

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.010

铝合金缺口件载荷谱小载荷删除与试验验证

谢 飞¹ 姚卫星² 金 甲¹ 许力蒲¹

(1. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京,210016;

2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,南京,210016)

摘要:小载荷删除方法是加速疲劳试验技术中的一种,现有的删除方法往往忽略了结构疲劳性能的随机性。本文将疲劳寿命看作连续的随机变量,采用概率距离定量描述小载荷删除前后疲劳寿命分布的差异程度,以删除谱与原始谱的疲劳寿命同分布为标准作为小载荷删除的方法。该方法考虑了结构疲劳性能的分散性,可根据结构的 p - S - N 曲线和载荷谱的应力分布函数计算相应的小载荷删除水平。对 LC4CS 铝合金缺口件在 5 种载荷谱下进行疲劳试验,结果表明,计算得到的删除谱与原始谱的疲劳寿命同分布,载荷循环数为原始谱的 8.4%,节省了试验时间。

关键词:疲劳试验;铝合金缺口件;小载荷删除;删除水平

中图分类号:V215.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)01-0060-07

Small Load Omitting Approach in Load Spectra for Aluminum-Alloy Notched Specimens and Experiment Verification

XIE Fei¹, YAO Weixing², JIN Jia¹, XU Lipu¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The small load omitting approach is a branch of accelerated fatigue test technology. The existing methods hardly ever consider the randomness of the fatigue property of the structure. In this paper, the fatigue life is regarded as a continuous random variable, and the difference of fatigue life distribution before and after small-load-omitting is quantitatively described by probabilistic distance. The standard, in which the distribution of the fatigue life of the omitted spectra is the same with that of the original spectra, is used. The dispersion of fatigue property of structure is considered in this approach. According to the distribution density function of stress amplitude and the p - S - N curves of the component, the omission level can be calculated. Fatigue tests with notched specimens made of LC4CS aluminum alloy are conducted to verify this approach. Five different spectra are obtained by removing small cycles of which amplitudes are less than the specified omission level, and the number of load cycles is about 8.4% of the original spectra. It is found that experimental results agree well with theoretical solutions.

Key words: fatigue test; aluminum-alloy notched specimens; small load omitting; omission level

基金项目:国家自然科学基金(51275241)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2016-02-17; **修订日期:**2016-03-23

通信作者:姚卫星,男,教授,博士生导师, E-mail: wxyao@nuaa.edu.cn.

引用格式:谢飞,姚卫星,金甲,等. 铝合金缺口件载荷谱小载荷删除与试验验证[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(1):60-66. XIE Fei, YAO Weixing, JIN Jia, et al. Small load omitting approach in load spectra for aluminum-alloy notched specimens and experiment verification[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1):60-66.

疲劳失效是工程结构失效的主要模式之一。目前结构疲劳试验仍是确定结构疲劳寿命的主要方法。但疲劳试验耗时长、成本高,而且必须对其载荷谱浓缩简化,小载荷删除就是最常见的简化载荷谱方法之一。

然而,如何删除小载荷目前还没有定论。通常采用的小载荷取舍方法有 2 种:(1)按载荷-时间历程中最大载荷幅值的百分比舍去小载荷。明平顺等人^[1]提出若不考虑极端值的影响,允许删去最大记录幅值的 8%~12%。Gipson^[2]认为载荷幅值若小于最大载荷的 12.5% 可以删除。Carss^[2]删除了 1.75σ (σ 为载荷正态分布标准差) 应力级,节省了试验谱 87% 的时间。鲍蕊等^[3-4]对铝合金 2324-T39 和 7050-T7451 试件在运输机谱下裂纹扩展的低载删除水平进行研究,认为删除水平为最大过载的 11.72% 或 13.98% 时较为合理。(2)按材料疲劳极限的百分比舍去小载荷。大量试验结果表明,低于材料疲劳极限 50% 的小载荷对试样的损伤可以不计^[5];有学者也提出过舍去疲劳极限或疲劳极限 0.5~0.7 倍以下的小载荷^[6]。Heuler 等^[7]基于部分载荷谱的试验结果将 50% 的条件疲劳极限 (10^7 次循环) 作为小载荷的取舍标准。de Jonge 等^[8]对 2024-T3 板缺口件在 TWIST 谱和 Mini-TWIST 谱下进行疲劳试验,结果显示舍去部分小载荷 (81% 疲劳极限) 使得裂纹形成寿命变为原来的 2.4 倍。文献^[9]对 45 钢试验件进行疲劳试验,发现低于疲劳极限的小载荷对损伤没有贡献,可以直接舍去。

这些方法通过相应的试验验证,虽然对疲劳谱寿命影响较小,但往往过于保守,依然耗费较多试验时间,更重要的是,这些方法并没有从删除原理入手。现有的删除标准建立在确定性疲劳分析的基础上,以疲劳极限或其他载荷的百分比为界将应力循环分为“损伤”或“非损伤”循环,不同构件的载荷谱工作环境不同,小载荷对零件的疲劳损伤贡献程度不同,所以删除标准也不该相同^[10]。现有方法忽略了结构的疲劳性能具有随机性,应力循环引起的疲劳损伤是一个“不确定性”的量。因此疲劳寿命是一个随机变量,合理的删除方法应当保证删除谱与原始谱的疲劳寿命分布相同或者差异不大。本文考虑了疲劳性能的随机性,以删除谱和原始谱的疲劳寿命同分布为评价标准进行小载荷删除。

1 小载荷删除

传统的载荷谱删除方法都基于经验,且都基于确定性思想进行疲劳损伤计算。而实际上从工程使用的安全角度来说,载荷和损伤都具有随机性,

仅仅考虑均值并不符合可靠性设计要求,也与实际损伤情况差异较大。

对于工程常见的缺口件,顺序效应等一系列过载效应不容忽视,随机加载情况下也必然造成低载损伤的差异,此外,试件的材料特性、工作环境以及几何特性等也有相应的分散性^[11]。为了描述疲劳寿命的分散性,往往使用 p - S - N 曲线,见图 1。

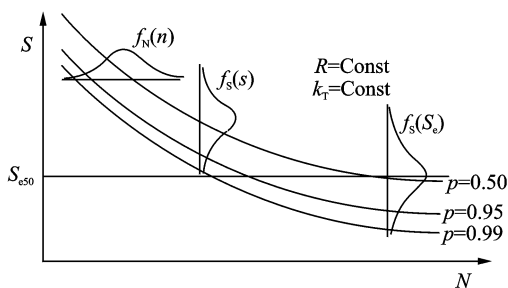


图 1 p - S - N 曲线示意图

Fig. 1 p - S - N curves

载荷删除的主要依据应该是疲劳极限 S_e 。给定寿命下的疲劳强度都有一定分散性,用 $f_s(s)$ 来表示, $f_s(S_e)$ 则表达了疲劳极限的分散性。在高周疲劳阶段, p - S - N 曲线可以近似用 3 参数方程来表示,即

$$N_{cp} (S - S_{0p})^{H_p} = C_p \quad (1)$$

式中 H_p 和 C_p 为材料常数。此处 S_{0p} 即为 p - S - N 曲线右延的趋势线的极限,可以认为 S_{0p} 以下的载荷不造成损伤。

结构所受到的载荷通常用载荷频率曲线 S - n 表示,见图 2。设疲劳损伤为 D ,在可靠度 p 给定的情况下,只有 $S(n_1)$ 大于 S_{0p} 的情况下才会造成损伤,即

$$P(D(n_1)) = P(S(n_1) > S_{0p}) \quad (2)$$

以上分析主要是针对单次载荷循环,体现了部分小载荷造成损伤的概率性质。对于随机谱,删除谱和原谱相比,单次循环造成损伤的概率差异会导致全谱疲劳寿命分布的差异,表现为寿命均值与分散性的差异。考虑载荷谱删除前后疲劳寿命分布

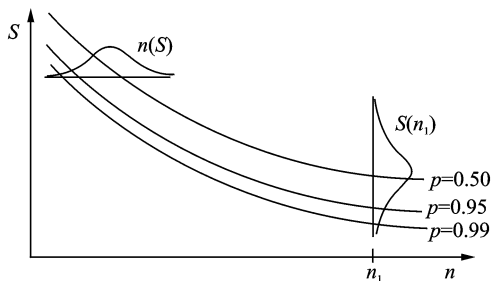


图 2 载荷-频率曲线示意图

Fig. 2 Load-frequency curves

差异性的度量,本文使用概率距离来对低载删除前后寿命均值和分散性进行综合描述。主要思想如下:对于原始载荷谱,指定一个删除水平 S_{omit} ,删除 $S_a \leq S_{omit}$ 的小载荷,若删除谱与原谱的疲劳寿命分布一致,则认为该删除水平合理。

设原始谱的疲劳寿命分布为 F , 删除掉 $S_a \leq S_{omit}$ 的小载荷之后,疲劳寿命分布为 G , 若原始谱作用下的疲劳寿命 F 分布与删除小载荷后的疲劳寿命 G 相同,则删除小载荷对疲劳寿命无影响。通常,删除谱会与原始谱有微小差异,这里可以认为若式(3)成立

$$L(F \parallel G) \leq \delta \quad (3)$$

则认为 F 和 G 同分布。式中, $L(F \parallel G)$ 为概率距离,描述相同事件空间内的两个概率分布的差异情况; δ 为容限值,反映了两个分布的差异程度。

2 小载荷删除方法

2.1 基于 KL 距离的小载荷删除

由于材料性能、几何尺寸和外载过程等的随机性,疲劳寿命是一个随机变量,可以采用概率分布来描述。概率距离是对两个分布相似性的度量。假设原始谱和删除谱的疲劳寿命均服从一种概率分布,根据概率距离的相似度,就可以判断所取删除水平是否合理。本文选取在统计学中的应用最为广泛的 KL 距离。设两个随机变量的分布密度函数为 $f(x)$ 和 $g(x)$, 则 KL 距离的定义为

$$L_{KL}(F \parallel G) = \int f(x) \ln \frac{f(x)}{g(x)} dx \quad (4)$$

KL 距离越大,则两个概率密度函数的差别也越大;反之,其差别越小。两者完全相同时, $L_{KL}(F \parallel G) = 0$ 。因此,可以采用 KL 距离来定量描述删除谱和原始谱分布的差异程度。

对数正态分布是常用的寿命分布形式之一,假设原始谱和删除谱的疲劳寿命均服从对数正态分布,对式(4)进行积分, $L_{KL}(F \parallel G)$ 可写为^[12]

$$L_{KL}(F \parallel G) = \frac{1}{2} \left[\ln \frac{\gamma^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{\gamma^2} - 1 + \frac{(\mu - \nu)^2}{\gamma^2} \right] \quad (5)$$

式中: μ 和 σ 为 f 的对数均值和对数标准差; ν 和 γ 为 g 的对数均值和对数标准差。寿命分布参数可以通过疲劳可靠性分析求得。

2.2 疲劳寿命分布计算

疲劳寿命的分散性可以用相应载荷水平下 p -S-N 曲线来描述,综合运用损伤累积准则和结构 p -S-N 曲线进行疲劳可靠性分析。根据二维概率 Miner 准则^[13], 可求得在二维随机应力时间历程作用下给定可靠度时结构的疲劳寿命。

$$T_p \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{cp}(S_{ai}, S_{mj})} = 1, N_{vp} = T_p \sum_i \sum_j n_{ij} \quad (6)$$

$$N_{vp} \iint_Q \frac{l(S_a, S_m)}{N_{cp}(S_a, S_m)} dS_a dS_m = 1 \quad (7)$$

式中: n_{ij} 为各级载荷的作用次数; S_{ai} 和 S_{mj} 为载荷幅值和均值; T_p 为可靠度 p 下结构破坏时的块谱数; N_{cp} 为可靠度 p 下的常幅寿命; N_{vp} 为可靠度 p 下结构破坏时的载荷循环数; $l(S_a, S_m)$ 为二维应力分布密度函数。二维概率 Miner 准则的优点在于只要知道结构的疲劳性能和所承受的变幅疲劳载荷谱,即可进行相应的疲劳可靠性分析,但是对于载荷次序的影响,则无能为力。对于承受随机载荷时间历程的结构,载荷的次序效应不明显^[14], 可以不考虑。本文采用二维概率 Miner 准则对结构进行疲劳可靠性分析,计算原始谱和删除谱的寿命分布参数。

假设载荷谱的应力分布密度函数为 $l(S)$, 根据二维概率 Miner 准则,原始谱和删除谱在任意可靠度 p 下的疲劳寿命为

$$N_{vp_ori} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{l(S)}{N_{cp}(S)} dS}$$

$$N_{vp_tra} = \frac{1}{\int_{S_{omit}}^{\infty} \frac{l(S)}{N_{cp}(S)} dS} \quad (8)$$

式中 N_{vp_ori} 和 N_{vp_tra} 分别为原始谱和删除谱在可靠度 p 下的疲劳寿命。 $N_{cp}(S)$ 根据可靠度 p 下的 p -S-N 曲线得到,结构的 p -S-N 曲线采用式(1)三参数模型描述。

假设 F 和 G 服从对数正态分布,则式(5)中,各分布参数近似计算如下

$$\mu = \lg N_{v50_ori}$$

$$\nu = \lg N_{v50_tra}$$

$$\sigma = \frac{1}{u_p} [\mu - \lg N_{vp_ori}] \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{u_p} [\nu - \lg N_{vp_tra}]$$

式中 u_p 为给定可靠度 p 下的标准正态偏量。

2.3 载荷删除水平计算

将式(9)代入式(5)得

$$L_{KL}(F \parallel G) = \frac{1}{2} \left\{ \ln \left(\frac{\nu - \lg N_{vp_tra}}{\sigma u_p} \right)^2 + \left(\frac{\sigma u_p}{\nu - \lg N_{vp_tra}} \right)^2 - 1 + u_p^2 \left(\frac{\mu - \nu}{\nu - \lg N_{vp_tra}} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

当可靠度 p 、应力分布密度函数为 $l(S)$ 和结构的 p -S-N 曲线给定时,仅为关于删除水平 S_{omit} 的函数。将式(10)代入式(3),求解不等式,即可得到

S_{omit} 的取值。式(10)的形式较为复杂,无法直接求出 S_{omit} 的解析表达式,需要采用数值方法计算。

2.4 KL 距离容限选取

式(3)中容限值,由于 KL 距离随着删除水平的增加而变大,则 δ 取值越小,原始谱寿命与删除谱寿命分布差异就越小,然而相应的删除水平也会越小,故而应该寻找一个平衡点,在原谱与删除谱寿命分布差异足够小的情况下尽可能多地删除小载荷。文献[15]的相关试验表明 δ 取 10^{-3} 时较为适宜。

3 算例及试验验证

3.1 材料与试件

试验件材料为 LC4CS(7A04T6) 铝合金,试验件为如图 3 所示,边切口试件,应力集中系数为 4,试件来自厚度为 2.5 mm 的板材,纵向取样。LC4CS 超硬铝合金的力学性能列于表 1。

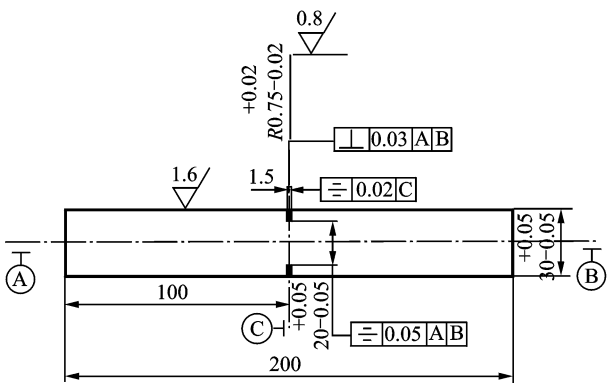


图 3 试验件尺寸

Fig. 3 Configuration of notched sheet specimens

表 1 LC4CS 铝合金力学性能

Tab. 1 Mechanical property of LC4CS

σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %
549	494	8.75

3.2 拟合缺口件 p - S - N 曲线

同种材料的结构元件在相同工作环境下服役时,缺口件除了受到与光滑件相同的内部组织结构分散性和外部工作状况分散性的影响,还受到缺口的应力集中效应和尺寸效应随机因素影响。这使得缺口件和光滑件的疲劳强度分散性既有内在联系又有外在差异。目前获得缺口件疲劳强度分散性的方法主要有试验法^[16]和随机有限元法^[17]。基于时间和经费的考虑,试验法多不被采用;由于随机变量的选取和离散需要大量的基础数据,目前还无法用随机有限元较好地处理缺口件的疲劳强度分散性问题。本文将影响缺口件疲劳强度分布

的因素分为光滑件的分散性和缺口效应的分散性两部分,只需要材料 p - S - N 曲线和缺口件几何信息。文献[18]采用改进的相等破坏概率法求出光滑件的疲劳强度分布,由应力场强法和历史数据获得疲劳缺口系数分布,由此获得缺口件疲劳强度分布,从而得到缺口件 p - S - N 曲线。缺口件 p - S - N 曲线的拟合流程如图 4 所示。

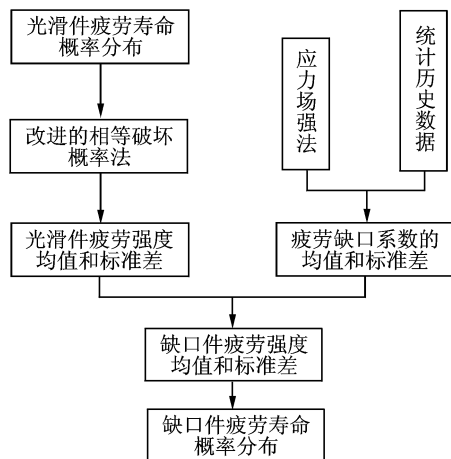


图 4 缺口件疲劳寿命概率分布估算流程

Fig. 4 Process for estimating probability distribution for fatigue life of notched specimens

王长江^[15]通过对平均应力 210 MPa 下光滑件进行成组法和升降法试验,并使用双加权最小二乘法^[19],拟合得到了在该应力水平下的 p - S - N 曲线,见表 2。本文选取平均应力 80 MPa 进行缺口件试验,使用文献[18]中的方法,最终得到表 3 的结果。

表 2 光滑件平均应力 210 MPa 下的 p - S - N 曲线参数

Tab. 2 p - S - N curve parameters of unnotched specimens under mean stress of 210 MPa

可靠度 p / %	H_p	$\lg C_p$	S_{op} / MPa
99.87	1.394 8	7.257 7	38.5
97.72	1.381 1	7.282 8	39.2
84.10	1.366 0	7.305 2	39.9
50.00	1.349 3	7.324 7	40.6
15.90	1.330 7	7.341 0	41.3
2.28	1.310 2	7.353 9	42.0
0.13	1.287 6	7.363 0	42.7

3.3 载荷谱试验

原始谱是基于应力谱超越数曲线,即

$$S_a = -14.3 \lg E_0 + 79.8 \quad (11)$$

使用 Twist 编谱法编制的飞续飞谱,单块谱包括 1 800 次飞行,每个谱循环数为 $10^{5.5804}$ 次。平均应力水平为 80 MPa。根据式(11)中原始谱的应力超越数曲线可得幅值应力 S_a 的分布密度函数为

表3 平均应力 80 MPa 下本例缺口件近似 p - S - N 曲线参数Tab. 3 p - S - N curve approximate parameters of notched specimens under mean stress of 80 MPa

可靠度 $p/\%$	H_p	$\lg C_p$	S_{0p}/MPa
99.87	1.449 9	6.675 4	12.36
97.72	1.407 1	6.699 7	13.32
84.10	1.375 1	6.725 9	14.27
50.00	1.345 8	6.744 9	15.25
15.90	1.322 9	6.781 2	16.14
2.28	1.317 4	6.807 6	17.08
0.13	1.295 2	6.818 0	18.09

$$l(S_a) = \begin{cases} -2.3026 \times 10^{-0.0699 S_a} & S_a \geq 0 \\ 0 & S_a < 0 \end{cases} \quad (12)$$

对于地空地循环,取地面应力 $S_g = 0$ MPa,载荷峰值为 114 MPa。每次飞行 1 次,在删除小载荷的过程中,地空地循环保持不变。根据二维概率 Miner 准则得到不同置信度时疲劳谱的寿命,利用概率纸法检验其分布类型是否满足对数正态分布,结果发现原始载荷谱的寿命(以地空地循环数为计)可以用对数正态分布来表示。对于本算例, $\mu = 4.1505$, $\sigma = 0.1042$ 。采用相同方法计算不同删除水平下删除谱的疲劳寿命分布参数 ν 和 γ ,根据式(10)计算 KL 距离,见图 5。由图 5 可见 KL 距离是关于删除水平 S_{omit} 的单调递增函数,从曲线上查找对应于容限值 δ 的 S_{omit} 值,即为所求的删除水平。

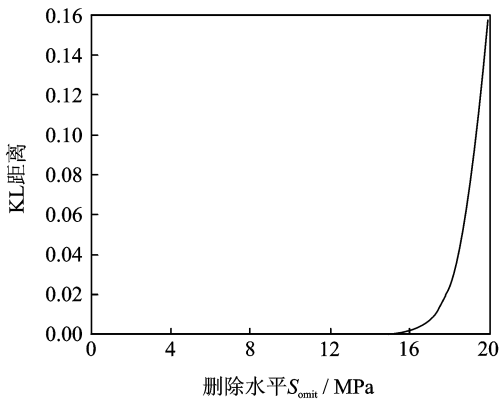


图5 KL 距离随删除水平的变化

Fig. 5 KL divergence versus omission level

容限值为删除小载荷时所能容忍的删除谱与原谱寿命分布的最大差异,通常为一个少量,在工程实践中根据具体要求选取。分别取 δ 为 0.000 1, 0.000 2, 0.001, 0.002 和 0.003,对应的删除水平如表 4 所示。

删除水平 S_{omit} 的取值在满足原始谱与删除谱同分布的情况下,原则上尽量取较大的删除水平,

表4 删除水平 S_{omit} 的取值Tab. 4 Determination of S_{omit}

δ	$S_{\text{omit}}/\text{MPa}$
0.003 0	16.4
0.002 0	16.1
0.001 0	15.4
0.000 2	14.5
0.000 1	13.5

这样才能达到压缩试验时间的目的。根据 2.4 节分析,本文取容限值 0.001 时删除水平 S_{omit} 为 15.4 MPa 的删除谱对小载荷删除方法进行试验验证,记为 L2。为了进行对比分析,额外选取了 4 个删除水平,分别为 9.2, 12, 19, 24 MPa,得到的载荷谱记为 L0, L1, L3, L4。对 5 种删除谱编制飞-续-飞试验谱进行疲劳试验。

疲劳试验在 MTS 370 电液伺服疲劳试验机上进行,试验频率 10 Hz,试验件为图 3 中的 LC4CS 边切口试件,对载荷谱 L0~L4 进行疲劳试验,共完成 5 组删除谱 30 件边切口试件试验,将试件断裂时的块谱数记为裂纹形成寿命,5 个删除谱的疲劳试验结果见表 5。删除水平 S_{omit} 为 15.4 MPa 的 L2 谱,每个谱块的载荷循环数为 31 878 次循环,约为原谱的 8.4%。

表5 L0~L4 谱的疲劳试验结果

Tab. 5 Fatigue experiment results of load spectra L0—L4

删除谱	裂纹形成寿命(块谱数, 1 块谱=1 800 次飞行)			均值	循环数	循环比/%
L0	6.01	5.91	5.63	5.83	86 509	22.7
	5.90	5.52	6.01			
L1	5.98	5.69	6.43	5.99	55 114	14.5
	5.89	5.66	6.34			
L2	5.79	6.32	6.25	6.04	31 878	8.4
	6.14	6.00	5.71			
L3	7.85	8.69	7.49	8.41	17 854	4.7
	8.86	8.81	8.75			
L4	11.74	12.96	11.01	11.45	7 982	2.1
	10.12	11.88	10.96			

图 6 给出了不同删除水平下裂纹形成寿命的变化趋势,可以看出,删除水平减小到 15.4 MPa 以后,疲劳寿命变化不大,因此可以将 L0 谱的试验结果作为原始谱的疲劳寿命。

采用 T 检验法对不同载荷谱下的裂纹形成寿命的均值进行检验,判断 L1~L4 谱的对数寿命均值是否与 L0 谱差异较大,采用 F 检验法对不同载荷谱下的裂纹形成寿命的标准差进行检验,判断 L1~L4 谱的对数寿命标准差是否与 L0 谱差异较大^[20]。 T 统计量和 F 统计量的计算值如表 6 所

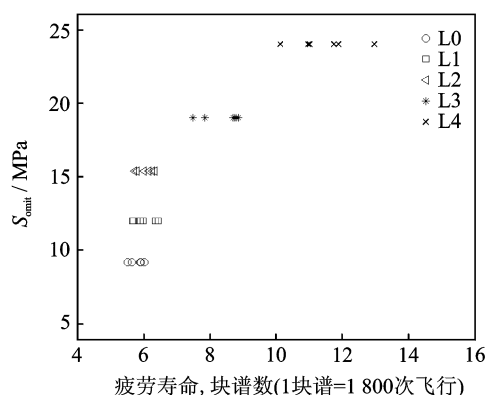


图 6 裂纹形成寿命随删除水平的变化

Fig. 6 Changing trend of influence of omission level on fatigue life

示。取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 针对不同的样本容量, T 统计量和 F 统计量的临界值列于表 6 右侧。将表 6 中各统计量的计算值与临界值进行对比, 可以看出:

(1) 对于载荷谱 L1 ~ L2, 有 $T_{\alpha/2} < T < T_{1-\alpha/2}$, L1 谱和 L2 谱的对数寿命均值与 L0 谱相比, 没有显著差别;

(2) 对于载荷谱 L3 ~ L4, $T > T_{1-\alpha/2}$, L3 谱和 L4 谱的对数寿命均值与 L0 谱相比, 差别较大;

(3) 对于载荷谱 L1 ~ L2, 有 $F_{\alpha/2} < F < F_{1-\alpha/2}$, L1 谱和 L2 谱的对数寿命标准差与 L0 谱相比没有变化;

(4) 对于载荷谱 L3 ~ L4, $F > F_{1-\alpha/2}$, L3 谱和 L4 谱的对数寿命标准差与 L0 谱相比, 差别较大。

由此可得出结论: L1 谱和 L2 谱的疲劳寿命与 L0 谱同分布, 说明计算得到的删除水平合理。

表 6 不同载荷谱下疲劳寿命的对数均值和对数标准差检验结果

Tab. 6 Test results of logarithmic mean and standard deviation of fatigue life for load spectra L1—L4

载荷谱	T	$T_{\alpha/2}$	$T_{1-\alpha/2}$	F	$F_{\alpha/2}$	$F_{1-\alpha/2}$
L1	1.05	-2.57	2.57	2.47	0.14	7.15
L2	1.20	-2.57	2.57	1.44	0.14	7.15
L3	9.66	-2.57	2.57	8.09	0.14	7.15
L4	12.47	-2.57	2.57	22.39	0.14	7.15

4 结 论

(1) 引入随机变量描述疲劳寿命, 以删除谱与原谱的疲劳寿命同分布作为小载荷删除标准。该方法考虑了疲劳性能的随机性, 客观反映真实载荷历程。

(2) 运用概率距离定量描述删除谱与原始谱疲劳寿命分布差异。

(3) 试验验证本文的小载荷删除方法计算得到的删除谱与原始谱同分布, 载荷循环数仅为原谱的 8.4%, 压缩了疲劳试验时间。

参考文献:

[1] 明平顺, 张志勇, 马前祖. 汽车部件疲劳载荷谱的计算机统计处理[J]. 武汉汽车工业大学学报, 1997, 19(2): 6-9.
MING Pingshun, ZHANG Zhiyong, MA Qianzu. Computer statistical processing of fatigue load spectrum of automobile part[J]. Journal of Wuhan Automotive Industry University, 1997, 19(2): 6-9.

[2] 平安. 疲劳载荷谱编制准则与寿命预测的研究[D]. 沈阳: 东北工学院, 1992.
PING An. Study on criterion of constructing fatigue spectra and life prediction[D]. Shenyang: Northeast Institute of Technology, 1992.

[3] TIAN Hailing, BAO Rui, ZHANG Jianyu, et al. Influence of low load truncation level on crack growth for Al 2324-T39 and Al 7050-T7451 [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(4): 401-406.

[4] BAO Rui, ZHANG Xiang. Fatigue crack growth behavior and life prediction for 2324-T39 and 7050-T7451 aluminium alloys under truncated load spectra [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7): 1180-1189.

[5] 刘学君, 杨晓华, 万贺. 基于 DFR 法的复杂载荷谱的等损伤简化方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 47(3): 408-412.
LIU Xuejun, YANG Xiaohua, WAN He. Equal damage simplified technique of complicated load spectrum based on DFR[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 47(3): 408-412.

[6] 张福泽. 飞机载荷谱编制的新方法研究[J]. 航空学报, 1998, 19(5): 518-524.
ZHANG Fuze. New method of drawing up aircraft load spectrum[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(5): 518-524.

[7] HEULER P, SEEGER T. A criterion for omission of variable amplitude loading histories [J]. International Journal of Fatigue, 1986, 8(4): 225-230.

[8] de JOUGE J B, NEDERVEEN A. Effect of gust load alleviation on fatigue and crack growth in AL-CLAD 2024-T3 [C]// American Society for Testing and Materials. Philadelphia: [s. n.], 1980: 170-184.

[9] YAN J H, ZHENG X L, ZHAO K. Experimental investigation on the small-load-omitting criterion [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(5): 403-415.

[10] 王德俊, 平安, 徐灏. 随机疲劳载荷的处理及载荷谱

- 编制准则[J]. 东北大学学报, 1994, 15(4): 327-331.
- WANG Dejun, PING An, XU Hao. Criteria for the treatment of random fatigue loads and load spectra [J]. Journal of Northeast University, 1994, 15(4): 327-331.
- [11] 李锋, 孟广伟, 周振平. 结构疲劳寿命稳健性优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 155-158.
- LI Feng, MENG Guangwei, ZHOU Zhenping. Robust design of structural fatigue life[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 155-158.
- [12] GIL M, ALAJAJI F, LINDER T. Renyi divergence measures for commonly used univariate continuous distributions [J]. Information Sciences, 2013, 249: 124-131.
- [13] 倪侃, 高镇同. 疲劳可靠性二维概率 MINER 准则 [J]. 固体力学学报, 1996, 17(4): 365-371.
- NI Kan, GAO Zhentong. Two-dimensional statistics MINER's rule in fatigue reliability[J]. Acta Mechanica Sinica, 1996, 17(4): 365-371.
- [14] EVERETT Jr R A. The effects of load sequencing on the fatigue life of 2024-T3 aluminum alloy [J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(1): S289-S293.
- [15] WANG C J, YAO W X, XIA T X. A small-load-omitting criterion based on probability [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 68(11): 224-230.
- [16] 高镇同, 蒋新桐, 熊峻江, 等. 疲劳性能试验设计和数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- GAO Zhentong, JIANG Xintong, XIONG Junjiang, et al. Fatigue performance test design and data processing[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1999.
- [17] 李应波, 姚卫星. 基于 SFEM 的结构有元件疲劳可靠性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 461-464.
- LI Yingbo, YAO Weixing. Fatigue reliability analysis on structural elements based on SFEM[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 461-464.
- [18] 谢金标, 姚卫星. 基于光滑件的缺口件疲劳强度分散性估算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 322-326.
- XIE Jinbiao, YAO Weixing. Estimation of fatigue strength of scatter of notched specimen based on smooth specimen [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 322-326.
- [19] 谢金标, 姚卫星. 建立 $P-S-N$ 曲线的双加权最小二乘法[J]. 实验力学, 2010, 25(5): 611-616.
- XIE Jinbiao, YAO Weixing. Double weighted least square method for $P-S-N$ curve regression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5): 611-616.
- [20] 顾玉娣, 杨纪龙. 概率论与数理统计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- GU Yuti, YANG Jilong. Probability and statistics [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.

