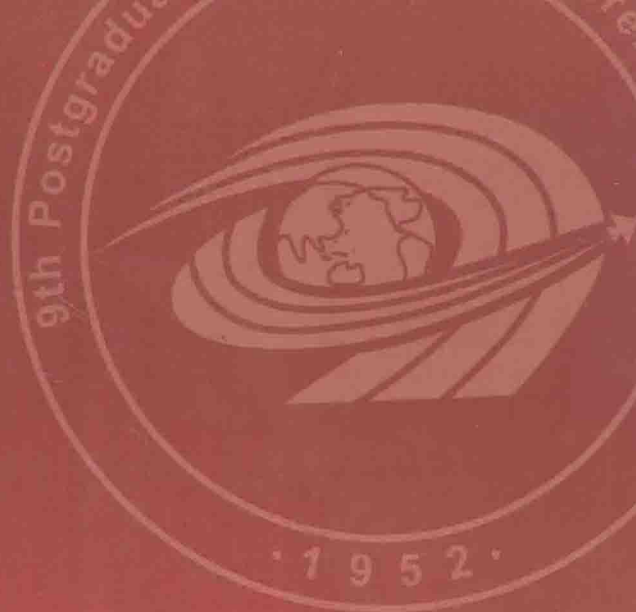




NANJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

南京航空航天大学



“**泉龙杯**” 南京航空航天大学

第**九**届研究生学术会议

9th Postgraduate Academic
Conference of NUAA

论文集

9th Postgraduate Academic Conference of NUAA

2007. 10 江苏 南京

主办单位：共青团南京航空航天大学委员会
南京航空航天大学研究生院
南京航空航天大学科协

赞助单位：中国一航611所

承办单位：南京航空航天大学研究生会



“梟龙杯”南京航空航天大学
第九届研究生学术会议

论 文 集

主办单位 共青团南京航空航天大学委员会
南京航空航天大学 研究生院
南京航空航天大学 科 协

赞助单位 中国一航611所

承办单位 南京航空航天大学研究生会

二〇〇七年十月 江苏·南京

树木参天

始于细嫩

祝第九届研究生

学不会成功

丁巳年

二〇〇八年十月

序

南京航空航天大学研究生学术会议肇始于 1999 年，以其鲜明的学术特色和严谨的学术风格赢得了校内外研究生的广泛参与和支持。在金秋十月秋风送爽，硕果累累丹桂飘香的季节里，南京航空航天大学第九届研究生学术会议又拉开了帷幕。

本届学术会议的召开恰逢党的十七大胜利召开和我校建校 55 周年校庆。会议高举自主创新的大旗，以“引领科技，创新思维”为主题，旨在营造浓厚的校园学术氛围，不断提高研究生的学术素养，增强研究生学术交流意识，培养良好的学术道德和科学精神。研究生学术会议自开办以来，得到了全校广大师生的密切关注和积极参与，会议期间组织的主会场、各学院分会场、博士论坛、“科创之星”评选、“科创之星”论坛以及其他合作院校的学术交流活动，已成为我校提高研究生学术水平，增进学术交流的重要平台，并在省内乃至全国具有了一定的影响。第九届研究生学术会议在继承往届传统的同时，着力扩大交流范围，提高学术质量。会议论文的质量持续提高，博士生投稿数量也稳步增长，共征集到稿件 775 篇，经 151 名评审老师认真、细致、严格地评审，收录论文 635 篇，从中遴选出 49 篇优秀论文，内容涉及工、管、理、经、文、法、哲、艺术等多个领域。

第九届研究生学术会议也特别得到了中国一航 611 所的大力支持和赞助，并冠名“枭龙杯”；同时也得到了南京理工大学研究生会等著名兄弟高校研究生会的鼎力合作，切实反映了我校研究生学术会议创新、开放、务实、多赢的办会精神。

为反映我校广大研究生的最新研究成果，我们选取了能够较好反映我校研究生较高学术水平和实用价值的学术论文结集成册，以期对大家的研究工作有参考和促进作用。由于作者和编者水平有限，疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

南京航空航天大学研究生会

二〇〇七年十月

目 录

航空宇航学院

复合材料层压板准静态横压的有限元分析	王仁鹏 (1)
倾斜出口合成射流激励器流场特性实验研究	李斌斌 (9)
肌质网钙离子泵蛋白的阳离子亲和性及电势分布	孙升 (16)
一种基于表面等离子体共振技术的自组装膜光纤生物传感器	胡耀明 (24)
不同实测胎压下柔性沥青路面的力学响应分析	黄庆泓 (29)
大弯度翼型翼根围框式连接受力特性分析	赵群 (33)

能源与动力学院

面向构件的航空发动机建模与仿真研究	姚祖明 (39)
双目视觉在路障识别及定位中的应用方法研究	张旻 (45)
不同条件下轿车空气动力学仿真	张海滨 (50)
发动机转速时间序列分形特征分析及应用	冯光烁 (56)

自动化学院

非均衡微观经济系统的信息融合控制	匡羽 (66)
基于 X 射线脉冲星的 GPS 卫星自主定轨研究	郑广楼 (74)

信息科学与技术学院

一种新的盲联合角度和频率估计方法	张胜男 (79)
基于 Contourlet 变换的彩色图像盲水印算法	谢静 (85)
时域积分方程隐式 MOT 算法基函数研究	唐煜 (91)
一种新的具有优异性能的低码流图像压缩方法	陈晓娟 (99)
机载 ISAR 舰船目标侧视图成像	叶旭 (105)
FFT 在 GPS 信号捕获中的应用	刘圣忠 (111)

机电学院

气动肌腱驱动的铰杆三级增力机构的设计与仿真	李红兵 (117)
表面蜂窝状微坑电解加工技术研究	邱勇 (121)
一个关于固结磨料抛光垫的材料去除速率模型	沈建良 (126)
深小孔电解加工工艺研究	刘燕 (133)
单层钎焊 CBN 砂轮磨削钛合金磨削力的试验研究	付建锋 (139)
开放式五轴弧焊机器人系统开发	周伟 (144)
航空类工装产品返修量预测方法研究	梁薇 (150)
非调质钢磨削强化残余应力场的仿真	龚圣来 (158)

材料科学与技术学院

316L 表面双辉复合镀渗 nano-SiO ₂ /Ni 基金层的研究	朱文慧 (165)
硅衬底上制备 ZnO 纳米晶薄膜的性能研究	李丹 (169)
垂直撞击于金属粉末基体表面的熔融液滴的铺展理论模型	张家宽 (175)
氮气氛围保温时间对双辉 Ti(CN) 渗镀层组织结构的影响	李莉平 (186)
低碳钢表面 Cr 涂层的机械合金化制备	黄真 (192)
White Light Emitting Mg _{0.1} Sr _{1.9} SiO ₄ :Eu ²⁺ phosphors	Zhao Xinran (198)
Frequency effects on the dielectric properties of AlN film	Song Xiufeng (204)

民航学院

基于 suffix tree 的网格环境下反垃圾邮件系统的研究	童军 (211)
一种基于尺度变换的转子信号小波自动消噪新方法	于明月 (217)
基于 Hough 变换的直线精确检测改进算法	朱为珏 (222)

经济与管理学院

基于 GM(1, 2) 的生产力与 GDP 时滞效应的关系研究	吴歆 (228)
试论航空公司的企业社会责任评价体系研究	张诚铭 (235)
南京科技人才流动的意愿研究	刘航 (242)
应用小世界网络研究知识活动的评述	李璐 (248)
绩效对大盘上市公司融资结构滞后影响的实证分析	李佳 (254)
外资银行进入对我国银行业效率影响的实证研究	杨慧兰 (260)
苏州、温州人均收入的协整分析与比较	薛俊宁 (266)
1104 工程金融机构客户端的需求分析与功能设计	洪艳 (275)

人文与社会科学学院

马克思的市民社会理论对构建和谐社会的启示	曹惠芬 (282)
论传统文化在社区建设中的地位和作用	张震 (286)
比例原则与合理性原则之比较	李巍 (292)
建立我国排污权交易法律制度的设想 ——从经济法理念与法经济学角度分析	朱彤彤 (296)

艺术学院

论音乐民族志中的“音乐文化区”分析方法	徐梦洁 (303)
---------------------------	-----------

复合材料层压板准静态横压的有限元分析

王仁鹏

(南京航空航天大学 航空宇航学院 中国 南京 邮政编码: 210016)

摘要: 采用基于应变描述的改进的 CHANG 失效准则与有限元方法, 对复合材料层压板在准静态压痕力作用下的破坏过程进行了渐进损伤分析, 在此基础上进一步预测了层压板的损伤阻抗。数值模拟通过商用有限元软件 ABAQUS/ UMAT 的用户子程序实现。数值模拟结果与实验数据吻合较好。本文的工作为复合材料层压板的损伤阻抗提供了一种有效的预测方法。

关键词: 复合材料层压板; 有限元; 渐进损伤分析; 损伤阻抗

引言

近20年来, 冲击后压缩性能(通常称为CAI)一直被用作复合材料抗冲击和损伤性能的统一表征。20世纪90年代初, Ilcewicz L B et al^[1]发现CAI并不足以用作复合材料抗冲击和损伤性能的统一表征。进一步研究后, Dost E F et al^[2,3]指出复合材料体系抗冲击损伤的能力(损伤阻抗)和复合材料体系的损伤容限是两个不同的物理概念, 损伤阻抗是指抵抗冲击事件的能力(或给定冲击力导致的损伤尺寸), 而损伤容限则是一定损伤状态对结构性能的影响(或对应给定损伤尺寸的强度值)。对于损伤阻抗, 文献[4]提出应用典型层压板和压头的最大接触力 $F_{\max}$ 来表征损伤阻抗性能。在美国ASTM专业委员会公布的ASTM D 6264-98(04)标准中, 又将接触力~位移曲线出现第一个拐点时的接触力作为表征损伤阻抗的重要参数, 称为损伤起始阻抗。目前所采用的低速落锤冲击试验方法比较复杂, 为了简化问题, 人们试图用准静态试验研究低速冲击损伤问题。文献[5]通过实验证明落锤冲击和静压痕(QSI)方法在冲击力相同的情况下产生的损伤基本上是相同的, 因此低速落锤冲击方法可以用静压痕(QSI)方法来替代。

在以往的低速冲击问题研究中, 主要关注的是冲击响应分析与损伤面积预测。而近期对静压痕问题的研究表明, 接触力~位移曲线上第一个卸载点对应的接触力(损伤起始接触力)与最大接触力是表征层压板损伤阻抗的两个重要指标。然而, 针对这两个指标的预测研究工作在文献中鲜见。因此, 本文基于失效准则与有限元方法, 对复合材料层压板在准静态压痕力作用下的破坏过程进行了渐进损伤分析, 并在此基础上对层压板的损伤阻抗进行了预测研究。本文的研究对飞机复合材料结构的设计选材工作具有一定的指导意义。

1 ABAQUS用户子程序二次开发基本原理

ABAQUS为了方便用户开发自己的本构模型, 采用FORTRAN语言接口方式, 提供了若干用户子程序(User Subroutines)^[6]。在ABAQUS提供的用户子程序中, 与开发用户材料本构模型直接相关的子程序是UMAT。按照ABAQUS二次开发的约定, 开发者需利用UMAT子程序定义其单元材料积分点Jacobian矩阵, 即材料本构关系的刚度系数矩阵

$$[D] = \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \epsilon} \quad (1)$$

ABAQUS采用增量加载技术与平衡迭代求解方法。如果ABAQUS在运行中发现用户子程序UMAT存在, 则ABAQUS将在每一个增量加载步开始时, 对每一个计算单元的材料积分点调用一次用户子程序UMAT, 并由用户程序代码计算刚度系数矩阵 $[D]$ 。然后ABAQUS形成刚度矩阵 $[D]$, 由此刚度矩阵 $[D]$ 和当前载荷增量 ΔR 求解位移增量 ΔU , 继而进行平衡校核。如果平衡校核不满足缺省或用户指定的误差, ABAQUS将进行平衡迭代, 直到认为收敛, 然后进入下一增量步的求解。因此, 在每一个载荷增量步中, ABAQUS将对每一次平衡迭代、对每一个用户定义材料单元、

每一个材料积分点都将调用一次UMAT子程序。

2 渐进损伤分析和刚度折减方法

复合材料层压板在横向集中载荷作用下的破坏模式主要有基体开裂、层间分层以及纤维断裂等。复合材料的损伤是一个渐进的过程，薄弱处的失效会引起载荷的重新分配，各种不同形式的损伤会造成复合材料层压板的刚度不断衰减，最后达到完全失效。考虑材料失效过程及失效后结构性能不断变化的分析方法称之为渐进损伤分析(Progressive failure analysis)。本文采用改进的 Chang 失效准则进行渐进损伤分析^[7]。

纤维拉伸失效：($\sigma_{11} \geq 0$)

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^2}{S_f^2} \right) + \left(\frac{\tau_{13}^2}{S_f^2} \right) \geq 1 \quad (2)$$

纤维压缩失效：($\sigma_{11} < 0$)

$$e_f^2 = -\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right) \geq 1 \quad (3)$$

基体拉伸失效：($\sigma_{22} \geq 0$)

$$e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{m23}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

基体压缩失效：($\sigma_{22} < 0$)

$$e_m^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{-\sigma_{22}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{Y_C^2 \sigma_{22}}{4 S_{12}^2 Y_C} \right) - \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C} \right) + \left(\frac{-\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

分层：($\sigma_{33} \geq 0$)

$$e_l^2 = \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_r} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{l23}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{31}}{S_{31}} \right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

其中，层压板内部出现损伤后，局部损伤区域的应力分布变化很剧烈，采用基于应力描述的失效准则进行损伤判定比较困难。应变在复合材料结构发生损伤前后保持连续，变化比较平滑，因此更适合被用来作为复合材料结构中损伤演化的准则^[8]。通过使用一维情况下应力和应变的表达式，可以将基于应力描述的失效准则转换为基于应变描述的失效准则：

$$\begin{cases} \sigma_{11} = E_{11} \varepsilon_{11}, \sigma_{22} = E_{22} \varepsilon_{22}, \sigma_{33} = E_{33} \varepsilon_{33} \\ \tau_{12} = G_{12} \gamma_{12}, \tau_{13} = G_{13} \gamma_{13}, \tau_{23} = G_{23} \gamma_{23} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_T = E_{11} X_T^e, X_C = E_{11} X_C^e, Y_T = E_{22} Y_T^e, Y_C = E_{11} X_C^e \\ Z_r = E_{33} Z_r^e, S_{12} = G_{12} S_{12}^e, S_{31} = G_{31} S_{31}^e, S_{m23} = G_{23} S_{m23}^e, \\ S_{l23} = G_{23} S_{l23}^e, S_f = G_{13} S_f^e \end{cases}$$

式中： X_T 和 X_C 分别为纤维纵向拉伸和压缩强度； Y_T 和 Y_C 分别为基体横向拉伸和压缩强度； S_{ij} ($i \neq j$) 为剪切强度；带有上标 e 的量表示对应于应力强度时的应变。于是推导出基于应变描述的失效准则如下：

(1) 基于应变描述的纤维失效模式

纤维拉伸失效: ($\varepsilon_{11} \geq 0$)

$$e_f^2 = \left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_T^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{12}}{S_f^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{S_f^\varepsilon} \right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

纤维压缩失效: ($\varepsilon_{11} < 0$)

$$e_f^2 = -\left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_C^\varepsilon} \right) \geq 1 \quad (8)$$

(2) 基于应变描述的基体失效模式

基体拉伸失效: ($\varepsilon_{22} \geq 0$)

$$e_m^2 = \left(\frac{\varepsilon_{22}}{Y_T^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{12}}{S_{12}^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{S_{m23}^\varepsilon} \right)^2 \geq 1 \quad (9)$$

基体压缩失效: ($\varepsilon_{22} < 0$),

$$e_m^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{-\varepsilon_{22}}{S_{12}^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{Y_C^{\varepsilon^2} \varepsilon_{22}}{4 S_{12}^{\varepsilon^2} Y_C^\varepsilon} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{22}}{Y_C^\varepsilon} \right) + \left(\frac{-\gamma_{12}}{S_{12}^\varepsilon} \right)^2 \geq 1 \quad (10)$$

(3) 基于应变描述的分层失效: ($\varepsilon_{33} \geq 0$)

$$e_l^2 = \left(\frac{\varepsilon_{33}}{Z_r^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{S_{l23}^\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{31}}{S_{31}^\varepsilon} \right)^2 \geq 1 \quad (11)$$

本文与文献[7]的应力更新策略不同, 根据文献[9], 引入失效变量(d_i ; $i = f, m, l$)来表征材料的纤维、基体、分层损伤程度。这些损伤变量的定义域为[0, 1], 当 $d = 0$ 时, 表示没有损伤产生; 当 $d = 1$ 时, 表示材料完全失效。当材料内部有损伤存在时, 即 $d_i > 0$, 此时发生损伤的局部区域的材料性能参数(如弹性模量, 剪切模量等) 将会下降, 表示为:

$$d_i = 1 - \frac{k_1}{e_i} e^{-k_2 e_i}, e_i \geq 1, (i = f, m, l) \quad (12)$$

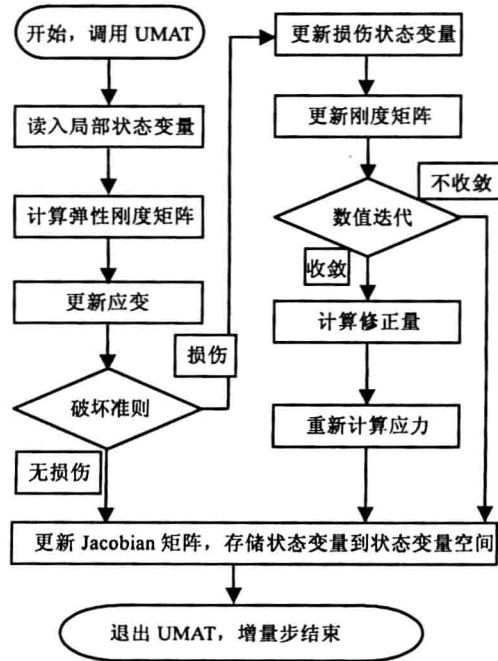
其中: k_1, k_2 对应于不同破坏模式有不同的表达式。在满足相应的强度准则后, 材料性能将根据不同情况分别进行有限刚度折减。具体的折减方法参照文[10,11]。折减后柔度矩阵变为:

$$[C]_d = [R][C] \quad (13)$$

损伤作用算子[R]为 6 阶对角阵, 其对角元素为:

$$\begin{aligned} R_{11} &= (1 - d_f)^{-1} \\ R_{22} &= (1 - d_m)^{-1} (1 - d_f)^{-1} \\ R_{33} &= (1 - d_l)^{-1} (1 - d_f)^{-1} \\ R_{44} &= (1 - d_m)^{-1} (1 - d_f)^{-1} \\ R_{55} &= (1 - d_l)^{-1} (1 - d_f)^{-1} \\ R_{66} &= (1 - d_l)^{-1} (1 - d_f)^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

根据以上算法, UMAT 主程序的流程图为:



3 算例

3.1 实验简介

实验采用直径为 12.7mm 的球面刚性压头垂直于试件平面方向加载位移, 装配图如图 1 所示。层压板材料为 T300/NY9200Z, 其基本性能如表 1 所示, 铺层数为 32 层, 铺层顺序为 $[45/0/-45/90]_{4s}$, 厚度为 3.7mm。试样共有三组, 其尺寸分别为 150mm×150mm、75mm×75mm 和 150mm×100mm。对应的支撑条件分别为 $\phi 125\text{mm}$ 圆孔简支、 $\phi 75\text{mm}$ 圆孔简支, 125mm×75mm 矩形孔固支。

表 1 T300/NY9200Z 复合材料基本性能

E_1 137GPa	G_{12} 5.3GPa	ν_{12} 0.312
E_2 9.4GPa	G_{23} 3.6GPa	ν_{23} 0.3
E_3 9.4GPa	G_{13} 5.3GPa	ν_{13} 0.312
X_T 1747MPa	X_C 1357MPa	S_{31} 89MPa
Y_T 67MPa	S_f 124MPa	S_{l23} 95MPa
Y_C 170MPa	S_{m23} 124MPa	S_{12} 89MPa

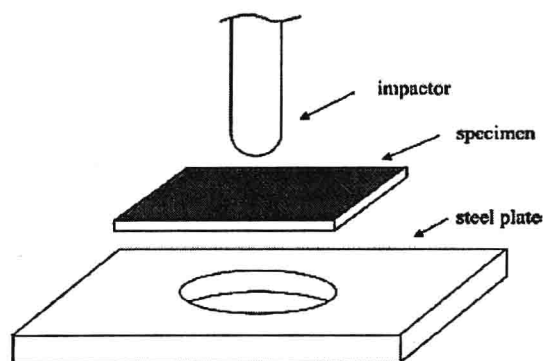


图 1 试件的装配图

3.2 数值分析模型

尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 试件的有限元模型如图 2 所示, 采用了全尺寸模型, 其它两种实验条件的模型与此类似。考虑到计算效率的问题, 将原来的 $[45/0/-45/90]_{4s}$ 铺层顺序, 简化为 $[45_4/0_4/-45_4/90_4]_s$, 以便减少厚度方向的单元数。由于破坏主要集中在板中心附近, 所以必须对中心处的单元细化, 中心处的最小单元尺寸为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm} \times 0.462\text{mm}$, 厚度方向共有 8 层单元, 整个板的单元总数为 5192 个。采用 C3D8R 三维 8 节点缩减积分体单元, 以便减少计算量并避免剪力自锁。由于压头和支持夹具的材料为钢, 所以二者都被定义为刚体以减少计算量。按照具体的实验情况, 在压头上端加载强制位移载荷。

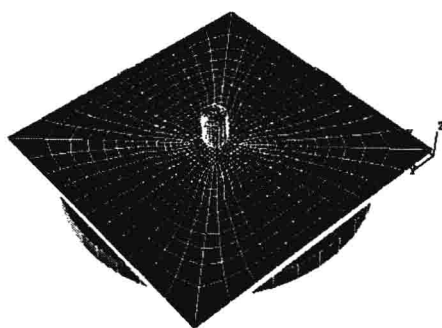


图 2 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 板的有限元模型

3.3 数值结果和实验结果的对比

图 3、4、5 分别为接触力~位移曲线的实验与有限元结果的比较。对于三种情况, 有限元结果与实验测量曲线吻合较好。有限元分析基本上能够反映接触力~位移曲线的主要特征, 即曲线的第一个卸载点与最高点。已有的实验研究已经指出, 曲线的第一个卸载点并不代表损伤起始点, 而是对应于较大的损伤情况, 此时不仅出现了较明显的基体裂纹, 而且包括小的分层损伤。本文的有限元损伤分析结果表明, 在分层出现以前, 曲线基本上保持直线变化, 基体裂纹对曲线几乎没有影响; 层间分层发生后, 由于单元刚度的明显衰减, 发生了第一次卸载, 这一预测机理与实验结果相吻合。此外, 热揭层实验结果表明, 表 2 给出了损伤阻抗的预测值与测量数据的平均值。分层起始载荷和最大接触力预测值与实验值相比有一定误差。三组试件分层起始载荷的预测值和实验值分别相差 3.82%、2.2%、5.73%。三组试件最大接触力的预测值和实验值分别相差 3.2%、12.5%、4.13%。产生误差的原因可能是由于对模型的简化造成的。总的来说, 本文的数值模型可以较好预测层压板的损伤阻抗。

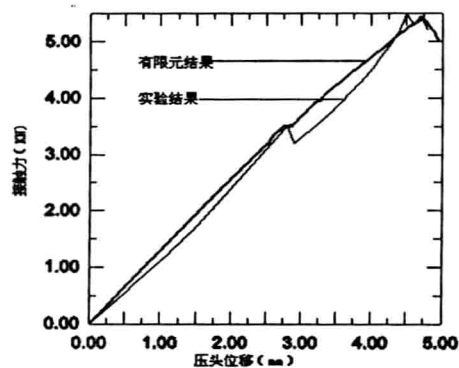


图 3 $\phi 125\text{mm}$ 圆孔简支条件下的位移~接触力曲线的有限元结果与试验值的比较

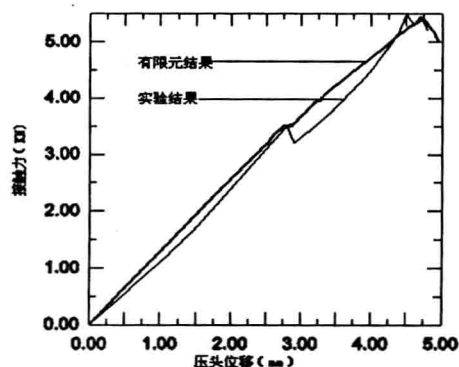


图 3 $\phi 125\text{mm}$ 圆孔简支条件下的位移~接触力曲线的有限元结果与试验值的比较

表 2 数值结果和实验结果的平均值对比

支持条件	方法	分层起始 接触力 (KN)	最大接触 力(KN)
$\phi 125$	实验	3.27	5.47
	数值	3.40	5.30
$\phi 75$	实验	3.29	5.74
	数值	3.22	5.10
125×75	实验	3.32	6.05
	数值	3.14	5.81

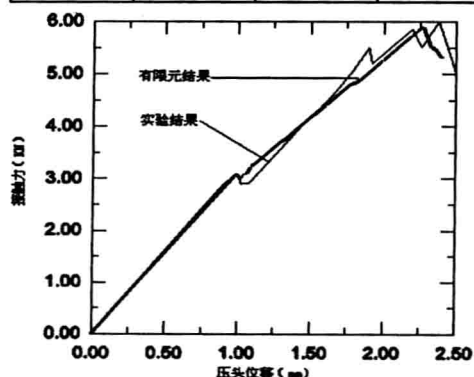


图 5 125mm×75mm 矩形孔固支条件下的位移~接触力曲线有限元结果与试验值的比较

3.4 实验分层结果和理论预测的对比

通过实验分析,接触力在达到最大接触力之前,试样内部所发生的破坏形式主要以基体破坏和分层为主,几乎没有发生纤维断裂。根据实验结果分析,这两种损伤模式是相关的,只要相邻层之间发生分层,该界面相邻的层就会发生基体的横向开裂。大多数情况下分层的形状为扇形状。并且该分层形状的主轴是与两相邻层中的下一层的纤维方向是一致的。如图6所示,对比数值模拟结果和热揭层照片的结果发现二者形状大小都比较接近,说明本数值模型可以较好的预测分层形状和大小。

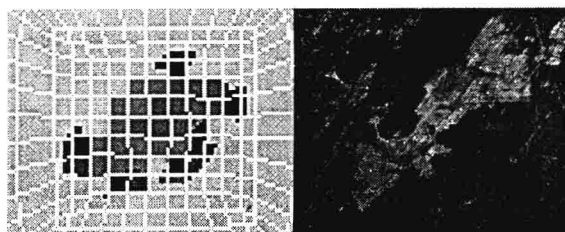


图6 0/45° 层间分层情况对比

4 结论

本文利用商用有限元软件 ABAQUS 中的用户子程序(UMAT)实现了层压板准静态压缩载荷下破坏过程的渐进损伤分析,经过和实验结果的对比。证明所使用的计算模型是有效的。对于层压板的损伤阻抗分析有较好的理论和实用价值,能够为实验提供很好的理论预测。

参考文献

- [1] Ilcewicz, L B, Dost, E F, Coggeshall, R L, A Model for Compression after Impact Strength Evaluation. Proc. of 21st International SAMPE Technical Conference. pp130-140. 1989
- [2] Dost, E F, Avery, W B, Finn, L B, Ilcewicz, L B, Scholz, D B, Wishart, R E. Impact Damage Resistance of Composite Fuselage Structure, Part 3. Paper Presented at Fourth ACT Conference, 1993
- [3] 美国国家研究委员会, New Materials for Next-Generation Commercial Transport. Washington, D.C.: National Academy Press. 1996
- [4] 沈真, 张子龙, 王进, 杨胜春, 叶林. 复合材料损伤阻抗和损伤容限的性能表征[J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 140-145
- [5] Sun CT, Potti SV. A simple model to predict residual velocities of thick composite laminates subjected to high velocity impact. Int J ImpEngg 1996;18(3):339 - 53.
- [6] 庄茁等译. ABAQUS非线性有限元分析与实例. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] Hou J P, Petrinic N, Ruiz C, Hallett S R. Prediction of impact damage in composite plates [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 273~281.
- [8] Huang Chien Hua, Lee Ya J ung. Experiment s and simulation of the static contact crush of composite laminated plates [J]. Composite Structures, 2003, 61(3): 265 - 270.
- [9] Linde, P., J. Pleitner, H. De Boer, and C. Carmone, "Modelling and Simulation of Fiber Metal Laminates," ABAQUS Users' Conference, 2004.
- [10] Matzenmiller A, Lublinear J, Taylor RL. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites[J]. Mechanics of Materials 1995;20:125 - 52.
- [11] 张彦, 来新民, 朱平, 梁新华. 复合材料铺层板低速冲击作用下损伤的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1348- 1353.

Finite Element Analysis of Composite Laminates subject to Quasi-Static Transverse Compressive Loading

Wang Renpeng

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Progressive damage analysis was conducted for composite laminates under Quasi-Static transverse compressive loading by using a modified strain-based CHANG failure criterion and finite element method. Furthermore, the damage resistance was predicted. Numerical analysis is implemented into a commercial finite element code, ABAQUS/ standard, via its user subroutine UMAT. The numerical results agree well with the experimental results. The present study provides an effective method for predicting the damage resistance of composite laminates.

Key words: composite laminates; finite element; progressive failure analysis; damage resistance

倾斜出口合成射流激励器流场特性实验研究

李斌斌

(南京航空航天大学空气动力学系 南京 210016)

摘要: 合成射流是基于旋涡运动的零质量射流,是近10年来研究最活跃的流动主动控制技术之一。应用非接触粒子图像激光测速技术(PIV)对阵列式斜出口附近的非定常流场特性进行了测试,得到激振周期内不同相位的瞬态和时均流动结构。研究表明,斜出口激励器具有对周围气流进行增强掺混和横向输运的特征,非常有利于进行边界层分离流动控制。

关键词: 合成射流, 粒子图像激光测速技术, 流动控制

中图分类号: **** 文献标识码: A

1 引言

合成射流(Synthetic jet)是一种基于旋涡运动的零质量射流。由于不需要气源,在应用于流动控制时,具有其独特的流动特性和工作特点。合成射流激励器输入能量少,可以阵列式灵活布置,非常适合在旋翼和机翼上进行分离流动控制,以及控制和抑制大攻角细长前体非对称流动。可显著增强飞行器的机动性、操纵性,增加飞行航程。应用合成射流激励器来部分代替飞行器的控制面,可避免使用复杂而笨重的控制系统,从而显著的减轻重量和简化控制。由于没有控制面的偏转,还可以避免增加雷达反射面积,从而提高飞行器的隐身性能。由于它在流动控制方面潜在的广阔应用前景,得到流体工作者相当多的关注^[1~6],并很快成为此领域近10年来最热门的研究课题之一。

合成射流技术作为一种全新的流动主动控制方法是20世纪90年代发展起来的,该技术一经提出就得到国内外学者的广泛关注。近年来许多学者就合成射流在气动控制、流动分离、增强掺混等方面的应用进行了实验研究,取得了许多令人鼓舞的成果^[6~7]。本文是在合成射流研究的基础上,借助于PIV系统,结合相位锁定技术测量了合成射流不同相位的瞬时流场,显示了周期内涡对融合的过程。分析了激励器出口数目对合成射流横流输运的影响特性,为其在流场主动控制方面的应用奠定了基础。

2 实验设备与测试方法

2.1 合成射流激励器

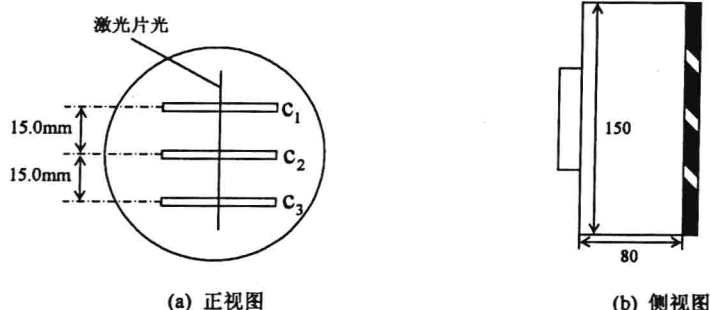


图1 合成射流激励器

合成射流激励器如图 1，主体为一个玻璃制成的振动腔，在其一侧装有扬声器，在正对扬声器的外表面一侧开有窄缝供气流入。驱动信号由信号发生器产生正弦波波形，经功率放大器放大，输出驱动信号来驱动扬声器振动膜进行往复运动。调节驱动信号的频率，在某一特定频率下，可在出口处产生较强的合成射流。扬声器规格为 40HM, 40W, 外径为 125mm。激励器振动腔长宽高分别为：150mm×150mm×80mm，射流出口为矩形，尺寸为 60mm×5mm。

2.2 平均流场测试系统

射流激励器出口附近的平均流速采用外径为 1 毫米的微型总压管测量。测得压力经微压变送器转化为模拟电压值输出。合成射流激励器和测试系统框图见图 2。多通道微压变送器的量程为 2kPa、精度为 0.3%F.S，适合低速压的测试要求。实验中总压探针的位置通过 TSI 二维坐标系统进行操控。

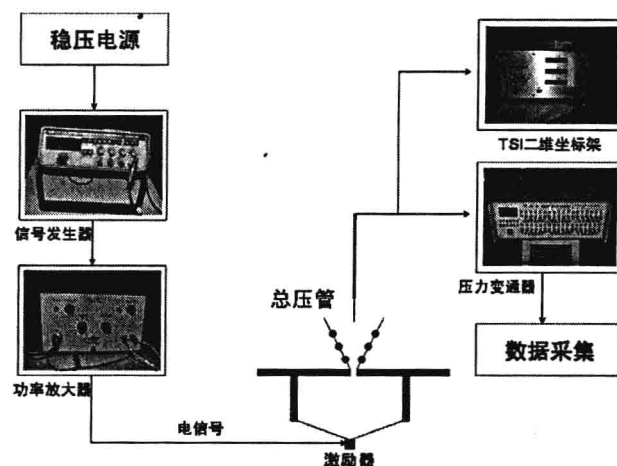


图2 总压管-压力变送器测速法系统

2.3 PIV测试系统

合成射流激励器出口附近的流场具有高度的非定常和周期性的特点，单点流速测试技术不能反映瞬态的流场结构。而粒子图像激光测速仪（PIV）可以定量的得到瞬态全流场结构，是研究合成射流的理想测试技术。试验研究所使用的美国 TSI 公司 PIV 系统包括：1) 双脉冲 Nd: YAG 激光器：最大输出功率为 50mJ/Pulse，脉冲激光波长为 532nm，脉冲持续时间为 10ns，双脉冲激光重复频率为 15Hz。2) 片光光学组件，将脉冲激光束变为有一定扩散角的片光，并使在所测的流场区域片光厚度小于 1mm。3) PIVCAM10-30 型互相关 CCD 数字相机，分辨率为 1016×1008Pixel。4) 同步器：由计算机控制的同步器控制双脉冲激光和 CCD 工作时序。

操作系统由计算机、高速图像采集卡、PIV 分析软件 Insight NT 构成，进行图像采集、处理、流场定量显示，并通过 RS-232 接口控制同步器的外触发时序。其测试系统实验框图如图 5。示踪粒子的播放密度、均匀性、粒子粒径的大小直接决定着测量结果。示踪粒子选用了香燃烧产生的烟作示踪粒子，烟粒子浓度比较容易调节，可以满足测量需要。



图3 合成射流 PIV 实验测试装置

2 实验结果与分析

2.1 斜出口共振频率测定

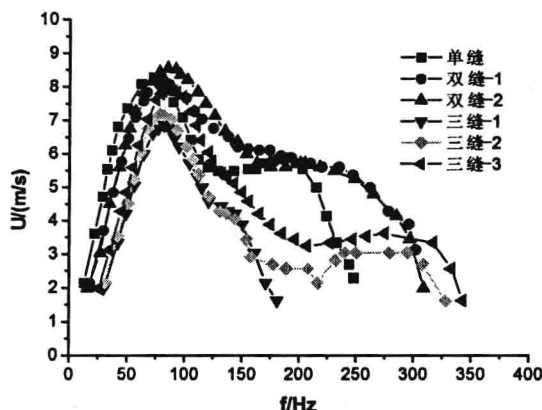


图4 合成射流最大速度值随频率变化特性($s=15\text{mm}$)

由图4可以得出从频率值为10Hz开始,随着频率值的增大,射流的最大速度值也随之增大,并在80Hz处达到最大,随着频率值的继续增加,最大速度值开始很快减小。即合成射流激励器产生的最大射流速度具有频率选择特性。三缝倾斜出口与双缝倾斜双出口和单缝倾斜出口相比,合成射流出口速度峰值降低,但出口数目的变化对共振频率影响不大。

2.2 斜出口合成射流流场特性

为了研究阵列式斜出口合成射流的流场特性,首先对倾斜单出口的合成射流进行了实验研究,以获得合成射流本身特性及流场特征,为阵列式合成射流组的研究奠定基础和经验。

图5给出了与壁面夹角 $\theta=60^\circ$ 斜出口情况下,激励周期内不同相位的6幅具有典型流场特征的涡量分布图。在激励周期内激励器合成射流可分为两个阶段:

1) 喷出段($t/T=0\sim0.45$): 在($t/T=0\sim0.23$),激励器共振腔内的气体被向外加速喷出并沿喷口方向呈放射状离开出口向外运动。喷出射流在激励器出口边缘处发生分离,在出口外形成一个旋涡对向下游运动。与常规垂直出口的合成射流激励器不同,该旋涡虽然也是成对出现,不过形成的涡对左右不对称。出口右侧近壁面的涡比另一侧弱。在左右两侧的涡之间相互作用以及它们和壁面的共同作用下,左侧的集中涡也很快发生了破碎。其涡结构逐渐消失,旋涡对变得模糊不清,最终演化为湍流流动,宏观流体运动方向为向右上方。在($t/T=0.23\sim0.45$)阶段,激励器出口处射流速度变小,而已经离开激励器出口一定距离的气体继续向外运动。不过由于扬声器的振动膜已经