

蠕变-疲劳交互作用的电子显微学研究*

孔庆平 王翔 周浩 倪群慧

(中国科学院固体物理研究所,合肥)

1985年11月27日收到

提 要

用透射电子显微镜和扫描电子显微镜研究了一种镍基合金(Nimonic 75型)蠕变-疲劳交互作用的机制。在温度873K,应力幅392 MPa下进行的实验表明,蠕变、疲劳和“蠕变叠加疲劳”数据近似满足线性累积损伤规律。扫描电子显微镜断口观察表明,所有试样均发生晶间型断裂。但用透射电子显微镜进行的位错观察指出,在蠕变、疲劳和“蠕变叠加疲劳”试样中,位错组态有明显的差别。这些不同的位错组态,对晶间断裂过程产生了各自不同的影响,因而蠕变损伤与疲劳损伤相互独立,在宏观上表现出线性交互作用的规律。本工作表明,透射电子显微学对于揭示蠕变-疲劳交互作用的机制有很大的潜力。

一、引 言

很多高温材料经受着蠕变与疲劳的复合作用。在这样的复合作用下,蠕变-疲劳交互作用的规律可分为线性和非线性两种。线性交互作用,即不发生交互作用,此时断裂寿命符合线性累积损伤法则:

$$\phi_c + \phi_f = 1, \quad (1)$$

式中 ϕ_c 为蠕变损伤分数, ϕ_f 为疲劳损伤分数。在非线性情况下,(1)式中应加入交互作用项:

$$\phi_c + B(\phi_c \cdot \phi_f)^{1/2} + \phi_f = 1, \quad (2)$$

式中 B 为交互作用系数。当 $B > 0$ 时,为正交互作用,此时断裂寿命比线性法则预期的要低。当 $B < 0$ 时,为负交互作用,此时断裂寿命比线性法则预期的要高。当 $B = 0$ 时,即线性交互作用的情况。

蠕变-疲劳交互作用的研究,对于预测材料使用寿命有重要的意义。最近十多年来,国内外这方面的研究日益增多^[1-6],但多半偏重于宏观规律方面。从微观上阐明交互作用本质的工作还不多。

固体缺陷在蠕变和疲劳过程中的行为,分别已有不少研究。而在蠕变-疲劳交互作用中,固体缺陷(位错、晶界等)所起的作用,至今还很少有人研究。

本文以透射电子显微镜和扫描电子显微镜为主要手段,对蠕变-疲劳交互作用下的试样断口和内部位错结构,进行了观察和分析,试图从固体缺陷的微观结构变化阐明交互作

* 中国科学院科学基金资助的课题。

用宏观规律的本质。

二、试样和实验方法

试验材料是一种成分比较简单的常用镍基合金 (Nimonic 75 型), 基体是面心立方结构。我们对它在高温蠕变过程中的位错结构, 进行过较细致的研究^[7,8]。材料成分为: Cr20%, Ti0.4%, C0.1% (重量比), 其余为 Ni。试样标距部分的长为 30mm, 宽为 3mm, 厚为 2mm。热处理温度为 1273K, 保温 20min, 空气中冷却。

在蠕变试验机上按装了周期性自动加载、保载和卸载的装置, 用来进行蠕变-疲劳交互作用的实验。加载和卸载的一个周期 $t = 1\text{min}$, 加载保持时间 Δt 有五种: $\Delta t = 0$ (纯疲劳); $\Delta t = 20\text{s}, 1\text{min}, 5\text{min}$ (蠕变叠加疲劳); $\Delta t = \infty$ (纯蠕变)。实验温度为 873K, 应力幅 $\sigma = 392\text{MPa}$, 卸载后保留的应力 $\sigma_0 = \sigma/10 = 39.2\text{aMPa}$ 。

断裂后的试样, 用 ASM-SX 型扫描电子显微镜进行断口观察。然后将试样用电火花沿纵向切割成薄片, 再经机械抛光和双喷电解抛光, 制成薄膜。用 JEM-200CX 型高分辨透射电子显微镜进行观察, 工作电压 200kV。

三、实验结果和分析

力学实验结果表示在以 N/N_f 为纵坐标、 $\sum \Delta t/t_r$ 为横坐标的蠕变-疲劳交互作用图中 (图 1)。其中 N/N_f 为疲劳损伤 ϕ_f , $\sum \Delta t/t_r$ 为蠕变损伤 ϕ_c 。 N_f 为纯疲劳断裂周期数, t_r 为纯蠕变断裂时间, N 和 $\sum \Delta t$ 分别表示蠕变-疲劳复合实验断裂时的循环周期数和累计保持时间。

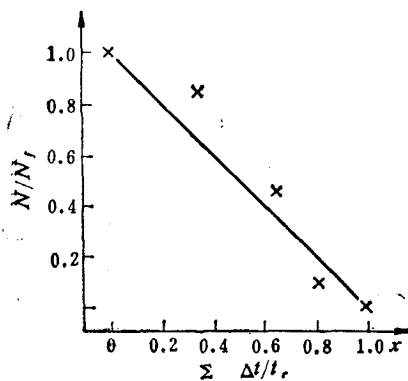


图 1

由图 1 可以看出, 在本实验条件下, 实验数据近似满足线性累积损伤法则, 即蠕变与疲劳之间发生线性交互作用, 即满足(1)式。

断裂后的试样, 用扫描电子显微镜进行断口观察。纯蠕变的断裂是晶间型的 (图 2 (见图版 I))。纯疲劳 (图 3 (见图版 I)) 和“蠕变叠加疲劳”的断裂, 也是晶间型的。仅由断口分析, 难以鉴别由蠕变引起的晶间断裂, 或由疲劳引起的晶间断裂。

将断裂试样沿纵向线切割, 制成薄膜, 对靠近断口的部位, 进行透射电子显微镜观察。在蠕变试样中, 观察到由不均匀分布的位错形成的胞状结构, 如图 4 (见图版 I)。这与我们以前的蠕变观察结果^[7,8]相符。位错攀移在形成这样的胞结构中起了重要作用。

在疲劳试样中, 观察到大量的条带状位错结构, 如图 5 (见图版 I)。条带间距 0.2—0.7 μm 不等。在疲劳试样中, 还观察到大量的平行位错组, 如图 6 (见图版 I)。这些都是晶内滑移的结果, 这时攀移未能充份地进行。

在“蠕变叠加疲劳”试样中,位错组态是蠕变和疲劳两种效应的组合,即兼有位错胞结构和平行位错组,如图 7 (见图版 I)。在这种试样中,也观察到类似图 5 的条带状位错结构。

此外,在所有断裂试样中都观察到位错缠结。在某些疲劳试样中,还观察到位错缠结聚集在晶界附近。这将导致晶界处的应力集中和晶间断裂。

上述观察表明,在本文实验条件下,高温蠕变和高温低周疲劳都引起晶间断裂。但它们内部的位错组态有明显的差别。一般认为,晶间断裂主要是由晶界相对滑动引起的,但同时也伴随着与之协调的晶内变形。晶内变形的机制,对晶间断裂过程将产生一定的影响,甚至起控制作用。本文观察到的蠕变与疲劳试样中不同的位错组态,将对晶间断裂过程产生各自不同的影响。因而,蠕变损伤与疲劳损伤相互独立,在宏观上表现出线性交互作用的规律。

四、结 语

1. 一种 Nimonic 75 型镍基合金在本文实验条件下,蠕变与低周疲劳之间发生线性交互作用。

2. 扫描电子显微镜断口观察表明,蠕变、疲劳和“蠕变叠加疲劳”试样均发生晶间断裂。仅由断口观察,难以鉴别高温下由蠕变引起的晶间断裂或由疲劳引起的晶间断裂。

3. 透射电子显微镜观察结果指出,蠕变、疲劳或“蠕变叠加疲劳”试样内部的位错组态,有明显的差别。这些不同的位错组态,对晶间断裂过程产生了各自不同的影响。因而,蠕变损伤与疲劳损伤相互独立,在宏观上表现出线性交互作用的规律。

本工作表明,透射电子显微学对于揭示蠕变-疲劳交互作用的机制,有很大的潜力。

本文中的试验机电路改装由孙志光和顾春辉同志完成,电子显微镜工作得到刘震锦和秦勇等同志帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 章安庆、孔庆平、师昌绪,金属学报,15(1979),518.
- [2] 章安庆、白元凯、肖跃天、孔庆平、师昌绪,第四届国际高温合金会议论文集(英文),(1980),623 页.
- [3] 何晋瑞、殷作祥、宁友连、赵迪,金属学报,21(1985),54.
- [4] R. A. Bartlett, W. J. Plumbridge, T. E. Chung, E.G. Ellison, ICF4, (1977), Vol. 2, p. 831.
- [5] A. Plumtree and N. G. Persson, ICF4, (1977), Vol. 2, p. 821.
- [6] H. J. Kolkman and R. J. H. Wanhill, Conference on Strength of Metals and Alloys, (1982), Vol. 2, p. 631.
- [7] 孔庆平、龙起易,物理学报,24(1975),83.
- [8] 孔庆平、王翔、倪群慧,物理学报,34(1985),973.

ELECTRON MICROSCOPY STUDIES ON THE INTERACTION BETWEEN CREEP AND FATIGUE

KONG QING-PING WANG XIANG ZHOU HAO NI QUN-HUI

(Institute of Solid State Physics, Academia Sinica, Hefei, China)

ABSTRACT

The mechanism of creep-fatigue interaction in a nickel base alloy (Nimonic 75 type) has been studied by transmission and scanning electron microscopy.

Experiments at 873 K and a stress amplitude 392 MPa showed that, the data of creep, fatigue and "creep combined with fatigue" obeyed approximately the linear cumulative law. Micrographs of fracture surfaces by SEM indicated that, the rupture was all intergranular. However, observations by TEM showed that, the dislocation configurations within fractured specimens were quite different among creep, fatigue and "creep combined with fatigue". We believe that different dislocation configurations have different influence on the process of intergranular rupture, and the damages due to creep and fatigue are independent with each other. Consequently, linear interaction between creep and fatigue occurs macroscopically.

The present paper shows that TEM has great potentialities for revealing the mechanism of creep-fatigue interaction.