

文章编号:1000-8055(2011)01-0185-06

7050-T7451 铝合金试件的疲劳安全寿命估算

任旭东, 姜大伟, 张永康, 张 田, 罗新民

(江苏大学 机械工程学院 江苏省光子制造科学与技术重点实验室, 镇江 212013)

摘 要: 对 7050-T7451 铝合金试件的三类不同试样激光冲击强化处理, 研究其 7 组疲劳寿命值, 并对铝合金试件的疲劳试验结果分别用单侧容限因数法和二维 Weibull 分布法进行疲劳安全寿命估算及比较. 结果表明, 激光冲击强化作用大大提高了铝合金试样的疲劳寿命; 在考虑置信度和可靠度的前提下, 单侧容限因数法能得到一个确切的疲劳安全寿命估算值, 而二维 Weibull 分布法则得到一个疲劳安全寿命值的取值范围; 考虑到工程应用中成本、安全等因素对疲劳安全寿命值的不同要求, 二维 Weibull 分布法更具有工程适用性.

关 键 词: 疲劳安全寿命; 二维 Weibull 分布法; 激光冲击强化; 单侧容限因数法; 7050-T7451 铝合金
中图分类号: TB301; TN249 **文献标识码:** A

Estimation of fatigue safe lives of 7050-T7451 aluminum alloy samples

REN Xu-dong, JIANG Da-wei, ZHANG Yong-kang,
ZHANG Tian, LUO Xin-min

(Jiangsu Key Laboratory of Laser Manufacture Science and Technology Ministry,
College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Laser shock processing of three categories of 7050-T7451 aluminum alloy samples was carried out, and their seven groups of fatigue life values were studied. To obtain the values of fatigue safe life of 7050-T7451 aluminum alloy specimens, the unilateral tolerance factor statistical analysis method and two-dimensional Weibull distribution method were used to predict the values of fatigue safe life, respectively, and these two kinds of calculation results were compared. The results show that: the fatigue life of aluminum alloy samples is enhanced greatly by laser shock processing, and in consideration of the confidence and reliability, the unilateral tolerance factor method can get an exact estimation value of the fatigue safe life, while the two-dimensional Weibull distribution method can get the range of values of fatigue safe life; considering different requirements of capital and safety, etc, on the fatigue safe life, the two-dimensional Weibull distribution method is more suitable for engineering applications.

Key words: fatigue safe life; two-dimensional Weibull distribution method;
laser shock processing; unilateral tolerance factor method;
7050-T7451 aluminum alloy

寿命问题是影响飞行器安全运行的重要因素之一. 在飞机结构设计中, 把飞机结构从开始使用到发生疲劳破坏所作用的循环载荷的次数或时

间, 称为疲劳寿命; 而为了保证飞机结构的安全, 采用某种方法, 确定出一个较低的结构使用寿命, 称为疲劳安全寿命^[1]. 为了确保设备在使用时存

收稿日期: 2009-11-30; 修订日期: 2010-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(50735001, 50905080); 中国博士后基金(20100471385); 江苏大学高级人才启动基金(10jd066)

作者简介: 任旭东(1977-), 男, 江苏南通人, 讲师, 博士, 研究方向为激光检测与加工. E-mail: renxd@ujs.edu.cn

在或正在扩展的裂纹不会发生无法挽回的灾难性事故,必须可靠地确定疲劳条件下的疲劳安全寿命^[2],估算结构的疲劳安全寿命对于设备的安全使用、维护具有重要意义^[3-5]. 在实际的工程应用中,对疲劳安全寿命有不同的要求,有时对安全性的要求较高,所采用的疲劳安全寿命越低越能保证安全性^[1-2];而有时考虑到成本因素,所采用的疲劳安全寿命高就越节省成本^[6]. 7050 铝合金是广泛用于飞机制造的航空高强结构铝合金,经过激光冲击强化处理后,材料疲劳寿命获得提高^[7-8]. 本文采用 7050-T7451 铝合金进行激光强化对比试验,对三类不同状态的试样进行激光冲

击处理,再进行疲劳试验,得到 7 组疲劳寿命值. 分别采用单侧容限因数法和二维 Weibull 模型法进行计算,并且考虑了可靠度与置信度的影响,期望能获得一种具有工程适用性的疲劳安全寿命计算方法.

1 试 验

试验材料采用飞机上广泛使用的 7050-T7451 铝合金,试样的化学成分及材料参数见表 1 和表 2. 试样分为三类进行对比试验,一类为预制裂纹试样,一类为预制小孔试样,另一类为无裂纹完好试样,其表面形状如图 1.

表 1 7050-T7451 超厚板化学成分

Table 1 Chemical compositions of 7050-T7451 ultra thick plate

质量分数/%												
牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Ti	其他		Al
										单个	合计	
7050	≤0.12	≤0.15	2.0~2.6	≤0.10	1.9~2.6	≤0.04	0.08~0.15	5.7~6.7	≤0.06	≤0.05	≤0.15	余量

表 2 7050-T7451 超厚板机械性能

Table 2 Mechanical property of 7050-T7451 ultra thick plate

牌号	供应状态	厚度/mm	取样方向	抗拉强度	规定非比例延伸强度	断后伸长率
				σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa (不小于)	
7050	T7451	60~76	L	503	434	9
			LT	503	434	8
			ST	469	407	3
		>76~102	L	496	427	9
			LT	496	427	6
			ST	469	400	3

注:L 为纵向,LT 为横向,ST 为高向.

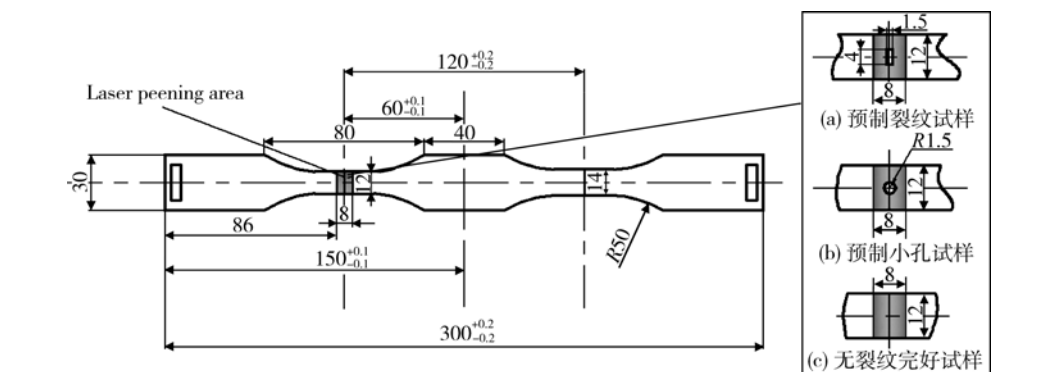


图 1 试样形貌及尺寸图

Fig. 1 Appearance and dimensional drawings of samples

对三类试样进行激光冲击对比试验处理,激光冲击处理在江苏大学机械工程学院钹玻璃强激光试验装置上完成,选定激光冲击参数功率密度为 2.91 GW/cm^2 ,脉冲宽度为 20 ns ,能量为 12 J . 根据工业化应用的需要选用水作约束层,选用铝箔作为保护涂层,铝箔厚度为 0.1 mm . 为了效果的均匀性,采用圆形光斑,光斑面积为 0.09 cm^2 ,半圆搭接. 冲击强化后得到 7 种试样对应序号分别为:未受激光冲击预制裂纹试样 1;未受激光冲击预制小孔试样 2;未受激光冲击无裂纹完好试样 3;双面激光冲击无裂纹完好试样 4;单面激光

冲击无裂纹完好试样 5;单面激光冲击预制小孔试样 6;单面激光冲击预制裂纹试样 7. 疲劳试验在华东理工大学动力机械工程学院完成,试验机型号为 PLG-100C 高频疲劳试验机,采用了不同的平均应力水平进行有效的对比. 7 组试验数据如表 3 所示,从表 3 可以看出,材料的疲劳寿命在经过激光冲击后获得极大提高,如未受激光冲击预制裂纹试样 1 经过单面激光冲击后成为单面激光冲击预制裂纹试样 7,在 67.3 MPa 的平均应力作用下,其平均疲劳寿命由 22 180 次提高到 156 423 次,增长了 605%.

表 3 试样疲劳寿命(单位:(循环)次)

Table 3 Fatigue lives of test specimens (unit: cycle)

	试样序号						
	1	2	3	4	5	6	7
	平均应力/MPa						
	67.3	101.3	270	270	270	101.3	67.3
疲劳寿命/次	22 359	25 202	38 369	45 217	60 010	93 338	152 506
	23 316	30 466	42 057	40 442	70 646	120 000	121 759
	28 478	22 295	36 668	51 528	86 560	81 415	201 421
	20 016	24 205	45 421	36 354	62 050	117 021	133 139
	20 026	29 655	30 009	46 245	70 964	131 620	162 055
	18 889	24 324				106 622	167 659
平均疲劳寿命/次	22 180	26 024	38 505	44 018	70 046	108 336	156 423

2 试验数据分析

2.1 单侧容限因数法

通常要使测定出的疲劳安全寿命具有一定的置信度,必须保证有足够的试样. 但是考虑到经济因素,当试样个数不能满足观测值的要求时,则可借助单侧容限因数 k ,给出具有置信度 γ 和可靠度 p 的疲劳安全寿命^[9]. 当对数疲劳寿命遵循正态分布时,可靠度 p 的对数安全疲劳寿命 x_p 可表示为

$$x_p = \mu + u_p \sigma \quad (1)$$

对于任何指定的可靠度 p , 都可以确定出一个 u_p 值,使得母体中有 p 的个体对数疲劳寿命大于 $\mu + u_p \sigma$. 用 $\bar{x}$ 和 β_s 作为 μ 和 σ 的估计量,为了使估计出的安全寿命不超过真值,需要寻找一个因数 k 取代 u_p ,使得由 c 估计出的对数安全寿命小于真值 $\mu + u_p \sigma$ 的概率为 γ , 这个 γ 就是安全寿命的置信度. 引入随机变量函数 $\epsilon = (\bar{x} + k\beta_s)$, 安

全寿命 $\bar{x} + k\beta_s$ 小于母体真值 $\mu + u_p \sigma$ 的概率以置信度 γ 表示为^[9]

$$P(\bar{x} + k\beta_s < \mu + u_p \sigma) = \gamma \quad (2)$$

假定 $\epsilon = (\bar{x} + k\beta_s)$ 服从正态分布 $N[E(\epsilon), \text{Var}(\epsilon)]$, 则由式(2)可得

$$\mu + u_p \sigma = E(\epsilon) + u_\gamma \sqrt{\text{Var}(\epsilon)} \quad (3)$$

根据统计理论可导出

$$E(\epsilon) = E[\bar{x} + k\beta_s] = E(\bar{x}) + kE(\beta_s) = \mu + k\sigma \quad (4)$$

$$\text{Var}(\epsilon) = \frac{\sigma^2}{n} + k^2 \left\{ \frac{(n-1)\sigma^2}{2} \left[\frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \right]^2 - \sigma^2 \right\} \quad (5)$$

当 $n = 5$ 时,则式(5)可写成

$$\text{Var}(\epsilon) = \sigma^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{k^2}{2(n-1)} \right] \quad (6)$$

将式(4)、式(6)代入式(3),得

$$\mu + u_p\sigma = \mu + k\sigma + u_\gamma\sigma\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{k^2}{2(n-1)}} \quad (7)$$

于是得出 k 的表达式为

$$k = \frac{u_p - u_\gamma\sqrt{\frac{1}{n}\left[1 - \frac{u_\gamma^2}{2(n-1)}\right] + \frac{u_p^2}{2(n-1)}}}{1 - \frac{u_\gamma^2}{2(n-1)}} \quad (8)$$

式中 k 称为单侧容限因数; n 为观测值个数; u_p 和 u_γ 分别是与可靠度和置信度相关的正态偏量. 当已知 u_p , u_γ 和 n 时, 可以由式(8)求出因数 k , 通过计算可得在不同的置信度和可靠度下, $n=5$, $n=6$ 时, k 的值由表 4 所示. 具有置信度 γ 和可靠度 p 的安全对数寿命为

$$\hat{x}_p = \bar{x} + k\beta s \quad (9)$$

其中 β 为修正参数, $n=5$ 时, $\beta=1.064$; $n=6$ 时, $\beta=1.051$; $\bar{x}$ 为平均值; s 为标准差. 由式(9)求出具有置信度 γ 和可靠度 p 的安全疲劳寿命为

$$\hat{N}_p = \lg^{-1} \hat{x}_p \quad (10)$$

$\hat{N}_p$ 的含义是: 以 γ 置信度来说(有 γ 的把握), 母体中至少有 p 的个体疲劳寿命大于 $\hat{N}_p$.

表 4 不同的置信度和可靠度下 k 值^[9]

Table 4 Values of k under different confidences and reliabilities

子样大小 n	置信度/%	可靠度/%	
		90	99
5	95	-3.382	-5.750
	90	-2.585	-4.400
6	95	-2.964	-5.025
	90	-2.379	-4.048

在不同置信度和可靠度下, 用单侧容限因数法得出的 7 组疲劳寿命数据所对应的安全疲劳寿命结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 单侧容限因数法可以得到一个确切的疲劳安全寿命数值结果, 在置信度相同时, 疲劳安全寿命值随可靠度的增加而减少, 当 $p=90\%$ 时, $\gamma=99\%$ 的疲劳安全寿命小于 $\gamma=90\%$ 的疲劳安全寿命; 在可靠度相同时, 则随置信度的增加而减少, 可靠度 $\gamma=90\%$ 时, $p=95\%$ 的疲劳安全寿命小于 $p=90\%$ 的疲劳安全寿命.

2.2 Weibull 模型法

自从 Weibull 开发了参数模型并应用它建模了大量的失效数据, Weibull 模型成了可靠性领

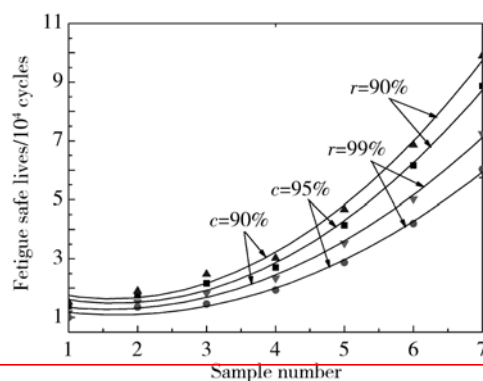


图 2 不同置信度和可靠度下的疲劳安全寿命 (单侧容限因数法)

Fig. 2 Fatigue safe lives under different confidences and reliabilities (unilateral tolerance factor method)

域里最广泛使用的模型^[10]. 二维 Weibull 分布函数的失效分布函数为^[11]

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (11)$$

$\beta > 0$, $\eta > 0$, η 为尺度参数, β 为形状参数(或斜率). 根据公式(11), 得出计算二维 Weibull 模型的疲劳安全寿命公式为

$$T_r = \eta \cdot \{-\ln[F(T_r)]\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

对于参数的估计值, 本文采用 RRY 参数法(即沿着 Y 秩线性回归), 由公式(11)得

$$\ln\{-\ln[1 - F(T)]\} = -\beta \ln(\eta) + \beta \ln(T) \quad (13)$$

令 $y = \ln\{-\ln[1 - F(T)]\}$, $x = \ln(T)$, $a = -\beta \ln(\eta)$, 以及 $b = \beta$, 则公式(13)变形为

$$y = a + bx \quad (14)$$

得到参数的估计值为

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N}}, \quad \hat{\eta} = e^{-\frac{a}{\hat{\beta}}} \quad (15)$$

其中 $y_i = \ln\{-\ln[1 - F(T_i)]\}$, $x_i = \ln(T_i)$, 若不考虑置信度, 把估计值 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\eta}$ 带入公式(12)就可得出安全疲劳寿命值. 本文采用 Fisher Matrix 估计法考虑置信度, 得出估计参数的公式为^[12]

$$\begin{aligned} \beta_u &= \hat{\beta} \cdot e^{\frac{k_a \sqrt{\text{Var}(\hat{\beta})}}{\hat{\beta}}} \quad (\text{上限值 upper}), \\ \beta_l &= \frac{\hat{\beta}}{e^{\frac{k_a \sqrt{\text{Var}(\hat{\beta})}}{\hat{\beta}}}} \quad (\text{下限值 lower}), \\ \eta_u &= \hat{\eta} \cdot e^{\frac{k_a \sqrt{\text{Var}(\hat{\eta})}}{\hat{\eta}}} \quad (\text{上限值 upper}), \\ \eta_l &= \frac{\hat{\eta}}{e^{\frac{k_a \sqrt{\text{Var}(\hat{\eta})}}{\hat{\eta}}}} \quad (\text{下限值 lower}). \end{aligned} \quad (16)$$

k_a 被定义为 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{k_a}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - \Phi(k_a)$, 若 δ

是置信度, 则双侧限度为 $\alpha = \frac{1-\delta}{2}$. 这样将得出

的 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\eta}$ 参数的上下极限值代入公式(12), 即可得出安全疲劳寿命的上下极限值.

在不同置信度和可靠度下, 激光强化后 7 组疲劳寿命数据所对应的疲劳安全寿命结果如图 3 所示. 由图 3 看出, Weibull 模型法可得到疲劳安全寿命的上限值, 中位值和下限值, 即所得结果不是一个具体的数值, 而是一个取值范围, 当置信度 $p=95\%$, 可靠度 $\gamma=90\%$ 时(图 3(c)), 试样 7 的疲劳安全寿命 $n=86\,438 \sim 155\,650$ 次, 而中位值为 115 990 次.

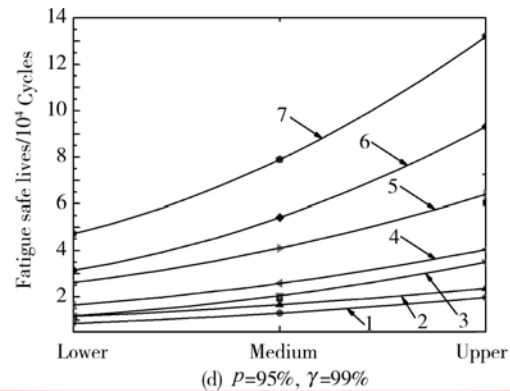
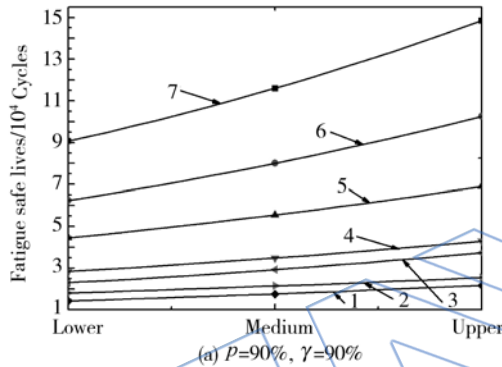


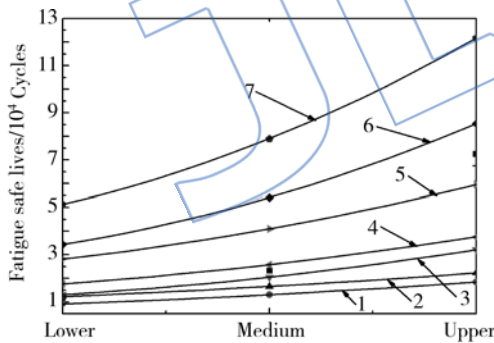
图 3 不同置信度和可靠度下疲劳安全寿命值
(二维 Weibull 分布法)

Fig. 3 Fatigue safe lives under different confidences and reliabilities (two-dimensional Weibull distribution method)

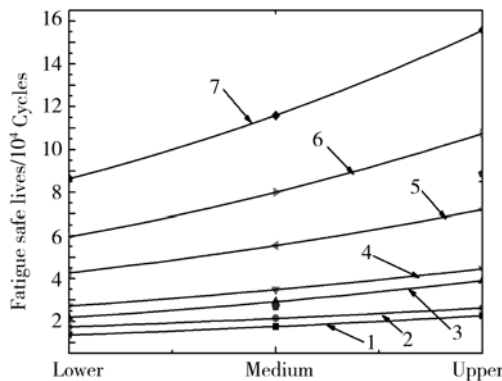
比较两种算法, 由图 4 看出, 在置信度及可靠度相同时, 单侧容限因数法结果处于 Weibull 分布结果的取值范围内, 即处于 Weibull 分布结果的上限值和下限值之间, 而且与其中位值比较接近, 但略小于中位值, 当 $p=95\%$, $\gamma=99\%$ 时, 下限值 $<$ 单侧容限因数法值 $<$ 上限值, 且单侧容限因数法值 $<$ 中位值(图 4(d)).



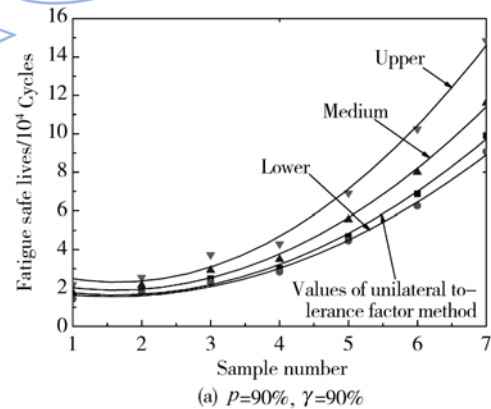
(a) $p=90\%$, $\gamma=90\%$



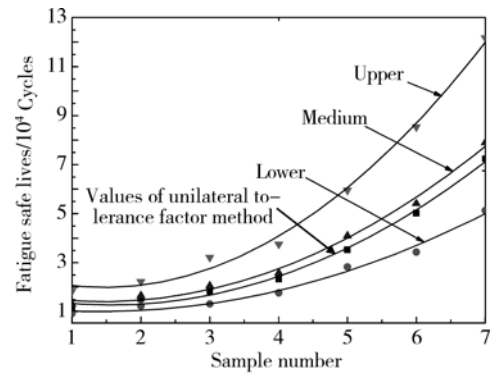
(b) $p=90\%$, $\gamma=99\%$



(c) $p=95\%$, $\gamma=90\%$



(a) $p=90\%$, $\gamma=90\%$



(b) $p=90\%$, $\gamma=99\%$

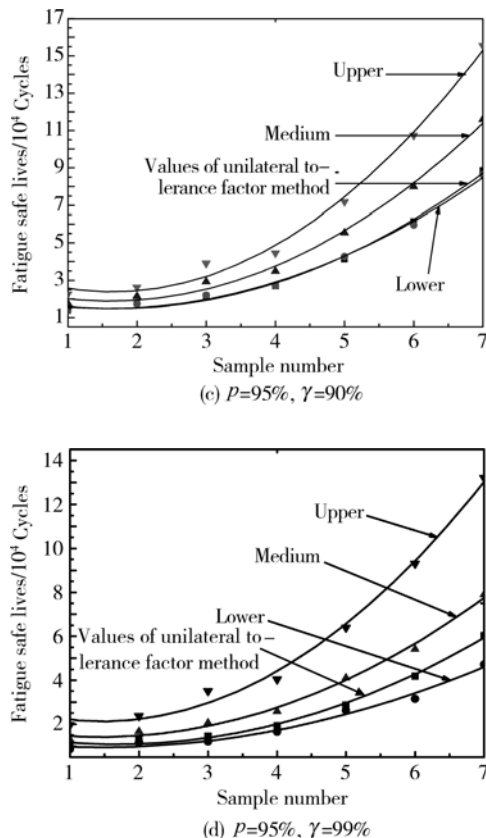


图4 不同置信度和可靠度下的疲劳安全寿命比较图

Fig. 4 Comparison charts of fatigue safe lives under different confidences and reliabilities

3 结 论

激光冲击可以大大提高材料的疲劳寿命. 通过比较两种算法可知: 用单侧容限因数法计算安全疲劳寿命, 可以得出一个确定的数值; 而Weibull分布法可以得到安全疲劳寿命的上限值, 中位值和下限值; 单侧容限因数法的结果与Weibull分布结果的中位值比较相近, 且都处于Weibull分布结果的上限值和下限值之间. 由于Weibull分布法能够提供疲劳安全寿命值的较为精确的取值范围, 因此在工程应用中, 人们可以根据需要选择适合的疲劳安全寿命值, 由此可见, 用Weibull分布法估算疲劳安全寿命更有工程适用性.

参考文献:

- [1] 程文, 金平, 张光明, 等. 一种结构件疲劳安全寿命的估算方法[J]. 科技信息, 2007(17): 678-690.
CHENG Wen, JIN Ping, ZHANG Guangming, et al. A calculating method of components fatigue safe life[J]. Science & Technology Information, 2007(17): 678-690. (in Chinese)
- [2] 王泓, 鄢君辉, 郑修磷. 有机玻璃疲劳裂纹扩展定量分析[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(1): 37-38.
WANG Hong, YAN Junhui, ZHENG Xiulin. The quantitative analysis on fatigue crack propagation of organic glass[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(1): 37-38. (in Chinese)
- [3] 闫晓军, 聂景旭. 定向结晶涡轮叶片蠕变/疲劳寿命的试验与分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 925-931.
YAN Xiaojun, NIE Jingxu. New experimental approach in determining creep fatigue life of directionally solidified alloy turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 925-931. (in Chinese)
- [4] 洪杰, 张大义, 陈璐璐. 气流激励下的叶片高周疲劳寿命研究的发展[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 652-661.
HONG Jie, ZHANG Dayi, CHEN Lulu. Review on investigation of high cycle fatigue failures for the aero engine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 652-661. (in Chinese)
- [5] 马艳红, 刘书国, 洪杰. 涡轮盘定心衬套失效模式与疲劳寿命研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1641-1646.
MA Yanhong, LIU Shuguo, HONG Jie. Research on failure mode and fatigue life of centering ring of turbine disk[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1641-1646. (in Chinese)
- [6] 黄良沛, 岳文辉, 尹喜云. 基于韦布分布的机械系统服役年龄建模与仿真[J]. 机械设计, 2009, 26(3): 27-30.
HUANG Liangpei, YUE Wenhui, YIN Xiyun. Modelling and simulation on the service age of mechanical system based on weibull distribution[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(3): 27-30. (in Chinese)
- [7] 陈瑞芳, 桑毅, 武敬伟, 等. 7050 铝合金激光冲击强化的试验和数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 113-117.
CHEN Ruifang, SANG Yi, WU Jingwei, et al. Experiment and numerical simulation of laser shock processing in 7050 aluminum alloy[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(2): 113-117. (in Chinese)
- [8] 任旭东, 张永康. 航空铝合金材料的两种表面激光冲击加工技术的比较[J]. 金属热处理, 2004, 29(11): 37-39.
REN Xudong, ZHANG Yongkang. Comparison of two kinds of laser shock processing for aerospace aluminum alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(11): 37-39. (in Chinese)
- [9] 高镇同, 蒋新桐, 熊峻江, 等. 疲劳性能实验设计和数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999: 19-21.
- [10] 蒋仁言. 威布尔模型族特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 23.
- [11] Murthy D N P, XIE Min, JIANG Renyan. Weibull models[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004: 9-21.
- [12] Reliasoft Corporation. Life data analysis reference on-line help [CP/OL]. <http://www.weibull.com/LifeDateWeb/lifedataview.htm> fisher_matrix_confidence_bounds.htm, 2006.