

GH33A 合金热机械循环塑性性能*

王建国 唐俊武 王红缨 徐世平

北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

摘要 针对 GH33A 高温合金材料在温度与机械应变同时交变条件下的热机械循环塑性性能, 就相位差对该材料在热机械循环状态下的循环硬化、循环软化和疲劳寿命的影响进行分析和讨论。结果表明: 相位差影响材料的循环硬化与软化; 在 570 ~ 825 ℃ 的温度交变条件下, 同相热机械疲劳寿命比反相热机械疲劳寿命短。

关键词 塑性, 相位差, 热机械疲劳, 循环硬化, 循环软化

中图分类号 TG132.32, TG115.57

Thermal Mechanical Cyclic Plastic Behavior of GH33A Superalloy*

Wang Jianguo Tang Junwu Wang Hongying Xu Shiping

State Key Laboratory of Advanced Metallic Materials, USTB, Beijing 100083, PRC

ABSTRACT The cyclic plastical behavior of GH33A superalloy is investigated under the condition of simultaneous cycle of temperature and mechanical strain. Influence of phase difference of alternating temperature and mechanical strain (in-phase and out-of-phase) on cyclic softening or cyclic hardening and thermal mechanical fatigue life is studied. The experimental results show that the damage in in-phase thermal machanical fatigue is more serious than that in out-of-phase at 570 ~ 825 ℃. And, the material is serious cyclic softening at high temperature side and first cyclic hardening, then cyclic softening at low temperature side for both in-phase and out-of-phase in thermal mechanical fatigue.

KEY WORDS plasticity, phase shift, themal mechanical fatigue, cyclic hardening, cyclic softening

在温度交变和机械载荷交变的同时作用下, 材料发生热机械疲劳损伤而导致破坏。因此, 研究涡轮盘材料的热机械循环性能对材料的寿命预测是相当重要的。

本文对飞机涡轮盘材料 GH33A 合金在温度和机械应变同时循环条件下的热机械循环性能进行了初步研究, 探讨了温度交变与应变交变的相位差对热机械循环硬化、软化

1994-05-12 收稿 第一作者 男 36岁 高级工程师

* 本课题由冶金部资助

的影响，同时还讨论了在热机械循环下的循环塑性性能，并对该材料在热机械循环下的应力-应变滞后回线形状与高温低循环应力-应变滞后回线形状进行比较和初步分析。

1 试验材料及实验方法

试验材料选自真空感应炉加真空自耗电炉炼制的时效硬化型 GH33A 镍基高温合金。

试验设备为 MTS 809 电液伺服拉扭疲劳材料试验机和 LEPEL 高频感应加热系统采用 PDP 11/23 PLUS 小型计算机，同时控制试验机和感应加热器，以实现温度交变和机械应变交变的自动控制。有关试验控制技术见文献 [1]。

热机械循环的温度交变范围为 570 ~ 825℃。试验采用总应变控制，应变比 $R_\epsilon = -1$ 。温度交变与机械应变交变的频率均为 0.0025 Hz，相位差分别为 0° 和 180°，即同相位和反相位。首先在温度交变的平均温度 T_{mean} 和最高温度 T_{max} 下分别进行材料的等温低循环疲劳试验，然后进行温度和机械应变同时交变的热机械疲劳试验。试验过程中，绘制材料在不同机械应变范围下的循环滞后回线，观察材料的循环软硬化现象，并测定材料的热机械疲劳寿命曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 循环应力-应变滞后回线

图 1 为在 570 ~ 825℃ 热机械循环疲劳下的应力-应变回线。从图 1 中可以清楚地看出，在热机械循环状态下，循环回线无论是同相位还是反相位均是非对称的。这个现象完全不同于高温低循环下的循环回线。

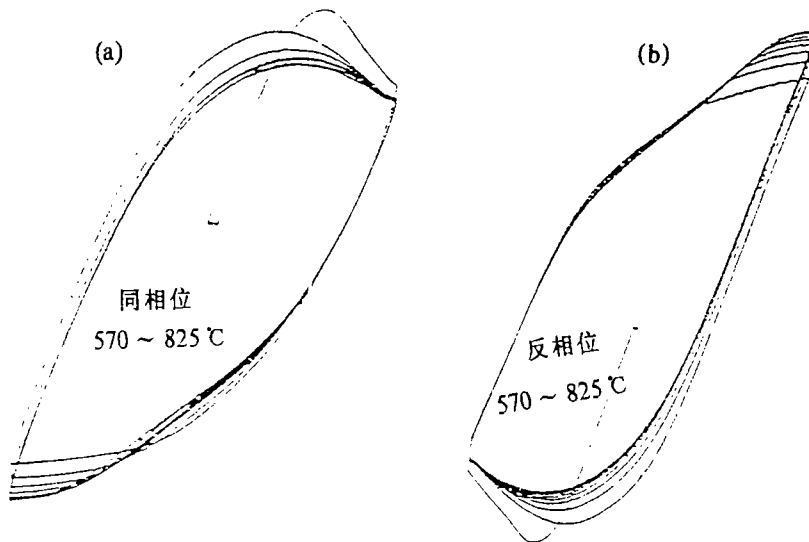


图 1 热机械循环滞后回线

在高温低循环下, 只有机械应变的交变而没有温度的交变, 因此在拉压两个半周材料的抗力是等同的, 所以材料的循环应力-应变滞后回线是对称的, 这样就可以按常温下的方法处理高温低循环问题. 如由稳定的循环滞后回线确定材料在不同温度下的循环应力-应变曲线, 根据 Manson-Coffin 法、通用斜率法和 10% 规则进行疲劳寿命估算.

但是, 在热机械循环下不仅有机械应变的交变, 同时还存在着温度的交变. 由于温度的交变, 使得在拉压两个半周材料的抗力存在着明显的差别, 结果出现循环滞后回线的不对称性. 同相位时, 机械应变和温度同时升高, 且两者同时达到最大值. 在拉半周材料的抗力逐渐降低, 而在压半周材料的抗力逐渐增强. 因此, 当拉压两个半周达到同样的应变幅时, 拉压应力幅值有很大的差别, 表现在循环滞后回线的不对称性, 拉应力幅小于压应力幅. 反相位时, 机械应变随着温度的升高而减小, 当温度最高时机械应变幅最小. 所以, 材料的抗力在拉压两个半周与同相位时相反, 结果也表现在循环滞后回线的不对称性, 但拉应力幅大于压应力幅.

2.2 循环特性曲线

图 2 和图 3 分别为同相位与反相位热机械循环条件下的应力幅-循环周次曲线. 从图 2 中可以看出, 同相位时拉半周为循环软化, 压半周时开始循环硬化然后循环软化. 从图 3 中可以看出, 反相位时拉半周开始循环硬化然后循环软化, 而压半周为循环软化.

由此可以得出, 无论是同相位还时反相位, 材料在温度交变的正半周为循环软化, 而在负半周为先循环硬化然后循环软化, 并且随着应变量的增大循环软、硬化速率加快. 而在高温低循环状态下, 无论是拉半周还是压半周均为循环硬化.

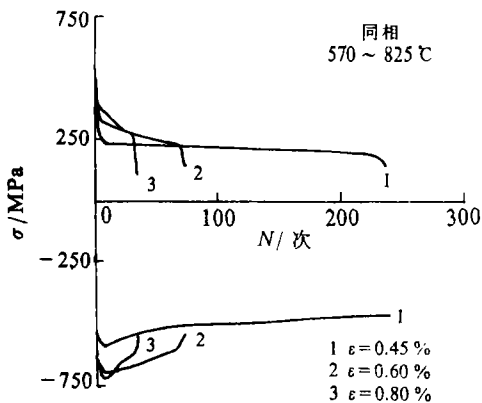


图 2 同相位热机械循环特性曲线

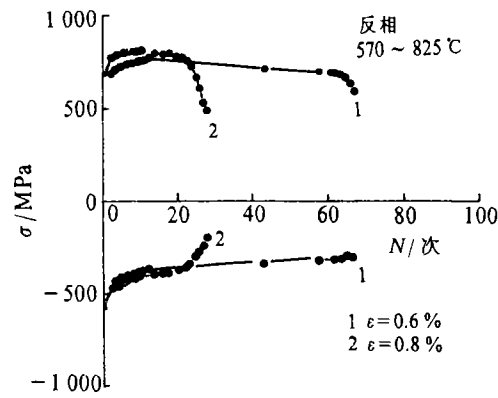


图 3 反相位热机械循环特性曲线

2.3 疲劳寿命

图 4 为 700 °C 和 825 °C 下的高温低循环疲劳寿命曲线. 由图中可见, GH33A 合金

在 825 ℃ 下的高温低应变疲劳寿命比 700 ℃ 下的高。这是由于在 775 ℃ 以上 GH33A 合金的强度明显下降塑性上升，而应变疲劳寿命随着塑性的升高而上升^[2]，导致材料在 775 ℃ 以上寿命有所上升。所以，对于相同应变范围内 825 ℃ 时的低循环疲劳寿命比 700 ℃ 高。

图 5 为 570 ~ 825 ℃ 下的 GH33A 合金热机械循环疲劳寿命曲线。从图中可以清楚地看到，在相同的应变幅作用下，同相的热机械疲劳寿命比反相的热机械疲劳寿命短。

同相热机械疲劳中，拉半周时随着温度的升高，材料的蠕变变形量增加，而在压半周时温度较低，压缩变形量较小，因拉伸变形量的增加导致疲劳损伤的增加，从而使热机械疲劳寿命降低。反之，反相热机械疲劳中，在压缩半周中压缩蠕变变形量随着温度的升高而增加。因压缩塑性变形不容易引起疲劳损伤，因而反相位热机械疲劳寿命一般比同相位热机械循环疲劳寿命高。

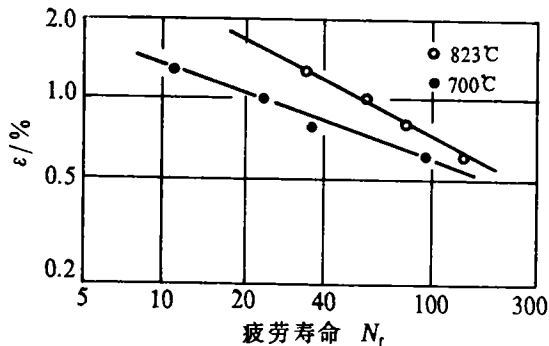


图 4 高温低循环疲劳寿命曲线

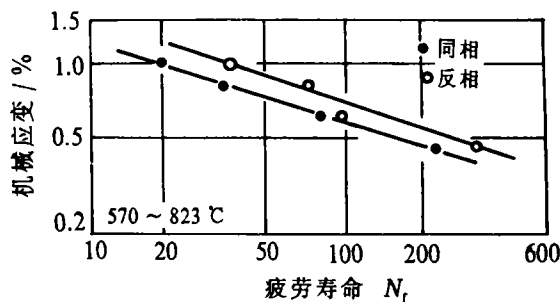


图 5 热机械循环疲劳寿命曲线

3 结论

(1) 在热机械循环下，无论是同相位还是反相位，GH33A 合金的循环应力 - 应变滞后回线均呈非对称性。

(2) 同相位热机械循环下，GH33A 合金在拉半周呈循环软化，而在压半周先硬化随后软化；反相位热机械循环下，该材料在拉半周呈先硬化随后软化，而在压半周呈明显的循环软化。

(3) 高温低循环下，该材料在拉半周和压半周均呈循环硬化。在 570 ~ 825 ℃ 的温度交变条件下，同相热机械循环的损伤比反相热机械循环损伤严重，因而同相热机械疲劳寿命比反相热机械疲劳寿命短。

参 考 文 献

- 1 王建国. 计算机控制热机械疲劳的试验研究. 见: 第二届全国高温强度学术会议论文集. 青岛, 1988. 335
- 2 Hertzberg R W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1976. 343