

文章编号:1000-6893(2009)02-0254-05

2.5 维机织复合材料纬向拉伸过程 初始屈服准则

郑君, 温卫东, 崔海涛, 高建辉

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

Original Yield of 2.5D Woven Composites Loaded in Weft

Zheng Jun, Wen Weidong, Cui Haitao, Gao Jianhui

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

摘要: 2.5 维机织复合材料已有较为广泛的应用,而目前对该类复合材料的破坏机理和失效原因尚未形成统一的认识。根据三维机织复合材料的拉伸试验现象,基于经纱曲面层板纬向纤维和树脂应力相等的假设,建立了 2.5 维机织结构复合材料纬向拉伸过程的初始屈服条件和屈服准则。通过对 2.5 维机织复合材料 3 种结构 12 个试件进行纬向拉伸试验及文献中的三维机织复合材料拉伸试验,与计算预测结果的对比表明本文中建立的初始屈服准则的合理性。研究表明,树脂横向裂纹是 2.5 维结构复合材料纬向拉伸过程初始屈服产生的直接原因;2.5 维机织复合材料出现纬向拉伸屈服的条件仅和经纱曲面层板内的经纱体积含量、纤维和基体的弹性模量及基体的拉伸破坏强度等因素有关,而与经纱曲面层的走向和层数无关。因为组分弹性模量不同,在纬向拉伸过程中,树脂应变高于复合材料的应变。树脂的初始横向裂纹首先发生在纤维密集处,并向富树脂区扩展;裂纹在向纤维方向扩展过程中受到纤维的阻碍而受到限制。

关键词: 2.5 维机织; 复合材料; 屈服准则

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A

Abstract: 2.5D woven composites are now in wide use, yet their failure mechanism is not clearly understood. From the tensile tests of 3D woven composites, the original yield condition and criteria of 2.5D woven composites loaded in weft are deduced based on the hypothesis that the matrix and fiber within the warp curved layers possess equal stress along the weft. To verify the original yield condition and the yield criteria, 12 samples of 2.5D woven composites with three different structures are selected for tensile tests in which the samples are loaded in the weft direction. Experiment results of these tests and examples in literatures are in good agreement with the outcome of the yield criteria. The conclusion is drawn that transverse cracks of the matrix is the direct reason of original yield. Original yield criteria of 2.5D woven composites are relative only to the fracture volume of warp in warp curve layers, the modulus of fiber and matrix, and the strength of the matrix, and they seem to have no relationship with the number of layers and warp direction. The strain of the matrix is larger than that of the composites because of the different modulus of its components when it is loaded in weft. Original cracks begin at places crowded with fibers, and spread in resin channels, which are prevented by fiber when they spread to tows.

Key words: 2.5D woven; composite; yield criteria

三维机织及 2.5 维机织复合材料明显改善了层合复合材料层间性能弱的缺点,因此越来越受到人们的关注。为最大限度地发挥上述结构复合材料的优势,研究者开展了针对该类复合材料力学性能的大量研究工作^[1-3],其中刚度特性研究较为充分^[4-5],而强度研究则相对较少。强度特性和失效准则是该类复合材料力学特性中较为复杂的

问题。研究复合材料细观破坏机理和失效准则是实现复合材料全程失效分析的基础,也是从细观角度研究复合材料强度的关键环节。三维及 2.5 维机织复合材料基于细观破坏机理的初始屈服准则研究是该类复合材料细观失效准则研究的重要组成部分,是该类复合材料强度研究的基础。

在对这类复合材料的破坏机理和强度特性的研究中,Cox^[6]首先进行了三维机织复合材料拉伸试验,Callus^[7],John^[8]等先后采用了经纱与纬

纱平直,接结经纱在厚度方向上加强的三维机织结构进行了拉伸试验。以上试验中,拉伸曲线在应变为 0~0.3% 的弹性阶段基本保持斜率不变,在应变为 0.3% 左右时(Cox 的试验在 0.6% 左右)出现不明显的转折点,即初始屈服点。此后材料的弹性模量出现折减并大致不变。Cox^[6] 将非线性刚度折减的现象归结于复合材料载荷方向上纤维非理想波动段塑性拉直过程,认为该初始屈服过程与纤维非理想波动段的波动角度有关,并给出了屈服起始点的计算公式。此后,Callus^[7] 的试验发现应变在 0.3% 时已出现富树脂区和接结经纱与树脂界面区域的树脂裂纹,在应变大于 0.3% 后,裂纹继续扩大,数量增多;除发现少量接结经纱散束破坏现象外,没有其他破坏现象出现。Callus 在研究中还发现应变超过 1.2% 后才出现纤维束非理想状态弯曲段的塑性拉直过程。John^[8] 在应变小于 0.3% 时发现了与拉伸载荷垂直方向的纤维束内树脂横向裂纹;在应变大于 0.3% 后,发现了与拉伸载荷平行方向的纤维束内树脂纵向裂纹,并将 0.3% 左右的初始屈服点归因于树脂的横向裂纹。燕瑛^[9] 和杨彩云等^[10] 也在试验中验证了三维机织结构复合材料在应变约 0.27%~0.30% 时出现弹性模量的折减。

上述的拉伸试验中,复合材料均在较小的应变(0.3%~0.6%)下达到初始屈服和相应的刚度折减。就碳纤维而言,未经复合的纤维,其破坏应变在 1.65% 左右,而合成后的碳纤维,其破坏应变在 1.50% 左右^[6],正常情况下,纤维不会在如此小的应变下出现断裂破坏,复合材料初始屈服过程也不会由纤维的断裂引起。Callus 的研究证实了应变为 0.3% 左右时,拉伸试件仅出现了树脂横向的裂纹,绝大部分纤维非理想波动段的塑性拉直过程也是出现在较大的应变(>1.2%)后,因此复合材料的拉伸初始屈服过程是由树脂横向破坏引起的^[7]。可以认为树脂出现横向裂纹的条件就是复合材料出现初始屈服过程的条件。

目前,对三维或 2.5 维机织复合材料的破坏机理和失效原因仍没有形成统一的共识,对于该类复合材料的初始屈服条件也没有较为清晰的认识。2.5 维机织复合材料作为三维机织复合材料的一种特例,具有与传统的三维机织复合材料相近似的力学特性和破坏机理。三维机织复合材料的力学试验分析可以为 2.5 维结构复合材料提供

有力的试验依据。

本文将同层的经纱视为曲面复合材料板。在横向载荷作用下,在经纱曲面内假设纤维和树脂具有相同的应力,推导在纬向拉伸条件下 2.5 维机织复合材料整体应变和树脂应变之间的关系。在此基础上,基于与拉伸载荷方向垂直的树脂横向裂纹的出现是纬向初始屈服的开始点,得出 2.5 维结构复合材料纬向拉伸过程中出现初始屈服的条件,将该条件作为纬向拉伸过程中的初始屈服准则,并进行试验验证。以此为基础进一步讨论纤维体积含量、纤维横向弹性模量和树脂弹性模量之比对初始屈服点的影响。

1 2.5 维机织复合材料纬向拉伸过程的初始屈服准则

1.1 纬向拉伸过程分析模型的简化

2.5 维机织结构由弯曲的经纱纱系和平直的纬纱纱系相互交织形成(见图 1)。在对该类结构的纬向拉伸特性分析过程中,将纬纱视为单向复合材料,将同层的经纱视为复合材料曲面复合材料单层板,则 2.5 维复合材料可认为是由互成 90° 的复合材料板组成。可见,2.5 维复合材料的纬向拉伸特性与 Callus, John 等采用的三维机织结构相近,并因此具有相近的力学特性和破坏机理。

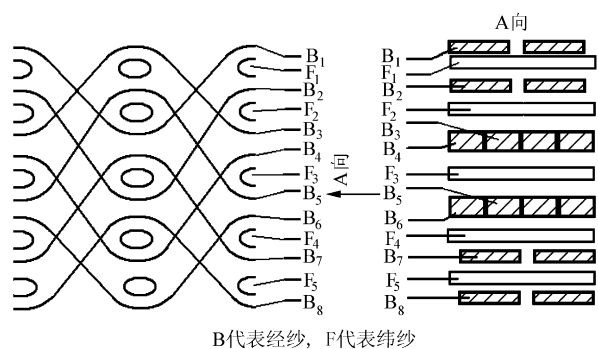


图 1 2.5 维浅交弯联结结构图
Fig. 1 2.5D bend-joint structure

按取向平均理论,2.5 维结构复合材料的纬向弹性模量 E_2 可以由下式计算^[6]

$$E_2 \approx f_w E_w^{(2)} + (1 - f_w) E_j^{(2)} \quad (1)$$

式中: f_w 为纬纱的纤维体积含量; $E_w^{(2)}$ 为纬纱的轴向弹性模量; $E_j^{(2)}$ 为经纱的横向弹性模量。

按式(1),2.5 维机织结构复合材料纬向弹性

模量主要由两部分组成,即纬纱轴向刚度(等式右端第1项)和经纱曲面层板的横向弹性模量(等式右端第2项)。在2.5维结构复合材料纬向拉伸出现树脂横向裂纹时,因裂纹的存在,经纱曲面层板的力传递路径和受力后的变形将出现变化,上式右端第2项出现折减,表现为复合材料整体弹性模量的折减。

1.2 纬向拉伸过程初始屈服条件的建立

树脂拉伸应变的大小直接决定了树脂是否出现破坏。在复合材料受拉变形过程中,树脂的应变很难直接测定,而复合材料整体应变的测量则相对容易。因此,建立复合材料应变和树脂应变之间的比值关系,通过校核树脂是否达到破坏以确定2.5维机织复合材料纬向拉伸初始屈服点,是一种较好的方法。

以经纱曲面层板为研究对象。在复合材料受纬向拉伸过程中,假设在经纱曲面板内:①经纱束内单丝相互平行无扭转;②纬向各截面上相对应的各点应力相等,即为纬向上树脂和纤维的应力相等。

在经纱曲面层板内,纬向拉伸变形量 Δl_Y 由纤维横向拉伸变形 Δl_f 和树脂拉伸变形量 Δl_m 两部分组成,即

$$\Delta l_Y = \Delta l_f + \Delta l_m \quad (2)$$

式(2)可进一步改写为

$$\epsilon_Y = \epsilon_f \frac{l_f}{l_Y} + \epsilon_m \frac{l_m}{l_Y} = \epsilon_f v_f + \epsilon_m v_m \quad (3)$$

式中: ϵ 为形变; l 为纬向长度; v 为经纱曲面层板的组分体积含量;下标 Y, m, f 分别代表复合材料整体、树脂及纤维。由假设条件②有

$$\epsilon_m E_m = \epsilon_f E_f^{(2)} \quad (4)$$

由式(3)及式(4)可得到

$$\epsilon_m = \frac{E_f^{(2)}}{v_m E_f^{(2)} + v_f E_m} \epsilon_Y \quad (5)$$

因此,

$$\sigma_m = \frac{E_f^{(2)} E_m}{v_m E_f^{(2)} + v_f E_m} \epsilon_Y = \frac{E_f^{(2)} E_m}{v_m E_f^{(2)} + v_f E_m} \frac{\sigma_Y}{E_Y} \quad (6)$$

式中: E_m 为树脂弹性模量; E_Y 为复合材料横向弹性模量; σ_m 为经纱曲面层板内树脂的应力; σ_Y 为复合材料整体拉伸应力。

当树脂的实际应力达到材料的许用应力 $[\sigma_s]$

时,单一纬向拉伸作用力条件下的树脂出现裂纹,复合材料纬向拉伸过程进入初始屈服过程。即初始屈服条件为

$$\frac{\sigma_m}{[\sigma_s]} \geq 1 \quad (7)$$

式中:许用应力 $[\sigma_s]$ 由树脂材料或树脂与纤维间的界面强度决定,一般通过单向复合材料横向拉伸试验获得。

根据式(6)和式(7)可见,三维或2.5维机织复合材料出现纬向拉伸屈服的条件仅和经纱曲面板内的经纱体积含量、纤维和基体的弹性模量及基体的拉伸破坏强度等因素有关,而与经纱曲面板的走向和层数无关。

2 试验验证及分析

2.1 理论计算的试验验证

为验证上述理论分析结果,采用T300-3K碳纤维和RTM技术合成2.5维机织结构复合材料,进行了4层浅交弯联结构、6层浅交弯联结构和4层浅交弯联加纱结构的12个试件样件的纬向拉伸试验(经纱密度:10根/cm;纬纱密度:3.5根/cm;加纱比:1)。

图2为12个试件拉伸破坏后的试件照片。各试件破坏形式接近,断口处较为平整;少数纬纱拉出,拉出长度不超过1mm;试件表面距断口60mm范围内有树脂横向裂纹。由断口向两夹持端方向,树脂开裂程度逐渐减轻。这一现象间接证明了树脂横向裂纹是初始屈服产生的原因。本文试验得到的12件试件的应力-应变曲线基本一致,再一次验证了在纤维和基体选定的条件下,纬向屈服条件仅和经纱曲面板内的经纱体积含量等因素有关,而与经纱曲面板的走向和层数无关

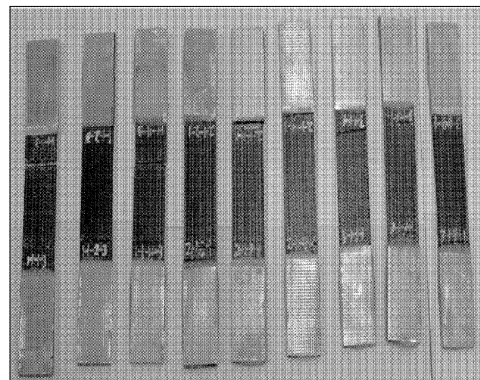


图2 2.5维机织结构复合材料试件

Fig. 2 Test samples of 2.5D woven composites

的结论。这里选择4层浅交弯联结构复合材料纬向拉伸应力-应变曲线(见图3)做以说明。由图3可见,拉伸曲线在应变为0.27%~0.30%间出现不明显的转折点,应变在0.30%以下时,复合材料弹性模量为定值;在拉伸强度达到100 MPa或应变达到0.30%左右时,曲线出现不明显的转折点,并在很小的应变范围内弹性模量出现非线性折减;在应变越过该狭小区域(0.30%左右)后,弹性模量基本维持不变直至拉伸破坏。由此可见该曲线与Callus等的试验拉伸曲线变化趋势一致。

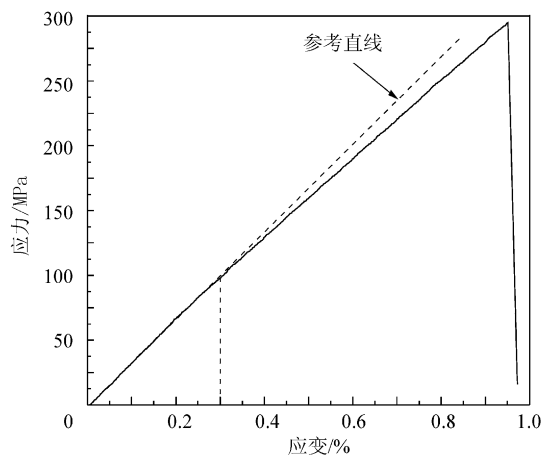


图3 2.5 维机织结构复合材料纬向拉伸曲线

Fig.3 Weft direction stress-strain curve of 2.5D composites

表1给出了本文2.5维机织复合材料拉伸应变的初始屈服点的预测结果和试验结果,还给出了文献[6]中三维机织复合材料拉伸应变的初始屈服点预测和试验结果的对比。

本文试验用机织复合材料经纱曲面层板内纤维体积含量选取0.785^[11-12]。由表1可见,复合材料初始屈服点的应变理论计算结果和试验结果吻合较好,说明本文对复合材料横向拉伸过程中所采用的屈服准则是合理的,对初始屈服点的计算方法可行有效。

表1 拉伸应变初始屈服点的结果对比

Table 1 Contrast of results in yield points between calculation and test

组分材料	E_m /GPa	$E_f^{(2)}$ /GPa	$[\sigma_s]$ /MPa	本文预测 值/%	试验值 /%
T300-3K/HCGP-1	4.55	40 ^[13]	40.5	0.267	0.3
AS4/RSL-1895 ^[6]	3.70 ^[13]	17 ^[14-15]	57.0	0.585	0.6 ^[6]

2.2 树脂与复合材料应变比值的影响因素分析

为进一步分析树脂和纤维的弹性模量及纤维

体积含量对树脂应变和复合材料整体应变比值的影响,本文根据式(5),计算了不同弹性模量比值,不同纤维体积含量条件下的树脂应变和复合材料整体应变的比值结果如图4所示。

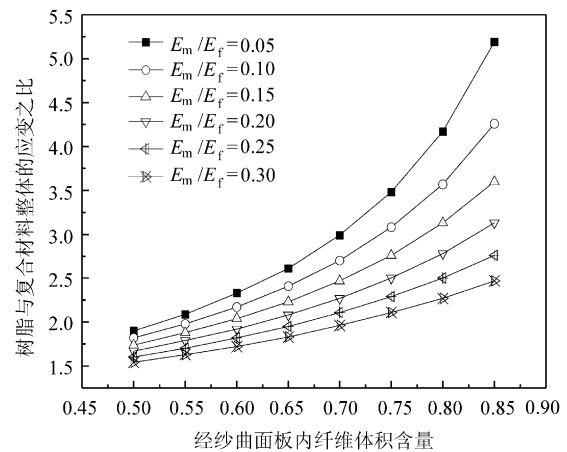


图4 树脂与复合材料应变比随曲面层板内纤维含量的变化曲线

Fig.4 Variation of strain ratio of matrix to composites vs fraction volume of fiber within warp curve layers

由图4的曲线可见,树脂应变与复合材料整体应变的比值与经纱曲面层板内树脂和纤维的体积含量密切相关,同时也与纤维的横向模量和树脂的弹性模量紧密相关。当树脂模量和纤维横向弹性模量比值固定时,随纤维体积含量增大,树脂应变与复合材料整体应变的比值就越大;当纤维体积含量固定时,随树脂的弹性模量与纤维的横向模量之比增大,树脂应变与复合材料整体应变的比值降低。而树脂应变和复合材料整体应变比值较大时,树脂就可能在复合材料整体应变较低的情况下出现初始屈服点,达到初始屈服条件。

由以上分析可进一步认为,在纤维分布不均的复合材料内部,树脂初始裂纹一般产生在纤维密集处。此后,随内部应力的逐渐增大,一方面裂纹向富树脂区方向逐渐扩展,而向纤维方向的扩展趋势受到纤维的抑制,形成裂纹在富树脂区较为明显的现象。另一方面裂纹数量增加。这一现象也可以从文献[7]提供的扫描电镜(SEM)照片中得到验证。

3 结论

(1) 基于三维机织复合材料的拉伸试验现象,建立了2.5维机织结构复合材料纬向拉伸过程的初始屈服条件和屈服准则,经与试验对比表

明本文建立的屈服准则是合理的,对初始屈服点的计算方法可行有效。

(2) 树脂横向裂纹是 2.5 维机织复合材料纬向拉伸过程中产生初始屈服过程的直接原因。三维或 2.5 维机织复合材料出现纬向拉伸屈服的条件仅和经纱曲面板内的经纱体积含量、纤维和基体的弹性模量及基体的拉伸破坏强度等因素有关,而与经纱曲面板的走向和层数无关。

(3) 因复合材料组分材料弹性模量不同,在纬向拉伸过程中,树脂拉伸应变高于复合材料的应变,增强纤维横向弹性模量越大,纤维含量越高,树脂承受的拉伸变形也就越大,也更容易在较低的复合材料应变的条件下出现树脂破坏。

参 考 文 献

- [1] Cox B N, Dadkhah M S, Morris W L. Failure mechanisms of 3D woven composites in tension, compression, and bending[J]. *Acta Metall Mater*, 1994, 42(12):3967-3984.
- [2] Cox B N, Flanagan G. Handbook of analytical methods for textile composites[R]. NASA CR-4750, 1997.
- [3] Tan P, Tong L Y, Steven G P. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. experimental investigation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(3):259-271.
- [4] 邢誉峰,田金梅. 三维正交机织复合材料单胞特征单元及其应用[J]. *航空学报*, 2007, 28(4): 881-885.
Xing Yufeng, Tian Jinmei. Unit cell eigen-element of 3D orthogonal woven composites and its applications[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(4): 881-885. (in Chinese)
- [5] 燕瑛,成传贤. 基于细观结构的三维机织复合材料弹性性能分析[J]. *航空学报*, 1999, 20(4): 289-294.
Yan Ying, Cheng Chuanxian. Analysis of elastic property for 3-D woven composites based on fabric microstructure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(4): 289-294. (in Chinese)
- [6] Cox B N, Dadkhah M S, Morris W L. On the tensile failure of 3D woven composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(6):447-458.
- [7] Callus P J, Mouritz A P, Bannister M K. Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, 30(11):1277-1287.
- [8] John S, Herszberg I, Coman F. Longitudinal and transverse damage taxonomy in woven composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32(8):659-668.
- [9] 燕瑛,楼畅,成传贤,等. 机织复合材料力学性能的细观分析与试验研究[J]. *复合材料学报*, 2001, 18(2):109-113.
Yan Ying, Lou Chang, Cheng Chuanxian, et al. Micromechanical analysis and experimental evaluation of the property of woven composite materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2001, 18(2):109-113. (in Chinese)
- [10] 杨彩云,李嘉禄,陈利,等. 树脂基三维机织复合材料结构与力学性能的关系研究[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(5): 51-55.
Yang Caiyun, Li Jialu, Chen Li, et al. Study of relationship between structures and mechanical properties of three-dimensional angle-interlock woven carbon/resin composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(5):51-55. (in Chinese)
- [11] Tan P, Tong L Y, Steven G P. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part II. FEA and analytical modeling approaches[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(3):273-281.
- [12] 丁辛,易洪雷. 三维机织结构的几何模型[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(5):108-113.
Ding Xin, Yi Honglei. A geometric model of three dimensional woven structures [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(5):108-113. (in Chinese)
- [13] Lee S K, Byun J H, Soon H H. Effect of fiber geometry on the elastic constants of the plain woven fabric reinforced aluminum matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 347(1/2):346-358.
- [14] Cox B N, Dadkhah M S. The macroscopic elasticity of 3D woven composites[J]. *Journal of Composites Materials*, 1995, 29(6):785-918.
- [15] Karbhari V M. Impact characterization of RTM composites: part I metrics [J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(15):4159-4166.

作者简介:

郑君(1974—) 男,博士研究生。主要研究方向:先进复合材料结构力学。

E-mail: zhengjun@nuaa.edu.cn

(责任编辑:李铁柏)