

疲劳裂纹形成与扩展分界点研究

李金泉¹, 黄德武², 徐 丹³, 尚德广⁴

(1. 沈阳工业学院 机械工程分院, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳工业学院; 3. 沈阳市苏家屯区供电局; 4. 北京工业大学)

摘 要: 以缺口件为研究对象, 根据弹塑性理论着重介绍了确定缺口试样疲劳裂纹形成与扩展分界点的新方法, 经实验验证, 与实测值吻合良好。

关 键 词: 疲劳裂纹; 短裂纹; J 积分; 分界点

中图分类号: TG113 225 **文献标识码:** A

确定疲劳裂纹形成与扩展分界点是估算缺口件疲劳寿命的关键, 定量地确定出分界点的尺寸会大大地提高疲劳寿命估算精度, 本文介绍一种采用弹塑性理论定量分析缺口根部应力应变场确定长短裂纹分界点的方法

1 疲劳试验

选用正火 45 号钢作为试验材料, 热处理后材料的屈服强度为 377 MPa, 抗拉强度为 623 MPa, 延伸率为 26.36%。试样形状为 60 板状单边 V 形缺口, 厚度为 4 mm。疲劳试验在 shenk 电液伺服疲劳实验机上进行, 控制应力恒幅加载, 应力比取 $R = 0, R = 1$ 两种情况, 加载频率为 50 Hz, 试验环境为室温, 空气介质。用放大倍数为 100 的光学显微镜双面观测裂纹, 最小可见长度为 10 μm 。当裂纹扩展到成为长裂纹以后停止试验。取裂纹小于 5~8 mm 的数据来分析研究缺口裂纹扩展。

2 试验结果与分析

2.1 缺口根部裂纹扩展理论分析

由于试样缺口根部有较大的应力集中, 从而使缺口根部产生了塑性区和应力应变集中区, 如图 1。在循环载荷作用下, 缺口塑性区的塑性应变分布如图 1 所示。从中可以看出缺口根部的塑性应变随着距缺口根部的距离增加而急剧降低。在缺口场内, 缺口根部的塑性应变随着距缺口根部距离的增加而急剧降低的这种现象, 在缺口塑性区内表现的最为明显。

对于短裂纹的早期扩展, 目前较为成功的表征参量是 J 积分。根据 Dowling 的关系式, 并经 ho shide 等人^[1]的修正, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} J &= J_e + J_p \\ &= 2PF^2 \left[\frac{R^2}{2E} + f(n) \frac{RSE}{1+n} \right] a \quad (1) \end{aligned}$$

其中: F 为形状因子, a 为裂纹长度, $f(n)$ 为循环应变硬化指数 n 的函数, R S E 分别为裂纹尖端的局部应力应变, E 为弹性模量, 分别表示弹性和塑性状态下的 J 积分。

式(1)只表示在弹塑性状态下, 一般短裂纹的早期扩展的驱动力, 即只是疲劳裂纹形成阶段的表征参量, 而没能反映出短裂纹形成后进一步扩展进入线弹性阶段时缺口场内的裂纹扩展驱动力, 因此, 用缺口场内的应力范围分布

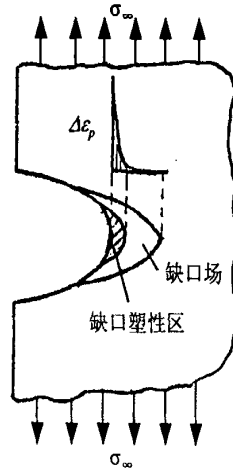


图1 缺口应力应变场及缺口根部塑性应变分布示意图

值和塑性应变分布值来分别代替式(1)中的裂纹尖端的局部应力 R 及局部应变 S , 此时 J 即为缺口场内的 J 分, 则 $\sqrt{J_{分} E}$ 可以描述裂纹形成后进入线弹性阶段时裂纹扩展的驱动力, 用该方法可确定裂纹形成与扩展的分界点, 经实验验证与实测值吻合良好。

图2a中曲线1为由式 $\sqrt{J_{分} E}$ 计算出的缺口场内循环积分分布所描述的裂纹扩展驱动力的分布曲线 $\sqrt{J_{分} E} - a$, 从中可以看出, 在循环塑性区内, 其扩展驱动力的分布值很大, 随着距缺口根部的距离增大而迅速下降, 超出循环塑性区以后, 下降幅度减少, 并逐渐回升, 最后以线性增大。这说明, 当裂纹尖端一开始位于塑性区之内时, 塑性应变对扩展驱动力有相当大的贡献, 此时裂纹有一些增大时, 其裂尖的塑性应变便急剧降低, 导致扩展驱动力降低, 从而会反映出裂纹扩展速率有下降的现象。当裂纹尖端长到一定的长度后, 此时裂纹扩展驱动力的分布值曲线呈线性, 即裂尖的塑性区应变很小, 扩展驱动力中以弹性占优, 塑性是很小的控制裂纹扩展的参量, 即开始向线弹性转换。

2.2 长短裂纹分界点的确定方法

缺口根部短裂纹的应力强度因子为^[2]

$$K_s = Ff \frac{K_s S}{2} \left[\left(1 + 2 \frac{a}{Q} \right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{a}{Q} \right)^{-3/2} \right] \sqrt{Pa} \quad (2)$$

其中: F 为形状因子, K_t 为理论应力集中系数, S 为名义应力幅, a 为从缺口根部算起的裂纹长度, Q 为缺口半径, f 为修正系数。把由式(2)得出的 $K_s 2a$ 关系曲线2与弹塑性驱动力 $\sqrt{J_{分} E} 2a$ 的分布曲线1绘到同一图中, 如图2a, 两曲线相交于点C后便重合在一起。由两条曲线的物理意义可知, C点对应的裂纹长度就是缺口长短裂纹的分界点, 也为缺口场尺寸的大小, 在裂纹长度小于C点对应的裂纹长度时, 其裂纹扩展速率由缺口场内的局部应力应变控

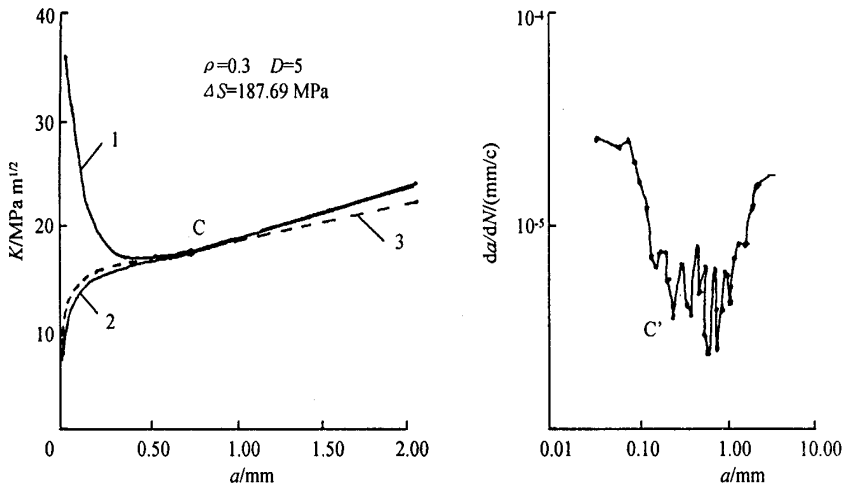
制; 当大于 C 点所对应的裂纹长度时, 其扩展速率由外场控制 实测短裂纹 da/dN $2a$ 曲线如图 2b, 可见预测值与实测值吻合良好, 其结果列于表 1 中

从表 1 中可以看出, 在同一缺口情况下, 随着载荷的增大, 分界点的尺寸增大, 即缺口场尺寸增大, 这说明缺口场的尺寸不仅仅由缺口几何形状决定, 而且与所加外载有关 这也说明缺口根部短裂纹的上界与所加外载有关, 外载大, 相应短裂纹的范围也大, 文献[3]将缺口场尺寸即短裂纹上界看成只与缺口几何形状有关是不确切的, 实际则要复杂得多.

为了验证本文所提出理论的可靠性, 即 $\sqrt{J_{分1} E}$ 在裂纹达到缺口场尺寸后的线弹性阶段是否能真实代表其裂纹扩展的驱动力, 现来计算真实 J 值 当缺口根部在外载荷作用下保持弹性时,

$$K = 1.12 \times \frac{1}{2} K_{t1} f \left[\left(1 + 2 \frac{a}{Q} \right)^{-1.62} + \left(1 + 2 \frac{a}{Q} \right)^{-3.62} \right] \quad (3)$$

其中各符号意义见式(2)中的说明, K 相当于缺口根部弹性应力集中系数的分布函数, 有了弹性应力集中系数的分布函数, 则由能量法可确定局部应力与局部应变, 其结果代入式(1)中, 即可求其 J , 结果见图 2a 中的虚线 3 (此线已换算成 $\sqrt{J_{1E}}$), 结果表明 $\sqrt{J_{1E}}$ 曲线与线弹性短裂纹应力强度因子曲线也相交于 C 点, 之后便以线性增大 说明本文确定缺口场的理论是可行的



(a) 理论曲线

(b) 实测 da/dN $2a$ 曲线

图 2 长短裂纹分界点的确定方法理论曲线与实测结果

3 结束语

本文介绍的确定缺口试样长短裂纹分界点的新方法, 其分界点与实测值吻合良好。

参考文献:

- [1] Dowling N E. Notched member fatigue life prediction combining crack initiation and propagation[J]. Fat Engng Mater Struet. 1979, (2): 1292138.
- [2] Katagawa, Takahashi. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage[C]. In Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, 1976, 6272631.
- [3] 姚为星. 疲劳裂纹形成寿命研究[J]. 机械工程学报, 1987, 23(4).

New Development on Studies of Dividing Point about Fatigue Crack Initiation and Propagation.

LI Jinquan¹, HUANG Dezu², Xu Dan³

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110016, China; 2. Shenyang Institute of Technology; 3. Bureau of Power Supply, Sujiatun District, Shenyang)

Abstract: The notch specimens are used as researching objects. A new method of determining the dividing point about fatigue crack initiation and propagation for the notch specimens is introduced according to elastic-plastic theory. It is coincident with measuring values by the test.

Key words: fatigue crack; short crack; J_2 integral; dividing point