

# COD法在检测疲劳裂纹长度中的应用

丁传富 赵伟 顾明达

## 摘 要

本文描述了在计算机控制下,利用柔度技术在疲劳门槛值和裂纹扩展速率试验中,CT试样上自动检测疲劳裂纹长度的方法。对用目测法和COD法所测疲劳裂纹长度的试验结果进行了分析比较,讨论了引起误差的主要原因。

## 一、引 言

精确地测定疲劳裂纹长度的重要性在于裂纹长度是评定材料断裂力学性能的重要试验参数。目前通常使用的目测法虽然具有简单易行的特点,但对某些情况,如在腐蚀环境下就无法实现,对较厚试样,所测结果也不能准确地代表裂纹前缘的实际裂纹长度,而且劳动强度大,无法实现连续监测裂纹长度。用COD法检测疲劳裂纹长度可以弥补上述缺点。由于COD法是以模拟量输出,因而在实验过程中可以通过计算机控制,实现裂纹检测自动化。

## 二、COD法

COD法是利用裂纹张开位移规,以柔度等效理论为基础而建立起来的一种监测裂纹长度的方法。它最早应用于 $K_{Ic}$ 的测定,后来逐步应用于测定疲劳裂纹扩展速率。根据线弹性理论,带缺口试样在线弹性范围内施加负荷与裂纹张开位移之间呈线性关系。在试验过程中,通过计算机程序按给定的裂纹扩展增量,从A/D通道上采集若干来自载荷传感器和位移传感器的载荷P和位移V值,用线性回归方法,对采集的数据点进行拟合,计算出给定裂纹长度下相应的P—V曲线的斜率m。该值与弹性模量E和试样厚度B相乘,即

得到无量纲柔度值U。对于CT试样, a/w与弹性柔度之间的函数关系可以用下列多项式表示<sup>[1]</sup>。

$$a/w = C_0 + C_1U + C_2U^2 + C_3U^3 + C_4U^4 + C_5U^5 \quad (1)$$

式中:  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 和 $C_5$ 为多项式系数;

U—无量纲柔度值,  $U = EB\Delta/P$ ;

a—有效裂纹长度;

w—试样宽度。

如果式中 $C_0 \sim C_5$ 已知的话,则把计算的U值代入方程(1)中,即可导出a/w值,也就可以得到有效裂纹长度a。图1示出了该方法的方块示意图。根据以上描述的物理过程以及测定 $\Delta K_{Ic}$ 和da/dN试验方法的要求,用BA<sup>S</sup>I<sup>C</sup>语言和MTS试验语言编制出试验过程的计算机程序,即可实现疲劳裂纹长度的自动检测。有关计算机程序的详细描述参见文献[2]。

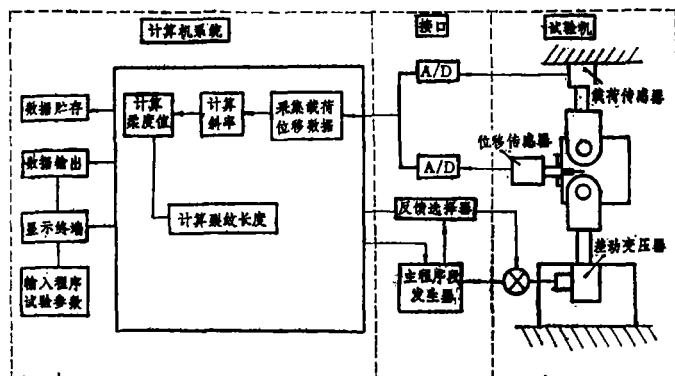


图1 COD法自动检测疲劳裂纹长度的方块示意图

### 三、柔度值标定

方程(1)中多项式系数是通过CT试样标定测得的试验数据确定的。对不同几何形状的CT试样,柔度与裂纹长度之间的关系是有差异的。在文献〔3,4〕中都提供了柔度与裂纹长度之间的关系。如果研究者通过试验验证,确信文献中提供的多项式系数代表你所使用试样的形状,那末这些方程中任何一种都可以适用。或者研究者有必要得到第一手柔度数据,以获得精确的裂纹长度,就必须用实验方法标定柔度与裂纹长度之间的关系。标定方法如下:

1.用线切割或用疲劳方法制造裂纹。

2.每产生一个裂纹长度间隔,用放大30倍的可移动式读数显微镜测量试样两表面的裂纹长度,取平均值。然后在静态下,一个循环拉伸载荷范围内按一定的 $\Delta P$ 增量,逐级连续加载,每增加一个 $\Delta P$ 值,从数字电压表上读出当时的负荷值和对应的位移值。这里测定的位移值是指裂纹咀处的张开位移。随着裂纹长度的变化,重复该过程,直至试样破断。如用疲劳方法制造裂纹的话,则用勾线法根据在试样断口上留下的疲劳线的痕迹各测定3~5个点,取平均值作为标定裂纹长度。标定范围应包括初始裂纹长度的柔度值。整个标定过程中,试样应始终处于线弹性状态,并且注意排除裂纹闭合效应的影响。

3.用最小二乘法拟合每个 $a/w$ 下对应的P-V数据,见图2。并由此计算出各组数据的斜率和相应的柔度值U。

4.用坐标纸绘制出 $a/w$ 对U的标定曲线,见图3。

5.确定多项式系数:由上述标定结果,将 $a/w$ 对U的一组数据输入求解高次多项式方程的计算机程序中进行曲线拟合,以计算出方程(1)中的各系数。为比较拟合效果,变换如下三种自变量的函数形式:

(1)以U本身为自变量;

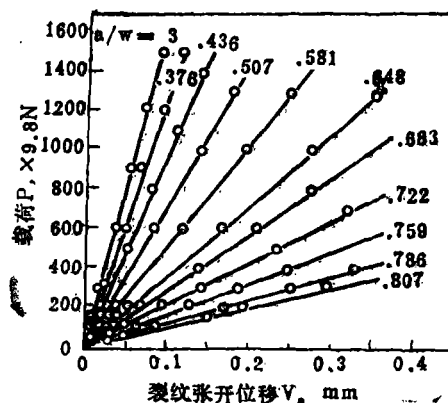


图2 不同 $a/w$ 下的P-V曲线

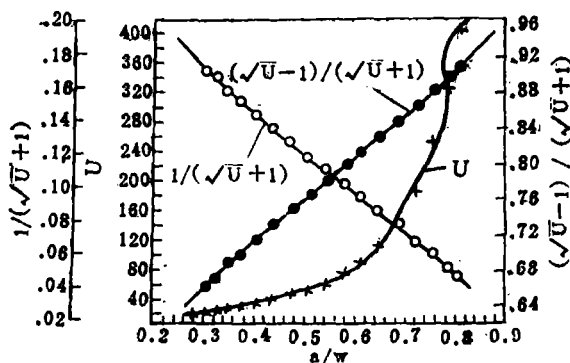


图3 CT试样柔度标定曲线

$$(2) f(U) = 1/(\sqrt{U}+1)^{[3]};$$

$$(3) f(U) = (\sqrt{U}-1)/(\sqrt{U}+1)^{[4]}.$$

拟合的效果用标定的目测值与拟合值之间的标准差S表示。拟合结果见图3。

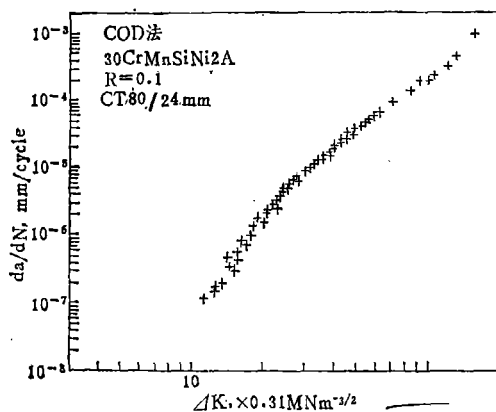
### 四、试验结果与分析

本文利用COD法完成了疲劳门槛值及 $da/dN$ 试验。所用位移规为MTS632.02C和MTS632.10C.01。前者用于室温空气环境下,后者既用于空气环境,也用于盐雾环境下。它们被安装在CT试样机械缺口处的上下刀口上。试验中采用按第二种自变量的函数形式拟合得到的多项式系数,计算有效裂纹长度如下: $C_0 = 0.930$ ,  $C_1 = -0.394$ ,  $C_2 = -75.39$ ,  $C_3 = 768.12$ ,  $C_4 = -3949.6$ ,  $C_5 = 8056.69$ 。为便于比较,同时使用目测法监测裂纹长度。

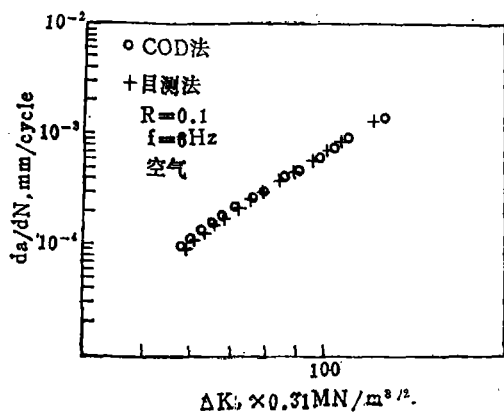
## 1. 试验结果

图4给出了三种材料的试验结果。其中图4a是在测定30CrMnSiNi2A钢疲劳门槛值和 $da/dN$ 的试验中,用COD法和目测法监测裂纹长度时获得的 $\Delta K$ 对 $da/dN$ 的关系曲线。而图4b和c分别代表Ti-6Al-4V和GC-4钢在恒幅裂纹扩展速率试验中,在同一试件上用两种裂纹检测方法所获得的 $\Delta K$ 对 $da/dN$ 的关系曲线。

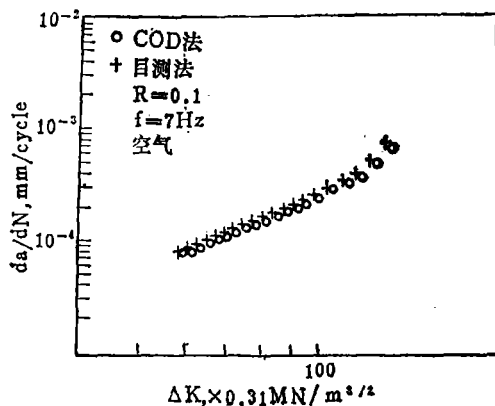
由图表明,用两种裂纹检测方法所获得的 $\Delta K$ 对 $da/dN$ 的关系曲线相当吻合。在同样条件下,多个数据点之间比较稳定,就门槛值而言,几个疲劳门槛值数据之间的偏差不大于3%。对Ti-6Al-4V和GC-4钢在盐雾腐蚀环境下,用同样的腐蚀位移规也得到了令人满意的试验结果。



(a) 30CrMnSiNi2A钢



(b) Ti-6Al-4V



(c) GC-4钢

图4  $\Delta K$ 对 $da/dN$ 的关系曲线

## 2. 两种检测方法的比较

图5给出了用COD法和目测法所测裂纹长度随循环次数 $N$ 增加的一个实例。由图看出,用COD法所测裂纹长度大都比目测法长。这是因为用COD法所测裂纹长度反映了裂纹前缘的变化,其值等效于平直的裂纹长度。而目测法检测的裂纹长度仅代表试样表面的平均值。因此,两者所测裂纹长度相当吻合。由计算表明,COD法与目测法之间所测裂纹长度的标准差大都在0.65~0.35之间。

在稳定性方面,COD法可以与目测法相等。表1列出了在同一裂纹长度下,用COD法20次重复测量的结果。由表中实测数据表明,20次重复测量的最大波动范围为0.05mm。试验证明,在疲劳门槛值试验中,采用0.25mm裂纹扩展增量,用COD法检测裂纹长度时,完全可以得到稳定的裂纹扩展速率和疲劳门槛值,如图4a所示。

由以上分析表明,在计算机控制下用COD法检测裂纹长度,不仅具有满意的测量精度和稳定性,而且可以充分满足 $\Delta K_{th}$ 和 $da/dN$ 试验方法的要求。同时还可以简化目测法时的繁琐操作,节省时间,并可自动连续监测裂纹长度,无需人工干预,并可定期打印输出检测结果。这一点特别适用于高温环境和腐蚀介质环境下的试验。

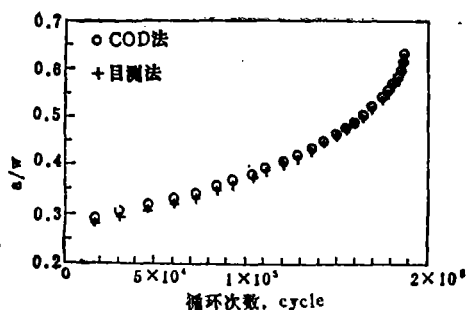


图5 COD法与目测法所测裂纹长度的比较

表 1 COD法20次重复测量的结果(mm)

19.6675	19.6472	19.6331	19.6436	19.6737
19.6569	19.6509	19.6328	19.6684	19.6319
19.6656	19.634	19.6367	19.6512	19.6399
19.6386	19.6335	19.6236	19.6679	19.6609

### 3. 误差来源分析

经验表明, 在计算机控制下, 用COD法检测时引起裂纹长度计算误差的主要来源可能有: 多项式系数的拟合精度、位移规的安装位置、采样速率、弹性模量及闭合效应等。

多项式系数的拟合精度不仅与柔度值的本身标定精度有关(如标定的数据点个数, 仪器本身精度), 而且与拟合时多项式中自变量的形式、 $a/w$ 的比值范围和方程(1)的阶数有关。一般地说, 在较窄的  $a/w$  范围内, 有足够的标定点, 采用上述第二、三两种自变量形式以及在方程(1)阶数取五次的情况下, 可获得最佳的拟合效果。例如, 三种自变量函数形式的拟合结果表明, 第一种形式拟合精度较差, 标准差  $S=0.6$ ; 第二、三两种形式,  $S=0.13 \sim 0.3$ 。就曲线的分布形式看, 对第一种形式, 当  $a/w > 0.5$  时, 拟合曲线呈非线性关系; 对第二、三两种形式, 在较宽的  $a/w$  范围内, 曲线表现出极好的相关性。这一点在实际使用中也得到了证实。

裂纹闭合效应的影响是一个不可忽视的重要因素, 特别是对闭合效应严重的材料。由于试验过程中裂纹闭合效应的存在, 在  $P-V$  曲线

上就会出现非线性区, 如图6所示。由于非线性区直接影响  $P-V$  曲线的拟合精度, 即  $m$  值, 而且试验过程中裂纹张开载荷的大小又随材料、厚度、应力比及裂纹长度而变化, 对某些材料如铝合金来说, 往往是一个不定值, 因此在计算斜率  $m$  时, 必须注意排除非线性区的影响。经验表明, 对闭合效应不明显的高强钢试样, 当应力比  $R < 0.25$  时, 一般应取大于最大载荷25%的采样数据点; 对闭合效应明显的, 应根据裂纹张开载荷的大小确定。文献〔5〕中为了排除闭合效应的影响, 对公式(1)的  $U$  值修改为如下表达式后取得了较好的效果。

$$U = BE \frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{V_{n+1} - V_{n-1}}{P_{n+1} - P_{n-1}} \cdot \frac{V_{n-1}}{V_{n+1}} \cdot EB$$

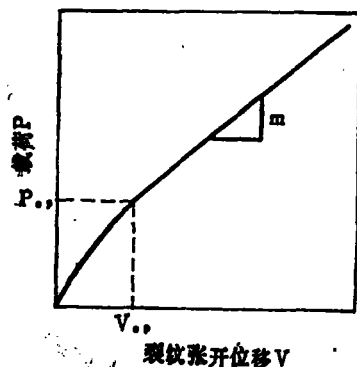


图6 裂纹闭合效应对  $P-V$  曲线的影响

此外, 计算斜率时应有足够的载荷位移数据点, 而且应尽量使这些点在一个或多个循环加载范围内均匀分布, 因此, 选择合适的采样速率是很重要的。为获得稳定的柔度值, 一般应取多个相继斜率的平均值作为计算值, 以清除某些瞬间波动所引起的计算误差。另外, 弹性模量也是一个重要的误差来源。因此,  $E$  值不应取手册中的参考值, 而应取被试验材料的实测值。

总之, 通过在疲劳门槛值试验及在室温空气和盐雾环境下的疲劳裂纹扩展速率试验中的应用考察表明, 在计算机控制下采用COD法检测裂纹长度, 可以获得令人满意的实验结果。  
(下转第30页)

中的问题更为方便可靠。首先,由上节讨论可知,只有预裂纹试样的性能指标 $K_{Ic}$ 与除氢时间成直线关系。根据直线可以直接用除氢时间控制材料的氢脆倾向;其次,应用 $K_{Ic}$ 可以得到有用的结论,现以本文前言中的活塞杆故障为例。

活塞杆是焊接件,裂纹均出现在焊缝附近。

对于工程上常见的表面半椭圆浅裂纹,其应力强度因子表达式为<sup>[5]</sup>:

$$K_I = 1.1\sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} = 1.95\sigma \sqrt{\frac{a}{Q}}$$

$$Q = \Phi^2 - 0.212 \left( \frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left( \sin^2 \varphi + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \varphi \right)^{1/2} d\varphi$$

式中 $\Phi$ 为第二类椭圆积分,其值与椭圆轴比 $a/c$ 有关。当 $c \gg a$ 时 $a/c \rightarrow 0$   $\Phi \rightarrow 1$

$$Q = 1 - 0.212 \left( \frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2$$

焊缝化学成分与基体化学成分相差较大,活塞杆淬火时焊缝附近可能因组织转变不一致而产生较大的残余应力。设淬火后焊缝附近的表面残余拉应力为2569MPa(工厂实测数据),取 $\sigma_s = 1500$ MPa,  $K_{Ic} = 2382$  MN/m<sup>3/2</sup>(图5),代入上式可得

$$a_c = \left( \frac{K_{Ic}}{1.95\sigma} \right)^2 \cdot \left[ 1 - 0.212 \left( \frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2 \right]$$

$$\approx 0.21 \text{ mm}$$

即深为0.21mm的表面裂纹即能引起开裂,而这样小的裂纹探伤时难以检测出来。由于焊接缺陷很可能造成此类小裂纹,因此,根据 $K_{Ic}$ 得出的结论可以解释活塞杆裂纹故障。

最后,预裂纹试样所需的试验机吨位低,壁厚为20mm的试样在3吨持久试验机上即可加载到接近 $K_{Ic}$ ,而本文中的缺口拉伸试样经5小时除氢后的断裂载荷已超过5吨,光滑试样的缓慢拉伸则要用10吨的拉力试验机。

## 五、结 论

1. 预裂纹紧凑拉伸试样的静载持久试验适宜研究高强度钢经含氢气氛保护加热后的氢脆问题。

2. 可以考虑用除氢时间代替氢含量作为处理上述氢脆问题的参量。

附记:本工作曾得到袁昌言、王广生、袁新泉等同志的大力支持及热情帮助,笔者对此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 张兴华, 高强度钢在甲醇裂解气氛中加热时产生氢脆的特征和防止措施, 沈阳松陵机械公司科技资料, 1982年。
- [2] Gerberich, W.W. et al, AIME 1974, P.77.
- [3] Johnson, H.H. et al, AIME, 1980, P.117.
- [4] Johnson, E.W. et al, Trans. AIME, 1960, P.1104.
- [5] 褚武扬, 断裂力学基础, 科学出版社, 1979年, P.283.



(上接第39页)

在精确的柔度标定和合理选择参数的前提下,该方法不仅具有较满意的测量精度和良好的稳定性,而且与目测法相比具有操作简单、省时和连续自动监控的特点。

## 参 考 文 献

- [1] Saxena, A., Hudar, S.J., Jr., International Journal of Fracture, 14(1978), No.5, 453~468.
- [2] 丁传富, 赵伟, 顾明达, 理化检验, (1986).
- [3] Donald, J.K., Schmidt, D.W., JTEVA 8(1980), No.1, 19~24.
- [4] Saxena, A., et al, JTEVA, 6(1978), No.3, 167~174.
- [5] Kaisand, L.R., Lefort, P., ASTM STP 613, (1976), pp.142,