

用控制柔度法测定低循环 疲劳裂纹扩展速率

四三〇厂 王栓柱 王兴国 常逢元

序 言

在航空发动机上不少部件的失效是由于低循环疲劳引起的。疲劳裂纹是在构件处于大范围屈服乃至整体屈服的情况下萌生和扩展的。一般说来,发动机部件的总寿命由两部分组成:工程裂纹的形成寿命和扩展寿命。在低周疲劳中,前者占总寿命的80%以上,一旦宏观裂纹出现,由于高的应力集中,使构件经历相当少的循环就破损^[1]。宏观裂纹扩展范围很小,采用通常控制应力或应变的方法不易测出扩展速率。与此相反,采用将负荷-位移控制到一条斜线上的方法(下面简称控制柔度法),可使低周疲劳裂纹亚临界扩展有一个较大的范围^[2],能方便地测出其扩展速率,即使出现塑性撕裂的情况下也能得到可靠的数据。在发动机上承受热应力和残余应力的部件,其裂纹的扩展过程也与上述方法接近,因而它具有一定的工程意义。

一、力学参量的选择

在应力疲劳中广泛采用应力强度因子 ΔK 作为力学参量去描述裂纹扩展特征。在应变疲劳中 ΔK 已不能描述裂纹尖端应力-应变场的奇异性,只能用弹塑性断裂力学的参量 J 积分作为控制变量。在简单加载和小应变条件下,全量理论可以证明裂纹尖端应力-应变场的强度由下式给出^[3]:

$$\sigma_{ij} = \frac{A}{r^{1/(1+\alpha)}} \left[\frac{J}{AI_n} \right]^{\alpha/(1+\alpha)} F_{ij}(\theta)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{A}{r^{1/(1+\alpha)}} \left[\frac{J}{AI_n} \right]^{1/(1+\alpha)} \phi_{ij}(\theta) \quad (1)$$

由式(1)可知弹塑性裂纹前端各点(r , θ 一定)的应力,应变场完全由 J 积分来确定。当 $r \rightarrow 0$ 时,

$$\sigma_{ij} \rightarrow \infty; \quad \varepsilon_{ij} \rightarrow \infty \quad \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} \rightarrow \infty。$$

即裂纹尖端应力,应变及其乘积存在着奇异性。 J 积分正是这种奇异性的描述。

在循环加载过程中, Lamba 粗略地证明了 J 积分仍有效^[4]。当试样处于整体屈服时, J 积分守恒性被实验所验证^[5]。 J 的值和循环加载过程中形变功之间有如下函数关系^[6]。

$$\Delta J = \Delta J_e + \frac{2}{b} \int_0^{\delta_p} P d\delta_p - \frac{1}{b} P \delta_p \quad (2)$$

Rice 指出式(2)后两项(即 J_p 的值)可以解释为负荷对施力点位移关系曲线下某一块特殊面积。

二、试样与试验过程

所选用的材料为法国航材15CDV6,其化学成分如表1所示。

表 1 15CDV6钢化学成分(%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.1 ~0.16	0.2	0.8 ~1.0	1.25 ~1.5	0.8 ~0.9	0.2 ~0.3

该钢由轧制毛坯纵向取材,粗加工后经975℃盐炉加热,油淬,200℃回火1小时后加工成试样最终尺寸,光洁度▽8。常规及应变疲劳寿命如表2所示。

测定裂纹扩展速率的试验在Mayes-100E低循环疲劳试验机上进行,使用Instron 8034

疲劳试验机动态引伸仪进行应变监控。引伸仪标距长度 L_0 应选择适中, 使标距点处应变均匀^[7]。对于中心裂纹试样选择 $L_0=12.7$ 。试样尺寸如图 1 所示。中心孔 $\phi 2^{+0.05}$, 在座标镗床上镗出, 孔两边线切割各 1 毫米长的槽。试样上部加工成 45° 斜面, 在与承受拉压对称的夹具配合时能自动找正中心, 消除不同心误差。

表 2 15CDV6 钢机械性能

HRC	$\frac{\sigma_{0.2}}{\text{公斤/毫米}^2}$	$\frac{\sigma_b}{\text{公斤/毫米}^2}$	δ %	a_k 公斤-米/厘米 ²	N_f 次
39.5	96	131	14	12.3	2379

注: 1. 拉伸试验在 Instron 1195 上进行;
2. N_f 为恒应变 (1.2%) 疲劳寿命。

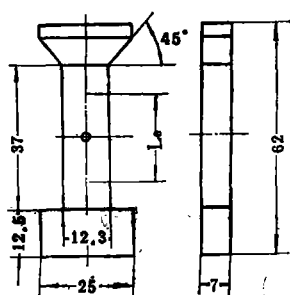


图 1 试样及引伸仪标距长度

用柔度法测定疲劳裂纹扩展速率变量较多, 如图 2 所示。纵座标代表负荷, 横座标代表动态引伸仪标距点位移 δ , 它综合反映了标距 L_0 内弹性应变, 塑性应变及裂纹张开效应位移的叠加。试验中负荷随位移(应变)的增加而减少, 所记录的滞后回线的顶点应落在预先确定的斜线 S-D 上。

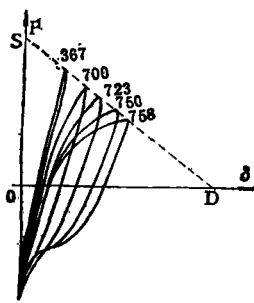


图 2 柔度法示意图

在试验开始之前, 要确定以下参数:
S 和 D 点, 决定预选斜线的斜率。它决定

了循环周次, 为模拟发动机构件的实际情况, 适当地选择 S 和 D 点, 使总周次维持在 10^3 左右。

f_0 为初始加载频率。试验中频率随应变变量 δ 的增加而降低, 其目的为维持应变速率基本恒定, 并使裂纹扩展速率相对于时间基本上为一常数。

ϵ_0 为起始应变变量, 它直接影响着破断周次。例如某试样 $\epsilon_0=0.8\%$ 时, 寿命 $N_f=360$ 次。而 $\epsilon_0=0.6\%$ 时, N_f 增加一倍。 ϵ_0 和 S-D 线斜率之间还存在着一定的制约关系。

以上参数的选择都必须经试验确定。对不同的材料, 不同的热处理状态, 这些参数有不同程度的差别。表 3 列出了两组试样的试验参数。

表 3 试验参数

类别	S 公斤	D 毫米	ϵ_0 %	f, 赫兹		2a/w	
				起始	断裂	起始	断裂
1	9430	0.22	0.8	0.17	0.033	0.325	0.79
2	7546	0.265	0.6	0.17	0.033	0.325	0.73

三、数据处理

试验中在动态下用显微镜测得裂纹长度 a_i , 画出 a_i-N_i 曲线。用七点递增多项式的 Fortran 程序在 Felax-256 型计算机上算出 $(da/dN)_{N_i}$ 的值。

在全屈服状态下, 描述疲劳裂纹尖端应力-应变特性的力学参数 J 积分是多变量的函数, 对于某一循环加载中,

$$\Delta J = f(\sigma, \delta, \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

式中 σ —循环应力幅值;

δ —动态引伸仪标距点的位移;

$\dot{\epsilon}$ —动态引伸仪标距点应变速率, 它又是应变量和加载频率的稳函数。

到目前为止, 弹塑性断裂力学还不能提供一个解析表达式去准确计算某一次应力-应变循环过程中的 J 积分值, 只能依赖于试验过程中所记录的滞后回线。对于中心裂纹试样, Douling 将式 (2) 具体化为^[8]

$$\Delta J = \Delta K^2/E + \Delta U_e/2Bb \quad (4)$$

式(4)中第一项为弹性项, 第二项为塑性项。

在计算弹性部分时, 不考虑裂纹尖端塑性区的形状, 可以认为试样完全处于线弹性条件下, 采用下式求出^[10]:

$$\Delta K_e = (\Delta P_e/WB) \sqrt{a} [1.77 - 0.177(2a/w) + 1.77(2a/w)^2] \quad (5)$$

式(5)中 ΔP 不是整个循环加载的负荷幅值, 而是裂纹在一次循环过程中张开状态所对应的有效负荷幅值^[10]。只有这一部分对裂纹向前扩展才有贡献, 如图3所示。

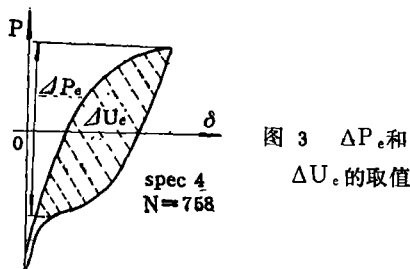


图3 ΔP_e 和 ΔU_e 的取值

式(4)中塑性部分的计算取决于滞后回线的面积 ΔU , 取值原则和 ΔP 一样, 如图3。

对于裂纹张开和闭合临界点C的确定。在柔度法中C点不会在 δ 轴之上, 由于应变恢复到零时必出现压负荷, 因此C点一般都低于 δ 轴。在动态下用显微镜观察可以看到负荷为零时, 裂纹并没有闭合。当裂纹一旦闭合, 回线就出现不对称, 据此原则找到每个环上临界点C进而确定 ΔP_e 和 ΔU_e 。

对于一个试样记录滞后回线的数目不应少于30个, 且保证J值变化的连续性。

在双对数坐标上找出 $(da/dN)_{N_i}$ 所对应的 ΔJ_{N_i} 值点, 如图4所示。

可以看出, 在不同的试验参数下(S-D线斜率, 起始应变 ϵ_0 等), da/dN 和 ΔJ 的对应点落在两条平行线所夹的分散带内。起始应变量大(寿命较短)的试样位于分散带右上方。起始应变小(寿命长)的试样位于分散带左下方。若取这一分散带中心线为代表, 则得到 da/dN 和 ΔJ 的幂指数关系:

$$da/dN = 2.5 \times 10^{-4} (\Delta J)^{1.38} \quad (6)$$

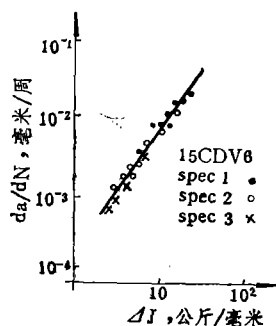


图4 da/dN 和 ΔJ 的关系曲线

式(6)把弹塑性断裂力学的参量J积分和低循环疲劳裂纹扩展速率建立起解析关系。在有了 ΔJ 的表达式之后就可以估算低周疲劳寿命和裂纹容限。

对于15CDV6钢经空冷处理的试样按照相同的方法(试验参数不同)得出:

$$da/dN = 3 \times 10^{-4} (\Delta J)^{1.32}$$

四、结果与讨论

在柔度法测定疲劳裂纹扩展速率的试验中, 直观力学参量是 δ 。它又是裂纹长度 a 的函数, 可以用 $\delta(a)$ 表示(图5)。

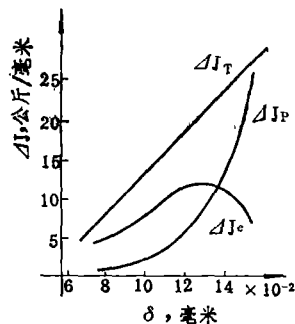


图5 $J_T (J_e, J_p)$ 对 $\delta(a)$ 的变化关系

图5表示 $J (J_e, J_p)$ 和 $\delta(a)$ 之间的线性关系。对于表3中第二类试样, 在低周范围内由实验点可拟合出

$$\Delta J_T = 2.64 \delta(a) - 13.16 \quad (7)$$

J积分的塑性部分是一个单调递增函数,

可用幂指数的形式给出:

$$\Delta J_p = 10^{-4.55} [\delta(a)]^5 \quad (8)$$

由图5可以看出, J 积分的弹性部分变化比较复杂。在弹塑性范围内出现峰值, 且图形不对称, 一个简单的函数关系不能准确的表达出它的变化规律。在裂纹扩展过程中, 当 $2a/w < 0.6$ 时, J_e 是递增的, 当 $2a/w > 0.6$ 时, J_e 表现为递减。当求出 J_T , J_p 的表达式之后, 从约束方程

$$J_T = J_e + J_p$$

可得

$$J_e = J - J_p = 2.64\delta(a) - 10^{-4.55}[\delta(a)]^5 - 13.16 \quad (9)$$

实验表明, 当 $2a/w < 0.6$ 时, J_e 与 J_p 相比, 前者大得多, J_T 主要取决于 J_e 。在这一阶段应力强度因子 ΔK 经过适当的修正还可以描述裂纹尖端应力-应变场的强度, 线弹性断裂力学参量还有一定的适用性。随着塑性变形量的增加, 当 $2a/w > 0.6$ 时, J_T 主要取决于 J_p , ΔK 无论怎样修正也不能再反映裂纹尖端应力-应变场的特性, 在这一阶段, 描述裂纹扩展的力学参量只能是 J 积分。 J 是弹塑性断裂力学最有希望的参量^[11]。

将式(7)代入式(6):

$$da/dN = 2.5 \times 10^{-4} [2.64\delta(a) - 13.16]^{1.38} \quad (10)$$

式(10)以 $\delta(a)$ 为参量描述了低循环疲劳裂纹扩展速率。 $\delta(a)$ 虽然不能定量的描述裂纹尖端应力-应变场的奇异性, 不是场的直接参量, 但它在工程上易于测量, 有其使用方便的一面。通过式(7), 将 $\delta(a)$ 和 J 之间建立了等效关系, 使 $\delta(a)$ 有了间接的理论基础。

五、结 论

1. 在全屈服状态下测定 15CDV6 钢低循环疲劳裂纹扩展速率, 以弹塑性断裂力学参量 J 积分作为控制变量建立了函数关系

$$da/dN = 2.5 \times 10^{-4} (\Delta J)^{1.38}$$

2. 指出在弹塑性范围内疲劳裂纹扩展过程中 J_T (J_e , J_p) 的变化规律, 建立了 $\delta(a)$ 和 J_T 的线性等效关系; 间接地赋予 $\delta(a)$ 以理论基础, 为工程上应用找到方便途径。

参 考 资 料

- [1] Zhou, F.G. and Cai, Q.G., Fatigue of Engineering Materials and Structure, Vol.2, 1979, 419-422.
- [2] Douling, N.E., Westinghouse, Res. Lab. Paper No 75-1E7 Palfea-PL 1975.
- [3] 褚武杨, 断裂力学基础, 1979, P.63.
- [4] Lamba, H.S., Engineering Fracture Mechanics, Vol.7, 1975, 693.
- [5] Musuva, J.K. and Radon, J.C., Imperial College of Science and Technology, Fracture and Fatigue, 1980, 129.
- [6] Rice, J.R., Progress in Flow Growth and Fracture Toughness, ASTM STP 536, 1973, 231.
- [7] 平修二, 田中启介, 小川茂, 材料, 26, 280 (1977), 93.
- [8] Douling, N.E., ASTM STP 601, 1976, 19.
- [9] Feddersen, C.E., Discussion in Plane Strain Crack Toughness Testing of Metallic Materials, ASTM STP 410, P.77.
- [10] 陈镜, 蔡其巩, 王仁智, 工程断裂力学, 国防工业出版社, 1977.
- [11] 大路清嗣, 小仓敬二, 久保司郎, 机械の研究, Vol.30, 1978; Vol.31, No1., 1979, P.1-33.