

文章编号:1000-8055(2013)06-1231-05

CCF300/QY8911 单向纤维增强复合材料纵向压缩性能预测

张勇波, 傅惠民, 王治华

(北京航空航天大学 小样本技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种单向纤维增强复合材料压缩性能的预测方法. 该方法基于纤维增强复合材料压缩的微屈曲失效机理与纤维膝切失效机理, 对 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料单向层合板的纵向压缩性能展开研究. 将纤维微屈曲失效与纤维膝切失效机理统一起来, 提出一种基于两种失效机理的预测模型, 很好地实现了 CCF300/QY8911 单向纤维增强复合材料压缩性能的预测. 通过与试验数据进行比较表明: 基于两种失效机理分析的 CCF300/QY8911 单向纤维复合材料压缩性能预测模型与试验数据符合较好, 误差在 5% 以内.

关 键 词: 纤维微屈曲; 纤维膝切; 预测模型; 压缩性能; 复合材料

中图分类号: V258; O211

文献标志码: A

Compressive strength prediction of CCF300/QY8911 unidirectional fiber reinforced composites

ZHANG Yong-bo, FU Hui-min, WANG Zhi-hua

(Research Center of Small Sample Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A method for the compressive strength prediction of unidirectional fiber reinforced composite was proposed. Based on the fiber microbuckling mechanism and fiber kinking mechanism, an investigation on the compressive strength prediction of CCF300/QY8911 unidirectional fiber reinforced composites was made. Combining the fiber microbuckling mechanism and fiber kinking mechanism together, which were both responsible for the failure, a combined model for compressive strength prediction of the unidirectional CCF300/QY8911 composite was proposed. According to the compression between the predicted results and measured date, it shows that to compare with the microbuckling model and the kinking model, the combined model makes a better agreement that keep the difference less than 5%.

Key words: fiber microbuckling; fiber kinking; prediction model; compressive strength; composites

随着高性能碳纤维复合材料逐渐发展成为航空航天领域的主承力构件, 掌握其基本的失效机理, 实现其基本性能的准确预测就显得至关重要.

压缩载荷是结构承载的重要载荷形式之一, 而纤维增强复合材料的压缩性能远低于其拉伸性能, 在湿热环境的作用下, 甚至可以造成结构的压缩

收稿日期: 2012-04-25

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1231_002.html

基金项目: 中国博士后科学基金(2011M500221); 国家重点基础研究发展计划(2012CB720000)

作者简介: 张勇波(1984—), 男, 四川隆昌人, 博士后, 从事加速寿命试验、可靠性评估及复合材料力学与失效分析研究.

3 纤维微屈曲失效模型

Xu 和 Reifsnider^[1] 将纤维增强复合材料简化为梁置于塑性基体的模型,建立了一种纤维微屈曲强度预测公式.本文在此基础上通过改进,给出了更为精确的预测公式.通过能量原理,总能量可以通过下式计算

$$\Pi = \int_0^L \left[\frac{E_{\text{fl}} I_f}{2} \left(\frac{d^2 u_y}{dx^2} \right)^2 + \frac{k}{2} u_y^2 - \frac{P}{2} \left(\frac{du_y}{dx} \right)^2 + \frac{1}{2} \tau b^2 \frac{du_y}{dx} \right] dx \quad (1)$$

其中 u_y 表示纤维的横向位移, b 表示无限板厚度, k 表示基体刚度, E_{fl} 表示纤维的纵向模量, τ 表示界面切应力, I_f 表示纤维的惯性矩.通过变分法及最小势能原理可以得到

$$E_{\text{fl}} I_f \frac{d^4 u_y}{dx^4} + (P - G_m b^2) \frac{d^2 u_y}{dx^2} + k u_y = 0 \quad (2)$$

其中 G_m 为基体切变模量, P 为施加的外载荷.通过将纤维边界条件代入式(2)可以求解得到纤维屈曲载荷为

$$P_{\text{cr}} = E_{\text{fl}} I_f \frac{\pi^2}{L^2} + G_m b^2 + \frac{k L^2}{\pi^2} \quad (3)$$

其中 L 为纤维屈曲的波长.因此,整个层合板的压缩强度可以表示为

$$\sigma_c = \frac{E_{\text{cl}} P_{\text{cr}}}{\pi r_f^2 E_f} = \left(\frac{E_{\text{fl}} \varphi_f + E_m (1 - \varphi_f)}{E_{\text{fl}}} \right) \left(E_{\text{fl}} \frac{r_f^2 \pi^3}{12 L^2} + G_m + \frac{k L^2}{\pi^3 r_f^2} \right) \quad (4)$$

其中 E_{cl} 为复合材料纵向模量, E_m 为基体模量, φ_f 表示纤维的体积分数.通过满足最小屈曲载荷的条件,可以得到纤维屈曲的波长为

$$L = \pi \sqrt[4]{\frac{E_{\text{fl}} I_f}{k}} \quad (5)$$

在 Xu 和 Reifsnider 的模型中,基体刚度通过简化基体模型并求解边界值问题进行求解.而本文中基体刚度通过下式计算:

$$k = \frac{F}{x} = \frac{\sigma b L}{x} \quad (6)$$

其中 σ 为纤维表面应力, x 可通过下式计算

$$x = \frac{\varepsilon b}{\eta} = \frac{\sigma b}{\eta E_{\text{c2}}} = \frac{\sigma b [E_m \varphi_f + E_{\text{fl}} (1 - \varphi_f)]}{\eta E_{\text{fl}} E_m} \quad (7)$$

其中 η 用于表示纤维与基体的黏结程度,当纤维与基体单面分开时, $\eta = 1$; 当纤维与基体完全黏

合, $\eta = 2$; 当纤维与基体部分黏结时, $0 < \eta < 2$. 因此,将式(7)代入式(6)可得

$$k = \frac{\eta E_{\text{fl}} E_m L}{E_m \varphi_f + E_{\text{fl}} (1 - \varphi_f)} \quad (8)$$

由此,将式(8)与式(5)代入式(4)中可以得到纤维增强复合材料的压缩强度为

$$\sigma_c = [E_{\text{fl}} \varphi_f + E_m (1 - \varphi_f)] \cdot \left\{ 0.45 \left[\frac{\eta E_m r_f \pi \sqrt{\pi}}{E_m \varphi_f + E_{\text{fl}} (1 - \varphi_f)} \right]^{2/5} + G_m \right\} \quad (9)$$

其中 r_f 表示纤维半径.

4 纤维膝切失效模型

纤维膝切失效本质上为纤维的后屈曲反应.对于失效机理的研究最早由 Rosen 提出^[2],他通过忽略增强纤维的弯曲抗力对复合材料的压缩强度进行预测.通过力矩平衡得到压缩强度的预测公式为

$$\sigma_c = G_{\text{cl}} \quad (10)$$

其中 G_{cl} 为纤维复合材料纵向切变模量.

但是,式(10)预测的压缩强度往往偏高,因此 Argon^[4]通过假设复合材料为承受切应力的理想塑性材料,并考虑了纤维初始偏离角度的影响,得到了其修正公式

$$\sigma_c = \frac{\tau_y}{\phi_0} \quad (11)$$

其中 τ_y 为复合材料的面内剪切屈服应力, ϕ_0 为纤维的初始偏离角度.

尽管如此,Rosen 和 Argon 都忽略了一个事实,那就是通过观察到的膝切带的方向总是往纤维的横向偏离了一定角度.因此,Budiansy 等^[13]在上述模型的基础上提出了现在最为常用的预测公式

$$\sigma_c = \frac{\tau_y}{\gamma_y + \phi_0} = \frac{G_{\text{cl}}}{1 + \phi_0 / \gamma_y} \quad (12)$$

其中 γ_y 为面内剪切屈服时的屈服应变.

5 联合模型

通过上述的失效机理分析可以看到,纤维的微屈曲失效与膝切失效本是一个连续的过程.如果只是单独地将其看作一个独立的失效模式,并以此建立相应的压缩强度预测模型,如上所述纤维微屈曲模型与膝切模型,得到的压缩强度预测结果误差较大.

因此,本文将其看作一个连续的过程,其纤维微屈曲强度由上述改进后的微屈曲失效预测公式

进行计算,而纤维达到微屈曲极限到形成膝切带并最终失效的强度 σ_{pk} 由下式计算:

$$\sigma_{pk} = \frac{\tau_f - \tau_y}{\gamma_f - \gamma_y + \phi_0} \quad (13)$$

其中 τ_f 为面内剪切失效力, γ_f 为面内剪切失效时对应的失效应变。

由此,就得到了单向纤维增强复合材料纵向压缩强度的联合预测公式为

$$\sigma_c = [E_{fl} \varphi_f + E_m (1 - \varphi_f)] \cdot \left\{ 0.45 \left[\frac{\eta E_m r_f \pi \sqrt{\pi}}{E_m \varphi_f + E_{fl} (1 - \varphi_f)} \right]^{2/5} + G_m \right\} + \frac{\tau_{fin} - \tau_y}{\gamma_{fin} - \gamma_y + \phi_0} \quad (14)$$

式(14)综合考虑了纤维与基体拉伸模量、基体切变模量、纤维半径、纤维与基体黏结强度、纤维体积分数、纤维初始偏离角度等影响因素的影响,因此对于单向纤维增强复合材料压缩强度的预测能取得很好的精度。

6 应用实例

利用上述 3 种预测模型分别对 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料压缩强度进行预测,并且与试验结果进行对比分析,比较各个预测模型的预测精度。通过试验得到的 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料压缩强度试验数据如表 1 所示。

表 1 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料纵向压缩试验数据

Table 1 Measured data of longitudinal compressive strength of CCF300/QY8911

试验状态	试件序号	压缩强度 X_c/MPa	压缩应变 $\varepsilon_{1c}/\mu\epsilon$	变异系数 $C_v/\%$
室温干态	1	1566	11371	3.4
	2	1512	13609	
	3	1462	13480	
	4	1432	13368	
	5	1495	13291	

分别应用纤维微屈曲失效模型、纤维膝切失效模型及联合模型对 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料压缩强度进行预测,比较结果如表 2 所示。

表 2 各模型预测结果与试验数据的比较

Table 2 Comparative result between the predicted results and test results

材料 CCF300/QY8911	试验 结果	预测结果		
		微屈曲 模型	膝切 模型	联合 模型
压缩强度/MPa	1485	1029	2539	1425
相对误差/%		30.7	70.9	4.1

通过表 2 的比较结果可以看到,微屈曲模型预测结果比试验结果偏低,而膝切模型预测结果相对偏高,只有联合模型的预测结果与试验结果较为接近,且相对误差也与试验结果的变异系数较为接近。因此,通过联合模型对 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料纵向压缩强度进行预测能取得较好精度。

7 结 论

1) 提出一种 CCF300/QY8911 碳纤维增强复合材料压缩性能预测方法,可以对单向纤维增强复合材料的纵向压缩性能进行预测。

2) 传统的对于单向纤维增强复合材料压缩性能的预测总是单一的依据纤维微屈曲失效机理或纤维膝切失效机理,预测精度不高。

2) 本文方法通过将纤维微屈曲失效与膝切失效看作一个连续的失效过程,进而建立联合预测模型,真实地反映了整个压缩失效过程,并且较为全面地考虑了各个因素的影响。

4) 通过与试验数据进行对比分析,表明微屈曲失效模型预测结果偏低,而膝切失效模型预测结果偏高,联合模型能较为准确地对压缩强度进行预测。

参考文献:

- [1] Xu Y L, Reifsnider K L. Micromechanical modeling of composite compressive strength[J]. Journal of Composite Mater, 1993, 27(6): 572-588.
- [2] Buciansky B. Micromechanics [J]. Computers & Structures, 1983, 16(1): 3-12.
- [3] Naik N K, Kumar R S. Compressive strength of unidirectional composites: evaluation and comparison of prediction models[J]. Composite Structures, 1999, 46(3): 299-308.
- [4] Argon A S. Fracture of composite in treatise on materials science and technology[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [5] Camponeschi E T, Jr. Compression of composite materials: a review[M]. Washington D C: Defense Technical Infor-

- mation Center, 1991:550-78.
- [6] Schultheisz C R, Waas A M. Compressive failure of composites :Part I testing and micromechanical theories[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1966, 32(1): 1-42.
- [7] Jumahat A, Soutis C, Jones F R, et al. Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composite subjected to compressive loading[J]. Composite Structures, 2010, 92(2): 295-305.
- [8] Berbinau P, Soutis C, Goutas P, et al. Effect of off-axis ply orientation on 0° fibre microbuckling[J]. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(10): 1197-1207.
- [9] Berbinau P, Soutis C, Guz I A. Compressive failure of 0° unidirectional carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) laminates by fibre microbuckling[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(9): 1451-1455.
- [10] Guynn E G, Bradley W L, Ochoa O. A parametric study of variables that affect fibre microbuckling initiation in composite laminates: Part I analyses[J]. Journal of Composite Material, 1992, 26(11): 1594-627.
- [11] Fleck N A, Budiansky B. Compressive failure of fibre composites due to microbuckling[C]// Inelastic Deformation of Composite Materials. New York: Springer-Verlag, 1991: 235-273.
- [12] Moran P, Liu L, Shih C. Kink band formation and band broadening in fibre composites under compressive loading [J]. Acta Metall & Materialia, 1995, 43(8): 2943-2958.
- [13] Budiansky B, Fleck N A. Compressive failure of fibre composites[J]. Journal of Mech Phys Solids, 1993, 41(1): 183-211.
- [14] Chung I, Weitsman Y J. Model for the micro-buckling/micro-kinking compressive response of fibre-reinforced composites[J]. Applied Mechanics Review, 1994, 47(6S): S256-S261.
- [15] Jumahat A, Soutis C, Jones F R, et al. Analysis of compression failure of unidirectional carbon fibre/toughened resin composites [R]. Sheffield, UK: Proceedings of the 10th Conference on Deformation and Fracture of Composites (DFC10), 2009.