

复合材料圆筒结构脱层损伤识别研究

李菊峰^{1,2} 杨涛^{1,2} 杜宇² 牛雪娟²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 针对复合材料圆筒结构, 讨论了基于模态柔度曲率矩阵的无损检测方法。通过模态分析获得脱层复合材料圆筒的各阶固有频率及节点振型, 计算得到轴向和周向柔度曲率矩阵来判断损伤。研究表明: 轴向和周向柔度曲率矩阵两种方法均可达到精确识别脱层位置及大小的效果, 且越靠近外筒壁, 柔度曲率矩阵图突变越大, 越易检测。相对而言, 轴向柔度曲率 F_c 在脱层位置突变远大于周向柔度曲率 F_d , 更易判断损伤。但当损伤发生在沿轴线固定端边界时, 轴向柔度曲率 F_c 本身就有较小突变, 应用周向柔度曲率 F_d 识别防止误判。

关键词 复合材料圆筒, 脱层损伤, 损伤检测, 柔度曲率矩阵

中图分类号: TB33

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.008

Damage Identification of Delaminated Composite Cylinders

LI Jufeng^{1,2} YANG Tao^{1,2} DU Yu² NIU Xuejuan²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract In this paper, an NDT method based on modal flexibility curvature matrix was discussed to detect delamination of composite cylinders. The natural frequency and shift values of the composite cylinder are simulated by modal analysis. The damage of composite cylinder is detected by the calculated axial and circumferential flexibility curvature matrix. Analysis shows that both axial and circumferential flexibility curvature matrix methods can accurately identify the location and size of delamination. From the inner wall of the cylinder to the outer wall, the closer the delamination to the outer wall, the more obviously of flexibility curvature mutations, and more easily the delamination to be detected. And relatively speaking, the mutation of the axial flexibility curvature F_c at delaminated location is far greater than circumferential flexibility curvature F_d , so F_c is easier to identify delaminations. But due to itself small mutation at the fixed end boundary, when damage occurs near the fixed end along axis direction, the axial flexibility curvature F_c may cause misjudgment, in this case, the circumferential flexibility curvature F_d can be used to identify damages.

Key words Composite cylinder, Delaminated damage, Damage detection, Flexibility curvature matrix

0 引言

纤维增强复合材料圆筒在航空航天领域中广泛应用^[1]。由于复合材料具有各向异性等特点, 在受到冲击或压缩载荷作用下容易产生分层损伤, 且不易被观察到^[2-4]。目前应用于复合材料的无损检测技术主要有超声波法、射线探伤法、红外热成像法以及

声发射法等。利用超声波在材料内部缺陷和正常区域的反射差异可判别损伤。国内外学者研究表明, 利用超声波检测虽然快速, 但是操作非常复杂, 不适用于小、薄及复杂结构构件^[5-7]; 利用射线在穿透被检测物体时强度的衰减情况可检测损伤。由于射线衰减程度对于复合材料脱层并不是很敏感, 且射线本身

收稿日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(11372220); 天津工业大学“研究生科技创新活动计划”(15122)

作者简介: 李菊峰, 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为复合材料成型技术与装备。E-mail: w1220334722@163.com

通讯作者: 杨涛, 1970 年出生, 教授。E-mail: yangtao@tjpu.edu.cn

对人体有害,复合材料脱层损伤检测成本又高^[8-10];红外热成像技术是将热脉冲作用于试件表面,并向内部传导,通过观察试件的温度场来识别损伤的。红外热成像检测快速,观测面积大,但对试件表面导热性能要求较高,具有局限性^[11-12];声发射检测原理是利用声发射源释放出的弹性应力波在传播过程中波频的变化来识别损伤。声发射法能检测缺陷并实时监测损伤的动态变化过程,但由于损伤产生的信号与噪声较难区分,检测过程容易受干扰^[13-14]。

基于振动的模态柔度曲率变化被广泛应用于桥梁检测。国外 Raghaven dracher 和 Aktan^[15]利用模态柔度曲率有效的检测了三跨度桥梁的损伤;国内陈立^[16]和郭利等^[17]利用模态柔度曲率作为损伤识别参数对桥梁及弯管结构损伤进行了准确的检测。由于复合材料圆筒脱层损伤必将导致材料本身物理性质(即刚度,质量和阻尼等)的变化,本文应用模态柔度曲率矩阵方法对复合材料圆筒脱层损伤进行有限元研究。相比其他方法,该方法定位准确,适用于复合材料圆筒结构的现场检测。

1 模态柔度曲率

1.1 柔度曲率

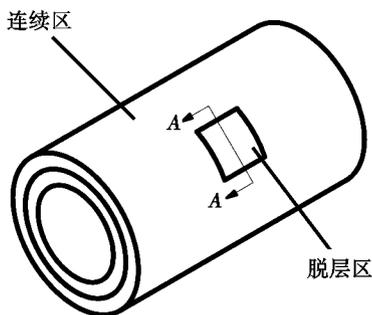
结构的柔度矩阵可由其模态参数(频率、振型)获得:

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T \quad (1)$$

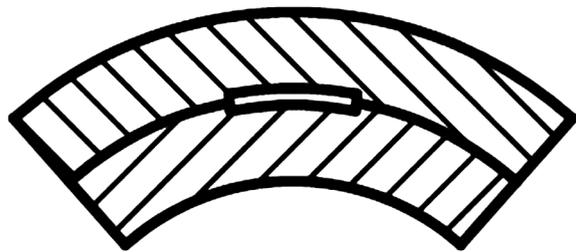
式中, $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_n]$ 为振型矩阵, Φ_i 为质量归一化后的第 i 阶振型向量; $\Omega = \text{diag}(W_i^2)$, ω_i 为第 i 阶固有频率; n 为所提取的振型阶数,由于高阶模态对柔度影响较小,本文共提取前三阶模态参数。

1.2 复合材料圆筒结构脱层识别理论

复合材料脱层圆筒的三维模型如图 1 所示。将复合材料圆筒结构按照图 2 进行单元划分,轴向和周向分别划分为 $(a-1)$ 和 $(b-1)$ 等分,则在圆筒表面共有 $a \times b$ 个节点, $(a-1) \times (b-1)$ 个单元。A 的自由度。 a, c 和 r 分别表示圆筒周向、轴向及径向, η, ζ 和 ω 为对应方向位移, θ_a 和 θ_c 分别为周向及轴向旋转角。



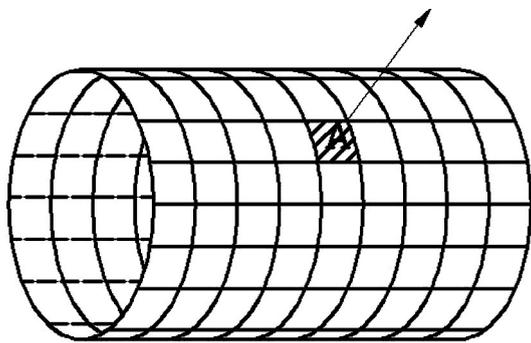
(a) 三维复合材料脱层圆筒



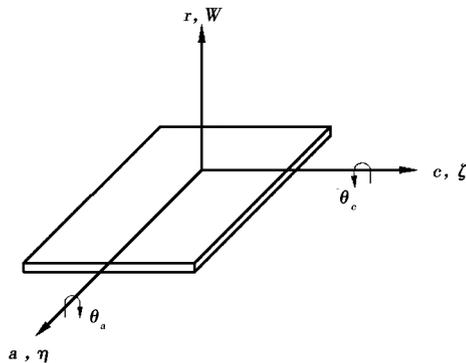
(b) A-A 剖面图

图 1 复合材料圆筒三维脱层模型

Fig. 1 3D model of model of delaminated composite cylinder



(a) 圆筒单元划分图



(b) 单元 A 自由度

图 2 复合材料圆筒的计算模型

Fig. 2 Calculation model of composite cylinder

令第 i 阶位移振型表示为:

$$\Phi_i = [a_{i1}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{im}] \quad (2)$$

式中, $m = a \times b$ 。

将(2)式代入(1)式可得 $F_{m \times m}$ 的矩阵,取 j 列最大值记为 C_j ,可得过度矩阵 F_i :

$$F_i = [C_1, \dots, C_j, \dots, C_m]_{1 \times m} \quad (3)$$

对 F_i 按单元划分情况重新排列,即可得到结点柔度矩阵 F_b :

$$F_b = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1j} & \dots & C_{1b} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{i1} & \dots & C_{ij} & \dots & C_{ib} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{a1} & \dots & C_{aj} & \dots & C_{ab} \end{bmatrix}_{a \times b} \quad (4)$$

按照式(2)和式(3)得式(4)圆筒结点柔度矩阵 F_b 。

在轴向上,可将圆筒表面看成是由一组线段构成

的。对 F_b 列向进行两次差分,得到轴向(列向)柔度曲率矩阵 F_c :

$$F_{cj}(i) = \frac{F_{bj}(i+1) - 2F_{bj}(i) + F_{bj}(i-1)}{[l_{(j+1)}l_{(j-1)}]^2} \quad (5)$$

在周向上,可将圆筒表面看成是由一组圆环构成的。

$$F_{di}(j) = \frac{1}{s} |F_{bi}(j-1) - 2F_{bi}(j) + F_{bi}(j+1)| \times \left[1 + \left(\frac{F_{bi}(j-1) - F_{bi}(j)}{l} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (7)$$

式中, s 为节点所在单元面积, l 为节点间距离。

2 复合材料薄壁圆筒脱层检测数值研究

2.1 复合材料圆筒脱层模型

利用有限元软件 ANSYS 进行模态分析,首先分别建立内径为 32.5 mm 和 34.375 mm,轴线方向高度为 125 mm,壁厚为 1.875 mm 的两个子筒(各子筒壁厚依据脱层所在层而定),每层厚度 0.1875 mm,铺层方向均为 0° 。其材料属性如下: $E_{11} = 120$ GPa, $E_{22} = E_{33} = 7.5$ GPa; $G_{12} = G_{13} = 4$ GPa, $G_{23} = 2.3$ GPa; $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.32$, $\nu_{23} = 0.33$ 。

按照图 2(a),将复合材料圆筒沿周向和轴向分别划分为 19 和 20 个单元。单元划分后得到的节点编号矩阵 $A1$ 和 $A2$ 分别为:

$$A1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 20 \\ 21 & 22 & \cdots & 40 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 381 & 382 & \cdots & 400 \\ 401 & 402 & \cdots & 420 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & 19 \\ 20 & 21 & \cdots & 38 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 362 & 363 & \cdots & 380 \\ 381 & 382 & \cdots & 399 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,(4)式结点柔度矩阵与(8)式节点编号矩阵 $A11$ 一一对应。

对于复合材料圆筒结构,预设了表样所列的四种工况来验证周向和轴向柔度曲率法识别圆筒结构脱层损伤的方法。

表 1 预设工况

Tab. 1 Preset work conditions

工况号	损伤节点编号	脱层位置	损伤单元
1	175	2~3 层	166
2	175	10~11 层	166
3	175	18~19 层	166
4	175	10~11 层	166
	305	10~11 层	289

2.2 复合材料圆筒脱层损伤识别

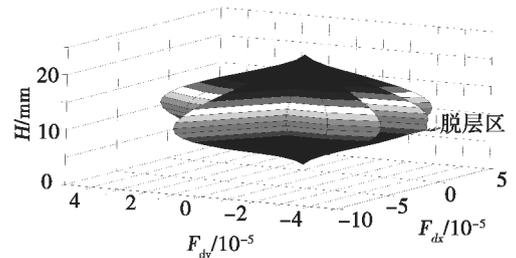
2.2.1 周向柔度曲率识别复合材料圆筒脱层损伤

圆曲率公式为:

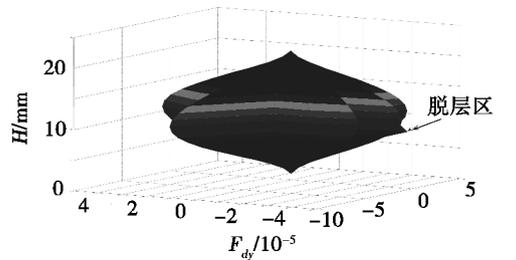
$$C = \frac{|y''|}{[1 + (y')^2]^{2/3}} \quad (6)$$

对 F_b 行向进行近似圆差分处理,依据公式(6)得到周向柔度曲率矩阵 F_d :

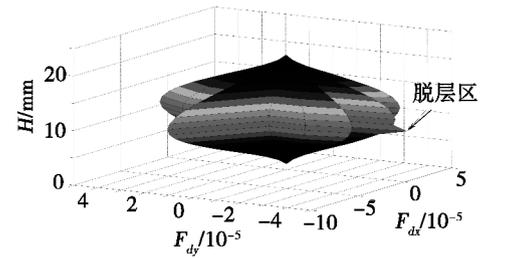
考虑表 1 的 4 个工况,由式(7)得到周向柔度曲率矩阵,以各点周向柔度曲率值为半径,圆筒高度 H 作为 z 轴方向分量得到图 3,周向柔度曲率值在 x 和 y 轴的分量分别为 F_{dx} 和 F_{dy} ,根据图中的周向柔度曲率值的突变情况可以判断脱层损伤位置及大小。



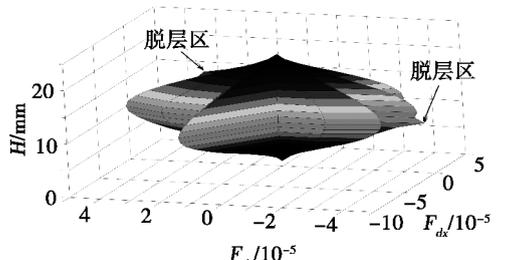
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 3 复合材料脱层圆筒周向柔度曲率

Fig. 3 Circumferential flexibility curvature of delaminated

composite cylinders

图3(a)~(c)显示的是在同一位置不同层上的脱层损伤圆筒的周向柔度曲率,分析可知:

(1)图3(a)~(c)三图在脱层节点175处周向柔度曲率 F_d 均有明显突变,与预设工况1、2、3相符,可精确判断损伤的位置及大小。

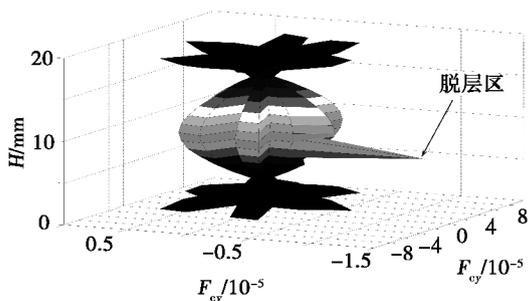
(2)图3(a)~(c)损伤节点175处 F_d 值分别为 4.400×10^{-5} 、 4.667×10^{-5} 和 4.937×10^{-5} , F_d 值逐渐增大,图中所示的凸起也更加明显。由此说明,从圆筒内壁到外壁,脱层越靠外壁,周向柔度曲率值突变越明显,更容易被检测。

(3)图3(d)显示的是同层上的两处损伤。图中 F_d 突变位置与预设的脱层单元166和289相符。图3(d)与图(b)相比,在公共损伤节点175处, F_d 值分别为 4.664×10^{-5} 和 4.667×10^{-5} 。因此,周向柔度曲率法可精确判断圆筒多处损伤位置及大小,且相互之间并无影响。

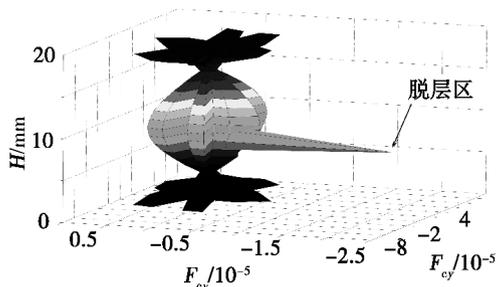
综上所述,无论单一还是复合损伤复合材料脱层圆筒,利用周向柔度曲率 F_d 可精确判断多处损伤位置及大小,且从圆筒内壁到外壁,脱层越靠外壁,周向柔度曲率值突变越明显,更容易被检测。

2.2.2 轴向柔度曲率识别复合材料圆筒脱层损伤

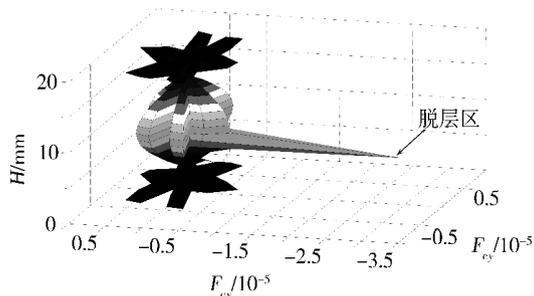
由公式(5)得到表2所列的4个工况的轴向柔度曲率矩阵,以各点轴向柔度曲率值为半径,圆筒高度 H 作为 z 轴方向分量得到图4,轴向柔度曲率值在 x 和 y 轴的分量分别为 F_{cx} 和 F_{cy} ;图4(a)至(d)分别为工况1、2、3、4所对应的轴向柔度曲率图,根据图中的轴向柔度曲率值的突变情况可以判断脱层损伤位置及大小。



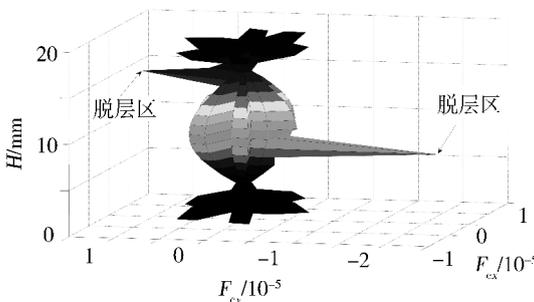
(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3



(d) 工况4

图4 复合材料脱层圆筒轴向柔度曲率

Fig.4 Axial flexibility curvature of delaminated composite cylinders

图4(a)、(b)和(c)显示的是在同一位置不同层上的脱层损伤圆筒的周向柔度曲率,分析可知:

(1)对比图4(a)、(b)和(c),3图在预设的同一脱层位置周向柔度曲率 F_c 均有明显突变,可精确判断损伤的位置及大小。

(2)图4(a)、(b)和(c)损伤节点175处 F_c 值分别为 1.379×10^{-5} 、 2.233×10^{-5} 和 3.086×10^{-5} , F_c 值逐渐增大,图中所示的凸起也更加明显。由此说明,从圆筒内壁到外壁,脱层越靠外壁,轴向柔度曲率值突变越明显,更容易被检测。

(3)图4(d)显示的是同层上的两处损伤。图中 F_c 突变位置与预设的脱层单元166和289相符。图(d)与(b)相比,在公共损伤节点175处, F_c 值大小分别为 2.234×10^{-5} 和 2.233×10^{-5} ,没有太大变化。因此,轴向柔度曲率法可精确判断圆筒多处损伤位置及大小,且相互之间并无影响。就图4(d)单独来看,在两损伤节点175和305处,305处 F_c 值 1.313×10^{-5} 明显小于175处 2.234×10^{-5} ,说明沿轴向方向,越靠近两固定端边界,轴向柔度曲率值突变越小,越不易被检测。

3 结论

(1)应用有限元软件仿真计算获得脱层复合材料圆筒的各阶固有频率及节点振型,通过计算得到复合材料圆筒结构的柔度曲率矩阵。

(下转第44页)