

AFMOC纤维在紫外光下的拉伸强度

石增强 阳建红

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

文 摘 用 Weibull分布和正态分布的方法研究了氙灯紫外光辐照对 AFMOC纤维拉伸强度及其分布的影响,比较了 Weibull分布及正态分布描述 AFMOC纤维单丝强度的适应性。结果表明:(1)氙灯紫外光辐照 96 h对 AFMOC纤维单丝拉伸强度及分布的影响不大,拉伸强度在 4.4 GPa附近波动;(2)Weibull分布和正态分布都可以描述 AFMOC纤维的强度分布,二者没有显著差别。

关键词 AFMOC纤维,紫外辐照老化,正态分布,Weibull分布

Tensile Strength of AFMOC Fibre Under Ultraviolet Radiation Aging

Shi Zengqiang Yang Jianhong

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

Abstract This paper studied influence of xenon lamp ultraviolet radiation on tensile strength of AFMOC fibre and distribution of tensile strength by Normal distribution and Weibull distribution, and compared adaptability of AFMOC single fibre's tensile strength by Normal distribution and Weibull distribution description. The results indicate that the influence of xenon lamp ultraviolet radiation on tensile strength of AFMOC fibre and distribution of tensile strength isn't obvious, tensile strength of AFMOC fibre fluctuated about 4.4 GPa. Both Normal distribution and Weibull distribution both can describe distribution of tensile strength, and there is no obvious difference.

Key words AFMOC fibre, Ultraviolet radiation aging, Normal distribution, Weibull distribution

1 引言

AFMOC纤维是俄罗斯生产的一种高性能芳纶类纤维^[1],因其具有密度低、强度和模量高、耐疲劳、耐磨损与抗冲击等优异性能而成为航空、航天先进复合材料的重要增强纤维^[2]。由于在使用过程中要受到紫外光的辐照,因而不可避免地影响其力学性能。

对于 AFMOC纤维拉伸性能的研究,目前有两种方法:主要的一种是采用复丝浸胶测定其性能然后再通过理论公式反推其拉伸强度和模量,但这样确定的性能指标受到基体树脂的性能及含胶量等因素的影响;另一种方法是采用纤维单丝拉伸试验,直接测定其拉伸性能,但由于纤维的内在缺陷,其拉伸强度有一定的分散性,影响纤维束的强度以及相应的复合材料性能评估。因此可用统计分析的方法以其平均值来表征其强度,还可以用方差等其他参数描述其离散度。考察紫外光辐照过的纤维单丝强度及强度分布,找出一个和实际情况接近的分布函数,来描述和预测

大量纤维单丝的强度,对分析纤维质量、预报复合材料强度及复合材料断裂过程有着重要的意义^[3]。

在材料强度的统计分析中,通常使用正态分布或 Weibull分布研究材料的强度分布状况。文献[4~6]用 Weibull方法分别评价了化学介质对 PBO纤维统计强度的影响、上浆对碳纤维强度的影响、表面处理对玻璃纤维强度影响。本文用正态分布和 Weibull分布的方法研究了紫外光辐照对 AFMOC纤维强度的影响。

2 实验

2.1 材料

AFMOC纤维由西安航天复合材料研究所提供,从中截取 8束 160 mm长的纤维束,单丝从纤维束中随机抽取,有效测试跨距为 50 mm。

2.2 仪器

银河 SH60B 氙灯耐气候试验机,功率为 6 kW,波长为 300~1050 nm,辐照度为 1.8 kW/m²;新三思

收稿日期:2008-01-17;修回日期:2008-02-27

作者简介:石增强,1979年出生,博士研究生,主要研究导弹武器发射系统的生存技术。E-mail: shizengqiang@yahoo.com.cn

CMT5205型电子拉力机;日本 JSM - 6700F场发射扫描电子显微镜,其二次电子分辨率为 1 nm,背散射电子分辨率为 3 nm,最大放大倍数为 6.5×10^5 倍。

2.3 方法

采用紫外光间歇辐照,白天照射 12 h,夜间停止辐照试验。试验中测定试样架温度,当照射 1 h后可达 50~55,通过老化箱的温湿度控制系统,试样的温、湿度控制在 55 和 70%左右。按 12、36、60、96 h 进行取样,按 ASTM D3379《高模量单丝材料拉伸强度和杨氏模量标准测试方法》进行 AFMOC 纤维单丝拉伸强度测试,拉伸速率取 10 mm/min,拉伸强力精确到 1 mN,每组试验保证 50 个有效拉伸试样,利用扫描电子显微镜对老化后的纤维表面及拉伸断口进行观察。

3 纤维单丝拉伸强度分布规律

纤维单丝的强度由于工艺、环境等因素的影响具有分散性,一般情况下,大多数的强度数据落在中间某一范围内,即:纤维强度的离散性是有统计规律的。

目前,适合描述材料强度的分布函数有正态分布和 Weibull 分布。一般地,正态分布适用于影响因素众多,而每个因素又是独立且不起决定作用的事件。Weibull 分布则广泛用于可靠性和失效理论中,研究失效取决于一系列环节中最薄弱一环的事件的概率分布。本文采用 Matlab 工具箱,对紫外光辐照和未辐照的共 5 组 AFMOC 纤维样本进行统计分析,得到各自的 Weibull 分布和正态分布参数值。并以 Weibull 分布为例分析了紫外光辐照对纤维强度和强度离散性的影响,然后比较了 Weibull 分布及正态分布描述 AFMOC 纤维单丝强度的适应性。

由中心极限定理和大数定理可知,当测量的纤维根数足够多时,其强度服从正态分布,但是文献 [7] 指出:

(1)对纤维进行拉伸试验时,通常在其最弱截面处发生断裂;

(2)纤维的强度与其长度有关,但无论纤维的长度如何,其拉伸强度总是正值;

(3)纤维的破坏概率 $P(f)$ 为其拉伸应力 f 的某一单调增函数。

基于上述假设,纤维单丝的破坏概率服从 Weibull 分布,其中二参数 Weibull 分布的纤维破坏概率函数由下式表示:

$$P(f) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{f}{f_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中, m 是形状参数, f_0 为尺度参数,通过试验可以求得。当用式 (1) 讨论材料强度的特性时,其概率分布

密度函数为:

$$f(f) = \frac{dP(f)}{df} = m \cdot \frac{f^{m-1}}{f_0^m} \cdot \exp\left[-\left(\frac{f}{f_0}\right)^m\right] \quad (2)$$

数学期望 (均值) 为:

$$\bar{f} = E[f] = \int_0^{\infty} f f(f) df = \int_0^{\infty} f \cdot m \cdot \frac{f^{m-1}}{f_0^m} \cdot \exp\left[-\left(\frac{f}{f_0}\right)^m\right] df = f_0 \left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (3)$$

标准差为:

$$s^2 = \int_0^{\infty} (f - \bar{f})^2 f(f) df = \int_0^{\infty} \left[\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2 \right] f_0^2 \exp\left[-\left(\frac{f}{f_0}\right)^m\right] df = f_0^2 \left[\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2 \right] \quad (4)$$

离散系数为:

$$C_v = \frac{s}{\bar{f}} = \frac{\left[\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2 \right]^{1/2}}{\left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \left[\frac{\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2}{\left(1 + \frac{1}{m}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

把相同条件下测得的单丝强度数据由小到大排列,实测破坏概率期望值为:

$$P(f) = \frac{i}{N+1} \quad (6)$$

式中, N 为所测纤维单丝的总根数, i 为在 f_i 下断裂的纤维根数。

对 (1) 式取双对数,得:

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(f)} \right] = m \ln f - m \ln f_0 \quad (7)$$

由 (7) 式可知, $\ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(f)} \right]$ 与 $\ln f$ 成直线关系,将实测 f_i 值与 $P(f)$ 值代入 (7) 式中,求得直线斜率与截距,即可求得 m 与 f_0 。

4 AFMOC 纤维拉伸强度的统计分析

4.1 Weibull 分布与正态分布参数求解

测定纤维单丝 f_i , 利用式 (6) 求得 $P(f)$, 代入式 (7) 可作出 Weibull 双对数曲线, 通过拟合直线的斜率和截距求出 Weibull 分布的各参数 (表 1)。

表 1 AFMOC纤维单丝在紫外光辐照后拉伸强度 Weibull分布参数表

Tab 1 Weibull parameter of AFMOC single fibre's tensile strength after ultraviolet radiation

老化时间 /h	斜率	截距	m	σ	计算均值 /MPa	实测均值 /MPa
0	12.524	-105.3693	12.524	4507.2	4325.9	4331.6
12	12.8998	-108.954	12.8998	4657.3	4474.8	4480.6
36	12.694	-106.5212	12.694	4409.3	4234.1	4239.5
60	13.1687	-111.3777	13.1687	4711.6	4530.2	4536.2
96	14.8021	-124.6651	14.8021	4546.6	4388.6	4394.1

对实测值进行参数估计,求取 AFMOC纤维单丝拉伸强度的正态分布数学期望与均方差(表 2)。

表 2 AFMOC纤维在紫外光辐照后拉伸强度正态分布表

Tab 2 Normal parameter of AFMOC single fibre's tensile strength after ultraviolet radiation

老化时间 /h	计算均值 /MPa	均方差	实测均值 /MPa
0	4331.6	393.36	4331.6
12	4480.6	397.39	4480.6
36	4239.5	380.95	4239.5
60	4536.2	392.06	4536.2
96	4394.1	336.99	4394.1

4.2 Weibull分布结果分析

由计算结果作出 AFMOC纤维未进行辐照和辐照后的纤维强度的 Weibull双对数图,其中直线或虚线为拟合值,符号为实验值,如图 1所示。

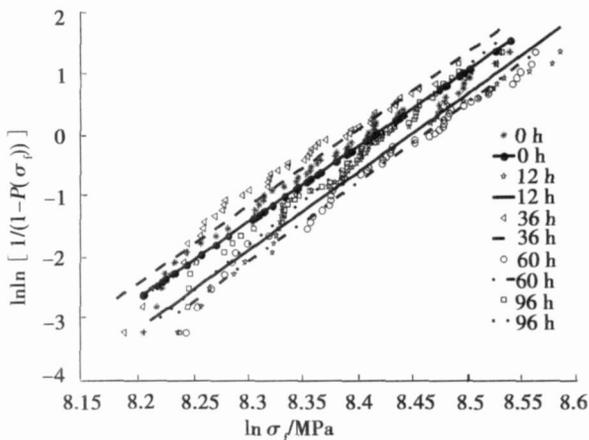


图 1 未老化和经不同老化时间的 AFMOC纤维拉伸强度 Weibull双对数图

Fig 1 Weibull double logarithmic plots of tensile strength for aging and without aging AFMOC

从图 1可以看出,辐照不同时间后拟合的直线与未辐照的直线十分接近;且大部分都落在拟合直线上,说明用 Weibull分布可以描述 AFMOC纤维单丝的强度及其分散性。由图 2可以看出辐照不同时间后强度分布中心均在 4.4 GMPa左右,与未老化的强度分布中心偏差不大;且曲线的最高点除老化 96 h后略高外,其余基本一致。由此可知,短期紫外光老

化对 AFMOC纤维单丝的强度影响不大,只是在 4400 MPa附近来回波动,说明紫外老化对 AFMOC纤维单丝的强度有强化和削弱两种作用;强度分布的分散性从表 1中形状参数 m 值由小变大,结合图 2老化 96 h后的强度分布波形逐渐变窄,波峰逐渐变高,说明随着紫外老化时间增加,强度分散性越小。

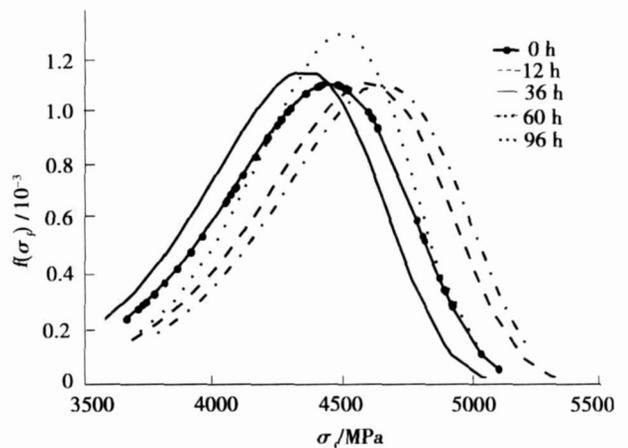
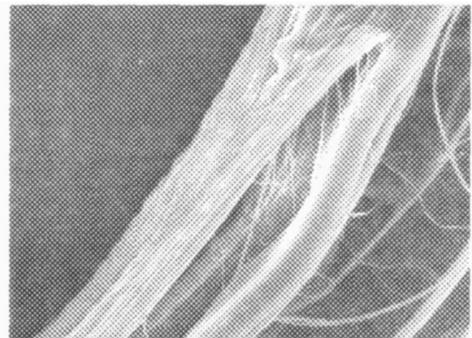


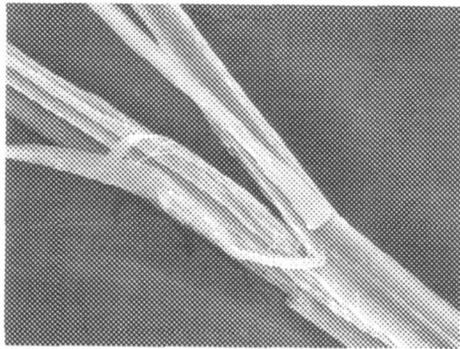
图 2 未老化和经不同老化时间的 AFMOC纤维拉伸强度 Weibull分布图

Fig 2 Weibull plots of tensile strength for aging and without aging AFMOC

将未老化与老化后的纤维拉断后,用扫描电镜观察(图 3)。由图 3可以看到,未经辐照的纤维断口形貌主要是劈裂断面,呈现原纤化特征,而老化 96 h后,其纤维断面平整,呈现“脆性”特征,这种变化可能是由于短期辐照造成部分分子链之间的网络结构发生了变化,但分子链取向度反而升高,使得纤维断裂有脆性劣化趋势,同时拉伸强度还有所强化。



(a) 未老化纤维



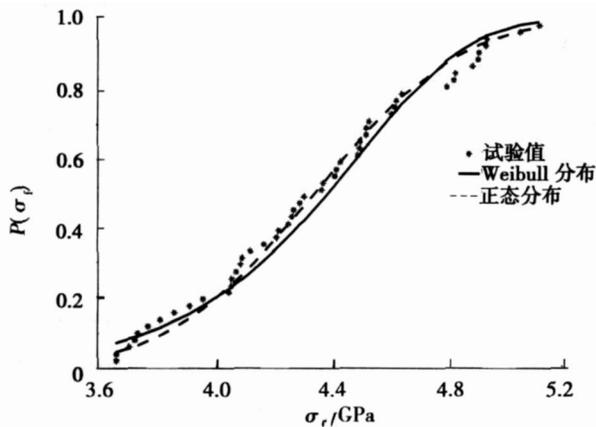
(b) 氙灯辐照 96 h后

图 3 纤维拉伸断口形貌 5 000 ×

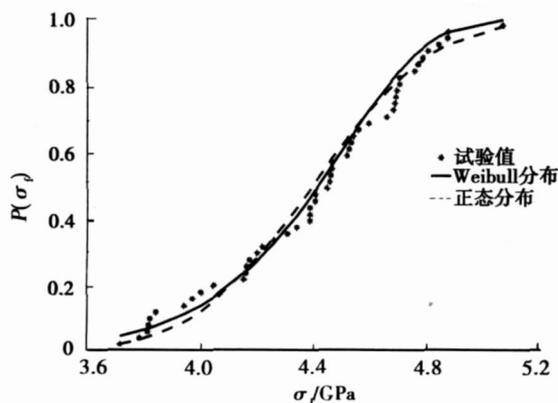
Fig 3 SEM photographs of AFMOC aging and without aging

4.3 拉伸强度的 Weibull分布与正态分布比较

研究表明,中强度碳纤维和 200E玻璃布的径向断裂力用 Weibull分布拟合较好,而 200E玻璃布的纬向断裂力用正态分布拟合较好^[8]。对未经辐照和辐照不同时间后的 AFMOC纤维共 5个样本,分别假设其符合正态分布和 Weibull分布,然后用 Matlab工具箱,根据实验值拟合出相应的分布参数,并计算了在两种分布下强度低于一定值的纤维分布概率,再与实验值比较(图 4)。



(a) 未经辐照



(b) 经 96 h辐照

图 4 未经辐照及辐照 96 h后的 AFMOC纤维拉伸强度 Weibull分布与正态分布累积概率分布图

Fig 4 Weibull and normal CDF plots of AFMOC tensile strength for 96 h aging and without aging

从图 4可以看出,对未经辐照的 AFMOC纤维中大多数具有中等强度的单丝,其拉伸强度用正态分布比 Weibull分布描述更为接近,而其余的单丝,更接近于 Weibull分布;对辐照 96 h的 AFMOC纤维大多数具有中等强度的单丝,其拉伸强度用 Weibull分布比正态分布描述更为接近,其余的单丝,更接近于正态分布,总的来说两者区别不大。从表 1、表 2中看出,正态分布以数学期望和方差为参数,结果计算数学期望与试验均值完全相符,Weibull分布以 m 和 σ_0 为参数,计算的数学期望比试验均值略低,笔者认为 Weibull分布要求试验的样本数更大,当样本数更大时,计算的数学期望将进一步逼近试验均值。由此可见,Weibull分布和正态分布都能用来描述 AFMOC纤维单丝的强度及其分散性,只是当样本数略小时,正态分布与试验更加吻合。

5 结论

(1)氙灯紫外光辐照 96 h对 AFMOC纤维单丝强度的影响不大。紫外老化对 AFMOC纤维单丝的强度有强化和削弱两方面的作用,两方面作用此消彼长,使得强度变化在 4.5 GPa附近上下波动。老化 96 h后的强度分布的分散性有逐渐减小的趋势。

(2)正态分布和 Weibull分布都可以描述 AFMOC纤维的强度分布状况及分散性,除正态分布比 Weibull分布对试验的样本数要求略小外,二者没有显著差别。

参考文献

- 1 于春茂,于国柱,魏月贞等. AFMOC - 纤维组成结构与结晶的研究. 合成纤维工业, 2000; 23(1): 45 ~ 48
- 2 赵克熙. 原苏联芳纶复合材料研究进展及其在固体发动机壳体上的应用. 宇航材料工艺, 1995; 25(5): 8 ~ 19
- 3 唐伟杰,顾明元. 碳纤维强度的计算机研究. 宇航学报, 1996; 17(3): 40 ~ 45
- 4 马春杰,宁荣昌,李琳等. 用 Weibull方法评价化学介质对 PBO纤维统计强度的影响. 复合材料学报, 2005; 22(3): 16 ~ 20
- 5 关蓉波,杨永岗,郑经堂等. 用 Weibull统计方法来评价上浆对碳纤维强度的影响. 炭素, 2001; (3): 26 ~ 29
- 6 王恒武,王继辉,黄再满等. 用 Weibull评价表面处理对玻璃纤维强度影响. 武汉理工大学学报, 2003; 25(6): 13 ~ 15
- 7 杜善义,王彪. 复合材料细观力学. 北京:科学出版社, 1998
- 8 朱颐龄. 复合材料的概率设计. 复合材料学报, 1985; 2(1): 72 ~ 79

(编辑 吴坚)