

DOI: 10.7511/jslx20220729001

基于静强度分布参数的复合材料剩余强度及寿命预测

赵维涛*, 朱律婧, 刘春升

(沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

摘要:为探讨剩余强度及疲劳寿命与初始静强度分布参数之间的关系,构建基于初始静强度分布参数的剩余强度和疲劳寿命计算模型。在模型构建过程中未涉及复合材料结构的层数、铺层厚度和铺层方向,适应性强。模型参数可通过静力试验和剩余强度试验获得,试验成本相对疲劳试验较低。剩余强度和疲劳寿命与初始静强度变异系数及其分布参数有关,当初始静强度服从威布尔分布时,疲劳寿命亦服从威布尔分布,可为开展疲劳可靠性提供借鉴和参考。算例表明,基于建立的模型,剩余强度计算结果最大误差为-1.58%,疲劳寿命与试验数据吻合较好。

关键词:复合材料;剩余强度;疲劳寿命;初始静强度;分布参数

中图分类号: O346.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)02-0270-05

1 引言

复合材料相比金属材料具有更好的力学性能,在航空航天、能源和建筑等领域得到广泛应用。目前对复合材料结构疲劳的研究,人们主要采取两种方法。一种方法从损伤角度出发,结合试验数据建立损伤模型,当材料疲劳累积损伤到一定数值时,材料发生破坏,进而对疲劳寿命进行预测;另一种方法从剩余强度或刚度角度出发,结合试验数据建立剩余强度或刚度模型,当剩余强度或刚度小于一定数值时,材料发生破坏。剩余强度的概念最早从金属疲劳寿命预测方法中提出,随后人们将其引至复合材料。剩余强度理论存在三个假设,(1)初始静强度服从一定统计分布;(2)剩余强度与初始静强度有关;(3)材料临界破坏时加载最大应力大于等于剩余强度。

Schaff等^[1]提出了复合材料在疲劳载荷下的剩余强度模型和寿命预测。Huston^[2]导出了等效静强度与剩余强度的关系,得到了与静强度、加载次数和最大应力有关的剩余强度模型。Gao等^[3]基于干涉理论提出了碳纤维增强环氧复合材料的剩余强度概率模型。Chen等^[4]基于剩余强度模型和疲劳寿命曲线,建立了应力峰值概率密度函数和随机过程功率谱密度模型。Yao等^[5,6]基于强度和刚度退化模型与损伤等效原则建立了疲劳寿命概率模型。田昆^[7]结合复合材料失效准则、剩余强度

和剩余刚度模型,模拟累积损伤过程,建立了疲劳寿命预测模型。奚蔚等^[8]研究了刚度退化准则对复合材料强度的影响,并实现了仿真软件中的子程序开发。刘建明等^[9]采用单向板试验数据,对正则化疲劳寿命与剩余强度进行拟合,通过对损伤的研究,得到了材料性能退化模型。拓宏亮等^[10]结合失效准则和材料性能退化模型建立了一种预测复合材料层合板疲劳演化和失效过程的疲劳损伤模型。汪厚冰等^[11]通过研究含离散源损伤的复合材料壁板剩余强度,提出了在内压-轴压联合载荷下的剩余强度估算模型。

由于加载顺序不同对强度衰减造成的影响不同,学者研究了等损伤和等效强度模型。张禄等^[12]基于强度退化系数,建立了两种疲劳累积损伤模型。刘苏超等^[13]基于剩余强度模型建立了等损伤模型,并利用疲劳累积损伤模型研究了不同加载次序对疲劳寿命的影响。马存旺等^[14]研究了分层界面损伤与应变能释放率之间的关系,提出了复合材料整体结构分层疲劳全寿命预测流程。童瑶等^[15]通过有限元软件建立了含分层复合材料层合板压缩剩余强度模型,并通过试验数据验证了其可行性。籍永青等^[16]通过试验数据拟合,建立了复合材料层合板拉伸剩余强度模型。刘宝瑞等^[17]对陶瓷基复合材料氧化行为进行研究,提出了氧化损伤的剩余强度模型。王明明^[18]针对三种层间模型,建立了含初始分层复合材料的剩余强度模型。Tan等^[19]建立了低速冲击下的剩余强度模型,进而得到了高精度渐进损伤模型。黄小娣等^[20]研究了冲击速度与温度对复合材料冲击的影响,得到了低速冲击下的剩

收稿日期:2022-07-29;修改稿收到日期:2022-10-02.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12272240)资助.

作者简介:赵维涛*(1977-),男,博士,教授

(E-mail:zhwt201@163.com).

余强度模型。刘俭辉等^[21]修正了应力场强法,建立了含冲击损伤的复合材料疲劳寿命模型。

目前,对复合材料剩余强度的研究主要是利用复合材料剩余强度试验和疲劳试验,通过试验数据拟合剩余强度模型中的相应参数,但这些研究忽略了初始静强度统计参数对剩余强度和疲劳寿命的影响。因此,本文通过探讨剩余强度和疲劳寿命与初始静强度统计参数的关系,构建考虑初始静强度分布参数的复合材料结构剩余强度和疲劳寿命模型,即充分考虑初始静强度对剩余强度和疲劳寿命的影响。

2 经典剩余强度模型

剩余强度是与应力比、最大应力和循环次数等有关的函数,一般情况下,剩余强度应满足以下特征。

(1) 初始未加载时,剩余强度 R 等于初始静强度 σ_0 , 即 $n=0$ 时, $R(0)=\sigma_0$ 。

(2) 当材料发生破坏,剩余强度等于加载最大应力 σ_{\max} , 即 $n=N$ 时, $R(N)=\sigma_{\max}$ 。

(3) 加载初期,强度退化速率较慢,即 $n \rightarrow 0$ 时, $dR(n)/dn \rightarrow 0$ 。

(4) 当 $n/N \rightarrow 1$ 时,材料出现突然死亡,剩余强度急剧减小,直至破坏。

经典复合材料剩余强度模型^[2]为

$$R(n) = R(0) - [R(0) - \sigma_{\max}](n/N)^d \quad (1)$$

式中 n 为循环次数, N 为材料破坏时的循环次数, $R(n)$ 为循环 n 次后的剩余强度值, σ_{\max} 为载荷循环下的最大应力, d 为强度退化系数。

强度退化系数 d 值可由试验数据拟合得到,对应强度退化的三个阶段(初期、中期和后期)取值不同。加载初期,强度退化速率较慢, $d < 1$; 加载中期,强度退化速率基本不变, $d = 1$; 加载后期,材料突然死亡, $d \gg 1$ 。

中期疲劳寿命占整个疲劳寿命的比重较大,若只考虑中期疲劳寿命,则复合材料剩余强度的线性模型为

$$R(n) = R(0) - [R(0) - \sigma_{\max}](n/N) \quad (2)$$

3 基于静强度分布参数的剩余强度与疲劳寿命模型

由于环境和制造工艺等因素的影响,复合材料初始静强度 $R(0)$ 是一个随机变量。复合材料初始静强度 $R(0)$ 一般服从威布尔分布、对数正态分布或正态分布,其分布参数可由试验数据拟合得到,本文采用双参数威布尔分布。一般情况下,复合材料剩余强度衰减速率与剩余强度成非线性反

比关系^[1,2],本文假定剩余强度衰减率与剩余强度的关系为

$$dR(n)/dn = -\delta f(\sigma_{\max}, \omega, r)/R^{1/\delta-1}(n) \quad (3)$$

式中 $f(\sigma_{\max}, \omega, r)$ 为最大应力 σ_{\max} 、频率 ω 和应力比 r 的函数, δ 为复合材料初始静强度的变异系数。

如果频率 ω 和应力比 r 不变,即常幅载荷作用下,则 $f(\sigma_{\max}, \omega, r) = f(\sigma_{\max})$, 此时将式(3)进行积分,即

$$\int_0^n \frac{1}{\delta} R^{1/\delta-1}(n) dR(n) = - \int_0^n f(\sigma_{\max}) dn \quad (4)$$

$$\text{得 } R^{1/\delta}(n) = R^{1/\delta}(0) - f(\sigma_{\max}) n \quad (5)$$

假设当剩余强度 $R(n)$ 下降到最大应力 σ_{\max} 时结构发生破坏,则疲劳寿命为

$$N = [R^{1/\delta}(0) - \sigma_{\max}^{1/\delta}]/f(\sigma_{\max}) \quad (6)$$

由于初始静强度 $R(0)$ 是随机变量,因此疲劳寿命 N 也为随机变量。利用 $R(0)$ 的分布(双参数威布尔分布)可推导出疲劳寿命 N 的分布函数,即

$$\begin{aligned} F_N(n) &= P(N \leq n) = \\ &P([R^{1/\delta}(0) - \sigma_{\max}^{1/\delta}]/f(\sigma_{\max}) \leq n) = \\ &P(R(0) \leq [nf(\sigma_{\max}) + \sigma_{\max}^{1/\delta}]^\delta) = \\ &1 - \exp\{-[R(0)/\eta]^m\} = \\ &1 - \exp\left\{-\left[\frac{n + \sigma_{\max}^{1/\delta}/f(\sigma_{\max})}{\eta^{1/\delta}/f(\sigma_{\max})}\right]^{\delta m}\right\} \quad (7) \end{aligned}$$

式中 η 和 m 分别为初始静强度 $R(0)$ 服从威布尔分布的比例参数和形状参数。

由式(7)可知,疲劳寿命服从三参数威布尔分布,比例参数为 $\eta^{1/\delta}/f(\sigma_{\max})$, 形状参数为 δm , 位置参数为 $-\sigma_{\max}^{1/\delta}/f(\sigma_{\max})$ 。

由威布尔分布可知,特征寿命为

$$N^* = \eta^{1/\delta}/f(\sigma_{\max}) \quad (8)$$

平均寿命为

$$\text{MTBF} = -\frac{\sigma_{\max}^{1/\delta}}{f(\sigma_{\max})} + \frac{\eta^{1/\delta}}{f(\sigma_{\max})\Gamma(1+1/\delta m)} \quad (9)$$

式中 Γ 为 Gamma 函数。

利用常幅载荷疲劳试验数据可以拟合经典 S-N 曲线,将寿命 N 取为特征寿命 N^* , S-N 数学表达式为

$$k_2 \sigma_{\max}^{k_1 \delta m} N^* = 1 \quad (10)$$

式中 k_1 和 k_2 为材料常数,可由试验数据拟合得到。

对比式(8,10),得

$$f(\sigma_{\max}) = \eta^{1/\delta} k_2 \sigma_{\max}^{k_1 \delta m} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)即可求得结构剩余强度为

$$R(n) = [R^{1/\delta}(0) - \eta^{1/\delta} k_2 \sigma_{\max}^{k_1 \delta m} n]^\delta \quad (12)$$

将式(11)代入式(6)即可求得结构破坏时的疲劳寿命,如下

$$N = [R^{1/\delta}(0) - \sigma_{\max}^{1/\delta}] / \eta^{1/\delta} k_2 \sigma_{\max}^{k_1 \delta m} \quad (13)$$

通过理论公式推导可知,(1)在剩余强度和疲劳寿命公式中涉及5个参数,其中 η 、 m 和 δ 可由静力试验获得; k_1 和 k_2 在有条件情况下可通过疲劳试验由式(10)拟合获得,在条件有限时可通过剩余强度试验(未发生疲劳破坏)通过式(12)拟合获得;(2)当不考虑初始静强度分布参数时,强度退化模型为式(5)。若进一步不考虑强度退化的非线性特征,结合 $n=N$ 时 $R(N) = \sigma_{\max}$,则式(5)可退化为式(2)。综上,当不考虑初始静强度分布参数及强度退化的非线性特征时,本文模型可退化为经典线性剩余强度模型。

4 算例

文献[2]针对碳纤维增强环氧树脂复合材料,先开展拉伸试验以确定初始静强度的分布参数,然后开展疲劳试验以确定材料的S-N曲线和剩余强度,拉伸试验按照ASTM D3039进行,疲劳试验数据如图1所示,载荷谱及剩余强度列入表1。已知初始静强度服从威布尔分布,比例参数 $\eta=2235$ MPa,形状参数 $m=13.24$,变异系数 $\delta=0.09$,初始静强度为具有90%存活率的强度值,即 $R(0)=1945$ MPa。

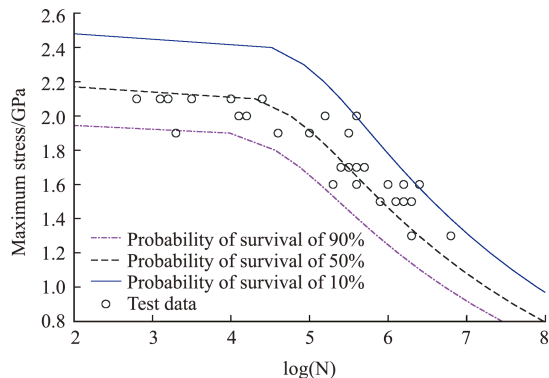


图1 具有存活率的S-N曲线
Fig.1 S-N curve with survival probability

表1 载荷谱及剩余强度

Tab.1 Load spectrum and residual strength

最大应力 /MPa	加载次数	剩余强度/MPa			
		1st block	2st block	3st block	4st block
1480	8100	1939	1905	1857	1772
1200	50000	1938	1904	1855	1768
990	225000	1938	1903	1855	1769
1310	23000	1936	1901	1850	1757
1800	500	1923	1883	1822	Failure
1630	1900	1914	1870	1798	—
1100	115000	1913	1869	1797	—
850	1000000	1913	1869	1797	—

4.1 剩余强度及寿命预测

应用表1中剩余强度的第一列数据(1st block)拟合本文模型中的参数 k_1 和 k_2 ,计算结果

为 $k_1=4.32$, $k_2=1.41 \times 10^{-23}$ 。本文模型的计算结果列入表2。对比表1和表2可知,本文方法与文献方法计算的剩余强度大体相同,最大误差为 -1.58% ;疲劳破坏发生在4st block的1800 MPa(剩余强度小于最大应力),存活率为90%的疲劳寿命为 4.5766×10^6 次,与文献[2]的结果一致。

表2 载荷谱及剩余强度(本文方法)

Tab.2 Load spectrum and residual strength (proposed method)

最大应力 /MPa	加载次数	剩余强度/MPa			
		1st block	2st block	3st block	4st block
1480	8100	1943	1901	1848	1772
1200	50000	1939	1896	1841	1761
990	225000	1932	1887	1829	1741
1310	23000	1928	1883	1823	1732
1800	500	1928	1883	1822	Failure
1630	1900	1927	1882	1821	—
1100	115000	1920	1873	1809	—
850	1000000	1904	1851	1777	—

4.2 疲劳寿命特征分析

4.2.1 S-N曲线

利用初始静强度威布尔分布参数,将存活率为90%、50%和10%的强度值取为初始静强度 $R(0)$,利用式(13)绘制最大应力与疲劳寿命的关系曲线(具有存活率的S-N曲线)如图1所示。可以看出,S-N曲线与试验数据拟合较好,在存活率为90%和10%两条曲线之间包含了绝大多数试验数据。因此,能够说明,(1)剩余强度和疲劳寿命公式具有较好的精度;(2)疲劳寿命服从威布尔分布及其参数是合理的。

4.2.2 平均寿命(MTBF)

利用图1的试验数据,拟合S-N曲线,然后利用Miner线性累积损伤理论求得在载荷谱作用下的平均寿命为 3.8538×10^7 次。

利用式(9)求出各级载荷作用下的平均寿命 $MTBF_i$,然后利用 $MTBF = \sum n_i MTBF_i / \sum n_i$ 求出在载荷谱作用下的平均寿命为 4.4584×10^7 次。

对比两种方法计算的平均寿命可知,利用S-N曲线和利用寿命威布尔分布参数给出的平均寿命在同一数量级上,且相差不多。

4.2.3 概率密度函数

由式(7)可知,疲劳寿命服从三参数威布尔分布,其中位置参数 $-\sigma_{\max}^{1/\delta} / f(\sigma_{\max})$ 是负值,但对于疲劳寿命而言不应该出现负值,似乎不合理。基于式(8),位置参数可以进一步表示为 $-(\sigma_{\max} / \eta)^{1/\delta} N^*$,由于 $\sigma_{\max} / \eta < 1, 1/\delta > 1$,因此位置参数相对特征寿命而言较小。取最大应力为1000 MPa,1200 MPa和1400 MPa,计算得到的位置参数分别为

-2.8981×10^{-30} , -1.1524×10^{-30} 和 -5.2849×10^{-31} 。综上,在实际工程中可以将位置参数取为0,即疲劳寿命服从二参数威布尔分布,其比例参数为 $\eta^{1/\delta}/f(\sigma_{\max})$, 形状参数为 δm 。

取最大应力为 1000 MPa, 1200 MPa 和 1400 MPa, 绘制疲劳寿命的概率密度函数如图 2 所示。可以看出,应力水平越低,疲劳寿命分散性越大;反之应力水平越高,疲劳寿命分散性越小。这符合实际情况,即当应力水平较高时,大部分试件在较短寿命内发生破坏,少部分试件疲劳寿命略长,疲劳寿命分散性较小;当应力水平较低时,由于初始强度的分散性,导致一部分试件的疲劳寿命较长,另一部分试件的疲劳寿命较短。

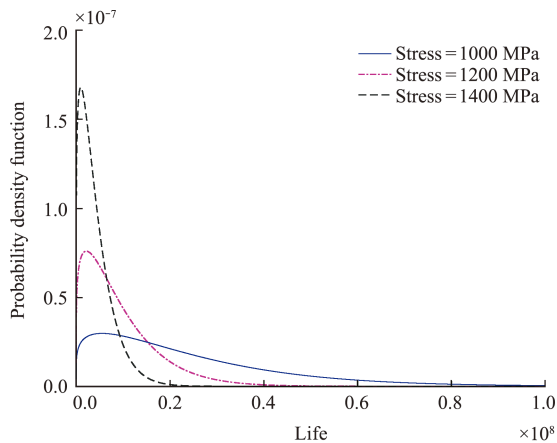


图 2 疲劳寿命概率密度曲线
Fig. 2 Probability density curve of fatigue life

5 结 论

(1) 基于复合材料初始静强度的分布参数,构建了剩余强度和疲劳寿命计算模型,在模型构建过程中未涉及复合材料结构的层数、铺层厚度和铺层方向,适应性强。模型中涉及到 5 个参数,其中 δ , m 和 η 可由静力试验获得, k_1 和 k_2 在有条件情况下可通过疲劳试验拟合获得,在条件有限时可通过剩余强度试验拟合获得,进而减少试验成本。

(2) 从计算公式可以看出,剩余强度和疲劳寿命与初始静强度变异系数及其分布参数有关。当初始静强度服从威布尔分布时,疲劳寿命亦服从威布尔分布。疲劳寿命对应威布尔分布的位置参数几乎为 0,在实际工程中可以忽略不计;比例参数与初始静强度的比例参数和应力水平有关;形状参数为 δm , 即疲劳寿命的形状参数取决于初始静强度变异系数和初始静强度的形状参数,与应力水平无关,可为开展疲劳可靠性提供借鉴和参考。

(3) 算例分析表明,剩余强度计算结果与文献结果大体相同,最大误差为 -1.58% ,疲劳寿命与文献结果相同, S-N 曲线与试验数据拟合较好, MTBF

较为合理,疲劳寿命概率密度曲线符合实际。

(4) 本文重在探讨剩余强度及疲劳寿命与初始静强度分布参数之间的关系,虽然计算结果与试验数据吻合较好,但建立的模型还需要大量试验数据和工程案例加以验证。

参考文献(References):

- [1] Schaff J R, Davidson B D. Life prediction methodology for composite structures. Part I: Constant amplitude and two-stress level fatigue [J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, **31**(2): 128-157.
- [2] Huston R J. Fatigue life prediction in composites [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1994, **59**(1-3): 131-140.
- [3] Gao J X, An Z W. A new probability model of residual strength of material based on interference theory [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, **118**: 202-208.
- [4] Chen X J, Sun Y, Wu Z W, et al. An investigation on residual strength and failure probability prediction for plain weave composite under random fatigue loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, **120**: 267-282.
- [5] Yao W X, Himmel N. A new cumulative fatigue damage model for fibre-reinforced plastics [J]. *Composites Science and Technology*, 2000, **60**(1): 59-64.
- [6] Wu F Q, Yao W X. A fatigue damage model of composite materials [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, **32**(1): 134-138.
- [7] 田 昆. 纤维增强复合材料层合板强度与疲劳渐进损伤分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2019. (TIAN Kun. Strength and Progressive Damage Analysis of Fiber Reinforced Composite Laminates [D]. Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese))
- [8] 奚 蔚, 郑晓玲, 汤家力, 等. 刚度退化准则对复合材料强度分析的影响研究 [J]. *机械设计与制造工程*, 2021, **50**(10): 74-77. (XI Wei, ZHENG Xiao-ling, TANG Jia-li, et al. Influence study of stiffness degradation criterion on composite strength analysis [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2021, **50**(10): 74-77. (in Chinese))
- [9] 刘建明, 万小鹏, 赵美英. 层合板螺栓连接结构疲劳寿命预测 [J]. *航空学报*, 2015, **36**(6): 1867-1875. (LIU Jian-ming, WAN Xiao-peng, ZHAO Mei-ying. Fatigue life prediction of laminated bolted joint structures [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, **36**(6): 1867-1875. (in Chinese))
- [10] 拓宏亮, 吴 涛, 卢智先, 等. 复合材料层合板疲劳寿命预测方法研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2022, **40**(3): 651-660. (TUO Hong-liang, WU Tao, LU Zhi-xian, et al. Study on fatigue life prediction method of composite laminates [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, **40**(3): 651-660. (in Chinese))
- [11] 汪厚冰, 王夏涵, 林国伟, 等. 含离散源损伤的复合材料壁板的剩余强度评估 [J]. *航空学报*, 2022, **43**(6): 459-468. (WANG Hou-bing, WANG Xia-han, LIN

- Guo-wei, et al, Residual strength evaluation of curved hat-stiffened composite panels with discrete-source damage[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(6):452-461. (in Chinese))
- [12] 张 禄, 纪 威, 周 炜, 等. 基于强度退化的疲劳累积损伤模型[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(S1):47-52. (ZHANG Lu, JI Wei, ZHOU Wei, et al. Fatigue cumulative damage models based on strength degradation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(S1):47-52. (in Chinese))
- [13] 刘苏超, 姜长杰, 刘新田. 基于强度退化的金属材料疲劳寿命预估[J]. 机械强度, 2021, **43**(3):742-746. (LIU Su-chao, JIANG Chang-jie, LIU Xin-tian. Fatigue life prediction of metal materials based on strength degradation [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, **43**(3):742-746. (in Chinese))
- [14] 马存旺, 鲁国富, 李光亮. 整体复合材料结构分层疲劳寿命预测方法研究[J]. 计算力学学报, 2013, **30**(3):455-460. (MA Cun-wang, LU Guo-fu, LI Guang-liang. Study on prediction method for delamination fatigue total lives of integrated composite structures [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, **30**(3):455-460. (in Chinese))
- [15] 童 瑶, 刘 磊, 朱书华. 含分层复合材料层板压缩剩余强度分析[J]. 航空计算技术, 2022, **52**(1):110-114. (TONG Yao, LIU Lei, ZHU Shu-hua. Analysis of compressive residual strength of composite laminates with delamination[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2022, **52**(1):110-114. (in Chinese))
- [16] 籍永青, 徐 颖, 游彦宇. 含分层复合材料层合板拉伸剩余强度研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, **50**(2):51-54. (JI Yong-qing, XU Ying, YOU Yan-yu. Research on residual tensile strength of composite laminates with initial delamination[J]. *Machine Building & Automation*, 2021, **50**(2):51-54. (in Chinese))
- [17] 刘宝瑞, 李 尧, 侯传涛, 等. 陶瓷基复合材料氧化行为与剩余强度数值分析[J]. 强度与环境, 2021, **48**(6):1-8. (LIU Bao-rui, LI Yao, HOU Chuan-tao, et al. Numerical analysis method of oxidation behavior and residual strength for ceramic matrix composite [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2021, **48**(6):1-8. (in Chinese))
- [18] 王明明. 含初始分层复合材料结构剩余强度与疲劳寿命预测方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2019. (WANG Ming-ming. Research on Prediction Methods of Residual Strength and Fatigue Life of Laminated Composites Containing Delamination [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese))
- [19] Tan W, Falzon B G, Chiu L N S, et al. Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, **71**:212-226.
- [20] 黄小娣, 李月勇, 杨 斌. 冲击速度和温度对层合板冲击后压剩余强度的影响[J]. 机械科学与技术, 2021, **40**(7):1137-1142. (HUANG Xiao-di, LI Yue-yong, YANG Bin. Effect of impact velocity and temperature on residual strength subjected to compression after impact of laminates [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, **40**(7):1137-1142. (in Chinese))
- [21] 刘俭辉, 薛文卓, 魏 泰. 含冲击损伤复合材料层合板疲劳寿命预测[J]. 西安理工大学学报, 2022, **38**(2):164-170. (LIU Jian-hui, XUE Wen-zhuo, WEI tai. Fatigue life prediction of composite laminates with impact damage [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2022, **38**(2):164-170. (in Chinese))

Residual strength and life prediction of composites based on static strength distribution parameters

ZHAO Wei-tao*, ZHU Jin-jing, LIU Chun-sheng

(Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To reveal the relationship of residual strength and fatigue life with initial static strength distribution parameters, calculation models of residual strength and fatigue life based on initial static strength distribution parameters are constructed. The number of layers, ply thickness and ply angle of the composite structure are not involved in the process of model construction, so the models have strong adaptability. The model parameters can be obtained from a static test and a residual strength test, thus the test cost of the proposed method is lower than that of a fatigue test. The residual strength and fatigue life are related to the variation coefficient and distribution parameters of the initial static strength. When the initial static strength obeys the Weibull distribution, the fatigue life also obeys the Weibull distribution, which can provide a reference for fatigue reliability. The example shows that the maximum error of the residual strength calculation result is -1.58% and the fatigue life fits well with the test data.

Key words: composite material; residual strength; fatigue life; Initial static strength; distributed parameter

引用本文/Cite this paper:

赵维涛, 朱肆婧, 刘春升. 基于静强度分布参数的复合材料剩余强度及寿命预测[J]. 计算力学学报, 2024, **41**(2):270-274.

ZHAO Wei-tao, ZHU Jin-jing, LIU Chun-sheng. Residual strength and life prediction of composites based on static strength distribution parameters[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, **41**(2):270-274.