

循环温度疲劳作用下粘接界面损伤的非线性超声评价

苑博 税国双 汪越胜

Nonlinear ultrasonic evaluation of damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue

Yuan Bo Shui Guo-Shuang Wang Yue-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 074302 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172265

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172265>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[声场中空化气泡的耦合振动及形状不稳定性的研究](#)

Coupled oscillation and shape instability of bubbles in acoustic field

物理学报.2018, 67(3): 034301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.034301>

[基于等效弹性模量的微裂纹-超声波非线性作用多阶段模型](#)

Modelling of multi-stage nonlinear interaction of micro-crack and ultrasonic based on equivalent elastic modulus

物理学报.2017, 66(13): 134301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134301>

[复合圆管界面特性对周向超声导波二次谐波发生效应的影响分析](#)

Influences of the interfacial properties on second-harmonic generation by primary circumferential ultrasonic guided wave propagation in composite tube

物理学报.2016, 65(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194301>

[圆管结构中周向导波非线性效应的模式展开分析](#)

Modal expansion analysis of nonlinear circumferential guided wave propagation in a circular tube

物理学报.2015, 64(18): 184303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184303>

[基于迟滞应力应变关系的非线性声学检测理论与方法研究](#)

Theory and method for nonlinear acoustics detection based on hysteretic stress-strain relation

物理学报.2014, 63(19): 194302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194302>

循环温度疲劳作用下粘接界面损伤的非线性超声评价*

苑博 税国双† 汪越胜

(北京交通大学力学系, 北京 100044)

(2017年10月20日收到; 2018年1月22日收到修改稿)

材料损伤以及性能退化与超声波的非线性效应密切相关. 为研究循环温度疲劳作用下粘接界面的损伤情况, 本文采用超声波透射法, 研究了6061型铝合金/改性丙烯酸酯胶粘接界面的声学非线性系数随高温、低温循环次数的变化情况. 结果表明, 在高温循环疲劳作用的初始阶段, 试件的非线性系数变化不明显, 但随着高温循环次数的不断增加, 非线性系数随循环次数的变化十分明显; 对于低温循环疲劳作用的初始阶段, 试件的非线性系数迅速增大, 随着循环次数的增加, 其值增速减缓. 在低温循环疲劳寿命的后期, 试件的非线性系数随循环次数的增加而继续增大. 进一步的讨论结果表明, 胶层三阶弹性常数的变化是造成高温循环疲劳时非线性系数变化的主要原因, 而对于低温循环疲劳, 粘接界面拉伸刚度的变化是引起非线性系数变化的主要原因.

关键词: 粘接界面, 循环温度疲劳, 声学非线性系数, 超声无损检测

PACS: 43.25.+y, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.67.20172265

1 引言

随着胶粘剂的发展和粘接技术的不断成熟, 胶粘剂在航空航天等领域得到了广泛的应用. 宇宙飞船、人造卫星等所采用的蜂窝夹层结构、高强度复合材料、密封材料等大部分是通过粘接技术来实现的^[1]. 由于航空航天器在轨运行期间反复进出地球阴影区域, 使得航空航天器表面不断承受循环温度疲劳的作用, 在这种交变循环的温度场作用下, 被粘接物与胶粘剂之间会产生交变热应力和热应变, 从而导致胶粘剂受损, 粘接界面力学性能下降^[2,3]. 因此, 研究循环温度疲劳作用下粘接界面力学性能的退化以及损伤情况显得尤为重要.

目前, 传统超声无损检测技术对胶层中的空洞、缺胶和微孔等缺陷基本上能可靠地检测出来^[4], 但对于胶层的内聚强度、粘接界面的黏附强度尚无

可行的检测手段^[5]. 大量研究表明, 材料早期力学性能退化总是伴随着某种形式的非线性行为, 从而引起超声波传播的非线性^[6,7]. 通常采用声学非线性系数描述材料的非线性特征^[8], 利用非线性系数实现对材料早期力学性能退化以及损伤情况的无损检测和评估.

近年来, 针对粘接界面力学性能退化及损伤情况的超声无损检测, 国内外学者做了大量的研究工作. 安志武等^[9]建立了粘接界面的非线性弹簧模型, 为利用非线性声学参量描述粘接界面的性质提供了理论上的依据. 高广健等^[10]根据界面弹簧模型, 分析了含弱界面的圆管结构中周向超声导波的频散特性及位移场. 刘婧等^[11]研究了粘接结构超声谐振模式随材料和界面粘接性能变化的演变规律, 分析和归纳了胶层厚度、密度和声阻抗等性能参数改变时对谐振模式演变规律的影响. Shui等^[12,13]建立了具有不同拉压性质的粘接界面

* 国家自然科学基金(批准号: 11472039)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn

模型,对疲劳载荷及冲击载荷作用下AZ31镁合金粘接试件非线性系数的变化情况进行了研究,发现理论值和实验值符合较好. Donskoy等^[14]的研究表明,超声波入射到不完全粘接界面时将表现出很强的非线性行为,特别当胶层中含有裂缝、分层等缺陷时,非线性现象尤为明显.因此,利用超声非线性可以实现对粘接界面的损伤进行无损评价.此外,Drinkwater等^[15]研究了铝-环氧树脂胶-铝弱粘接试件的非线性系数随压强的变化情况,发现初始阶段试件的非线性系数迅速减小,之后随着压强的增加,其变化趋势趋于平缓. Kawashima等^[16]通过非线性超声成像系统,得到了不完全粘接界面的超声图像.然而,对循环温度疲劳作用下粘接界面力学性能退化及损伤的非线性超声无损检测,国内外相关的研究工作还较少.本文针对6061型铝合金/改性丙烯酸酯胶/6061型铝合金粘接试件,采用超声波透射法,研究了粘接试件的声学非线性系数与循环温度疲劳次数之间的关系,为循环温度疲劳作用下金属粘接界面力学性能退化和损伤的非线性超声无损检测提供了参考和依据.

2 非线性超声理论

固体材料内部微观损伤的产生、疲劳等都伴随着明显的非线性现象,利用非线性超声方法检测结构损伤,实质上是利用超声波在传播过程中的非线性特征反推结构损伤后所表现出来的非线性.当一维纵波通过非线性介质时,在小应变情况下,波动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (1)$$

其中, u 是 x 方向上的位移, ρ 是介质密度, σ 是 x 方向上的正应力.

非线性应力-应变关系取 van den Abeele 等^[17]给出的积分形式,即

$$\sigma = \int E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) d\varepsilon, \quad (2a)$$

$$E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_0 \{1 + \beta\varepsilon + \delta\varepsilon^2 + \alpha[\Delta\varepsilon + \varepsilon(t) + \text{sgn}(\dot{\varepsilon})] + \dots\}, \quad (2b)$$

其中, E_0 为弹性模量; β, δ 分别为二阶、三阶非线性常数; α 为滞回非线性系数; $\Delta\varepsilon$ 为局部应变变化幅度; $\dot{\varepsilon}$ 为应变对时间的微分; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

在小变形情况下,应变与位移的关系为

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (3)$$

将(2)和(3)式代入(1)式,整理可得一维条件下固体中的非线性波动方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ &= c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2} \beta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{3} \delta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^3 \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

保留二阶非线性项,(4)式可写成

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (5)$$

对形如 $u(0, t) = A_0 \sin \omega t$ 的入射波,将其表达式代入(5)式,由微扰近似理论求得波动方程的近似解为

$$\begin{aligned} u(x, t) &= A_0 \sin(kx - \omega t) \\ &+ \frac{1}{8} (A_0^2 k^2 \beta x) \cos 2(kx - \omega t), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $k = \omega/c$ 为波数, β 为材料的非线性系数.

根据(6)式,基频波的幅值 $A_1 = A_0$,二次谐波的幅值 $A_2 = \frac{1}{8} (A_0^2 k^2 \beta x)$,从而可将非线性系数表示为

$$\beta = 8 \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right) \frac{1}{k^2 x}. \quad (7)$$

当超声波频率和传播距离一定时,非线性系数只与透射波的基频和倍频幅值相关.定义材料的相对非线性系数为

$$\beta' = A_2 / A_1^2. \quad (8)$$

通过测量基频波幅值 A_1 和二次谐波幅值 A_2 ,即可得到材料的相对非线性系数 β' ,该量与非线性系数 β 直接相关,因此可以评价材料的力学性能退化以及相应的损伤情况.

3 非线性超声实验

3.1 试件

被粘接试件为6061型铝合金材料,每个试件的直径均为38 mm,厚度均为6 mm.所用胶粘剂为辽宁抚顺哥俩好化学有限公司生产的改性丙烯酸酯胶,该胶以甲基丙烯酸酯类为主要原料,是一种双组分(A, B)反应型结构胶粘剂,其基本性能参数如表1所列.试件制备时,首先用医用酒精将黏合面的油脂、尘垢等污物擦掉,使其干燥,之后按A, B胶重量比1:1进行配胶,胶总量为0.3 g.将混合均匀的胶液均匀涂抹在试件表面,恒压下粘接

定位 2 min, 确保试件粘接位置正确, 待室温固化 24 h 后, 开始进行温度疲劳实验. 制备完成后的试件如图 1 所示. 共采用两组试件进行非线性超声测

试. 第一组共 3 个试件, 分别编号 1, 2, 3, 用于高温循环疲劳实验; 第二组共 2 个试件, 分别编号 A, B, 用于低温循环疲劳实验.

表 1 改性丙烯酸酯胶的基本性能参数
Table 1. Parameters of modified acrylate adhesive.

胶粘剂	固化条件		使用温度/°C	抗剪强度/MPa	T-剥离强度/kN·m ⁻¹	冲击强度/kJ·m ⁻²
	温度/°C	压力/MPa				
改性丙烯酸酯胶	室温	接触约 0.1	-60—120	22.6—34.3	8.8	>2.0

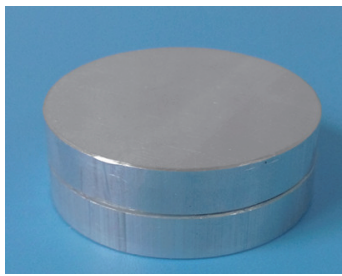


图 1 6061 型铝合金粘接试件
Fig. 1. 6061 aluminum alloy bonding specimen.

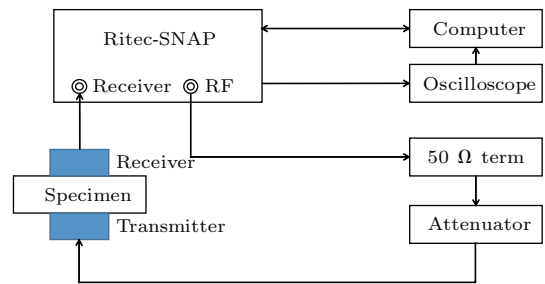


图 2 非线性超声测试系统示意图
Fig. 2. Schematic diagram of nonlinear ultrasonic measurement system.

3.2 非线性超声测试系统

采用美国 Ritec 公司生产的 SNAP-0.25-7-G2 非线性高能超声测试系统进行非线性超声测试, 系统包括大功率主机、RT-50 欧姆终端、40 dB 可调衰减器、MDO3014 型示波器、微型计算机、接触式压电直探头以及夹持装置. 图 2 所示为系统示意图, 图 3 所示为系统实物图. 测量过程中为保证激发探头和接收探头的共轴性以及探头与试件之间的稳定耦合, 采用图 3 中的夹持装置固定超声激发和接收探头. 该装置由压力传感器、六角螺栓、有机玻璃板、钢板等组成. 有机玻璃板与钢板中心有一凹槽, 用来保证激发探头和接收探头在同一轴线上. 结合夹持装置中压力传感器的读数和六角螺栓的调节控制夹持力的大小, 从而保证测量过程中探头与试件的耦合情况尽可能一致.

非线性超声检测系统主机激发单一频率的正弦脉冲信号, 该信号经 50 Ω 终端和高能衰减器后, 激励压电换能器向试件输入单频超声波. 当粘接界面在循环温度疲劳作用下出现损伤时, 由于固体介质的材料非线性, 将会产生高频成分的超声波信号. 对采集到的信号进行快速傅里叶变换, 从而得到基波幅值和二次谐波幅值, 进而得到试件的相对非线性系数.

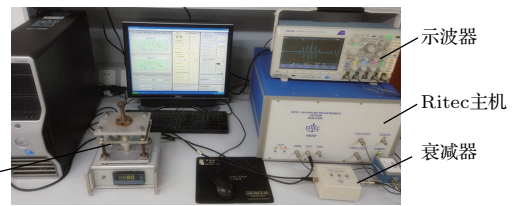


图 3 非线性超声测试系统
Fig. 3. Nonlinear ultrasonic measurement system.

3.3 实验方法

通过对探头频率的标定, 本文所采用激发探头的实际中心频率为 3.5 MHz, 因此实验的信号激励频率为 3.5 MHz. 通过改变非线性超声测试系统输出电压实现对激励信号强弱的控制. 耦合剂采用双翼牌 XY-B 型超声耦合剂. 试件每经过一定次数的温度循环疲劳, 测量一次非线性系数. 测量过程中, 通过旋转图 3 中夹持装置螺栓和压力传感器的读数来控制夹持力的大小. 本实验中保持夹持力的大小为 80 N. 在发射脉冲串不与回波叠加的前提下, 选取激励信号周期个数为 5.

3.3.1 高温循环疲劳

对第一组的 3 个试件进行 10—140 °C 范围的高温循环疲劳加载. 加热设备采用 MTI-250/3040

加热平台,如图4所示. 试件加热到140 °C后,采用自来水进行冷却,水温始终保持为10 °C.



图4 MTI-250/3040 加热平台

Fig. 4. MTI-250/3040 heating platform.

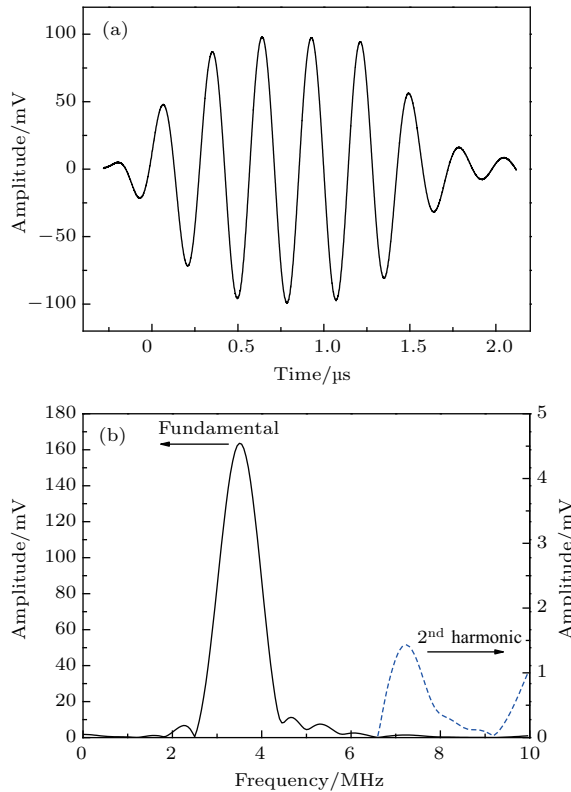


图5 180次高温循环疲劳后2#试件的(a)时域信号和(b)频域信号

Fig. 5. Signals of specimen 2 in (a) time domain and (b) frequency domain, respectively, after being fatigued in high temperature for 180 times.

为确定合适的加热时间及冷却时间,采用非制冷焦平面热像仪记录试件温度随加热时间和冷却时间的变化情况. 结果表明,当加热时间为5 min,冷却时间为20 s后,试件的温度保持稳定,可将此作为一次高温循环疲劳. 每20次高温循环疲劳,利用图3所示的非线性超声测试系统测量一次试件

的非线性系数. 为尽可能地减小测量误差,对每个试件重复测量三次,取三次测量的平均值作为该试件的非线性系数. 图5所示为180次高温循环疲劳后2#试件的时域信号和频域信号.

3.3.2 低温循环疲劳

对第二组的两个试件进行-50—25 °C范围的低温循环疲劳加载. 采用DYDW-60QL工业低温箱对试件进行低温冷却,该低温箱最低冷却温度可达-86 °C. 之后试件在室温下晾置,室温为25 °C. 为确定合适的冷却时间和晾置时间,采用数字温度表记录试件温度随冷却时间和晾置时间的变化情况,实验结果如图6所示.

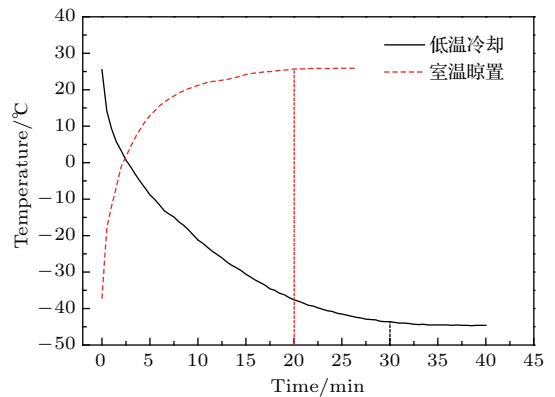


图6 试件温度随冷却时间和晾置时间的变化

Fig. 6. Variation of the temperature of the specimen with the cooling time in refrigerator and warming time in room temperature.

从图6可以看出,当冷却时间为30 min、晾置时间为20 min后,试件的温度基本保持稳定,将此作为一次低温循环疲劳. 每40次低温循环疲劳后测量一次试件的非线性系数. 同样,每个试件重复测量三次,取三次测量得到的平均值作为试件的非线性系数.

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

由于粘接试件由铝片试件和粘接界面组成,其非线性将来自于粘接界面和被粘接试件本身. 首先对铝片试件在温度循环作用下其非线性系数随循环温度疲劳次数的变化情况进行研究. 循环温度范围为10—140 °C,加热时间为5 min,冷却时间为20 s. 试件共3个,每10次循环温度疲劳后测量一

次试件的非线性系数. 图7所示为各试件归一化的非线性系数随循环温度疲劳次数的变化情况. 可以看出, 随着循环温度疲劳次数的增加, 铝片的非线性系数基本保持不变. 因此, 可以认为, 循环温度疲劳载荷作用下粘接界面的损伤是造成粘接试件非线性系数变化的主要原因.

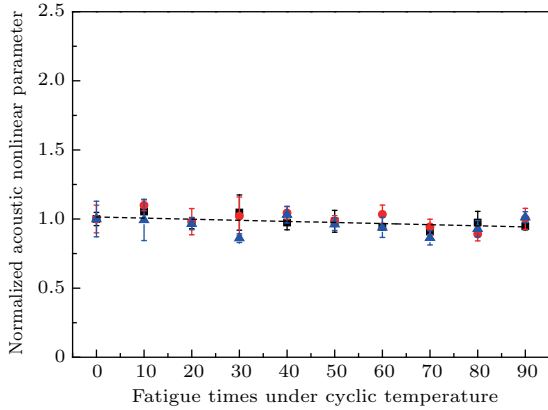


图7 铝片归一化的非线性系数随循环温度疲劳次数的变化

Fig. 7. Variation of the normalized acoustic nonlinear parameter of aluminum with the fatigue times under cyclic temperature.

图8所示为第一组试件高温循环疲劳下归一化的非线性系数随高温循环次数的变化情况. 首先测量未进行高温循环疲劳时试件的非线性系数 β_0 , 然后测量不同高温循环疲劳次数下试件的非线性系数 β , 并用 β/β_0 得到试件的归一化非线性系数.

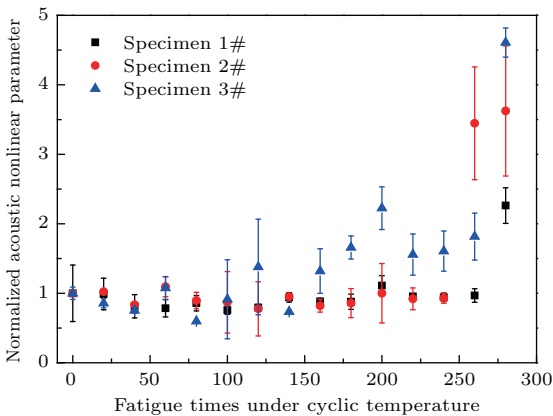


图8 归一化非线性系数随高温循环次数的变化情况

Fig. 8. Variation of the normalized acoustic nonlinear parameter with the fatigue times under high cyclic temperature.

从图8可以看出, 在高温循环疲劳初始阶段, 随着高温循环次数的增加, 试件的非线性系数基本保持不变; 当高温循环次数达到100次左右后, 试

件的非线性系数总体上随着高温循环次数的增加而增大, 特别在高温循环疲劳寿命后期, 试件的非线性系数增加明显.

图9所示为第二组试件低温循环疲劳下归一化非线性系数随低温循环次数的变化情况.

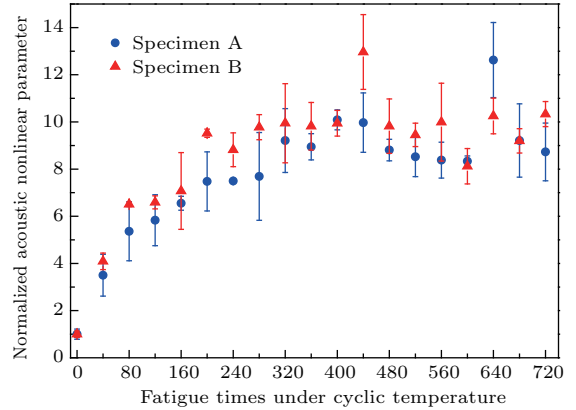


图9 归一化非线性系数随低温循环次数的变化

Fig. 9. Variation of the normalized acoustic nonlinear parameter with the fatigue times under low cyclic temperature.

从图9可以看出, 与高温循环疲劳不同, 在低温循环疲劳初始阶段, 随着低温循环次数的增加, 试件的非线性系数迅速增大; 当循环次数达到240次左右后, 试件的非线性系数增速减缓, 但总体上该非线性系数随低温循环次数的增加而增大.

4.2 实验结果分析

4.2.1 高温循环疲劳

材料的非线性系数与其高阶弹性常数密切相关, 高温循环疲劳下胶层三阶弹性常数的变化是造成非线性系数变化的主要原因^[18]. 在对粘接试件进行高温循环疲劳试验过程中, 高温可以激活分子链中未完全固化的反应集团, 高分子链段的运动性增强, 使得在常温下侧链及支链中未能反应的基团相互靠近, 接触的概率增大, 进而交联密度增大, 胶粘剂的胶接强度上升, 即胶粘剂发生二次固化^[19], 此时试件的非线性系数随着高温循环次数的增加其值变化不明显. 当胶粘剂完全固化后, 随着循环次数的增加, 高温循环疲劳将造成大量的热应力集中, 胶粘剂分子链开始出现滑移、解缠^[20], 多次的高温循环疲劳使胶粘剂分子链发生断裂而形成的小分子将从胶层中析出, 从而降低胶粘剂的交联密度, 增大了分子链间的空隙. 此时胶粘剂粘接强度

降低, 其三阶弹性常数不断增大, 从而导致试件的非线性系数随着高温循环次数的增加而增大.

对于各向同性固体中的三阶弹性常数, 不同的学者采用不同的定义方法. 在这里, 采用 Landau 和 Lifshitz [21] 人所定义三阶弹性常数 A, B, C , 该常数与标准定义三阶弹性常数 c_{IJK} 存在以下关系 [22]:

$$\begin{aligned} c_{123} &= 2C, & c_{111} &= 2A + 6B + 2C, \\ c_{144} &= B, & c_{112} &= 2B + 2C, \\ c_{456} &= A/4, & c_{166} &= A/2 + B. \end{aligned} \quad (9)$$

为研究三阶弹性常数 A, B, C 的变化对材料非线性系数的影响, 下面进一步采用商业有限元软件 ABAQUS 对相同增量下材料的非线性系数随三阶弹性常数的变化情况进行分析讨论. 图 10 所示为铝合金材料的归一化非线性系数随三阶弹性常数绝对值的变化情况. 可以看出, 材料三阶弹性常数 B 对非线性系数的影响程度要大于三阶弹性常数 A, C 的影响程度, 且 A, C 对非线性系数的影响程度近似一致. 因此, 后续分析中仅通过改变胶层三阶弹性常数 B 的大小来讨论粘接试件的非线性系数随高温循环次数的变化情况.

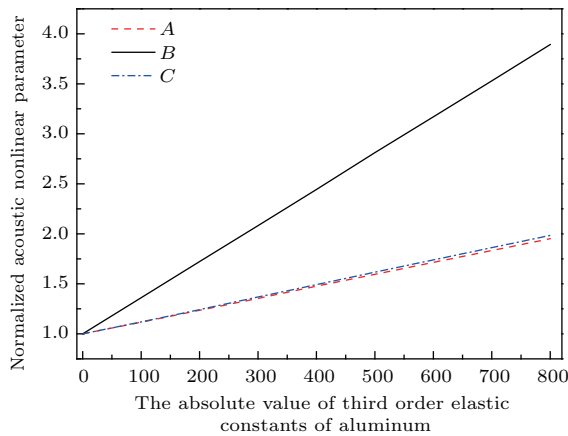


图 10 铝合金材料的归一化非线性系数随三阶弹性常数绝对值的变化

Fig. 10. Variation of the normalized acoustic nonlinear parameter of aluminum with the absolute value of third order elastic constants.

由于温度循环对铝材料本身的影响较小, 对粘接试件分析时仅考虑胶层高阶弹性常数变化对非线性性的影响. 根据图 8 的实验数据, 利用 ABAQUS 模拟计算出各归一化非线性系数对应的胶层三阶弹性常数 B , 计算结果如表 2 所列.

利用数据分析软件 Origin 对数据进行拟合, 三阶弹性常数 B 与温度循环次数的关系可用非线性幂函数表征为:

$$B = B_0 + 3.99746 e^{-15} N^m, \quad (10)$$

其中, B_0 为未进行高温循环疲劳时胶层的三阶弹性常数, N 为温度循环次数, m 为与实验有关常数. 图 11 所示为胶层三阶弹性常数 B 随高温循环次数 N 的变化情况. 这里, $B_0 = 20.732$ GPa, $m = 10.455$. 可以看出, (10) 式较好地反映了胶层三阶弹性常数 B 随高温循环次数 N 的变化情况.

表 2 归一化非线性系数所对应的胶层三阶弹性常数 B
Table 2. The third order elastic constant B and normalized acoustic nonlinear parameter of the adhesive layer.

高温循环次数	实验拟合值	ABAQUS 模拟值	B 的大小/GPa
0	1.0000	1.0000	20
60	1.0002	1.0002	20.011
120	1.0025	1.0003	20.0114
180	1.0341	1.0343	22.3223
200	1.0821	1.0835	25.592
220	1.1952	1.1991	33
240	1.4643	1.4770	55.1
260	2.1180	2.1255	88
280	3.6593	3.6678	175

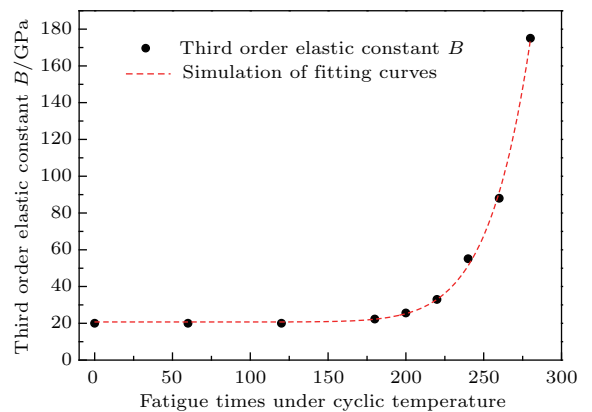


图 11 胶层三阶弹性常数 B 随高温循环次数 N 的变化

Fig. 11. Variation of the third order elastic constant B of the adhesive layer with the fatigue times under high cyclic temperature.

描述固体的非线性弹性效应一般是在物质坐标 (也称拉格朗日坐标) 下进行. 用 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$

表示固体发生形变时质点的初始坐标. 考虑一维传播情形, 忽略固体的黏滞性, 设质点位移矢量 $U = (U, V, W)$, U 的三个分量 U, V 和 W 是 $a = a_1$ 和 t 的函数, 三个分量波动方程的具体形式为 [23]

$$\begin{aligned} & U_{tt} - c_1^2 U_{aa} \\ &= \left(3c_1^2 + \frac{c_{111}}{\rho_0} \right) U_a U_{aa} \\ &+ \left(c_1^2 + \frac{c_{166}}{\rho_0} \right) (V_a V_{aa} + W_a W_{aa}) + \dots, \\ & V_{tt} - c_t^2 V_{aa} \\ &= \left(c_1^2 + \frac{c_{166}}{\rho_0} \right) (U_a V_{aa} + V_a U_{aa}) + \dots, \\ & W_{tt} - c_t^2 W_{aa} \\ &= \left(c_1^2 + \frac{c_{166}}{\rho_0} \right) (U_a W_{aa} + W_a U_{aa}) + \dots, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho_0}$ 和 $c_t = \sqrt{\mu/\rho_0}$ 为纵波声速和横波声速. 若 $V = W = 0$, 则 (11) 式退化为纯纵波波动方程 [24]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c_1^2 \frac{\partial^2 U}{\partial a^2} g \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right), \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} g(\xi) &= 1 + \left(3 + \frac{c_{111}}{\rho_0 c_1^2} \right) \xi \\ &+ \left(3 + \frac{3c_{111} + c_{1111}}{\rho_0 c_1^2} \right) \frac{\xi^2}{2!} + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

参照均匀无损耗流体中有限振幅声波的求解过程, 沿 $+a$ 轴传播的行波中存在一个 Riemann 不变量 $(\lambda - u)/2 = 0$ (这里的 λ 不是 Lamé 常数), λ 的表达式为 [22]

$$\lambda = -c_1 \int_0^{\partial U / \partial a} g^{\frac{1}{2}}(\xi) d\xi, \quad (14)$$

实际空间中的声速应为 $c + u$, 这里 $c = c_1 g^{\frac{1}{2}}(\partial U / \partial a)(1 + \partial U / \partial a)$. 利用 (14) 式和 $\lambda = u$, 消去 $\partial U / \partial a$, 可得到

$$c + u = c_1 + \beta u + \dots, \quad (15)$$

其中, β 为固体介质的非线性系数, 其表达式为

$$\begin{aligned} \beta &= - \left(\frac{3}{2} + \frac{c_{111}}{2\rho_0 c_1^2} \right) \\ &= - \left(\frac{3}{2} + \frac{2A + 6B + 2C}{2\rho_0 c_1^2} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

将 (10) 式代入上式, 最终得试件的非线性系数与温

度循环次数的关系:

$$\beta = - \left[\frac{3}{2} + \frac{A + 3(B_0 + 3.99746 e^{-15} N^m) + C}{\rho_0 c_1^2} \right]. \quad (17)$$

若仅考虑胶层三阶弹性常数 B 的变化对试件非线性系数的影响, 参考文献 [18] 取各试件胶层三阶弹性常数 A 的大小均为 30 GPa, C 均为 -5 GPa,

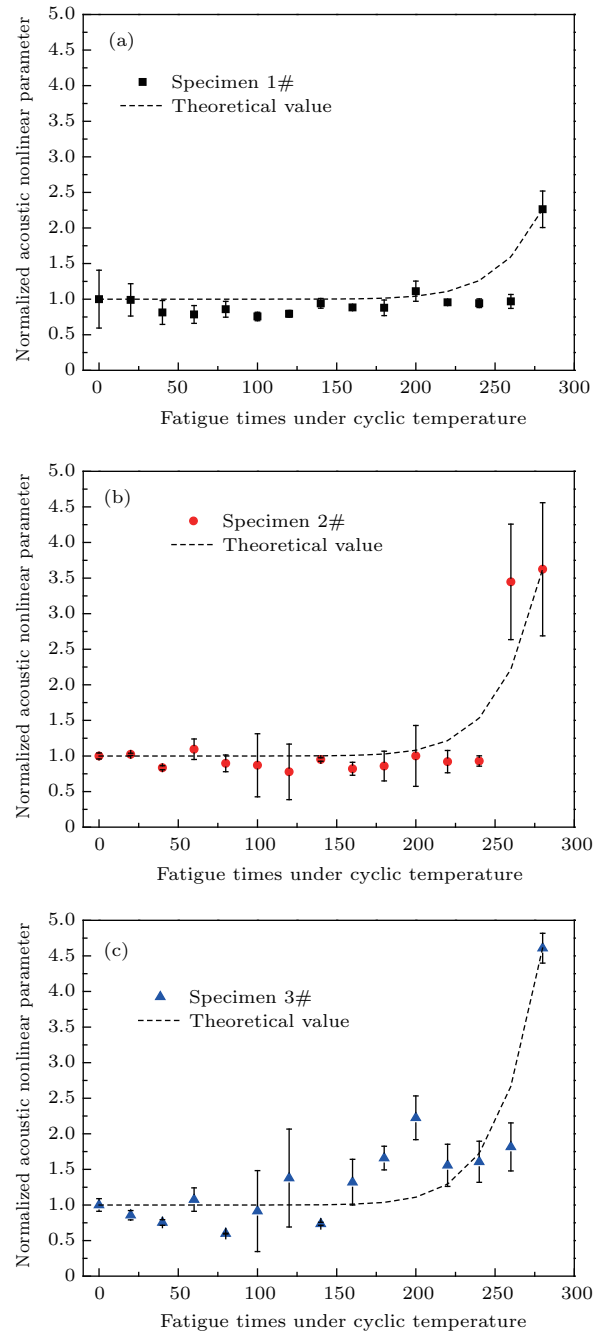


图 12 试件 1#—3# 归一化非线性系数理论值和实验值随高温循环次数的变化

Fig. 12. Variation of the theoretical and experimental normalized acoustic nonlinear parameters with the high temperature cycles for specimen 1#–3#.

且不随温度循环次数的增加而改变, ρ_0 为胶层密度, 大小为 1100 kg/m^3 , c_1 为纵波波速, 大小为 2700 m/s . 因此, (17) 式可进一步写为

$$\beta = - \left[4.618 + \frac{1}{2.673 e^9} (B_0 + 3.99746 e^{-15} N^m) \right]. \quad (18)$$

图 12 为各试件归一化的非线性系数理论值和实验值随温度循环次数的变化情况. 这里将 $B = B_0$ 时所对应的非线性系数 β_0 作为试件的初始非线性系数, 而 β/β_0 作为归一化的非线性系数. 各试件所采用的拟合参数 B_0 和 m 如表 3 所列.

从图 12 和表 3 可以看出, 随着温度循环次数的增加, 归一化后各试件非线性系数的理论值和实验值符合较好. 其中, 参数 B_0 反映了试件未进行高温循环疲劳时的初始损伤情况, 参数 m 反映了试件非线性系数随高温循环次数的变化快慢程度, m 越大, 则非线性系数 β 变化越剧烈. 因此, 通过该理论模型, 可实现对高温循环疲劳作用下粘接界面力学性能退化情况的预测和评估.

表 3 试件 1#—3# 的拟合参数 B_0 和 m

Table 3. The fitting parameters B_0 and m of specimen 1#-3#.

试件	B_0/GPa	m
1#	20	10.220
2#	21	10.355
3#	23	10.422

4.2.2 低温循环疲劳

由于改性丙烯酸酯胶是一种室温固化的胶粘剂, 在低温循环疲劳初始阶段, 试件周围环境温度较低, 使得胶粘剂分子交联密度低, 同时温度过低往往会使胶粘剂中的小分子难以挥发出去, 甚至形成缺陷, 显著降低粘接强度, 此阶段试件的非线性系数随低温循环次数的增加而迅速增大; 随着时间的推移, 胶粘剂分子交联密度逐渐增大, 试件的非线性系数增速减缓, 甚至呈下降趋势; 当胶粘剂分子交联密度达到饱和后, 由于被黏物与胶粘剂的线胀系数不同, 随着低温循环次数的增加, 粘接层不断承受拉-压内应力, 其粘接强度逐渐下降, 此时试件的非线性系数随低温循环次数的增加而增大.

低温循环疲劳时, 胶粘剂分子热运动能量低, 部分溶剂不能完全从胶粘剂内部挥发出去, 从而在

胶层中产生空隙. 同时, 由于改性丙烯酸酯胶与铝片之间的线胀系数不同, 在低温循环疲劳作用下, 导致胶层在加热、冷却过程中不断承受拉-压交变应力, 并在胶层应力集中处将产生裂纹等微小缺陷. 当超声波在该粘接试件中传播时, 将表现出强烈的非线性行为. 为分析超声波与微小缺陷的相互作用, 首先建立图 13 所示的粘接结构的非线性模型.

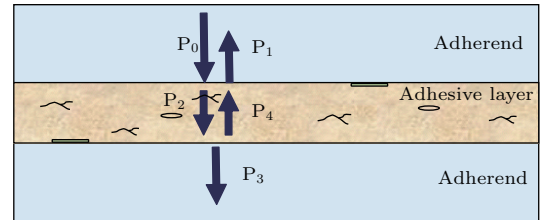


图 13 粘接结构的非线性模型以及波在粘接结构中传播的示意图

Fig. 13. Nonlinear model of bonding structure and wave propagation in an adhesive structure.

在该模型中, 被粘接物为两个弹性半无限大空间, λ, μ, ρ 分别为被粘接物的拉梅常数、剪切模量和密度; 中间为胶层, 其拉梅常数、剪切模量和密度分别为 $\bar{\lambda}, \bar{\mu}, \bar{\rho}$; P_0 为入射纵波, 频率为 ω ; P_2 和 P_3 为透射波; P_1 和 P_4 为反射波. 假设粘接层的损伤使得其拉伸模量显著下降, 而压缩模量保持不变. 为简化分析, 将界面层简化为 $h \rightarrow 0$ 时的“数学界面”模型. 在粘接界面处, 有

$$\begin{aligned} \sigma_y(x) &= K^+ \Delta u_y(x) \quad \sigma_y, \Delta u_y \geq 0, \\ \sigma_y(x) &= K^- \Delta u_y(x) \quad \sigma_y, \Delta u_y \leq 0, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\sigma_y(x)$ 为界面处的正应力, $\Delta u_y(x)$ 为界面处的间断位移, K^+ 和 K^- 为界面的拉伸刚度系数和压缩刚度系数.

由于粘接界面不同的拉伸刚度和压缩刚度, 超声波信号将表现出明显的非线性特征, 即透射波 P_3 中除基频分量外, 还有其他高频分量的产生. 因此, 透射波 P_3 的波形表达式可写成

$$u_y^{(3)} = \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(3)} e^{im\zeta} \right\}. \quad (20)$$

定义材料的非线性系数为

$$\beta = \frac{A_2^{(3)}}{|A_1^{(3)}|^2}, \quad (21)$$

(21) 式中, $A_1^{(3)}, A_2^{(3)}$ 分别为透射波 P_3 的基波幅值和二次谐波幅值. 对于低温循环疲劳, 粘接试件的损伤情况可由黏接界面拉伸刚度 K^+ 与压缩刚度

K^- 的比值来描述. 损伤力学中经常采用损伤变量 D 来描述结构的损伤情况. 根据非线性系数与粘接界面拉/压刚度比间的关系^[13], 试件的非线性系数 β 与损伤变量 D 之间的关系可近似写为

$$\beta = 0.54403 \exp\left(\frac{D}{0.3946}\right) - 0.52766. \quad (22)$$

许多学者研究表明, 损伤变量 D 与循环疲劳次数密切相关^[25-27], 由于试件在低温循环疲劳之前的非线性系数大小不为0, 因此二者关系可写为

$$D = D_0 + (1 - D_0)\left(\frac{N}{N_f}\right)^b, \quad (23)$$

其中, N 为低温循环次数, N_f 为试件的疲劳寿命, 这里 N_f 取值为720, b 为与实验有关的常数. 可以看出, 当 $N = 0$ 时, $D = D_0$; 当 $N = N_f$ 时, $D = 1$. 将(23)式代入(22)式, 最终可得试件的非线性系数与低温循环次数之间的关系

$$\beta = 0.54403 \exp\left\{\frac{1}{0.3946}\left[D_0 + (1 - D_0)\left(\frac{N}{N_f}\right)^b\right]\right\} - 0.52766. \quad (24)$$

取初始损伤变量 $D_0 = 0.25$, 常数 $b = 0.22$. 将 $D = D_0$ 时的非线性系数作为试件的初始非线性系数, β/β_0 为试件归一化后的非线性系数. 结合4.1节的实验结果, 可得试件归一化后的非线性系数理论值和实验值随低温循环次数的变化情况, 如图14所示. 可以看出, 二者非线性系数随低温循环次数的变化情况近似一致, 因此, 该理论模型可以用来监测和评估低温循环疲劳作用下粘接试件力学性能的退化和损伤情况.

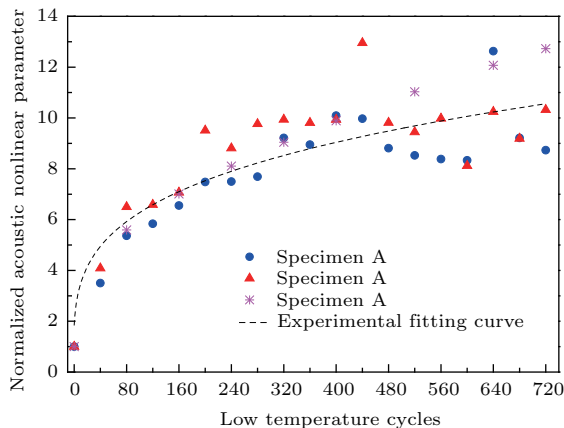


图14 归一化的非线性系数理论值和实验值随低温循环次数的变化

Fig. 14. The normalized acoustic nonlinear parameter of theoretical value and experimental value varies with the low temperature cycles.

5 结 论

采用超声波透射法, 对循环温度疲劳作用下6061型铝合金/改性丙烯酸酯胶/6061型铝合金粘接试件非线性系数的变化情况进行了研究, 并分析了高温/低温循环疲劳作用下胶层的力学性能损伤退化机理. 对于高温循环疲劳, 认为胶层三阶弹性常数 B 的变化是造成试件非线性系数变化的主要原因; 对于低温循环疲劳, 认为粘接界面拉伸刚度 K^+ 的变化是造成非线性系数变化的主要原因. 在此基础上分别建立了高温/低温循环疲劳作用下粘接界面的理论模型, 分别对高温/低温循环疲劳下胶层力学性能的损伤退化情况进行分析, 发现理论值与实验结果符合较好. 因此, 可通过测量试件的非线性系数, 评价循环温度疲劳作用下试件粘接界面的力学性能损伤情况.

参考文献

- [1] Sun D L, Yu X C 2014 *Adhesive and Adhesive Technology Foundation* (Beijing: Chemical Industry Press) p5 (in Chinese) [孙德林, 余先纯 2014 胶黏剂与粘接技术基础 (北京: 化学工业出版社) 第5页]
- [2] Qin W, Li L, Ye Z Y, Lü G, He S Y 2008 *Failure Analysis and Prevention* **3** 7 (in Chinese) [秦伟, 李莉, 叶铸玉, 吕刚, 何世禹 2008 失效分析与预防 **3** 7]
- [3] Xie M, Gao J M, Du Q, Wu S H, Qin Y K 2016 *J. Harbin Inst. Technol.* **48** 17 (in Chinese) [谢敏, 高建民, 杜谦, 吴少华, 秦裕琨 2016 哈尔滨工业大学学报 **48** 17]
- [4] Liu Z L, Song L H, Bai L, Xu K L, Ta D A 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 154303 (in Chinese) [刘珍黎, 宋亮华, 白亮, 许凯亮, 他得安 2017 物理学报 **66** 154303]
- [5] Jordan P M 2006 *J. Phys. Lett. A* **355** 216
- [6] Nazarov V E, Sutin A M 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 3349
- [7] Buck O 1976 *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* **23** 346
- [8] Shui G S, Wang Y S, Qu J M 2005 *Adv. Mech.* **35** 52 (in Chinese) [税国双, 汪越胜, 曲建民 2005 力学进展 **35** 52]
- [9] An Z W, Wang X M, Mao J, Li M X, Deng M X 2010 *Acta Acust.* **35** 481 (in Chinese) [安志武, 王小民, 毛捷, 李明轩, 邓明晰 2010 声学学报 **35** 481]
- [10] Gao G J, Deng M X, Li M L, Liu C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224301 (in Chinese) [高广健, 邓明晰, 李明亮, 刘畅 2015 物理学报 **64** 224301]
- [11] Liu J, Xu W J, Hu W X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 074301 (in Chinese) [刘婧, 徐卫疆, 胡文祥 2016 物理学报 **65** 074301]
- [12] Shui G, Wang Y S, Huang P, Qu J 2015 *NDT & E International* **70** 9

- [13] Shui G, Song X, Xi J Y, Wang Y S 2017 *J. Nondestruct Eval.* **36** 23
- [14] Donskoy D, Sutin A, Ekimov A 2001 *NDT & E International* **34** 231
- [15] Yan D, Drinkwater B W, Neild S A 2009 *NDT & E International* **42** 459
- [16] Kawashima K, Murase M, Yamada R, Matsushima M, Uematsu M, Fujita F 2006 *Ultrasonics* **44** 1329
- [17] Abeele E A V D, Sutin A, Carmeliet J, Johnson P A 2001 *NDT & E International* **34** 239
- [18] Ju T, Achenbach J D, Jacobs L J, Qu J 2017 *AIP Conference Proceedings* **1806** 020011
- [19] Li X G, Gao J, Zhang S P, Du C W, Lu L 2011 *Aging Law and Mechanism of Natural Environment of Polymer Materials* (Beijing: Science Press) p256 (in Chinese) [李晓刚, 高瑾, 张三平, 杜翠薇, 卢琳 2011 高分子材料自然环境老化规律与机理 (北京: 科学出版社) 第 256 页]
- [20] Wu Y X, Chen W Y 2005 *J. Taiyuan Univ. Technol.* **36** 654 (in Chinese) [武艳霞, 陈维毅 2005 太原理工大学学报 **36** 654]
- [21] Landau L D, Lifshitz E M 1986 *Theory of Elasticity* (3rd Ed.) (Oxford: Pergamon Press)
- [22] Norris A N 1998 in: Hamilton M F and Blackstock D T eds. *Nonlinear Acoustics* (San Diego CA: Academic Press)
- [23] Gol'Dberg Z A 1961 *Sov. Phys. Acoust.* **6** 306
- [24] Thurston R N 1984 in: Truesdell C eds. *Mechanics of Solids* (Berlin: Springer-Verlag) p109
- [25] Fatemi A, Yang L 1998 *Int. J. Fatigue* **20** 9
- [26] Cui W 2002 *J. Mar. Sci. Technol.* **7** 43
- [27] Xu J Q, Guo F M 2010 *J. Mech. Eng.* **46** 40 (in Chinese) [许金泉, 郭凤明 2010 机械工程学报 **46** 40]

Nonlinear ultrasonic evaluation of damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue*

Yuan Bo Shui Guo-Shuang[†] Wang Yue-Sheng

(Department of Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 20 October 2017; revised manuscript received 22 January 2018)

Abstract

Adhesively bonded structures possess various industrial applications, such as safety-critical structures in the aerospace and automotive industries. With the increasing using of adhesive joints, corresponding methods of evaluating and testing the structural integrity and quality of bonded joints have been widely investigated and developed for the structural health monitoring. Studies show that the damage and degradation of material are closely related to the nonlinearity of ultrasonic waves propagating within the material. In this paper, for the evaluating of the damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue, acoustic nonlinear parameters (ANPs) of specimens made of aluminum alloy 6061 and modified acrylate adhesive are measured experimentally by using the nonlinear ultrasonic technique; and thus the variations of the ANPs with the fatigue time under high and low cyclic temperature are obtained for the bonded specimens. The study shows that the ANP, which serves as an indicator of material properties, remains nearly unchanged in the initial stage of high temperature cyclic fatigue test, and the ANP obviously increases with temperature cyclic time increasing. For low temperature cyclic fatigue test, the ANP increases rapidly with the increase of temperature cyclic time in the initial stage, and its value growth slows down in the later stage. Further discussion shows that the increase of third order elastic constant is the main reason for the change of ANP for high temperature cyclic fatigue, and that the change of the tensile stiffness of the bonding interface is the main source for the change of the ANP for low temperature cyclic fatigue. It is shown that the ANP based on the theoretical model increases consistently with the experimentally measured values. The present research is expected to provide a promising way of characterizing and monitoring the damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue.

Keywords: adhesively bonding interface, cyclic temperature fatigue, acoustic nonlinear parameter, ultrasonic nondestructive evaluation

PACS: 43.25.+y, 43.35.+d

DOI: 10.7498/aps.67.20172265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11472039).

[†] Corresponding author. E-mail: gsshui@bjtu.edu.cn