

文章编号: 1000-4750(2014)02-0230-07

# 基于应变信号的复合材料层合板 低速冲击损伤识别研究

王利恒

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘 要:** 为了进行复合材料层合板的冲击损伤识别研究, 设计了由小到大的14个等级的冲击能量, 对应由小到大的冲击损伤, 其中最小能量的冲击没有造成损伤, 最大能量的冲击造成穿透复合材料板的损伤。应用冲击过程中测试得到的应变响应进行损伤识别。基于冲击过程中获得的脉冲应变信号, 提出了10个新的冲击损伤识别指标: 脉冲上升时间、下降时间、总时间、上升时间比下降时间、下降时间比上升时间; 脉冲上升面积、下降面积、总面积、上升面积与下降面积之比、下降面积与上升面积之比。将提出的10个新冲击损伤识别指标与冲击能量的关系进行了对比研究。研究表明: 脉冲下降时间、脉冲总时间、脉冲下降面积、脉冲总面积与冲击能量之间的关系大体上都是单调的, 这4个指标适合0.8J/mm到6.67J/mm的大范围的冲击损伤程度识别, 其余6个指标在一定的冲击能量范围内可以识别冲击损伤程度。应用脉冲下降面积、脉冲总面积指标进行了冲击定位识别研究, 研究表明, 这两个指标也可以识别冲击损伤的位置。

**关键词:** 复合材料层合板; 冲击损伤; 损伤识别; 损伤指标; 冲击总时间

中图分类号: TU599; V214.8; V414.8 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.09.0693

## LOW VELOCITY IMPACT DAMAGE IDENTIFICATION OF COMPOSITE LAMINATE USING DYNAMIC STRAIN SIGNALS

WANG Li-heng

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Fourteen levels of impact energy were designed in order to identify the damages of composite laminates. Corresponding to the minimum level of impact energy, composite laminates were intact. Corresponding to the maximum level of impact energy, composite laminates were penetrated through. Strain responses during the impacts were used to detect impulse damages of composite laminate specimens. Based on the collected impulse strain signals under the impacts, the following ten new impact damage indexes are suggested. They are rising shock duration (RSD, the interval from the starting time to peak time of the impact), descending shock duration (DSD, the interval from the peak time to the end time of the impact), shock duration (SD, the interval from the starting time to the end time of the impact), the ratio of the RSD to the DSD, the ratio of the DSD to the RSD, rising area (RA, the integral of the impulse strain response from the starting time to the peak time of the shock), descending area (DA, the integral of the impulse strain response from the peak time to the end time of the shock), total area (TA, the integral of the impulse strain response from the starting time to the end time of the shock), the ratio of the RA to the DA, the ratio of the DA to the RA. The relationship between the ten damage indexes and the impact energies was researched. The results indicate that such indexes as the DSD, the SD, the DA and the TA

收稿日期: 2012-09-20; 修改日期: 2013-03-01

基金项目: 航空科学基金项目(2009ZD44006)

通讯作者: 王利恒(1972-), 男, 内蒙古人, 高工, 博士, 从事结构健康监测研究(E-mail: walihe@hotmail.com).

vary monotonically, depending on the increasing impact energies on the whole. Thusly, the four damage indexes are suitable for identifying the impact energies within the range from 0.8J/mm to 6.67J/mm. The six rest damage indexes can identify impact damage quantification within some shock energy range. The results also show that the DA and TA can also be used to identify the impact location.

**Key words:** composite laminates; shock damages; damage identification; damage index; impulse duration

复合材料的低速冲击损伤是一种常见的损伤,这种损伤不易被发现,对其压缩强度却有较大的影响<sup>[1-5]</sup>,为提高复合材料结构的安全性,需要及时发现冲击损伤的位置和损伤的大小。因此,复合材料结构健康监测受到越来越多的重视。

结构损伤检测是结构健康监测的基础。应用结构振动响应的结构损伤检测可分为基于模型的方法(model-based)和非基于模型的方法(non model-based)。基于模型的方法需要对结构进行有限元建模,结合结构测试数据,进行损伤识别,如文献[6-7]的方法,非基于模型的方法不对结构进行有限元建模,直接应用结构的测试数据进行损伤识别<sup>[8-23]</sup>。

文献[6]对结构施加随机激励,测试结构的模态频率、频响函数曲线,并用商业软件 MSC. Nastran 对其进行建模分析,将试验测试结果与有限元分析结果结合,应用拓扑优化的方法进行损伤识别。这样的方法属于基于模型的方法。

对结构施加线性调频脉冲激励、谐形激励或随机激励得到精确模态测试数据,文献[8-15]分别用模态频率<sup>[8]</sup>、模态阻尼<sup>[9]</sup>、模态振型<sup>[10]</sup>、模态曲率<sup>[11]</sup>、模态应变能<sup>[12]</sup>、柔度<sup>[13]</sup>等为损伤指标进行识别;文献[14]用直接刚度方法(direct stiffness calculation, DSC)对损伤后结构的分布刚度进行识别。对结构施加冲击激励,文献[15]用加速度指标进行损伤识别;文献[16]基于结构的非线性动力特性,用结构的固有频率随其振幅的变化特征进行损伤识别。对结构施加高频电压激励,文献[17]应用 Lamb 波法进行损伤识别。对结构施加一定频率范围的随机激励,文献[18-20]应用互相关函数幅值向量法进行损伤识别研究。这些识别方法均没有对结构建立有限元模型,直接对测试数据分析得到结构的损伤信息。因此,均为非基于模型的识别方法。

综合分析基于模型的识别方法(model-based)和非基于模型的识别方法(non model-based)发现,这些识别方法有一个共同的特点,就是在结构损伤前以及损伤后,需要对结构施加额外的载荷,如谐形

激励、线性调频脉冲激励、冲击激励、高频电压激励,一定频率范围的随机激励等。施加这些额外的载荷或激励,是为获得识别需要的数据。实际上,进行损伤识别,有时是不允许施加额外的激励或载荷的,如飞机结构损伤识别通常不允许为检测损伤而施加谐形激励,做模态试验;对于飞机上复合材料的损伤检测,特别是在线监测,也不允许施加高频电压驱动压电片的激励,因此,需要研究不施加额外激励的损伤识别方法,而直接应用结构运营过程中可能受到的载荷而发生的响应进行识别,本文针对此类需求,就复合材料冲击损伤识别问题,提出了新的损伤识别方法,其不需要施加额外的激励,只应用结构运营过程中可能出现的激励响应,对其进行识别。本文方法属于非基于模型的方法。

针对飞机复合材料结构维修过程中工具掉落、飞鸟碰撞等引起的损伤,本文以国产复合材料层合板为研究对象,对其施加了冲击载荷,测试了冲击过程中的分布应变响应,应用提出的新的损伤识别指标,进行了冲击损伤的定位和定量研究。

## 1 复合材料层合板冲击试验

### 1.1 试验介绍

试验研究采用的复合材料层压板是依据美国 ASTM 标准(《ASTM 标准号: D7136/D7136M-05》)设计的,试验件几何尺寸:长 150mm,宽 100mm,厚度 4mm,选用的材料为 CCF300, 5228A 国产复合材料,其铺层顺序为[45/0/-45/90]4s。依据 ASTM 标准选择了冲击装置,按照 ASTM 标准安装了测试试验件。包括配重在内的冲击质量块质量为 5123.43g,质量块沿冲击装置上的固定轨道自由下落,对试验件施加冲击载荷,通过调整自由下落的高度来实现不同的冲击能量。冲击过程中应变测试采用了 Strainbook616 应变仪,其采样频率为 90kHz。

### 1.2 冲击能量的设计

针对一批一次成型的国产复合材料层合板 14 块设计了 1 到 14 个等级的冲击能量,其 1 到 14 损

伤等级与冲击能量的对应关系如表 1 所示。

表 1 复合材料板的损伤等级和对应冲击能量

Table 1 Damage levels and corresponding impulse energies

损伤等级	冲击能量/(J/mm)	损伤等级	冲击能量/(J/mm)
1	0.8	8	3.5
2	1	9	4
3	1.1	10	4.45
4	1.2	11	5
5	2	12	5.5
6	2.5	13	6
7	3	14	6.67

### 1.3 传感器的布置

传感器的布置如图 1 所示，沿复合材料层合板试验件的长边方向，布置应变传感器 1 号到 5 号，沿短边方向布置 6 号传感器。图 1 中也给出了冲击载荷的施加位置，其在复合材料层合板的中心位置。在施加 1 个到 14 个损伤等级对应的冲击能量过程中，应用 Strainbook616 进行应变数据的采集。

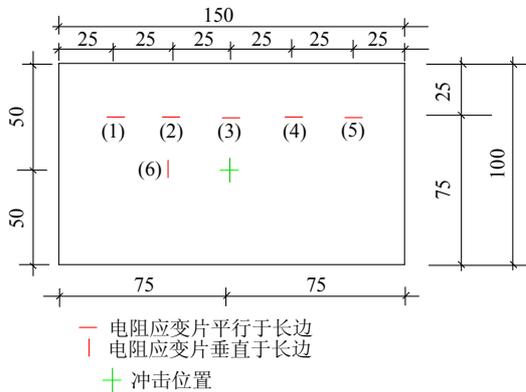


图 1 应变传感器的布置和冲击位置

Fig.1 Lay out of the resistance strain gauge and impact location

### 1.4 冲击试验装置

冲击试验是在北京航空航天大学进行的，冲击试验装置如图 2 所示，按照 ASTM 标准要求，冲击前将冲头中心与试验件的中心严格对中后，再于四个角处将复合材料试验件固定。图 2 也给出了质量



图 2 冲击装置

Fig.2 Impact instrument

块下落的轨道。将质量块提升一个高度，自由释放，质量块沿轨道下落，冲击试验件后，质量块反弹，要求试验者及时接住质量块，避免二次冲击发生。

## 2 冲击试验结果分析

### 2.1 两个等级冲击能量下应变响应的对比

图 3 和图 4 分别为 0.8J/mm 和 6.67J/mm 冲击能量下的编号 1 到编号 6 应变响应。由此两个图可知，能量小时，如 0.8J/mm 冲击下，应变响应接近半正弦波，响应图形表现出对称的特点：上升时间和下降时间对称、上升面积和下降面积对称。当能量大时，如 6.67J/mm，复合材料层合板应变响应不再接近半正弦波，响应图形表现出非对称的特点：上升时间和下降时间不对称、上升面积和下降面积不对称。基于此特点，考察应用这种不对称性识别冲击能量大小的可行性。

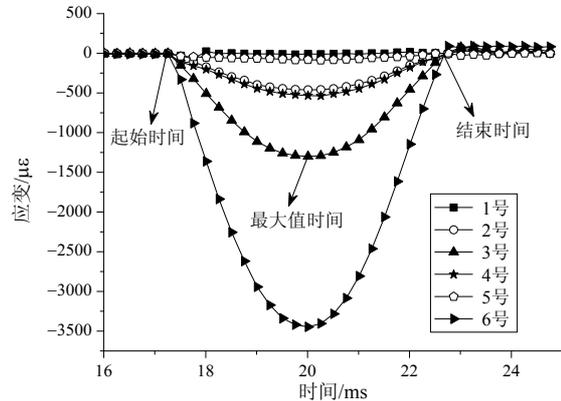


图 3 在 0.8J/mm 冲击能量下的应变响应

Fig.3 Strain response under impact energy of 0.8J/mm

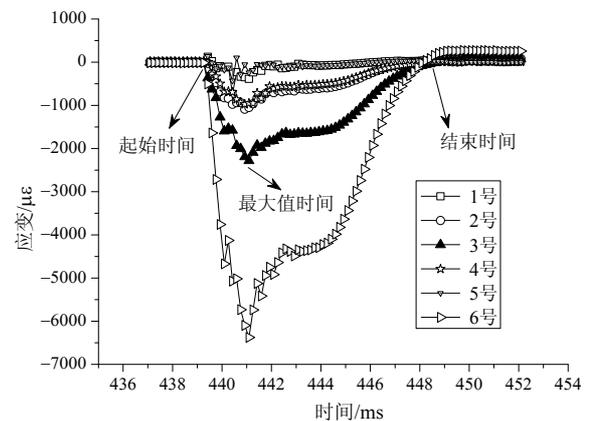


图 4 在 6.67J/mm 冲击能量下的应变响应

Fig.4 Strain response under impact energy of 6.67J/mm

### 2.2 冲击损伤识别指标

考虑这种损伤引起不对称的特点，提出的损伤识别指标如下：上升时间(冲击起始时间到应变响应达到最大值的时间长度)，下降时间(应变响应达到

最大值时间到冲击结束时间长度), 总时间(冲击起始时间到冲击结束时间长度), 上升时间比下降时间(上升时间长度与下降时间长度之比), 下降时间比上升时间(下降时间长度与上升时间长度之比), 见图3和图4。

进而提出基于应变响应的面积指标如下: 上升面积(起始时间到应变响应达到最大值时间范围内应变响应图面积), 下降面积(应变响应达到最大值时间到结束时间范围内应变响应图面积), 总面积(起始时间到结束时间范围内应变响应图面积), 上升面积与下降面积之比, 下降面积与上升面积之比, 如图3和图4所示。

总结上述, 在试验研究的基础上, 提出10个冲击损伤识别指标。下面, 应用提出的10个损伤识别指标进行冲击损伤是否发生、损伤大小以及损伤位置的识别研究。

### 2.3 损伤程度识别及10个冲击损伤识别指标的比较

针对3号传感器的测试结果, 应用这10个指标对试验数据进行分析, 得到如下结果。

图5给出了冲击上升时间、下降时间、总时间与冲击能量之间的关系。由此图可见, 大体上总时间及下降时间与冲击能量之间呈单调变化的趋势, 冲击能量增加, 损伤增加, 总时间及下降时间单调增加; 对于上升时间, 当冲击能量大于3J/mm时, 随冲击能量增加, 损伤程度增加, 上升时间呈单调下降的趋势。

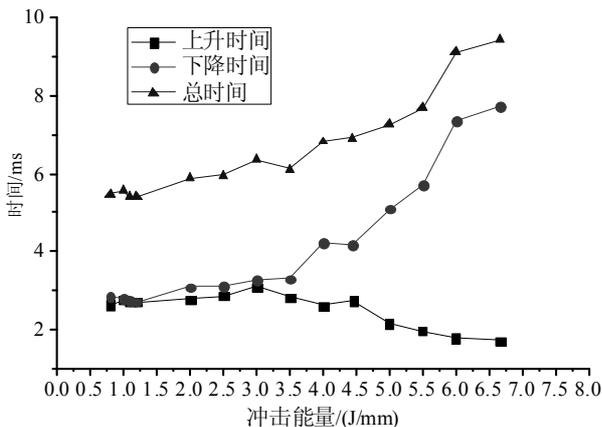


图5 冲击时间与冲击能量之间的关系

Fig.5 The relationship of impulse duration and impact energies

图6给出了冲击上升面积、下降面积、总面积与冲击能量之间的关系。由此图可见, 大体上总面积及下降面积与冲击能量之间呈单调变化的趋势, 冲击能量增加, 损伤增加, 总面积及下降面积绝对值单调增加; 对于上升面积, 当冲击能量大于

4.45J/mm时, 随冲击能量增加, 损伤程度增加, 上升面积绝对值呈单调下降的趋势。

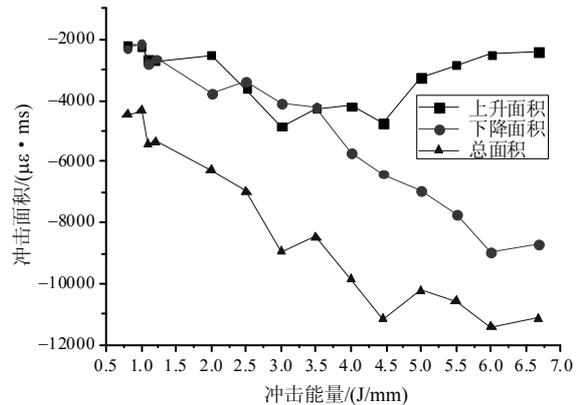


图6 冲击面积与冲击能量之间的关系

Fig.6 The relationship of impulse area and impact energies

总结图5和图6的试验结果, 可以发现, 总时间、下降时间、总面积及下降面积指标适合0.8J/mm到6.67J/mm的大范围的冲击损伤程度识别, 而上升时间适用于超过3J/mm的冲击损伤程度识别。上升面积适用于超过4.45J/mm的冲击损伤程度识别。

图7给出了冲击上升时间与下降时间之比、下降时间与上升时间之比、上升面积与下降面积之比、下降面积与上升面积之比与冲击能量之间的关系。由此图可见, 当冲击能量大于3.5J/mm时, 下降时间与上升时间之比和下降面积与上升面积之比与冲击能量之间大体上表现出单调关系, 即冲击能量增加, 损伤增加, 此两个比值指标单调增加。对于冲击上升时间与下降时间之比和上升面积与下降面积之比与, 当冲击能量大于3.5J/mm时, 此两个比值指标随冲击能量增加, 损伤程度增加而单调减少。因此, 此4个指标适用于比较大的冲击能量下(3.5J/mm到6.67J/mm冲击能量范围内)的损伤程度识别。

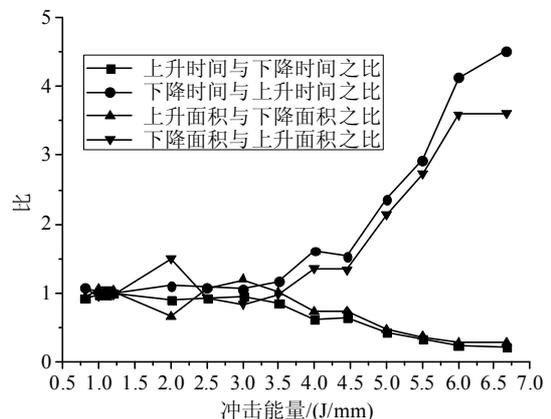


图7 比值指标与冲击能量之间的关系

Fig.7 The relationship of the ratio and impact energies

### 2.4 损伤位置识别

上面分析是针对 3 号传感器的结果,就冲击损伤程度识别进行了探讨。所提到的 10 个冲击损伤识别指标中,总时间、下降时间指标、总面积、下降面积指标的冲击损伤程度识别范围均为 0.8J/mm 到 6.67J/mm 的冲击能量范围。对于总时间、下降时间指标在此试验研究中只能识别冲击损伤的能量大小,而对于总面积、下降面积指标,其一方面可以识别冲击能量大小,另一方面也可以识别冲击的位置。基于这两个指标,图 8~图 9 给出了针对 1 号~5 号传感器的分析结果。

图 8 和图 9 分别给出了编号 1~5 传感器下降面积和总面积与冲击能量之间的关系。由此两图可见,相比之下,1 号和 5 号传感器的下降面积及总面积指标线竖标是最小的(绝对值);2 号和 4 号传感器的下降面积及总面积指标线竖标居中(绝对值),3 号传感器的下降面积及总面积指标线竖标是最大的(绝对值)。因此,可以判断冲击损伤位置距离 3 号传感器位置最近。这与实际冲击加载情况相符。故下降面积及总面积指标可以识别冲击损伤的位置。

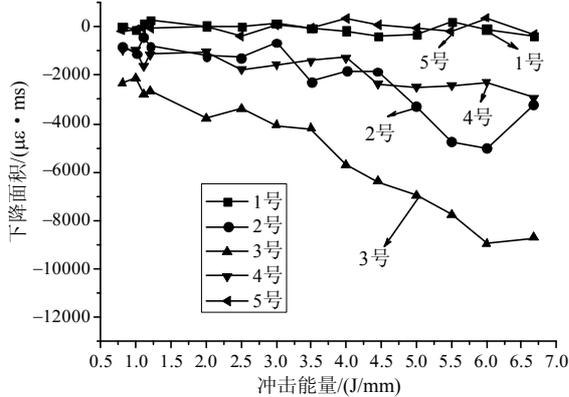


图 8 编号 1 到 5 传感器下降面积与冲击能量之间的关系  
Fig.8 The relationship of the descending area and impact energies

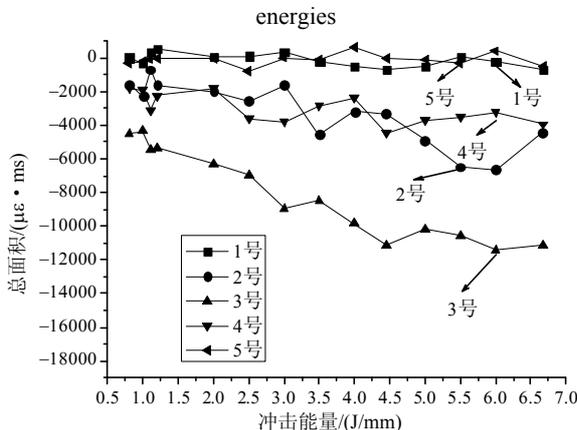


图 9 编号 1 到 5 传感器总面积与冲击能量之间的关系  
Fig.9 The relationship of the total area and impact energies

为了更加清楚下降面积与总面积指标识别冲击损伤位置的可行性,下面做出传感器的位置坐标与两个损伤指标的关系,如图 10 到图 11 所示。

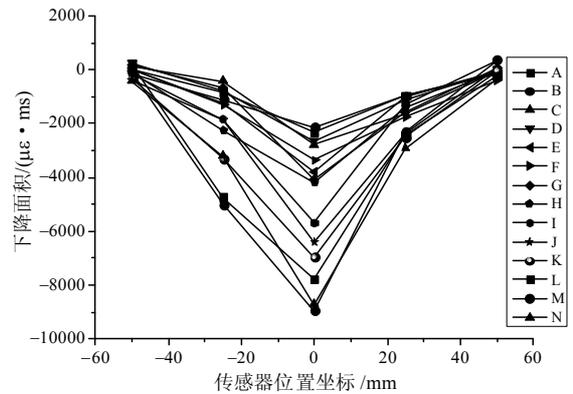


图 10 传感器位置坐标与下降面积之间的关系  
Fig.10 The relationship of the descending area and sensor location

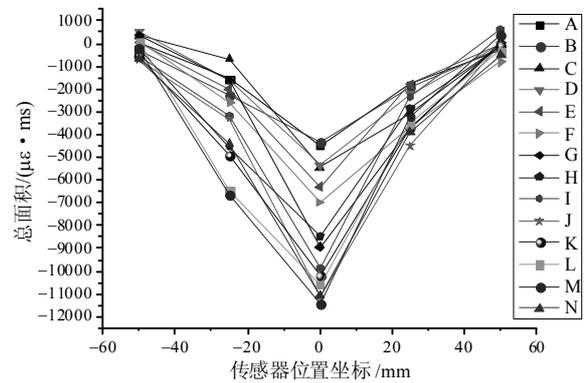


图 11 传感器位置坐标与总面积指标之间的关系  
Fig.11 The relationship of the total area and sensor location

图 10 和图 11 给出了 1 到 14 等级的冲击能量(依次对应 A 到 N)下,传感器的位置坐标与下降面积指标及总面积指标之间的关系。由此两图可见,距离冲击点越近,下降面积及总面积指标绝对值越大,而且 1 到 14 等级的冲击载荷下,这样的规律表现出一致性。据此,可以判断冲击损伤的位置离 3 号传感器最近,与试验的结果是一致的。结合文献[23]的冲击定位方法,用这两个指标可以计算得到冲击损伤发生的位置。当冲击能量比较小时,冲击后几乎没有损伤发生时(如损伤等级 1,与图 10、图 11 的 A 对应),这两个指标,结合文献[23]的冲击定位方法也可以计算得到该位置曾经受到过冲击载荷的作用。

### 3 结论

本文在试验研究的基础上,针对复合材料层合板,提出 10 个新的冲击损伤识别指标,对其进行

了比较研究。研究结果表明:

(1) 总时间、下降时间、总面积及下降面积指标适合 0.8J/mm 到 6.67J/mm 的大范围内的冲击损伤程度识别,而上升时间适用于超过 3J/mm 的冲击损伤程度识别。上升面积适用于超过 4.45J/mm 的冲击损伤程度识别。

(2) 冲击上升时间与下降时间之比、下降时间与上升时间之比、上升面积与下降面积之比、下降面积与上升面积之比适用于比较大的冲击能量下(3.5J/mm 到 6.67J/mm 冲击能量范围内)的损伤程度识别。

(3) 所提到的 10 个冲击损伤识别指标中,总时间、下降时间指标、总面积、下降面积指标的冲击损伤程度识别范围均为 0.8J/mm 到 6.67J/mm 的冲击能量范围。总时间、下降时间指标在此试验研究中只能识别冲击损伤的能量大小,而对于总面积、下降面积指标,其一方面可以识别冲击能量大小,另一方面也可以识别冲击的位置。

当前在结构损伤识别研究领域,识别方法大多是对结构设计损伤后,再施加激励,进而对结构进行测试和损伤识别分析得到损伤的程度和损伤位置。本文依据复合材料冲击受损的特点,提出的损伤识别方法是直接基于损伤过程中所测试得到的应变数据提取的指标,不同于额外施加激励的方法。由于本文是针对小试验件的研究结果,试验研究具有一定的局限性,下一步,将把提出的指标和方法应用于大的结构试验件,如飞机复合材料机翼结构或其他复合材料结构上进行研究。

#### 参考文献:

- [1] 程小全,寇长河,酆正能. 低速冲击后复合材料层合板的压缩破坏行为[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 115—119.  
Cheng Xiaoquan, Kou Changhe, Li Zhengneng. Compressive failure behavior of composite laminates after low velocity impact [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(1): 115—119. (in Chinese)
- [2] 程小全,酆正能. 复合材料层合板低速冲击后压缩的损伤累积模型[J]. 应用数学和力学, 2005, 26(5): 569—576.  
Cheng Xiaoquan, Li Zhengneng. Damage progressive model of compression of composite laminates after low velocity impact [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(5): 569—576. (in Chinese)
- [3] 程小全,吴学仁. 复合材料层合板低速冲击损伤容限的改进方法和影响因素[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(3): 20—25.  
Cheng Xiaoquan, Wu Xueren. Methods for improving damage tolerance of composite laminates after low velocity impact and their influence factors [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2002, 18(3): 20—25. (in Chinese)
- [4] 程小全,张子龙,吴学仁. 小尺寸试件层合板低速冲击后剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 8—12.  
Cheng Xiaoquan, Zhang Zilong, Wu Xueren. Post-impact compressive strength of small composite laminate specimens [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(6): 8—12. (in Chinese)
- [5] 林智育,许希武. 含冲击损伤复合材料加筋层板压缩剩余强度[J]. 航空学报, 2009, 30(1): 56—61.  
Lin Zhiyu, Xu Xiwu. Residual compressive strength of stiffened composite laminates with impact damage [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 56—61. (in Chinese)
- [6] Hanno Niemann, Joseph Morlier, Amir Shahdin, Yves Gourinat. Damage localization using experimental modal parameters and topology optimization [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24: 636—652.
- [7] 刘福林,闫维明,何浩祥,王卓. 基于Zernike矩的网壳结构的振型表征及损伤识别[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 1—9.  
Liu Fulin, Yan Weiming, He Haoxiang, Wang Zhuo. Mode shape characterization and damage detection in latticed shell structures based on Zernike moments [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 1—9. (in Chinese)
- [8] Grouve W J B, Warnet L L, de Boer A, Akkerman R, Vlekken J. Delamination detection with fibre Bragg gratings based on dynamic behavior [J]. Compos Sci Technol, 2008, 68(12): 2418—2424.
- [9] Curadelli R O, Riera J D, Ambrosini D, Amani M G. Damage detection by means of structural damping identification [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 3497—3504.
- [10] Pizhong Qiao, Maosen Cao. Waveform fractal dimension for mode shape-based damage identification of beam-type structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 5946—5961.
- [11] Maosen Cao, Pizhong Qiao. Novel Laplacian scheme and multiresolution modal curvatures for structural damage identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23: 1223—1242.
- [12] Manoj Kumar, Sheno R A, Cox S J. Experimental validation of modal strain energies based damage identification method for a composite sandwich beam [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 1635—1643.
- [13] Edwin Reynders, Guido De Roeck. A local flexibility method for vibration-based damage localization and quantification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010,

- 329: 2367—2383.
- [14] Maeck J, DeRoeck G. Dynamic bending and torsion stiffness derivation from modal curvatures and torsion rates [J]. *Journal of Sound and Vibration* 1999, 225: 153—170.
- [15] 王利恒, 周锡元, 阎维明. 用锤击试验反应最大值监测钢筋混凝土简支桥梁结构损伤程度的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(1): 90—94.  
Wang Liheng, Zhou Xiyuan, Yan Weiming. Experimental studies on monitoring reinforced concrete beams damage degree using responses maximums in impact excitation vibration tests [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(1): 90—94. (in Chinese)
- [16] Liheng Wang, Xiyuan Zhou, He Liu, Weiming Yan. Damage detection of RC beams based on experiment and analysis of nonlinear dynamic characteristics [J]. *Constructions and Building Materials*, 2012, 29: 420—427.
- [17] Ning Hu, Takahito Shimomukai, Cheng Yan, Hisao Fukunaga. Identification of delamination position in cross-ply laminated composite beams using S0 Lamb mode [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68: 1548—1554.
- [18] 党晓娟, 杨智春, 谭光辉, 王乐. 基于互相关函数幅值向量的复合材料层合板损伤的统计检测[J]. *工程力学*, 2009, 26(3): 218—223, 256.  
Dang Xiaojuan, Yang Zhichun, Tan Guanghui, Wang Le. Statistic detection for composite laminate damage by application of correlation function amplitude vector method [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(3): 218—223, 256. (in Chinese)
- [19] 于哲峰, 杨智春. 基于互相关函数幅值向量的结构损伤定位方法研究[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 77—80.  
Yu Zhefeng, Yang Zhichun. Structural damage detection with random excitation and correlation function amplitude vector [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(3): 77—80. (in Chinese)
- [20] 张慕宇, 杨智春, 王乐, 丁燕. 复合材料梁结构损伤定位的无参考点互相关分析方法[J]. *工程力学*, 2011, 28(11): 166—169.  
Zhang Muyu, Yang Zhichun, Wang Le, Ding Yan. Damage locating for composite beam structure by cross correlation analysis without reference node [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(11): 166—169. (in Chinese)
- [21] 郭杏林, 高海洋, 王盛辉. 一种基于频率响应曲率的损伤检测多步判定方法[J]. *工程力学*, 2012, 29(7): 56—62, 83.  
Guo Xinglin, Gao Haiyang, Wang Shenghui. A multi-step decision method for damage detection based on frequency response curvature [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(7): 56—62, 83. (in Chinese)
- [22] 侯吉林, 欧进萍, Lukasz Jankowski. 约束子结构损伤识别的时序方法研究与试验[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 129—135.  
Hou Jilin, Ou Jinping, Lukasz Jankowski. The experiment of substructure isolation and Identification using local time series [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 129—135. (in Chinese)
- [23] 王利恒. 复合层合板低速冲击应变测试及其状态监测[J]. *压电与声光*, 2012, 34(4): 509—514.  
Wang Liheng. Study on low-velocity impact strain measurement of composite laminate plate and its health monitoring using fiber bragg grating sensors [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, 34(4): 509—514. (in Chinese)