

19

高应变低周疲劳的能量分析方法

109-113 The Energy Analysis for High Strain Low Cycle Fatigue

盛光敏
Sheng Guangmin

龚士弘
Gong Shihong

彭侃
Peng Kan

TG113.255

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 630044)

摘 要 从疲劳过程中材料吸收的总应变能和每次循环的应力应变滞后环出发, 推出了形如 Coffin-Manson 公式和 Basquin 公式的寿命预测表达式。实验验证结果表明, 在高应变低寿命区, 理论与实测的 $\Delta\epsilon_p-2N_f$ 曲线相吻合。

关键词 低周疲劳; 应变能; 疲劳寿命
中国图书资料分类法分类号 TG113.255

金属

ABSTRACT From the total strain energy absorbed by materials during cycling and the stress-strain hysteresis loop of every cycle, the mathematical expressions were derived for predicting fatigue life. The expressions are just like the Coffin-Manson and Basquin formulas. The results of test verification showed that, in the high strain low life region, the theoretical $\Delta\epsilon_p-2N_f$ curve is approximately identical to that measured by test.

KEYWORDS low cycle fatigue; strain energy; fatigue life

0 引 言

材料的高应变低周疲劳机理十分复杂, 在确定疲劳寿命时须考虑材质、应力应变大小、加载方式及加载历程等因素的影响。长期以来, 人们不断地在探索, 力求从某些“控制因素”出发来描述整个疲劳过程, 从而达到预估疲劳寿命、防止疲劳破坏的目的。目前处理此问题的基本理论有两类: 第一类是裂纹扩展理论^[1,2], 即用某一力学参量(如 AK 、 COD 、 J 积分)建立起疲劳裂纹扩展的数学模型, 当裂纹扩展到该力学参量的临界值(K_{Ic} 、 δ_c 、 J_{Ic})时, 产生疲劳破坏; 第二类是累积损伤理论^[3], 即当每次循环使材料产生的不可逆损伤累积达到材料的损伤界限时, 便发生断裂。

实际上, 在低周疲劳过程中, 由于塑性应变量大, 因而有一部分变形功将以应变能的形式被材料所吸收。其循环塑性应变能是可测试的, 有可能利用以估计这类高应变低周疲劳寿命, 并提出疲劳寿命的定量表达式。为此进行了本文所述研究工作。

1 基本方法

设第 i 次循环材料吸收的塑性应变能为 ΔU_i (其大小可用应力应变滞后环的面积表示)。那么整个疲劳过程中所吸收的应变能总量应为各次循环滞后环面积的总和, 定义为循环韧度, 用 U_p 表示, 即

$$U_p = \sum_{i=1}^{2N_f} \Delta U_i \quad (1)$$

式中 $2N_f$ 为疲劳寿命。由于在低周疲劳过程中材料会产生循环硬化或循环软化效应, 故每次循环的 ΔU_i 是不相等的。为了简化起见, 将(1)写成:

$$U_p = 2N_f \cdot \Delta U \cdot \alpha \quad (2)$$

式中 ΔU 为循环稳定阶一次循环的滞后环面积, α 为循环特性系数。对循环硬化材料: $\alpha > 1$; 循环软化材料: $\alpha < 1$; 循环稳定材料: $\alpha = 1$ 。

1.1 关于 U_p

裂纹体受载后, 首先在裂纹尖端产生塑性变形, 形成塑性区, 如图 1 所示。则

$$U_p = \pi \cdot \frac{r^2}{4} \cdot \omega \cdot B \quad (B \text{ 为试样厚度})$$

ω 为塑性区内应变能密度, 并设 ω 与裂纹长度无关。由断裂力学, 疲劳过程中塑性区尺寸为:

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_s} \right)^2 \quad (\text{平面应力})$$

在裂纹失稳扩展的临界条件下, 应力强度因子范围

$\Delta K = K_{Ic}$, $a = a_c$, 那么:

$$\begin{aligned} U_p &= \frac{\pi}{4} B \cdot \omega \cdot \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{Ic}}{2\sigma_s} \right)^2 \right]^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot B \cdot \omega \cdot \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{a_c}}{2\sigma_s} \right)^2 \right]^2 \supseteq a_c^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 Y 为形状因子; $\Delta\sigma$ 为应力循环范围; σ_s 为材料屈服强度。那么, 临界裂纹长度分别为 a_{c1} 、 a_{c2} 的试样对应的 U_{p1} 、 U_{p2} 应为:

$$\frac{U_{p1}}{U_{p2}} = \left(\frac{a_{c1}}{a_{c2}} \right)^2 \quad (4)$$

由: $K_{Ic}^2 = Y^2 \cdot (2\sigma_s)^2 \cdot a_c$, (4) 可为:

$$\frac{U_{p1}}{U_{p2}} = \left(\frac{\sigma_{s2}}{\sigma_{s1}} \right)^4 \quad (5)$$

式中 σ_s 为循环应力幅。现将下标“1”考虑成一种特殊的循环加载, 即单向静拉伸加载 ($N_f = \frac{1}{2}$)。此时显然有: $\sigma_{s1} \cong \sigma_f$, σ_f 为单向加载时材料的断裂强度, $U_{p1} = U_f$, U_f 为单向加载时材料的静力韧度 (单向应力应变曲线下的面积)。则(5)为:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_f} = \left(\frac{U_f}{U_p} \right)^{-1/4}$$

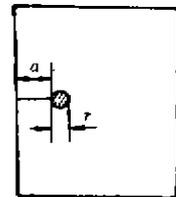


图 1 裂尖塑性区

或

$$U_f = U_f \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f} \right)^{-1} \tag{6}$$

1.2 关于 ΔU 和 U_f

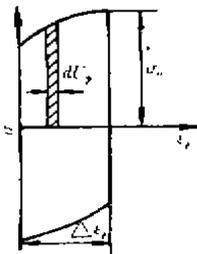


图 2 塑性滞后环

为了简化计算,采用图 2 所示的塑性滞后环来计算 ΔU ,并假定滞后环相对横轴对称。

则
$$\Delta U = 2 \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \tag{7}$$

图 2 中环的非线性部分可用 Hollomon 公式表示:

$$\sigma = K \cdot \epsilon_f^n \tag{8}$$

式中 K 、 n 分别为应变硬化系数和指数。代入(7):

$$\Delta U = \frac{2}{n+1} \cdot \Delta \epsilon_p \cdot \sigma \tag{9}$$

同理,单向加载时材料的静力韧度 U_f 也可以用(9)计算,只是不考虑反向应力:

$$U_f = \frac{1}{n+1} \cdot \epsilon_f \cdot \sigma_f \tag{10}$$

式中 ϵ_f 为单向加载材料断裂时的真实应变。

1.3 关于疲劳寿命

将(6)、(9)和(10)代入(2),经整理后得:

$$(2N_f) \cdot (2a) = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f} \right)^{-5} \cdot \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \right)^{-1} \tag{11}$$

单向加载试样断裂时有:

$$K = \sigma_f / \epsilon_f^n \tag{12}$$

将(12)代入(8)可得

$$\frac{\sigma}{\sigma_f} = \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_f} \right)^n \tag{13}$$

所以,在循环加载下有:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} = \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \right)^n \quad \text{或} \quad \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f} \right)^{1/n} \tag{14}$$

将(14)代入(11),消去(11)中的 $\frac{\sigma_a}{\sigma_f}$ 可得

$$\Delta \epsilon_p \cdot (2N_f)^{\frac{1}{5n+1}} = \epsilon_f \cdot (2a)^{-\frac{1}{5n+1}} \tag{15}$$

将(14)代入(11),消去(11)中的 $\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f}$ 可得

$$\sigma_a \cdot (2N_f)^{\frac{1}{5n+1}} = \sigma_f \cdot (2a)^{-\frac{1}{5n+1}} \tag{16}$$

(15)和(16)式为用能量法预估疲劳寿命的数学表达式。对应变控制疲劳,用(15),应力控制疲劳,用(16)。

2 讨 论

1) 将(15)、(16)式分别与 Coffin-Manson 公式^[3]:

$$\Delta \epsilon_p \cdot (2N_f)^c = z \tag{17}$$

和 Basquin 公式^[4]:

$$\sigma_a \cdot (2N_f)^b = y \quad (18)$$

比较可知,本文用能量法推出的疲劳寿命预估表达式形式上与 Coffin-Manson 公式及 Basquin 公式相同。只是疲劳塑性指数 c 、疲劳强度指数 b 、疲劳塑性系数 z 和疲劳强度系数 y 不同。见表 1。

表 1 C, Z, b, y 比较

本 文	Coffin-Manson 或 Basquin 公式
$C = \frac{1}{5n+1}$	$C = 0.6$
$Z = \varepsilon_f \cdot (2a)^{-\frac{1}{5n+1}}$	$Z = \varepsilon_f$
$b = \frac{n}{5n+1}$	$b = 0.1$
$y = \sigma_f \cdot (2a)^{-\frac{n}{5n+1}}$	$y = \sigma_f$

2) 在疲劳过程中,材料的循环特性与 n 值有关。当 $n < 0.1$ 时,循环软化; $n \geq 0.1$ 时,循环硬化或循环稳定^[5]。因此, α 值大致可为:

$$\alpha = n/0.1 \quad (19)$$

但是,对大部分材料来说,只有在初始和最后的少量循环中,才会出现明显的硬化、软化效应^[6]。因此,对于疲劳寿命的粗略估计,可取 $\alpha \approx 1$ 。

3) (6) 式表达了循环韧度 U_p 与静力韧度 U_f 之间的关系。由于 $\sigma_a < \sigma_f$, 所以 $U_p > U_f$ 。 σ_a 越低,循环韧度 U_p 比静力韧度 U_f 大得越多。因而有

$$U_f < U_p (\text{低周疲劳}) < U_p (\text{高周疲劳}) \quad (20)$$

由(16)式

$$\sigma_a = \sigma_f \cdot (4N_f \alpha)^{-\frac{n}{5n+1}} \quad (16')$$

将(10)和(16')式代入(6):

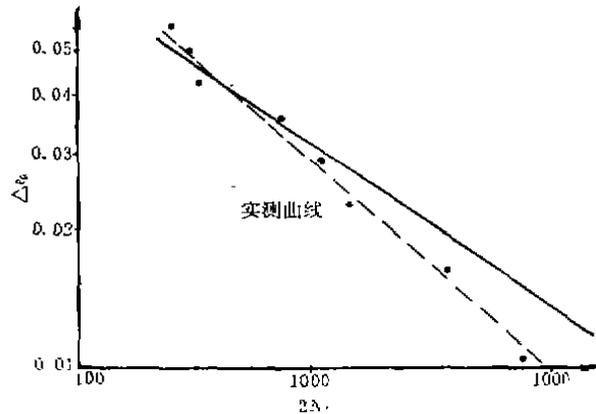
$$\begin{aligned} U_p &= \frac{\varepsilon_f \cdot \sigma_f}{n+1} \left[\frac{\sigma_f \cdot (4N_f \cdot \alpha)^{-\frac{n}{5n+1}}}{\sigma_f} \right]^{-1} \\ &= \frac{1}{n+1} \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma_f \cdot (2N_f \cdot \alpha)^{\frac{n}{5n+1}} \end{aligned} \quad (21)$$

(21) 式为循环韧度的定量表达式。随疲劳寿命 $2N_f$ 的延长,循环韧度 U_p 的增加是非线性的。

3 实验验证

实验材料为含钒的高强度低合金(HSLA)钢,化学成分为 C:0.20%;Si:0.52%;Mn:1.16%;V:0.06%;P、S \leq 0.03%, $\Phi 20$ 的热轧棒材。其拉伸机械性能为: $\sigma_s = 415$ MPa, $\sigma_b = 588$ MPa; $\varepsilon_f(\delta_{10}) = 25\%$; $n = 0.1854$ 。

将实验材料加工成标准的低周疲劳试样,在 MTS810 液压伺服试验机上进行恒应变低周疲劳试验。试验参数为:三角波形;对称循环;加载频率为 1 Hz,温度为实验室室温。

图3 理论与实测的 $\Delta\epsilon_f-2N_f$ 曲线

实测的 $\Delta\epsilon_f-2N_f$ 曲线及按本文(15)式计算得到的 $\Delta\epsilon_f-2N_f$ 曲线见图3。在 $2N_f < 1000$ 周的低寿命范围内, 实测线与理论线吻合得较好; 在高寿命区, 理论线与实测线逐渐分离, 用(15)式预估的疲劳寿命比实测寿命偏高。这与在循环过程中, 塑性应变能逐渐释放, 形成低能量的位错胞结构^[6]有关。

4 结 论

1) 实验验证结果表明, 用本文提出的形如 Coffin-Manson 公式和 Basquin 公式的疲劳寿命表达式, 即

$$\Delta\epsilon_f(2N_f)^{\frac{1}{5n+1}} = \epsilon_f \cdot (2\alpha)^{-\frac{1}{5n+1}}$$

$$\sigma_a(2N_f)^{\frac{1}{5m+1}} = \sigma_f \cdot (2\alpha)^{-\frac{1}{5m+1}}$$

来预估高应变低疲劳寿命具有较高的精确度。

2) 循环韧度随疲劳寿命 $2N_f$ 的延长而非线性地增大。

参 考 文 献

- 1 蔡其巩. 论塑性区中裂纹的扩展. 金属学报. 1976, 12(1), 45~55
- 2 盛光敏, 龚士弘. C-M 公式的理论推证. 重庆大学学报. 1990, 13(3), 56~62
- 3 杨道明. 金属力学性能与失效分析. 北京: 冶金工业出版社, 1991, 354
- 4 何肇基. 金属的力学性质(修订版). 北京: 冶金工业出版社, 1989, 73
- 5 Landgraf R. W. Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys. ASTM STP 467, 1970
- 6 盛光敏, 龚士弘. 含钒低合金钢的循环软化和硬化行为研究. 重庆大学学报, 1988, 11(5), 76~85