复合材料学报 第17卷 第2期 5月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 17 No. 2 May 2000

文章编号: 1000-3851(2000)02-0070-04

# 具有分层损伤复合材料加筋与无加筋层合板热-机械力屈曲性态

陈浩然, 尹向勇, 刘相斌
(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 基于复合材料一维剪切理论——Mindlin 理论,给出了材料性质与温度有关的含分层损伤复合材料加筋和无加筋层合板的线性和非线性热-机械力耦合情况下的屈曲问题有限元分析方法,并研究了含分层损伤的加筋和无加筋层合板的两种不同类型的热-机械力屈曲问题。通过典型算例分析,讨论了热-机械力耦合效应和分层大小对含分层损伤结构的屈曲性态的影响关系。

关键词: 热-机械力耦合; 复合材料; 加筋、无加筋层合板; 分层损伤; 线性和非线性热屈曲性态
中图分类号: TB330.1; O242.21 文献标识码: A

## THERMAL-MECHANICAL BUCKLING BEHAVIOR OF STIFFENED AND NON-STIFFENED COMPOSITE LAMINATED PLATES WITH DELAMINATION DAMAGE

CHEN Hao-ran, YIN Xiang-yong, LIU Xiang-bin
(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: On the basis of Mindlin first order shear effect plate theory, a linear and nonlinear finite element stability analysis method of the stiffened and non-stiffened laminate plates with delamination damage under thermal and mechanical combined loading is established. The temperature dependent thermal and mechanical properties of the composites are considered. Two kinds of different thermal-mechanical coupling problems have been studied. The numerical results of some typical examples are given. From numerical analysis for some typical examples, the coupling effects of the thermal-mechanical loads, different delamination sizes and areas on buckling behavior of the stiffened and non-stiffened plates are discussed. The numerical method and conclusions provided in the paper are useful for engineers of composite structures.

Key words: thermal-mechanical coupling effect; composites; stiffened and non-stiffened plates; delamination damage; linear and nonlinear buckling behavior

复合材料层合结构在制造和使用过程中,由于受外来物的冲击,在层合结构内部出现分层损伤。这种含有分层损伤的结构在机械力与热载作用下,其强度和稳定性与完善结构相比将出现很大的弱化,因此,研究这种含损伤结构的力学性能就显得十分重要。含分层损伤的层合结构最常见的破坏形式是在压缩荷载作用下的分层屈曲,近年来国内外许多学者都致力于此问题的研究,并取得了很大的进展[1~8],但目前研究仅限于在纯热载或纯机械载荷作用下层合板分层屈曲问题。含分层损伤的航空、航天飞行器复合材料层合结构,往往在机械力和热载复合工况下工作,由于问题的复杂性,目前还未见到此项研究成果的公开报道。温度和机械力共同作用下的含损伤结构的分层屈曲研究,一般可分为如下两种情况: 其一,为结构在一定的温度下承受机械载荷,研究其受机械力作用下的屈曲临界力; 其二,为结构受一定机械载荷时,研究在温度变化的环境工作时其屈曲临界温度。这两种问题分别归属于线性

收稿日期: 1998-10-16; 收修改稿日期: 1998-12-05
基金项目: 国家自然科学基金(1967204)和教委博士学位点专项科研基金(9601411)资助项目
作者介绍: 陈浩然(1940), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 复合材料及其结构的力学分析。

和非线性屈曲的范畴。本文中就以上两种情况分别给出了相应的有限元分析方法, 并通过典型算例分析, 研究了在温度-机械力耦合作用下具有不同分层的复合材料加筋和无加筋层合板的分层屈曲性态的变化规律。文中提出的有限元分析方法同样适用于复合材料的湿、温度和机械力耦合问题的求解。

## 1 热-机械力耦合复合材料加筋层合板的分层屈曲的线性和非线性有限元分析方法

### 1.1 复合材料加筋层合板的热-机械力耦合屈曲问题的控制方程

(1) 在已知温度场下, 复合材料加筋层合板的屈曲临界载荷分析

在已知温度场下复合材料加筋板的有限元屈曲分析控制方程可表达为:

$$([K]^{F}_{sp} + [K_R]^{T}_{sp}) + K[K_R]^{F}_{sp})\{\bar{q}\}_{sp} = 0 \quad (1)$$

式中: $[K]^{F}_{sp}$、$[K_R]^{T}_{sp}$和$[K_R]^{F}_{sp}$分别为在给定温度下的加筋层合板总刚度阵、热载当量总几何刚度阵和机械载荷总几何刚度阵; K为载荷比例因子; $\{\bar{q}\}_{sp}$表示加筋板的节点总位移向量。由于温度场已知, 复合材料层合板材料性质可由该温度场下单层材料本构方程和层合理论确定, 则和$[K_R]^{T}_{sp}$为常数矩阵, 故此问题属线性屈曲问题。

(2) 在给定机械载荷作用下, 复合材料加筋层合板屈曲临界温度分析

在给定机械载荷下复合材料加筋层合板有限元屈曲分析控制方程为:

$$([K]^{T}_{sp} + [K_R]^{F}_{sp} + K[K_R]^{T}_{sp})\{\$q\}_{sp} = 0 \quad (2)$$

式中$[K]^{T}_{sp}$和$[K_R]^{T}_{sp}$分别为加筋层合板在当前温度下的总刚度阵和热载当量总几何刚度阵, 二者均为温度的函数; $[K_R]^{F}_{sp}$为机械载荷总几何刚度阵; $\{\$q\}_{sp}$为加筋板的总节点位移增量向量; K为温度载荷比例因子。

此类问题由于事先不知道温度场分布, 故在分析中无法预先确定其材料性质与热学性质, 这就需要采用非线性分析方法求解其屈曲临界温度, 本文将采用增量法求解, 其求解迭代过程详见文献[5]。

### 1.2 复合材料加筋层合板的屈曲分析有限元列式

本文作者基于复合材料一阶剪切理论——Mindlin 理论, 采用分项插值和选择积分技术分别推导了复合材料层合板和组合层合梁的单元刚度阵、热载和机械载荷下的单元几何刚度阵列式, 数值试验证明, 此列式具有精度高、收敛快的特点。其具体列式见文献[3] 和文献[4]。

## 2 分层模型

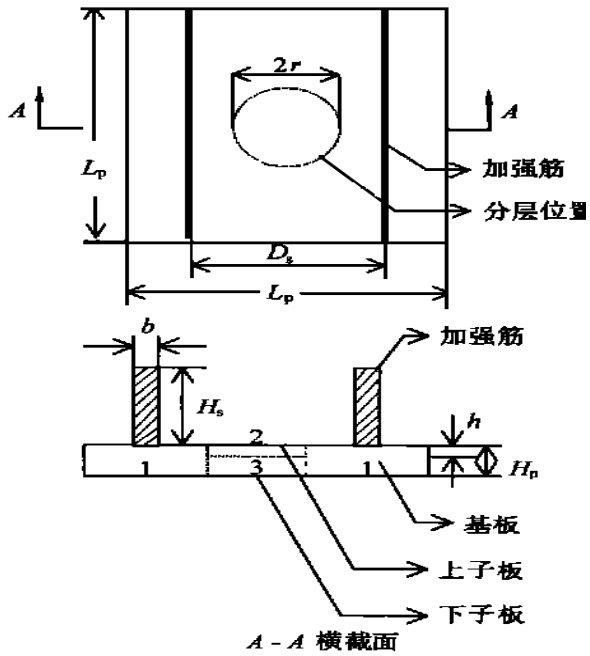


图 1 含有圆形嵌入分层的加筋层合板模型

Fig. 1 A schematic model of stiffened composite laminated plate with embedded damage of a circle delamination

图 1 给出了具有分层损伤的加筋方板的分析模型。设在加强筋之间的层合板中部含有一个圆形分层, 分层区半径为 r; $L_P$ 和 $H_P$ 分别为层合板的边长及厚度; $D_S$、$H_S$ 和 b 分别为加强筋间距离、筋高和筋宽。以分层的前缘为界, 将该板划分成未脱层区和脱层区两部分。未脱层区的板称为基板, 脱层区被分开的上、下两部分分别称为上子板和下子板。这样整个层合板可看成由基板和上、下子板三块板组成, 分别定义为 1, 2, 3 区域。在进行有限元分析时, 分别对基板和上、下子板进行单元离散, 三块板间的唯一联系是位于基板在分层前缘处的法线上那些分别属于三个不同板的单元节点。当板发生变形时, 按 Mindlin 假设, 位于同一条法线上的分别属于基板和上、下子板单元的三个节点上的位移应满足如下协调条件:

$$w = w_1 = w_2 = w_3,\ H_x = H_{x1} = H_{x2} = H_{x3},$$
$$H_y = H_{y1} = H_{y2} = H_{y3},$$
$$u_2 = u_1 + H_y(H_P - h)/2,\ u_3 = u_1 - H_y h/2,$$
$$v_2 = v_1 - H_x(H_P - h)/2,\ v_3 = v_1 + H_x h/2 \quad (3)$$

上式中 h 为分层处上子板的厚度; 下标 1, 2 和 3 分别为未分层处加筋板基板、分层处上子板和下子板。

u、v 和 w 分别为面内 x、y 及法向位移, $H_x$ 和 $H_y$ 为绕 x 和 y 轴的转角。

## 3　计算结果与讨论

本文分别研究了受机械力和温度载荷联合作用下含有圆形分层损伤的加筋和无加筋层合方板的屈曲性态。假设:

(1) 复合材料单层板的材料性质随温度线性变化, 其中

$E_1 = E_1^0(1 - 0.5 \times 10^{-3}\Delta T)$, $E_2 = E_2^0(1 - 0.2 \times 10^{-3}\Delta T)$, $G_{12} = G_{12}^0(1 - 0.2 \times 10^{-3}\Delta T)$, $A_1 = A_2 = A^0(1 - 0.5 \times 10^{-3}\Delta T)$, $\mu = \mu_s = 0.25$, $E_1^0/E_2^0 = 40.0$, $G_{12}^0/E_2^0 = 0.5$, $A^0 = A_s^0 = 10^{-6}$。

式中上标 0 表示常温下材料热弹性性质, $\Delta T$ 为温度增量。

(2) 加筋层合板的基板与无加筋层合板的铺层均为$[0°/90°/90°/0°]_6$, 加强筋截面为矩形, 其铺设角均为 0 度。板和加强筋几何尺度比分别为 $H_p/L_p = 1/90$, $b/H_s = 1/5$ 和 $H_p/H_s = 1/5$。加筋层合板支承为四边固支。

(3) 加筋层合板含有一个圆形嵌入分层, 分层圆的半径 r 可以任意变化大小, 其分层位置在距板上表面第四层与第五层界面处。

### 3.1　线性热力耦合问题

图 2(a)和 2(b)分别给出了具有不同分层大小的加筋方板以及与其几何尺寸相同的无加筋光板的无量纲屈曲临界力与环境温度的关系。设加筋与无加筋层合板无量纲屈曲临界力分别为 $P_{cr}^s = P_{cr}^s/P_{cr}^{s0}$ 和 $P_{cr}^p = P_{cr}^p/P_{cr}^{p0}$。其中 $P_{cr}^s$ 和 $P_{cr}^p$ 分别为给定温度环境下含分层损伤加筋和无加筋板的屈曲临界力, $P_{cr}^{s0}$ 和 $P_{cr}^{p0}$ 分别为在室温下不含分层加筋和无加筋板的屈曲临界力; 图中标号 1 曲线为 $2r/L_p = 0$ 和 $2r/L_p = 0.1$ 时计算结果, 而标号 2、3、4 和 5 分别为 $2r/L_p = 0.2$、0.3、0.4 和 0.5 时的计算结果。

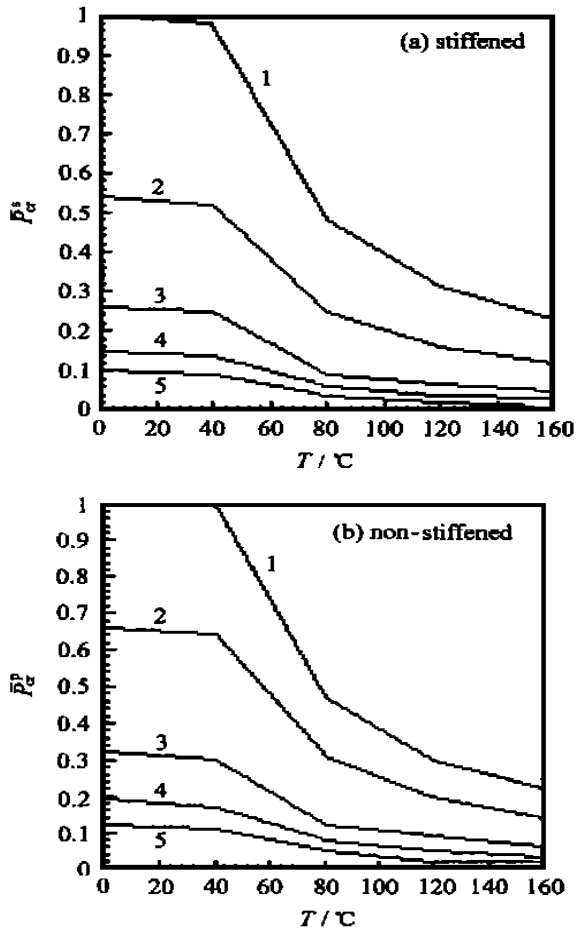


图 2　环境温度和分层大小对加筋板、光板无纲量临界力的影响曲线

Fig. 2　The variations of environment temperatures with non-dimensional critical loads of the stiffened or non-stiffened composite laminated plates for different delamination areas

分析图 2, 我们可以得到以下结论:

(1) 分层面积大小影响结构的屈曲临界力值。当环境温度较低时, 分层面积大小对结构的无量纲临界力影响较大; 而环境温度较高时, 无量纲临界力值受分层面积大小的影响程度降低。

(2) 在环境温度较低时, 具有同样分层面积的结构的无量纲临界力值几乎与环境温度无关, 但随着环境温度的升高, 其无量纲临界力迅速下降; 但当环境温度增加到一定程度后、环境温度对无量纲临界力的影响又逐渐减弱。

(3) 对比图 2 中(a)和(b)可以看出: 在相同环境温度下, 分层对加筋板无量纲临界力的影响要比无加筋光板严重。

### 3.2　非线性热力耦合问题

表 1 给出了在不同外力作用下, 两加强筋间基板内部含有一圆形分层的加筋层合板以及与其几何尺寸相同的无加筋光板屈曲临界温度随分层面积以及机械外力大小变化的数值结果。表中 $S_d$ 和 $S_p$ 分别为分层圆的面积和方板的面积, $T_{cr}^{NL}$ 为非线性屈曲临界温度(℃)。

分析表 1 中数据, 我们可以得到以下结论:

(1) 在给定外力作用下的加筋和无加筋光板, 其屈曲临界温度随着分层面积的增大而减小。当分层面积较小时, 分层损伤对屈曲临界温度影响不大;

表 1 在给定外载下, 具有不同分层面积的加筋板和无加筋光板的临界温度 $T_{cr}^{NL}$(℃)

Table 1 The variations of critical temperatures $T_{cr}^{NL}$(℃) with non-dimensional loads of stiffened and non-stiffened composite laminated for different delamination areas

| $S_d/S_p$ | | 0.0% | 0.79% | 1.77% | 3.14% | 4.90% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 429.9 | 413.8 | 307.4 | 186.4 | 129.2 |
| 0.0 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 267.6 | 267.4 | 251.4 | 186.4 | 129.2 |
| 0.1 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 378.9 | 375.4 | 278.4 | 144.1 | 87.8 |
| 0.1 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 241.2 | 240.0 | 225.4 | 168.8 | 104.8 |
| 0.2 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 338.2 | 330.3 | 228.3 | 102.9 | 46.1 |
| 0.2 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 213.0 | 207.6 | 199.8 | 144.0 | 87.5 |
| 0.3 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 290.4 | 286.5 | 186.4 | 62.4 | - 4.5 |
| 0.3 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 179.5 | 182.3 | 174.5 | 126.7 | 40.6 |
| 0.4 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 245.7 | 243.9 | 138.2 | 21.8 | - 63.9 |
| 0.4 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 161.4 | 157.3 | 149.5 | 102.6 | 21.7 |
| 0.5 $P_{cr}^{s0}$ | 加筋板 $T_{cr}^{NL}$ | 199.3 | 199.0 | 98.8 | - 35.4 | - 90.8 |
| 0.5 $P_{cr}^{p0}$ | 光 板 $T_{cr}^{NL}$ | 136.5 | 132.7 | 125.0 | 85.4 | - 4.9 |

而当分层面积逐渐增大时其屈曲临界温度将迅速下降。应特别注意的是, 在外力作用下分层面积较大时, 其加筋和无加筋层合板的屈曲温度均较低, 这表明在此种情况下结构将很容易失效。

(2) 当分层面积一定时, 加筋和无加筋层合板其屈曲临界温度均随着所受外力的增大而迅速下降。

(3) 对比表 1 加筋与无加筋层合板的结果, 可以看出, 在分层面积较小时, 外载大小对临界温度的影响, 无加筋层合板要比加筋板严重; 而当分层面积较大时其影响程度, 加筋板要比无加筋板严重。

(4) 表 1 中屈曲临界温度数值为负的情况, 表示该结构在所加外力情况下已经失稳, 故不能再承受任何附加的温度载荷。

(5) 本文中提出的方法也适用于研究含分层损伤加筋和无加筋层合板在热、湿-机械力耦合作用下的屈曲性态。关于在热载和机械力共同作用下, 具有分层损伤复合材料加筋和无加筋层合板的后屈曲性态研究工作, 作者正在进行中。

## 参 考 文 献


[1] Kim H J. Postbuckling analysis of composite laminates with a delamination[J]. Computer & Structures, 1997, 62(6): 975～983.

[2] Gaudenzi P. On delamination buckling of composite laminates under compressive loading[J]. Composite Structures, 1997, 39(1/2): 21～30.

[3] 陈浩然, 尹向勇, 郭兆璞, 温玄玲. 具有分层损伤的复合材料组合层合梁的屈曲性态研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 1998, 142(5): 3～6.

[4] 温玄玲, 张依芬, 陈浩然. 含椭圆形分层损伤层合板的非线性热屈曲[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(1): 20～26.

[5] 陈浩然, 尹向勇, 郭兆璞, 孙先念. 含分层损伤的复合材料加筋层合板非线性热屈曲分析[J]. 宁夏大学学报, 1999, 20(3): 21～27.

[6] 陈浩然, 孙先念, 郭兆璞. 层合复合材料低速冲击损伤研究. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价: 第二卷[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 96～112.

[7] 孙先念, 陈浩然, 王利民. 含椭圆分层损伤层合板屈曲和后屈曲研究[C]. 全国第十届复合材料学术会议论文集. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998. 468～472.

[8] 孙先念. 含层间分层损伤复合材料层合板压缩破坏行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1998. 32～114.