

## 二维热应力疲劳及裂纹形态\*\*

冯钧一· 边孟欣· 党紫久·

**摘 要:** 研究了不同应力比的二维热应力疲劳试验并进行了数值分析。结果表明: 热疲劳裂纹的形态决定于两个主应力的比和两个主塑性应变的比; 直线型裂纹的方向垂直于最大主应力方向; 两个主应力的值和两个主塑性应变值相近时出现网状龟裂。

**关键词:** 疲劳, 热疲劳, 热应力, 裂纹

## Biaxial Thermal Stress Fatigue and Crack Morphology

*Feng Junyi· Bian Mengxin· Dang Zigou·*

**ABSTRACT:** The experiment and numerical analysis of biaxial thermal stress fatigue under various stress ratio. The results show that the morphology of thermal fatigue cracks depend on both ratio of two principal stresses and ratio of two principal plastic stress, and the direction of straight crack is perpendicular to the direction of maximum principal stress. Netty thermal fatigue crack will occurs when two principal stress and two principal plastic strains are approximately equal to each other.

**KEY WORDS:** fatigue, thermal fatigue, thermal stress fatigue, thermal fatigue test

热疲劳是机械工程中常见的破坏现象,但热疲劳问题又是十分复杂,涉及到许多因素,如温度的上下限、高温的持续时间、应力大小、环境……等,因此热疲劳的研究工作基本上还停留在定性分析和试验模拟的阶段。

1990—06—13 收稿 ·· 本文得到冶金部基础研究基金的支持

· 数力系 (Department of Mathematics and Mechanics)

Coffin公式:

$$\Delta \varepsilon_p N_f^c = C^{(1)} \quad (1)$$

为定量研究热疲劳问题奠定了基础,可以由塑性应变范围 $\Delta \varepsilon_p$ 来确定热疲劳循环的寿命 $N_f$ ( $a, C$ 为由材料性质决定的常数)。由于热疲劳寿命的控制因素很多,而且温度场、应力场都是瞬态问题,使热疲劳寿命的定量分析困难重重,考虑在多维应力作用下的热疲劳破坏、裂纹的形态、裂纹的传播等问题至今只有很少报导<sup>[2]</sup>。

本文对3Cr2W8V钢在二维应力、应变状态下的热疲劳问题作了定量分析和实验研究,对热疲劳中应力、应变状态和疲劳裂纹形态的关系得到一些有意义的结论。

## 1 热疲劳试验

### 1.1 试验方法和设备

试验在GLEELE-1500热模拟试验机上进行。试样为圆柱体,中间工作段为 $\phi 10\text{mm}$ 。试样缓慢加热到高温,然后喷水快速冷却,试样内将产生二向热应力(周向和轴向应力)。试样的加热、冷却反复进行,形成反复的热应力循环。不同的试样采用相同的加热、冷却制度,在试样快速冷却的同时对不同的试样施加0~24kN的轴向力 $F_x$ ,这样在不同的试样内产生不同的应力比 $\sigma_\theta/\sigma_x$ 、应变比 $\varepsilon_\theta/\varepsilon_x$ 、和塑性应变比 $\sigma_{p\theta}/\sigma_{px}$ (这里 $\theta$ 表示周向, $x$ 表示轴向),然后观察试样的热疲劳破坏现象。

试样材料为3Cr2W8V,在1100℃下油淬,570℃下保温2h后炉冷,试样加热上限温度为720℃,喷水4s,下限温度约为210℃。试样的加热和加轴力的曲线如图1,每根试样的热疲劳循环次数均为150次。

试验机由计算机自动控制和采集试样中的温度、时间、轴向力的数据,并根据需要自动输出这些参数间的关系曲线,为了使试样冷却均匀,作者对试验机的喷水装置进行了改进。

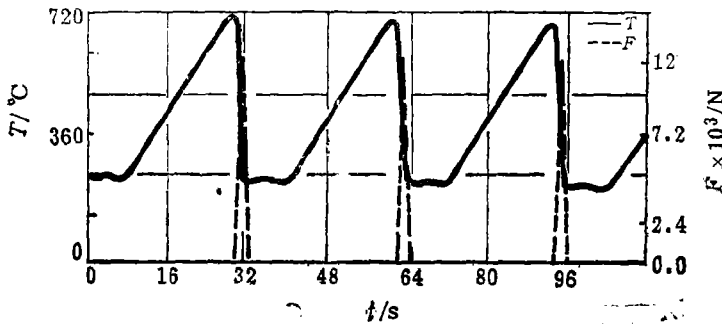


图1 温度、轴向力对时间的变化曲线

Fig.1 Change of temperatures and axial force on time

### 1.2 试验结果

图2显示了5个试样的热疲劳裂纹的情况。可以看出:当轴向力为零和轴向力很大时( $F_{x\max} = 24\text{kN}$ ),试样表面均产生直线形裂纹(图2, a, e),裂纹方向分别为轴向和垂直于轴向。当轴向力居于前两者之间时试样上出现龟裂,龟裂的大致形状随轴向力的增大,由

长轴平行于轴向的长方形变为大致为正方形状，再变为长轴垂直于轴向的矩形（图2，b，c，d）。可见热疲劳裂纹随轴向力由小到大发生形态和方向的转变。

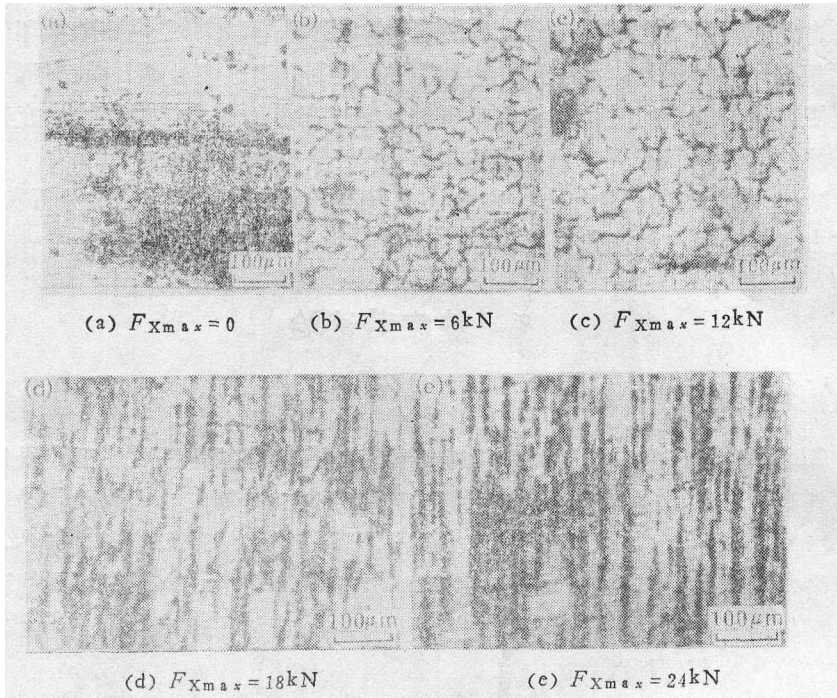


图2 150次循环后热疲劳裂纹的显微照片

Fig.2 Micrographs of thermal fatigue cracks after 150 cycles (the specimen axis is horizontal)

## 2 瞬态温度场和应力场的数值分析

本文用逼近法解决了瞬态温度场的数值计算问题(可参考文献[4, 5])。其基本原理是：轴对称问题的热传导方程经过用后差分格式展开 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 以后得到的有限元方程为：

$$\left( [H] + \frac{[N]}{\Delta t} \right) \{T\}_t = \{P\}_t + \frac{[N]}{\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} \quad (2)$$

其中 $\{T\}_t$ 和 $\{T\}_{t-\Delta t}$ 分别为 $t$ 时刻和 $t - \Delta t$ 时刻的温度列阵。矩阵 $[H]$ 、 $[N]$ 、 $\{P\}$ 决定于 $k$ 、 $C_p$ 、 $q$ 、 $a$ ，这样由(2)式可以从 $t - \Delta t$ 时的温度 $T_{t-\Delta t}$ 计算出 $t$ 时刻的温度 $T_t$ 。然而这四个常数都随温度有很大的变化，材料的导热系数 $k$ 和比热 $C_p$ 由手册上可以查到数据，经回归分析后取近似值。

决定于热传导边界条件的热流量密度 $q$ 和换热系数 $a$ 随温度、材料、介质的不同有很大的变化。本文根据实测的表面温度经多次比较，迭代确定 $q$ 或 $a$ 值，从而计算出整个试样在降温过程中的温度场，具体计算方法详见文献[5]。

有了试样的瞬态温度场就可以用热弹塑性有限单元法来分析试样中的应力场和应变场。由于试样已进入塑性状态，并且温度变化较大，因此材料的力学性能也会有大范围的变化。

文中对试验材料从20~750℃在MTS材料试验机上做了5种不同温度的性能试验,得到各种温度下的应力应变曲线,这是用热弹塑性有限元法计算应力场、应变场所必需的。

有限元计算的基本方程是:

$$[K]_{i-1} \Delta\{\delta\}_i = \Delta\{P\}_i \quad (3)$$

这里 $[K]_{i-1}$ 是时间增量 $\Delta t_i$ 以前的刚度矩阵。 $\Delta\{P\}_i$ 和 $\Delta\{\delta\}_i$ 是时间增量 $\Delta t_i$ 中的载荷(包括温度载荷)增量和位移增量(未知的),从方程(3)中求出 $\Delta\{\delta\}_i$ ,并由 $\Delta\{\delta\}_i$ 求出塑性应变增量 $\Delta\{e_p\}_i$ ,应变增量 $\Delta\{e\}_i$ 和应力增量 $\Delta\{\sigma\}_i$ :

$$\left. \begin{aligned} \{e_p\}_n &= \{e_p\}_{n-1} + \Delta\{e_p\}_n \\ \{e\}_n &= \{e\}_{n-1} + \Delta\{e\}_n \\ \{\sigma\}_n &= \{\sigma\}_{n-1} + \Delta\{\sigma\}_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由方程(4)可以求得任一瞬间试样内的应力场、应变场和塑性应变场。

图3表示喷水冷却1.5s后在距试样中性线3mm处,试样表面的应力、应变和塑性应变的大小。

在瞬态应力场、应变场的计算中,时间增量 $\Delta t_i$ 和瞬态温度场计算中的时间增量是相同的。

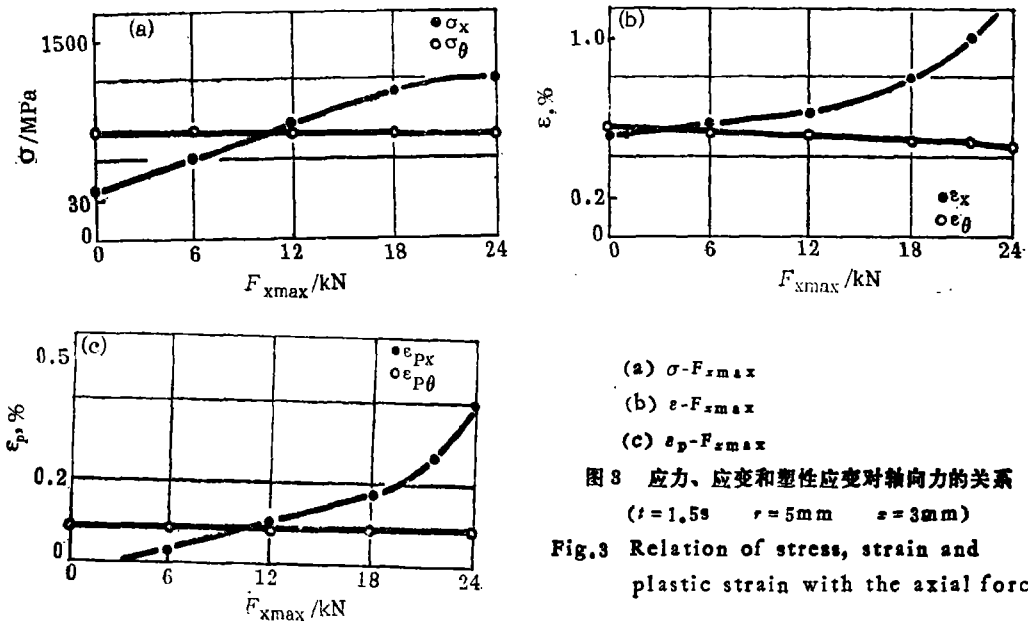


图3 应力、应变和塑性应变对轴向力的关系  
( $t=1.5s$   $r=5mm$   $s=3mm$ )  
Fig.3 Relation of stress, strain and plastic strain with the axial force

### 3 分析和讨论

由上述计算方法确定的试样中的应力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_\theta$ ,应变 $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_\theta$ ,塑性应变 $\varepsilon_{px}$ 、 $\varepsilon_{p\theta}$ ,和图2中显示的试样的裂纹综合起来。

可显示出:当 $\sigma_\theta > 2\sigma_x$ 或 $\varepsilon_{p\theta} \gg \varepsilon_{px}$ 时试样表面呈现直线型裂纹,裂纹走向平行于轴线 $x$ ,而垂直于 $\sigma_\theta$ 、 $\varepsilon_{p\theta}$ ;当 $\sigma_\theta$ 和 $\sigma_x$ ,或 $\varepsilon_{p\theta}$ 和 $\varepsilon_{px}$ 数量上大体相当时,试样表面呈现网状龟裂;当

$\sigma_r > 1.5\sigma_\theta$  或  $\varepsilon_{p,r} > 4\varepsilon_{p,\theta}$  时也呈现直线型裂纹, 并垂直于轴线, 即垂直于  $\sigma_x$  和  $\sigma_\theta$ 。

在上述情况下虽然轴向力有很大的变化, 但最大主应变方向没有变化, 始终有  $\varepsilon_x \geq \varepsilon_\theta$ 。

从上述分析可以看出: 当轴向力由小到大变化时, 导致应力状态和塑性应变状态的转变, 相应地热疲劳裂纹的形态也产生转变。直线型裂纹的走向总是垂直于最大主应力  $\sigma_1$  和最大塑性应变  $\varepsilon_{p,1}$  的方向。龟裂对应于两个主应力大致相等和两个主塑性应变大致相等的情况, 虽然热疲劳裂纹的形态有很大的变化, 但相应的应变状态却变化不大。

上述的结果也可以说明著名的 Coffin 试验的结果。因为 Coffin 试验为薄壁圆管试样, 温度是均匀的, 所以有:  $\sigma_\theta = \sigma_r = 0$   $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = a\Delta T$   $\varepsilon_{p,r} = \varepsilon_{p,\theta} = 0$  又因薄壁圆管的两端为固定, 所以有

$$\sigma_x \neq 0 \quad \varepsilon_x = \varepsilon_x^T + \varepsilon_x^P + \varepsilon_x^S = 0$$

可见最大主应力和最大塑性应变方向都是轴线方向, 按照该文的结论推断, Coffin 试验的裂纹一定为直线形裂纹, 并且和薄壁圆管的轴线方向相垂直, Coffin 试验的试样正是这样破坏的。

## 4 结 论

(1) 热疲劳裂纹的形态决定于应力状态和塑性应变状态, 因此, 材料的热疲劳性能试验或零件的热疲劳设计时, 应考虑到应力状态的影响。

(2) 当  $\sigma_1 > 1.5\sigma_2$  或  $\varepsilon_{p,1} > 4\varepsilon_{p,2}$  时热疲劳裂纹呈现为直线型, 裂纹走向与  $\sigma_1$  或  $\varepsilon_{p,1}$  的方向垂直, 当  $\sigma_1 \approx \sigma_2$  或  $\varepsilon_{p,1} \approx \varepsilon_{p,2}$  时热疲劳裂纹呈现为网状龟裂。

## 参 考 文 献

- 1 Coffin L F Jr. Transaction, ASME, Aug., 1954, 931~950
- 2 Mowbray D F and Mcconnelee J E. ASTM, STP-612, 1976; 10~29
- 3 Ziekiewicz O C. The Finite Element Method, Third Edition, 1977, 450~460, McGraw-Hill
- 4 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用, 第二版, 北京: 中国科学出版社, 1986
- 5 冯钧一, 陈剑南. 机械强度, 1989, (3): 31~34