# 柔度方程在COD 法测量疲劳裂纹 长度中的应用

牛康民 陈美英 胡元凯

(北京航空材料研究所)

摘要 简介了 COD 技术测量裂纹长度的理论标定式。通过一套高精度的柔度 测量系统,对GC4 高强钢的两种热处理制度的 CT 试样进行了裂纹测量标定。调 整柔度——裂纹表达式中的弹性模量E',获得了高精度的实验柔度——裂纹(即 BE'V/P-a/W)标定曲线。由实验观察提出了对 BEV/P 取对数的多项式标定函 数,它比广为采用的以1/[(BEV/P)<sup>1/2</sup>+1]为项的多项式简单,无论是与理论 计算 值还是与实验值进行对比,前者均优于后者。

1 e . .

关键词 COD,疲劳裂纹,柔度测量。

1 引言

应用于金属材料疲劳断裂测试的裂纹监测方法有多种<sup>[1,3]</sup>.除直接的目测法外,目前广 泛使用的有裂纹嘴张开位移法(COD法)<sup>[3-6]</sup>和电位法(DC和AC法)<sup>[6-8]</sup>.由于现代电 子技术的进步,使得这两种间接的测裂纹方法具备了连续长时、准确可靠,便于实现自动化 检测和控制,能够适应多种环境的突出优点。在特殊环境下,COD法和电位法适用的环境 也有所不同。例如电位法在高温以及真空等条件下应用很好,但在湿气或液态介质下电位法 需要考虑对导电介质的修正,并有可能产生电化学方面的影响。COD法则相反在,高温或真 空条件下难度较大,而便于应用在气态或液态环境下。另外由于存在着裂纹面的氧化(除高 真空外),电位法似乎不宜用来测量裂纹闭合效应,COD法则能较真实的测量裂纹闭合 行为。在美国海军试验室制定的《海水介质恒载幅疲劳裂纹扩展速率标准试验方法》<sup>[9]</sup>中,曾 明确提出在液态腐蚀条件下推荐采用 COD 裂纹测量技术。本文着重讨论 COD 法 在 CT 试 样上的应用。

1987年11月15日收到。

## 2 COD 法理论标定简介

COD 法又称柔度法.对于给定裂纹长度 a 的线弹性体,载荷 P 和裂纹面上确定位置 的 张开位移 V 成线性关系,直线的斜率  $\Delta V/\Delta P$  即为试样体的柔度。对于固定的 试 样 型 式, 通过测量各个不同裂纹长度下的柔度,可准确的得到 V/P - a关系.对同种材 料 而 言,相 同试样的 V/P - a关系是不变的.若根据线弹性理论将该关系无量纲化,即变换为 BEV/P- a/W,此处 B为试样厚度, E为弹性模量, W为试样特征宽度,则这个关系将 适 用 于 所 有成比例的试样,例如所有的标准 CT 试样等。通过理论计算可以得 出 各 类 试 样 的 无 量 纲 BEV/P - a/W表达式。

对于中心裂纹的 CCT 试样早在 1972 年就由 Eftis 和 Liebowitz 得到了解析式[1º]

 $\frac{BEV}{P} = 2 \cdot \left[ \frac{2}{\pi (Y/W)} \cosh^{-1} \frac{\cosh(\pi Y/W)}{\cos(\pi a/W)} - \frac{1+\nu}{\left[ 1 + \frac{\sin^2(\pi a/W)}{\sin^2(\pi Y/W)} \right]^{1/2}} + \nu \right] \times \frac{Y}{W} \left( \frac{\pi a}{W} \csc \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$ 

这里Y是裂纹对称线上的半规距长, "是 波松比.该式适用范围 为  $0 \le a/W \le 0.8$ ,  $Y/W \le 0.5$ .在此范围内 Newman(1976)采用边界配位法计算的结果与之符合的很好。 Newman 用 同种方法还计算了 CT 试样在  $0.2 \le a/W \le 0.8$ . WOL 试 样 在  $0.2 \le a/W \le 0.75$  范围 内, 裂纹面上不同位置的柔度。这个计算结果 1978 年为 Sax.na 和 Hudak<sup>1103</sup>采用, 他 们 结 合 Wilson 的深裂纹应力强度因子关系式将适用范围拓宽至  $0.2 \le a/W \le 0.975$ . 进而将柔度—裂纹关系拟合成了几个实用的多项表达式, 并从试验上进行验证, 此后这些表达式为许多研究人员所采用。下面是其中一个最常用的式子:

 $a/W = 1.0010 - 4.6695u_x + 18.460u_x^2 - 236.82u_x^3 + 1214.9u_x^4 - 2143.6u_x^3$ 

$$u_{s} = \frac{1}{\left(\frac{BEV}{P}\right)^{1/2}} + 1 \tag{2}$$

此式中的V是指试样前表面裂纹嘴处的张开位移。最近 Kapp<sup>[11]</sup>、Jablonski<sup>[12]</sup>等又分别得到了一些象纯弯曲梁单边裂纹、三点弯曲、CT、圆盘形CT、拱形拉伸(arc—shaped + cnsion)等各类试样型式的柔良关系式。

## 3 试验装置及试验方法

疲劳试验在 Schenck 公司的 PBV 卧式试验机上进行。采用标准 CT 试样。宽W=80 mm, 厚 B=20mm。材料为 GC4高强钢, 热处理制度有 I型、 I型两种: I型----920℃加

<u> </u>	型	σ, MPa	σ <sub>0.2</sub> MPa	ος %	ψ%	E	GMPa
Ĩ	型	1760	1320	12.4	47.9		194*
I	型	1800	1430	11.8	46.7		195*

表 1 GC4 合金机械性能

\*: 查自材料手册

241

热, 300℃等温 1h, 空冷, Ⅱ型——920℃加热, 180℃等温 1h, 260℃回火 4h. 机械性能列 于表 1.

图 1 是柔度测量装置简图。因 PBV 试验机未设载荷信号输出,另单接一载荷传感器, 利用 EG ZG 公司的 124A 型领相放大器作交流桥路放大,可产生载荷满量程为 10V的电压信 号。采用 MTS 公割 632.02型 COD 规和 408.21 型直流桥路放大器作位移测量。备有 Gould 6000 型 X-Y 记录仪绘制 P-V 曲线,同时有两台 PZ8 数字电压 表分别监测载荷与 COD 信 号。整个系统由单独的稳压源供电,所有导线和仪器屏蔽并单独接地。另有一台改装的移动 式光学显微镜作试样表面裂纹的观测,以掌握疲劳试验进度并观察裂纹路径及其形态。

疲劳裂纹扩展可在高频或在低频条件下进行,但测读 P-V 曲线必须在低频下进行.选定低频为 f=1Hz,必满足 X-Y 记录仪的行针速度.在高频试验时,COD 测量采用手动加载,即当裂纹扩展至一定间隔后,停止加动载,对试样做静拉试验.注意这个静载不能大于动载的最大值 Pmm,考虑到裂纹尖端的塑性区大小与加载速率实际是有关系的,最大静载荷还应低于以 Pmm,以避免影响后续的裂纹扩展行为.

本试验首先选用了 I 型热处理的试样做标定测量。为在断口上留下勾线,予制裂纹至一 定长度时测量柔度,然后减小载荷幅度再予制,一旦裂纹略有扩展即可将载荷恢复到正常水 平加快裂纹的扩展,如此往复。图 2 为该试样的断口表面。





图 2 疲劳勾线法得到一组裂纹迹线

对于正常的疲劳试验为尽可能多的得到实测裂纹长度数据,一般在试验结束时将试样用静载拉断,留下裂纹前缘迹线,同时记录柔度关系。在断口上按平均间隔对裂纹长度测量九点,平均裂纹长度按下列公式计算:

$$\tilde{u} = \frac{1}{8} \left( a_1/2 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9/2 \right)$$
(3)

#### 4 试验研究

COD 法测量裂纹长度时应掌握好以下几点。

#### 4.7 弹性模量 E的选取

从理论上讲,只要得到了象式(1)和式(2)这样的关系式,通过常规试验测得弹性 模量 E 即可,但是,这种做法在实际应用中会带来一定的误差。因为常规拉伸试验与疲劳裂 纹扩展试验的条件相差较大,比如:拉伸应变速率、尺寸大小等。特别是带裂纹的疲劳试验 应力应变梯度很大,甚至裂纹尖端还存在着塑性变形,这时候裂纹试样的弹性模量 E<sup>(</sup>将反

**2**42

映一种综合效应.还需要指出的是根据弹性力学, BEV/P-a/W无量纲关系中的E只代表 平面应力条件,而在平面应变条件则要改为E/(1-v<sup>2</sup>),带有洎松比v.我们知道,疲劳断 裂试样中较厚的试样都看做平面应变状态,至少在试样除两侧外的内部认为符合平面应变条 件.但对E的状态似有所不同.最近Tobler<sup>[13]</sup>等人用有限元分析了CT试样的BEV/Pa/W柔度函数,并与试验数据进行了对比,发现平面应力假设比平面应变假设更接近试验 值.但是并没有充分的证据可以认为大多数试样是平面应力的状态,实际的条件更可能的是 介于平面应力和平面应变状态之间.

在柔度法测裂纹时,求E的最佳方案是,必E做为BEV/P-a/W素度函数的变量,与 实验测得的柔度——裂纹长度数据做最小二乘法意义下的数据拟合,求出的E'做为名义的 弹性模量值<sup>[9,13]</sup>。一般可以单用一到两根试样做裂纹勾线法来进行这种标定。目前这种方法 已被用来测取难于进行常规拉伸试验的材料的E值,例如岩石等。应当尽可能的避免直接从 材料手册上查取弹性模量,这样测量裂纹长度必然存在着较大的误差<sup>[3,9]</sup>。

#### 4.2 P-V关系中的非线性问题

如图 3, 在起始部分的非线性是裂纹闭合效应造成的,这个问题已见诸于许多讨论。在 柔度测量时应考虑消除这一裂纹闭合非线性的影响。

Crooker 等人<sup>[3]</sup>采用 取 $\frac{1}{2}P_{mx}$ 、 $P_{mx}$ 两点的办法计算

**P**<sup>−V</sup>上部的直线部分,这样只要百数字电压点就可进行测量。也有人认为循环加载条件下,对应 P<sub>∞0</sub>的 V<sub>∞</sub>, 测量会由于载荷填向、应变规科动等造成测量试差,而 建议取到 0.9P<sub>4</sub>,或 0.95P<sub>∞0</sub>。此外由于裂纹闭合的 非 线性与材料、试样形状以及裂纹长短直接相关,有人建 议取 0.4P<sub>∞x</sub>以上部分做直线处理。如果材料的闭 合 效 应不显著,甚至也可以不考虑裂纹闭合的影响<sup>[5]</sup>。



我们在试验中发现 P--V 曲线的上部在有些情况下也出现非线性,见图 3 中的虚纹。 查 线弹性阶段出现这种非线性还未见有报道过。通过分析我们认为这可能是由于 CT 试样在情 轴处的磨擦力较大,限制了转动位移,造成了位移量偏小的趋势,从而出现了非线性。通过 对 CT 试样连接处涂上适用的润滑剂,基本消除了这类非线性。这里特别指出的是,若忽视 了这种非线性效应,将给裂纹测量造成较大的误差,因为这时测得的 COD 量偏小。这种 测 量误差在不同应力比条件下的试验将显得尤为突出。另外,不消除 CT 试样的转动约束,也 会改变外载荷的边界条件,影响到应力强度因子的大小。鉴于此,我们建议乘度.P--V 前测 量不能仅靠数字电压表来完成,最好是使用 X--Y 记录仪定时的绘制 P--V 曲线。若 使用 计算机快速采样技术采集 P--V 数据时,也要定期的检查 P--V 曲线的形态。

#### 5 试验结果及讨论

对两种热处理制度的 15 根试样,实测平均裂纹长度. 并根据前述求 E 法,以 D=  $\left\{ \left[ \sum_{i=1}^{n} (a'_i - a_i)/a'_i \right]/n \right\}^{\frac{1}{2}}$ 为相对误差的均方根为目标函数,将(2)式与实测数据相拟合,

得到最佳 E'值, E'=204.5GPa, 与表 1E 值相差 5%左右. 将 E'值 返 回 (2) 式 就 是 CT试样对该材料的裂纹柔度标定关系式, 在本文称做五次多项式标定式. 若代入相应 的 柔 度值, 就得到了计算的裂纹长度值 a 和相应的 E'=204.4GPa. 可见标定式与试验 结 果 符 合的很好. 由试验与计算值也可发现, I型和 II型热处理取同一的 E'值能保证足够的 测 量 精度.

这里 需 要 特别 强调的是,随 COD 测量位置的不同,CT 试样的柔度裂纹关系也有 所 不同。例如,加载线上的柔度测量就不适用(2)式。文献[10]分别给出了 CT 试 样 在 四 个不同位置上的多项式拟合式。尽管如此,有时候仍需要对一些特殊位 置 的 COD 做 出 处 理。例如,对 CT 试样前表面裂纹嘴附处螺丝固定的上下刀口处的 COD 关系,严格 说 来 (特别是刀片较厚时)就不能使用(2)式。这时,可由文献[10]提供的方法和数据重新拟 合出其它的 BEV/P-a/W关系式,或由试验数据直接拟合出标定式<sup>[4]</sup>。



象(2)式这样的五次多项式,已被许多 作者<sup>[2,4,10,12]</sup>成功的用来处理各种类型试样 的*BEV/P-a/W*标定式,但我们仍有理由怀 疑取这样复杂的函数项1/[(*BEV/P*)<sup>1/2</sup>+1]是 否适宜.另外,五次多项式也有缺点,如待定 常数多,又如不能直接从(2)式换算出*a/W* 的函数表达式来.我们将试验数据整理为图 4,同时给出了由(2)式给出的理论曲线, 图中的纵坐标做了取对数的处理.可以发现在 这样的坐标系下试验点和理论曲线随*a/W* 的 变化是平缓的.有可能通过对 *BEV/P* 变量取

对数来获得更简单的多项式标定关系·我们利用文献[10]给出的 CT 试样在 0.2 ≤ *a*/*W* ≤ 0.8 范围内的计算柔度值, 拟合得到了下列对数的二次多项式形式:

$$a/W = -0.981244 + 1.18863 \lg \frac{BEV}{P} - 0.193896 \lg^2 \frac{BEV}{P}$$
 (4)

同时也拟合了变量为1/[BEV/P)<sup>1</sup>/<sup>2</sup>+1]的二次多项式标定式,并将此二式的拟合 精 度 与 五次多项式((2)式)的拟合精度进行对比,此时设W=80mm.不难发现五次多项式 的 精度最高,几乎没有什么误差,二次对数多项式要差些,取1/[(BEV/P)<sup>1</sup>/<sup>2</sup>+1]做变 量 的 二次标定式误差最大,为五次多项式的 10 倍.如果考虑到理论计算以及试验数据本身 所 固 有的分散性,容易理解实际上已无必要提高对数多项式的次数来增加标定式的拟合精度.这 也有助于理解下述事实,即二次的(4)式与试验数据相吻合的程度(此时 E=204.4G Pa) 要优于五次的(2)式.由(4)式反解,容易得到

$$\frac{BEV}{P} = 10^{3} \frac{0.6512 - [9.39497 - 5.1574](a/.v + 0.981244)]^{1/2}}{(5)}$$

利用此式可方便的求解弹性模量 E. 由此可见,将柔度量 BEV/P 取对数,仅用简单多项式 形式就能获得精度很高的 BEV/P-a/W关系曲线,拟合效果要 优 干 1/[(BEV/P)''\*+1] 244 项的函数式。由于多项式次数的降低,也便于得到标定式的反演关系。总之这种对数多项式 形式更能反映出柔度一裂纹标定关系的内在规律。

#### 6 结论

2

1) 本试验建立的一套 COD 测量裂纹装置、精度高,使用方便可靠,对两种热处理的 GC4 高强钢的 CT 试样裂纹长度测试获得了满意的结果。

2) 介绍了 CT 试样柔度--裂纹的理论标定式在试验中的具体应用, 建 议 将 BEV/Pa/W关系中的弹性模量 E 做为柔度--裂纹实测数据的拟合参量。

3) 实测得到的柔度一裂纹数据与 Saxena 等人建立的理论标定多项式表达式符合 的 很好,误差一般在 0.3mm或 1%以下。

4)发展了一种对 BEV/P 取对数的简单多项式标定关系,当取二次多项式时,与 Newman的计算结果拟合的结果误差很小,与本文所得的实测柔度一裂纹数据相吻合的程度 甚至要优于 Saxena 等人的五次多项式。

本文试验在本所 25 室疲劳二组完成时得到了许多同志的协助,特此深表感谢!

#### 参考文献

- [1] Beevers, C. J., Eds. Advances in Crack Length Mcasurement, EMAS, The Chameleon Press LTD., London, 1982.
- [2] Cullen, W. H., Landgraf, R. W, Kaisand, L. R., and Underwood, J. H., Eds., Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth, ASTM STP 877, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985.
- [3] Yoder, G. R., Cooley, L. A., and Crooker, T. W., Procedures for Precision Measurement of Fatigue Crack Growth Rate Using Crack Opening Displacement Techniques, Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP 738, 1981, 85-102.
- [4] 丁传富,赵伟,顾明达,航空材料,总第80期,1987,第1期,36-39。
- [5] Tipton, D. G., A Low-Cost Microcomputer Data Acquisition System for Fatigue Crack Growth Testing, Environment-Sensitive Frature: Evaluation and Comparison of Test Methods, ASTM STP 821, 1984, 484-496.
- [6] Wei, R. P., and Brazill, R. L., An Assessment of A-C and D-C Potential Systems for Monitoring Fatigue Crack Growth, Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP 738, 1981, 103-119.
- [7] 李德利, 陆毅中, 机械强度, 6 (1984), No 2, 38-44.
- [8] 牛康民, 涂柏林, 颜鸣皋, 力学与实践, 8 (1986), No.2.
- [9] Crooker, T. W., Bogar, F. D., and Yoder, G. R., Standard Method of Test for Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates in Marine Environments, NRL Memorandum Report 4594, Naval Research Laboratory, Washington, D. C., 1981.

- [10] Saxena, Ashok, and Hudak, S. J., Jr., Int. Journ. of Fracture, 14 (1978), 453-468.
- [11] Kapp, J. A., Leger, G. S., and Gross. B., Wide-Range Displacement Expressions for Standard Fracture Mechanics Specimens, Fracture Mechanics: Sixteenth Symposium, ASTM STP 868, 1985, 27-44.
- [12] Jablonski, D. A., Journet, B., Vecchio, R. S., and Hertzberg, R., Engineering Fracture Mechanics, 22 (1985), 819-827.
- [13] Tobler, R. L., and Carpenter, W. C., Engineering Fracture Mechanics, 21 (1985), 547-556.

# Application of Compliance Expressions for Measuring Fatigue Crack Length By COD Techniques

Niu Kangmin Chen Meiying Hu Yuankai

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

**Abstract** Compliance expression used for measuring fatigue crack lengths are briefly described. Crack lengths of CT specimen, made of Gc4 high strength steel and heat treated in two different processes, are measured by a sct of high precision COD measurement equipment.

The compliance expression by Saxena et al is found to be in excellent agreement with experimental results but complicate. In this paper, a new form of compliance expression, in which log (BEV/P) is used instead of BEV/P, is proposed, and it seems that this new expression is superior.

Key words COD, fatigue crack, compliance measurement.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net