复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 4 期 8 月 2009 年
Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0191-06

含穿孔-多分层混合损伤平面编织层合板自振特性

王 轩*，李顶河，冯振宇，徐建新
（中国民航大学 航空工程学院，天津 300300）

摘 要： 研究了含穿孔-多分层损伤平面编织层合板的自振特性问题。首先建立含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤平面编织层合板自由振动分析有限元模型。然后通过典型算例，分别讨论了穿孔尺寸、分层尺寸以及穿孔-多分层损伤位置对平面编织层合板固有频率的影响。结果表明：当穿孔和分层的尺寸较小时，其对层合板固有频率的影响很小；横向穿孔-多分层损伤对层合板固有频率的影响较纵向穿孔-多分层损伤更显著；平面编织层合板固有频率对损伤位置最为敏感，分层尺寸次之，穿孔尺寸的影响最弱。

关键词： 穿孔-多分层；振动特性；平面编织层合板；有限元建模
中图分类号： TB330.1；V214.8 **文献标志码：** A

Free vibration characteristic of plain woven fabric laminates with multiple delaminations around a central hole

WANG Xuan*, LI Dinghe, FENG Zhenyu, XU Jianxin
(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The free vibration characteristic was studied for plain woven fabric laminates with multiple delaminations around a central hole. Finite elements analysis models were established by MSC. Nastran/Patran for plain woven fabric laminates with elliptical multiple delaminations around an elliptical central hole. From some typical examples, the effects of the holes' size, multiple delaminations' size and damage's location on the vibration characteristic were discussed. The results show that the effect of small-sized hole and delaminations is not great. On the natural frequencies, the effect of transverse elliptical multiple delaminations around an elliptical central hole is more serious than that of lengthways elliptical multiple delaminations around an elliptical central hole; the natural frequencies are very sensitive to damages location, and less sensitive to multiple delaminations' size and the holes' size.

Keywords: multiple delaminations around a hole; vibration characteristic; plain woven fabric laminates; finite element modeling

穿孔和分层是纤维增强复合材料层合结构的 2 种最常见损伤形式。复合材料层合结构在受到高速冲击时可能会出现穿孔损伤，在受到中低速冲击时可能会出现分层损伤。工程应用过程中，复合材料层合结构出现上述 2 种损伤的情况随处可见，损伤将不可避免地影响层合板的力学性能，减少结构的使用寿命。因此，研究穿孔及分层损伤对复合材料层合板力学性能的影响具有重要的实际工程意义。

已有很多文献[1-8]对含单分层或多分层损伤复合材料层合结构进行了深入研究。也有一些文献[9-13]对含孔损伤复合材料层合结构进行了多方面的研究。但复合材料层合结构在高速冲击作用下，实际的穿孔损伤周围还含有环形的分层损伤，如图 1 所示[14]。

Ju 等人[15]结合 Mindlin 层板理论，利用有限元方法，讨论了中心方形和圆形穿孔-分层混合损伤对复合材料层合板固有频率的影响，结果表明：在某些情况下，分层的存在对层合板固有频率的影响显著，但对层合板振型的影响甚微。Ashwini Kumar 等[16]基于高阶剪切变形理论研究了含穿孔-分层混合损伤层合板的振动问题，但该模型中只含有单个孔边分层，与实际的穿孔-分层损伤形式有

收稿日期： 2008-09-01；**收修改稿日期：** 2009-02-19
基金项目： 中国民航大学横向项目(KK6214)；中国民航大学科研基金(07KYM07)
通讯作者： 王 轩，助教，研究方向为复合材料结构设计与维修 E-mail：couragexuan@yahoo.com.cn

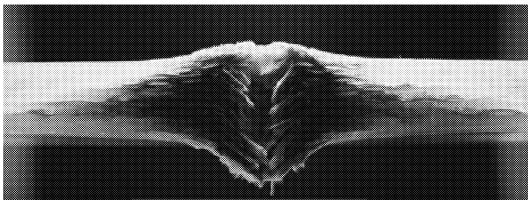

图 1　实际的穿孔损伤形式

Fig. 1　Modality of actual hole damage

一定差别。

本文中运用有限元分析软件 MSC. Nastran/Patran 研究了含穿孔-多分层损伤平面编织层合板的自振特性问题。首先，建立含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤平面编织层合板自由振动分析有限元模型。然后通过典型算例，分别讨论穿孔尺寸、分层尺寸以及穿孔-多分层损伤位置对平面编织层合板固有频率的影响。最后分析给出了含穿孔-多分层损伤平面编织层合板前 2 阶固有频率随穿孔尺寸、分层尺寸以及穿孔-多分层损伤位置的变化规律。研究结果对于平面编织层合结构的损伤容限设计和维修设计具有一定的参考价值。

1　含穿孔-多分层层合板有限元建模

图 2 给出了含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤层合板的剖面图。中间双竖线表示穿孔，中间横粗线表示穿孔周边的分层，共有 7 个分层，穿孔与各分层中心重合。穿孔损伤的尺寸在层合板的厚度方向上不变，而穿孔周边的分层区域自上而下是逐渐增大的。

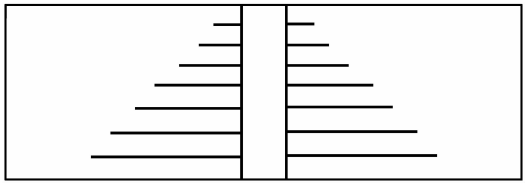

图 2　含穿孔-多分层损伤层合板剖面图

Fig. 2　Cutaway view of composite laminate with multiple delaminations around a hole

有限元模型采用 4 节点 Quad 单元对含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤平面编织层合板进行网格划分，如图 3 所示。

本文中分 2 种情况研究椭圆穿孔-椭圆多分层损伤对平面编织层合板固有频率的影响：(1) 椭圆穿孔和椭圆分层区域长轴与试件的板长方向垂直，

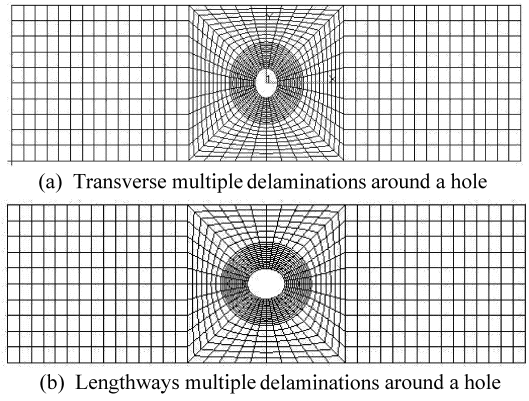

图 3　含穿孔-多分层损伤层合板有限元网格图

Fig. 3　FEA meshes of composite laminate with multiple delaminations around a hole

称之为横向椭圆穿孔-多分层，如图 3(a)所示；(2) 椭圆穿孔和椭圆分层区域长轴与试件的板长方向平行，称之为纵向椭圆穿孔-多分层，如图 3(b)所示。

椭圆穿孔-椭圆多分层损伤有限元模型的建立过程示意图如图 4 所示。

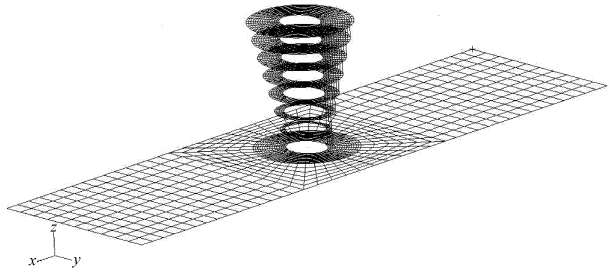

图 4　椭圆穿孔-椭圆多分层损伤有限元建模

Fig. 4　Finite element modeling of elliptical multiple delaminations around an elliptical hole

建模过程中，为了避免含分层损伤层合板自由振动分析过程中在上、下子板间出现不合理的嵌入现象，本文中引入三维间隙(GAP)单元。当在划分有限元网格时，将分层区域的上下子板划分成相同的网格，连接 x、y 坐标相同的上、下子板的节点 i、j，设置为 GAP 单元，如图 5 所示。

节点 i、j 可以接触，接触刚度的确定方法和变化规律详见参考文献[17]；节点 i、j 分离时，两节点间无刚度。

由于在分层前缘处分层区域的上下子板和基板的位移必须满足连续条件，本文中在分层前缘处上下子板和基板的节点采用刚性连接，如图 5 所示。

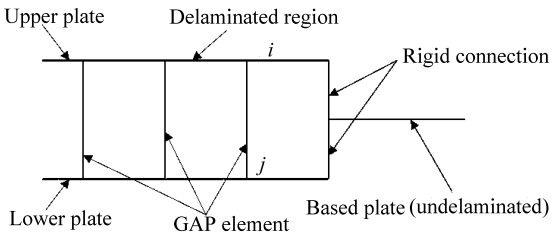

图 5　分层前缘区域

Fig. 5　Connecting boundary of delaminated and undelaminated regions

2　含穿孔-多分层层合板自由振动有限元分析

一般来说，有限元单元的动力学方程可以写成

$$[[\boldsymbol{K}^{e}]-\omega^{2}[\boldsymbol{M}^{e}]]\cdot|\boldsymbol{u}_{0}|=0 \tag{1}$$

式中：$[\boldsymbol{K}^{e}]$为单元的刚度矩阵；$[\boldsymbol{M}^{e}]$为单元的质量矩阵；$|\boldsymbol{u}_{0}|$为单元的位移向量。

将层合板所有单元刚度和质量矩阵组装起来就可以得到其动力学控制方程，即

$$[[\boldsymbol{K}]-\omega^{2}[\boldsymbol{M}]]\cdot|\boldsymbol{u}_{0G}|=0 \tag{2}$$

式中：$[\boldsymbol{K}]$为结构的刚度矩阵；$[\boldsymbol{M}]$为结构的质量矩阵；$|\boldsymbol{u}_{0G}|$为层合板的所有自由度。但在其由各单元的刚度矩阵和质量矩阵组装时，必须引入GAP单元和分层前缘处的位移连续条件。

因为$|\boldsymbol{u}_{0G}|$必不为零，所以

$$\det[[\boldsymbol{K}]-\omega^{2}[\boldsymbol{M}]]=0 \tag{3}$$

求解方程(3)就可得到复合材料层合板的各阶固有频率。

固有频率的计算结果采用如下无量纲化方法表示：

$$\omega=\omega_{1}/\omega_{0} \tag{4}$$

式中：ω 为含损伤层合板无量纲化之后的固有频率；ω_1 为含损伤层合板无量纲化之前的固有频率；ω_0 为无损伤层合板的固有频率。

3　算例及分析讨论

对单层材料为3234/G814的平面编织层合板进行自振特性研究，试件的几何尺寸为104 mm×341 mm，单层厚度为0.2125 mm，单层材料的力学参数见表1。其铺层方式为$[0/45/0/45]_S$。

试件板长方向一端固支，以横向穿孔-多分层和纵向穿孔-多分层2种形式来研究穿孔尺寸、分层尺寸和损伤位置对含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤平面编织层合板固有频率的影响。

表 1　3234/G814 材料特性

Table1　Properties of 3234/G814

Density/ (kg·m^{-3})	Elastic modulus/GPa			μ
	E_{11}	E_{22}	G_{12}	
1559.16	67.9	67.9	4.28	0.068

3.1　穿孔尺寸对固有频率的影响

穿孔损伤尺寸变化范围是：短轴 $2a=10\sim35$ mm，长轴 $2b=15\sim40$ mm。第1层分层损伤的长短轴比穿孔损伤的长短轴长5 mm。其他层的分层损伤长短轴随着层数增加而递增5 mm。图6给出了含横向和纵向椭圆穿孔-椭圆多分层混合损伤层合板1阶和2阶固有频率随穿孔尺寸(椭圆穿孔短轴)的变化曲线。

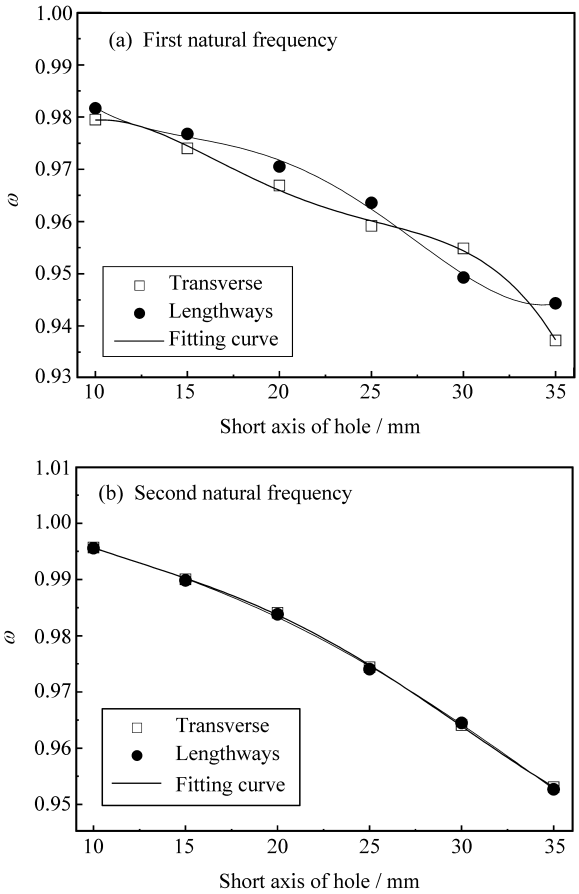

图 6　含横向和纵向穿孔-多分层损伤层合板前2阶固有频率随穿孔尺寸的变化曲线

Fig. 6　Effect of hole's size on the values of the first two modes for laminates with transverse and lengthways multiple delaminations around a hole

由图6可看出：(1) 对于前2阶固有频率，含横向穿孔-多分层混合损伤和纵向穿孔-多分层混合

损伤层合板固有频率都下降，这与文献[10]的结果相一致。(2) 对于 1 阶固有频率，随着穿孔尺寸的增加，含纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率变化速度先慢后快，而后再慢；而含横向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率变化速度先快后慢，而后再快。且横向穿孔-多分层混合损伤对层合板固有频率的影响较纵向穿孔-多分层混合损伤更显著。(3) 对于 2 阶固有频率，含纵向穿孔-多分层混合损伤和横向穿孔-多分层混合损伤层合板接近线性变化，且两者的变化速度相似。

3.2　分层尺寸对固有频率的影响

穿孔损伤尺寸($2a=10$ mm，$2b=15$ mm)保持不变，第 1 层分层损伤的尺寸变化范围：短轴 $2a=15\sim20$ mm，长轴 $2b=20\sim25$ mm，每次变化都增加 1 mm。随着层数的增加，其他层的分层损伤长短轴随着层数增加而递增 5 mm。图 7 给出了含横向和纵向椭圆穿孔-椭圆多分层混合损伤层合板 1 阶和 2 阶固有频率随分层尺寸(短轴)的变化曲线。

由图 7 可以看出：(1) 对于前 2 阶固有频率，含横向穿孔-多分层混合损伤和纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率都下降，这与文献[10]的结果相一致；(2) 对于 1 阶固有频率，随着分层尺寸的增加，含横向穿孔-多分层混合损伤和含纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率变化速度有所增加，且横向穿孔-多分层混合损伤对层合板固有频率的影响较纵向穿孔-多分层混合损伤更显著；(3) 对于 2 阶固有频率，随着分层尺寸的增加，含横向穿孔-多分层混合损伤和含纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率接近线性变化，且两者的变化速度相似。

3.3　损伤位置对固有频率的影响

穿孔损伤长短轴：短轴 $2a=10$ mm，长轴 $2b=15$ mm。第 1 层分层损伤的长短轴比穿孔损伤的长短轴长 5 mm。其他层的分层损伤长短轴随着层数增加而递增 5 mm。损伤位置的变化范围是 0.2～0.8，此处位置的含义是，损伤在试件板长方向实际位置 e 与试件长度 L 之比 e/L，$e=0$ 为试件固支端，如图 8 所示。

图 9 给出了含横向和纵向椭圆穿孔-椭圆多分层混合损伤层合板 1 阶和 2 阶固有频率随损伤位置的变化曲线。

由图 9 可看出：(1) 对于前 2 阶固有频率，含横向穿孔-多分层混合损伤和纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率都先下降后增加，这与文献[10]的结果相一致。(2) 对于 1 阶固有频率，随着损伤位置远离固支端，含横向穿孔-多分层混合损伤和含纵向穿孔-多分层混合损伤层合板固有频率

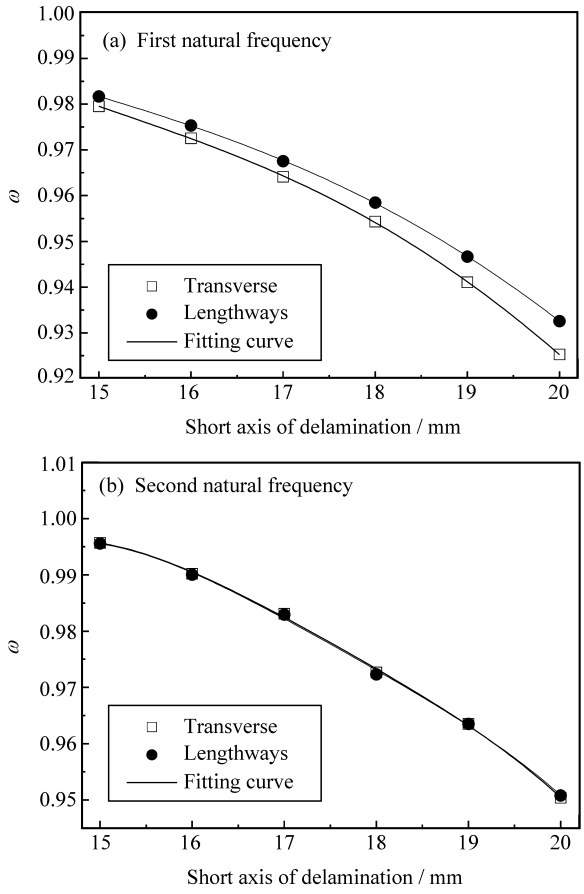

图 7　含横向和纵向穿孔-多分层损伤层合板前 2 阶固有频率随分层尺寸的变化曲线

Fig. 7　Effect of delaminations' size on the values of the first two modes for laminates with transverse and lengthways multiple delaminations around a hole

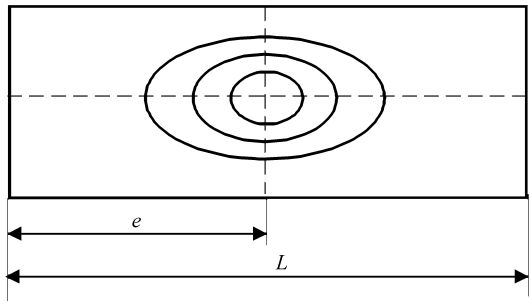

图 8　损伤位置示意图

Fig. 8　Location of damages

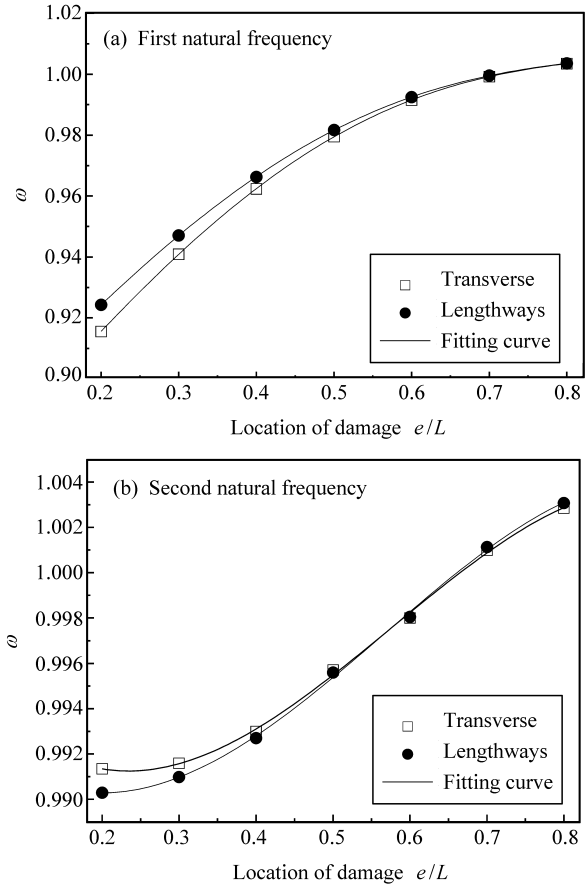

图 9　含横向和纵向穿孔-多分层损伤层合板前 2 阶固有频率随损伤位置的变化曲线

Fig. 9　Effect of delaminations' location on the values of the first two modes for laminates with transverse and lengthways multiple delaminations around a hole

均增加，且变化速度逐渐减小，且横向穿孔-多分层混合损伤对层合板固有频率的影响较之纵向穿孔-分层混合损伤更显著。在位置约为 0.6 以后，横向穿孔-多分层和纵向穿孔-多分层混合损伤位置对层合板固有频率的变化规律趋于一致。(3) 对于 2 阶固有频率，随着损伤位置远离固支端，固有频率增加，在位置 0.4 以前，纵向穿孔-多分层混合损伤较之横向穿孔-多分层混合损伤对层合板固有频率的影响更小，在位置 0.4 以后，横向穿孔-多分层和纵向穿孔-多分层混合损伤对层合板固有频率的变化规律趋于一致。

对于工程上最关心的基频，就穿孔尺寸、分层尺寸和损伤位置 3 个因素来说，平面编织层合板 1 阶固有频率对损伤位置最为敏感，分层尺寸次之，穿孔尺寸的影响最弱。

4　结　论

基于 MSC. Nastran/Patran，建立了含椭圆穿孔-椭圆多分层损伤平面编织层合板自由振动分析有限元模型。研究了穿孔尺寸、分层尺寸和损伤位置对含穿孔-多分层损伤平面编织层合板固有频率影响的问题。

(1) 当穿孔和分层的尺寸较小时，其对层合板固有频率的影响很小。

(2) 横向穿孔-多分层损伤对层合板固有频率的影响较纵向穿孔-多分层损伤更显著。

(3) 对于穿孔尺寸、分层尺寸和损伤位置 3 个因素，损伤位置对平面编织层合板固有频率的影响最强，分层尺寸次之，穿孔尺寸的影响最弱。

参考文献：

[1] Chattopadhyay A, Gu H. Delamination buckling and postbuckling of composite cylindrical shells [J]. AIAA Journal, 1996, 34(6): 1279-1286.

[2] Chattopadhyay A, Gu H. Elasticity based solutions for buckling of composite plates [J]. AIAA Journal, 1998, 36(8): 1529-1534.

[3] Gu H, Chattopadhyay A. An experimental investigation of delamination buckling and postbuckling of composite laminates [J]. Composite Science and Technology, 1999, 59(6): 903-910.

[4] Cho M, Kim J S. Higher-order zig-zag theory for laminated composites with multiple delaminations [J]. Journal of Applied Mechanics, 2001, 68(6): 869-877.

[5] Kim J S, Cho M. Buckling analysis for delaminated composites using plate bending elements based on higher-order zig-zag theory [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 55(11): 1323-1343.

[6] Kim H S, Zhou X, Chattopadhyay A. Interlaminate stress analysis of shell structures with piezoelectric patch including thermal loading [J]. AIAA Journal, 2002, 40(12): 2517-2525.

[7] Kim Heung Soo, Chattopadhyay Aditi, Ghoshal Anindya. Dynamic analysis of composite laminates with multiple delamination using improved layerwise theory [C] // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structural, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk: AIAA, 2003.

[8] 吉桂秀，李娇颜，陈浩然. 多分层对复合材料层合板自振特性的影响 [J]. 复合材料学报，2007，24(4)：161-165.
Ji Guixiu, Li Jiaoyan, Chen Haoran. Effect of multiple delaminations on free vibration characteristic for composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 161-165.

[9] Nagaya K. Simplified method for solving problems of vibrating

plates of doubly connected arbitrary shape Ⅱ: Applications and experiments [J]. Journal Sound Vibration, 1981, 74(4): 553-564.

[10] Lee H P, Im S P. Free vibration of isotropic and orthotropic square plates with square cutouts subjected to in-plane forces [J]. Computer and Structures, 1992, 43(3): 431-437.

[11] Sabir A B, Davies G T. Natural frequencies of plates with square holes when subjected to in-plane uniaxial, biaxial or shear loading [J]. Thin-Walled Structure, 1997, 29(3/4): 312-335.

[12] Rossi R E. Transverse vibrations of thin, orthotropic rectangular plates with rectangular cutouts with fixed boundaries [J]. Journal Sound Vibration, 1999, 221(4): 733-736.

[13] Chen C C, Kitiporanchai S, Lim C W, Liew K M. Free vibration of symmetrically laminated thick perforated plates [J]. Journal Sound Vibration, 2000, 230(1): 111-132.

[14] Shyr Tienwei, Pan Yuhao. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates [J]. Composite Structures, 2003, 62(2): 193-203.

[15] Ju F, Lee H P, Lee K H. Free vibration of composite plates with delamination around cutouts [J]. Composite Structures, 1995, 31(2): 177-183.

[16] Ashwini Kumar, Shrivastava R P. Free vibration of square laminates with delamination around a central cutout using HSDT [J]. Composite Structures, 2005, 70(3): 317-333.

[17] 洪　明. 分层损伤复合材料层合板振动与声特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.

(上接 118 页)

KEYWORDS FOR COMPOSITES

computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testing
optical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression moulding
consolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up (manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration (RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)