]. NDT & E International, 2012, 46: 22-31.
- [8] LUCA A D, CAPUTO F, KHODAEI Z S, et al. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 138: 168-180.
- [9] FENZA D A, SORRENTINO A, VITIELLO P. Application of artificial neural networks and probability ellipse methods for damage detection using Lamb waves[J]. Composite Structures, 2015, 133: 390-403.
- [10] HARB M S, YUAN F G. Non-contact ultrasonic technique for Lamb wave characterization in composite plates[J]. Ultrasonics, 2016, 64: 162-9.
- [11] YANG Bin, XUAN Fuzhen, CHEN Shaojie, et al. Damage localization and identification in WGF/epoxy composite laminates by using Lamb waves: Experiment and simulation[J]. Composite Structures, 2017, 165: 138-147.
- [12] ZHANG Bing, SUN Xiaochuan, EATON M J, et al. An integrated numerical model for investigating guided waves in impact-damaged composite laminates[J]. Composite Structures, 2017, 176: 945-960.
- [13] RAMADAS C, PADILYAR J, BALASUBRAMANIAM K, et al. Lamb wave based ultrasonic imaging of interface delamination in a composite T-joint[J]. NDT & E International, 2011, 44(6): 523-530.
- [14] SCHAAAL C, MAL A. Lamb wave propagation in a plate with step discontinuities[J]. Wave Motion, 2016, 66: 177-189.
- [15] YANG Bin, XUAN Fuzhen, XIANG Yanxun, et al. Lamb wave-based structural health monitoring on composite bolted joints under tensile load[J]. Materials, 2017, 10: 652.

作者简介: 杨斌, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料压力容器的力学性能及健康监测。
E-mail: yangbin@ecust.edu.cn
轩福贞(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能传感与先进健康监测技术。
E-mail: fzxuan@ecust.edu.cn

(上接第 18 页)

- quantum dots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 134-140.
- [15] ZHANG Pan, YAN Bei, YAN Ke, et al. Design of quantum dots for rolling bearing inner ring-cage thermal monitoring[C]// Chinese Mechanical Engineering Society. International Conference on Mechanical Design, November 19-21, 2017, Beijing Institute of Technology, Beijing. Beijing: CMES, 2017: 1-10.
- [16] YAN Ke, YAN Bei, LI Bengqiang, et al. Investigation of bearing inner ring-cage thermal characteristics based on CdTe quantum dots fluorescence thermometry[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 279-286.

作者简介: 张盼, 女, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为量子点传感器及轴承状态监测。
E-mail: zhangpan0203@stu.xjtu.edu.cn
闫柯(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轴承润滑与热特性分析。
E-mail: yanke@mail.xjtu.edu.cn