

文章编号 : 0253-9721(2007)10-0042-04

三维机织复合材料的弯曲疲劳性能

戎琦, 邱夷平

(东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要 在材料测试系统 MTS 上, 采用三点弯曲加载方式对超厚三维正交机织复合材料(玻璃纤维/不饱和聚酯)分别进行静态及疲劳试验, 对该材料的疲劳性能进行探索和预测。结果表明, 材料的疲劳衰变主要分为 3 个阶段: 产生小裂纹的初始阶段; 损伤累积扩张阶段; 材料刚度加速退化, 疲劳破坏阶段。材料中纤维的体积含量不仅对其静态力学性能影响很大, 对弯曲疲劳性能同样起到决定性作用。通过对弯曲疲劳加载后的剩余模量进行理论分析, 验证了理论分析和实验数据之间的一致性, 为实际预测复合材料剩余模量提供了依据。

关键词 超厚三维正交复合材料; 三点弯曲试验; 疲劳性能; 理论曲线

中图分类号: TB33 文献标识码: A

Bending fatigue behavior of 3-D woven composites

RONG Qi, QIU Yiping

(College of Textile, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract The 3-point bending test was performed on Material Testing System (MTS) to investigate the quasi-static and fatigue behavior of ultra-thick 3-D orthogonal woven composites (glass/unsaturated resin), which aimed to predict the fatigue property of this material. The results revealed that the fatigue degradation of the material includes three stages: micro-crack appearing at initial stage, a long process of crack propagation and fatigue failure of the material after suffering the extraordinary degradation of stiffness. In addition, the fiber volume fractions of composites have great impact on the quasi-static mechanical property and play a decisive role in the fatigue behavior. Comparisons made between experimental data and a theoretical fatigue model show good agreement, which can be used to predict the fatigue residual modulus of composites.

Key words ultra-thick 3-D orthogonal woven composites; three-point bending test; fatigue property; theoretical curves

随着纺织复合材料优异性能和减重效果的突显, 其应用几乎渗透到所有的技术领域, 尤其在航空航天领域的应用更为广泛。复合材料的强力及韧性与一般的金属材料相比要高得多, 而质量则要轻很多, 但是, 复合材料也存在着一些缺点。例如, 二维结构的层合板易分层, 其面外强力较小。三维结构复合材料的发展, 不仅提高了材料层间剪切的性能, 减少了分层, 还提高了厚度方向的强力及韧性。

近几十年来, 对复合材料的静态力学性能的研究已非常成熟, 而对材料疲劳性能的研究还不够深入, 对超厚三维正交结构复合材料疲劳性能的研究则更少。材料在疲劳状态, 其结构会在某种程度上

受到破坏, 因此, 其疲劳强力要小于静态强力。复合材料的疲劳性能不同于其他各向同性的材料, 他在疲劳初期就已经存在微小裂缝, 但仍能承受载荷直到完全破坏。以往的研究表明: 复合材料层合板的疲劳破坏机制是一个复杂的过程, 他包括纤维的断裂、树脂的破坏及分层^[1]等。从其破坏的现象看, 疲劳破坏可以通过剩余强度^[2-5,7-9]及刚度^[4-6,10]的减少来表示。剩余强度用于衡量疲劳破坏是具有一定意义的, 但这种方法只有通过破坏材料来获得, 而剩余刚度则无需破坏材料, 还能对疲劳破坏的发展进行跟踪。

本文主要对超厚三维正交机织复合材料(玻璃

收稿日期: 2006-04-07 修回日期: 2006-07-14

作者简介: 戎琦(1982—), 女, 硕士生。研究方向为超厚三维机织复合材料。邱夷平, 通讯作者, E-mail: ypqiu@163.com。

纤维/不饱和聚酯)的弯曲疲劳性能进行研究,在对剩余刚度进行分析的基础上对其疲劳性能进行预测。

1 理论分析

在受到疲劳加载的过程中,材料的模量会随疲劳次数的增加而逐渐减小,材料的疲劳加载过程就是其剩余模量逐渐减小的过程。

设 $E(n)$ 为经 n 次疲劳后的剩余模量(刚度),把剩余模量(刚度)的下降速率用第 n 次加载时的函数^[11]来表示

$$dE(n)/dn = -E(0)Qvn^{\nu-1} \quad (1)$$

式中: n 为加载循环次数; $E(0)$ 为初始模量; Q 和 ν 是根据加载应力、加载频率、应力比及环境变化的随机变量。

把循环载荷次数 n_1 和 n_2 代入式(1),得到

$$E(n_2) = E(n_1) - E(0)Q(n_2^{\nu} - n_1^{\nu}) \quad (2)$$

使式(2)中的 $n_1 = 0, n_2 = n$, 得到

$$E(n) = E(0)(1 - Qn^{\nu}) \quad (3)$$

设 $Q(k)$ 和 $\nu(k)$ 是试样加载 n_k 时的 Q 和 ν 值,则式(3)改写为

$$E(n) = E(0)[1 - Q(k)n^{\nu(k)}] \quad (4)$$

在边界条件 $n = n_k$ 时,即 $E(n) = E(n_k)$,由式(4)可得到 $Q(k)$ 和 $\nu(k)$ 的关系式

$$Q(k) = \left| 1 - \frac{E(n_k)}{E(n_0)} \right| / (n_k)^{\nu(k)} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到

$$E(n) = E(0) - [E(0) - E(n_k)](n/n_k)^{\nu(k)} \quad (6)$$

对式(6)进行线性变换,得

$$\ln\{[E(0) - E(n)]/[E(0) - E(n_k)]\} = \nu(k)\ln(n/n_k) \quad (7)$$

通过对试验中测得的刚度 $E(0), E(1), \dots, E(n_k), \dots, E(n)$ 进行线性回归,可求得经纬向的 $\nu(k)$ 分别为 0.836 和 0.555。

2 试验材料及制备

玻璃纤维/不饱和聚酯复合材料是用 2 400 tex 的玻璃纤维作经纬纱,110 tex 的芳纶(Twaron[®])作为 Z 方向的绑定纱并经三维正交织机制成预制件,通过 VARTM 技术加工成型。经差热分析法得到经纬向的纤维体积比分别是 21.1%, 28.5%, Z 绑定纱占

2.7%。

试样尺寸为 200 mm × 25 mm × 15 mm,三点弯曲静载和疲劳试验均在材料测试系统 MTS 810.23 上完成,参照 GB/T 1449—2005 进行试验。

3 三点弯曲静载和疲劳试验

三点弯静态试验采用三点加载简支梁方法,加载速度为 3 mm/min,跨距为 150 mm。

三点弯曲疲劳试验采用等幅稳定多次重复加载。在疲劳加载过程中,每隔 5 000 次停止疲劳加载进行 1 次静载试验,分别测试载荷及位移,并观察试样的破坏情况。

经纬向的静态弯曲极限载荷分别为 10、13.5 kN,因此分别取 3~8 kN 及 4~10 kN 为各自的疲劳上、下限,应力比 R 为 0.4,加载频率 2.5 Hz。

通过疲劳试验,可以得到刚度退化值(SD),计算公式为

$$SD = \frac{E_0 - E_n}{E_0} \times 100\% = \frac{\left| \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right|_0 - \left| \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right|_n}{\left| \frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right|_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中: E_0 为初始弯曲模量; E_n 为加载 n 次后材料的弯曲模量; ΔP 为最大载荷与最小载荷之间的差值; $\Delta \delta$ 为对应最大载荷与最小载荷的位移差值。

4 结果与分析

4.1 静态弯曲

经纬向弯曲载荷位移曲线如图 1 所示。在相同载荷下,经向的位移较大,纬向的位移较小,这是由材料经纬向纱线密度不同造成的。试样最外层发生拉伸破坏,以基体开裂、纤维拉伸断裂和抽拔为主;压头接触部位由于局部挤压也发生破坏^[12]。

4.2 弯曲疲劳试验

图 2 为试样跨距中点的位移和疲劳次数的关系曲线。在疲劳载荷上、下限时,试样跨距中点的位移均随疲劳次数的增加呈持续增长。在疲劳试验的初始阶段,位移随疲劳次数的增加变化剧烈,原因是材料存在缺陷和小孔洞,导致在初始阶段就产生小裂纹^[11],随着损伤的累积,位移迅速增加;在此之后变化比较平缓,但总的趋势是随疲劳次数的增加而增

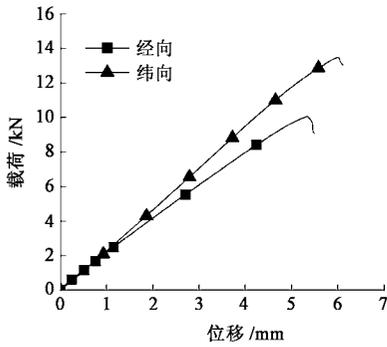


图 1 三点弯曲静态载荷位移曲线

Fig.1 Load-displacement curves of three-point bending test

加,这个阶段主要是裂纹缓慢扩展的过程,复合材料和金属材料不同,虽然早期疲劳损伤就已分布在复合材料的广大体积范围内,但是疲劳损伤的扩展速度非常缓慢;疲劳试验的最后阶段,材料应变迅速增加直至最终疲劳破坏。

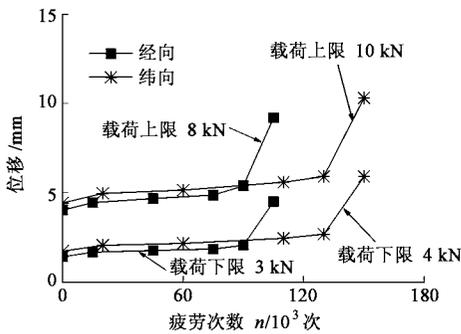


图 2 试样跨距中点的位移和疲劳次数的关系曲线

Fig.2 Displacement (center point of sample) vs. fatigue loading number curves

试验的刚度退化曲线如图 3 所示,与试样跨距中点的位移和疲劳次数的关系曲线一致,在疲劳试验初始阶段,材料刚度退化较快,随后材料经历较长的损伤累积过程,刚度退化比较缓慢,当疲劳次数达到 10 万次左右,材料刚度退化至初始刚度的 85% 左右,随后刚度退化速度逐渐加快,直至材料最终破坏。刚度退化过程贯穿整个疲劳试验,这种逐渐“软化”的特性,从安全设计的角度看具有很大意义,刚度的变化提供了疲劳损伤的早期征兆。

理论剩余刚度曲线(见图 4)表明,在一定程度上,试验值与理论值拟合较理想。

综上所述,虽然纤维增强复合材料疲劳损伤在早期就已出现,但仍需很长时间才能完全破坏;纬向由于纤维含量较高,刚度较大,其疲劳性能明显优于经向,随着材料刚度的提高,疲劳性能将大大改善。

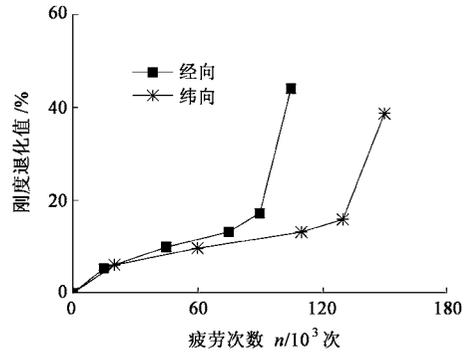


图 3 试样的刚度退化曲线

Fig.3 Curves of stiffness degradation

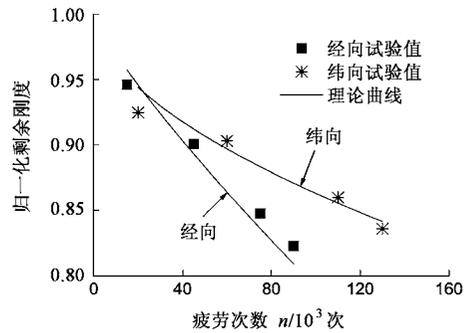


图 4 经向试样剩余弯曲刚度的理论值与试验值的比较

Fig.4 Comparison between experimental and theoretical residue bending stiffness

5 结 论

1) 整个疲劳试验,超厚三维正交复合材料经历了 3 个阶段:疲劳加载初期,弯曲刚度退化较快,主要是由复合材料小裂缝所致;第 2 阶段刚度退化趋于缓慢,这个过程较长;当弯曲刚度退化至某个临界值(初始刚度的 85% 左右)后,刚度退化再次加速,材料性能发生突变直至破坏。

2) 纬向疲劳性能优于经向。纤维含量对材料的疲劳性能有很大的影响,刚度的提高大大改善了材料的疲劳性能。

3) 剩余刚度的理论预测值在一定范围内和试验值拟合较好。

FZXB

参考文献:

[1] 邓增杰,周敬恩.工程材料的断裂与疲劳[M].北京:机械工业出版社,1995 :263 - 271 .
 [2] Hana H T, Kim R Y. Proof testing of composite materials[J]. J Com Mat,1975(9) : 297 - 311 .

- [3] Hana H T, Kim R Y. Fatigue behaviour of composite laminates [J]. J Com Mat , 1976(10) : 156 - 180 .
- [4] Awerbuch J, Hana H T. Fatigue and proof testing of unidirectional graphite /epoxy composite[C]// Reifsnider K L, Lauraitis K N. Fatigue of Filamentary Composite Materials . ASTM STP 636 ,1977 :248 - 266 .
- [5] Hana H T. Fatigue behaviour and life prediction of composite laminates [C]// Tsai S W. Composite Materials Testing and Design (Fifth Conf.) . ASTM STP 674 , 1979 : 383 - 417 .
- [6] Ó'Brien T K, Reifsnider K L. Fatigue damage evaluation through stiffness measurement of boron epoxy laminates [J]. J Com Mat , 1981(15) : 55 - 70 .
- [7] Broutman L J, Sahu S. Progressive damage of a glass reinforced plastic during fatigue[J]. 24th Annual RP/CI Conf, CPI, 1969 :55 - 67 .
- [8] Yang J N, Du S. An exploratory study into the fatigue of composites under spectrum loading [J]. J Com Mat , 1983 (17) : 511 - 525 .
- [9] Chou P C. Scale effect in fatigue of composite materials[J]. J Com Mat , 1979(13) : 178 - 194 .
- [10] Wang S S, Goetz P P, Corten H T. Shear fatigue degradation and fracture of random short-fibre SMC composites[J]. J Com Mat , 1984(18) : 2 - 20 .
- [11] Yang J N, Jones D L, Yang S H, et al. A stiffness degradation model for graphite/epoxy laminates [J]. J Com Mat , 1987, 24(6) : 753 - 769 .
- [12] 袁国青,黄争鸣,董国华.单向机织物增强复合材料层合梁弯曲破坏规律[J].同济大学学报:自然科学版, 2005 ,33(6) :794 - 799 .