

# 短切纤维增强复合材料拉伸强度的预测 \*

孙爱芳<sup>1,2</sup> 刘敏珊<sup>1</sup> 董其伍<sup>1</sup>

1. 郑州大学热能工程研究中心 郑州 450002

2. 河南机电高等专科学校 新乡 453002

**摘要** 在分析单向连续纤维增强复合材料纵向拉伸时细观受力与变形的基础上,对连续纤维的长度和方向进行尺寸和方向性修正,给出了短切纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式.使用这个预测公式计算短切碳纤维增强 PTFE 复合材料的拉伸强度,预测值与实验值吻合得较好.

**关键词** 材料科学基础学科, 拉伸强度, 短切纤维, 复合材料

**分类号** TB332

**文章编号** 1005-3093(2008)03-0333-04

## Prediction of tensile strength for short-fiber-reinforced composites

SUN Aifang<sup>1,2</sup> LIU Minshan<sup>1\*\*</sup> DONG Qiwu<sup>1</sup>

1. Thermal Engineering Research Center of Zhengzhou University, Zhengzhou 450002

2. Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002

\* Supported by the Innovation Fund for Outstanding Scholar of Henan Province No.0621001600 and The Science and Technology Development Project of Henan Province No.0524260042.

Manuscript received October 15, 2007; in revised form January 8, 2008.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel:(0371)63887312, E-mail:mshliu@zzu.edu.cn

**ABSTRACT** From lengthways tensile strength of unilateral uninterrupted fiber reinforced composite, and analyzing the meso-mechanics and deformation, a strength predicting formula of short fiber reinforced composite has been established by using the dimensions of short fiber to amend the influence of its length and orientation on tensile strength. To check the validity of the formula, the predicted results and experimental data for the short carbon fiber reinforced PTFE composites have been compared, and a good agreement is found.

**KEY WORDS** foundational discipline in materials science, tensile strength, short fiber, composites

随机取向的短纤维增强复合材料具有比连续长纤维增强复合材料更好的模压性,成本较低且便于自动化生产<sup>[1]</sup>.复合材料的优势在于其性能的可设计性,而强度是复合材料结构设计的重要依据.短切纤维增强复合材料的强度预测对新设备的选材、设计和安全评估有十分重要的意义.短切纤维增强复合材料的模量预测已经接近问题的实质水平<sup>[2]</sup>,根据各组成相材料的性能从理论上导出其基本强度参数,也是工程界和学术界关心的问题.虽然很多学者已经做了

大量的工作<sup>[3-5]</sup>,但是至今还没有一个实际工程中计算复合材料主要性能的简明公式.

在化纤行业长丝的生产中,硫酸加热是一个典型的高温强腐蚀工况.普通材料甚至不锈钢都难以用于工作在此环境下的换热器,用昂贵的耐腐蚀合金制造的换热器寿命也很低.聚四氟乙烯具有极好的抗腐蚀性,用短切碳纤维增强聚四氟乙烯(PTFE)复合材料制造导热复合材料紧凑型板壳式换热器<sup>[6]</sup>,可改善其综合机械性能、抗蠕变和耐疲劳性<sup>[7]</sup>.但是,目前还没有一个适用的计算公式快速而准确地预测不同配方短切碳纤维增强聚四氟乙烯复合材料的拉伸强度.本文在单向连续纤维增强复合材料模型的基础上给出了短纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式,并以短切碳纤维增强聚四氟乙烯复合材料为例对其进行验证.

\* 河南省杰出人才创新基金 0621001600 和河南省科技发展计划 0524260042 资助项目.

2007 年 10 月 15 日收到初稿;2008 年 1 月 8 日收到修改稿.

本文联系人:刘敏珊,教授

### 1 短切纤维增强复合材料拉伸强度预测公式的建立

对于单向连续纤维增强复合材料,其纵向拉伸方向即受力方向与纤维的方向一致,因此可看作受拉超静定弹性杆系<sup>[3]</sup>(图1).当纤维与基体具有相同的拉伸破坏应变时,有

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (1)$$

其中下标 c、f、m 分别对应复合材料、纤维和基体,而 A 为研究模型各部分的截面积,σ 为截面上的应力.令  $V_f = A_f/A_c$ ,  $V_m = 1 - V_f$  分别为增强纤维和基体的体积分数,则单向连续纤维增强复合材料的拉伸强度与纤维和基体的拉伸强度的关系为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (2)$$

其中  $\sigma_{cu}$ 、 $\sigma_{fu}$ 、 $\sigma_{mu}$  分别为复合材料、纤维和基体的拉伸强度.

对于脆性纤维增强塑性基体,基体的破坏应变

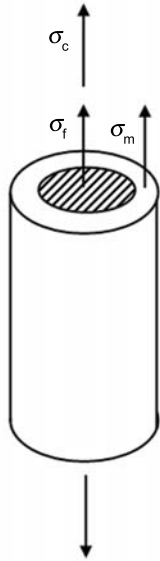


图1 套筒模型  
Fig.1 Sleeve model

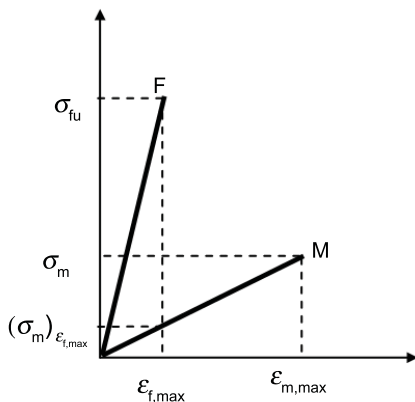


图2 纤维与基体的应力应变示意图  
Fig.2 Stress-strain map of fiber and matrix

$\epsilon_{m,max}$  比纤维的破坏应变  $\epsilon_{f,max}$  高得多(图2).当应变达到  $\epsilon_{f,max}$  时,纤维因应力达到其强度值  $\sigma_{fu}$  而破坏,这时由纤维控制的复合材料的最大应力为

$$\sigma_{c,max} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}} (1 - V_f) \quad (3)$$

此式为单向纤维增强复合材料的纵向拉伸强度的计算公式.纤维破坏后( $\sigma_f=0$ )基体承担全部载荷,复合材料所能承受的最大应力为

$$\sigma'_{c,max} = \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (4)$$

由式(3)和(4)得到复合材料强度与纤维体积分数的关系(图3).从图3可见,当  $V_f < V_{min}$ (最小体积分数)时,  $\sigma'_{c,max} > \sigma_{c,max}$ ,由基体控制复合材料的强度;当  $V_f > V_{min}$ ,  $\sigma_{c,max} > \sigma'_{c,max}$ ,由纤维控制复合材料的强度.由图3可得,使纤维能实现增强作用的最小纤维体积分数  $V_{fc}$  即临界体积分数为

$$V_{fc} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}}{\sigma_{fu} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}} \quad (5)$$

这时,如果所有纤维都破坏,剩下的基体就没有能力单独承担外力作用.

因纤维的长度和方向等因素的影响,短切纤维增强复合材料的力学行为不同于长纤维增强复合材料,因此必须对其拉伸强度计算公式(即式(3))进行修正.

#### 1) 纤维的长度修正

纤维的临界长度( $l_c$ ),为能够达到纤维的拉伸强度  $\sigma_{fu}$  的最小纤维长度.假定复合材料的界面切应力  $\tau_s$  为常量,并考虑拉伸应力与切应力之间的平衡,即  $\pi d_f \cdot l_c \cdot \tau_s = 2 \cdot \frac{\pi}{4} (d_f)^2 \cdot \sigma_{fu}$ ,则纤维的临界长度为

$$l_c = \frac{\sigma_{fu}}{2\tau_s} \cdot d_f \quad (6)$$

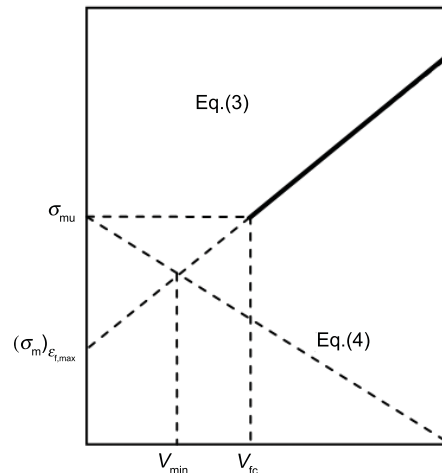


图3 复合材料强度与纤维体积分数的关系示意图  
Fig.3 Stress-volume fraction sketch map

其中  $d_f$  为纤维截面直径,  $\tau_s$  可取基体或界面的剪切强度中较小者. 本文涉及的纤维长度大于临界长度, 可用平均纤维应力  $\bar{\sigma}_f$  修正纤维长度的影响. 对于界面剪切强度为常量的情况,  $\bar{\sigma}_f = \sigma_{fu} [1 - \frac{l_c}{2l}]$ , 用复合材料破坏时基体的应力  $\sigma'_{mu}$  代替  $(\sigma_m)_{\varepsilon_{f,max}}$ , 则对纤维长度修正后复合材料的拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} (1 - \frac{l_c}{2l}) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f) \quad (7)$$

临界体积分数为

$$V_{fc} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_{mu}}{\sigma_{fu} (1 - \frac{l_c}{2l}) - \sigma'_{mu}} \quad (8)$$

对于相同的纤维和基体材料, 短纤维增强复合材料的临界体积分数比连续纤维增强复合材料的高.

## 2) 纤维的方向性修正

Zhu 等<sup>[5]</sup> 根据大量纤维的几何排布规律分析了三维空间随机分布纤维和单向纤维增强复合材料的拉伸强度, 提出用纤维的长度效应来修正短纤维增强复合材料中的轴向应力分布的不均匀性. 令  $k=l_c/l$  且  $\theta = \cos^{-1}k$ , 对  $l_c$  的方向性影响系数为  $\frac{2\theta}{\tan\theta}$ , 假设全部纤维拉伸强度相等、每根纤维长度相等、纤维在基体中随机分布、界面为理想状态, 则可将式 (7) 修正为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} (1 - \frac{k\theta}{\tan\theta}) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f) \quad (9)$$

且

$$V_{fc} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_{mu}}{\sigma_{fu} (1 - \frac{k\theta}{\tan\theta}) - \sigma'_{mu}} \quad (10)$$

(9) 式即为可用于工程计算的短切纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式.

## 2 短切碳纤维增强PTFE复合材料拉伸强度的预测和实验验证

碳纤维具有优良的力学性能、耐腐蚀性和材料稳定性, 与聚四氟乙烯 (PTFE) 复合后具有良好的抗腐蚀性和耐老化性能<sup>[8]</sup>. 选用普通国产碳纤维的平均直径  $8.3 \mu\text{m}$ , 长度  $106 \mu\text{m}$ , 拉伸强度  $1000 \text{ MPa}$ . PTFE 基体的拉伸强度  $21.3 \text{ MPa}$ , 剪切强度取  $40 \text{ MPa}$ . 使用这些参数, 由式 (6) 计算出临界纤维长度  $l_c$  为  $102 \mu\text{m}$ ,  $k=l_c/l=0.96$ ,  $\theta = \cos^{-1}k=0.28$ ; 由式 (10) 计算出临界体积分数为  $V_{fc} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_{mu}}{\sigma_{fu} (1 - \frac{k\theta}{\tan\theta}) - \sigma'_{mu}}$ ; 由式 (9) 计算出纤维体积分数为  $15\%$  时短切碳纤维增强 PTFE 的拉伸强度为

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} (1 - \frac{k\theta}{\tan\theta}) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f)$$

不同体积分数的短纤维增强复合材料的强度预测值, 列于表 1.

对碳纤维进行表面处理, 能显著改善增强纤维与基体树脂之间的界面粘接<sup>[9]</sup>, 充分发挥增强纤维的高强度和高模量特性, 也满足界面为理想状态的假设条件. 碳纤维的长度对其增强 PTFE 复合材料的物理性能和强度有非常显著的影响<sup>[8]</sup>, 纤维长度的门槛值大约为  $100 \mu\text{m}$ , 与本文的预测结果基本吻合. Grakovich<sup>[10]</sup> 用等离子体处理方法对短切碳纤维进行表面活化, 然后与 PTFE 复合得到 CF 质量分数为  $20\%$  (体积分数约  $24.2\%$ ) 的复合材料. 其拉伸强度为  $32 \text{ MPa}$ , 与本文预测结果的比值为  $98\%$ . 我们采用了国内工艺成熟且简单的偶联剂处理方法. 试验结果如表 2 所示, 其中对体积分数为  $12.5\%$  碳纤维增强 PTFE 复合材料采用偶联剂表面处理和未经表面处理两种碳纤维试样.

表 2 表明, 对碳纤维表面进行偶联剂处理, 提高了纤维与基体之间界面的粘结张度, 体积分数为  $12.5\%$  碳纤维增强 PTFE 复合材料的性能大大提高, 其拉伸强度可提高  $22\%$ . 比较表 1 与表 2, CF 体积分数为  $12.5\%$  和  $15\%$  时, 实验结果与预测值之比分别为  $90.7\%$  和  $90.4\%$ , 表明预测结果与实验结果基本一致.

表 1 不同体积分数短切碳纤维增强 PTFE 的拉伸强度预测值

Table 1 Tensile strength predictions of PTFE reinforced by different  $V_f$  of short carbon fibers

$V_f$	$\sigma_{cu}/\text{MPa}$
24.2%	32.65
20%	29.48
15%	27.44
12.25%	26.31
10%	25.39

表 2 短切碳纤维增强 PTFE 的拉伸强度实验值

Table 2 Test results of tensile strength of short CF-reinforced PTFE composite

	12.25%CF	12.25%CF	15%CF
	PTFE	fiber not	surface
		treatment	treatment
		treatment	treatment
$\sigma_{cu}/\text{MPa}$	21.3	19.1	23.8
			24.9

## 3 结 论

1. 给出了用于工程计算的短切纤维增强复合材料的拉伸强度预测公式

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} (1 - \frac{k\theta}{\tan\theta}) V_f + \sigma'_{mu} (1 - V_f)$$

2. 使用这个预测公式, 短切碳纤维增强 PTFE 复合材料的拉伸强度预测值与实验值吻合得比较好.

### 参 考 文 献

- 1 Igor Sevostianov, Mark Kachanov, Connection between elastic moduli and thermal thermal conductivities of anisotropic short fiber reinforced thermoplastics: theory and experimental verification, *Materials Science and Engineering*, **360**, 339(2003)
- 2 J.S.Bergstrom, L.B.Hilbert Jr., A constitutive model for predicting the large eformation thermomechanical behavior of fluoropolymers, *Mechanics of Materials*, **37**, 899(2005)
- 3 ZENG Qingdun, *Memo-destruction and Intensity of Composites* (Beijing, Science Publishing Company, 2002) p.52 (曾庆敦, 复合材料的细观破坏机制与强度 (北京, 科学出版社, 2002) p.52)
- 4 WANG Haiying, SHANG Jialan, LIU Guoquan, Overview on description methods for the spatial distribution of the second phase in multi-phase materials, *Advances in Mechanics*, **30**(4), 558(2000)  
(汪海英, 尚嘉兰, 刘国权, 复相材料中第二相的空间分布状况的描述方法综述, *力学进展*, **30**(4),558(2000))
- 5 Y.T.Zhu, G.Zong, A.Manthiram, Strength analysis of random short-fibre-reinforced metal matrix composite materials, *J. Mater. Sci.*, **29**, 6281(1994)
- 6 LIU Minshan, SUN Aifang, DONG Qiwu, Thermal Conductive Composite Compact Plate-Shell Heat Exchanger, PRC Pat. 200610128280.X, 2006(in Chinese)  
(刘敏珊, 孙爱芳, 董其伍, 导热复合材料紧凑型板壳式换热器, 中华人民共和国发明专利, 200610128280.X, 2006)
- 7 SUN Aifang, LIU Minshan, DONG Qiwu, Modification and Application Situation of PTFE in anticorrosive heat exchanger, *Materials for Mechanical Engineering*, **31**(9), 1(2007)  
(孙爱芳, 刘敏珊, 董其武, 耐腐蚀换热器用聚四氟乙烯的改性与应用现状, *机械工程材料*, **31**(9), 1(2007))
- 8 V.A.Shelestova, V.V.Serafimovich, P.N.Grakovich, The effect of the size of carbon fibers on the physicomechanical properties of fluvis composites, *Mechanics of Composite Materials*, **38**(2), 125(2002)
- 9 Akihiro Oshima, Akira Udagawa, Shigeru Tanaka, Fabrication of polytetrafluoroethylene/carbon fiber composites using radiation crosslinking, *Radiation Physics and Chemistry*, **62**(1), 77(2001)
- 10 P.N.Grakovich, V.A.Shelestova, Plasma-chemical modification of carbon fibers as an efficient method of regulating properties of PTFE-based composite materials, *Science China, A*, **44**(s1), 292(2001)