

# 一种铁基高温合金的周期蠕变

北京钢铁学院高温合金教研室 谢锡善 徐志超  
上 钢 五 厂 朱金元 林振通

## 摘 要

对GH132合金的周期蠕变研究指出,该合金在周期蠕变条件下其变形规律是复杂的,除了弹性应变,塑性应变外,还有滞弹性应变。这种变形规律的特征随周期应力卸载条件下最小应力的大小而变化。在高的最小应力条件下,可以表现为合金以不同的应变速率分别在高、低应力下交替地进行。

## 一、引 言

为了系统研究高温合金在接近使用条件下的变形及断裂,我们开展了一系列的工作。对GH132铁基合金在650℃,GH33A镍基合金在750℃周期持久交变应力条件下的断裂研究指出<sup>[1]</sup>,由于蠕变——疲劳的复合作用而使两种材料都表现为弱化。因为在周期持久试验条件下仅记录其断裂寿命,所以对周期交变应力条件下的蠕变变形规律一无所知。近年来Morris和Harris<sup>[2]</sup>、Halford<sup>[3]</sup>以及Tien等<sup>[4]</sup>对不锈钢和高温合金进行了周期蠕变的研究,显示出在周期交变应力条件下的动态蠕变曲线是非常复杂的。

国内对周期持久的研究工作已见公开发表<sup>[5,6]</sup>,但周期蠕变的工作尚未开展,为了探讨在周期蠕变条件下的变形规律、动态蠕变速率的控制因素以及不同周期应力条件下的断裂特征,作为系统研究的探讨而开展了本文的工作。

## 二、试验用料及方法

试料取自上钢五厂电弧炉+真空自耗大生产的GH132合金90mm方锻坯熔检试料,合金的化学成分见表1。

表1 GH132合金的化学成份(重量%)

| 合金    | 炉号     | C     | Si   | Mn   | S     | P     | Cr    | Ni   | Mo   | V    | Al    | Ti   | B     | Fe |
|-------|--------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|----|
| GH132 | 818-85 | 0.053 | 0.51 | 1.52 | 0.006 | 0.013 | 14.82 | 25.7 | 1.35 | 0.32 | 0.225 | 2.18 | 0.007 | 基  |

合金的热处理制度为:980℃/1小时/油冷+720℃/16小时/空冷。

试验是在上钢五厂自行改装的CC-2A型周期持久机基础上再扩大炉管加入形变测量装置,借用T-48型蠕变试验机上的传感器和读数仪,读数仪的精确度为 $10^{-4}$ mm,准确度是

$10^{-3} \text{ mm}$ 。周期蠕变试样为 $\phi 5 \times 25 \text{ mm}$ 的非标准试样。

周期蠕变试验的载荷谱如图 1 所示。采用固定最大应力 ( $\sigma_1$ )，固定频率，改变最小应

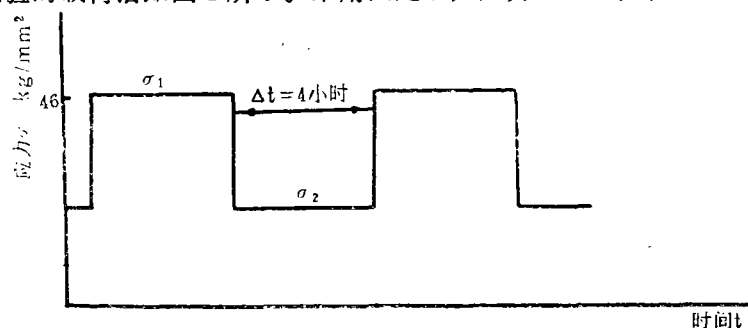


图 1 周期蠕变试验载荷谱

力 ( $\sigma_2$ )。因为不能自动记录变形量，所以采取尽可能多的定点测量。载荷谱中  $\Delta t = 4$  小时。在 4 小时中，分别在 0、0.5、1、2、3、4 小时测量变形，根据这些点绘出周期蠕变曲线并与静态蠕变曲线比较。具体试验条件见表 2。

表 2 周期蠕变试验条件

| 合 金                                  | GH132 |
|--------------------------------------|-------|
| 温 度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )       | 650   |
| 最大应力 $\sigma_1$ ( $\text{kg/mm}^2$ ) | 46    |
| 最小应力 $\sigma_2$ ( $\text{kg/mm}^2$ ) | 10    |
|                                      | 23    |
|                                      | 43    |
| 保持时间 $\Delta t$ (小时)                 | 4     |

为了分析周期蠕变条件下的断裂特征，将试样断口在 JCSA-733 型扫描电镜下作直接观察。试样观察前采用  $15\% \text{KMnO}_4 + 20\% \text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$  溶液煮沸 0.5 小时清洗。

### 三、结果和讨论

GH132 合金在  $650^{\circ}\text{C}$  保持最高应力  $\sigma_1$  为  $46 \text{ kg/mm}^2$ ，并分别改变最小应力  $\sigma_2$  为 10、23、 $43 \text{ kg/mm}^2$ （即分别为最高应力的 20%、50%、90%），保载时间为 4 小时的周期蠕变曲线与  $\sigma_1 = \sigma_2 = 46 \text{ kg/mm}^2$  的静态蠕变曲线综合示于图 2。如果以总保载时间来计算，周期蠕变寿命要高于静态蠕变寿命，且静态蠕变速率也高于其它三种条件下的动态蠕变速率（见图 3）。可以认为在这种周期应力条件下的蠕变是受平均应力（即  $\sigma_1 + \sigma_2 / 2$ ）所控制，由于平均应力的降低而明显地延长蠕变寿命。

仔细分析三种周期蠕变条件下的蠕变变形细节是有所不同的（见图 4、5、6），图 4a 为  $\sigma_1 = 46 \text{ kg/mm}^2$ ， $\sigma_2 = 10 \text{ kg/mm}^2$  条件下一个典型的加载和卸载周期中的变形规律（它是图 2 中曲线 D 的局部放大图），在加载的 4 小时中随着温度与时间的作用而产生一定

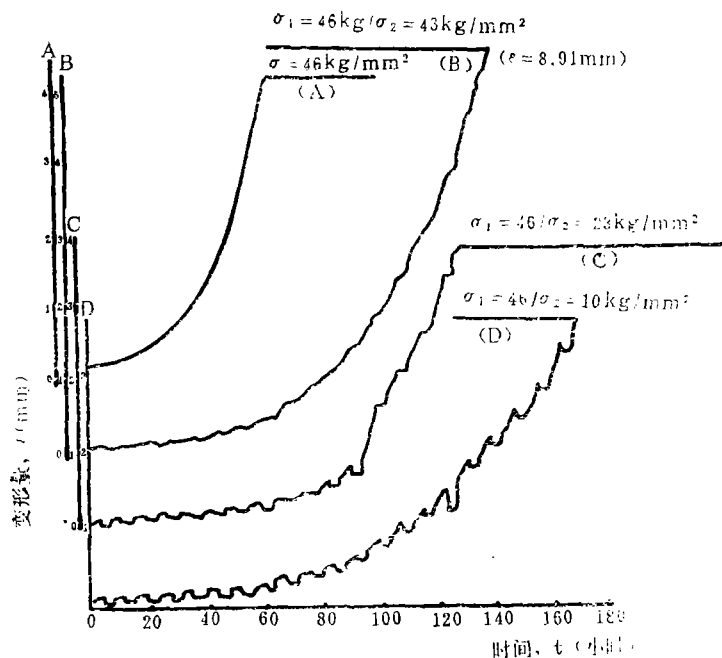


图2 GH132合金在650℃的周期蠕变及静态蠕变曲线

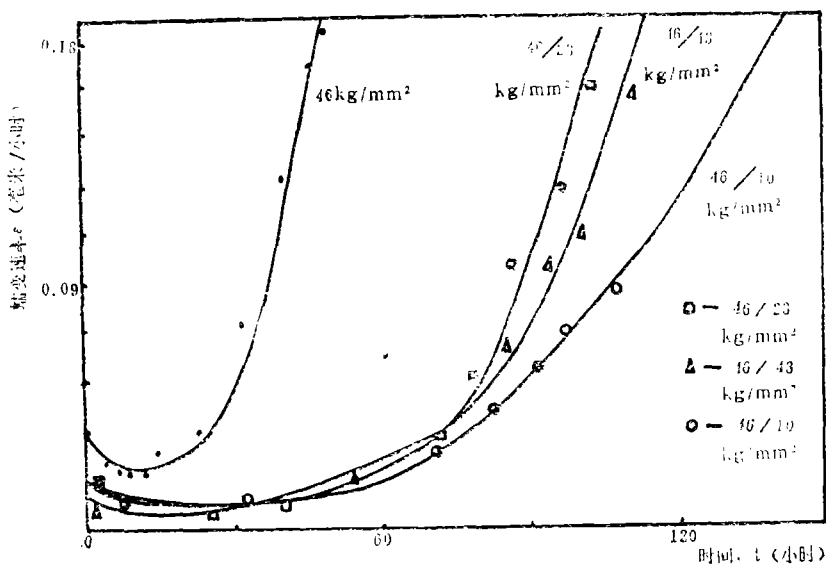


图3 GH132合金在650℃的周期蠕变及静态蠕变速度曲线

的应变。可是在卸载至低应力时除了弹性恢复外，还出现一个应变随时间的延续而逐渐降低以保持一个水平的应变弛豫过程，即所谓滞弹性现象<sup>[7]</sup>。这种滞弹性在图4b中表示为 $\epsilon_{\text{滞}}$ ，在下一个加载周期中弹性应变为 $\epsilon_{\text{弹}}$ 。在保载时间的总应变量中主要部分为蠕变变形量 $\epsilon_{\text{蠕}}$ ，但其中有一小部分是 $\epsilon_{\text{滞}}$ ，即在卸载到低应力时，将随着时间的延续而回复回去的滞弹性应变量。这就进一步明确了在高应力下保载的总应变量应为弹性应变、塑性应变和滞弹性应变三部分的总和，即 $\epsilon_{\text{总}} = \epsilon_{\text{弹}} + \epsilon_{\text{滞}} + \epsilon_{\text{蠕}}$ ，实际上造成蠕变变形的是其中的一部分塑性变形。

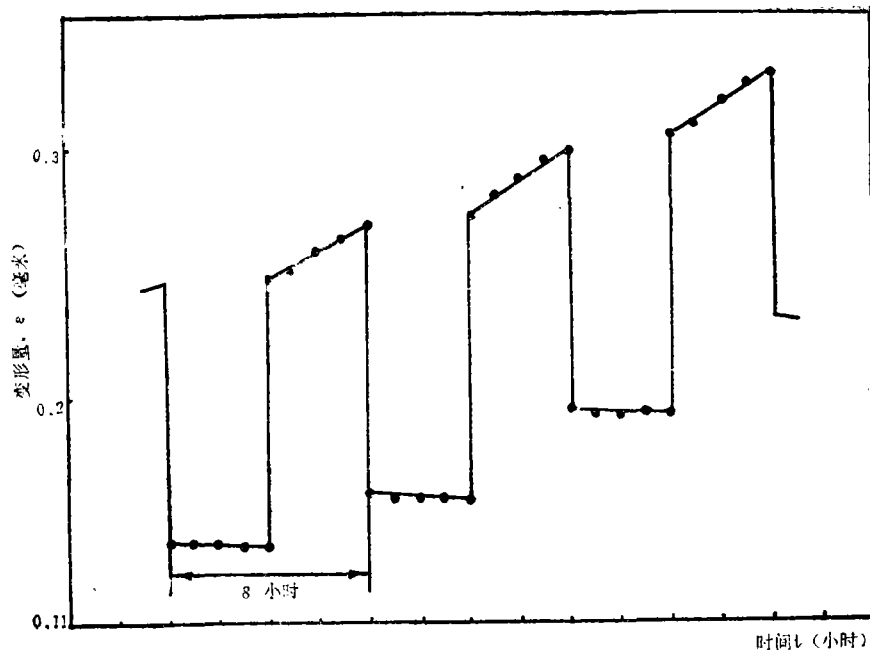


图4a GH132合金  $\sigma_1 = 46 \text{ kg/mm}^2 / \sigma_2 = 10 \text{ kg/mm}^2$  周期蠕变曲线局部放大图

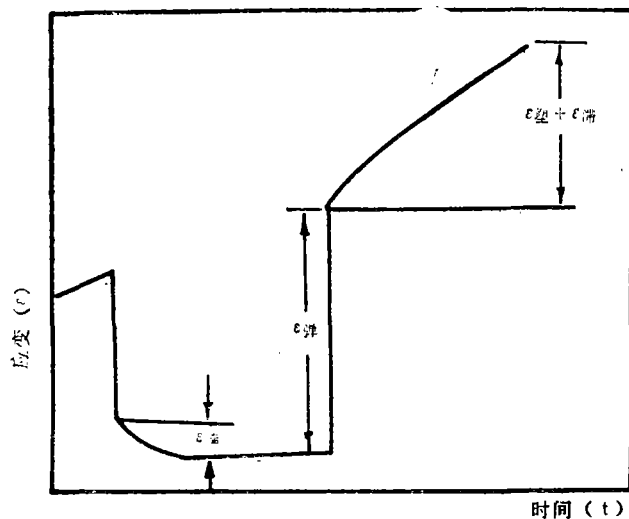


图4b 周期应力条件下的滞弹性

当增加最小应力  $\sigma_2 = 23 \text{ kg/mm}^2$  时, 这时试样的平均应力增加, 在卸载时除了弹性回复和应变弛豫外, 经过一定的孕育期后, 又继续发生蠕变。这个现象可以从图 5 中看出 (图 5 是图 2 中曲线 C 的放大图)。

当最小应力  $\sigma_2$  增高到  $(43 \text{ kg/mm}^2)$  滞弹性回复很少, 到试验后期几乎看不出来。这时作用在试样上的平均应力很高, 差不多接近最大应力, 所以应变弛豫和继续蠕变前的孕育期很难从蠕变曲线上反映出来。因此, 试样在高应力作用下, 以很高的应变速率进行变形, 在低应力下, 以较低的应变速率交替地进行变形, 直至断裂, 见图 6 (图 6 是图 2 中曲线 B 的放大图)。

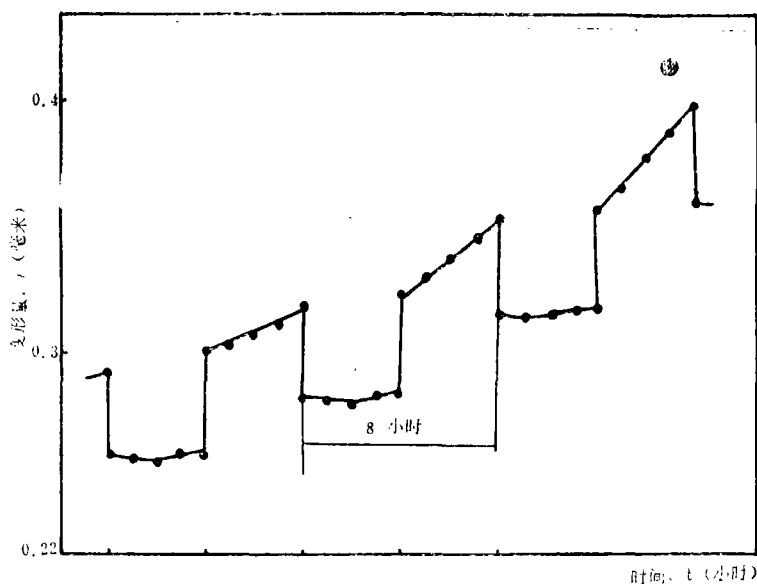


图5 GH132合金在 $\sigma_1 = 46 \text{ kg/mm}^2 / \sigma_2 = 23 \text{ kg/mm}^2$ ,  $650^\circ\text{C}$ 周期蠕变的局部放大图

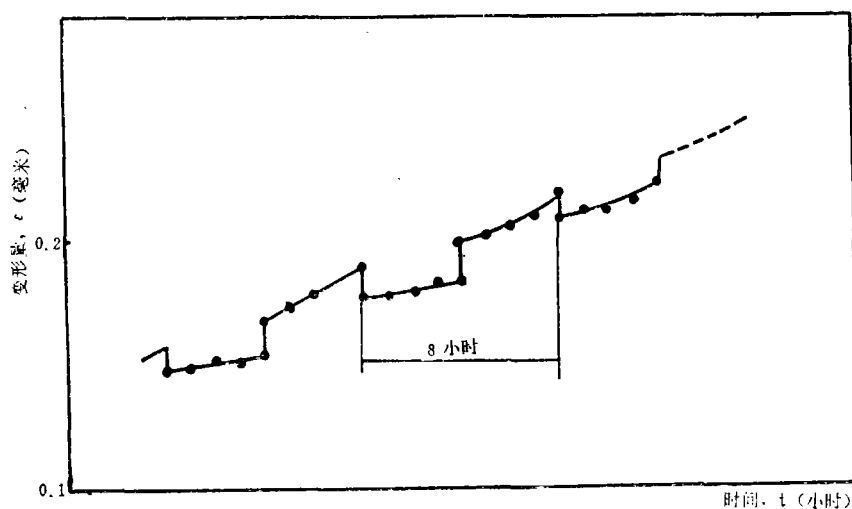


图6 GH132合金在 $\sigma_1 = 46 \text{ kg/mm}^2 / \sigma_2 = 43 \text{ kg/mm}^2$ ,  $650^\circ\text{C}$ 周期蠕变的局部放大图

对GH132合金在 $650^\circ\text{C}$ 所作复杂应力条件下的蠕变及断裂研究表明<sup>[1]</sup>, 由于蠕变引起的断裂主要在晶界, 而疲劳引起的断裂主要在晶内。GH132合金在 $650^\circ\text{C}$ 静态蠕变断裂的断口表明, 以沿晶断裂为主的混合断裂<sup>[1]</sup>。同样, GH132合金在不同周期蠕变条件下的断口形貌仍显示以沿晶断裂为主的特征。可以认为, 在所研究的周期蠕变条件下, 由于保载时间长(即频率低), 虽然在周期应力作用下有疲劳因素参与作用, 但仍可认为是以蠕变为主的一种变形形式, 因此在断口上未曾找到疲劳条纹的痕迹, 而且断裂仍然显现以沿晶断裂为主的混合断裂。不过, 随着最小应力 $\sigma_2$ 值的减小, 疲劳作用加强, 在混合断裂的断口上有穿晶断裂部分增多的趋势。

周期蠕变条件下的变形机构是复杂的。近年来 Morris<sup>[2]</sup> 和 Tien<sup>[4]</sup> 等人对不锈钢和高温合金所做的结果表明, 316型不锈钢在625℃以方形波的形式做周期蠕变时, 其蠕变速率并不受加载和卸载因素产生很大的影响<sup>[2]</sup>。而Tien等人对MA754高温合金在760℃所作的周期蠕变条件下的蠕变速率与静态蠕变相比出现减速现象, 并显现比较长的蠕变断裂寿命。但是, 在对Udimet700于760℃所作周期蠕变条件下也出现有加速蠕变的现象, 而使蠕变断裂寿命降低, 这个因素是直接受频率变化影响<sup>[4]</sup>。他们所做的周期蠕变试验的最小应力或者是零或只有最大应力的20%以下, 因此他们仅计算加载的总保载时间, 而不计入小应力的保载时间, 这一点与我们的周期蠕变研究是有所不同的。

我们是在固定频率条件下作周期蠕变而研究最小应力改变的影响, 从蠕变曲线上已经看出最小应力 $\sigma_2$ 的变化会显著地影响每个周期的变形特点。正象前述分析的那样, 在这种条件下的周期蠕变变形是受平均应力控制, 那么周期蠕变曲线上的蠕变速率应该与相当量的平均应力条件下的静态蠕变速率相等。这说明在这样的条件下, 虽然有周期应力的作用, 但并不受疲劳分量的影响。对比这两种情况, 其周期蠕变速率小于静态蠕变速率则表现为交变应力作用下所出现的强化效应, 反之则表现为软化效应。当然, 这种推断的正确与否需要进一步的实验证明, 另外对不同周期蠕变条件下的变形机构也需要进一步的研究。

#### 四、结 论

GH132合金在周期蠕变条件下的变形规律是复杂的, 除了弹性应变、塑性应变外, 还有滞弹性应变。这种变形规律的特征随周期应力卸载条件下最小应力的大小而变化。在高的最小应力条件下可以仅表现为合金以不同的应变速率分别在高、低应力下交替地进行。

#### 参 考 文 献

- (1) 谢锡善、徐志超、许经峰、朱金元: 二种铁基和镍基高温合金在复杂应力条件下的蠕变及断裂(高温合金的力学冶金之一), 北京钢铁学院(1983)
- (2) D.G. Morris, D.R. Harris; Journal of Materials Science, 13 (1978) P. 985.
- (3) G.R. Halford; Metallurgical Transactions, 3 (1972) P. 2247.
- (4) J. K. Tien, D. E. Matejczyk, Y. Zhuang (庄毅) and T. E. Howson; Proc. Int. Conf. on the Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, Edited by B. Wilshire and D. R. J. Owen (1981) P. 433.
- (5) 章安庆、孔庆平、师昌绪: 金属学报, 15卷, 第4期, (1979) 第518页。
- (6) A. C. Chang, Y. K. Bai, Y. T. Xiao, C. P. Kung, C. H. Shih; Proc. 4th Int. Symposium on Superalloys, Edited by J. K. Tien et al. Seven Springs, USA, (1980) P. 1821.
- (7) 冯端等编著: 金属物理(下册), 科学出版社, (1975) 第557页。

# CYCLIC CREEP STUDY ON AN IRON-BASE SUPERALLOY

Xie Xishan, Xu Zhichao, Zhu Jinyuan, Lin Zhengtong

## Abstract

Cyclic creep tests were conducted in an iron-base superalloy GH132 at 650℃ and constant maximum stress (46kg/mm<sup>2</sup>) with different minimum stresses (10, 23 and 43kg/mm<sup>2</sup>). Deformation at cyclic creep is complicated. Beside elastic and plastic deformation, an elastic deformation occurs at cyclic creep. Deformation behaviour at cyclic creep depends on stress amplitudes and minimum stresses.