

过载对疲劳裂纹低速扩展的影响

邓蓉英

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文研究一次拉伸型过载对奥氏体不锈钢疲劳裂纹近门槛值扩展的影响。试验结果表明,过载对门槛值的影响和过载比 P_0/P_{max} 的大小有关; $P_0/P_{max} > 1.4$ 时,门槛值随着过载比增加而线性提高,提出了裂纹扩展速率减缓和门槛值提高的主导原因是过载大大促进裂纹顶端闭合,即塑性诱发闭合和断裂表面粗糙诱发闭合。

一、引 言

已有研究表明:裂纹在其扩展过程中受到高水平载荷的作用后,其扩展不再受 Paris 关系所支配^[1-3]。如果高载是属拉伸型,则裂纹在高载下作短暂的快速扩展之后,其扩展速率立即缓慢下来,甚至停止。有关迟滞的研究以往大都着重于第Ⅱ阶段的扩展。这对承受变幅载荷的实际构件疲劳寿命的估算是重要的,但服役构件中的裂纹(或缺陷)更多的还是处于第Ⅰ阶段的慢速扩展。因而研究过载对第Ⅰ阶段的低速扩展的影响更有其实际意义。本工作采用奥氏体不锈钢进行研究,并进一步探讨其影响的微观机制。

二、试验方法

试验采用奥氏体不锈钢,经1130°C固溶处理得到奥氏体晶粒尺寸为0.18mm,其化学成分、机械性能见文献[4]。疲劳裂纹扩展试验采用矩形梁(25×20mm)的三点弯曲试样。试验加载频率为115Hz,循环应力比为0.5。本研究规定,经 10^6 循环加载,裂纹扩展量 $\Delta a \leq 0.1$ mm,即 $da/dN \leq 10^{-7}$ mm/cyc,对应的裂纹顶端的 ΔK 为疲劳裂纹扩展的门槛值 ΔK_{th} 。

1986年5月12日收到初稿;1986年8月22日收到修改稿。

试验采用过载比 P_0/P_{max} 为 1.4, 1.8 和 2.2 三种. 从切口引发疲劳裂纹的载荷幅值开始, 随着裂纹的发展, 在相同的循环载荷下逐渐递减载荷直至接近裂纹扩展的门槛值时, 按不同过载比的要求加一次过载 P_0 . 再选取不同载荷幅值进行常幅疲劳试验, 并记录每个载荷幅值及裂纹扩展量 $\Delta a=0.1\text{mm}$ 的载荷循环数 N , 则得到一定 P_0/P_{max} 的 $\Delta K-N$ 曲线. 从曲线即可得到该过载比下 $N=10^6$ 所对应的 ΔK 即为过载门槛值 ΔK_{th}^0 . 在不同过载比下重复上述试验, 即可得到不同过载比的裂纹扩展的门槛值.

本研究还对裂纹在过载塑性区中的扩展进行金相和扫描电镜观察.

三、试验结果和分析

试验得到三种过载比的常幅 $\Delta K-N$ 曲线示于图 1. 结果表明, 随着过载比的增加, 在同样的 ΔK 作用下, 相应的载荷循环数 N 亦增加. 三种过载比 (1.4, 1.8, 2.2) 对应的门槛值 ΔK_{th}^0 分别为 5.15, 6.82, $7.87\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$, $\Delta K_{th}^0/\Delta K_{th}$ 分别为 1.03, 1.36, 1.57. 很明显, $P_0/P_{max}=1.4$ 时对门槛值的影响甚小. 当 $P_0/P_{max}>1.4$ 时, 随着过载比的增加, 门槛值不断提高. 经数据回归分析, 在一定过载比范围内, ΔK_{th}^0 与 P_0/P_{max} 的关系如下:

$$\Delta K_{th}^0 = \Delta K_{th} \left(7.83 \times 10^{-2} + 0.68 \frac{P_0}{P_{max}} \right) \quad (1)$$

相关系数 $r=0.9914$.

金相观察表明, 过载比越大, 由过载引起裂纹顶端钝化的程度也越严重. 过载后, 裂纹顶端被一个大而塑性变形程度高的塑性区所包围, 该塑性区内严重塑性变形的两翼

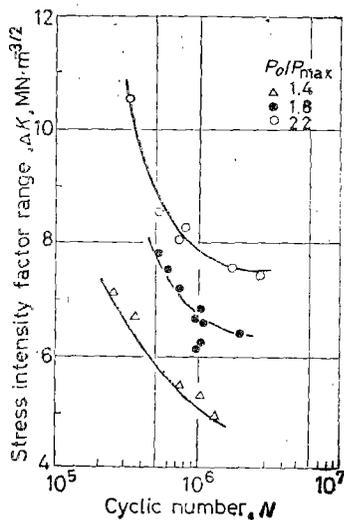


图 1 不同过载比的 $\Delta K-N$ 曲线
Fig. 1 $\Delta K-N$ curves for various overload ratio

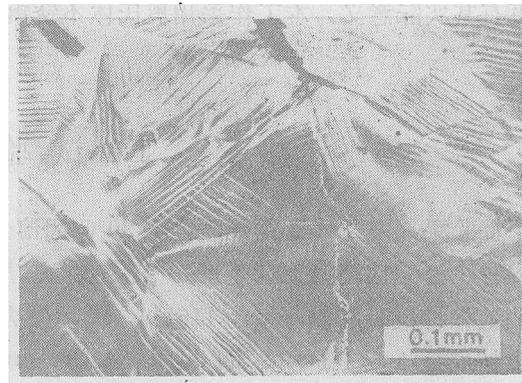


图 2 裂纹在过载塑性区内的扩展
Fig. 2 Propagation of a crack in overload plastic zone

间夹角，随过载比增大而变小。被钝化的裂纹顶端在随后的常幅循环载荷作用下是难以起动的。在过载塑性区中扩展着的裂纹其后部由于闭合变细而模糊不清，裂纹多数是通过晶粒内部滑移带相交的地方向前推进，裂纹每穿过晶界即改变其扩展方向，扩展中的裂纹多次出现分叉（见图2），且裂纹表面起伏不平。

扫描电镜观察发现，在过载门槛值附近，断口形貌仍然是穿晶型的周期解理和塑性撕裂。在撕裂棱处观察到韧窝，还观察到“轮胎”和“羽毛”状花样的形貌（见图3a）。断口上出现二次裂纹，在断裂面的中部为数较多。在具有结晶学特征的周期解理小平面上呈现极细密的与局部裂纹扩展方向垂直的平行条纹（见图3b）。裂纹在扩展过程中与晶界相遇时，出现两种情况：一是解理小平面稍改其扩展方向，但并不发生数量上的骤然增加（见图3c）；另一种则是解理小平面不连续，必须重新生核，裂纹沿着若干新的相互平行的解理面扩展使解理台阶激增（见图3b）。前者是裂纹与同号刃型位错垂直排列组成的小倾斜晶界相遇的结果，裂纹面与刃型位错相交并不引起解理台阶的增减；后者则是裂纹和扭转晶界相遇，与大量螺位错交割，使解理台阶激增而形成大量河流。

根据 Elber^[5]的闭合理论，扩展着的裂纹顶端的尾部留下残余塑性应变区，它有效地减少裂纹张开的位移量，使卸载过程中裂纹提前闭合，裂纹顶端的真实应力强度因子

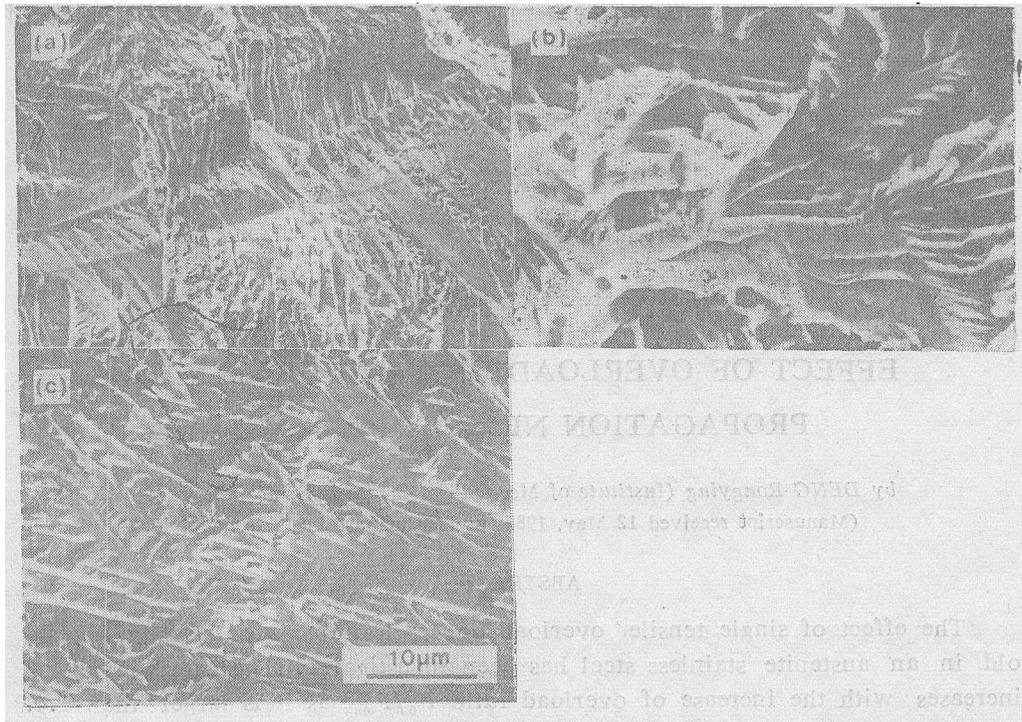


图3 过载门槛限裂纹扩展的断口形貌

Fig. 3 Morphology of fracture surfaces for overload threshold
 (a) Tyre-like cleavage; (b) Parallel striation on small facet and large angle grain boundaries; (c) Small angle grain boundaries

范围即 ΔK_{eff} 比名义应力强度因子范围 ΔK 小, 而使扩展速率减小. 过载越大, 闭合应力越高; 扩展速率越慢和门槛值越高. 试验观察到裂纹在过载塑性区中扩展出现变细而模糊不清的现象即是闭合的证明.

文献 [4] 指出, 晶粒尺寸越大, 裂纹近门槛值的低速扩展越慢, 门槛值越高. 其原因是晶粒越大, 断裂面越粗糙, 越容易促使裂纹粗糙诱发闭合, 增加裂纹扩展阻力, 使裂纹扩展速率下降. 因而在断裂面观察到小平面上的平行条纹较细晶粒为密. 粗晶粒这种有利的影响在循环载荷比低时更为明显. 此外, Schijve^[6] 指出, 围绕塑性区的弹性区产生压缩残余应力, 就象夹钳夹在这个区域上. 裂纹扩展进入这个塑性区后, 需要一个较大的外加应力才能使裂纹张开. 另一方面, 裂纹顶端的残余压应力使裂纹顶端承受的平均应力下降, 即循环载荷比减小. 过载比增大, 夹钳作用增强, 残余压应力相应增加而循环载荷比更低, 因而粗糙诱发闭合的机理随着过载比的提高而起着越来越明显的作用. 致使裂纹扩展速率进一步降低和门槛值的上升.

四、结 论

1. 拉伸型一次过载对裂纹扩展的门槛值的影响和过载比有关, P_0/P_{max} 在 1.4—2.2 之间, ΔK_{th}^0 与 P_0/P_{max} 呈线性关系提高.

2. 裂纹扩展速率的下降及门槛值的提高系塑性诱发闭合和粗糙诱发闭合起主导作用.

参 考 文 献

- 1 Jones R E. Eng Fract Mech, 1973; 5: 585
- 2 Matsuoka S, Tanaka K. Eng Fract Mech, 1978; 10: 515
- 3 Bathias C, Vancon M. Eng Fract Mech, 1978; 10: 409
- 4 邓蓉英, 于桂清, 李 禾, 金属学报, 1986; 22: A409
- 5 Elber W. ASTM, STP 486, 1971: 230
- 6 Schijve J. Rep 195, National Luchtvaart Laloratorium Amsterdam, 1960

EFFECT OF OVERLOAD ON FATIGUE CRACK PROPAGATION NEAR THRESHOLD

by DENG Rongying (Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

(Manuscript received 12 May, 1986; revised manuscript 22 August, 1986)

ABSTRACT

The effect of single tensile overload on crack propagation near the threshold in an austenite stainless steel has been investigated. The threshold value increases with the increase of overload ratio P_0/P_{max} as it is larger than 1.4. But the threshold value will not be effected by this ratio while it is less than 1.4. It was supposed that the reduction of crack propagation and increase of the threshold value arise primarily from crack tip closure, i.e. plasticity-induced and roughness-induced closure.