

用再结晶法研究超载对疲劳 裂纹扩展的效应

北京航空学院 杨秉宪

摘 要

本文用再结晶法测定了等幅循环载荷中施加超载后在裂纹尖端发生的高应变区内的塑性应变,求得了此区域的各参数与J积分、裂纹尖端张开位移CTOD及超载对疲劳裂纹扩展的延缓效应。实验结果表明,用再结晶法研究超载对裂纹扩展的延缓效应是一种很有效的方法。

一、引 言

在基本循环载荷 ΔK_1 中插入超载 ΔK_2 , 二者之比, $r = \Delta K_2 / \Delta K_1$, 称为超载比。一般当超载比 $r < 1.4$ 时, 超载对裂纹扩展速率影响很小, 微观结构也无多大变化, 这是实验证明了的。而在超载水平较高时, 往往进入了大范围塑性屈服, 并在裂纹尖端形成高应变区 (Intense strain region), 也称之为 Rice “D” 区^[1], 或过程区 (process zone)^[2], 在此区域发生微观断裂。已有一些学者用滑移线场理论或有限元法进行了计算, 但目前实验研究还很少。这里, 我们利用金属再结晶晶粒直径与所贮存的塑性应变有直接关系的性质来测定裂纹尖端高应变区的形状和当量塑性应变分布, 由此可求出高应变区参数与裂纹尖端张开位移 CTOD、J 积分以及超载引起的延缓效应的对应关系。

先进行疲劳裂纹扩展试验, 然后用同一试件进行再结晶法试验。

二、疲劳裂纹扩展试验方法

1. 试件

试件材料为结构钢 S15C, 其化学成分与机械性能分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 化学成分(%重量)

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.24	0.52	0.021	0.010

1983年8月26日收到。

表 2 机械性能
Table 2 Mechanical properties

σ_s (kgf/mm ²)	σ_b (kgf/mm ²)	E (kgf/mm ²)	$T. E$ (%)
40	61	2.1×10^4	40

使用 1CT 试件, 其形状和尺寸按 ASTM E-647 确定。试验机为 MTS 电液伺服疲劳试验机。

2. 试验方法

为了便于观察 ΔK_2 对 ΔK_1 的影响, 须保持 ΔK_1 恒定 (图 1 (b)), 由于 $\Delta K = \Delta P / B \sqrt{W} f(a/W)$, 其中 ΔP 为施加给试件的载荷变程, B 为试件厚度, W 为试件宽度, a 为裂纹长度。随着裂纹扩展, a 增大, ΔK 亦增大, 因此为了保持 ΔK_1 不变, 必须逐次减小 ΔP (图 1 (a)), 由计算机控制按载荷谱程序加载。当超载水平较高时, 很可能进入大范围屈服的弹塑性状态, 此时应使用 J 积分变程 ΔJ (图 1 (c)), 其超载比定义为 $r_i = \Delta J_2 / \Delta J_1$ 。

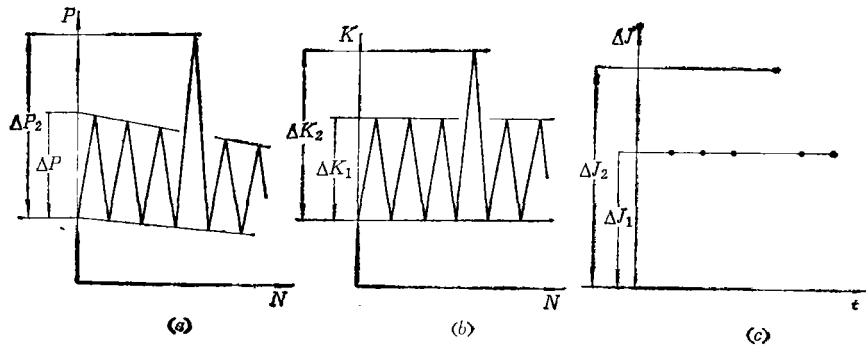


图 1 试验载荷谱示意图

Fig. 1 Schematic of load spectra

ΔJ 是由裂纹张开时所作的功来计算的, 由试验得到载荷-位移曲线, 按照 Clarke 的简化式^[3]计算

$$\Delta J = \frac{2U}{Bb} \left(\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2} \right) \quad (1)$$

$$\alpha = \left\{ \left(\frac{2a}{b} \right)^2 + 2 \left(\frac{2a}{b} \right) + 2 \right\}^{1/2} - \left(\frac{2a}{b} + 1 \right) \quad (2)$$

式中, U 为载荷-位移曲线下的面积; B 为试件厚度; b 为韧带宽度。

三、再结晶的试验方法

1. 再结晶法的概念

由于在适当的热处理温度和时间下得到的再结晶晶粒直径与材料的塑性应变量有

关, 可以预先求出材料本来具有这种再结晶晶粒直径和塑性应变量的关系, 然后可由再结晶晶粒直径的变化获得其它条件下的塑性应变量, 这就是用再结晶法研究裂纹尖端附近塑性应变的概念。这一概念曾被用来研究静载荷作用下裂纹尖端的高应变区^[4]。

2. 圆棒拉伸试件的再结晶试验

试件尺寸如图2所示。有三种拉伸速度: 1mm/min, 12.3mm/min, 61.6mm/min。由拉伸试验得到载荷-位移曲线。

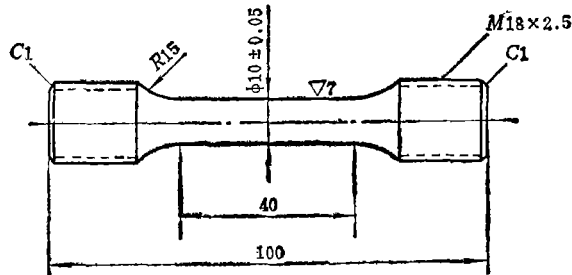


图2 拉伸试件

Fig. 2 Tensile specimen

拉伸试验后将试件进行 600°C、3 小时的再结晶处理, 并制成嵌镶片, 在光学显微镜下进行连续摄影、观察。

再结晶晶粒直径可由显微镜照片内的晶粒数 N_0 和再结晶区域面积 s 求出。假定晶粒是圆形, 则可求晶粒的平均直径 d , 若显微镜倍率为 m , 则晶粒直径为

$$d = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{4s}{\pi N_0}} \quad (3)$$

3. CT 试件的再结晶试验

试验方法和步骤与圆棒试验相同。为了观察在静载和循环载荷作用下的裂纹尖端附近的应变状态, 将试件中心部分切出, 嵌镶在环氧树脂中, 由表面开始按 0.7, 0.6, 0.6, 1.0, 1.5mm 切削, 直到厚度中央为止, 以便观察不同厚度的结晶组织。

四、试验结果与讨论

1. 疲劳裂纹扩展试验结果

保持 $\Delta J_1 = 0.43 \text{ kgf/mm}$ 恒定, 在五种超载比 $r_j = 2.47, 4.31, 21.97, 27.9, 50.71$ 下的试验结果如图3所示。图中 a_0 和 N_0 分别表示施加超载时的裂纹长度和循环数。 $r_j < 2.47$, 超载延缓效应很小, 随 r_j 增加, 延缓效应增大, 但各种超载比情况下的迟滞延缓 (delayed retardation) 形式是一样的。

2. 再结晶法试验结果

图4表示由圆棒拉伸试验得到的再结晶晶粒直径与当量塑性应变的关系。产生再结晶的临界当量塑性应变为 $\bar{\epsilon}_0 = 0.17$, 破断当量塑性应变为 $\bar{\epsilon}_f = 1.2$ 。

图5表示 $r_j = 27.9$ 时的 CT 试件表面附近和厚度中央部分的高应变区的再结晶照片。由照片可见, 高应变区不论在中央或表面附近都呈现一个双叶形的放射状形状。图

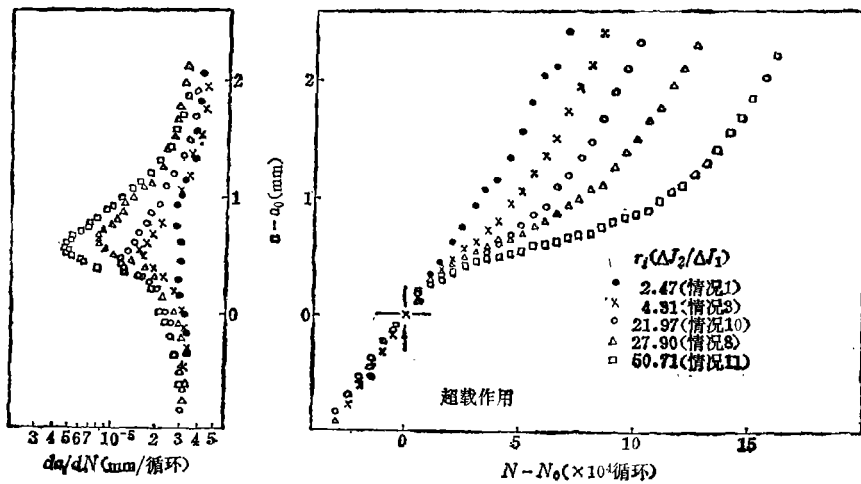


图 3 不同超载水平的裂纹扩展试验结果

Fig. 3 Experimental data of crack growth under different overloads

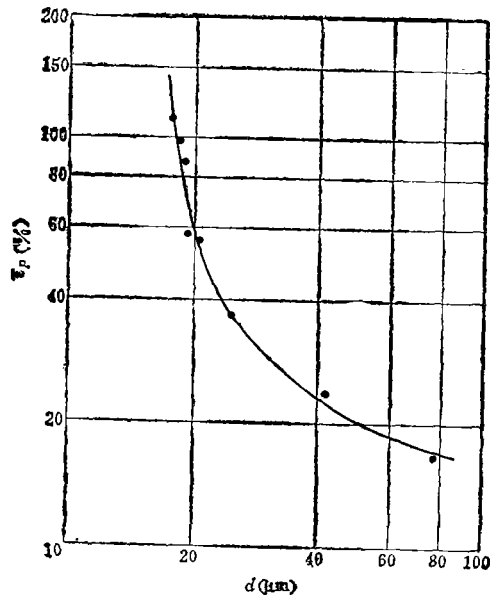


图 4 当量塑性应变与再结晶晶粒尺寸的关系

Fig. 4 Relationship between the equivalent plastic strain and the recrystallized grain size

6 则表示将高应变区加以模型化。裂纹尖端的张开位移 CTOD 的定义和 Rice 等人的定义相同, 即高应变区边界与裂纹面的两个交点之间的距离。图中 R_s 表示由钝化裂纹尖端到产生再结晶的临界当量塑性应变的距离。

图 7 表示 R_s 与 ΔJ_2 的关系, 图中实心圆圈为疲劳裂纹扩展过程中插入超载的试验结果, 空心圆圈为单调静载的试验结果。显然, 在循环载荷作用下, 施加超载前后都受到应力历程的影响, 塑性应变的大小与分布是与静载情况不同的, 但从试验结果来看,

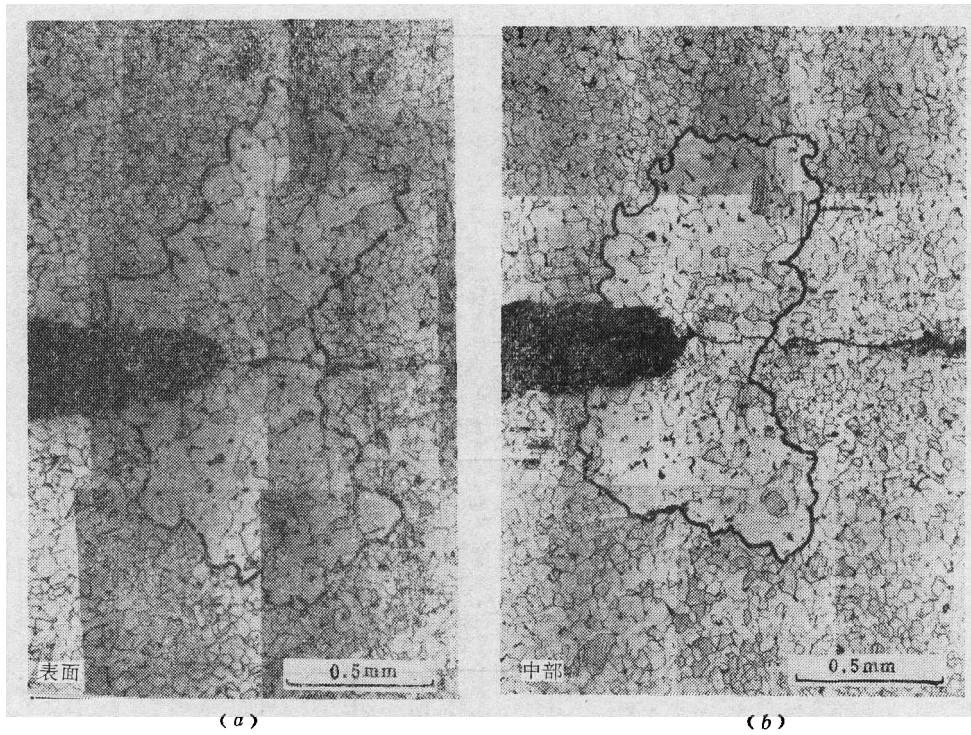


图5 典型的高应变区再结晶照片
(a) 表面 (b) 中央

Fig. 5 Typical microphotographs of recrystallization in the intense strain region
(a) surface (b) midsection

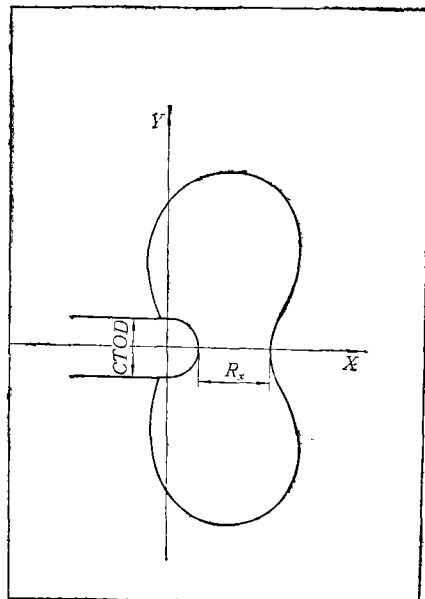


图6 高应变区及其参数

Fig. 6 Intense strain region with its parameters

载荷水平较高时, 二者的差别不大。ΔJ₂ 与 R_x 成线性关系, 可表达为

$$\Delta J_2 = 463.5 R_x \quad (4)$$

此系数大致等于 σ_{flow}, 与静载情况下的试验结果基本一致。但当载荷水平较低时, 则显示出静载与疲劳载荷的机理有很大差别。当静载 J 小于 1.15kgf/mm 时, 观察不到再结晶, 而当水平较低 ΔJ 恒定的疲劳试验时, 例如, ΔJ=0.40~0.66kgf/mm, 在裂纹边缘和裂纹尖端都观察到了再结晶, 说明由于应力历程的影响, 使塑性应变增大, 与静载情况下的塑性应变不同。

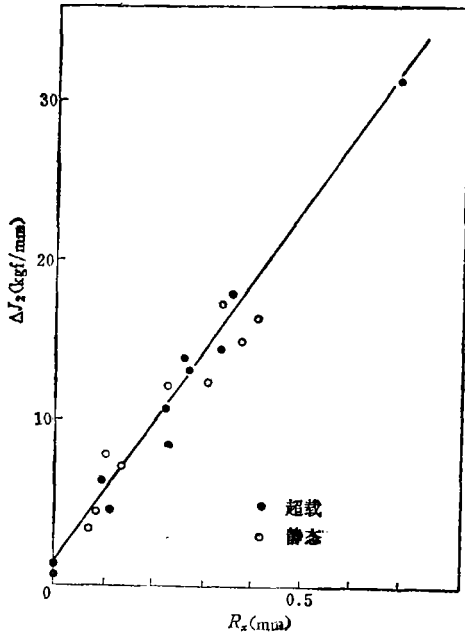


图 7 ΔJ₂ 与 R_x 的关系

Fig. 7 Variation of ΔJ₂ with R_x

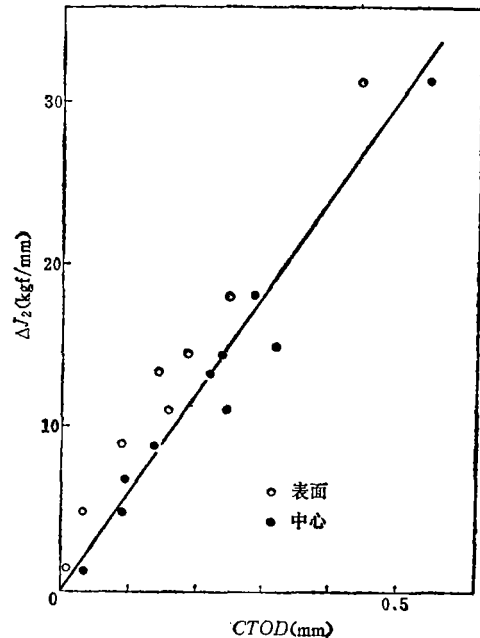


图 8 ΔJ₂ 与 CTOD 的关系

Fig. 8 Variation of ΔJ₂ with CTOD

图 8 表示 ΔJ₂ 与 CTOD 的关系, 图中实心圆圈表示板厚中央部分的 CTOD, 空心圆圈表示表面附近的 CTOD。图中直线表示静载试验得到的板厚中央部分的试验结果。循环载荷下板厚中央部分的 CTOD 与静载情况的试验结果差别不大。表面附近的 CTOD 比板厚中央部分的小。

在静载情况下得到的图 8 中的直线关系可用下式表达

$$CTOD = 0.66 \frac{J}{\sigma_r} \quad (5)$$

CTOD 与 R_x 的关系如图 9 所示。中央部分的 CTOD 和 R_x 都比表面附近的大一些, 但不论是中央或表面附近都具有下列关系

$$R_x = 1.12 CTOD \quad (6)$$

J. R. Rice 用滑移线场理论, 假定裂纹尖端钝化为半圆形, 在裂纹尖端形成的高应变区具有对数螺旋线形状, 此高应变区在裂纹线上的长度, 即 R_x 与 CTOD 的关系为

$$R_x = 1.9 CTOD \quad (7)$$

与本试验结果不同的是由于 Rice 假定的高应变区是对数螺旋线形状，而本试验得到的结果是双叶形，在裂纹线上向内收缩，故差别较大。

参考文献〔5〕对 HT60-I，HT60-II，A533B-I 三种试件在静载作用下的再结晶试验结果为

$$R_x = CTOD \quad (8)$$

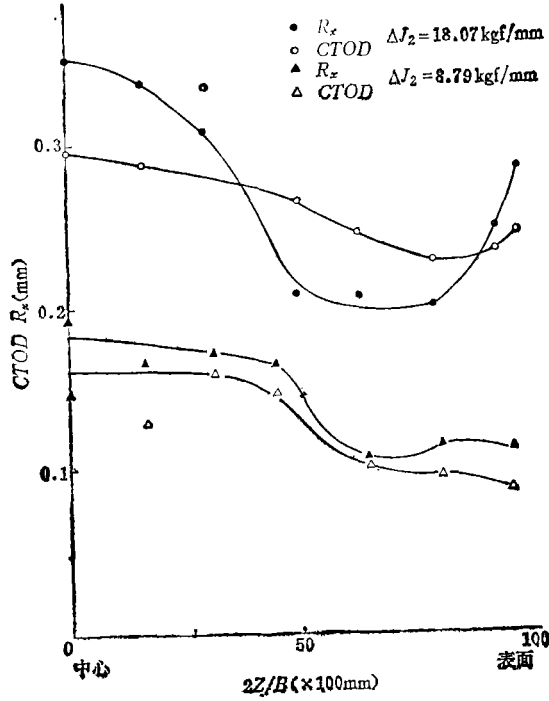


图 9 R_x 与 CTOD 的关系

Fig. 9 Variation of R_x with CTOD

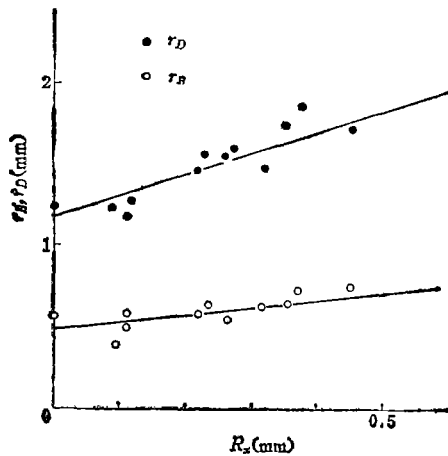


图 10 r_B, r_D 与 R_x 的关系

Fig. 10 Variation of r_B, r_D with R_x

本试验得到的结果稍大的原因是超载负荷前后受到了循环应力历程的影响。

图 10 表示表面附近的 R_x 值与超载影响区范围 r_D 及超载作用点至最大迟延点的距离 r_B 的关系。由试验结果可以认为 r_D , r_B 与 R_x 均为直线关系。故可由 R_x 的测试结果判定 r_D , r_B 值。

上述试验结果表明, 用再结晶法研究超载的延缓效应是一种很有效的方法。

参 考 文 献

- [1] Rice, J. R. et al., *Inelastic Behavior of Solids*, (1970) McGraw-Hill, p. 641.
- [2] Broberg, K. B., *On Stable Crack Extension*, Report 73-4. Division of Solid Mechanics, Lund Institute of Technology, (1973).
- [3] Clarke, G. A. et al., *J. Testing and Evaluation*, 7, (1979), p. 49.
- [4] Machida, K., Miyamoto, H. and Kikuchi, M., *The Study on the Intense Strain Region at the Crack Tip by Using the Recrystallization Technique*, Proceedings of the 1982 Joint Conf. on Exp. Mech., SESA, Vol.1, (1982), p. 89.
- [5] Shoji, T., *Metal Science*, May, (1976), p. 165.

A STUDY ON EFFECT OF AN OVERLOAD ON FATIGUE CRACK GROWTH WITH RECRYSTALLIZATION TECHNIQUE

Yang Bingxian

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

In order to study the mechanism of overload retardation effect, it is necessary to know the stress and strain distribution in the intense strain region at the crack tip under elasticplastic conditions. It has been proposed that at the crack tip exists a process zone in which the micro-fracture process takes place. However, the experimental verification has not appeared.

By using the recrystallization technique, the large plastic strain in the intense strain region at the crack tip has been measured for compact tension specimens when an overload was applied to them under constant amplitude cycling loads. The parameters in this region and the J-integral has been determined, and the retardation effect of the crack tip opening displacement(CTOD) and the overload on the fatigue crack growth has been found. The experiment results show that the recrystallization technique is a very useful method for evaluating the retardation effect of an overload on crack growth.