

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.08.010

基于模态应变能的复合材料板层间损伤定位研究^{*}

范正伟¹, 姜建华¹, 王学琴²

(1. 同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 应用基于模态应变能的损伤识别方法对复合材料层合板的层间损伤进行定位研究, 并基于单元模态应变能变化率提出了改进的损伤指标。通过有限元软件方法模拟复合材料板层与层之间的损伤(如残留气泡等缺陷引起的损伤), 提取受损模型的各阶模态振型, 将改进的单元模态应变能变化率作为复合材料层合板的损伤定位指标。通过有限元数值模拟, 验证了模态应变能方法在复合材料层合板定位层间损伤的有效性, 从而在保证损伤定位精度的前提下, 大大减小后期分析的工作量。

关键词: 复合材料层合板; 模态应变能; 损伤定位; 层间损伤

中图分类号: O342+TB33+TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)08-043-04

Research on Strain Energy Damage Detection Method to Interlaminar Damage of Composite Laminates

Fan Zhengwei¹, Jiang Jianhua¹, Wang Xueqin²

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shandong Nonmetal Material Research Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: The method of damage detection based on modal strain energy was applied for composite laminates to detect interlaminar damage, and a modified damage index based on modal strain energy ratio was proposed. The interlaminar damage of composite laminates (e.g. caused by residual bubbles) was simulated by finite element method. The mode shapes of damage model were obtained to calculate the modified modal strain energy ratio as the damage index for composite laminates. By finite element simulating, the validity of the modal strain energy method for interlaminar damage detection in composite laminates was verified. In order to ensure the damage location precision, the workload of later analysis was greatly reduced.

Keywords: composite laminates; modal strain energy; damage detection; interlaminar damage

基于模态参数分析定位结构损伤位置的方法具有测量方便和费用相对较低的优点, 很多国内外的学者探索了基于不同模态参数的损伤识别方法在工程中的应用^[1-3], 分别有基于结构固有频率、位移模态、应变模态、曲率模态、模态应变能、频响函数等一系列的损伤识别方法^[4-7]。最早提出的是基于结构固有频率的方法, 它可以准确判断出结构中是否存在损伤, 但是不能定位损伤的具体位置。后来, 大量学者提出了能较为理想地定位结构局部损伤位置的基于应变模态和曲率模态的方法。由于此方法是基于振型的局部损伤的识别量, 所以对结构的局部损伤有较好的敏感度, 但其中基于曲率模态的方法有一定局限性。因为在实际的应用中, 待测结构的曲率并不能通过实验仪器直接测量, 只能通过对位移进行中心差分才能得到曲率, 其获得很大程度上继承了位移的误差, 因此影响了损伤定位的准确性。

基于模态应变能的方法是目前主流的基于能

量的损伤识别方法, D. R. Sanders 等应用应变能的方法定位了复合材料梁结构中的损伤^[8], 而 Z. Y. Shi 等提出了基于模态应变能的损伤指标是对模态应变能方法的进一步研究, 通过应用模态应变能变化率和模态应变能改变的两个损伤指标有效地定位了梁和框架结构的损伤位置^[9-11]。P. Cornwell 将该方法从梁中推广到了板状结构中, 并定位了板状结构中的损伤位置^[12]。笔者利用基于模态应变能的方法, 通过改进的损伤指标, 定位复合材料板层与层之间的损伤(残留气泡)位置。通过有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析, 获取层合板各层的模态振型和刚度矩阵, 然后应用 MATLAB 程序计算单元的模态应变能, 通过改进的模态应变能变化率作为损伤指标, 验证该指标定位复合材料层合板层与层

^{*} 上海市第一批高新技术产业化重点项目(沪经信技 2011-819)

联系人: 姜建华, 教授, 主要从事复合材料结构健康监测研究

收稿日期: 2014-06-03

之间损伤(残留气泡)的有效性。

1 损伤指标

结构单元的刚度和单元对应的模态振型是单元模态应变能的两个基本变量,若某单元发生损伤,其单元的刚度将发生变化,而且该单元及其附近周围单元的模态振型也将会受到影响,因此,结构损伤前后该单元及其附近单元的模态应变能的变化将比较突出,并且损伤单元的模态应变能变化应该最大。将复合材料层合板的各层纤维铺层离散成若干矩形单元,可以得到单元的模态应变能^[13]:

$$MSE_j^u = \frac{1}{2} \{\phi^u\}_i^T [k_j] \{\phi^u\}_i \quad (1)$$

如果单元发生损伤,由于单元刚度或振型的变化,那么单元的模态应变能将变为:

$$MSE_j^d = \frac{1}{2} \{\phi^d\}_i^T [k_j + \Delta k_j] \{\phi^d\}_i \quad (2)$$

那么单元模态应变能变化率为:

$$MSECR_j = \frac{\{\phi^d\}_i^T [k_j + \Delta k_j] \{\phi^d\}_i - \{\phi^u\}_i^T [k_j] \{\phi^u\}_i}{\{\phi^u\}_i^T [k_j] \{\phi^u\}_i} \quad (3)$$

从单元模态应变能变化率的表达式可以看出,应用单元模态应变能进行损伤定位时,需要分析不同阶模态下的单元应变能的变化,对于大型结构,这将是不错的工作量。因此提出改进的损伤指标,它是通过直接叠加各阶模态下的单元模态应变能变化率得到的。根据模态应变能的理论,在不同损伤工况下,损伤单元的模态应变能变化率比其余单元的值要大,所以叠加各阶模态下的单元模态应变能变化率,其损伤单元的损伤指标值与其余单元的差值将更大,从而定位损伤位置。

笔者应用的数值算例是通过计算复合材料纤维铺层各单元的损伤指标值,定位复合材料层合板层与层之间的残留气泡。由于不是通过直接降低某单元的刚度模拟复合材料层合板的损伤,因此笔者将忽略复合材料纤维铺层各单元的刚度变化,计算其改进的损伤指标值,其改进的损伤指标表达式为:

$$z_j = \sum_{i=0}^n \frac{\{\phi^d\}_i^T [k_j + \Delta k_j] \{\phi^d\}_i - \{\phi^u\}_i^T [k_j] \{\phi^u\}_i}{\{\phi^u\}_i^T [k_j] \{\phi^u\}_i} \quad (4)$$

在(1)式、(2)式、(3)式、(4)式中, $\{\phi^u\}_i$, $\{\phi^d\}_i$ 分别表示损伤前后结构的第 i 阶模态; n 表示模态的阶数; $[k_j]$ 表示第 j 单元的刚度矩阵; Δk_j 表示单元刚度的变化,在本文应用中令其为 0; z_j 表示第 j 单元的损伤指标值。

2 复合材料层合板损伤定位的数值模拟分析

应用 ABAQUS 软件建立有限元模型,模拟复合

材料层合板,模型的大小为 40 mm × 20 mm × 1.75 mm,网格划分为 40 × 20 × 11,单元选用 8 节点实体单元 (C3D8R),网格划分的 11 层中有 6 层模拟纤维铺层,各层的纤维材料方向分别为: +45°, -45°, 0°, +45°, -45°, 0°, 分别命名为层 1, 层 2, 层 3, 依次类推共 6 层,每层厚度为 0.25 mm。其材料参数为:纵向拉伸弹性模量 $E_1=185$ GPa,横向拉伸弹性模量 $E_2=E_3=10^5$ GPa,泊松比 $\nu_1=0.28$, $\nu_2=0.25$,剪切弹性模量 $G_{12}=G_{13}=73$ GPa,密度 (ρ)=1 600 kg/m³,其余 5 层模拟铺层之间的树脂层,每层厚度为 0.05 mm,材料参数为: $E=21$ GPa, $\rho=1\ 000$ kg/m³。

为了模拟复合材料层合板层与层之间的损伤(气泡),删除纤维铺层层 1 和层 2 之间树脂层的某一单元,具体位置为网格在 X 轴正向的第 20 列, Y 轴正向的第 10 行。X 轴和 Y 轴的正向与 ABAQUS 建模环境下默认坐标系的 X 轴和 Y 轴的正向方向一致。运行 ABAQUS 有限元软件,利用 MATLAB 编写计算程序提取复合材料层合板完好状态下和损伤状态下的前 8 阶模态振型和单元刚度矩阵,计算各纤维铺层的改进的损伤指标。

图 1 ~ 图 6 为 6 层纤维材料铺层的各单元损伤指标值。比较各纤维铺层中单元的损伤指标值可知,层 1 纤维层最大损伤指标值 (1.533) 和层 2 纤维层的最大值 (1.273) 比层 3 纤维层的最大值 (0.201) 大,甚至比层 4、层 5 和层 6 纤维层的最大值 (0.104, 0.072 和 0.063) 大一个数量级。

根据模态应变能的理论,损伤单元的模态应变能变化率的值是所有单元中最大的,而该损伤指标也是基于单元模态应变能变化率得到的。因此,图 1 ~ 图 6 数据表明复合材料层合板的损伤位置出现在层 1 纤维层和层 2 纤维层之间的树脂层。为了定位复合材料层合板损伤的具体位置,着重分析层 1 和层 2 纤维铺层,计算前 8 阶模态下该两层的单元模态应变能变化率。

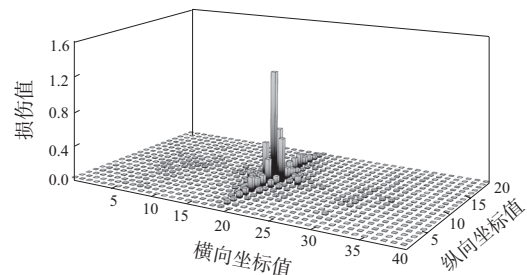


图 1 层 1 纤维铺层各单元的损伤指标值

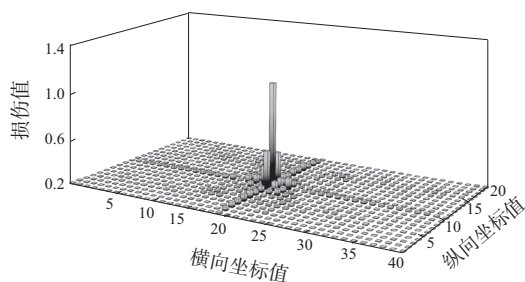


图2 层2纤维铺层各单元的损伤指标值

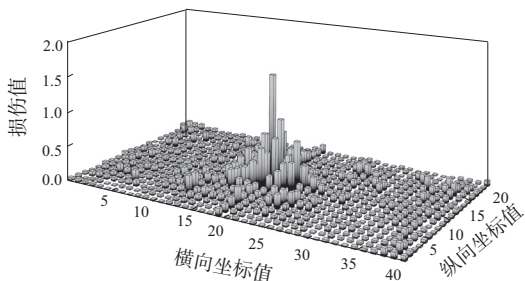


图3 层3纤维铺层各单元的损伤指标值

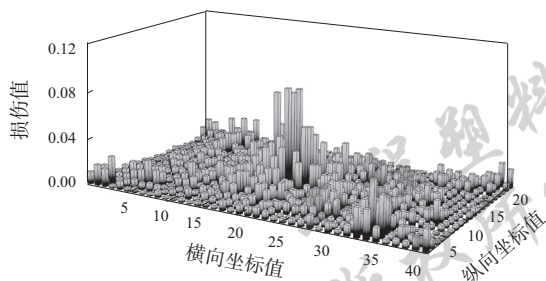


图4 层4纤维铺层各单元的损伤指标值

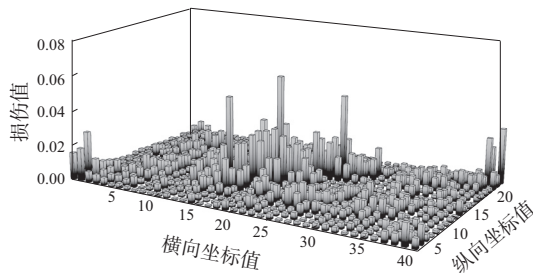


图5 层5纤维铺层各单元的损伤指标值

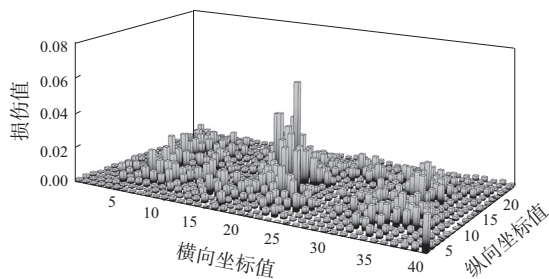


图6 层6纤维铺层各单元的损伤指标值

图7、图8分别为层1和层2纤维层网格第10行各单元的模态应变能变化率。

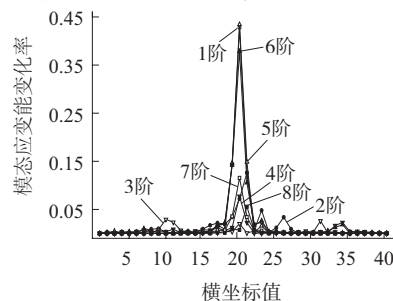


图7 层1纤维层网格第10行各单元的模态应变能变化率

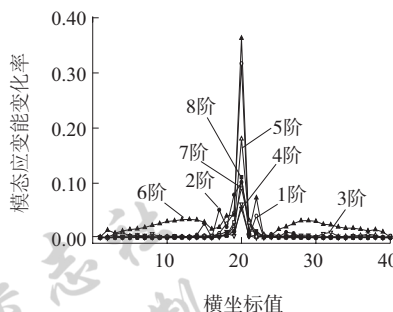


图8 层2纤维层网格第10行各单元的模态应变能变化率

通过分析比较,单元模态应变能变化较为明显的主要出现在层1和层2纤维层第10行,因此,为了能精确定位,分析前8阶模态下层1和层2纤维层第10行的所有单元模态应变能变化率。由图7可以确定在层1纤维铺层中,在20点位置的单元模态应变能变化比较突出,在第1,5和6阶模态下表现的尤为明显;通过图8可以发现,在层2纤维铺层中,在第6阶模态下20点位置的单元模态应变能变化最突出,其余阶模态下也是在20点的单元模态应变能变化较为明显。

因此,在树脂层中与层1纤维铺层第20点单元和层2纤维铺层20点的单元相距最近的单元应该为损伤单元,因为单元的损伤影响使得周围单元的模态参数发生变化,从而导致周围单元模态应变能发生改变,与损伤单元相距越近的影响越大,所以,可以确定树脂层中损伤单元位置在第10行(Y轴正向)的第20列(X轴正向),该位置与之前删除的单元位置相吻合。

3 结语

探讨了基于单元模态应变能的方法在定位复合材料层合板层间损伤中的应用,通过数值模拟验证了该方法可以定位复合材料层合板层与层之间的损伤(残留气泡),在分析过程中,运用改进的单元模态应变能变化率的损伤指标,从而在保证损伤定

位精度的前提下,大大减小后期分析的工作量。

在研究复合材料层合板损伤定位时用到的各层单元模态振型和单元刚度矩阵,虽然是通过有限元数值仿真模型获得的,但基于模态应变能变化率的损伤定位识别方法同样可以推广到实际检测工程。只要将待测结构监测到的部分实测模态,构成特征子样空间进行自由度扩充,然后将自由度扩充获得的完备模态替代相应的理论模态即可。当然,进一步研究单元模态应变能变化率的方法在复合材料层合板中的应用,需要更多的实验研究,进而验证该方法的定位精度。而实际工程中,获得复合材料层合板各纤维材料层的更高阶的模态参数,仍然有一定难度。因此,如何有效地测量结构各层能反映损伤的模态参数是损伤定位发展的一个方向。

参考文献

- [1] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2001.
Li Debao, Lu Qiuhai. Experimental modal analysis and applications[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 郭国会,易伟建. 基于模态参数进行连续梁损伤诊断的数值研究 [J]. 振动与冲击, 2001, 20(1):72-75.
Guo Guohui, Yi Weijian. A numerical study on damage diagnosis of a continuous beam using modal parameters[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(1):72-75.
- [3] 邓焱,严普强. 梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(11):123-127.
Deng Yan, Yan Puqiang. New approach for strain modal measurement and damage detection of bridges[J]. Tsinghua University(Sci &Tech), 2000, 40(11):123-127.
- [4] Wei Fan, Pizhong Qiao. Vibration-based damage identification methods:a review and comparative study[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10 (1):83-111.
- [5] Yan Junxia, Liu Chusheng, Liu Tongzeng, et al. A review on advances of damage identification methods based on vibration [J]. Key Engineering Materials, 2009, (413-414):277-283.
- [6] Lia Y Y. Hypersensitivity of strain-based indicators for structural damage identification:a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24 (3):653-664.
- [7] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2):321-332.
- [8] Sanders D R, Kim Y I, Stubbs N. Nondestructive evaluation of damage in composite structures using modal parameters[J]. Experimental Mechanics, 1992, 32(3):240-251.
- [9] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Structural damage localization from modal strain energy change[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 218(5):825-844.
- [10] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Structural damage detection from modal strain energy change[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12):1 216-1 223.
- [11] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Improved damage quantification from elemental modal strain energy change[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(5):521-529.
- [12] Cornwell P, Doebling S W, Farrar C R. Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 224(2):359-374.
- [13] Chen J C, Garba J A. On-orbit damage assessment for large space structures [J]. AIAA Journal, 1988, 26(9):1 119-1 126.

2018 年全球特种合成纤维塑料市值将突破 200 亿美元

著名市场咨询公司 MarketsandMarkets 日前发表报告预测,2018 年全球特种合成纤维及玻璃纤维塑料市值将达 201 亿美元。2014~2018 年期间,其市场需求复合年增长率为 5.2%。

报告指出,近年来市场对特种合成纤维及玻璃纤维塑料的需求力度正在逐年加大。得益于其质量轻便、抗冲击性强、耐腐蚀等特性,以上两种材料在航天航空、汽车生产等领域应用范围广泛。市场分析师称,特种合成纤维塑料如芳香聚酰胺、UHMW(超高分子量聚乙烯)是理想的车用塑料,其在汽车零部件生产领域应用前景十分可期。随着人们对军事冲突及民用安全隐患担忧的不断提升,导弹防护的重要性也日益凸显。而这也在很大程度上推高了市场对特种合成纤维及玻璃纤维塑料的需求。

为减轻机体质量,节约油耗成本,碳纤维增强塑料(CFR)近年来已成为航天航空领域的首选材料。此外,未来几年交通运输行业,尤其是汽车领域也将成为推动特种合成

纤维及玻璃纤维塑料市场繁荣发展的主要驱动力。

MarketsandMarkets 表示,就地域而言,北美、欧洲、亚太地区是当前全球三大特种合成纤维及玻璃纤维塑料市场。

(中国聚合物网)

舒尔曼 9 100 万美元收购 Ferro 特种塑料资产

美国舒尔曼(A Schulman)公司近日表示,已经以 9 100 万美元的收购价完成了对美国 Ferro 公司特种塑料业务大部分资产的收购。此次收购包括舒尔曼在美国的 4 套装置以及西班牙的业务,但不包括新泽西州 Edison 和委内瑞拉 Carabobo 的塑料业务。该资产在 2013 年的售价为 1.54 亿美元。

舒尔曼首席执行官 Joseph Gingo 发表声明称:“此次收购对我们来说是极好的战略补充,反映了我们在扩大产品供应以及对目标市场地理覆盖上的持续努力。”Ferro 公司发表声明称,特种塑料业务的净出售额估计为 8 800 万美元,将用来偿还债务。据悉, Ferro 公司生产用于陶瓷和玻璃的釉料、着色剂、墨水及聚合物添加剂。

(工程塑料网)