复合材料学报 第17卷 第1期 2月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol 17 No. 1 February 2000

文章编号: 1000-3851(2000)01-0122-04

纤维束增强复合材料的横向弹塑性性能研究

杨庆生 郑代华
(北方交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 利用细观力学模型和有限元法研究纤维束复合材料的横向弹塑性力学性能。假设弹性的纤维束均匀地分布于幂硬化弹塑性基体材料中,并假设纤维束内的纤维接触是光滑的。通过与单丝纤维复合材料的相应结果比较,研究了纤维成束对复合材料宏观弹塑性性能的影响。通过对硼/铝复合材料的数值研究表明:纤维的成束对复合材料的横向弹性刚度影响很小,而对复合材料的塑性变形和切线刚度有显著的影响。

关键词: 纤维束; 复合材料; 弹塑性; 接触效应
中图分类号: TB33 **文献标识码**: A

STUDY ON TRANSVERSE ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF FIBER BUNDLE REINFORCED COMPOSITES

YANG Qing-sheng ZHENG Dai-hua
(College of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The transverse elasto-plastic mechanical properties of fiber bundle reinforced composites were studied by using the micro-mechanical model and finite element method. It is assumed that the elastic fiber bundle is evenly distributed in the elastoplastic powerlaw-hardening matrix and the contact between fibers in the fiber bundle is smooth. The effect of fiber bundling on the overall elasto-plastic properties of composite material was investigated by comparing the results of fiber bundle composites with that of the single fiber composites. The numerical results for the Boron/Aluminum composite show that the transvers plastic deformation and tangent stiffness are considerably influenced by the fiber bundling. While the elastic properties of composites are microstructure-insensitive.

Key words: fiber bundle; composite materials; elasto-plastic; contact effects

纤维束复合材料的主要力学特征就是纤维的接触效应。首先纤维互相接触而产生相互作用,这种相互作用对宏观性能有不同程度的影响。其次若干根纤维互相接触在一起,增大了纤维的有效半径,这有利于提高纤维桥联基体裂纹的屏蔽作用,增加复合材料的断裂阻力和韧度。另外,纤维的成束改变了纤维-基体的界面结构,能够显著地影响裂纹的扩展方向和破坏模式[1]。

近几年来,越来越多的研究者认识到这种细观结构的几何缺陷对复合材料宏观性能影响的重要性,并致力于寻求与实际材料尽量相近的细观力学模型。文献[2]的研究结果表明纤维分布的不均匀性显著地影响热残余应力的局部分布,因而影响初始损伤模式,而对有效热膨胀系数没有影响。文献[3]和文献[4]分别研究了短纤维和连续纤维复合材料的几种典型纤维不均匀分布对复合材料有效扬氏模量和弹塑性细观应力场的影响,但这些工作尚未考虑到纤维的接触效应。

本文中主要研究纤维互相接触后的力学性质,并通过与纤维均匀分布模型的结果对照研究其影响。提出几种纤维束典型分布的力学模型,利用有限元法数值预测复合材料的横向弹塑性应力-应变曲线,并进行结果比较。

1 细观力学模型

这里主要研究有代表性的3种简单情况,即单

收稿日期: 1998-07-08; 收修改稿日期: 1998-12-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目
作者介绍: 杨庆生(1962), 男, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料细观力学.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

纤维、3 根束和 4 根束复合材料, 假设纤维(束)在基体材料中均匀分布并呈正方形周期排列。与单纤维复合材料的通常作法一样, 可以取出一个代表体元, 称作单胞(如图 1 所示), 其边界条件根据材料微结构的对称性和周期性以及单胞与周围材料的变形协调性确定。按照同样的原理, 3 根束和 4 根束的纤维束复合材料, 也可取出类似的单胞, 分别如图 2 和图 3 所示。下面依次研究这三种情况。

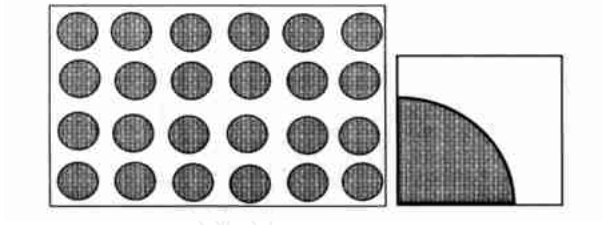


图 1 均匀纤维复合材料及单胞 (case 1)

Fig. 1 Single-fiber composite and unit cell (case 1)

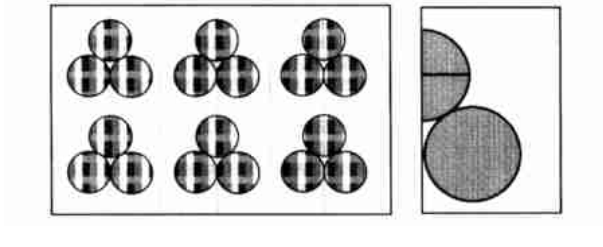


图 2 3 根束复合材料及单胞 (case 2)

Fig. 2 Three-fiber bundle composite and unit single cell (case 2)

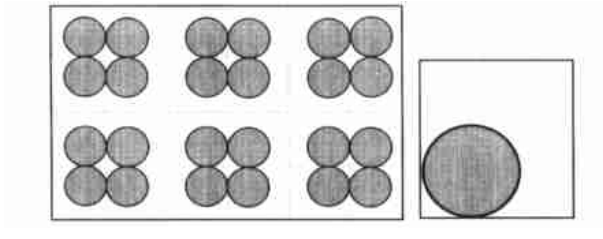


图 3 4 根束复合材料及单胞 (case 3)

Fig. 3 Four-fiber bundle composite and unit cell (case 3)

纤维之间的接触认为是光滑点接触。除了接触点外, 纤维与基体之间的界面条件假设为完好的, 即在界面上位移条件是连续的。单胞的边界条件根据对称性和协调性条件可以写成如下:

$$x = 0: \quad u = 0; \quad x = a: \quad u = \bar{u}$$

$$y = 0: \quad v = 0; \quad y = b: \quad v = \bar{v}$$

其中: a、b 是单胞的水平和竖向长度, $\bar{v}$ 是所施加的指定位移, $\bar{u}$ 则须根据单元与周围材料的协调性条件计算出来, 本文中将该边($x = a$)的平均应力为零作为协调性条件。

假设纤维为线性弹性材料, 其应力-应变关系由虎克定律给出, 由于本文中只考虑横向平面内的变形, 因而假设纤维在横向平面内为各向同性。基体假设为幂硬化的各向同性弹塑性材料, 其单轴应力-应变关系表示为

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0} & \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^n & \varepsilon \geq \varepsilon_0 \end{cases}$$

其中 σ_0 是初始屈服应力, $\sigma_0 = E\varepsilon_0$, n 是应变硬化指数, $0 \leq n \leq 1$, 当 $n = 1$ 时为弹性材料, 当 $n = 0$ 时为弹性理想塑性材料。在复杂应力状态下的本构关系由参数 E、n 和 σ_0 完全确定。

2 数值例题与分析

以硼纤维/铝合金(B/Al)复合材料为例, 其组分材料常数如下:

B: Young 氏模量 $E = 400$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.23$

Al: $E = 68.9$ GPa, $\nu = 0.35$, 初始屈服应力 $\sigma_0 = 68.9$ MPa, 应变硬化指数 n 取为 0、0.2、和 0.5

采用 Δ 常应变单元, 一个典型的有限元网格(对 3 根束)如图 4 所示, 在所有计算中, 取纤维(束)的体积含量为 0.5。数值计算主要针对 3 种情况进行, 即图 1~图 3 所示的单根纤维、3 根束和 4 根束复合材料。实际上, 由于纤维束可以由任意根纤维组成, 且有不同的排列形式。因此, 实际的纤维束大小和形状有相当多的组合, 本文中所研究的 3 根束和 4 根束可认为是最简单和最典型的情况。

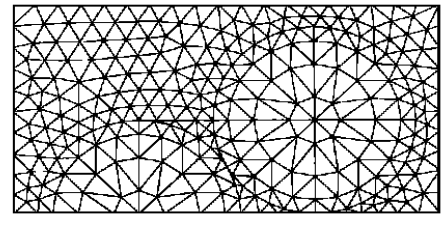


图 4 典型有限元网格(3 根束)

Fig. 4 Typical finite element mesh (case2)

值得指出的是纤维的成束将改变复合材料的横观各向同性性质, 例如, 4 根束复合材料在横向平面的 0°与 45°有不同的性能。本文中只考虑材料沿 0°方向的应力-应变关系。

计算结果分别绘于图 5~图 7, 其中每一种情况的基体硬化指数取 0、0.2 和 0.5, 以分别反映基体硬化指数对平均应力-应变的影响。显然, 这种影响

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

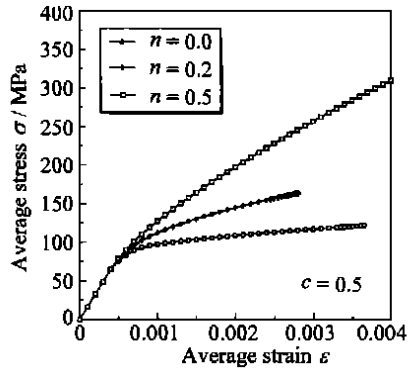


图 5 单丝纤维复合材料的横向变形

Fig. 5 Transverse σ-ϵ curve of single-fiber composite

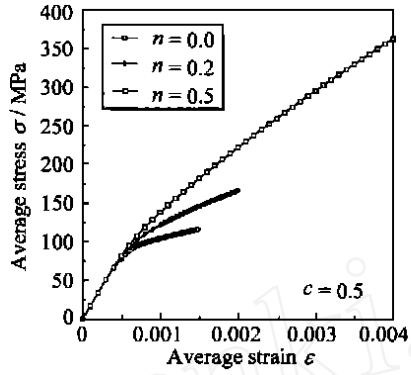


图 6 3 根束复合材料的横向变形

Fig. 6 Transverse σ-ϵ curve of three-fiber bundle composite

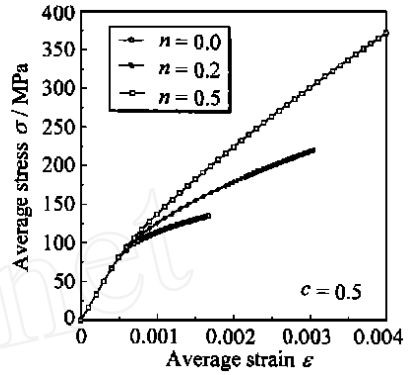
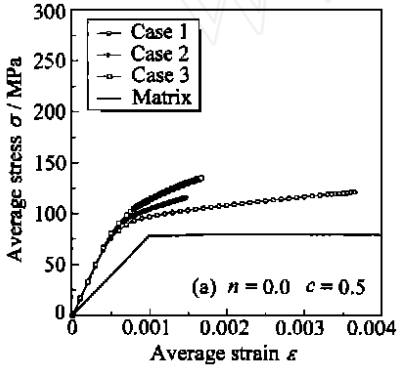
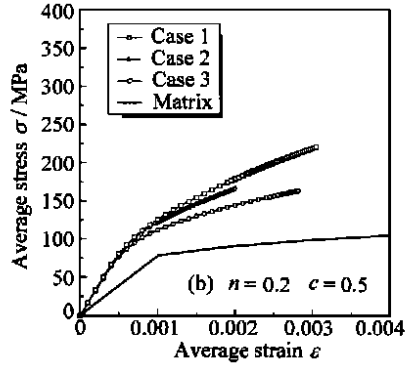


图 7 4 根束复合材料的横向变形

Fig. 7 Transverse σ-ϵ curve of four-fiber bundle composie





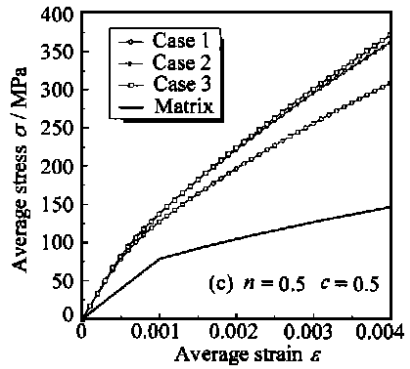


图 8 纤维成束对横向应力-应变曲线的影响

Fig. 8 The effect of fiber bundling on the transverse σ-ϵ curve

仅在变形的塑性阶段才表现出来。由于目前国内外对纤维束复合材料的研究工作极少,很难见到可供比较的实验和理论结果。但是,对于单丝纤维复合材料的研究工作极多,图 1 所示的细观力学模型是经无数的研究工作所采用并证实其正确性,所以对于单纤维复合材料,其力学模型的可靠性是无可置疑的。

纤维束复合材料与单丝纤维复合材料的结果比较见图 8。这些结果分别反映了在不同基体硬化指数下,纤维成束对复合材料的弹性性能的影响很小,但对塑性变形和切线模量却有显著的影响。纤维束含有越多的纤维,其横向弹塑性刚度越大。随着基体应变硬化指数的增大,纤维成束的影响在缩小,这从另一角度证明了上述关于纤维成束对复合材料的弹性性能影响很小的结论,因为当 n 取最大值 1 时,基体为弹性材料,纤维成束的影响应消失,本文的计算结果符合这种趋势。

3 结果讨论

在实验上,制备用于研究纤维相互作用的模型复合材料非常困难,而且对于实验过程的要求相当细致,因而实验结果数据很少,并且有些实验结论相差较大甚至相反[6]。本文中利用细观力学的方法和数值分析,首次给出了纤维束复合材料的横向弹塑性应力-应变曲线,并研究了纤维成束对复合材料性能的影响,对于理解纤维束复合材料在塑性变形阶段的增强机理有一定的帮助。主要表现在以下几个方面:

(1) 纤维的成束对复合材料的横向弹性模量影响很小,亦即横向弹性模量是一个微结构不敏感的物理量。这一结论很早就得出,并使得许多预测有效模量的细观力学模型得以成功[1, 4, 7],但这一结论是有条件成立的,即假设微结构是没有任何力学缺陷(裂纹、脱粘)的理想微结构。有些结果与实验结果不符的原因在于没有考虑实际存在的力学缺陷。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 纤维束复合材料的弹塑性(切线)模量显著高于单纤维复合材料的弹塑性(切线)模量, 平均应力-应变曲线的非线性越强, 这种差距越显著。这说明纤维成束对复合材料塑性变形有明显的影响。

(3) 纤维束复合材料的屈服与基体材料有所不同。复合材料的屈服没有基体材料那样的明显屈服点, 平均屈服应变小于基体的屈服应变, 但屈服应力没有相应的提高, 这可能由于复合材料中的应力集中使得基体材料的局部较早地进入塑性变形。

(4) 复合材料的应变强化效应远远大于基体的强化, 既使对于理想弹塑性的基体材料, 复合材料也有很强的应变强化, 这是纤维(束)增强的结果。

在上述结论中, 结论 1、3 和 4 具有一般性, 结论 2 仅在现有计算和基础上成立, 它与纤维束的大小和排列构型有关, 须对更多的纤维束微结构进行计算和比较。

参 考 文 献

[1] Piggot M R. Mesostructures and their mechanics in fiber composites [J]. *Adv Comp Mater*, 1996, 6(1): 75～81.

[2] Sorensen B F, Talreja R. Effects of nonuniformity of fiber distribution on thermally-induced residual stresses and cracking in ceramic matrix composites [J]. *Mech Mater*, 1993, 16: 351～363.

[3] 杨庆生. 短纤维复合材料的细观力学模型研究 [J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(2): 218～221.

[4] Bohm H J, Rammerstorfer F G. Fiber arrangement effects on the microscale stresses of continuously reinforced MMCS [C]. In: Pyrz R, ed. IUTAM Symposium on Microstructure-Property Interactions in Composite Materials. The Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1995. 51～62.

[5] 杨庆生, 杨 卫, 陈浩然, 等. 复合材料的宏观性能与参数设计 [J]. 力学与实践, 1996, 18(3): 1～7.

《复合材料学报》宣传介绍栏征稿

经《复合材料学报》第四届编委会决定,《复合材料学报》自 2000 年第 17 卷第 1 期起利用空白版面开辟宣传介绍专栏, 为从事复合材料研究的国家和部委级重点实验室、重点学科、博士点、科研机构、最新成果及产品做宣传介绍, 有意者请与复合材料学报编辑部联系。

联系电话: (010) 82316907

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net