

# 负超载对 Al-2024 疲劳裂纹扩展的影响

伍义生 J. Zuidema

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (Delft 大学, 荷兰)

**摘要** 本文讨论了负超载对 Al-2024 铝合金材料疲劳裂纹扩展的影响, 试验发现在大量负超载循环周次之后也有裂纹停滞现象发生。这种停滞现象的产生与剪切唇的形成有关。本文发现负超载期间的剪切唇(简称剪切唇 I)和负超载之后的剪切唇(简称剪切唇 II)对疲劳裂纹扩展速率影响的程度不同。从裂纹闭合的观点建立了负超载对疲劳裂纹扩展影响的计算模型。

**关键词** 疲劳裂纹生长, 负超载, 剪切唇, 裂纹闭合, 疲劳试验

## 1. 引言

关于超载对材料疲劳裂纹扩展特性的影响已进行了大量的研究工作, 得出众所周知的超载停滞效应, 如文献[1]。通常认为超载停滞效应是由于裂尖残余应力、裂纹尾迹区残余塑性变形及裂尖钝化造成的。关于负超载的影响目前研究尚少。通常认为负超载将引起疲劳裂纹扩展加速。本文进行了多循环次数的负超载疲劳试验, 发现在大量负超载循环周次之后也有裂纹停滞现象发生。这种停滞现象的产生和剪切唇的形成有关, 因此本文对此问题进行了深入的研究。

## 2. 试验方法

本试验所用材料为 Al-2024 T351 航空铝合金材料。化学成份为 Cu4.75, Mg1.18,

Mn 0.67, Fe 0.14, Si 0.34, Zn 0.19, Cr 0.004, Ti 0.03, 其余为 Al。机械性能为: 屈服应力 353 MPa, 拉伸强度 459 MPa, 延伸率 21%。试件为中心裂纹板拉伸试件。板宽 100 mm, 板厚 6 mm, 板长 300 mm。中心孔直径 3 mm, 在孔的两边用电火花各切割 1.5 mm 长的切口。再预制疲劳裂纹每边各 2 mm。试件进行常应力强度因子范围控制加载试验, 如图 1 所示。 $\Delta K_{RC}$  为基线应力强度因子范围,  $\Delta K_{UL}$  为负超载应力强度因

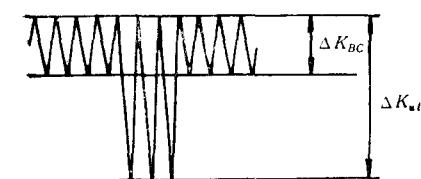


图 1 负超载试验的载荷特性

Fig. 1 Load characteristics of underload test

子范围。试验的基线有效应力强度因子范围不变, 为  $5 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 。负超载有效应力强度因子范围选  $8 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ ,  $10 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  和  $16 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  三个不同的数值。负超载作用不同的周次, 以便研究负超载循环次数不同对疲劳裂纹扩展的影响。裂纹长度采用脉冲直流电位法(Howden 仪)进行测量。试验是在 Delft 大学金属系试验室 350 kN 计算机控制的

本文系编委王自强推荐,于 1991 年 11 月 2 日收到第一次稿,于 1991 年 12 月 29 日收到修改稿。

MTS 液压伺服疲劳试验机上进行的。试验频率为 10Hz, 室温。

### 3. 试验结果

图 2 给出受负超载影响的典型的裂纹生长曲线。 $AB$  段为负超载前在基线有效应力强度因子范围作用下的裂纹扩展。 $BC$  段为负超载本身所引起的快速疲劳裂纹扩展。 $C$  点之后是负超载停止作用之后的疲劳裂纹扩展。可以看到在  $C$  点之后有停滞现象产生。 $Nd_3$  是平行线  $CC'$  与  $BB'$  之间的水平距离, 表示扩展到同样长度, 由于负超载本身的加速扩展, 所造成循环周次的减小。 $Nd$  是平行线  $CC'$  和  $PP'$  之间的水平距离, 表示负超载对随后裂纹扩展的延迟作用, 所引起的停滞周数。 $Nd_2$  为平行线  $BB'$  与  $PP'$  之间的水平距离, 表示负超载总的效果, 如  $Nd_2$  为正, 表示负超载的总效果为停滞(寿命延长), 如为负表示总效果为加速(寿命缩短)。

图 3 给出负超载有效应力强度因子范围为  $10\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时负超载的加速、减速及综合的效果。图 4 给出负超载有效应力强度因子范围为  $16\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时负超载的加速、减速及综合的效果。从图 3 可以看出当负超载的幅值较低时 ( $(\Delta K_{eff})_{ul} = 10\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ), 负超载的加速效果大于减速效果, 总的寿命比没有负超载时要短。从图 4 可以看出当负超载的幅值较高 ( $(\Delta K_{eff})_{ul} = 16\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ), 且负超载的循环次数很多时, 负超载的停滞效果可能大于加速效果, 总的寿命比没有超载时要长。

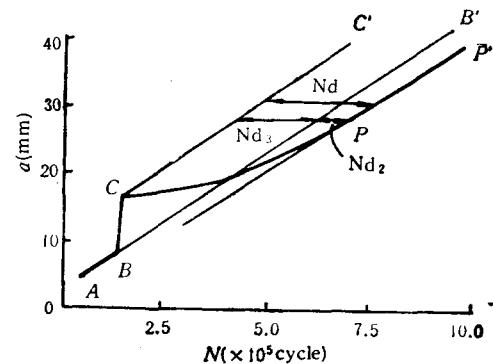


图 2 典型的负超载裂纹生长曲线

Fig. 2 Typical crack growth curve with underloading

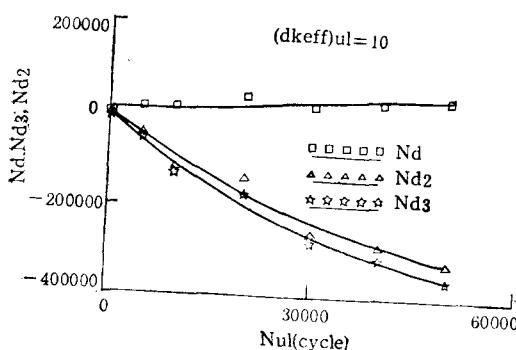


图 3 负超载引起的加速、减速及综合效果

$((\Delta K_{eff})_{ul} = 10\text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$

Fig. 3 Acceleration, deceleration and total effect of underloading

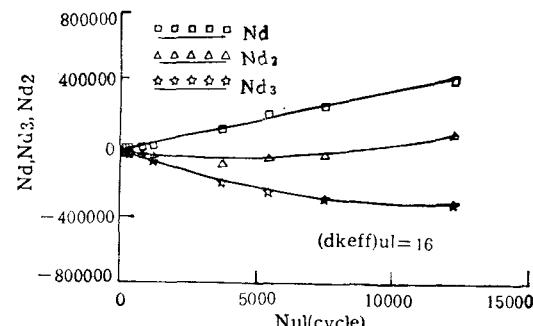


图 4 负超载引起的加速、减速及综合效果

$((\Delta K_{eff})_{ul} = 16\text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$

Fig. 4 Acceleration, deceleration and total effect of underloading

#### 4. 剪切唇的形成

试验发现由于负超载的作用,裂纹表面有剪切唇生成,即由平断口转变为斜断口。随着负超载作用周数的增加,剪切唇的长度、宽度和厚度增加,如图5所示。在负超载作用期间,剪切唇逐渐加长、加宽。在负超载结束时剪切唇的宽度达到最大。我们简称此为I阶段剪切唇。在负超载结束后,剪切唇的宽度逐渐减小,最后恢复为平断口,我们简称此为II阶段剪切唇。

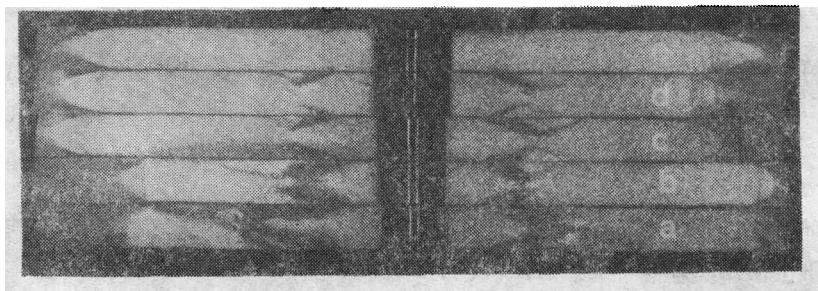


图5 负超载引起的剪切唇 ( $(\Delta K_{eff})_{UL} = 16 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ )  
(负超载周次 a. 12200 周, b. 5430 周, c. 3730 周, d. 2270 周, e. 500 周)

Fig. 5 Shear lip caused by underloading ( $(\Delta K_{eff})_{UL} = 16 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ )  
(cycle number of underloading, a 12200 cycles, b 5430 cycles, c 3730  
cycles, d 2270 cycles, e 500 cycles)

试验发现在剪切唇I阶段,随着剪切唇加大,疲劳裂纹扩展速率有所下降。但在负超载停止作用后的剪切唇II阶段,裂纹扩展速率的下降更为显著,如图6所示。

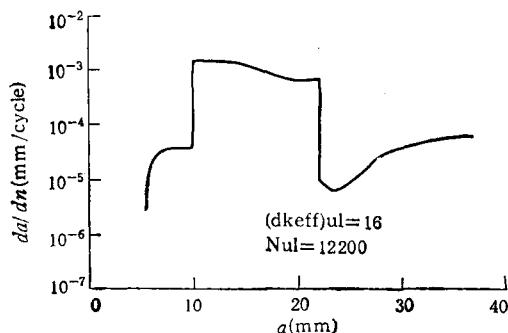


图6 负超载影响的疲劳裂纹扩展速率曲线

Fig. 6 Fatigue crack growth curve under the effect of underloading

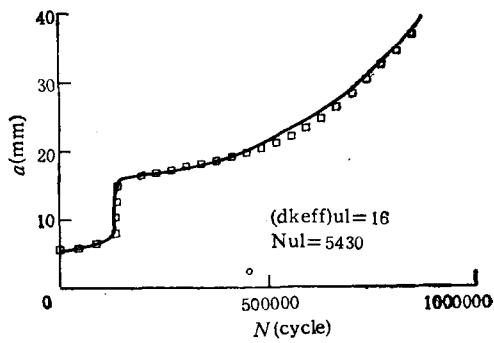


图7 计算裂纹生长曲线与试验裂纹生长曲线的比较

$(\Delta K_{eff})_{UL} = 16 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ , 负超载 5430 周)  
Fig. 7 The comparison between predicted crack growth curve and test curve

#### 5. 计算模拟

裂纹闭合已成功地用来解释许多疲劳裂纹扩展现象。裂纹闭合不仅可以由裂纹尾迹区的残余塑性变形引起,也可以由裂纹表面的不规则引起。在剪切唇I阶段,由于负超载所形成的剪切唇,加大了裂纹表面的不规则,使裂纹提早闭合,从而使有效应力强度因子范围降低。剪切唇越大,裂纹表面的不规则越严重,有效应力强度因子范围降低的越

多。在剪切唇 II 阶段，除了剪切唇本身的不规则引起有效应力强度因子下降以外，由于 I 阶段剪切唇的阻塞作用使裂纹更早闭合，有效应力强度因子范围下降更显著。因此 II 阶段剪切唇比 I 阶段剪切唇对裂纹扩展速率的影响更大。根据以上论述本文提出以下计算剪切唇影响的疲劳裂纹扩展公式：

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K_{eff}/(L_s/t)^\beta)^n \quad (1)$$

式中， $\Delta K_{eff}$  是没有负超载作用的有效应力强度因子范围，可按 Elber<sup>[2]</sup> 或 Schijve<sup>[3]</sup> 公式计算， $L_s$  为剪切唇横截面轮廓线长度，可按 Zuidema<sup>[4]</sup> 公式计算， $t$  为试件厚度。 $C$ 、 $n$  为 Paris 公式中的材料常数， $C = 2.311 \times 10^{-7}$ ， $n = 3.18$ ， $\Delta K_{eff}$  单位为 MPa $\sqrt{m}$ ， $da/dn$  单位为 mm/cycle， $\beta$  为反映剪切唇影响大小的指数。根据试验结果进行回归得出：

$$\beta = 1.0 \quad \text{I 阶段剪切唇}$$

$$\beta = 4.5 \quad \text{II 阶段剪切唇}$$

图 7 显示用公式(1)计算得出的裂纹生长曲线与试验结果的比较。可以看出计算曲线和试验曲线是吻合的。

## 6. 结论

(1) 不仅正向超载可以引起疲劳裂纹生长停滞，负向超载也有可能引起疲劳裂纹生长停滞。

(2) 在负超载幅值低、周次少时负超载的加速效果大于停滞效果，总效果是加速裂纹扩展，试件寿命减少。在负超载幅值高、周次多时，负超载的停滞作用大于加速作用。总效果是停滞，试件寿命加长。

(3) 负超载引起的裂纹生长停滞与剪切唇诱导的裂纹闭合有关，本文建立的计算模型，计算结果与试验吻合。

## 参 考 文 献

- [1] Schijve J. The Accumulation of Fatigue Damage in Aircraft Materials and structures. AGARD-AG-157, 1972
- [2] Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure, Damage Tolerance in Aircraft structures, ASTM STP 486, 1970
- [3] Schijve J. Some Formula for the Crack Opening stress level, *Engng Fract. Mech.* 14: 461—465
- [4] Zuidema J. and Blaauw H S. Slant Fatigue Crack Growth in Al-2024 sheet material *Engng Fract. Mech.* 1988, 29: 401—413

## THE EFFECT OF UNDERLOADING ON AI-2024 FATIGUE CRACK GROWTH

Wu Yisheng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

J. Zuidema

(Delft University of Technology, Dept. of Materials, Netherlands)

**Abstract** Fatigue test with a large number of underloading were performed. Fatigue crack growth delay after the action of underloading was found. The delay was correlated to the development of shear lips on the crack surface. It was found that in stage one (during underloading) and in stage two (after underloading) the effect of shear lips on fatigue crack growth was different. The effect of the shear lips was much stronger in stage two than in stage one. A calculation model of fatigue crack growth including the effect of underloading was suggested based on the crack closure concept.

**Key words** fatigue crack growth, underloading, shear lip, crack closure, fatigue test