

基体非线性对单向玻璃纤维增强 复合材料压缩性能的影响

王 红¹, 李卓球²

(1. 广东工业大学 建设学院, 广东 广州, 510643;
2. 武汉理工大学 结构工程学院, 湖北 武汉, 430070)

摘要:通过微观测试研究单向玻璃纤维增强复合材料(FRP)的纵向压缩破坏,并建立一个与纤维体积、基体和纤维的性质有关的模型来预测 FRP 的纵向压缩强度.实验中,设计了一个特殊加载装置用来放在 Leitz 光学仪器下观察压缩破坏过程,观察到一些纤维首先弯折,然后引起相邻纤维弯折系列响应,最后导致整个试件压缩破坏.强度预测与实验结果吻合较好,结果表明当纤维有微挠度特别是有微弯曲时,压缩强度与基体的非线性有关.

关键词:FRP;压缩强度;加载装置;纤维弯折

中图分类号:TB33

文献标识码:A

文章编号:1007-7162(2003)02-0038-04

许多学者研究了单向玻璃纤维增强复合材料(FRP)的纵向压缩破坏机理.早在 20 世纪 60 年代, Rosen 通过光弹实验,发现玻璃纤维的光弹应力图随温度变化而呈周期变化. Rosen 提出微观弹性失稳破坏模型,认为纤维在约束基体受压下产生周期性微观失稳破坏^[1].后来, Hahn 和 Sohi^[2]分别通过实验验证了 Rosen 的分析模型.尽管如此,许多实验结果对 Rosen 的微观弹性失稳理论提出疑问乃至否定. D. Hale^[3]的单向玻璃纤维增强复合材料压缩强度的实验结果远低于 Rosen 的预测值.越来越多的实验使破坏机理逐渐被认清,并建立了一些压缩破坏模型如“折曲带”破坏,纤维剪切撕裂破坏,基体破坏等等,用来预测单向玻璃纤维增强复合材料压缩强度.例如, Hahn^[4]建立了与纤维初始角和基体非线性有关的模型. Daniels^[4]和 Wison^[5]给出一个压缩强度的预测公式. 杨卫^[6]对纤维增强复合材料的微观压缩机理作过探讨.所有这些对研究复合材料压缩机理都很重要.尽管有上述理论公式,预测值仍比实测值高,甚至大很多.因此,有必要进一步研究纤维增强复合材料的破坏机理,并提出更精确的预测.根据微观实验观察到的压缩破坏现象并考虑基体的非线性,本文提出了一个单向纤维增强复合材料压缩强度的预测理论.

1 微观破坏模型

单向复合材料由纤维和基体组成,因此其压缩性能与纤维和基体有关.研究表明不同类型的纤维有不同的压缩破坏模型.例如,高模量的石墨纤维破坏是沿最大剪应力面剪切破坏;而 kevlar 纤维以弯折的形式破坏;玻璃纤维则是弯曲破坏.

基体破坏与纤维有关,表现为两种破坏类型:一种是与加载呈 45°方向的塑性流破坏;另一

收稿日期:2002-07-04

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(010025);广东省科技计划资助项目

作者简介:王红(1968-),女,讲师,主要研究方向为复合材料细观力学及空间网壳的稳定性计算.

种是小变形下的剪切屈服破坏.另外,不同工艺的纤维形状,如无绞接的纤维,纤维增强管和层合板,分别引起不同的压缩破坏.这表明压缩破坏模型复杂多样,只用一个微观模型难以描叙.一般地,一个微观破坏模型的适用性是有限性的.本文提出的模型用来预测单向玻璃纤维增强复合材料的压缩破坏强度.

本文在 Leitz 光学仪器下进行了压缩破坏实验,观察到了单向玻璃纤维增强复合材料的压缩破坏过程.结果表明当载荷达到某个值时,材料表面的一些纤维首先弯曲,然后引起邻近的纤维失稳和弯曲,最后导致整个试件破坏.因此,本文提出一个分析模型,如图1所示.

这个模型表明在纵向压力 p 作用下,当一些纤维弯曲时,会引起相邻的纤维弯曲.

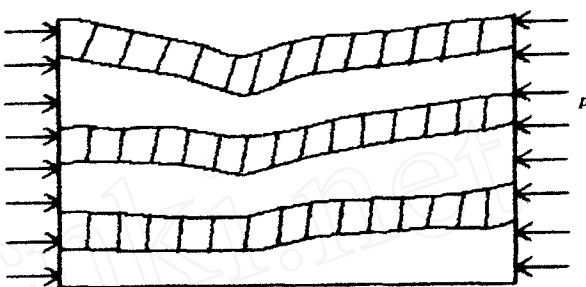


图1 分析模型

2 压缩强度的预测

为了建立单向玻璃纤维增强复合材料的压缩强度预测公式,作如下几点假设:

- ①纤维和基体的材料性质在混合前后一样.
- ②纤维之间互相平行,排列如图2所示.
- ③纤维和基体是各向同性的材料,其弹性性质在压缩和弯曲时一样.

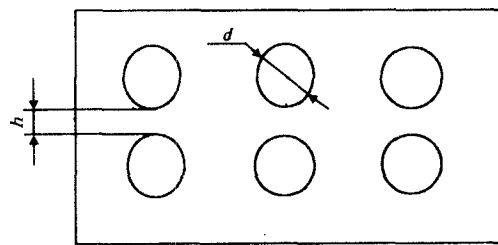


图2 纤维的假定排列

- ④基体与纤维间的粘结完好.

根据建立的模型和所作的假设,考虑纤维的一个微小单元体,其基本平衡微分方程为

$$E_f I_f V'''' + p V'' = q_1(x) - q(x) \quad (1)$$

$$E_f I_f (V^I + V^I)'''' + p (V^I + V^I)'' = q_1(x) - q(x) \quad (2)$$

式(2)中, V^I 和 $(V^I + V^I)$ 分别是纤维屈曲前后的横向挠度; x 是纤维的轴向坐标; I_f 是初始纤维的弯矩, $I_f = \frac{\pi d_f^4}{64}$; d_f 是纤维的直径; p 是纤维轴向受压均布荷载; $q_1(x)$ 是作用在纤维横向的附加载荷; $q(x)$ 是基体对纤维的支持力.

载荷 $q_1(x)$ 使纤维屈曲,但是弯曲挠度受到基体横向力 $q(x)$ 的限制.根据弹性力学理论, $q(x)$ 与横向挠度和基体弹性性质有关.即

$$q(x) = kV, \quad (3)$$

$$k = \frac{E_m d_f}{h}. \quad (4)$$

根据图2所示的模型,有

$$h = \frac{d_f}{2\sqrt{\frac{\pi}{V_f}}} - d_f. \quad (5)$$

当纤维相互接触时,有 $V_f = \pi/4$,这就使得 k 趋向无穷大,然而这是不可能的.因此有必要

进行修正. 当 $V_f \rightarrow \pi/4$ 时, k 为单向层合板的横向弹性模量, 这时有

$$k = \frac{E_f E_m}{E_f(1 - V_f) + E_m V_f}. \quad (6)$$

实际应用时, k 取用式(5)和式(6)计算值较小者.

由式(1)和式(2)很难精确解得 $q(x)$. 根据文中设定的微观破坏模型, 一纤维屈曲会对邻近纤维产生横向力. 由于与弯曲点相比, 横向受压纤维可认为无限长, 所以横向力近似为

$$q_1(x) = \begin{cases} p_1 & \text{在弯曲处} \\ 0 & \text{在其他点} \end{cases} \quad (7)$$

上述等式进一步描述了微观破坏模型, 即一纤维轴向受压并受基体约束时, 邻近纤维因弯曲失稳而使其产生初始弯曲挠度, 从而使其中心产生一横向力. 考虑纤维弯曲中心和纤维弯曲部分的边界条件, 联立方程(1)~(7)求解, 得

$$P_{cr} = \frac{2}{9} \sqrt{k E_f J_f}, \quad (8)$$

于是压缩强度预测公式为

$$\sigma_c = \frac{8 V_f}{9 \pi d_f^2} \sqrt{k E_f J_f}. \quad (9)$$

3 基体的非线性

基体材料的性质对纤维的压缩破坏模型有很大的影响. 对玻璃纤维增强复合材料来说, 玻璃纤维的断裂应变大约为 3%, 而环氧树脂基体的断裂应变为 1%. 当纤维屈曲时基体已处于塑性状态. 实验表明基体的塑性阶段较长. 利用依留辛加载规律, 假定基体的应力—应变关系为

$$\sigma_m = E_m(1 - \alpha \epsilon_m^n), \quad (10)$$

其中的参数值由实验曲线而得, 从上述式子可推得

$$E_m^s = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} = E_m(1 - \alpha \epsilon_m^n), \quad (11)$$

$$E_m^t = \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_m} = E_m[1 - \alpha(1+n)\epsilon_m^n]. \quad (12)$$

其中, E_m^s 表示割线模量, E_m^t 表示切线模量. 考虑复合材料受压屈曲破坏模型时, 一个很小的应力增量会导致整体屈曲破坏. 因此需要考虑切线模量. 不同的基体有不同的切线模量. 例如普通的环氧基体塑性区的切线模量是初始切线模量的 70% ~ 80%. 而有些普通的聚脂基体的比值是 50% ~ 60%. 因此基体的非线性不能忽略.

4 实例分析

考虑这两种玻璃纤维: S-玻璃纤维和 E-玻璃纤维, 基体材料分别用环氧和聚脂树脂, 材料常数如表 1 所示.

另外, 两种纤维的直径相同, 均为 $d_f = 9 \times 10^{-6}$ m, 复合材料的体积百分比 $V_f = 0.4$. 将参数值分别代入式(9), 压缩强度的计算值列在表 2 中.

表1 材料常数

	S-玻璃纤维	E-玻璃纤维	环氧树脂	聚脂树脂
E/GPa	85	73	3.5	3.1
E'/GPa			2.6	1.7

表2 压缩强度的预测值 MPa

	S-玻璃纤维		E-玻璃纤维	
	线性	非线性	线性	非线性
$\sigma_c(\text{环氧树脂})$	682.8	588.4	632.7	545.4
$\sigma_c(\text{聚脂树脂})$	642.6	475.9	595.5	441.0

5 结论

本文在单向玻璃纤维增强复合材料的微观测试过程中,观察到了因试件某处一些纤维的屈曲弯折,促使邻近纤维屈曲弯折,发生连锁反应,导致试件的最终破坏。

文章通过考虑基体的非线性建立了单向玻璃纤维增强复合材料的预测计算公式.计算结果表明考虑基体的非线性后,压缩强度降低.环氧基体复合材料的聚脂基体复合材料的压缩强度分别降低 16% 和 35%。

从本文的预测公式可知,压缩强度与纤维的含量,基体的非线性,纤维的初始挠度有关.更精确的分析和计算有待进一步的工作。

参考文献:

- [1] B. W. Rosen. Mechanics of Composite Strengthening in Fiber Composite Materials. American Society for Metals[J]. 1965, 2:35 - 39.
- [2] H. G. Hahn and M. M. Sohi. Compressive Properties of FRP[J]. Comp. Sci. Tech., 1986, 3:25 - 27.
- [3] D. 赫尔. 复合材料导论[M]. 张从寅等译. 北京:中国建筑工业出版社, 1989. 192 - 234.
- [4] M. R. Wison. Research of Composite Strengthening in FRP. Composites[J]. 1990, 21(5):403 - 407.
- [5] H. E. Daniels and T. H. R. Skyrme. The maximum of random walk in Fiber Composite Materials. Adv. Appl. Prob[J]. 1985, 17:85.
- [6] 杨卫. 结构增韧材料在裂纹扩展中的韧度增值. 力学学报[J]. 1991, 23(1):61.

Effect of Nonlinear Matrix on Compressive Properties of Unidirectional Glass Fibre - Reinforced Composites(FRP)

WANG Hong¹, LI Zhuo-qiu²

(1. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643, China;

2. Dept. of Construction Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, the longitudinal compressive failure of the unidirectional glass fiber - reinforced composites(FRP) is studied by microscopic test. The process of the compressive failure is observed and analysed in details. A model is made to predict the compress strength of FRP. This model depends on the fiber volume, the characteristics of the matrix and fibers. In the experiment, a special fixture is devised and made to observe the process of the compressive failure under the Leitz optical instruments. It is observed that some fibers kinking - buckling cause the adjacent fibers kinking - buckling and chain reaction, at last, the whole specimen fails in compression. Strength prediction is made. The prediction shows good agreement with the experimental data. The results show that the compressive strength depends on the properties of the nonlinear matrix when the fiber is in micro - deflection, especially in initial microbuckling.

Key words: FRP; compressive strength; loading fixture; fibers kinking - buckling