

纤维表面粗糙度对复合材料力学性能的影响*

姚寅 陈少华

(中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室, 100190)

摘要: 针对具有纤维交叉排列结构的复合材料系统, 建立改进的剪滞模型研究界面改性过程中纤维表面粗糙度对复合材料内部应力传输及其整体刚度的影响。考虑纤维和基体间为理想界面, 并以弹性方式传递应力。由计算结果发现界面剪应力将随粗糙度增加而减小, 从而使界面更为安全, 而纤维应力基本不受粗糙度影响。同时复合材料刚度随粗糙度增加而增大, 体现了纤维表面物理改性对材料整体性能的增强效果。

关键词: 纤维增强复合材料, 表面粗糙度, 剪滞模型, 应力传输, 等效刚度

一、引言

纤维增强复合材料中具有惰性表面的纤维(碳、芳纶等)与基体粘结性能较差, 易导致界面脱粘失效现象出现^[1], 因此需要对纤维表面进行改性处理。一种重要的改性方法就是对纤维进行表面刻蚀以增加其粗糙度, 使界面啮合情况更好, 从而达到改善材料整体性质的目的^[2]。本文提出改进的剪滞模型分析改性处理后的纤维粗糙表面对具有纤维交叉排列结构复合材料内部载荷传输和整体刚度的影响。所得到的结果对于设计新型复合材料具有一定的参考价值。

二、理论模型

2.1 考虑纤维表面粗糙度的剪滞方程

对于纤维交叉排列的复合材料, 我们根据已有研究^[3], 选取代表元模型进行分析。但与经典模型不同的是此时纤维表面为粗糙表面。

2.2 弹性应力传递下的控制方程

对于表面粗糙的纤维微元建立平衡方程:

$$\begin{cases} E_f \frac{d^2 \bar{u}_1}{d\bar{x}^2} + \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{h} \frac{dh}{dx} (E_f \frac{d\bar{u}_1}{d\bar{x}}) + \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{G_m \Phi}{1-\Phi} \frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{h^2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \bar{\Delta}^2}{\bar{\lambda}^2} \sin^2(\frac{2\pi\rho\bar{x}}{\bar{\lambda}})} = 0 \\ E_f \frac{d^2 \bar{u}_2}{d\bar{x}^2} + \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{h} \frac{dh}{dx} (E_f \frac{d\bar{u}_2}{d\bar{x}}) - \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{G_m \Phi}{1-\Phi} \frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{h^2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \bar{\Delta}^2}{\bar{\lambda}^2} \sin^2(\frac{2\pi\rho\bar{x}}{\bar{\lambda}})} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

复合材料等效刚度的解析形式:

* 国家自然科学基金(10972220、10732050、11021262)资助项目

$$E_e = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} = \frac{\Phi E_f (< \sigma_{f1} > + < \sigma_{f2} >)}{2 [< \sigma_{f1} > + \frac{2E_f}{L} (u_2(0) - u_1(0))]} \quad (2)$$

三、结果分析

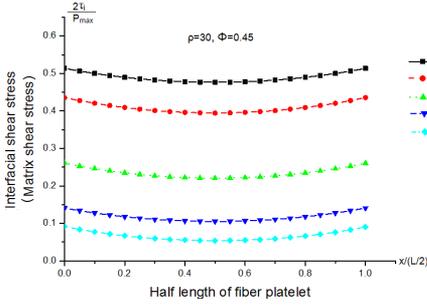


图 1 界面剪应力分布

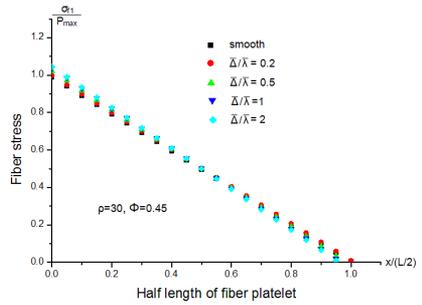


图 2 纤维应力分布

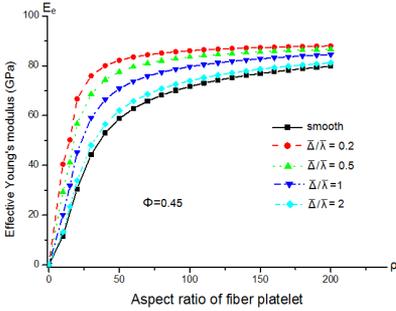


图 3 等效刚度随纤维长细比变化

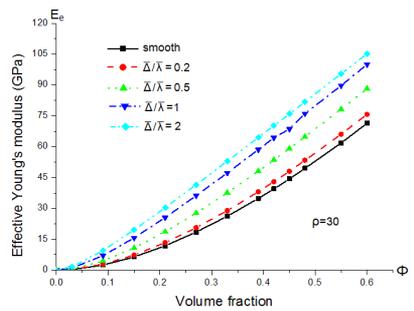


图 4 等效刚度随纤维体积分数变化

四、结论

(1) 纤维表面粗糙度增加使界面剪应力减小，从而使界面更为安全。同时纤维应力基本不变，这与以前关于纤维/基体间理想界面粗糙度影响的研究结果相符^[4]；

(2) 复合材料等效刚度随粗糙度增加而增大，使材料整体性能提高。但对于长细比较大纤维，粗糙度的影响相对并不明显。

参 考 文 献

- 1 Atkinson K E, Kiely C. Composite. Science and Technology, 1998; 58(12): 1917~1922
- 2 Kim S N, McMahon P E, Riggs J P et al. U.S. Patent, 4,374,114, Feb. 15, 1983
- 3 Zuo S C, Wei Y G. Acta Mechanica Solida Sinica 2007; 20(3): 198~205
- 4 Chai Y S, Mai Y W. Journal of Materials Science, 2001; 36(8): 2095~2104