

# 聚醚醚酮基复合材料的疲劳寿命 表达式及累积疲劳损伤预测\*

On the Expression of Fatigue Life and Cumulative  
Fatigue Damage for Poly-Ether-Ether-Ketone Composite

魏建锋 (西安交通大学材料科学与工程学院)

郑修麟 (西北工业大学材料科学与工程学院)

Wei Jianfeng (Xi'an Jiaotong University)

Zheng Xiulin (Northwestern Polytechnical University)

**[摘要]** 通过对短碳纤维增强聚醚醚酮基复合材料的疲劳寿命试验数据的分析,给出了其疲劳寿命表达式,进而给出了适于两级不定载荷谱下累积疲劳损伤度及其概率分布区间的预测方法。

**关键词** 聚醚醚酮基复合材料 疲劳寿命表达式 累积疲劳损伤预测

**[Abstract]** The expression of fatigue life is offered for short carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composite by statistically analyzing the test data. Furthermore, prediction procedures of the critical values of the accumulated fatigue damage and its probability distribution region under two level loads are given.

**Keywords** poly-ether-ether-ketone composite expression of fatigue life prediction of critical values of accumulated fatigue damage

## 1 引言

高性能的树脂基复合材料由于易制备、质轻和好的可设计性而正被应用于工程构件,诸如空间站、飞行器、道路交通工具和快艇等。为了保证工程构件服役安全,已进行了许多长碳纤维增强复合材料的疲劳性能的研究<sup>[1]</sup>。短纤维增强树脂基复合材料由于比强度低、比弹性模量低及疲劳断裂性能复杂等原因而研究较少。随着具有高强、耐冲击和耐高温的热塑性塑料,特别是还具有较好疲劳抗力的聚醚醚酮的发展,使得研究短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的疲劳性能显得非常必要<sup>[2~4]</sup>。

同时,由于工程构件的服役条件并不总是恒幅载荷,所以研究聚醚醚酮在变幅载荷下的疲劳性能及其累积疲劳损伤规律亦很有必要。文献[2]给出了短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料在恒幅载荷和两级载荷下的疲劳实验结果,但未能给出其疲劳寿命的表达式和

合适的累积疲劳损伤度的预测方法。

基于上述考虑,本文对文献[2]中的恒幅载荷下疲劳寿命实验结果进行分析,采用新的应力疲劳公式对实验结果进行拟合,给出疲劳寿命表达式。对其两级载荷下疲劳寿命实验结果进行再分析,给出适于其疲劳寿命和两级不定载荷下累积疲劳损伤度概率分布区间的预测方法。

## 2 实验方法

### 2.1 实验材料

实验材料为短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料,纤维直径为 $7\mu\text{m}$ ,长为 $150\mu\text{m}$ ,纤维含量为30wt%。纤维随机分布在聚醚醚酮基体中,其力学性能如表1所示。

### 2.2 疲劳试验

疲劳试样形状如图1所示。试样由棒材加工而成,为消除加工硬化等带来的影响,试样经200 退火2h,疲劳试验在旋转弯曲疲劳试验机上进行,试样频率为30Hz。

\* 本文得到国家自然科学基金(59271030)资助。

表1 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的力学性能<sup>[6]</sup>

Table 1 Mechanical properties of CFRPEEK composite

$\sigma_b$	E	$\sigma_{0.2}$	$\delta$
MPa	MPa	MPa	%
132	8600	104.9	2.6

首先进行恒幅载荷下的疲劳试验, 试验加载应力为  $S_1=78.5\text{ MPa}$  和  $S_2=68.6\text{ MPa}$ 。然后进行上述两应力的高低  $S_1$ 、 $S_2$  和低高  $S_2$ 、 $S_1$  两级载荷实验, 两级变幅疲劳实验时先在第一级应力下循环若干周次, 然后在第二级应力下加载至试件断裂。

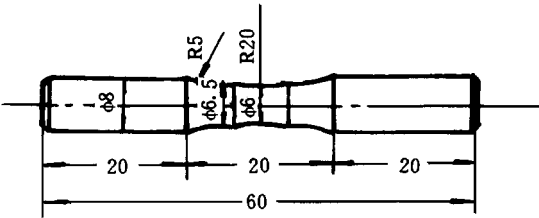


图1 疲劳试件形状<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Fatigue specimen configuration

3 恒幅载荷下疲劳寿命表达式

表2给出了恒幅载荷下疲劳寿命实验结果<sup>[1]</sup>。

表2 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料  
恒幅载荷下疲劳寿命

Table 2 Fatigue life of CFRPEEK composite under  
constant stress amplitude

序号	$S_1=78.5\text{ MPa}$	$\lg S_1$	$S_2=68.6\text{ MPa}$	$\lg S_2$
1	47800	4.6794	500000	5.6990
2	56200	4.7497	555000	5.7443
3	67900	4.8319	800000	5.9031
4	82900	4.9186	847000	5.9279
5	117000	5.0682	1250000	6.0969
6	123000	5.0899	1570000	6.1959
7	125000	5.0969		
8	164000	5.2148		
9	170000	5.2305		
$\bar{X}$	106000	4.9867	920000	5.9278
s		0.2000		0.1935
r		0.9754		0.9829

注:  $\bar{X}$ 、s 和 r 分别为平均值、标准差和线性相关系数。

将表2中每一应力下的疲劳寿命取对数后, 画在正态概率坐标纸上, 如图2所示。其中取平均值作为失效概率的估计值<sup>[7]</sup>。可见, 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命服从对数正态分布。

采用文献 [9] 中公式及方法对实验结果进行拟合, 得到短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命表达式如下:

$$N_f=2.1713 \times 10^7 (S_n-63.5)^{-2} \tag{1}$$

回归分析给出了 r 值远高于规定值, 这表明拟合结果有效。图3按式 (1) 画出了短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命曲线。

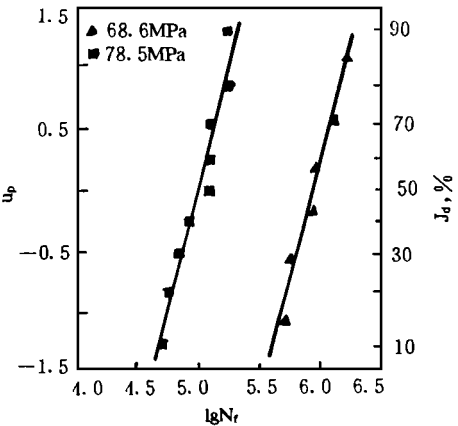


图2 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of the fatigue life of CFRPEEK composite

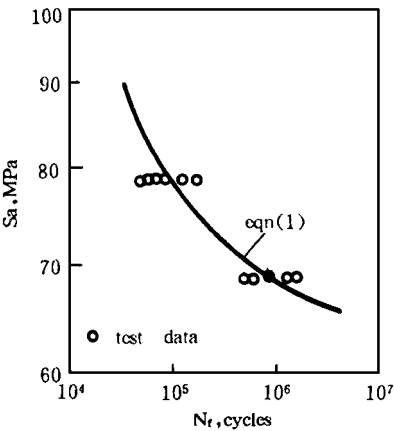


图3 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命及其最小二乘拟合

Fig. 3 Fatigue test results and the least-squares fit of CFRPEEK composite

4 变幅载荷下疲劳寿命预测及实验结果

由于短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料是脆性材

料，其疲劳裂纹扩展寿命在疲劳总寿命中所占比例较小，可以认为其疲劳裂纹起始寿命占疲劳寿命的主要部分。这样，可根据其疲劳寿命表达式及 Miner 定则预测其变幅载荷下疲劳寿命和累积疲劳损伤临界值。由前述实验方法及对文献 [ 1 ] 的实验结果分析可知，其第一级应力下的实际循环周次不是某一常数，所以这里给出了每种情况下的第二级应力下的预测寿命和预测的累积疲劳循环比。预测结果如表3所示。

表3同时给出了两级载荷下的疲劳试验结果，可以看出，预测结果与实验结果的平均值符合很好。同

表3 (a) 高低加载时疲劳寿命及累积疲劳循环比的预测值及实验值

Table 3 (a) Predicted fatigue life and cumulative cycle ratio of CFRPEEK composite and test results under high-low loading

序号	$n_1^*$	$n_1^*/N_1$	$n_2$	$n_2/N_2$	D	$n_{2, 预测}$	$n_{2, 预测}/N_2$
1	35722	0.3684	585120	0.6909	1.0593	534938	0.6316
2	18550	0.1913	754400	0.8908	1.0821	684910	0.8087
3	74836	0.7717	271400	0.3205	1.0922	193343	0.2283
4	29150	0.3006	356040	0.4204	0.7210	592334	0.6994
5	103350	> 1.0	58880	0.0700	1.1353	0	0
6	89146	0.9193	135240	0.1597	1.0790	68363	0.0807
7	65826	0.6788	445280	0.5258	1.2046	272030	0.3212

注： $n_1^*$ 、 $n_2^*$  分别表示高低加载和低高加载时第一级应力下的循环数。

表3 (b) 低高加载时疲劳寿命及累积疲劳循环比的预测值及实验值

Table 3 (b) Predicted fatigue life and cumulative cycle ratio of CFRPEEK composite and test results under low-high loading

序号	$n_2^*$	$n_2^*/N_2$	$n_1$	$n_1/N_1$	D	$n_{1, 预测}$	$n_{1, 预测}/N_1$
1	441600	0.5214	61162	0.6307	1.1521	46410	0.4786
2	330280	0.3900	68794	0.7094	1.0994	59156	0.6100
3	207000	0.2444	85436	0.8810	1.1254	73272	0.3352
4	563040	0.6648	40068	0.4132	1.0780	32505	0.3352
5	618240	0.7300	31270	0.3225	1.0525	26184	0.2700
6	897000	> 1.0	12190	0.1257	1.1848	0	0

注： $n_1^*$ 、 $n_2^*$  分别表示高低加载和低高加载时第一级应力下的循环数。

时，实验结果的对数平均值亦与预测结果符合很好。实验结果还表明，无论高低或低高加载，其累积疲劳损伤度的平均值均大于且接近于1.0，而与加载顺序无关。这表明，采用 Miner 定则和短碳纤维增强的聚醚醚酮复

合材料的疲劳寿命表达式可预测其两级变幅载荷下的疲劳寿命和累积疲劳损伤临界值，而无须考虑加载顺序。

表3 (c) 短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料疲劳寿命及累积疲劳损伤度的预测值及实验值

Table 3 (c) Predicted fatigue life and critical cumulative damage of CFRPEEK composite and test results

	预测值		实验值	
	lg D	D	lg D	D
高低加载	0	1.0	0.0178	1.0533
低高加载	0	1.0	0.0471	1.1154
综 合	0	1.0	0.0313	1.0820

5 两级载荷下累积疲劳损伤度概率分布预测及实验结果

由表2可见，短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的恒幅疲劳寿命结果出现了异常现象，即低应力下的疲劳寿命分散性比高应力下的疲劳寿命分散性还小，它不满足文献 [ 8 ] 提出的三个原则，这样很难给出其带存活率的疲劳寿命表达式。但是，既然恒幅疲劳寿命实验结果服从对数正态分布，就可得出其不同存活率下的疲劳寿命，如表4所示。

表4 短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的带存活率的疲劳寿命

Table 4 Fatigue life with given survivability of CFRPEEK composite

	99.9% S <sub>v</sub>	95% S <sub>v</sub>	50% S <sub>v</sub>	5% S <sub>v</sub>	0.1% S <sub>v</sub>
78.5M Pa	23365	45458	96974	206870	402471
68.6M Pa	213828	407011	846915	1762274	3354409

这样，在文献 [ 9 ] 给出的变幅载荷下疲劳寿命和累积疲劳损伤临界值概率分布的预测方法基础上，可提出适于上述两级载荷下累积疲劳损伤度概率分布的预测方法如下：

- (1) 依据短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命概率分布，求得其应力  $S_1$ 、 $S_2$  下的带存活率的疲劳寿命  $N_{j,p}$  ( $j= 1, 2$ )。
- (2) 将每级应力下具有不同存活率的疲劳寿命除以其对应的中值疲劳寿命，得到具有不同存活率的累积疲劳损伤度。
- (3) 将不同存活率下的累积疲劳损伤度画在概率坐标纸上，得出预测值的概率分布类型。

根据上述预测过程，可分别得出在  $S_1$ 、 $S_2$  应力下短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料带存活率的累积疲劳损伤度的预测结果如表5所示。

将表5的预测结果，取对数后画在图4中。可见，两级应力下的累积疲劳损伤度的预测结果均服从对数正态分布。应该指出的是，由于短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命分散性的异常，使得在  $S_1$ 、 $S_2$  应力下预测的累积疲劳损伤度很接近（见表5），从而在图4中很难区分这两级下的预测结果。

图4同时给出了短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的由疲劳试验结果得到的累积疲劳损伤度，其中取平

表5 短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的带存活率的累积疲劳损伤度

Table 5 Critical cumulative damage with given survivability of CFRPEEK composite

	99.9% $S_V$	95% $S_V$	50% $S_V$	5% $S_V$	0.1% $S_V$
78.5MPa	0.2409	0.4688	1.0	2.133	4.1503
68.6MPa	0.2525	0.4806	1.0	2.0808	3.9607

均值作为失效概率的估计值，可见疲劳试验结果亦近似服从对数正态分布。

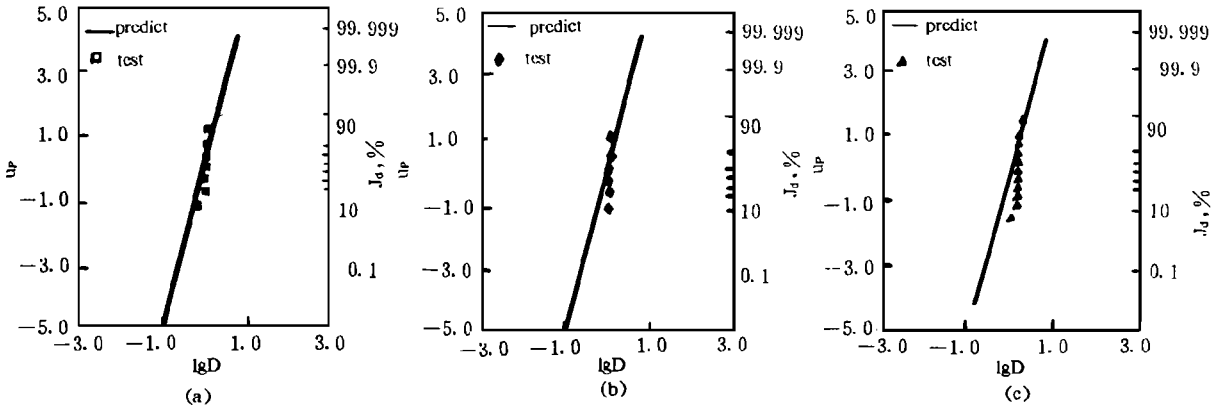


图4 短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料累积疲劳损伤度的预测结果及实验结果

(a) 高低加载；(b) 低高加载；(c) (a) + (b) 综合

Fig.4 The predicted probability distribution of cumulative damage index and test results of CFRPEEK composite under two-stage loading

(a) the high-low case (78.5MPa-68.6MPa); (b) the low-high case (68.6MPa-78.5MPa); (c) the case of (a) + (b)

6 讨论

比较表3可知，本文预测的第二级应力下的疲劳寿命和累积疲劳循环比与实验结果符合较好。预测的累积疲劳损伤度与实验结果的平均值和对数平均值符合很好。对高低加载，实验结果的平均值与预测值相差5.3%。低高加载时，实验结果的平均值与预测值相差11.5%。两种情况综合起来，实验结果的平均值与预测值相差8.2%。这表明用 Miner 定则可近似地但足够精确地预测短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的累积疲劳损伤度。

根据本文所提出的短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料在两级变幅载荷作用下累积疲劳损伤度的预测方法，实验结果理应分布在两条预测线之间，但正如前述，由

于恒幅载荷下的疲劳寿命实验结果出现异常，即低应力水平下的疲劳寿命对数方差比高应力水平下的还小，且这两级应力下的疲劳试验子样个数也不相等，从而很难得出其  $P-S-N$  曲线和表达式，从而未能得到更加满意的结果。但图4的实验结果与预测结果表明，尽管实验结果出现在预测区间外面，但大部分处于预测线右边的安全区，只有高存活率部分结果处于左边，偏于危险。但对于短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料这种新材料，在实际应用初期，本文所作的分析及结果对其实际应用具有一定的指导意义。为了得到更为满意的结果，应进行子样个数再大些的恒幅疲劳试验。但无论如何，本文所给出的两级变幅载荷下累积疲劳损伤度的预测方法对今后遇到类似问题具有一定的实用价值。

## 7 结论

本文通过对短碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的实验结果的再分析, 可以初步得出如下结论:

(1) 短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料的疲劳寿命服从对数正态分布。

(2) 其疲劳实验结果可以很好地用新的应力疲劳公式拟合, 并得出其应力疲劳公式如式 (1) 所示。

(3) 式 (1) 和 Miner 定则可用于其两级变幅载荷下疲劳寿命和累积疲劳损伤度的预测, 预测结果与实验结果的平均值及对数平均值符合很好。

(4) 本文提出了在无法得出其 P-S-N 曲线及表达式的情况下, 在两级载荷下疲劳实验所得到的累积疲劳损伤度的概率分布区间估计。预测结果表明, 短碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料两级载荷下的累积疲劳损伤度服从对数正态分布。实验结果亦近似地服从对数正态分布, 且分布在预测结果附近。

\* \* \* \* \*

(上接第12页)

$$- \frac{4V_f \gamma \cos \theta}{d_f (1 - V_f)} \quad (23)$$

当预制件开始变形时, 随着  $V_f$  增加致使  $P_c$  增加, 再从 0 到  $t$  将等式 (13) 积分可得  $x_f$ :

$$x_f = \frac{1 - F}{1 - V_f} \int_0^{t_1} u dt + \int_{t_1}^t \frac{u (1 - F)}{K (1 - V_f)} dt \quad (24)$$

在等式 (23) 和 (24) 中, 当预制件开始变形后,  $K$ 、 $V_f$ 、 $V_f$  和  $F$  均随着时间而变化, 这些变量作为表面压力  $P_s$  的函数, 这使得 (24) 式的函数关系过于复杂, 只有利用计算机, 将设定参量代入 (24) 式积分后才可以求得数值解。但定性分析 (24) 式可知, 浸渗距离  $x_f$  随着浸渗时间的增加而增加。

## 4 结论

(1) 分析了挤压铸造短纤维增强金属基复合材料的浸渗条件, 建立了液态金属在短纤维预制件中的浸渗和压力分布模型。

(2) 分别计算了外加压力使短纤维预制件发生变形和未变形两种情况下的浸渗距离和浸渗前端的压力。当外加压力不足以使预制件产生变形之前, 其浸渗距离和浸渗前端的压力分别为:

## 参考文献

- 1 Hull D. An Introduction to Composite Material. Cambridge University Press, 1981
- 2 Noguchi H, Kim Y H and Nisitani H. Engng Fract Mech, 1995, 46 (3): 457
- 3 Dickson R F, Jones C J, Harris B et al. J Mat Sci, 1985, 20: 60
- 4 Friedrich K, Walter R, Voss H et al. Composites, 1986, 17: 205
- 5 Nisitani H, Noguchi H and Kim Y H. Engng Fract Mech, 1993, 45 (4): 497
- 6 Nisitani H, Noguchi H and Kim Y H. Engng Fract Mech, 1992, 43 (5): 685
- 7 高镇同. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 8 郑修麟, 吕宝桐. 确定疲劳强度概率分布和 P-S-N 曲线表达式的简便方法. 机械强度, 1992, 14 (3): 60
- 9 魏建锋. 变幅载荷下疲劳寿命及其概率分布预测模型. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 1996

$$x_f = \frac{1 - F}{1 - V_f} \int_0^t u dt \text{ 和 } P_s = \frac{\mu u}{K_0} \frac{1 - F}{1 - V_f} \int_0^t u dt - \frac{4V_f \gamma \cos \theta}{d_f (1 - V_{f0})}$$

当外加压力使预制件产生变形之后, 则浸渗距离和浸渗前端的压力分别为:

$$x_f = \frac{1 - F}{1 - V_f} \int_0^{t_1} u dt + \int_{t_1}^t \frac{u (1 - F)}{K (1 - V_f)} dt \text{ 和 } P_s = \frac{\mu u}{K_0} \frac{1 - F}{1 - V_f} \int_0^t u dt + \mu u \int_{t_1}^t \frac{u (1 - F)}{K (1 - V_f)} dt - \frac{4V_f \gamma \cos \theta}{d_f (1 - V_f)}$$

## 参考文献

- 1 Y. H. ayashi, K. Ban and H. Sakurai. Bull. Japan Inst. Metals, 1986, 25: 565
- 2 E. Nakata, Y. Kagawa and H. Terao. J. Japan Soc. Comp. Mater. 1983, 9: 115
- 3 H. Matsubara, Y. Nishida, I. Shirayanagi. J. Japan Inst. Light Metals. 1989, 39: 338
- 4 H. Fukunaganad, K. Goda. J. Japan Soc. Mech. Eng., 1983, 49: 1808
- 5 储双杰. 金属基复合材料非平衡凝固过程的研究. 上海: 上海交通大学博士学位论文, 1996, 6
- 6 G. W. Jackson and D. F. James. Canada J. Chem. Eng., 1986, 64: 364
- 7 A. Mortensen and J. A. Cornie. Metall. Trans., 1987, 18A: 1160