

文章编号: 1000-324X(2003)01-0045-05

## 玻纤和碳纤在低温下的强度统计特性

王贤锋, 赵建华, 姜洪源, 龚明

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230027)

**摘要:** 利用纤维强伸实验仪和自制的低温实验装置, 研究了碳纤维与玻璃纤维在低温 (77K) 下的拉伸力学性能. 由测试数据发现, 低温下纤维的强度分布具有统计性, 采用 Weibull 统计分布可以较好的进行描述. 在低温下, 两种纤维的强度 Weibull 分布尺度参数和平均强度都有不同程度的提高, 而形状参数和弹性模量则基本保持不变.

**关键词:** 纤维; 低温力学性能; Weibull 分布

**中图分类号:** O 346, TB 301 **文献标识码:** A

### 1 引言

在一些低温工程中, 纤维增强复合材料因其优异的力学性能而得到越来越广泛的应用, 其中应用最广泛的就是玻璃纤维和碳纤维增强环氧树脂基复合材料. 试验研究发现<sup>[1,2]</sup>, 随着温度的降低, 这些纤维增强复合材料的刚度、强度、甚至韧性都有不同程度的提高. 众所周知, 复合材料的宏观力学性能与组份材料的性能以及界面性能有直接的关系. 对于纤维增强复合材料, 纤维的力学性能则是影响复合材料整体性能的一个重要因素. 在室温下, 纤维的强度通常是由单纤维拉伸试验 (single filament tensile tests)<sup>[3]</sup>得出的. 通过单纤维测试得出的强度数据离散性很高, 这主要是由于纤维中存在缺陷造成的, 因此对数据的处理只能通过统计的方法. 人们曾经采用过不同的统计分布来描述过纤维的强度, 而应用最为广泛也为人们所接受的就是 Weibull 分布<sup>[4,5]</sup>. 在室温下, 纤维的强度通常采用双参数 Weibull 分布函数描述为:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left[-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^\beta\right] = P_f \quad (1)$$

其中,  $F(\sigma)$  为累积断裂概率, 即纤维在其强度不超过  $\sigma$  的断裂概率,  $L$  是纤维长度,  $\sigma_0$  和  $\beta$  分别为 Weibull 尺度参数和形状参数. 对于双参数 Weibull 分布的尺度参数  $\sigma_0$  和形状参数  $\beta$  是由一定标距长度上的强度数据来确定, 通常不同的标距长度上得到的参数是相同的<sup>[6]</sup>.

为分析处理强度测试数据进而确定 Weibull 分布中的统计特性参数, 通常对方程 (1) 两边取双对数, 表达成为以下形式:

$$\beta \ln \sigma - \beta \ln \sigma_0 = \ln\{-\ln[1 - F(\sigma)]\} - \ln L \quad (2)$$

式中,  $1 - F(\sigma)$  为纤维的存活率, 它表示纤维强度不超过  $\sigma$  时的不破坏概率. 以  $\ln\{-\ln[1 - F(\sigma)]\}$  对  $\ln(\sigma)$  作图 (Weibull 概率分布图) 是一条斜率为  $\beta$  的直线. Weibull 分布的一个有用

收稿日期: 2002-01-04, 收到修改稿日期: 2002-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (19732001)

作者简介: 王贤锋 (1972-), 男, 博士研究生. E-mail: wxf@mail.ustc.edu.cn

的特征就是各种标距测出的强度可以画在同一曲线上. 一旦得到某一标距下的纤维 Weibull 分布尺度参数和形状参数, 就可以利用方程 (1) 外推得到任意标距长度下纤维的强度分布.

数值模拟表明<sup>[7]</sup>, 复合材料宏观力学性能与纤维的强度统计特性, 特别是尺度参数有很强的依赖性. 因此测定玻璃纤维和碳纤维在低温下的强度统计特性对于了解复合材料的低温力学行为和设计低温环境使用的复合材料是有意义的. 要探讨的问题是: 在低温下, 纤维的强度统计特性是否仍可用双参数 Weibull 分布来描述? 如果可以, 那么尺度参数和形状参数与温度的关系如何?

## 2 纤维拉伸强度试验

单纤维试验广泛的应用于测定各种纤维的弹性模量、拉伸强度和断裂应变. 具体试验要求与方法见文献 [8]. 在本试验研究中, 玻璃纤维是选用南京玻纤研究院生产的 E-玻纤, 碳纤维选用台湾的 TC12K33. 通过扫描电镜的图象照片 (图 1、2) 可得到玻璃纤维的直径为  $10\mu\text{m}$ , 碳纤维的直径为  $6\mu\text{m}$ .

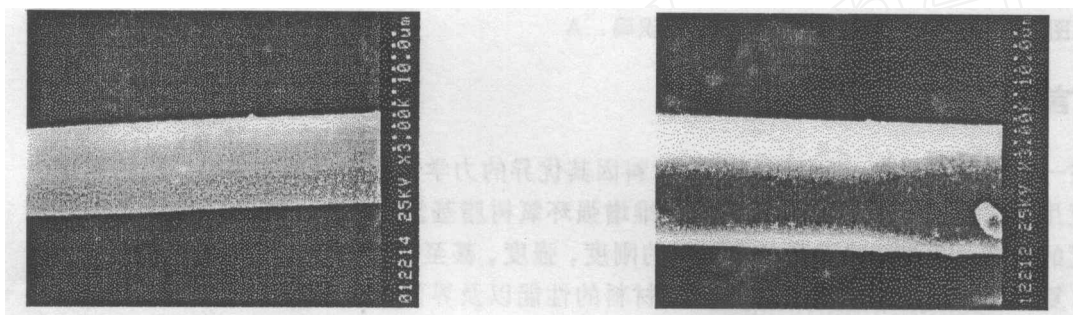


图 1 碳纤维扫描电镜图

Fig. 1 SEM micrographs of carbon fibres

图 2 玻璃纤维扫描电镜图

Fig. 2 SEM micrographs of glass fibres

文献表明, 室温下测试所需的纤维数目大多在 50~100 根之间<sup>[5,6,9]</sup>, 本试验测试的纤维数目分别取在 70~150 根之间.

单纤维拉伸试验是在 XQ-1 型纤维强伸仪上进行, 通过向一个自制容器中注入液氮而获得 77K 的低温环境. 试验时, 将被夹在强伸仪上下夹头间的纤维浸入低温容器中, 上夹头固定, 下夹头以常值速率 (本试验中取为  $1\text{mm}/\text{min}$ ) 下移以给试样加载, 并自动记录载荷  $p$ -位移  $u$  (下夹头移动距离) 曲线, 同时记录纤维的断裂载荷  $P_f$  和对应的位移  $u_{\max}$ . 由纤维直径计算出纤维的截面积  $A_f$ , 并由此算出纤维的强度  $\sigma_f = P_f/A_f$ ; 由纤维的标距长度  $L$  和  $u_{\max}$ , 可计算得到纤维的断裂应变  $\varepsilon_f = u_{\max}/L$ . 另外由  $p-u$  曲线可以换算成纤维的应力应变曲线, 该曲线的斜率即为纤维的弹性模量  $E_f$ .

## 3 试验结果与讨论

测试了低温 ( $T=77\text{K}$ ) 下标距长度为  $L=20\text{mm}$  的碳和玻璃纤维的拉伸强度和弹性模量. 为进行比较, 同时测试了室温 ( $T=296\text{K}$ ) 下标距长度分别为  $L=20\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$  下的碳与玻璃纤维的强度和弹性模量. 由测试出来的纤维强度数据就可以利用方程 (1) 和 (2) 绘出纤维破坏概率与纤维破坏强度的关系曲线以及纤维强度的 Weibull 分布图.

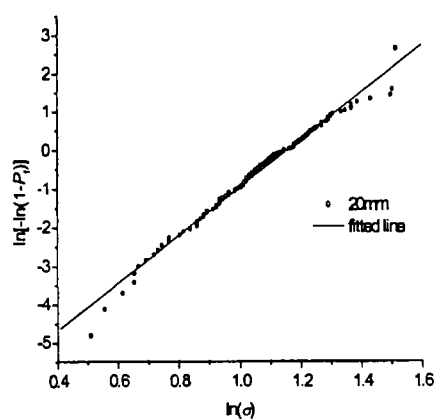


图 3 碳纤维 Weibull 分布图

Fig. 3 Weibull distribution for carbon fibres

$T=77\text{K}$ ,  $L=20$

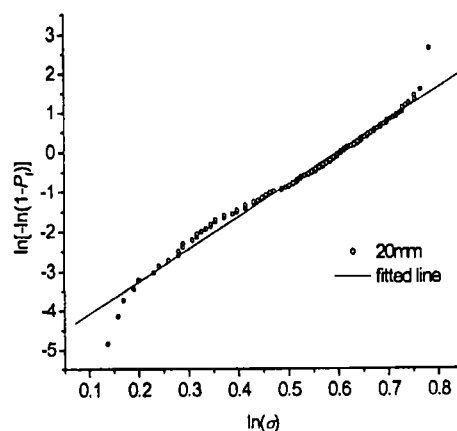


图 4 玻璃纤维 Weibull 分布图

Fig. 4 Weibull distribution for glass fibres

$T=77\text{K}$ ,  $L=20$

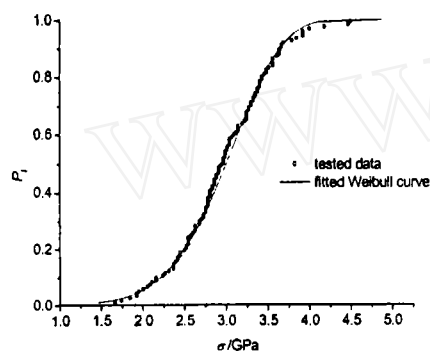


图 5 碳纤维破坏概率 - 强度图

Fig. 5 Strength distributions and fitted weibull functions for carbon fibres

$T=77\text{K}$ ,  $L=20$

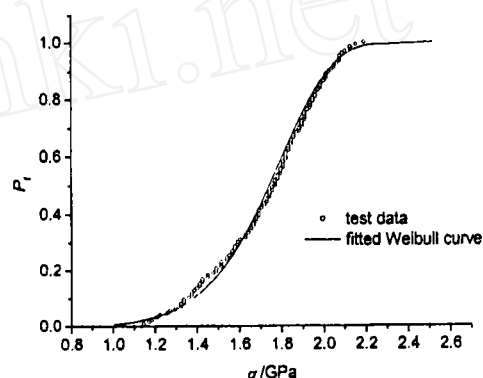


图 6 玻璃纤维破坏概率 - 强度图

Fig. 6 Strength distributions and fitted weibull functions for glass fibres

$T=77\text{K}$ ,  $L=20$

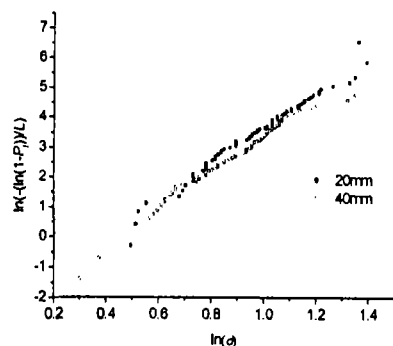


图 7 碳纤维 Weibull 分布图

Fig. 7 Weibull distribution at different gauge lengths for carbon fibres

$T=296\text{K}$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $40\text{mm}$

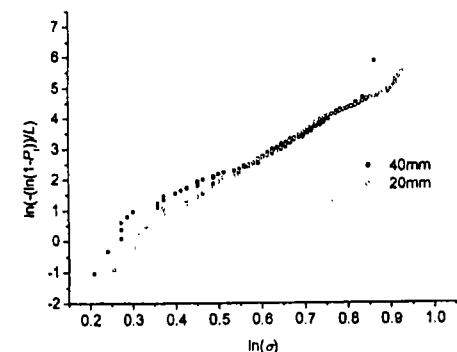


图 8 玻璃纤维 Weibull 分布图

Fig. 8 Weibull distribution at different gauge lengths for carbon fibres

$T=296\text{K}$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $40\text{mm}$

图 3、4 分别为低温下碳纤维与玻璃纤维的 Weibull 分布图, 也称双对数 Weibull 图。由图知, 纤维强度数据点呈现线性分布, 采用最小二乘法可以线性拟合得到一条直线。由直线的截距和斜率就可以得到纤维强度 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。图 5、6 分别为低温下碳纤维与玻璃纤维的破坏概率 - 强度关系图以及拟合的 Weibull 曲线。由纤维破坏概率 - 强度曲线图可以发现, 在低温下, 双参数 Weibull 分布曲线也可以很好的描述碳与玻璃纤维的强度分布。

图 7、8 分别为室温下不同标距长度的碳与玻璃纤维强度的 Weibull 分布图, 由图可知, 不同标距长度下得到的试验数据点几乎重合, 即纤维强度的 Weibull 分布尺度参数和形状参数几乎不随纤维长度改变, 而纤维强度与纤维的长度有关。

表 1 为碳纤维和玻璃纤维在室温和低温下的测试结果, 由表可以看出, 低温下纤维的尺度参数和平均强度比室温下的要高, 而形状参数和拉伸模量基本保持不变。低温下碳纤维平均强度增加了约 11.6%, 而玻璃纤维平均强度增加了约 34%。

表 1 碳纤维和玻璃纤维试验测试结果  
Table 1 Experiment results of carbon and glass fibres

Fibre	Carbon			Glass		
Temperature/K	296	296	77	296	296	77
Gauge length/mm	20	40	20	20	40	20
Number of tested fibres	67	100	124	131	74	126
Scale parameter/GPa	1.50	1.52	1.69	0.85	0.80	1.13
Shape parameter	6.13	5.93	6.17	8.35	7.54	8.13
Average strength/GPa	2.67	2.48	2.98	1.29	1.17	1.72
Tensile modulus/GPa	235	235	237	72	71	74

#### 4 结论

通过一系列的纤维拉伸试验, 测试了室温和低温下的碳纤维和玻璃纤维的拉伸力学性能。试验发现: 低温下纤维的强度分布仍然遵循双参数 Weibull 分布, 平均强度在低温下都有不同程度的增加; 低温下, 玻璃纤维 Weibull 分布尺度参数有很大的增加, 而碳纤维相对增加较少; 对于碳与玻璃纤维, 其形状参数和弹性模量在低温下没有明显的改变。

#### 参考文献

- [1] Reed R P, Golda M. *Cryogenics*, 1994, **34**: 909-928.
- [2] Schutz J B. *Cryogenics*, 1998, **38**: 3-12.
- [3] 汤佩钊. 复合材料及其应用技术. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
- [4] Rosen B W. *AIAA J.*, 1964, **11**: 1985-1991.
- [5] Watson A S, Smith R L. *J. of Mater. Sci.*, 1985, **20**: 3260-3270.
- [6] Manders P W, Bader M G. *J. of Mater. Sci.*, 1981, **16**: 2246-2256.
- [7] Wang X F, Zhao J H. *Cryogenics*, 2001, **41**: 683-691.

[8] 纤维增强复合材料试验力学. 科学出版社, 1990.

[9] Pikerling K L, Bader M G, Kimber A C. *Composites Part A*, 1998, **29A**: 435-441.

## Statistical Characteristics of Strength at Low Temperature for Glass and Carbon Fibers

WANG Xian-Feng, ZHAO Jian-Hua, JIANG Hong-Yuan, GONG Ming

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** A series of single fiber tensile tests were conducted at 77K and room temperature for glass and carbon fibers. The results show that at low temperature the statistical characteristics of the tensile strength can still be described by Weibull distribution function and the average strengths are increased with different degree to the case of room temperature for both types of the fibers. The scale parameter exhibits remarkable rising at 77K for glass fiber, while it is slight for carbon fiber. However, the shape parameters and tensile modulus have no obvious change to the case of room temperature for both types of the fibers.

**Key words** fibres; mechanical properties under low temperature; weibull distribution .