

碳纤维表面粗糙度对碳/环氧树脂基复合材料界面性能的影响¹⁾

姚寅^{*}, 陈少华^{*,2)}

^{*} (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 碳纤维在制备过程中, 表面生成大量沿纤维轴向分布的微观沟槽, 形成轴向粗糙度。而增加纤维表面粗糙度亦是表面改性处理的一种手段, 达到改善复合材料界面粘结性能的目的。本文对碳纤维这一独特的表面微观形貌进行解析表征, 在此基础上建立考虑界面粗糙度影响的剪滞模型分析碳纤维从热固性环氧树脂基体中拔出的力学行为, 给出不同粗糙度下的外力-位移曲线, 详细考察轴向粗糙度增加对纤维/基体界面结合的增强效应。理论预测结果与实验结果符合较好。本文结果对碳纤维增强环氧树脂基复合材料的界面优化设计具有一定指导意义。

关键词: 碳/环氧复合材料, 轴向表面粗糙度, 剪滞方程, 纤维拔出, 表观界面强度

引言

碳纤维作为典型的高性能纤维, 具有高比模量、高比强度、轻质等优良特性。将其与环氧树脂混合制成的碳纤维增强环氧树脂基复合材料, 在保留了碳纤维优点的同时, 又兼有良好的热稳定性和抗腐蚀性。目前, 碳/环氧树脂基复合材料被广泛应用于航空、航海、汽车制造等众多工业领域中, 已成为最受关注的先进纤维增强复合材料^[1]。

在碳/环氧复合材料系统中, 树脂基体通过界面将载荷传递给具有高强度和高模量的碳纤维, 使碳纤维承载能力强的优势得以发挥。因此界面性质对复合材料的力学性能起着决定性的影响^[2-3]。但碳纤维表面呈现化学惰性, 与树脂基体浸润性差, 使得复合材料界面粘合性能较差, 易出现界面脱粘、纤维拔出等与界面失效密切相关的损伤现象, 降低材料整体性能^[4-5]。为克服这一缺陷, 研究者们采用多种物理或化学手段对碳纤维惰性表面进行改性处理, 使纤维/基体界面具有较高的粘合强度, 能够更好地传递应力^[5-7]。

通过扫描电镜观察, 可发现碳纤维表面上存在大量与纤维轴向平行的微观沟槽, 形成轴向粗糙度。而表面改性处理的一个重要目的就是通过表面刻蚀使微观沟槽加深, 数目增多, 从而扩大界面接触区域, 增强纤维与基体间的机械啮合能力(物理改性)。利用纤维拔出实验可以验证: 随着碳纤维表面轴向粗糙度增加, 复合材料的界面粘合性能有明显提高^[7-9]。

碳纤维表面粗糙度在改善界面粘合性能方面的重要性已被广泛关注。但目前相关研究仍大多限于实验, 较少涉及理论分析。在早期关于碳化硅和金属纤维的研究中, Kerans、Liu、Mai等人曾提出一系列基于剪滞法的理论模型用于研究界面粗糙度对纤维拔出或压出行为的影响, 并给出表面粗糙形貌的几种解析表征^[10-12]。但在这些模型中, 纤维表面微观沟槽取向均为环向(垂直于纤维轴向), 这与实验观察到的碳纤维表面形貌明显不符, 因此无法沿用这些模型分析碳纤维表面粗糙度对界面性能的增强效应。

本文将对碳纤维特有的轴向粗糙表面形貌进行解析表征, 建立考虑界面粗糙度影响的剪滞模型分析碳纤维从热固性环氧树脂基体中拔出的力学行为, 在此基础上研究纤维表面轴向粗糙度对界面粘合性能的增强效应。以期对改善界面强度方面给出一定的理论指导。

1 界面脱粘及纤维拔出问题

1.1 轴向粗糙度表征

根据实验观察结果, 图1给出碳纤维粗糙表面的理想构型。轴向沟槽沿纤维环向周期性排列, 纤维截

¹⁾ 本文得到国家自然科学基金(10972220, 10732050)和纳米重大基础研究计划(2012CB937500)的资助

²⁾ 通讯作者: 陈少华; E-mail: chenshaohua@hotmail.com

面沿轴向均匀，但其围线呈周期性起伏特征。类似Jiang、Waters等的研究^[13-14]，纤维半径 r_f 表示为：

$$r_f(\theta) = r_{f0} + \Delta \cos(2\pi r_{f0}\theta / \lambda) \quad (1)$$

式中 r_{f0} 为光滑表面碳纤维的半径，如图 1 所示。 Δ 和 λ 为微尺度粗糙表面上峰值和波长， θ 为环向坐标。表面粗糙纤维截面面积 A_f 和周长 c_f 分别表示为：

$$A_f = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r_f(\theta)} r dr \approx \pi r_{f0}^2 \quad (2)$$

$$c_f = \oint_{s_f} ds = \int_0^{2\pi} r_f(\theta) \sqrt{1 + [dr_f(\theta)/d\theta]^2 / [r_f(\theta)]^2} d\theta$$

由式(2)可以看出粗糙度几乎不改变纤维截面积，但截面周长增大，即纤维表面积增加，当 $\Delta \rightarrow 0$ 或 $\lambda \rightarrow \infty$ 时，则趋于光滑表面碳纤维的周长 $2\pi r_{f0}$ 。

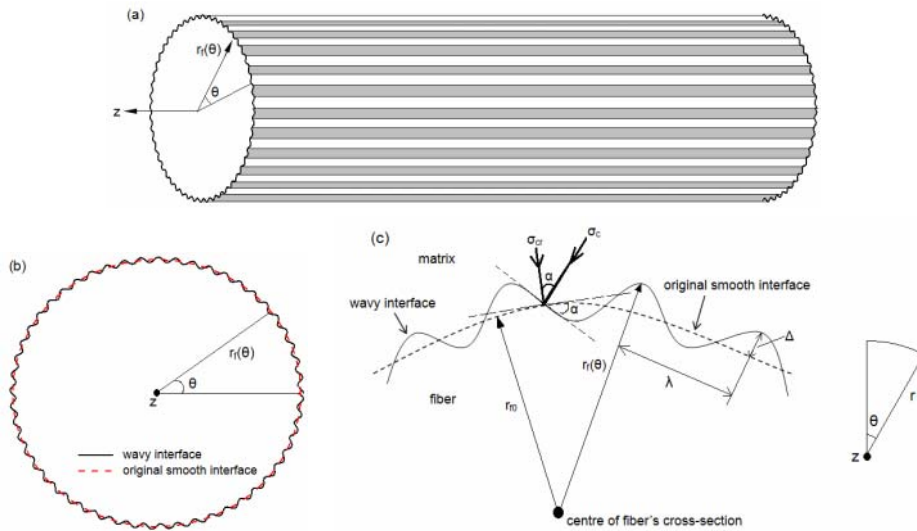


图 1 具有粗糙表面的单根碳纤维：(a) 3D 构型；(b) 纤维截面；(c) $r-\theta$ 平面内的粗糙表面

Fig.1 Single carbon fiber with rough surface: (a) 3-D configuration; (b) fiber's cross section; (c) rough surface in $r-\theta$ plane.

1.2 考虑轴向粗糙度的剪滞模型

图2(a)是一个典型的单纤维拔出实验示意图，树脂基体半径 r_m ，最外侧无径向约束，埋在基体中的碳纤维长度为 L ，在 $z=0$ 处均布拉伸荷载 σ_0 作用下界面发生脱粘，脱粘长度为 βL ($0 \leq \beta \leq 1$)。

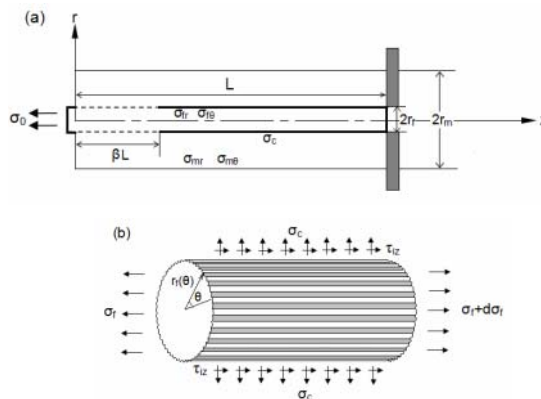


图2 (a) 单纤维拔出装置；(b) 具有轴向粗糙度的纤维微元

Fig.2 (a) Single fiber pull-out device; (b) infinitesimal fiber element with longitudinal roughness

根据平衡条件有：

$$\sigma_0 = \sigma_f + \frac{1}{\gamma} \sigma_m; \quad \gamma = \frac{A_f}{\pi r_m^2 - A_f} \approx \frac{r_{f0}^2}{r_m^2 - r_{f0}^2} \quad (3)$$

σ_f , σ_m 分别表示碳纤维和树脂基体中的轴向应力。由图 2(b)的纤维微元受力分析, 可得考虑粗糙度影响的剪滞关系:

$$\begin{aligned} (\sigma_f + d\sigma_f)A_f + dz \oint_{s_f} \tau_{iz} ds &= \sigma_f A_f \\ \rightarrow \frac{d\sigma_f}{dz} &= -\frac{\oint_{s_f} \tau_{iz} ds}{\pi r_{f0}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 τ_{iz} 为界面剪应力, dz 为纤维微元长度。在脱粘区域界面上, τ_{iz} 满足库伦定律, 由图 1(c)中力分解关系可得:

$$\begin{aligned} \tau_{iz} &= -\mu \sigma_c = -\mu \sigma_{cr} / \cos \alpha \\ &= -\mu \sigma_{cr} \sqrt{1 + [dr_f(\theta) / d\theta]^2 / [r_f(\theta)]^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 μ 为摩擦系数, σ_c 为垂直于粗糙界面切平面的接触压应力, σ_{cr} 为 σ_c 在径向方向上的分量, α 是光滑界面与粗糙界面切平面的夹角。

当界面脱粘, 纤维发生摩擦滑移, 表面的微观轴向沟槽与滑动方向平行, 因此不会产生类似于环向粗糙纤维情况下的径向失配现象^[10-12]。由于表面粗糙峰值远小于纤维半径, σ_{cr} 仍可以表示为与光滑界面上相同的形式^[12]:

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= (\sigma_{fr})_{r=r_f} = q_0 - q_v \\ q_0 &= \frac{E_m (\kappa_m - \kappa_f) \Delta T}{\alpha(1-\nu_f) + (1+2\gamma+\nu_m)}, \quad q_v = k_1 \sigma_f(z) - k_2 \sigma_0 \\ \alpha &= \frac{E_m}{E_f}, \quad k_1 = \frac{\alpha \nu_f + \gamma \nu_m}{\alpha(1-\nu_f) + (1+2\gamma+\nu_m)}, \\ k_2 &= \frac{\gamma \nu_m}{\alpha(1-\nu_f) + (1+2\gamma+\nu_m)} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 σ_{fr} 为纤维中的径向应力, 其在界面上的值包括两部分: 在固化过程中形成的热残余压应力 q_0 和由泊松效应引起的径向应力 q_v 。 E_f , ν_f , κ_f , E_m , ν_m , κ_m 分别表示碳纤维和树脂基体的杨氏模量、泊松比和热膨胀系数。联立式(4)-(6)得到:

$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{\mu(q_0 - q_v)}{\pi r_{f0}^2} \int_0^{2\pi} \left\{ 1 + \frac{1}{[r_f(\theta)]^2} \left[\frac{dr_f(\theta)}{d\theta} \right]^2 \right\} r_f(\theta) d\theta \quad (7)$$

对式(7)无量纲化处理, 进一步得到:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_f}{d\bar{z}} &= \frac{2\rho\mu(q_0 - q_v)}{\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ 1 + \frac{1}{[\bar{r}_f(\theta)]^2} \frac{4\pi^2 \bar{\Delta}^2}{\lambda^2} \sin \frac{2\pi\theta}{\lambda} \right\} \bar{r}_f(\theta) d\theta \\ \bar{r}_f(\theta) &= 1 + \bar{\Delta} \cos \frac{2\pi\theta}{\lambda}, \quad \bar{\Delta}, \bar{\lambda}, \bar{r}_f = \Delta, \lambda, r_f(\theta) / r_{f0} \\ \rho &= L / 2r_f \approx L / 2r_{f0} \end{aligned} \quad (8)$$

求解方程(8)并考虑边界条件 $\sigma_f(0) = \sigma_0$, 纤维内的应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_f(\bar{z}) &= \frac{q_0 + k_2 \sigma_0}{k_1} - \left(\frac{q_0 + k_2 \sigma_0}{k_1} - \sigma_0 \right) \exp\left(-\frac{2r_1 \rho \mu k_1 \bar{z}}{\pi}\right) \\ r_1 &= \int_0^{2\pi} \left\{ 1 + \frac{1}{[\bar{r}_f(\theta)]^2} \frac{4\pi^2 \bar{\Delta}^2}{\lambda^2} \sin \frac{2\pi\theta}{\lambda} \right\} \bar{r}_f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $0 \leq \bar{z} \leq \beta$ 。

1.3 外力—位移关系及表观界面强度

在外力 σ_0 作用下，整个纤维拔出过程由两个阶段组成：(1).界面脱粘阶段：脱粘区内界面剪应力遵循库伦摩擦定律，而粘附区内为弹性变形传递^[12, 15]；(2).完全脱粘后的纤维拔出，界面剪应力为滑动摩擦力。两个阶段对应的外力和拔出位移分别表示为 σ_{0d} , δ_d ; σ_{0p} , δ_p 。

1.3.1 界面脱粘

方程（10）给出了界面脱粘的能量准则，

$$G_{cr} = \frac{\partial U_t}{\partial S_d} = \frac{\partial U_t}{\partial(\beta L \oint_{s_f} ds)} = \frac{1}{L \oint_{s_f} ds} \frac{\partial U_t}{\partial \beta} \quad (10)$$

G_{cr} 为界面断裂韧性， S_d 为脱粘区面积， U_t 为系统弹性应变能，即：

$$U_t = U_{ft} + U_{mt} \quad (11)$$

U_{ft} , U_{mt} 分别表示碳纤维和树脂基体中的弹性应变能。各应力应变分量服从广义Hooke定律：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{jr} &= \frac{1}{E_j} [\sigma_{jr} - \nu_j (\sigma_{j\theta} + \sigma_j)] \\ \varepsilon_{j\theta} &= \frac{1}{E_j} [\sigma_{j\theta} - \nu_j (\sigma_{jr} + \sigma_j)] \\ \varepsilon_{jz} &= \frac{1}{E_j} [\sigma_j - \nu_j (\sigma_{jr} + \sigma_{j\theta})] \\ \varepsilon_f^r &= 0, \tau_f^r = 0, \varepsilon_m^r = \frac{2(1+\nu_m)}{E_m} \tau_m^r \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $j=f$, m 分别代表纤维和基体。联立式(3)、(4)、(6)、(9)、(10)-(12)，可以得到界面脱粘阶段的外力。

纤维在加载端 $z=0$ 处拔出位移 δ_d 的无量纲形式表示为^[12]：

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_d &= \frac{\delta_d}{L} = \frac{1}{E_m} |\lambda_1 f_0 + \beta (\lambda_2 \sigma_{0d} + \lambda_3 q_0)| \\ f_0 &= \frac{\beta (q_0 + k_2 \sigma_{0d})}{k_1} - \frac{\pi [q_0 + (k_2 - k_1) \sigma_{0d}]}{2k_1^2 r_1 \mu \rho} \times (1 - e^{-\frac{2\rho k_1 r_1 \mu \beta}{\pi}}) \\ \lambda_1 &= \alpha + \gamma - 2k_1 (\alpha \nu_f + \gamma \nu_m), \quad \lambda_2 = 2k_2 (\alpha \nu_f + \gamma \nu_m) - \gamma \\ \lambda_3 &= 2(\alpha \nu_f + \gamma \nu_m) \end{aligned} \quad (13)$$

由此可见，脱粘过程中外力和位移为脱粘长度 β 的函数，随脱粘长度的变化而呈现非线性变化，

$$\begin{cases} \sigma_{0d} = \sigma_{0d}(\beta) \\ \bar{\delta}_d = \bar{\delta}_d(\beta) \end{cases} \quad (14)$$

1.3.2 完全脱粘后纤维拔出

当界面完全脱粘后，界面应力传输遵循库伦摩擦定律^[15-17]。此阶段外力与位移可表示为：

$$\begin{aligned} \sigma_{0p} &= \frac{[1 - e^{-\frac{2\rho k_1 r_1 \mu (1 - \bar{\delta}_p)}{\pi}}] q_0}{k_1 - k_2 + k_2 e^{-\frac{2\rho k_1 r_1 \mu (1 - \bar{\delta}_p)}{\pi}}} \\ \bar{\delta}_p &= \frac{\delta_p}{L}, \quad (\bar{\delta}_d)_{\beta=1} \leq \bar{\delta}_p \leq 1 \end{aligned} \quad (15)$$

此时外力随拔出位移增大而减小，当位移 δ_p 与纤维长度 L 相等时，纤维全部拔出，拔出力变为零。

1.3.3 表观界面强度

纤维拔出实验中通常引入表观界面强度 τ_a 来衡量界面粘合程度^[8, 18]，即：

$$\tau_a = \frac{\sigma_{0m} \pi r_{f0}^2}{2\pi r_{f0} L} = \frac{\sigma_{0m}}{4\rho} \quad (16)$$

式中 σ_{0m} 为界面脱粘阶段的最大外力。可以看出表观界面强度与碳纤维长细比和最大脱粘外力相关，反映了界面实际的承载能力。

2 结果与讨论

对于碳/环氧树脂复合材料体系，材料参数如下： $E_f=230\text{GPa}$ ， $E_m=3\text{GPa}$ ， $\nu_f=0.2$ ， $\nu_m=0.35$ ， $\mu=0.3$ ， $\kappa_f=12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $\kappa_m=55\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $G_{cr}=200\text{J/m}^2$ ， $r_m=4r_{f0}$ ， $\Delta T=-150^\circ\text{C}$ ， $\rho=L/2r_{f0}=10$ 。纤维表面轴向粗糙度通过表面粗糙峰值和波长的比值 Δ/λ 来衡量。 Δ/λ 越大，表面越粗糙； Δ/λ 趋于0时，表面趋于光滑。根据Chen等人的实验^[8]，表1给出 Δ/λ 与表面刻蚀时间的关系：

表1 不同表面刻蚀时间下的 Δ/λ 值
Table 1 Values of Δ/λ for different surface etching time

Etching time (h)	Δ/r_{f0}	λ/r_{f0}	Δ/λ
0 h	0	/	0
24h	0.0055	0.286	0.019
48h	0.0072	0.171	0.042
72h	0.009	0.122	0.074
96h	0.012	0.107	0.112
120h	0.016	0.086	0.186

2.1 纤维拔出问题

2.1.1 外力—位移关系曲线

由式(14)首先得到界面脱粘阶段外力和脱粘长度在不同粗糙度下的变化关系：

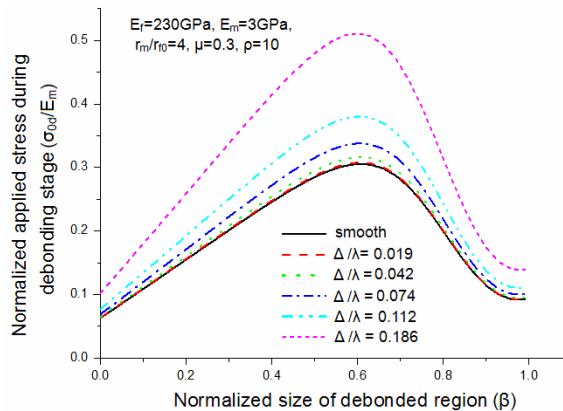


图5 界面脱粘阶段外加拉伸载荷和脱粘长度在不同粗糙度下的关系曲线

Fig.5 The normalized applied tensile load during the debonding stage versus the normalized debonded length for different interface roughness

如图5所示，当刚开始发生界面脱粘时($\beta=0$)，外加拉力为有限值，并随着脱粘程度增加而逐渐增大；在达到峰值 σ_{0m} 之后，界面快速脱粘直至完全失效，而外力下降较快。由方程 $d\sigma_{0d}/d\beta=0$ 可求出 σ_{0d} 达到最大值时对应的无量纲脱粘长度 $\beta_c \approx 0.63$ ，这与Piggort针对碳/环氧树脂复合材料的理论预测结果基本一致^[19]。同时发现 σ_{0d} 随着 Δ/λ 增加而明显增大，说明粗糙的界面提高了界面的粘合强度。

由式(14)、(15)得到整个碳纤维拔出过程中的外力—位移曲线，与Bismarck等得到的实验结果^[20]进行比较，可以看出实验数据和理论预测量级一致。由于缺少必要的实验参数，很难进行定量比较，但可发现两个定性相同的特征：(1) 外加拉力均在很小的位移范围内达到最大值，(如图 6(a)所示)；(2) 将实验和理论曲线放大(图 6(b)、(c))，发现外力在达到最大值后(点A)，均会迅速降至有限值(点B)，同时界面完全脱粘，接着呈现明显的“摩擦控制”特点^[15,21]。

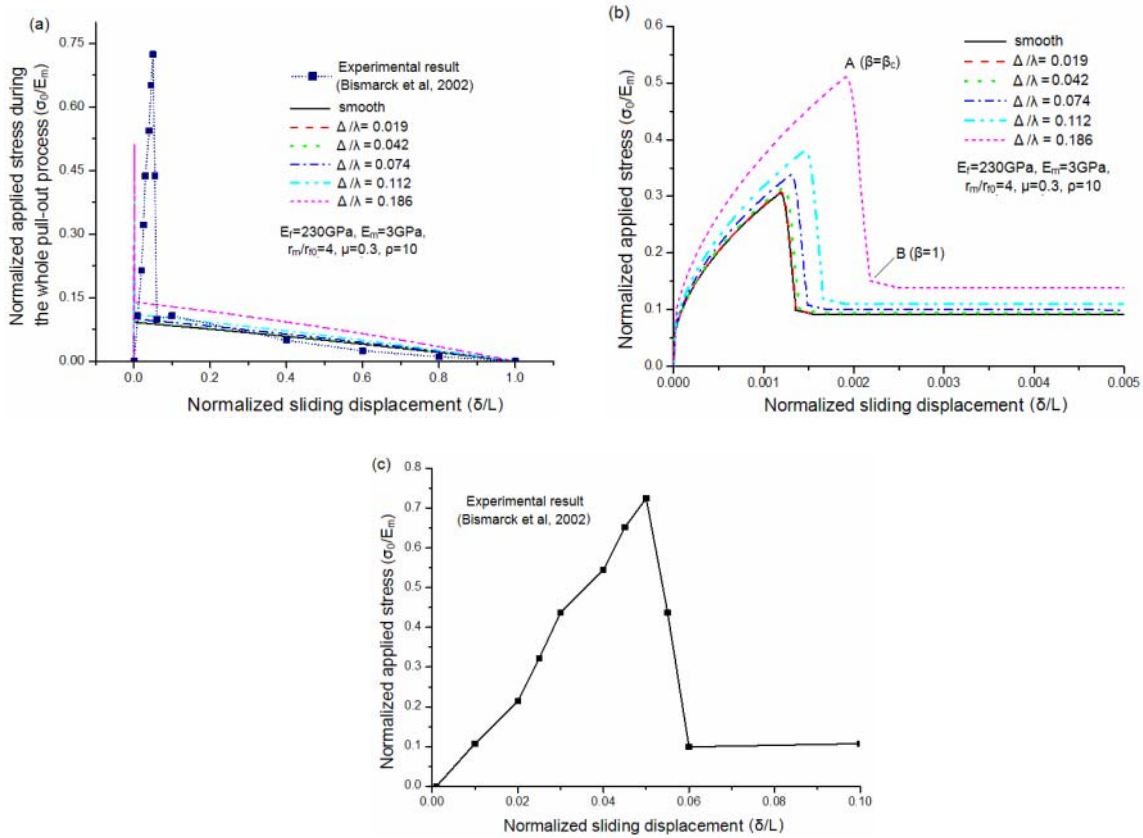


图 6 (a) 不同粗糙度下整个纤维拔出过程中的外力—位移曲线；(b) $0 \leq \delta \leq 0.005$ 范围内的外力—位移理论曲线；(c) $0 \leq \delta \leq 0.1$ 范围内的外力—位移实验曲线^[20]

Fig.6 (a) Applied load—displacement curves during the whole pull-out process for different interface roughness; (b) amplifications of the applied load—displacement theoretical curves when $0 \leq \delta \leq 0.005$; (c) amplifications of the applied load—displacement experimental curve when $0 \leq \delta \leq 0.1$ ^[20]

2.1.2 界面粗糙度对表观界面强度的增强效应

图 7 首先给出不同长细比碳纤维的表观界面强度 τ_a 随表面刻蚀时间的变化关系，可以看出理论预测与 Song 等人的实验结果^[8]处于同一量级，且 $\rho=20$ 时与实验结果符合最好，说明理论预测外加拉力最大值 σ_{0m} 的合理性。当长细比一定时， τ_a 随表面刻蚀时间增加而增大，反映出表面改性对界面粘合强度的提高作用。但随长细比增大，粗糙度对界面强度的增强效应呈现先增大后减小的趋势，这一现象在图 8 中表现更为清晰：当粗糙度一定时，长细比存在一个极限值 ρ_c ，使表观界面强度达到最大。

由于方程 $d\tau_a/d\rho=0$ 为一个超越方程，无法解析求得 ρ_c 的表达式，仅能给出一个大致的长细比范围 $30 \leq \rho \leq 45$ ，在此范围内，界面粗糙度一定时，长细比对表观界面强度的增强效应最为明显。可见，在碳/环氧复合材料具体设计中，可在此优化范围内选择碳纤维长细比，从而使表面改性对界面强度的提高作用达到最优。

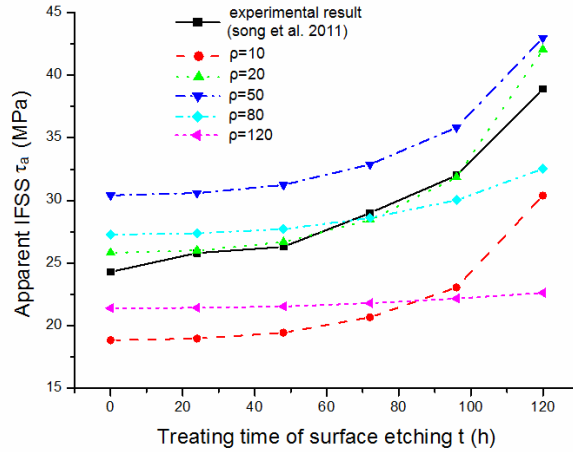


图 7 不同碳纤维长细比下表观界面强度随表面刻蚀时间的变化关系

Fig.7 Apparent IFSS versus surface etching time for different carbon fiber's aspect ratios

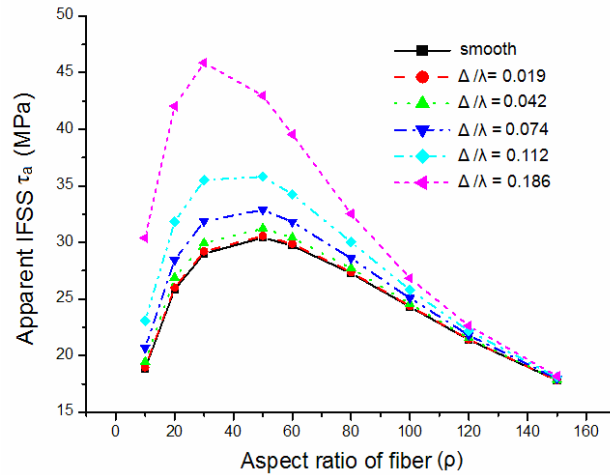


图 8 不同粗糙度下表观界面强度随碳纤维长细比的变化关系

Fig.8 Apparent IFSS versus carbon fiber's aspect ratio under different interface roughness

3 结论

本文针对碳纤维特有的轴向粗糙表面形貌对复合材料界面性能的影响进行理论分析，建立了考虑粗糙度的剪滞模型，分析碳纤维表面粗糙度在纤维拔出问题中对界面结合性能的影响，结果发现：

碳纤维表面粗糙度的增加提高了界面粘结强度，即界面脱粘需要更大的外力作用，碳纤维表面改性可改善界面粘合强度，拔出外力与位移的理论结果关系与实验定性特征符合；当碳纤维长细比为30~45范围时，粗糙度对界面强度的增强效应达到最优。本文结果对碳纤维增强环氧树脂基复合材料的界面优化设计具有一定的指导意义。

致谢：

本文得到国家自然科学基金（10972220, 10732050）和纳米重大基础研究计划（2012CB937500）的资助。

参考文献

1. Mukhopadhyay M. Mechanics of composite materials and structures [M]. India: Longman, 2005.
2. Hughes J D H. The carbon fiber/epoxy interface—A review. Compos Sci Technol, 1991, 41(1): 31-45.
3. Luo Y F, Zhao Y, Duan Y X, et al. Surface and wettability property analysis of CCF300 carbon fibers with different sizing or without sizing. Mater Des, 2011,

32(2): 941-946.

4. Meng L H, Chen Z W, Song X L, et al. Influence of high temperature and pressure ammonia solution treatment on interfacial behavior of carbon fiber/epoxy resin composites. *J Appl Polym Sci*, 2009, 113(6): 3436-3441.
5. Fu Y F, Xu K, Li J, et al. The influence of plasma surface treatment of carbon fibers on the interfacial adhesion properties of UHMWPE composite. *Polym-Plast Technol & Eng*, 2012, 51(3): 273-276.
6. Bai Y P, Wang Z, Feng L Q. Interface properties of carbon fiber/epoxy resin composite improved by supercritical water and oxygen in supercritical water. *Mater Des*, 2010, 31(3): 1613-1616.
7. Rhee K Y, Park S J, Hui D, et al. Effect of oxygen plasma-treated carbon fibers on the tribological behavior of oil-absorbed carbon/epoxy woven composites. *Compos Part B*, 2012, 43(5): 2395-2399
8. Song W, Gu A J, Liang G Z, et al. Effects of surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites. *Appl Surf Sci*, 2011, 257(9): 4069-4074.
9. Xie J F, Xin D W, Cao H Y, et al. Improving carbon fiber adhesion to polyimide with atmospheric pressure plasma treatment. *Surf Coat Technol*, 2011, 206(2-3): 191-201.
10. Kerans R G, Parthasarathy T A. Theoretical analysis of the fiber pullout and pushout tests. *J Am Ceram Soc*, 1991, 74(7): 1585-1596.
11. Liu H Y, Zhou L M, Mai Y W. On fiber pull-out with a rough interface. *Philos Mag A*, 1994, 70(2): 359-372.
12. Chai Y S, Mai Y W. New analysis on the fiber push-out problem with interface roughness and thermal residual stresses. *J Mater Sci*, 2001, 36(8): 2095-2104.
13. Jiang L Y, Huang Y, Jiang H, et al. A cohesive law for carbon nanotube/polymer interfaces based on the van der Waals force. *J Mech Phys Solids*, 2006, 54(11): 2436-2452.
14. Waters J F, Lee S, Guduru P R. Mechanics of axisymmetric wavy surface adhesion: JKR - DMT transition solution. *Int J Solids Struct*, 2009, 46(5): 1033-1042.
15. Gao Y C, Mai Y W, Cotterell, B., 1988. Fracture of fiber-reinforced materials. *J. Appl. Math. Phys. (ZAMP)* 39(4), 550-572.
16. Lin Z, Li C V. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *J Mech Phys Solids*, 1997, 45(5): 763-787.
17. Mackin T J, Warren P D, Evans A G. Effects of fiber roughness on interface sliding in composites. *Acta Metall Mater*, 1992, 40(6): 1251-1257.
18. Hampe A, Kalinka G, Meretz S, et al. An advanced equipment for single-fibre pull-out test designed to monitor the fracture process. *Compos*, 1995, 26(1): 40-46.
19. Piggott M R. Failure processes in the fibre-polymer interphase. *Compos Sci Technol*, 1991, 42(1-3): 57-76.
20. Bismarck A, Menner A, Kumru M E, et al. Poly(carbazole-co-acrylamide) electrocoated carbon fibers and their adhesion behavior to an epoxy resin matrix. *J Mater Sci*, 2002, 37(3): 461-471.
21. Yue C Y, Cheung W L. Interfacial properties of fiber-reinforced composites. *J Mater Sci*, 1992, 27(14): 3843-3855.

EFFECTS OF CARBON FIBER'S SURFACE ROUGHNESS ON THE INTERFACIAL PERFORMANCES OF CARBON/EPOXY COMPOSITES¹⁾

Yao Yin^{*}, Chen Shaohua^{*,2)}

^{*} (LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Many longitudinal striations and grooves are generated on carbon fiber's surface in the manufacturing process, leading to the formation of longitudinal surface roughness. One of the Surface modification approaches is to increase fiber's surface roughness, which helps to improve the interfacial adhesions. This paper presented an analytical characterization of carbon fiber's special surface morphology with longitudinal roughness, based on which a shear-lag model considering effects of interface roughness was developed to analyze the carbon fiber pullout behavior from a thermosetting epoxy resin matrix. The applied load—displacement curves for different longitudinal surface roughness were given, and the enhancement of fiber/matrix interfacial adhesion due to roughness was checked in detail. The theoretical results agree well with the experimental ones, which have an instructive significance for the optimal design of interfaces in carbon-fiber reinforced epoxy composites.

Key words: carbon/epoxy composites, longitudinal surface roughness, shear-lag equation, fiber pull-out, apparent interfacial shear strength (apparent IFSS)

1) The project was supported by the NSFC through Grants #10972220, #10732050, and #2012CB937500.

2) E-mail: chenshaohua72@hotmail.com