

13  
A  
49-53  

# 低碳钢的大应变低周疲劳\*

张以增\*\* 李国琛 徐明英 杜明亮 樊卫东

(华中理工大学材料系, 武汉, 430074)(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

**摘要** 对三种低碳钢的不同缺口的轴对称圆柱形试样在大应变循环下的低周疲劳行为进行了研究。以考察失效周次在100次以内的疲劳断裂行为。结果表明随着被控循环应变幅度的增大, 低碳钢的低周疲劳寿命降低, 断裂模式则由疲劳解理逐渐向延性韧窝过渡。缺口处的三向应力程度以及起始循环加载的静态损伤都对最终的疲劳失效有重要的影响。建议采用一种广义的循环应变参量  $\Delta\epsilon$  来概括影响这种大应变低周疲劳的诸因素, 从而可以采用修正的 Coffin-Manson 关系式描述其疲劳行为。

**关键词** 低周疲劳 大应变循环 累积损伤 疲劳寿命 低碳钢

TG142.31  

## LOW CYCLE FATIGUE OF LOW CARBON STEELS

### UNDER LARGE STRAIN CYCLIC LOADING

Zhang Yizeng Li Guochen Xu Mingying Du Mingliang Fang Weidong

(Dept. of Materials Science and Eng., Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

**Abstract** Axisymmetric notched bars with notch roots of large and small radii were tested under large strain cyclic loading. The main attention is focused on the fracture behavior of steels having cycles to failure within the range 1~100. Our study shows that a gradual transition from a static ductile nature to one of fatigue cleavage can be observed and characterized by the Coffin-Manson formula in a generalized form. Both the triaxial tensile stress within the central region of specimens and static damage caused by the first increasing load have effects on the final failure event. A generalized cyclic strain range parameter  $\Delta\epsilon$  is proposed as a measure of the numerous factors affecting behavior. Fractographs are presented to illustrate the behavior reported in the paper.

**Key words** low cycle fatigue, large strain cyclic loading, damage accumulation, fatigue life

 $\Delta\epsilon$ ——广义循环应变幅度 $\Delta\bar{\epsilon}$ ——塑性应变平均幅度 $\epsilon_d$ ——最小截面处的径向应变 $\Delta\epsilon_d$ ——最小截面处的径向应变幅度 $\Delta\bar{\epsilon}_d$ ——径向应变平均幅度 $\epsilon_d^0$ ——起始循环的径向应变 $\epsilon_f$ ——静载下的径向断裂应变 $\bar{\epsilon}$ ——静态损伤参量,  $\bar{\epsilon} = \epsilon_d^0 / \epsilon_f$  $N_f$ ——失效周次 $N_r$ ——疲劳裂纹萌生寿命 $C, \alpha$ ——疲劳塑性系数和指数 $\sigma_m, \sigma_e$ ——平均应力和等效应力 $d_0$ ——最小截面处的起始直径 $d$ ——最小截面处的现时直径 $R$ ——缺口起始曲率半径 $D$ ——试样的起始直径 $\gamma$ ——相关系数 $m$ ——缺口敏感性

## 1 前言

材料的塑性对于低周疲劳行为的影响甚大。考虑塑性对低周疲劳行为影响的模型是由 Tavernilli 和 Coffin<sup>[1]</sup> 以及 Manson<sup>[2]</sup> 提出的, 它涉及到循环塑性应变幅度 ( $\Delta\epsilon_p$ ) 和疲劳失效周次 ( $N_f$ ) 之间的关系, 即

$$\Delta\epsilon_p = CN_f^m \quad (1)$$

\* 19940823 收到初稿, 19941005 收到修改稿。

\*\* 张以增, 男, 1928年1月生, 汉族, 材料系教授, 博士生导师, 武汉, 430074。

这个 Coffin-Manson (C-M) 关系式与应力疲劳下的不同。在应力循环下的高周疲劳, 材料的强度是影响的主要因素。

近几年来国内外交通运输、航空、石油化工行业中的设施屡有事故发生。失效分析表明多半与大应变低周疲劳有关。有的事故疲劳破坏寿命极短, 只有几十个周次。一般认为低周疲劳的破坏周次范围在  $10^3 \sim 10^5$  次左右。上述 C-M 关系式也是指这样的周次范围而言的。过去对疲劳破坏周次在 100 次以内的疲劳行为了解甚少<sup>[3]</sup>。这种寿命极短的大应变低周疲劳断裂规律, 无论是在理论方面还是在实验研究方面都很少研究。

## 2 试样与实验方法

试验材料为三种不同类型的低碳钢(如表 1、2 所示)。A 组和 B 组试样为普通碳素钢, 化学成份及热处理稍有不同。C 组试样是 20Cr 钢。热处理后所有试样的显微组织均为珠光体均匀分布在铁素体基体上, 以保证有足够的塑性。

大多数实际构件都有截面变化的各种台阶、油孔、退刀槽等, 这些部位的大应变都伴随着相当大的三向应力。因此我们采用带有不同缺口的轴对称圆柱形试样(见图 1 及表 3)。每组试样还根据其几何尺寸的不同划分为小组, 如  $A_1$ 、 $A_2$ 、和  $A_3$  等。

测试工作在北京和武汉两地进行。使用的液压伺服闭环控制疲劳试验机分别为美国 MTS-810 以及日本岛津 EA10-EHF。疲劳测试均采用应变控制( $R = -1$ ), 三角波形。频率为 0.2 Hz。试验均在室温下进行。

一般液压伺服疲劳试验机所配置的轴向延伸计只能控制 1% (0.01) 以下的轴向应变, 这也是大应变低周疲劳很少研究的一个原因。为了能够在一般液压伺服疲劳试验机上实现大应变循环的控制, 我们在 D' Haeyer 和 Simon<sup>[4]</sup> 的装置的基础上加以改进, 自制了一种大应变径向延伸计<sup>[5]</sup>。经过标定, 这种延伸计可有效控制 3.5% (0.035) 的径向应变(此时轴向应变大约是 6%)。误差低于  $\pm 0.1\%$ , 符合 ASTM E606-80 标准的要求。

## 3 实验结果及讨论

**3.1 疲劳测试** 图 2 给出典型的大应变循环载荷—应变幅度迹线。它是由 X-Y 仪记录, 或者由计算机记录, 经绘图软件绘制而成。除了 C 组试样以外, A 组和 B 组试样均呈循环硬化。在最后若干周次的迹线压缩部分底端可见曲率发生了改变, 如图 2 中的 A 所示。这是由于产生了裂纹的闭合效应。一旦出现这个现象, 在缺口根部的表面可观察到裂纹, 把最早出现这种现象的相应周次规定为疲劳裂纹萌生寿命  $N_{cr}$ 。有的试样这种曲率改变不甚明显。按照惯例, 将载荷由稳定值下降 10% 作为确定  $N_{cr}$  的标志。在大应变循环条件下试验所用低碳钢的裂纹萌生寿命占整个疲劳寿命的大部分。各组试样的  $N_{cr}/N_f$  平均比例为 0.86 ( $A_1$ )、0.68 ( $A_2$ )、0.56 ( $A_3$ )、0.83 ( $B_1$ )、0.77 ( $B_2$ )、0.87 ( $C_1$ )、0.79 ( $C_2$ )。试样越光滑,  $N_{cr}$  所占比例越大。

表 1 低碳钢的化学成份 (wt%)

组号	C	Mn	Si	P	S	Cr
A	0.15	0.66	0.24	0.15	0.025	0.01
B	0.20	0.39	0.06	0.01	0.021	0.06
C	0.21	—	0.30	—	—	0.99

表 2 热处理与力学性能

组号	热处理	强度极限 MPa	屈服强度 MPa
A	880℃ 淬火, 710℃ 回火 5h	444	323
B	895℃ 空冷	506	230
C	880℃ 空冷	605	347

表 3 试样的几何参数

组号	几何类别	试样件数	$\frac{R}{mm}$	$\frac{D}{mm}$	$\frac{d_0}{mm}$
A	$A_1$	12	62.0	16.0	9.5
	$A_2$	7	4.5	16.0	9.5
	$A_3$	9	1.5	16.0	9.5
B	$B_1$	6	40.0	10.0	6.0
	$B_2$	9	1.5	9.5	6.0
C	$C_1$	9	40.0	10.0	6.0
	$C_2$	9	1.5	9.5	6.0

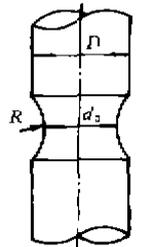


图 1 试样几何形状

由于是大应变循环, 缺口根部附近的非线性力学行为以及该处应变的不均匀分布是十分显著的。我们把试样最小截面处的径向应变作为大应变低周疲劳的一个重要参量。

$$\epsilon_d = \ln(d/d_0) \quad (2)$$

式中  $d_0$ ——试样最小截面处的起始直径

$d$ ——现时的直径

疲劳测试在径向总应变为恒幅的情况下进行, 因此, 平均径向总应变幅度  $\Delta\bar{\epsilon}_d = \Delta\epsilon_d$ 。在大应变循环的条件下弹性回复所占比例相对来说比较小, 可忽略不计。于是, 径向总应变平均幅度可作为疲劳的塑性应变幅度的度量。

按照应变损伤累积理论, 对实验数据采用 C-M 关系式, 将  $N_f$  和  $\Delta\bar{\epsilon}_d$  联系起来有如下式:

$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.419N_f^{-0.590}$	$\gamma = -0.978$	$A_1$	$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.253N_f^{-0.516}$	$\gamma = -0.990$	$A_2$
$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.252N_f^{-0.593}$	$\gamma = -0.994$	$A_3$	$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.369N_f^{-0.504}$	$\gamma = -0.962$	$B_1$
$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.186N_f^{-0.552}$	$\gamma = -0.958$	$B_2$	$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.490N_f^{-0.555}$	$\gamma = -0.939$	$C_1$
$\Delta\bar{\epsilon}_d = 0.130N_f^{-0.500}$	$\gamma = -0.925$	$C_2$			

(3)

式中  $\gamma$ ——相关系数

(3)式考虑了每组试样的所有的数据, 采用最小二乘法回归。

图 3 给出了有关数据及其回归线。为使图 3 看起来比较清晰,  $B_1$  以下各组的数据点没有画出。由图 3 可知, 随着  $\Delta\bar{\epsilon}_d$  的增大  $N_f$  降低。C-M 关系式中的材料参量  $C$  和  $\alpha$  决定了回归线的位置和斜率。尽管我们的试验材料都是低碳钢, 但各组的回归线散得比较开。各组材料的成份和热处理制度并不相同。可能是数据散漫的一个原因, 但这恐怕不是唯一的原因。数据分散给应用带来了困难。于是我们进行了大应变低周疲劳断裂行为的微观研究, 寻找其原因。

**3.2 扫描电镜 (SEM) 观察** 对疲劳试样的断口进行扫描电镜观察, 发现其断裂机制由疲劳解理逐步向延性韧窝过渡, 这取决于与应变累积有关的疲劳失效周次的多少。图 4 显示了一些断口的 SEM 照片。图 4a 是  $N_f = 431$  cycle 的断口形貌, 这是比较典型的低碳钢低周疲劳断口。图下方标有“a”字样的地区是疲劳裂纹源, A、B、C 是疲劳条纹, 表明疲劳裂纹从裂纹源一个循环一个循环地向上方扩展。条纹之间为疲劳解理。间或可见细小的微空洞散布在条纹局部附近, 而这个地区正是起始循环施加拉伸载荷所留下来的痕迹。如果  $N_f$  低于 100 cycle, 则很难看到条纹和疲劳源。

图 4b 为  $N_f = 37$  cycle 的断口。表明延性韧窝已占断裂模式的支配地位。在断口上微孔洞的分布是随机的, 不如图 4a 那样在条纹附近集中。在某些部位微空洞已开始聚集, 这说明起始循环的拉伸载荷所造成的损伤已经相当大了。

从疲劳试样的断口微观分析可知, 起始循环拉伸载荷所引起的延性韧窝损伤对最终疲劳失效有影响, 而且这种影响随着失效周次的降低 (即加大应变幅度) 越来越重要。这在 C-M 关系式中没有体现出来。同时, 这种影响还与三向应力程度有关, 三向应力会促进微空洞的形成。

**3.3 广义循环应变幅度** 由上述可知, 影响大应变低周疲劳最终失效的因素比较多, 如果按照单一参量的 C-M 关系式归纳数据, 往往会出现散漫的结果。前人对此早有许多议论, 如 Chell<sup>[6]</sup> 曾建议疲劳裂纹扩展的一种损伤累积模型, 他认为疲劳损伤可以分为两部分, 一部分是由静载引起的, 另

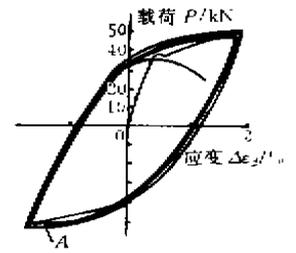


图 3 循环载荷—应变滞线  
 $N_f = 8$   $\Delta\epsilon_d = 3.75\%$

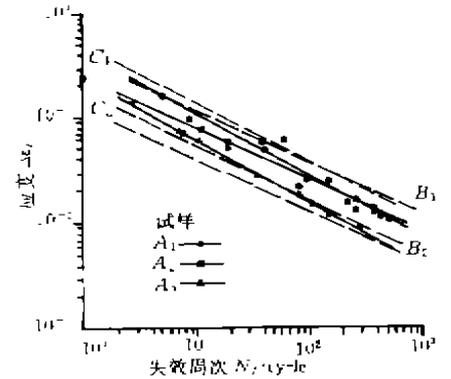


图 3  $N_f$  与  $\Delta\bar{\epsilon}_d$  的关系

一部分是由循环载荷引起的。Shimada 和 Furuya<sup>[7]</sup> 根据裂纹尖端局部应变概念,提出一种损伤累积模型:按照他们的模型,不论是疲劳裂纹的萌生还是扩展,都可作同样的处理。一旦载荷所引起的局部应变累积到了某一临界值,材料就失效了。可惜的是他们都没有作出具体的定量分析。为此,我们对低碳钢大应变低周疲劳定义了一个损伤判据。

$$(\epsilon_s^0/\epsilon_f) + (\Delta\bar{\epsilon}_d/CN_f^m) = 1 \quad (1)$$

此式左边第一项代表了静态损伤,由参量  $\bar{\epsilon}$  来度量。

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_s^0/\epsilon_f \quad (5)$$

它是起始循环径向应变与断裂应变之比。这部分损伤程度可由材料的断裂韧性来决定。第二项是整个疲劳寿命期间的径向应变平均幅度,这部分损伤是反复加载的循环累积。可以看出,后一项是遵守 C-M 关系式的。

按照损伤力学原理,我们还可以进一步定义疲劳寿命期间的塑性应变平均幅度为:

$$\Delta\bar{\epsilon} = \Delta\bar{\epsilon}_d/(1 - \bar{\epsilon}) \quad (6)$$

这样就静态损伤考虑进去了。将(5)、(6)式代入(4)式,将会有 C-M 关系式的修正式。

$$\Delta\bar{\epsilon} = CN_f^m \quad (7)$$

如果失效周次由  $N_f=100$  cycle 降低,甚至减少到  $N_f=1$ ,我们计算<sup>[5]</sup>不同的缺口由  $\bar{\epsilon}$  所代表的静态损伤所占份额可以是:忽略不计( $\leq 0.02$ );较小( $\leq 0.08$ );较大( $> 0.10$ )。

我们提出来的低碳钢大应变低周疲劳损伤判据式(4),满足两种极端情况。当  $\bar{\epsilon} \rightarrow 0$ ,式(4)就还原成 C-M 关系式的原型。然而,如果  $\bar{\epsilon}$  很大,以致于使  $\Delta\bar{\epsilon}_d=0$ ,则式(4)就成为静态断裂判据: $\epsilon_s^0 = \epsilon_f$ 。三向应力程度对低碳钢大应变低周疲劳也有影响。Bridgman<sup>[8]</sup>就轴对称圆柱形试样中的三向应力程度进行了计算:

$$\sigma_m/\sigma_e = (1/3) + \ln[(d_0/4R) + 1] \quad (8)$$

式中  $\sigma_m, \sigma_e$ ——平均应力与等效应力

$d_0$  和  $R$  的几何意义见图 1。一般情况下可按式(8)计算三向应力程度,  $\sigma_m/\sigma_e$ 。可是,在大应变情况下缺口的曲率半径会有变化,变形增大,尖缺口会钝化。与此相反,钝缺口由于出现缩颈而锐化。李国琛等人<sup>[9]</sup>对这种效应进行了有限元计算。我们在计算三向应力程度时采纳了他们的数据。

为了能使式(6)中的  $\Delta\bar{\epsilon}$  概括三向应力的影响,再一次定义广义的循环应变幅度为:

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{1 - \bar{\epsilon}} \left[ \frac{(\sigma_m/\sigma_e)}{(\sigma_m/\sigma_e)_0} \right]^m \Delta\bar{\epsilon}_d \quad (9)$$

$(\sigma_m/\sigma_e)_0$  按照比较光滑的试样计算的,开始加载时  $(\sigma_m/\sigma_e)_0 = 0.37$ 。 $m$  为材料的缺口敏感性。

引进静态损伤以及三向应力程度的影响,使图 3 的数据散漫情况得到明显的改善,见图 5。该图是假设广义的循环应变幅度  $\Delta\epsilon$  遵守 C-M 关系式,即  $\Delta\epsilon = CN_f^m$  绘出的。所用参量如表 4 所示。

由图 5 和表 4 可知,各组实验数据的回归线均有比较满意的相关系数,说明我们的修正结果符合实验结果。图 5 中还画出了标有 C-M 符号的实线,这条线是用 A 组数据按照(1)式作出的。显然这条线的位置最低。各组数据的回归线都相互趋向重合,只有当  $N_f$  接近  $10^3$  时趋于分开。这是因

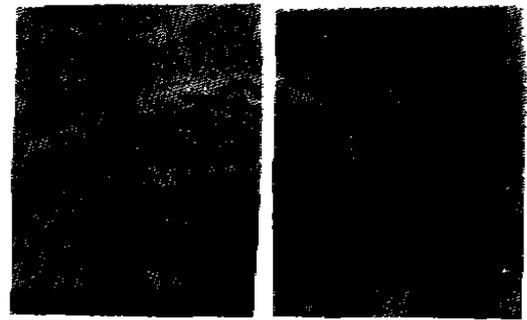


图 4 扫描电镜断口照片

(a)  $N_f = 431$  cycle,  $\times 50$  (b)  $N_f = 37$  cycle,  $\times 700$

表 4 用于式(9)和式(10)的一些参量 ( $\sigma_m/\sigma_e)_0 = 0.37$

组号	缺口敏感性 $m$	塑性系数 $C$	塑性指数 $\alpha$	相关系数 $\gamma$
A	0.45	0.515	-0.609	-0.986
B	0.88	0.512	-0.543	-0.960
C	1.34	0.683	-0.567	-0.929

为此时静态损伤以及三向应力程度的影响不大。

#### 4 结论

a 建议采用广义循环应变幅度  $\Delta\varepsilon$  来描述低碳钢的大应变低周疲劳的断裂行为。 $\Delta\varepsilon$  包括三个影响因素:塑性应变平均幅度、静态损伤以及缺口处三向应力程度。这种修正扩大了 Coffin-Manson 关系式在  $N_f=1\sim 100$  cycle 范围的应用。

b  $N_{cr}/N_f$  的比例取决于三向应力程度。 $N_{cr}/N_f$  随着缺口根部的曲率半径的减小而降低。

c 随着  $N_f$  的降低,低碳钢大应变低周疲劳的断裂模式逐渐由疲劳解理向延性韧窝过渡。

#### 致谢

国家自然科学基金委员会和中国科学院基金对本课题提供了部分资助,谨表谢忱。参加疲劳测试工作的还有余祥卫和胡社军。涂国清和陈建国制作了大应变径向延伸计。谨向他们表示感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 Tavernilli J F, Coffin L F Jr. Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, J Basic Engng, 1962;84:533~537
- 2 Manson S S. Discussion. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, J Basic Engng, 1962;84:537~541
- 3 余祥卫,张以增. 球化低碳钢的低周疲劳循环特性. 机械强度, 1989;11(2):13~16
- 4 D'Haeyer R, Simon P. Low Cycle Fatigue Behavior of Thick High-strength Steel Plates for Pressure Vessel. ASTM STP 770, 1982;296~310
- 5 樊卫东. 20Cr 钢高应变低周疲劳性能. 华中理工大学硕士学位论文, 1991
- 6 Chell G G. Fatigue Crack Growth Laws for Brittle and Ductile Materials Including the Effects of Static Modes and Elasto-plastic Deformation. Fatigue Engng Mater. Struct., 1984;7:237~250
- 7 Shimada H, Furuya Y. Local Crack-tip Strain Concept for Fatigue Crack Initiation and Propagation. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, J Engng Mater Tech., 1987;109:101~106
- 8 Bridgman P W. Studies in Large Flow and Fracture. McGraw-Hill, NY, 1952;9~37
- 9 Li G C (李国琛), Yang G Y. Computer Simulation of the Ductile Fracture Behavior in Axisymmetric Bars. In: Too J J M ed., Computer Modelling of Fabrication Processes and Constitutive Behavior of Metals, Ottawa, Canada, 1986;385~396

(上接第 28 页)

(1) 所取的拟合点数  $N$  对于 38CrMoAl 材料在同样的条件下进行拟合, 仅改变参数拟合的点数  $N$ , 结果发现随着  $N$  的增大,  $n$  将稳定在某一个范围, 欲使拟合结果误差在 5% 之内, 一般应取  $N > 20$  才行。

(2) 应变范围 当采用不同的应变范围  $\varepsilon/\varepsilon_b$  时, 随着  $\varepsilon/\varepsilon_b$  从 60% 变化到 100% 时, 硬化指数有所增大。但对 Luo 关系而言, 对应变范围比较敏感, 而对纯幂关系和 R-O 关系而言, 拟合结果较稳定。当拟合时应变范围取为 95%  $\varepsilon_b$ , 结果比较可靠稳定。

(3) 不同应力应变关系式的结果评价 就标准差而言, Luo 关系较好, 纯幂关系最差。Luo 关系在前一段(即应变值较小时)与实际曲线符合较好, 而 R-O 关系在后一段更接近于实际情形。另外对较脆的材料不宜采用纯幂关系拟合。

#### 参 考 文 献

- 1 美国试验与材料学会. Standard Test Method for Tensile Strain-hardening Exponents ( $n$ -Values) of Metallic Sheet Materials. ASTM E646~78
- 2 罗学富. 可压缩理想弹塑性裂纹定常扩展尖端场. 清华大学博士学位论文, 1988
- 3 Hwang K C, Luo X F, Liu X H, Sun X W. Theory, Experiment and Computation of Resistance Curve for Crack Growth. SMiRT 10, Transactions Vol. G, Los Angeles, U. S. A., 1989. 8

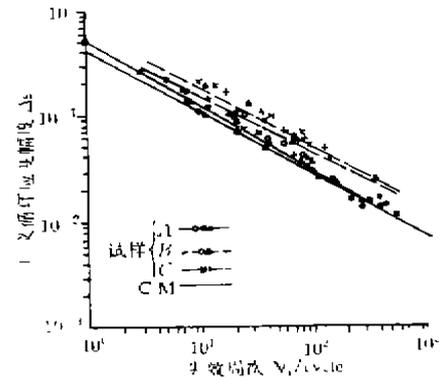


图 5  $N_f$  与广义循环应变幅度  $\Delta\varepsilon$  的关系