

文章编号:1000-582X(2004)07-0024-04

缝纫对复合材料层合板分层屈曲的影响*

魏玉卿¹, 陈斌²

(1. 青岛建筑工程学院数理系, 山东 青岛 266033; 2. 重庆大学工程力学系, 重庆 400030)

摘要:基于包含若干分层的缝纫复合材料层合板在面内压缩载荷作用下发生屈曲破坏的机理, 即厚度方向上的缝纫线被拉断, 把缝纫线的极限伸长率作为层合板屈曲破坏的控制参数, 采用能量的方法建立了用于预测缝纫复合材料层合板屈曲强度的理论模型。采用最小势能原理计算了缝纫及未缝纫复合材料层合板的屈曲强度。在此基础上, 定义一个缝纫增强比, 用一个算例证明了缝纫复合材料层合板较未缝纫复合材料层合板有更高的屈曲强度。研究了缝纫参数(包括缝纫线直径, 缝纫针距和行距)对缝纫复合材料层合板屈曲强度的影响。

关键词:缝纫; 复合材料; 层合板; 分层; 屈曲强度

中图分类号: O344.3

文献标识码: A

复合材料以其高的比强度、比刚度、具有可设计性和制造工艺简单等众多优点在国民经济各领域得到广泛的应用。但是传统复合材料层合板通常是通过把增强纤维按照一定的铺层角度进行铺设, 然后经过层压固化所形成的二维层板结构。这种结构层与层之间仅靠基体起粘接和传递载荷的作用, 层间的力学性能比较薄弱, 在横向载荷特别是冲击载荷下很容易发生分层破坏。缝纫复合材料层合板是八十年代为了改善复合材料的层间力学性能而发展起来的一种三维层板结构。在厚度方向上有缝纫线的增强作用, 能够明显地提高层间破坏刚度^[1-2]和抗冲击容限^[3]。

在压缩载荷下, 含分层的复合材料层合板的主要破坏形式为屈曲^[4]。对于缝纫复合材料层合板由于厚度方向上有缝纫线的增强作用, 层合板发生失稳屈曲的破坏形式为厚度方向上的缝纫线被拔出并且最终发生断裂。目前已经发展了一些理论模型, 可以预测缝纫参数对层合板的屈曲应变^[5]和能量释放率^[6-7]的影响。本文把缝纫线的极限伸长率作为层合板发生失稳屈曲的控制参数, 采用能量的方法得到缝纫复合材料层合板的屈曲强度, 作为比较也研究了未缝纫复合材料的屈曲强度。定义一个缝纫增强比, 通过一个算例表明缝纫复合材料层合板较未缝纫复合材料层合板

有更高的屈曲强度, 研究了缝纫参数包括缝纫针距、行距和缝纫线直径对复合材料层合板屈曲强度的影响。

1 缝纫复合材料层合板的屈曲强度

考虑含贯穿整个宽度 b , 分层长度为 l 的复合材料对称层合板, 受到横向压缩载荷 P 的作用, 如图 1 所示。其中 p 为缝纫针距, q 为缝纫行距, H 为层合板的厚度, 缝纫方向与载荷方向相垂直。分层受诸如材料体系、铺层结构、制造工艺以及载荷条件等诸多因素的影响, 情况十分复杂。为了分析的方便对实际情况作了适当简化, 作如下假设:

1) 在这里讨论比较简单的对称屈曲的情况: 层合板发生对称屈曲—中心分层, 分层平面为层合板的对称面。由于对称性, 取上子板分析。

2) 在分层屈曲段, 缝纫线被看作为刚度系数为 k 的线性弹簧, 如图 2 所示。

3) 层合板屈曲破坏的准则为: 缝纫线的实际伸长量等于缝纫线的极限伸长量。

4) 屈曲的形状可以用正弦曲线来模拟。

在此条件下由图 2 可得分层区域内宽度方向及长度方向上缝纫线的数目。宽度方向上包含缝纫线的个数:

* 收稿日期: 2004-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272120); 青岛建筑工程学院基金资助项目(C2003-133)

作者简介: 魏玉卿(1978-), 男, 山东巨野人, 青岛建筑工程学院助教, 硕士, 主要从事复合材料方面的研究工作。

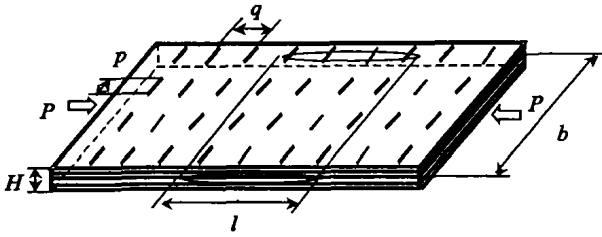


图 1 含分层的缝纫复合材料层合板结构

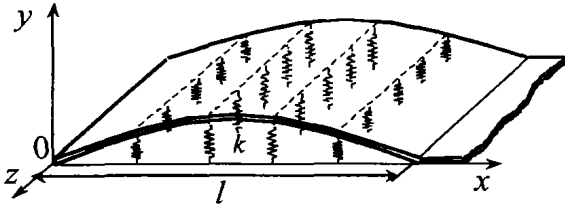


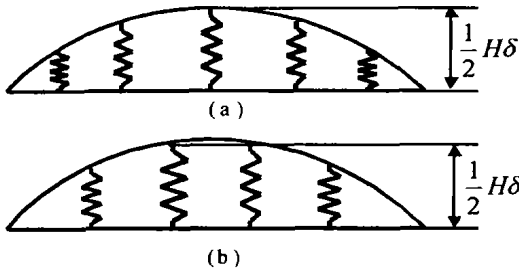
图 2 子层的屈曲变形

$$n_p = \text{int}[b/p] \quad (1)$$

长度方向上包含缝纫线的个数：

$$n_q = \text{int}[l/q] \quad (2)$$

其中 $\text{int}[\cdot]$ 为取整函数。当 n_q 为奇数时，伸长最大的缝纫线段在分层段的中央，如图 3(a) 所示。当 n_q 为偶数时，伸长最大的缝纫线段在分层段中央的两侧，如图 3(b) 所示。其中 δ 为缝纫线的伸长率。



(a) 行数为奇数；(b) 行数为偶数
图 3 缝纫线在纵截面上的分布

由假设 4) 可得在屈曲失稳的临界状态下，分层屈曲的形状函数为：

$$y(x) = \begin{cases} A_1 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) & (0 \leq x \leq l), n_q \text{ 为奇数} \\ A_2 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) & (0 \leq x \leq l), n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $A_1 = \frac{H\delta}{2}$, $A_2 = \frac{H\delta}{2\sin(\pi(l+q)/2l)}\delta$ 为缝纫线的伸长率。当 $\delta = \delta_c$ 时缝纫线断裂，屈曲达到临界状态，这里 δ_c 是缝纫线的极限伸长率。缝纫线引起的弹性应变能为：

$$U_s = \begin{cases} n_p \left\{ \frac{k}{2} \left[y^2\left(\frac{l}{2}\right) + 2 \sum_{i=1}^{(n_q-1)/2} y^2\left(\frac{l}{2} + iq\right) \right] \right\}, & n_q \text{ 为奇数} \\ n_p \left\{ k \left[\sum_{i=1}^{n_q/2} y^2\left(\frac{l+q}{2} + (i-1)q\right) \right] \right\}, & n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

其中 k 为缝纫线等效弹簧的弹性系数，假定等效弹簧的原长为层合板厚度 H ，则弹性系数可表示为：

$$k = \frac{\pi E_s d^2}{4H} \quad (5)$$

式中 E_s 为缝纫线的弹性模量。子板因弯曲产生的应变能：

$$U_b = \frac{E_{fx} I_{xx}}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \begin{cases} \frac{\pi^4 A_1^2 E_{fx} I_{xx}}{4l^3}, n_q \text{ 为奇数} \\ \frac{\pi^4 A_2^2 E_{fx} I_{xx}}{4l^3}, n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

式中 E_{fx} 为子板的弯曲模量， I_{xx} 为子板的惯性矩。外力作的功：

$$W = \frac{P}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx = \begin{cases} \frac{\pi^2 A_1^2 P}{4l}, n_q \text{ 为奇数} \\ \frac{\pi^2 A_2^2 P}{4l}, n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

式中 P 为缝纫层合板的屈曲载荷。由能量守恒得：

$$U_s + U_b - W = 0 \quad (8)$$

得到临界状态下缝纫复合材料层合板的极限屈曲载荷 P_{st} ：

$$P_{st} = \begin{cases} \frac{\pi^2 A_1^2}{4l} (U_s + U_b), n_q \text{ 为奇数} \\ \frac{\pi^2 A_2^2}{4l} (U_s + U_b), n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (9)$$

则缝纫层合板的屈曲强度：

$$\sigma_{st} = \frac{P_{st}}{bH} = \begin{cases} \frac{\pi^2 A_1^2}{4lbH} (U_s + U_b), n_q \text{ 为奇数} \\ \frac{\pi^2 A_2^2}{4lbH} (U_s + U_b), n_q \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (10)$$

2 未缝纫复合材料层合板的屈曲强度

由于层合板在厚度方向上没有缝纫线的约束，其屈曲形状函数假定为：

$$y(x) = a \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (0 \leq x \leq l) \quad (11)$$

其中 a 为未知常数。子板由于弯曲产生的应变能可表示为：

$$U_u = \frac{E_{fx} I_{xx}}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \quad (12)$$

外力作的功：

$$W_u = \frac{P_{unat}}{2} \int_0^l \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \quad (13)$$

则系统总势能为：

$$\Pi = U_n - W_u = a^2 \left(\frac{\pi^4 E_{fx} I_{xx}}{4l^3} - \frac{\pi^2 P_{unat}}{4l} \right) \quad (14)$$

根据最小势能原理,未知常数 a 使 Π 取最小值,即:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = 0 \quad (15)$$

得未缝层合板的屈曲极限载荷:

$$P_{unst} = \frac{\pi^2 E_{fx} I_x}{l^2} \quad (16)$$

则未缝层合板的屈曲强度为:

$$\sigma_{unst} = \frac{P_{unst}}{bH} = \frac{\pi^2 E_{fx} I_x}{bHl^2} \quad (17)$$

3 算例与讨论

针对 Kelvar 缝碳纤维增强环氧树脂基复合材料对称层合板,用算例分析研究了缝线的增强效果及缝线参数对层合板屈曲强度的影响。定义缝线的增强比:

$$R = \frac{\sigma_{st}}{\sigma_{unst}} \quad (18)$$

取材料参数为^[8]:

$$b = 2.5 \text{ cm}, l = 1 \text{ cm}, \delta_c = 4\%, H = 0.2 \text{ cm}, E_{fx} = 138 \text{ GPa}$$

分析结果如图 4 和图 5 所示。图 4 给出了在缝线行距不变,缝线直径及针距变化时,缝线密度 $D(D = 1/(p \cdot q))$ 对层合板屈曲强度的影响曲线。可以看出,缝线复合材料层合板较未缝线复合材料层合板有更高的屈曲强度,且随着缝线密度的增加,屈曲强度逐渐增大。变化曲线不光滑,呈阶梯状。屈曲强度随缝线直径的增加而增加。在 $d = 0.1 \text{ mm}$ 时,缝线密度从 10 cm^{-2} 增加到 28.6 cm^{-2} ,屈曲强度增加了 1.2 倍,在 $d = 0.2 \text{ mm}$ 时,屈曲强度则增加了 1.6 倍。图 5 给出了在缝线针距不变,缝线直径及行距变化时,缝线密度对层合板屈曲强度的影响。其影响规律与图 4 相似。所不同的是曲线的阶梯状不明显,近似为光滑曲线。

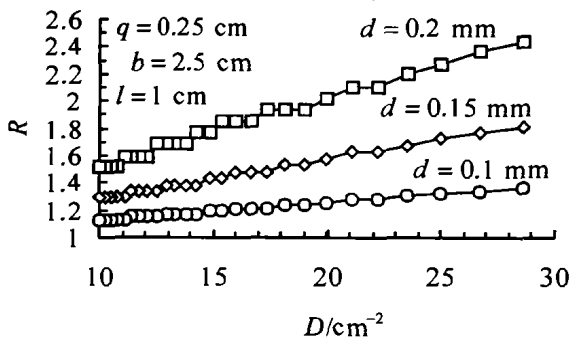


图 4 屈曲强度随缝线密度的变化趋势 (行距恒定,针距变化)

4 结 论

基于缝线复合材料层合板在面内压缩载荷作用下的屈曲破坏的机理,把缝线的极限伸长率作为屈曲

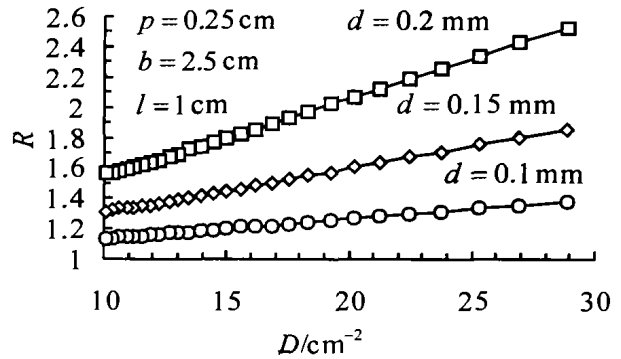


图 5 屈曲强度随缝线密度的变化趋势 (针距恒定,行距变化)

破坏的控制参数,采用能量的方法建立了求解其屈曲强度的分析模型。研究了缝线参数对屈曲强度的影响,得到如下结论:

- 1) 缝线可以明显地提高复合材料层合板的分层屈曲强度。
- 2) 屈曲强度随着缝线密度和缝线直径的增加而增大。增加缝线密度和缝线直径有助于提高复合材料的分层容限。
- 3) 缝线针距和行距对屈曲强度有不同的影响。当缝线方向垂直于载荷方向时,针距对屈曲强度的影响曲线呈较明显的阶梯状,而行距对屈曲强度的影响曲线则平滑的多。

参考文献:

- [1] JAIN L K, MAI Y - W. On the effect of stitching on mode I delamination toughness of laminated composite[J]. Composites Science and Technology, 1995, 51: 331 - 345.
- [2] JAIN L K, MAI Y - W. Determination of Mode II Delamination Toughness of Stitched Laminated Composites [J]. Comp Sci and Tech, 1995, 55: 241 - 253.
- [3] MPURITZ A P, LEONG K H, HERSZBERG I. A Review of the Effect of the Stitching on the In - plane Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polymer Composites[J]. Composites A, 1997, 28: 979 - 991.
- [4] FLANAGAN G. A Sublaminar Analysis Method for Predicting Disbond and Delamination Loads in a Composite Structure [J]. Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12: 876 - 887.
- [5] GUI L, LI Z. Delamination buckling of stitched laminates [J]. Composite Science and Technology, 2001, 61: 629 - 636.
- [6] SHU D, MAI Y - W. Delamination buckling with bridging Composite [J]. Science and Technology, 1993, 47: 25 - 33.
- [7] SHU D, MAI Y - W. Buckling of delaminated composites re - examined [J]. Composite Science and Technology, 1993, 47: 35 - 41.
- [8] PAN T S, HERRINGTON P D. Local Buckling of Stitched Composite Laminate [J]. Composite B, 1999, 30: 833 - 840.

Effects of Stitcing on the Buckling Strength of Stitched Composite Laminates

WEI Yu-qing¹, CHEN Bir²

(1. Department of Science Engineering, Qingdao Institute of Architecture and Engineering, Qingdao 266033, China;

2. Department of Mechanics Engineering, Chongqing University, Chongqng 400030, China)

Abstract: A theoretic model is proposed based on the mechanism of the buckling failure of the stitched composite laminates containing delaminations. The buckling strength of the stitched composite laminates under the in-plane compressive load is predicted. The critical percentage elongation of the stitching thread is taken into account as a control parameter of the buckling failure. The energy method is used to calculate the buckling strength of the stitched composite laminates, and the minimal potential energy is used to calculate that of the unstitched composite laminates. The result shows that the buckling strength of the stitched composite laminates is larger than that of the unstitched composite laminates. The effects of stitching technical parameters such as the stitch thread diameter, stitch step and stitch space on the stitched composite laminates are also analyzed.

Key words: stitching; composite; laminate; delamination; buckling strength

(编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第 17 页)

## Two-level Fuzzy Method for Evaluation of the Supplier's System in Automobile Industry

HUANG Ju<sup>1,2</sup>, YI Shu-ping<sup>1</sup>, ZENG Xiao-jing<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Mechanical and Packaging Engineering, Chongqing Technology and business University, Chongqing 400067, China;

3. Chongqing Changan JinLing Auyomobile Parts Liability Co., LTD Chongqing 400023, China)

**Abstract:** This paper analyses the importance of the suppliers' evaluation in automobile industry. Based the conception of system, all the corporations' suppliers are regarded as an integer. On condition that the corporation has evaluated the single supplier's performance, the model for evaluate the performance of supplier's system is established, the performance by two-level fuzzy method is evaluated. Finally, the method sets with an example as the illustration.

**Key words:** supplier's system; two-level fuzzy method; automobile industry

(编辑 成孝义)