

LD10cs薄板表面裂纹弹塑性 疲劳扩展速率实验技术研究

周镜昆 宋先邨 于起峰

(应用力学系)

摘 要 本文提出用有机颜料着色法检测表面裂纹疲劳扩展时的尺寸和形状,其结果表明,这是铝合金薄板表面裂纹测深行之有效的办法;且对表面裂纹弹塑性疲劳扩展中的其它问题,即韧带、背表面屈服、裂纹形状变化规律和裂纹穿透点进行了研究;最后用线弹簧模型处理了疲劳数据,并得出了一些结论。

一、前 言

表面裂纹是宇航压力容器最常见缺陷型式。对表面裂纹弹塑性疲劳扩展速率的研究,是一个急待解决的重要课题。但是,由于表面裂纹属于三维问题,因而至今未有精确理论解;表面裂纹疲劳扩展的情形更为复杂,迄今为止,主要依靠实验方法,由实验结果拟合出供工程应用的经验或半经验公式。实验中遇到的主要困难是表面裂纹测深技术没有得到有效解决。这就是本文所研究的主要问题。

二、实验方案论证

目前,表面裂纹测深,国外有电位法、超声波法、激光全息法等,由于精度不高或仪器及使用的复杂性,而无法推广使用。我们对目前使用较多的一些方法进行了试验和分析比较,认为:氧化留印法,操作工序繁琐,且加温氧化对扩展速率有影响;柔度位移法受人为技术所限,精度较差;变载荷勾线法使用较多,但勾线时疲劳周次的处理,存在较大误差,且LD10cs板材疲劳表面裂纹十分粗糙,勾线效果不明显。加之本实验为薄板试样,故勾线法无法使用。

相对而言,水彩着色法实验技术简单,留印比较清晰。然而进一步研究发现,水对

高强度铝合金有严重的应力腐蚀作用, 水含量的微小改变, 将引起铝合金疲劳扩展速率很大改变。在潮湿和干燥环境下, 其改变值可达一个数量级^[1]。为此, 我们进行多种试验, 以消除这种影响。首先, 使用有机性溶剂: 丙酮、汽油、煤油和酒精等, 溶解各种颜色的有机颜料进行着色。由于有机分子体积大, 所选用的溶剂和颜料的化学性能稳定, 其混合物既不能直接与裂尖裂纹面反应, 也不能自身放出氢原子渗入裂尖铝合金晶格间, 从而不对裂纹性质发生影响。通过实验对比, 最后选定汽油稀释各色油漆, 作为着色剂。它的优点是溶解性好, 渗透力强, 挥发快, 低温下染料不沉淀, 留印后痕迹清晰。我们将楔形加载的 LD10cs 裂纹试样浸泡在汽油加油漆的介质中, 一百天后取出并压断试件, 通过电镜扫描作断口分析, 证明此着色剂对 LD10cs 无应力腐蚀作用。

三、试验材料、设备和方法

1. 材料: LD10cs 铝合金板材, 试件尺寸和机械性能列表如下:

试件厚度 $B(\text{mm})$	σ_b (kgf/mm^2)	σ_s (kgf/mm^2)	E ($\times 10^3 \text{kgf}/\text{mm}^2$)	δ_s (%)	ψ (%)	试件宽度 $W(\text{mm})$	试件长度 $L(\text{mm})$	有效长度 $l(\text{mm})$
3.0	48.5	44.0	7.4	12.0	24.0	110	380	240
5.0	48.5	44.0	7.4	12.5	23.5	110	380	240
7.0	48.5	43.5	7.5	12.5	22.5	80	300	160

2. 设备

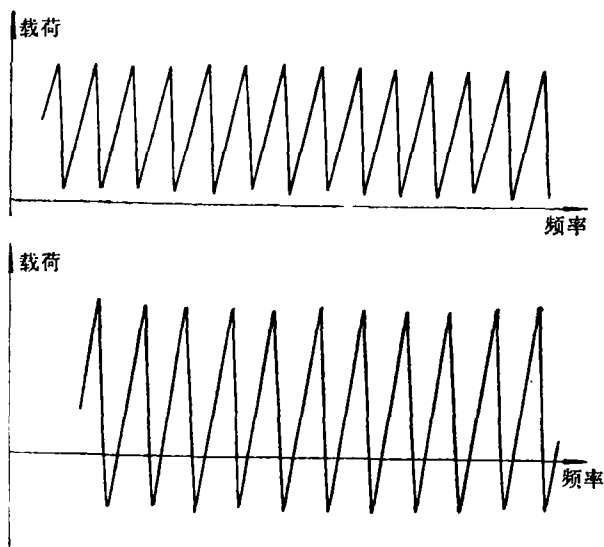


图 1 251 低频机载荷标定曲线

(1) 低频疲劳机：频率7~60周/分，载荷为正弦波，静载荷误差±1.0%，动载荷误差±3.0%，见图1，载荷误差均符合有关标准的规定。

(2) PW-2型高频疲劳机：预制初始疲劳裂纹。

(3) 静态应变仪，BE60-0.3AA应变片：测量背表面的应变值。

(4) 动态应变仪，位移传感器、X—Y记录仪：绘制裂纹面张开位—载荷曲线。

(5) 各色油漆和汽油。

3. 试验方法

有机颜料着色技术为：在选定的着色时刻，用玻璃棒将油漆搅拌均匀，蘸少许于瓷盘中，再滴入2—3滴汽油；待油漆充分溶解后，点蘸于裂纹两端；经若干次疲劳后停机卸载，挤出多余着剂，用脱脂棉拭净，十分钟后，即可继续疲劳。当气温较低时，着色后可用红外线灯照射或电热吹风，使之迅速干涸。要使得着色效果明显，须注意以下几点：一是着色总次数不超过六次，二是使用油漆的颜色由深至浅，三是着色时疲劳周次，随裂纹深度的增加而增加，四是沿裂纹两端着色，五是着色剂浓度宜稠些，最后两次适当稀些。经着色后的试件拉断后，断口上颜色的交界线，则为各次着色剂时刻裂纹形貌，断口如图1。



由于着色痕迹为一交界线，而不象勾线法那样为一窄带，故板厚相同时，可多次留印。如板厚为3.0mm和5.0mm薄板均能得到五个以上测点，而变载荷勾线法需8.0mm板才可得到五个点^[2]。此外，着色法人为因素较少，着色剂无应力腐蚀作用和不受环境影响，测深精度较高，其分辨力可达0.05mm。在工具显微镜下观测裂纹尺寸，裂纹前缘形状很清晰。我们认为本方法适用其它金属材料。

四、其它问题研究和测试

1. 用负压皮碗技术测表面裂纹穿透点

在压力容器中，表面裂纹在交变载荷作用下，通常以裂纹穿透背表面为破坏的标志。因此，测量穿透点疲劳周次，即疲劳寿命是很有意义的。目前，测量穿透点的方法有真空杯法^[3]和电阻丝片法^[4]。因试件背表面已贴测其应变的电阻应变片，故无法再贴测穿透点的应变片，而且这两种应变片的功用是不相同的。而真空杯法，装置复杂，且不宜于疲劳试验。为此，我们提出用负压皮碗法测表面裂纹疲劳扩展穿透点。具体做

法是：当试件背表面出现塑性凹坑时，用弹性较好的橡胶皮碗贴置于试件背表面或前表面，皮碗要复盖全部裂纹，将其内部空气排尽，再用真空泥密封好。此时，皮碗内部因负压而瘪凹，当裂纹穿透瞬间，皮碗内外压力趋于平衡，使皮碗鼓胀恢复原状。这样观察皮碗变形，即可记录下裂纹穿透点疲劳周次。皮碗大小可视裂纹长短而定，我们用“奶嘴”做负压皮碗效果很好。实践证明，负压皮碗是一种简单易行且可靠的测表面裂纹穿透点的方法，示意图如图3(a)。

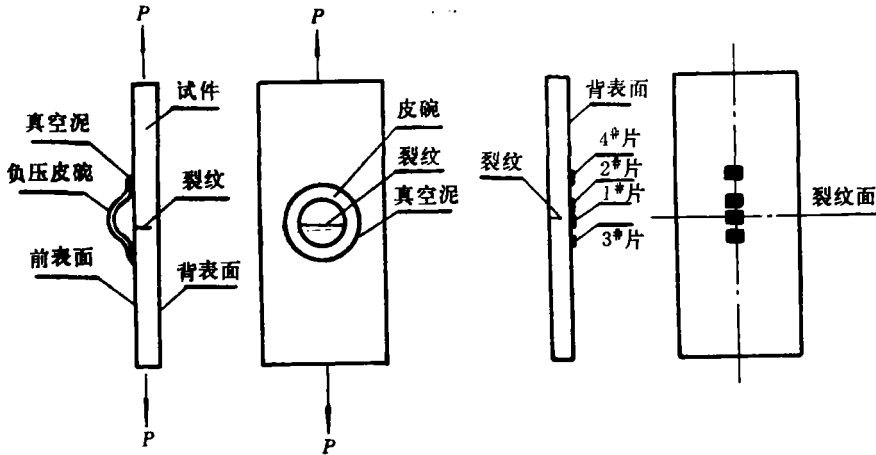


图 3(a)

图 3(b)

2. 背表面应变值测量及其变化情况

为研究背表面在疲劳裂纹扩展中何时何处产生屈服应变，疲劳试验前，将 BE60-0.3AA 微应变片分别粘贴在试件背表面距裂纹平面为 0、1、2、3mm 处，相应定为 1、2、3、4 号应变片，示意图如图 3(b)。在实验中，每次着色后，通过静态应变仪，取不同载荷测量了背表面应变值，图 4 和图 5 分别给出 3.0、5.0mm 板厚试件的应变值随载荷和裂纹深度变化的关系，图中曲线标号表示应变片标号，从图中得出以下结论：

(1) 当裂纹较浅时，背表面各点应变值相差不大，且与外载有较好的线性关系。

(2) 最大应变值位置随裂纹扩展，由离裂纹面最远点逐渐向裂纹面转移，与裂纹面约成 45° 角。

(3) 应变值变化幅度最大的点是裂纹平面上的那个点。它随裂纹的扩展，由开始时的远场应变值逐渐减小，甚至出现负值，而当裂纹很深时，可达到材料屈服应变值 1.5 ~ 2.0 倍。其原因是随着裂纹加深，试件横向截面受力几何中心向背表面偏移，以及深度方向和横向附加弯矩的变化所致。

(4) 一号片应变值迅速增大时，背表面出现明显的塑性凹坑（迭波）现象。此时，凹坑处应变值已超过塑性应变值，这与文 [5] 中提出的：“尽管背表面出现了明显凹坑，但应变值仍处于弹性应变范围内”。两者结论尚不一致。

3. 表面裂纹弹塑性疲劳扩展裂纹形状变化的规律

本实验考虑薄板及弹塑性的特点，对裂纹形状变化规律作简要描述。图 6、7 给出了

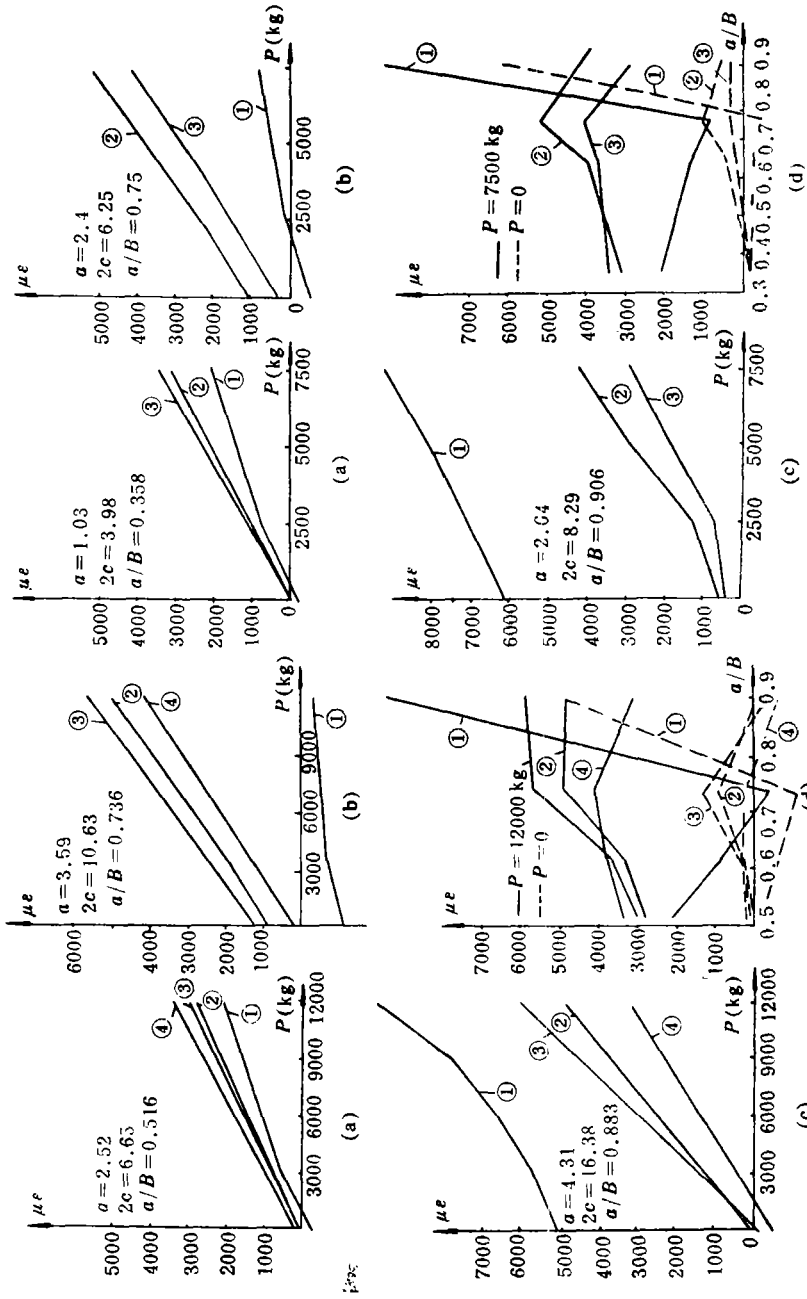


图 4 LD10cs-3-01表面裂纹背表面应力变化变化情况 ($B = 8\text{mm}$ 板)

图 5 LD10cs-05-20表面裂纹背表面应力变化变化情况 ($B = 5\text{mm}$ 板)

3mm、5mm 板厚表面裂纹形状变化曲线，从中可以看出：裂纹形状比 a/c ，当裂纹较浅时，其值增加（即所谓“圆化”阶段），当 $a/B \approx 0.6$ 时， a/c 达到极值约为 0.75 ± 0.1 ，其中 3mm 板之值偏小。当裂纹继续扩展时， a/c 又开始减小，进入明显的“扁化”过程，见裂纹形状变化图 8，当 $a/B > 0.9$ 时， $a/c \approx 0.6 \pm 0.1$ 。而文献[6]、[7]中的结果是随裂纹的加深， a/c 趋于一稳定值 0.75 ± 0.1 （亦即上述的极值），而未有“扁化”现象，文献[10]中裂纹形状变化规律表达式，对本实验数据也不适用。

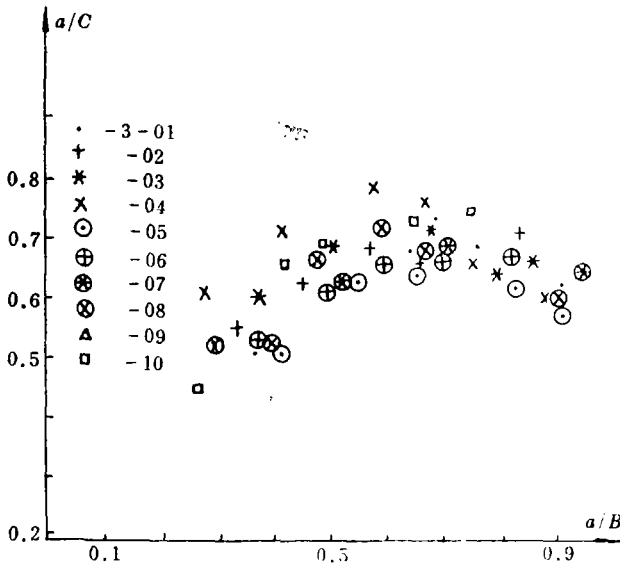


图 6 LD10cs3mm 板裂纹形状变化

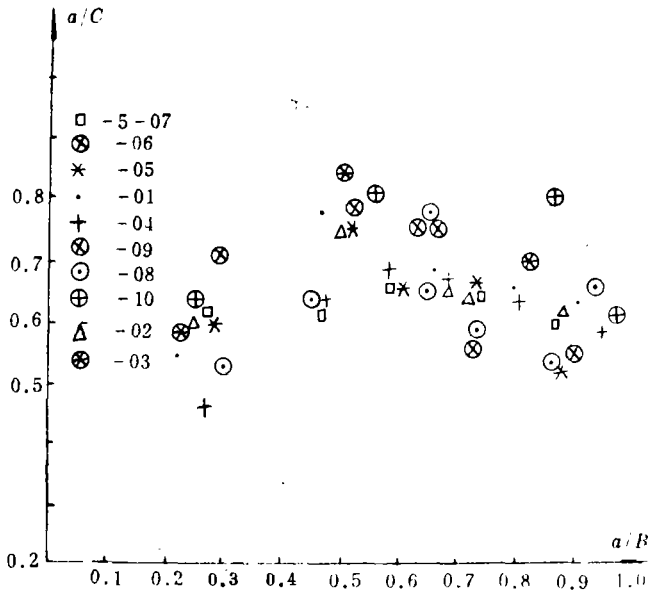


图 7 5mm 板裂纹形状变化

薄板表面裂纹形状的“圆化—扁化”的规律，反映了裂尖扩展驱动力与材料抗裂纹阻力之比的分配情况。“圆化”现象是由于裂纹开始扩展时，前缘大部分处于平面应变

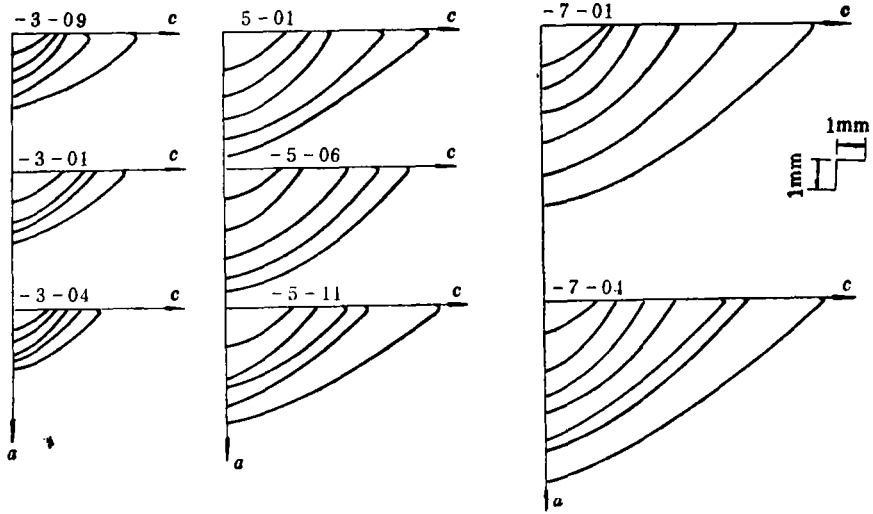


图 8 裂纹形状变化

受力状态，而后的“扁化”现象则是背表面进入塑性流动使阻力增加所致，而厚板“扁化”现象不明显。通过薄板疲劳试验结果，拟合出薄板拉伸疲劳表面裂纹形状规律的经验表达式：

$$a/c = -1.2 \left[a/B - 0.4 \left(\frac{2a_0}{B} + 0.5 \right) \left(1.3 - \frac{a_0}{2c_0} \right) \right]^2 + 0.61 \left(\frac{a_0}{c_0} + 0.5 \right) \left(1.3 - \frac{a_0}{B} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{a}{3B}}$$

式中： a_0 、 c_0 ——初始裂纹深度、半长， B ——试件厚度。

五、实验及其结果

试验基本情况列如下表：

板厚	项目 数据	Pf_{max} (kg)	R	f (周/分)	测背表面应变值的载荷(吨)	试件数 n	温度 $^{\circ}C$	湿度 %	备注
3.0mm		7500	0.2	38	0, 2.5, 5.0, 7.5	20	室温	70%~85%	
		7500	0.4	30	/	5			
		9000	0.1	28~30	0, 3.0, 6.0, 9.0	5			
		9000	0.2	30	/	5			
5.0mm		12000	0.1	12~15	3.0, 6.0, 9.0, 12.0	24			
		12000	0.4	22	/	5			
		10000	0.1	32	/	5			
7.0mm		12000	0.1	28	0, 4.0, 8.0, 12.0	10			
		12000	0.1	26	/	9			
		12000	0.4	27	/	5			
		10000	0.1	32	/	5			

1. 实验程序

- (1) 预制疲劳裂纹：其方法参见文献[8]；
- (2) 疲劳试验：用自行改装的25吨低频机；
- (3) 测背表面应变值：着色后停机测量；
- (4) 测裂纹嘴张开位移：着色后绘COD曲线；
- (5) 测裂纹穿透点：用负压皮碗测疲劳裂纹穿透点；
- (6) 测断口裂纹尺寸：用30倍工具显微镜测量着色留印的裂纹尺寸 $a_i, 2c_i$ 。

2. 数据处理方法

采用滑动三点二次式 ($n=1$ 的递增多项式) [9]，加初始端点 e 指数函数的方法处理 $a-N$ 曲线。这是因为本实验初始裂纹很小，需较大循环次数才测得一个点；尔后的测点较密。这种测点极不均匀，若仅用滑动三点二次式处理 $a-N$ 曲线，可能使初始的 da/dN 为负值 (见图9)，这与物理图象不符。为此本文修改初始端点两个值的求法 (见图10)，即初始两个测点用单调增函数 e 指数进行拟合。初始端点的 da/dN 值直接对 e 指数函数求导而得，第二个测点的 da/dN 值取 e 指数函数导数和滑动三点二次式导数的算术平均值。于是对于第二个测点，前者导数可能偏小，后者导数可能偏大，取二者平均值将减小误差，故各点 da/dN 值为：

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_i = \frac{(N_i - N_{i+1})a_{i-1}}{(N_{i-1} - N_i)(N_{i-1} - N_{i+1})} + \left(\frac{1}{N_i - N_{i-1}} + \frac{1}{N_i - N_{i+1}} \right) a_i + \frac{(N_i - N_{i-1})a_{i+1}}{(N_{i+1} - N_{i-1})(N_{i+1} - N_i)} \quad (1)$$

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_n = \frac{(N_n - N_{n-1})a_{n-2}}{(N_{n-2} - N_{n-1})(N_{n-2} - N_n)} + \frac{(N_n - N_{n-2})a_{n-1}}{(N_{n-1} - N_{n-2})(N_{n-1} - N_n)} + \left(\frac{1}{N_n - N_{n-2}} + \frac{1}{N_n - N_{n-1}} \right) \quad (2)$$

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_1 = c \cdot b \cdot e^{bN_1} \quad (3)$$

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_2 = \left(c \cdot b \cdot e^{bN_2} + \left. \frac{da}{dN} \right|_{2+} \right) / 2 \quad (4)$$

式中： $b = (\ln a_1 - \ln a_2) / (N_1 - N_2)$ ； $c = a_1 \times e^{-bN_1}$ ； a_i, N_i 为第三次测点的裂深、疲劳周

次； $\left. \frac{da}{dN} \right|_{2+}$ 为(1)式的计算值。

顺便指出， dc/dN 实验数据处理方法同 da/dN 。

3. 深度、长度方向的疲劳裂纹扩展速率

采用弹塑性线弹模型计算的形式强度因子范围 ΔK ，与裂纹扩展速率 da/dN 、 dc/dN 之间的关系，其曲线如图(11)、(12)、(13)、(14)所示，结果：深度方向为： $\left. \frac{da}{dN} \right|_{B=5} =$

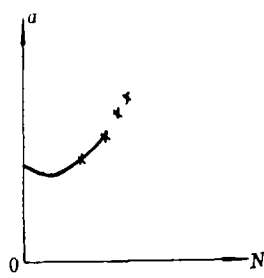


图 9 滑动三点二次式处理端值

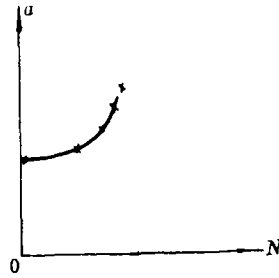


图 10 滑动三点二次式加初始端点e
指数函数处理端点值

$$0.5207 \times 10^{-7} (\Delta K_I)^{2.3759}, \left. \frac{da}{dN} \right|_{B=3} = 0.4906 \times 10^{-8} (\Delta K_I)^{1.8883}, \text{长度方向为: } \left. \frac{dc}{dN} \right|_{B=5}$$

$$= 0.7139 \times 10^{-8} \times (\Delta K_I)^{3.6189}, \left. \frac{dc}{dN} \right|_{B=3} = 0.3096 \times 10^{-8} \times (\Delta K_I)^{3.4119}.$$

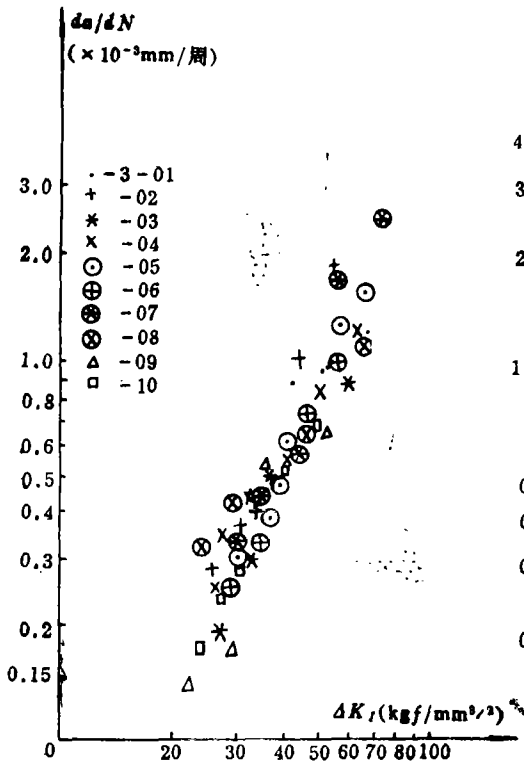


图 11 LD10cs3mm板 a 向疲劳扩展速率

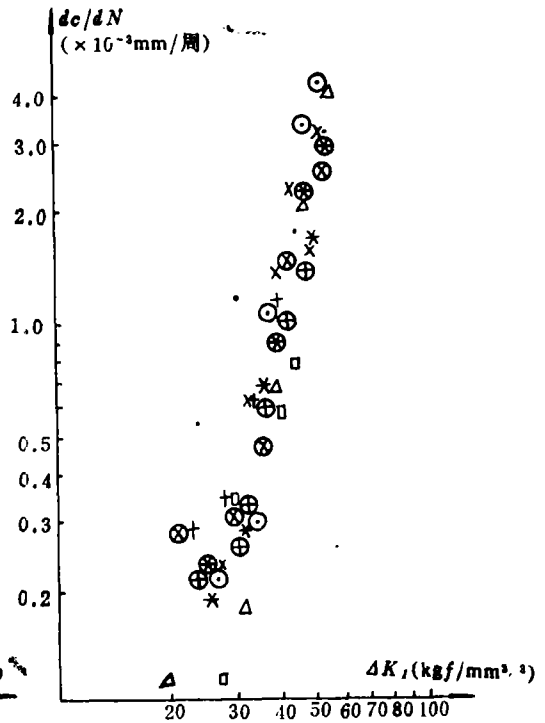


图 12 LD10cs3mm c 向疲劳扩展速率

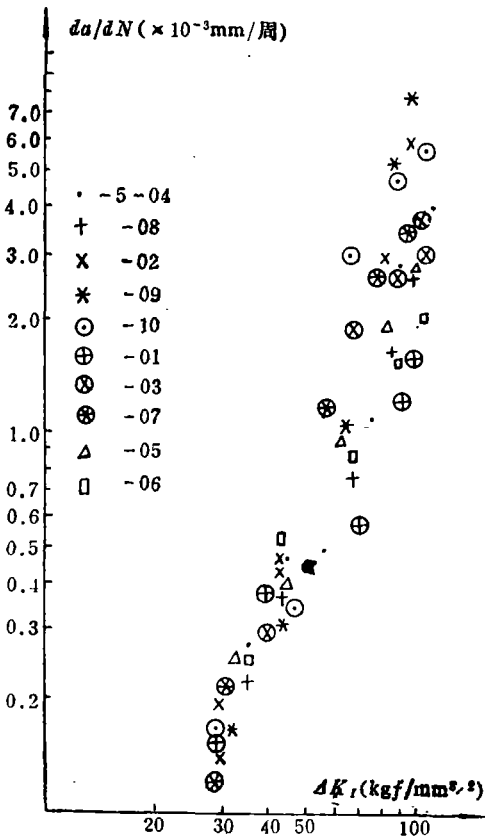


图 13 LD10cs5mm板疲劳扩展速率

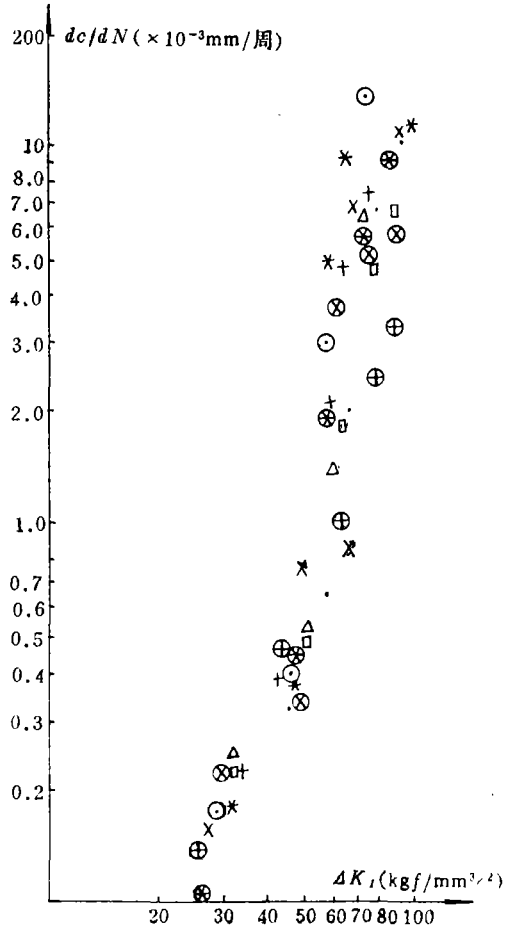


图 14 LD10cs5mm板疲劳扩展速率

六、结 论

1. LD10cs铝合金薄板表面裂纹弹塑性疲劳扩展实验中，采用汽油稀释各色油漆，所获得的着色剂，对其着色留印，较好地解决了表面裂纹测深问题。这种使用有机溶剂的着色留印法，成本低，简易可靠，其分辨力可达0.05mm。本方法对其它金属材料也具有实用价值。

2. 采用负压皮碗测金属薄板（或厚板）表面裂纹疲劳扩展穿透点（或泄漏点）所对应的疲劳周次，是行之有效的办法。

3. 金属薄板表面裂纹疲劳扩展实验中，在试件背表面贴微应变片测应变值，监测疲劳裂纹扩展过程中背表面迭加应力情况，对分析表面裂纹应力强度因子沿裂纹前缘各方向的变化，导致沿裂纹前缘各方向裂纹增长速率的变化是有益的。

4. 同种试样，载荷比 R 一定时，最大疲劳载荷 P_{fmax} 越大，则 da/dN 、 dc/dN 越大；或者 P_{fmax} 一定时，疲劳应力幅 $\Delta\sigma_f$ 越大（即减小 R ），则疲劳裂纹扩展速率 da/dN 、

dc/dN 越大。

5. LD10cs 铝合金疲劳裂纹扩展速率随加载频率的减小而增增, 在正常试验条件下, 频率效应不明显, 但随温度、湿度的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] R.W.赫次伯格著, 王仁等译, 工程材料的变形与断裂力学, p566~588.
- [2] 霍洪举, 秦红, 杨芳毓, 大连工学院学报, 第20卷增刊. 1981年, p107 114.
- [3] Brownl Kaufman, eds, Developments in Fracture mech test methods standardization, ASTMSTP 632(1977)
- [4] 王亨, 周镜昆, 解全陞, LD10cs薄板表面裂纹弹塑性断裂测试技术报告, 1981,7.
- [5] Philip. H.francis and Daoid L.Davidson Experiment characterization of yield induced by—surface flow, The surface crack; physical problems and Computational solutions.1972.
- [6] 杨芳毓, 王炎炎等中国力学学报, 1983年1期, p34~44.
- [7] 北京钢铁学院断裂组, 621所等航空科技HK78014(1978,7)。
- [8] 周镜昆, 解全陞, 王亨, 关于LD10cs 铝合金薄板表面裂纹预制方法的探讨, 宇航学会结构强度与环境工程专业委员会第二届年会论文集。
- [9] 欧阳辉, 张永奎, 表面裂纹疲劳扩展速率计算方法探讨, 理化检验物理分册, 19卷2期1983.p34.
- [10] Clark. W.G. Variability in Fatigue Crack Growth Rate Testing J of Testing and Evolution.No.3(1975)p454.

An Experimental Technique Research for Elastic-plastic Fatigue Progression Rate of Surface Crack in the Thin-plate of LD10cs Aluminium Alloy

Zhou Jingkun Shong Xinancun

Yu Qifeng

Abstract

In this paper a dyeing method using organic dye is presented to detect the dimension and shape of surface crack under fatigue progression. The results show that it is an effective method for detecting the depth of surface crack in Aluminium alloy thin-plate. Several other problems in elastic-plastic fatigue progression of surface crack, such as the yielding on back surface, the changing role of crack shape and the crack penetration points are studied. Finally the fatigue data are treated by line-spring model and some conclusions are drawn.