

晶粒尺寸对奥氏体不锈钢疲劳裂纹 低速扩展及其顶端塑性变形的影响

邓蓉英 于桂清 李 永

(中国科学院力学研究所)

以往的研究结果表明^[1-4], 晶粒尺寸不仅影响材料的门坎值, 而且也与常规机械性能特别是强度指标有一定的关系. 为了解材料的门坎值、晶粒尺寸和强度之间的关系, 本工作以奥氏体不锈钢为研究对象试图探索这一关系, 同时用浮凸法^[5]研究晶粒尺寸对门坎值和低速扩展中裂纹顶端塑性变形的影响.

一、试验方法

将含有15.5wt-%Cr和14.5wt-%Ni的不锈钢经不同温度固溶化热处理, 得到0.181, 0.143和0.044mm三种不同晶粒尺寸, 分别以A, B, C表示. 其力学性能见表1.

试验在2t高频疲劳试验机上进行, 加载频率为115Hz, 循环应力比为0.5. 为了对裂纹扩展进行连续金相观察, 试验经过特殊制备^[5]. 采用相衬显微镜(PCM), 进行研究.

表1 试验用钢的力学性能
Table 1 Mechanical properties of steel tested

Code	σ_b MPa	σ_s MPa	E MPa	δ %	ψ %	n
A	461	138	178000	67.6	80.4	0.45
B	465	140	190000	67.2	77.7	0.42
C	501	168	234000	73.0	82.6	0.39

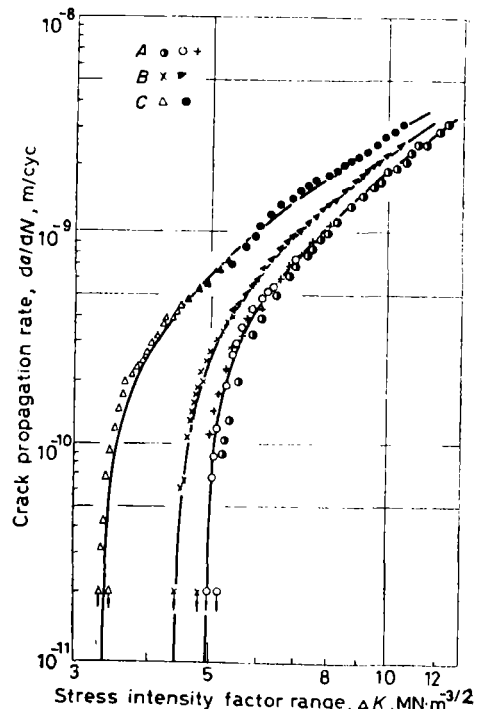


图1 晶粒尺寸对裂纹扩展速率的影响
Fig. 1 Effect of grain size on crack propagation rate

1984年11月19日收到初稿; 1985年10月30日收到修改稿.

经 10^7 次循环加载, 裂纹扩展长度不超过 0.2mm 时, 裂纹顶端应力强度因子范围 ΔK 定义为材料疲劳裂纹扩展的门槛值。采用载荷递减方法测定。

二、试验结果和分析

2.1 晶粒尺寸对疲劳裂纹扩展速率的影响

试验测得门槛值 ΔK_{th} 和晶粒尺寸 d 之间的关系为:

$$\Delta K_{th} = 4.9 + 0.275 \times 10^2 \sqrt{d} \quad (1)$$

相关系数 $r = 0.9788$ 。

在 da/dN 为 $2 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-6} \text{ mm/cyc}$ 范围内测定了三种晶粒尺寸试样的扩展速率 (图 1), 在低速扩展区明显地显示了晶粒尺寸对裂纹扩展速率的影响, 随着速率的增加, 影响越来越小而趋于一致。

进一步将材料的 ΔK_{th} 值、 d 和力学性能—屈服强度 σ_s 与硬化指数 n 整理, 得到无量纲准数

$$n \frac{\Delta K_{th}}{2\sigma_s \sqrt{d}} = \text{const} \quad (2)$$

其数据列于表 2。

表 2 裂纹起始扩展的无量纲准数
Table 2 Dimensionless criterion of crack starting propagation

Code	σ_s MPa	ΔK_{th} (av.) $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$	$\frac{1}{d^2}$ $\frac{1}{\text{m}^2}$	n	$n \left(\frac{\Delta K_{th}}{2\sigma_s \sqrt{d}} \right)$	Mean dimensionless criterion	Mean relative error %
A	138	5.01	0.0135	0.45	0.6060		1.05
B	140	4.70	0.0120	0.42	0.5888	0.5997	-1.81
C	168	3.44	0.0066	0.39	0.6043		0.76

表 3 门槛值条件下裂纹顶端在 X 和 Y 方向塑性区尺寸

Table 3 Plastic zone size of crack tip along lines of X and Y at threshold

Code	$2(R_Y)_{th}$ mm	$(R_X)_{th}$ mm	$2 \frac{R_Y}{R_X}$	$(A_Y)_{th}$	$(A_X)_{th}$
A	0.487	0.180	2.71	0.046	0.034
B	0.307	0.120	2.56	0.034	0.027
C	0.070	0.028	2.50	0.021	0.018

2.2 塑性区观察

在门槛值条件下裂纹顶端塑性区尺寸的测定结果列于表 3。 A_X 和 A_Y 分别表示 X 和 Y 方向单调塑性区尺寸与 $(K_{max}/\sigma_s)^2$ 的比例系数。裂纹顶端塑性变形特点是单滑移, 滑移线不贯穿整个晶粒 (图 2, 图版 A47), 同时, 塑性变形相对裂纹面是不对称和不连续的。个别情况在整个裂纹顶端无任何塑

性变形发生。

随着裂纹扩展的发展,大约在 $1.0\text{--}5.0\times 10^{-6}\text{mm/cyc}$ 范围内,三种晶粒尺寸的比例系数 A_r 分别为0.082, 0.080和0.074,不受晶粒尺寸的影响。但在门坎值下则不然。晶粒尺寸越大,比例系数也越大。

当 da/dN 小于 10^{-7}mm/cyc ,裂纹面两侧的塑性变形层和门坎值时一样,为不对称和不连续,多为单滑移(图3a,图版A47),且微区分布不均匀,微区的大小和晶粒尺寸同数量级,只有少数地方金相观察到滑移线,而在PCM下原来无滑移线的地方也观察到极细滑移线(图3b,图版A47)。

随裂纹顶端 ΔK 的增加,裂纹前缘的塑性变形逐渐变为连续,滑移线除密集外,多系滑移逐渐增多(图4a,图版A47)。同时明显地看到晶界和孪晶界对滑移的影响。遇到孪晶界滑移便改变其方向(图4b,图版A47)。在弹塑性区的分界处滑移线稀疏且多为单滑移。与文献[5]观察到的一样,裂纹顶端严重的塑性变形区是沿着与裂纹面成一定方向角内向两翼伸展,随着 ΔK 增加,裂纹顶端严重塑性变形区向更大的 θ 角发展,两翼之间夹角减小,三种晶粒尺寸有一样的趋势。

金相观察表明,裂纹扩展是穿晶的,极少数是沿晶的。裂纹扩展路径对孪晶界极为敏感。穿过孪晶界,裂纹改变方向扩展(图5a,图版A48)。

2.3 SEM观察

在 $2\times 10^{-8}\text{--}3\times 10^{-6}\text{mm/cyc}$ 范围内的低速扩展,三种晶粒尺寸断口形貌皆为穿晶小平面的周期解理和塑性撕裂(图6,图版A48)穿晶小平面的尺寸大约和晶粒尺寸相当。塑性撕裂地方有小的韧窝,同样,小平面取向对晶界和孪晶界也是敏感的(图5b,图版A48)。断口上微区(约晶粒尺寸大小)裂纹扩展方向和宏观扩展方向不同,小平面上有与微区扩展方向垂直的平行条纹。有的微区上还出现多系滑移的羽毛状的周期解理形貌。

三、结 语

裂纹在低速扩展区,奥氏体不锈钢晶粒尺寸对扩展速率影响大,晶粒尺寸大,扩展速率低,而门坎值高,同时裂纹顶端单调塑性区尺寸与 $(K_{max}/\sigma_s)^2$ 间的比例系数也增大。

由实验数据整理得到的裂纹起始扩展的无量纲准数,对三种晶粒尺寸的奥氏体不锈钢为一常数,即 $n\frac{\Delta K_{th}}{2\sigma_s\sqrt{d}}=0.6$ 。它的物理意义是,裂纹顶端循环塑性区尺寸与材料晶粒尺寸之比的平方根,达到某一常数时,裂纹便起始扩展,该常数与材料有关。

近门坎值的低速扩展主要是以穿晶剪切型周期解理和塑性撕裂进行的。

参 考 文 献

- 1 郑哲敏, 力学进展, 12 (1982), No 2, 133.
- 2 Nakai, Y.; Tanaka, K., *Eng. Fract. Mech.*, 15 (1981), 291.
- 3 Higo, Y.; Pickard, A. C.; Knott, J. F., *Met. Sci.*, 15 (1981), 233.
- 4 Robin, C.; Pluvinage, G., *Mater. Struct.*, 3 (1980), 287.
- 5 邓蓉英, 李禾, 于桂清, 金属学报, 20 (1984), A76.

EFFECT OF GRAIN SIZE ON SLOW FATIGUE CRACK
PROPAGATION AND PLASTIC DEFORMATION
ZONE OF CRACK TIP

by DENG Rongying; YU Guqing; LI He (Institute of Mechanics,
Academia Sinica, Beijing)
(Manuscript received 19 November, 1984; revised manuscript
30 October, 1985)

ABSTRACT

Fatigue crack propagation threshold and slow propagation near it were studied at the constant amplitude of the cyclic load ratio, $R=0.5$ for three-point bend specimen of the austenite stainless steel. The effect of grain size on the plastic deformation of crack tip at the threshold and at slow propagation near it were investigated using the relief method. The results show that the threshold value of crack propagation increases linearly with the square root of grain size and the rate was slower for larger grain sized material. The proportionality factors of plastic deformation zone size of crack tip and $(K_{max}/\sigma_s)^2$ for various grain size are different at the threshold. The larger the grain size, the larger is the proportionality factor. At the same time, the distinction of the plastic deformation development is the uncontinuous and unsymmetric as da/dN is from $2 \times 10^{-8} - 10^{-7}$ mm/cyc. A dimensionless criterion of crack starting propagation, $n(\Delta K_{th}/2\sigma_s d^{1/2})$ which is constant for various grain size was obtained after the results of the test were put in order. Its physical significance is that fatigue crack starts to propagate when the square root of the ratio of the cyclic plastic zone size and grain size equals 0.6. The metallographic and SEM observations show that the crack propagation near the threshold of austenite stainless steel proceeds on the transgranular shear mode cyclic cleavage and plasticity tear.



图 2 门坎值条件下裂纹顶端塑性变形
Fig. 2 Crack tip plastic deformation at threshold

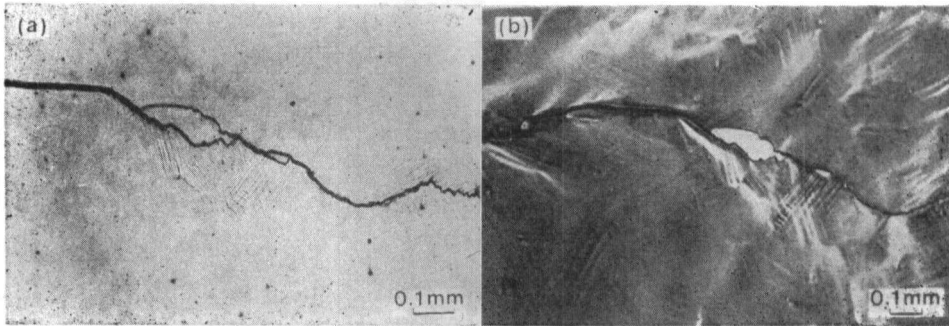


图 3 $da/dN < 10^{-7}$ mm/cyc 扩展中裂纹面两侧塑性变形
Fig. 3 Plastic deformation of crack surface both sides
as $da/dN < 10^{-7}$ mm/cyc
(a) under ordinary microscope; (b) under phase contrast microscope

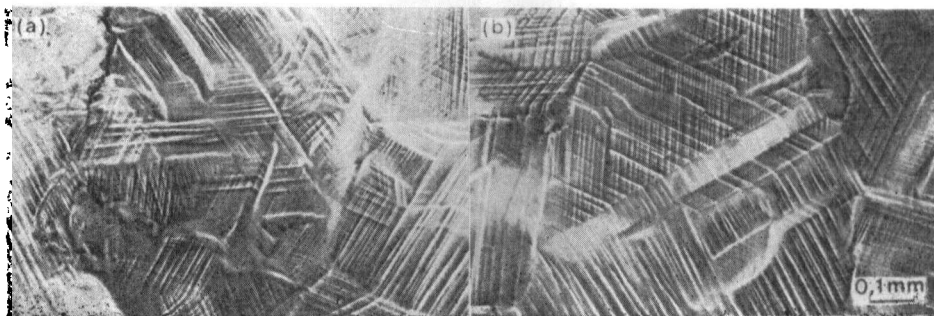


图 4 $\Delta K = 14.1 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1/2}$ 裂纹顶端附近的交叉滑移线 (a)
和滑移线通过孪晶的情况 (b)
Fig. 4 Cross slip line (a) and slip line through twin (b) near
crack tip $\Delta K = 14.1 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1/2}$

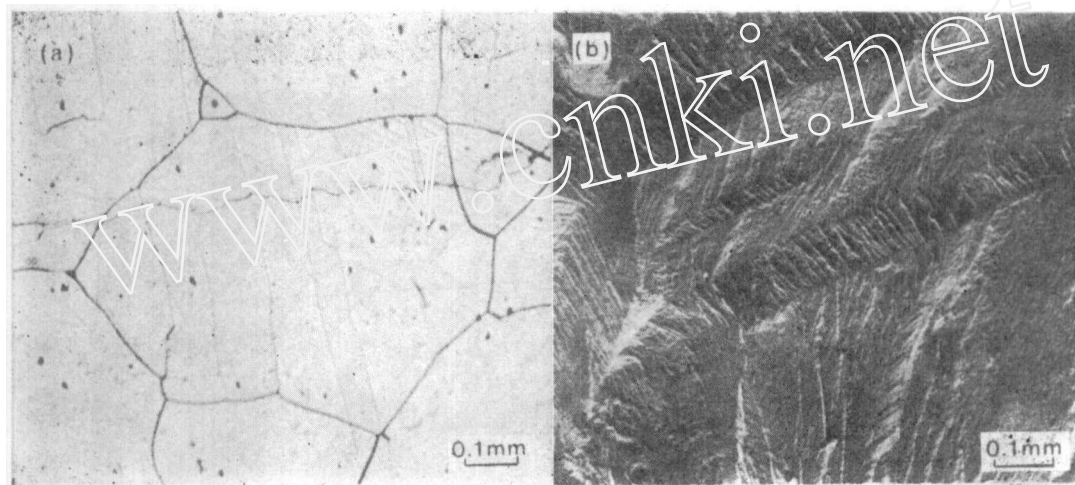


图 5 裂纹扩展通过孪晶
Fig. 5 Crack propagation through twin
(a) metallograph,
(b) fracture surface topograph



图 6 近门槛值的低速扩展的断口形貌，周期解理和塑性撕裂
Fig. 6 Slow propagation rate fracture topographic feature, cyclic cleavage and plasticity tear