

块谱内部载荷排序对结构疲劳寿命的影响

许聪,嵇大伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要: 载荷次序的影响一直是疲劳累积损伤研究的热点话题,载荷的大小、级数、块谱外载荷次序及块谱内载荷次序的影响规律亟待探究。选取 3 种载荷范围,并按线性将其分为 4、10、100 级谱块与 4、10、100 级单峰值排序。通过线性累积损伤理论和两种经典非线性累积损伤理论,对以上各种情况进行累积损伤计算,得出载荷排序对载荷大小、级数、谱块内部、单级载荷次序的影响规律。

关键词: 载荷次序;累积损伤;疲劳寿命

中图分类号: V231.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2021)01-0045-04

Effect of Internal Load Order of Block Spectrum on Structural Fatigue Life

XU Cong, JI Dawei

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The influence of load order has been a hot topic in the study of fatigue cumulative damage. The influence of load size, order, spectral block load order, and single-stage load order need to be explored. Three load ranges were selected, sorted into linear blocks in order of 4, 10, and 100, and in the same order, single peaks were arranged according to linearity. Based on the linear cumulative damage theory and two classic nonlinear cumulative damage theories, the cumulative damages were calculated for each of the above cases, thus obtaining the influence rules of the load size, the number of stages, the inside of the spectral block, and the order of the single-stage load in the load order.

Keywords: load sequence; cumulative damage; fatigue life

0 引言

在实际工程应用情况下,许多机械结构要承受复杂的载荷。疲劳失效是机械结构最常见的失效形式之一^[1-3]。现有文献中研究载荷次序的影响主要是运用疲劳累积损伤理论。疲劳累积损伤理论主要分为两种:线性累积损伤理论与非线性累积损伤理论。线性累积损伤理论最著名的是 Miner-Palmgren 线性累积损伤理论,是迄今为止还没有工程应用价值与之相媲美的理论。非线性累积损伤有多种分类方式,提出非线性理论的原因是载荷次序对疲劳寿命有明显的影响。非线性累积损伤理论认为可以分为两类^[4]:1)考虑载荷次序的影响但没有考虑载荷之间的相互作用;2)考虑载荷次序并且考虑载荷之间的相互作用。考虑载荷次序并考虑载荷相互作用的模型能更好地体现块谱内部载荷次序的影响。关于载荷作用次序对结构强度和寿命影响的研究,20 世纪中期就已经有人提出了载荷的“锻炼效应”理论^[5-7]表明载荷次序对于疲劳寿命有影响。NAUMANN J C J 等^[5]在 NASA 的报告中指出载荷加载方式依次为高一低,低—高一低,随机次序,低—高,疲劳寿命依次降低。ZAKARIA K A 等^[8]在研究中表明,铝合金的失效循环次数受到谱加载次序的显著影响。等幅载荷下的总疲劳寿命最短,其次是室温和高温下的高—低和低—高载荷次序。总的来说,疲劳寿命取决于载荷次序以及变幅载荷下多次过载和欠载的相互作用。

SHRESTHA R 等^[9]试验研究了载荷历史和次序对聚醚醚酮(PEEK)热塑性塑料的循环变形和疲劳行为的影响。发现预加载对 PEEK 寿命具有显著的增益效果,而与载荷次序(无论高一低或低—高)相关性较小。KAMAYA M 等^[10]在室温试验室环境中使用 316 型不锈钢进行谱载荷试验。试验得到疲劳寿命比线性损伤累积规则预测得短。对试件加载高一低和低—高两组载荷次序,发现低—高载荷次序表现出更长的疲劳寿命。疲劳寿命的减少主要归因于有效应变的变化。通过确定有效应力振幅的允许循环次数,可以保守地评估由于加载顺序效应导致的疲劳寿命减少。载荷次序问题仍然是现阶段疲劳领域争论不休的话题^[11]。现阶段有许多试验和理论研究谱块载荷情况下的载荷次序问题,而单峰值载荷次序排序目前尚且没有公开文献表明,但可以用已有文献中块谱之间排序寿命模型来研究所要研究的单峰载荷次序的影响。

1 累积损伤模型

1.1 Miner 模型

Miner 线性累积损伤理论^[12]认为 k 个应力水平 S_i 作用下,经受 n_i 次循环,则可定义总损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k n_i / N_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

破坏准则为: $D = \sum n_i/N_i = 1$ 。

1.2 基于 S-N 曲线修正模型

戴钰冰等^[13]针对大多数损伤累积模型忽略了多级载荷历史效应及载荷次序效应对损伤累积的影响,提出了一种基于 S-N 曲线及 Miner 理论的非线性疲劳损伤累积模型。该模型考虑了载荷历史效应与载荷次序效应对机械零部件疲劳寿命的影响,克服了线性疲劳损伤累积模型的不足。多级载荷下的疲劳损伤如下:

$$D = \left\{ \left[\left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{\frac{S_2}{S_1}} + \frac{n_2}{N_2} \right]^{\frac{S_3}{S_2}} + \frac{n_3}{N_3} \right\}^{\frac{S_4}{S_3}} + \frac{n_4}{N_4} \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 级载荷循环数; S_i 为第 i 级载荷的应力; N_i 为 S_i 载荷下的疲劳寿命; 当 $D=1$ 时材料发生断裂。

1.3 Kramer 累积损伤模型

Kramer 认为累积损伤破坏可以依据循环载荷作用下材料表面的应力增长率来表示^[14]。对于一种给定材料来说,临界面的应力是一个常数,唯一要做的是计算出给定应力及给定循环数下表面应力的损伤和,并提出一个可以表达载荷作用顺序效应的累积损伤模型,其形式是:

$$\frac{n_1 \sigma_1^p}{\beta} + \frac{n_2 \sigma_2^p}{\beta} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{pf_1} + \frac{n_3 \sigma_3^p}{\beta} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right)^{pf_1} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{pf_2} + \dots = 1 \quad (3)$$

式中: $p = -1/m$, m 是 S-N 曲线 $\sigma = CN^m$ 的斜率; $\beta = C^p$; p 和 β 是材料常数; f 表示的是前一个应力顺序的损伤历程。

$$f_1 = \frac{\sigma_1^p n_1}{\beta} \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{n_2 \sigma_2^p}{\beta} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{pf_1} \quad (5)$$

2 谱型设置

大多数文献中所说的载荷排序对疲劳的影响是指不同的载荷块之间排序对疲劳的影响,如图 1 与图 2 所示。而现实中机构所承受的载荷情况更为复杂,高低载荷往往呈单峰值出现。为研究单峰载荷排序,本文选取两种特殊排序方式,如图 3 及图 4 所示(本文区别两种载荷顺序为:块谱之间及块谱内部)。为研究载荷排序中载荷大小、级数、谱块级数、单峰值级数的影响,本文采用 3 种载荷范围(439~586) MPa、(586~805) MPa、(366~805) MPa,并按线性将之分为 4、10、100 级。

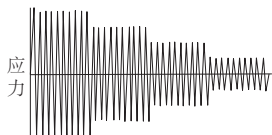


图 1 块谱之间从大到小排序

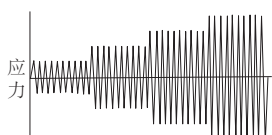


图 2 块谱之间从小到大排序

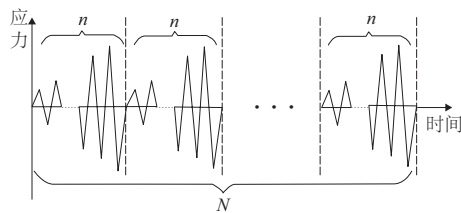


图 3 块谱内部从小到大排序

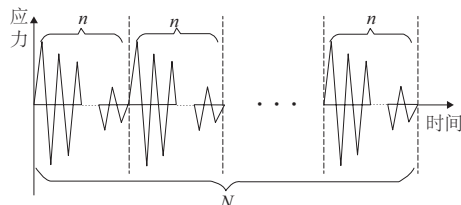
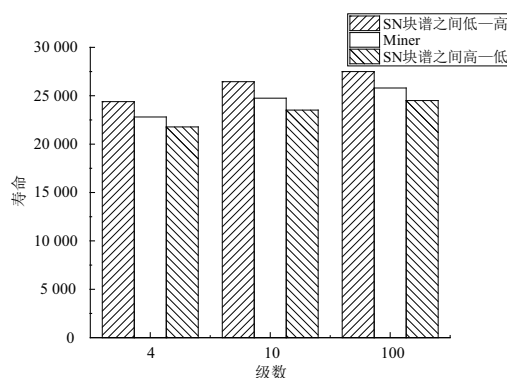


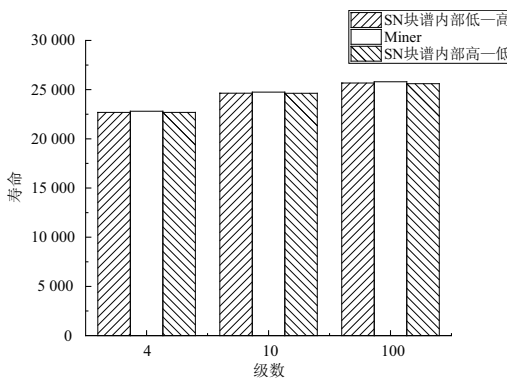
图 4 块谱内部从大到小排序

3 计算结果

块谱之间和单峰值载荷级数有 4、10、100 三种情况,图中的寿命为载荷的总循环数,分别用基于 S-N 修正模型、Kramer 累积损伤模型图来表示块谱之间的影响。从图 5-图 10 中可以看出,上述两种模型可以很好地预测出载荷从低到高寿命比线性累积的长、载荷从高到底时寿命比线性累积的短;而块谱内部载荷排序与线性的相比,发现与线性的相差不大,且块谱内部载荷无论是从低到高还是从高到底,两者寿命都很接近。

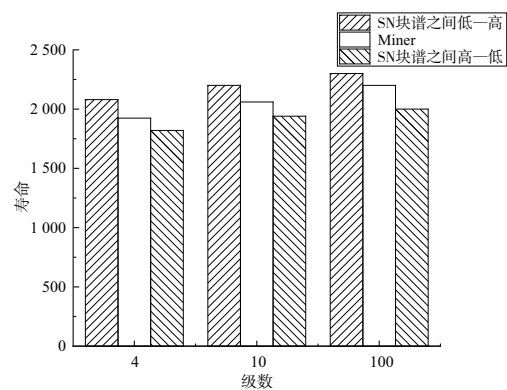


(a) 块谱之间载荷次序的影响

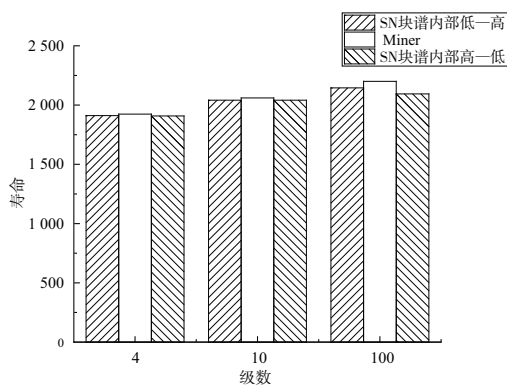


(b) 块谱内部载荷次序的影响

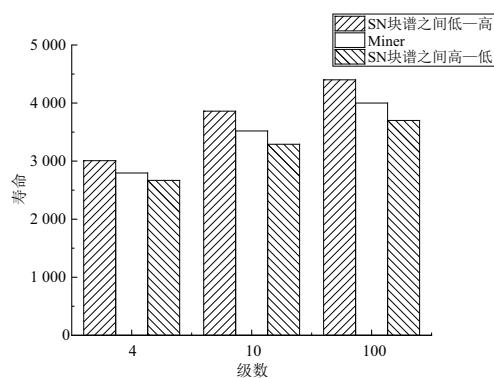
图 5 基于 S-N 曲线修正模型
(载荷范围(439~586) MPa)



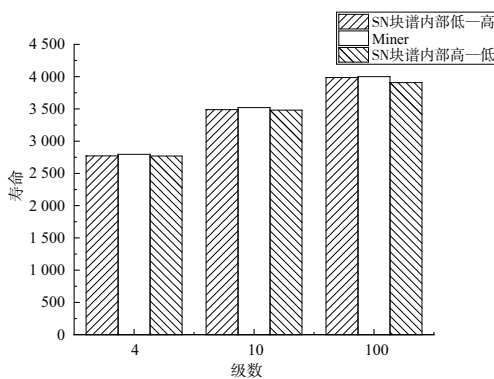
(a) 块谱之间载荷次序的影响



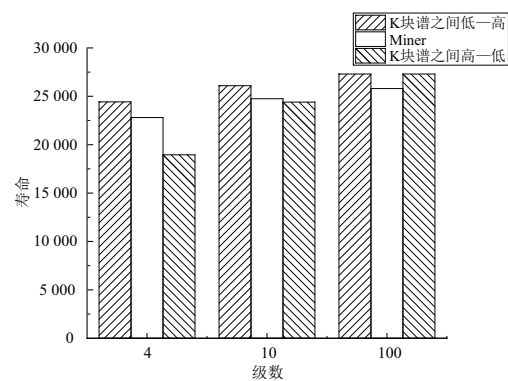
(b) 块谱内部载荷次序的影响

图6 基于S-N曲线修正模型
(载荷范围(586~805) MPa)

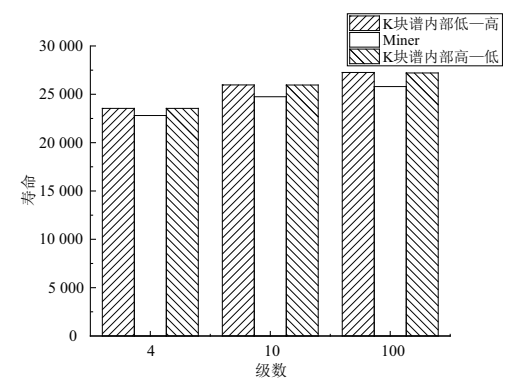
(a) 块谱之间载荷次序的影响



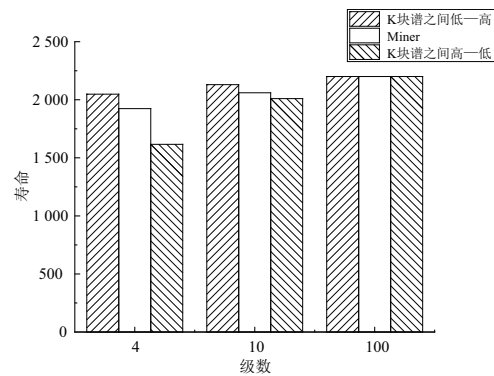
(b) 块谱内部载荷次序的影响

图7 基于S-N曲线修正模型
(载荷范围(366~805) MPa)

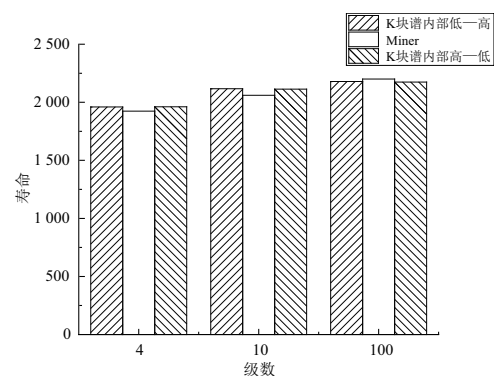
(a) 块谱之间载荷次序的影响



(b) 块谱内部载荷次序的影响

图8 Kramer累积损伤模型
(载荷范围(439~586) MPa)

(a) 块谱之间载荷次序的影响



(b) 块谱内部载荷次序的影响

图9 Kramer累积损伤模型
(载荷范围(586~805) MPa)

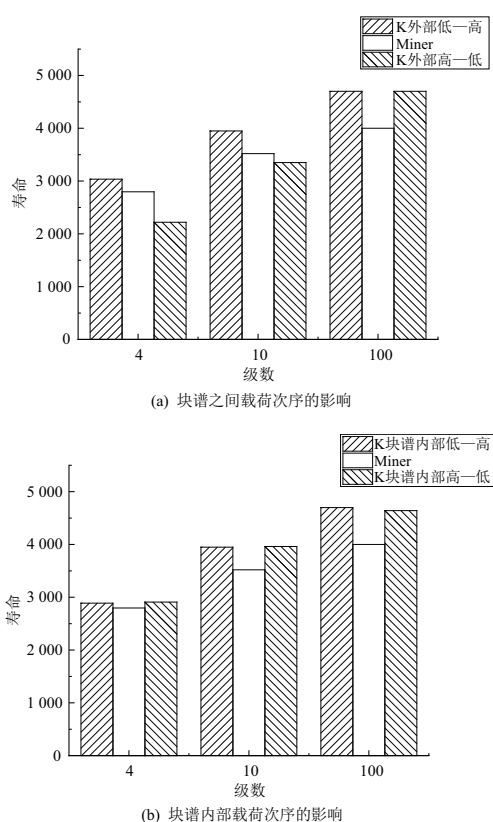


图10 Kramer 累积损伤模型
(载荷范围(366~805) MPa)

块谱之间载荷从低到高加载有与“锻炼”类似的效果。锻炼也称渐增应力处理,是一种强化方法。锻炼时首先在低应力下(一般低于疲劳极限)试验一定循环次数,然后逐级增加应力,从而提高疲劳强度或寿命。其原理是通过逐渐强化材料中的薄弱点来达到有益的效果。其过程是:最弱的滑移面首先滑移后,产生应变硬化,从而得到加强,使以后更高载荷产生的应变能更均匀地分布于整个表面,避免了薄弱区域中过度的应变集中^[15]。这解释了载荷从低到高加载时寿命比较长的原因。假设块谱之间载荷从高到低加载,较大的载荷在最弱的滑移面上滑移后,很快就达到穿晶开裂,但后续过程速率较快,即使是小载荷,也很快发生沿晶开裂,裂纹扩展直至断裂。对于块谱内部载荷从低到高或者从高到低排序,从微观上看,它们不符合锻炼的过程,因而寿命不会增大或减少。其次,锻炼的效果相当有限,无法与喷丸或渗碳(氮)等强化方式相比。从现有寿命预测模型计算结果中发现,块谱之间载荷没有影响或者影响很小,而且是从低到高或者是从高到低,两种预测模型与线性相比,最多相差 21.6%,与线性结果相差并不是很多。

4 结语

1) 对于块谱外部顺序,从低到高加载有与“锻炼”

类似的效果。两种模型可以很好地预测出载荷从低到高寿命比线性累积的长,载荷从高到底时寿命比线性累积的短;且所选取的两种非线性累积损伤模型计算块谱之间载荷从低到高或从高到低顺序时,两种预测模型与线性相比,最多相差 21.6%,与线性结果相差并不是很多。

2) 块谱内部载荷排序与线性的相比,发现与线性的相差不大,且块谱内部载荷无论是从低到高还是从高到底,两者寿命都很接近。

参考文献:

- [1] RATHOD V, YADAV O P, RATHORE A, et al. Probabilistic modeling of fatigue damage accumulation for reliability prediction [J]. International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, 2011, 13, 495-504.
- [2] 陈清良, 葛恩德, 陈雪梅, 等. 冷挤压抗疲劳制造技术在钛合金构件中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 57-60.
- [3] 王筱冬, 张娇. 研磨光整处理 Ti-6Al-4V 钛合金表面组织及疲劳性能[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 30-31, 49.
- [4] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 确定性疲劳累积损伤理论进展[J]. 中国工程科学, 2003, 5(4): 81-87.
- [5] NEWMAN J C Jr, ZERBST U. Engineering fracture mechanics [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(3/4): 367-369.
- [6] 吴志学, 吕文阁, 徐灏. 疲劳极限下损伤及“锻炼”效应[J]. 东北大学学报, 1996, 17(3): 338-341.
- [7] 崔中文. 载荷作用次序对疲劳寿命影响的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [8] ZAKARIA K A, ABDULLAH S, GHAZALI M J, et al. Influence of spectrum loading sequences on fatigue life in a high-temperature environment [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 30: 111-123.
- [9] SHRESTHA R, SIMSIRIWONG J, SHAMSAEI N. Load history and sequence effects on cyclic deformation and fatigue behavior of a thermoplastic polymer [J]. Polymer Testing, 2016, 56: 99-109.
- [10] KAMAYA M, KAWAKUBO M. Loading sequence effect on fatigue life of Type 316 stainless steel [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 81: 10-20.
- [11] FACCHINETTI M L. Fatigue damage of materials and structures assessed by Wöhler and Gassner frameworks; recent insights about load spectra for the automotive [J]. Procedia Engineering, 2018, 213: 117-125.
- [12] M A Miner. Cumulative damage in fatigue [J]. J. Appl. Mech. 1945, 12(3): 159-164.
- [13] 戴钰冰, 曹娜, 江丽娟, 等. 一种旋转设备疲劳寿命预测的新方法[J]. 现代制造技术与装备, 2018(2): 121-122.
- [14] JEELANI S, MUSIAL M. A study of cumulative fatigue damage in AISI 4130 steel [J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(6): 2109-2113.
- [15] 赵少汴. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

收稿日期: 2019-12-10