

超载对疲劳寿命影响的试验研究

中国科学院力学研究所 曾春华 郭康民

摘 要

超载对疲劳寿命的影响是航空研究中的一个重要问题。本文通过试验初步探讨了机械超载对疲劳寿命的影响,包括超载对疲劳裂纹形成寿命、疲劳裂纹扩展寿命、疲劳累积损伤以及裂纹扩展迟滞效应的影响。并用X射线应力分析仪测量了超载引起的残余应力。用残余应力的观点解释了超载对疲劳寿命的影响。

一、引 言

近几年来,国内外许多学者都对疲劳中的超载问题很感兴趣,因为人们逐渐认识到超载对疲劳寿命影响的重要性,超载机理是疲劳设计中控制材料疲劳寿命和加强材料抗疲劳性能的理论基础。目前,国外已提出一些超载迟滞模型^[1~5],然而,目前大多数文章都着重讨论超载对疲劳裂纹扩展的影响,很少涉及超载对疲劳裂纹形成寿命和累积损伤的影响。

本文以15MnVN, 28CrNi3MoV, 25Cr2NiMoV合金钢和LY12CZ铝合金试样的大量疲劳试验为基础,研究了超载对疲劳裂纹形成寿命、裂纹扩展寿命、疲劳累积损伤和迟滞效应的影响,测量了超载造成缺口根部的残余应力,并用残余应力观点解释了裂纹闭合、迟滞效应和超载对疲劳寿命的影响。

二、超载对疲劳裂纹形成寿命的影响

疲劳破坏大致经历着四个时期,即疲劳成核期,微观裂纹增长期,宏观裂纹扩展期和断裂期。疲劳裂纹形成寿命指的是疲劳成核期和微观裂纹增长期寿命。究竟出现多长的裂纹就算形成阶段的结束,国内外目前还没有统一的标准,本文采用多数人的标准,即试件出现一毫米长裂纹就标志形成阶段结束。

研究超载对疲劳裂纹形成寿命的影响,我们选四根15MnVN,四根28CrNi3MoV和三根25Cr2NiMoV边缘切口板试样,尺寸如图1所示。对每种试样都先施加不同的超载量,用X射线应力分析仪测出缺口根部的残余应力。然后在西德制的Schenck疲劳试验机上施加常幅三点弯曲载荷,应力比 $R=0.5$,试验频率为40Hz。用工具显微镜仔细观察,直到试样出现一毫米长的疲劳裂纹为止,记录下施加的疲劳载荷循环次数。以

此为基础, 分析不同超载量对不同材料疲劳裂纹形成寿命的影响。试验结果在表 1 中示出。

表1 超载对疲劳裂纹形成寿命影响的试验结果

Table 1 Test results of effect of overload on fatigue crack initiation life

材料	15MnVN		28CrNi3MoV		25Cr2NiMoV	
	超载量	形成寿命N次	超载量	形成寿命N次	超载量	形成寿命N次
试样 1	无	0.087×10^5	无	0.28×10^5	无	1.359×10^6
试样 2	$41.4\% \sigma_s$	0.795×10^5	$32.7\% \sigma_s$	0.47×10^5	$60\% \sigma_s$	3.460×10^6
试样 3	$48.3\% \sigma_s$	1.243×10^5	$38.4\% \sigma_s$	0.925×10^5	$70\% \sigma_s$	9.659×10^6
试样 4	$55.2\% \sigma_s$	1.620×10^5	$43.6\% \sigma_s$	1.07×10^5		

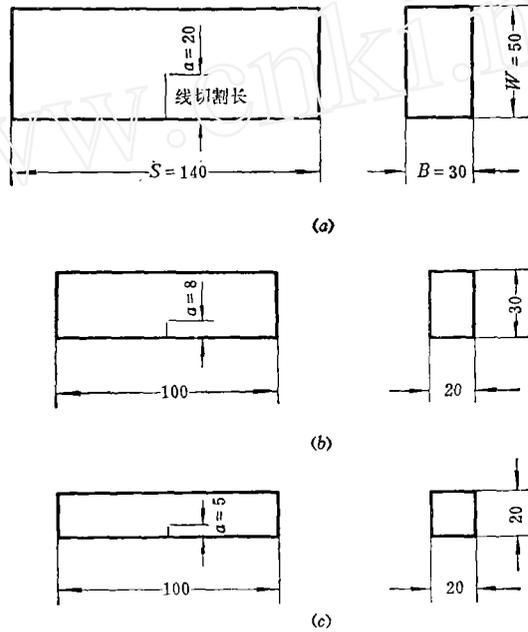


图1 切口疲劳试样

Fig. 1 Notched fatigue testpieces

(a) 15MnVN; (b) 28CrNi3MoV; (c) 25Cr2NiMoV 单位: 毫米。

三、超载对疲劳裂纹扩展寿命的影响

这里所指的疲劳裂纹扩展寿命包括宏观裂纹扩展和最后断裂两阶段, 也就是指出现一毫米裂纹以后至断裂的寿命。我们还是用上述 11 根试样观察超载对扩展寿命的影响, 待裂纹扩展至 5 毫米后, 施加与表 1 相同的超载量, 测出缺口根部的残余应力。继续在 Schenck 疲劳机上试验, 施加与形成阶段相同的载荷, 用工具显微镜观察疲劳裂纹的扩展。裂纹每扩展一定距离, 记录一次载荷循环次数, 直至裂纹扩展到临界裂纹尺寸为止, 这样便可得出裂纹长度 a 与载荷循环次数 N 的关系曲线。以这组关系曲线为基础, 分析超载对疲劳裂纹扩展寿命的影响。

超载对三种材料缺口试样疲劳裂纹扩展寿命影响的试验结果如图 2~4 所示。

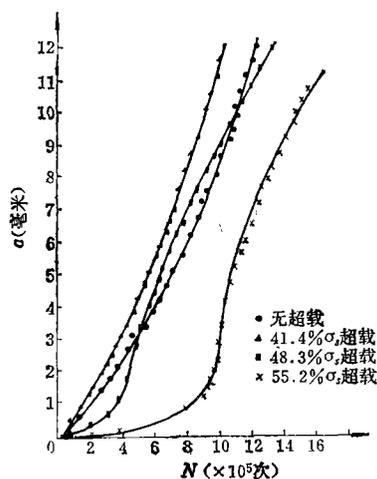


图2 15MnVN钢缺口试样的 $a \sim N$ 关系曲线

Fig. 2 $a \sim N$ curves of 15MnVN steel notched testpieces

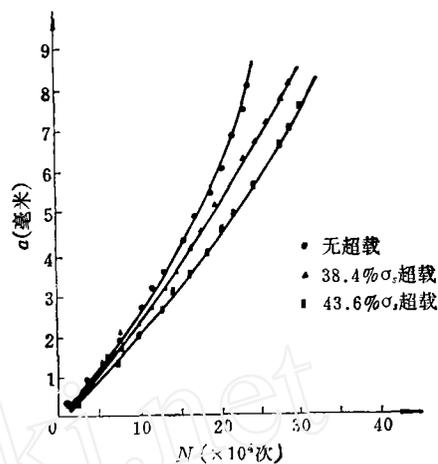


图3 28CrNi3MoV钢缺口试样的 $a \sim N$ 关系曲线

Fig. 3 $a \sim N$ curves of 28CrNi3MoV steel notched testpieces

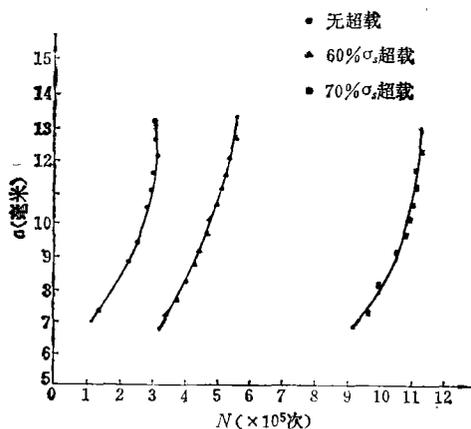


图4 25Cr2NiMoV钢缺口试样的 $a \sim N$ 曲线

Fig. 4 $a \sim N$ curves of 25Cr2NiMoV steel notched testpieces

四、超载对疲劳累积损伤的影响

疲劳损伤就是指在交变载荷作用下材料损坏的程度，进一步说就是材料在交变载荷作用下微观疲劳裂纹不断发展和深化，从而使材料有效工作面减少的程度。1945年Miner首先提出了一个线性累积损伤理论，但是后来许多研究者陆续指出：材料达到疲劳破坏时，损伤周比值（即 $\sum \frac{n}{N}$ ）不一定为 1，多数情况下与 1 相差一些，有时则相差很大，这是因为 Miner 理论没有考虑应力之间的相互影响。影响 $\sum \frac{n}{N}$ 的因素很多，超载就是较

主要的因素。

为了研究过载对累积损伤 $\Sigma \frac{n}{N}$ 的影响, 我们选用 LY12CZ 铝合金中心切口板试样进行疲劳试验, 试样形状和尺寸如图 5 所示。选应力次序为从低到高的五级程序载荷谱, 每循环 12 块加一次超载, 超载量为 $45\% \sigma_s$, $55\% \sigma_s$, $75\% \sigma_s$, 在瑞士制 Ansler 高频疲劳试验机上加载, 直至试样发生疲劳破坏。对每种超载试验 5~8 个试样, 最后根据试验所得的寿命与对应的疲劳曲线计算每个试样的累积损伤 $\Sigma \frac{n}{N}$, 取对数平均值, 以此分析超载对累积损伤的影响。试验和计算结果见表 2。

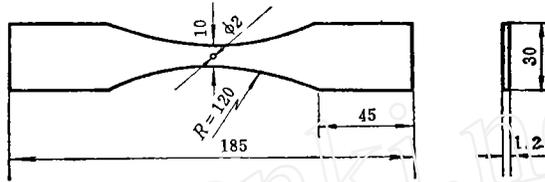


图5 LY12CZ铝合金中心切口板试样 单位: 毫米

Fig. 5 LY12CZ aluminium alloy centre notched plate testpiece

表2 超载对损伤周比影响的试验结果

Table 2 Test results of effect overload on damage cyclic rate

超载量	疲 劳 累 积 损 伤 周 比 值 $\Sigma \frac{n}{N}$								平均
	试件 1	2	3	4	5	6	7	8	
$45\% \sigma_s$	1.6373	2.4845	1.7715	3.8809	3.1217	2.2622	1.7800	1.6710	2.0300
$55\% \sigma_s$	6.7685	7.1510	6.9530	6.9570	6.9490				6.9530
$75\% \sigma_s$	8.9670	4.3800	16.8500	46.4050	13.3440				13.9600

五、超载对裂纹迟滞效应的影响

在常幅加载过程中, 引入一次或几次拉伸峰值载荷后, 紧接其后的裂纹扩展速率将

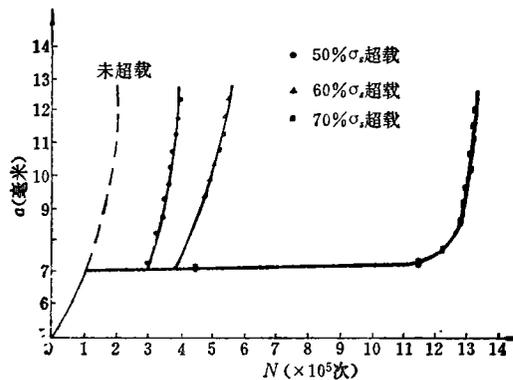


图6 25Cr2NiMoV钢试样的裂纹迟滞效应曲线

Fig6 Retardation effect curves of crack propagation of 25Cr2NiMoV steel notched testpieces

会显著的变慢,直到相当循环以后才能慢慢地恢复到原来的水平,这种由于超载引起裂纹扩展速率变慢的现象,称为裂纹扩展的迟滞效应。

为了研究这种超载迟滞效应,我们选用三根 25Cr2NiMoV 钢缺口试样进行试验,试样形状和尺寸见图 1(c)。先在疲劳试验机上引发疲劳裂纹 2 毫米,然后分别施加 50% σ_s , 60% σ_s , 70% σ_s 的超载,测出缺口根部残余应力后,继续疲劳试验,用工具显微镜观察裂纹扩展,以此研究超载对疲劳裂纹扩展迟滞效应的影响。裂纹扩展迟滞效应曲线见图 6。

六、结论和分析

1. 从试验结果可以看出,拉伸超载对疲劳裂纹形成寿命的影响很大,超载可使三种试验钢试样的裂纹形成寿命大大增加。对 15MnVN 钢, 55.2% σ_s 的拉伸超载的裂纹形成寿命比无超载试样寿命高 19 倍多。对 28CrNi3MoV 钢, 43.6% σ_s 拉伸超载试样的裂纹形成寿命比无超载试样高 5 倍多。对 25Cr2NiMoV 钢, 70% σ_s 拉伸超载试样的裂纹形成寿命比无超载试样高 7.5 倍。

2. 从试验数据的分析看出,所试验的三种钢试样,疲劳裂纹形成寿命都是随着拉伸超载量的增加而增加,并且都与残余应力密切相关。拉伸超载后会在试样缺口根部造成残余压应力,见表 3。在一定范围内,超载量越大,造成的残余压应力越大,而残余压应力对疲劳寿命是有利的,它可以提高材料的疲劳抗力,阻碍疲劳裂纹的形成与扩展,因而大大提高了试样的疲劳寿命。

3. 试验结果表明,拉伸超载对疲劳裂纹扩展寿命的影响也很大,超载可使三种试验钢试样的疲劳裂纹扩展寿命大大提高。对 15MnVN 钢, 55.2% σ_s 超载试样裂纹扩展 5 毫米时的寿命比无超载试样高 4 倍。对 25Cr2NiMoV 钢, 70% σ_s 超载试样裂纹扩展 2 毫米时的寿命比超载 50% σ_s 的试样高 9 倍,比无超载试样将高更多倍。

4. 从试验得到的 $a \sim N$ 曲线看出,随着拉伸超载量的增加, $a \sim N$ 曲线沿着横坐标向右移动。超载量较小时不很明显,拉伸超载量越大,它的疲劳裂纹扩展寿命就越长。这也是与缺口根部的残余应力有关的,因为残余应力多半是由非均匀的塑性变形引起的。在一定范围内,拉伸超载量越大,在缺口根部造成的塑性变形就越大。我们知道,拉伸峰值载荷将使疲劳裂纹扩展迟滞,这一迟滞过程发生在裂纹穿过超载塑性区的整个过程中,迟滞的大小取决于裂纹穿过塑性区距离的大小。所以,塑性区越大,迟滞时间就越长,也就是说裂纹的闭合时间越长,就是由于这种裂纹的闭合现象,推迟或阻止了疲劳裂纹的扩展,从而提高了疲劳裂纹的扩展寿命。

5. 超载对疲劳累积损伤周比的影响也十分显著。实验和计算表明,在循环加载前施加一拉伸超载,损伤周比 $\Sigma \frac{n}{N}$ 值会增加许多倍。在一定范围内,随着超载量的增加, $\Sigma \frac{n}{N}$ 值迅速增加,从而对疲劳寿命产生有利的影响。超载可使缺口根部产生塑性变形,超载量大,产生的塑性变形就大。但塑性区周围仍处于弹性变形状态,当超载取消后,塑性变形区受压,形成了有利于疲劳寿命的残余压应力,使 $\Sigma \frac{n}{N}$ 增加。

6. 从图 6 的试验结果看到,拉伸超载所引起的裂纹扩展迟滞效应是十分明显的。在常幅加载过程中,引入一次峰值拉伸载荷后,紧跟其后的裂纹扩展速率将显著地变慢,

甚至停止扩展,直到相当的循环次数以后,才能慢慢地恢复到原来的水平。试验表明,在一定范围内,超载量越大,迟滞时间越长。这种由于超载作用使裂纹扩展速率变慢的现象,称为裂纹扩展迟滞效应,这在实际应用中是一个很重要的概念。

表3 三种钢缺口试样引发疲劳裂纹前后测量的残余应力
Table 3 Residual stress of measured of initiation fatigue crack before and later on three steel notched testpieces

材 料	试样号	裂纹引发前的残余应力 (kg/mm ²)		裂纹引发后的残余应力 (kg/mm ²)	
		长度方向	宽度方向	长度方向	宽度方向
15MnVN	1	0	0	0	0
	2	-20.7	-34.5	-25.3	-29.7
	3	-18.4	-34.5	-20.1	-43.7
	4	-16.1	-27.6	-2.3	-39.8
28CrNi3MoV	1	0	0	0	0
	2	-25.3	-50.6	-27.6	-39.1
	3			-27.6	-39.1
	4			-32.2	-39.1
25Cr2NiMoV	1			0	0
	2			-18.4	
	3			-23.0	
	4			-23.0	
	5			-36.8	-41.4
	6			-36.8	-36.8

参 考 文 献

- [1] Wheeler, D. C., ASME. D. (1972).
 [2] Engle, R. M. and Rudd. J. L., AIAA paper, No. 74-369.
 [3] J. Maarse., Fracture. (1977).
 [4] AFFDL., Vol. 1, ADAO 21700.
 [5] Matsuoka and Tanaka., Eng. Fract. Mech., (1976), Vol. 8, No. 3.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF OVERLOAD ON FATIGUE LIFE

Zeng Chunhua and Guo Kangmin
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

There are many factors which affect the fatigue life, but residual stress and overload are the most important. Overload in a metal can improve its fatigue strength markedly. Based on a large number of tests, the effects of the overload on fatigue crack initiation life, fatigue crack propagation life, fatigue cumulative damage cyclic rate and crack propagation retardation are researched.

Experimental data on the influence of overload on the fatigue initiation life are summarized in a table. In order to compare the influence of overload on fatigue crack propagation life with crack propagation retardation effect, $a \sim N$ curves are used for demonstrating the experimental results of three notched specimens. Finally the effect of overload on fatigue life is explained in the view of residual stress.