

粉末高温合金 FGH95 和 FGH96 的热机械疲劳性能

张国栋, 何玉怀, 苏彬

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 对粉末高温合金 FGH95 和 FGH96 进行了温度循环为 350℃ 到 600℃ 的同相位和反相位热机械疲劳试验。分析比较了两种合金的热机械疲劳滞后回线、循环应力响应行为和疲劳寿命。研究表明: FGH95 合金和 FGH96 合金的热机械疲劳应力-应变滞后回线拉压对称, 合金表现出高强度低塑性的特点; 在相同总应变范围下, FGH96 合金的热机械疲劳循环塑性比 FGH95 合金的热机械疲劳循环塑性大; FGH95 合金和 FGH96 合金的热机械疲劳循环应力响应行为与热机械载荷水平相关; 在相同的变形条件下, FGH96 合金的热机械疲劳循环应力比 FGH95 合金的热机械疲劳循环应力小, 从而导致了 FGH96 的热机械疲劳性能好于 FGH95 的热机械疲劳性能。

关键词: FGH95 合金; FGH96 合金; 热机械疲劳; 滞后回线

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2011.6.017

中图分类号: V223; V215.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2011)06-0096-05

航空发动机涡轮盘在高温、高转速的工作条件下, 盘的不同部位存在温度梯度, 从而导致涡轮盘在承受机械载荷的同时, 还承受由于温度梯度引起的热循环应力。热机械疲劳试验和等温低循环疲劳试验的研究发现: 某些材料的热机械疲劳寿命要比上限温度的等温低循环疲劳寿命短^[1], FGH95 合金就存在此类现象^[2]。基于以上原因, 对于航空发动机涡轮叶片和涡轮盘等关键部件只进行等温低周疲劳试验来进行的抗疲劳设计, 存在不安全因素, 不能够满足安全设计的要求。因此, 有必要对既承受机械载荷又承受热载荷的材料进行模拟实际工况的热机械疲劳试验。

目前, 国内外航空发动机的涡轮盘材料多为粉末高温合金^[3], 同时对粉末高温合金的力学性能开展了广泛深入的研究^[4-8], 为粉末涡轮盘在航空发动机上的成功应用提供了可靠的力学性能数据。目前国内粉末涡轮盘主要有 FGH95, FGH96 和 FGH97, 因三种合金的力学性能差异以及对其力学性能对比研究开展不足, 影响了航空发动机涡轮盘的选材。本工作主要研究了粉末合金 FGH95 和 FGH96 的热机械疲劳性能及热机械疲劳行为, 对 FGH95 和 FGH96 合金的热机械疲劳性能进行了对比评价。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料与试样

试验材料为粉末合金 FGH95 和 FGH96。将 FGH95 和 FGH96 合金加工为 $\phi 8\text{mm}$ 和 $\phi 6\text{mm}$ 的热机械疲劳试样。

1.2 试验装置与方法

试验在 MTS810 热机械疲劳试验机上进行的。采用机械应变控制方式分别进行了应变比 $R_\epsilon = -1.0$, 350℃ \leftrightarrow 600℃ 同相位热机械疲劳试验和反相位热机械疲劳试验。

试验过程中采集的波形分别如图 1 和图 2 所示。从图 1 和图 2 可以看出, 试验过程中的温度循环控制的非常理想。

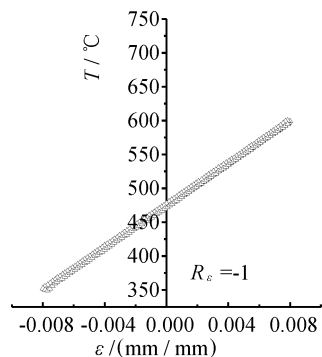


图 1 同相位的温度-应变

Fig. 1 Temperature vs strain of In-phase

收稿日期: 2009-08-21; 修订日期: 2011-01-17

作者简介: 张国栋 (1977—), 男, 硕士, 主要从事合金冷热疲劳研究, (E-mail) zgdlx@sina.com。

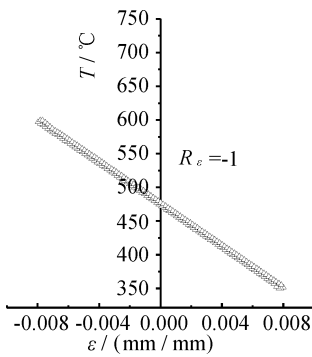


图 2 反相位的温度-应变

Fig. 2 Temperature vs strain of Out-of-phase

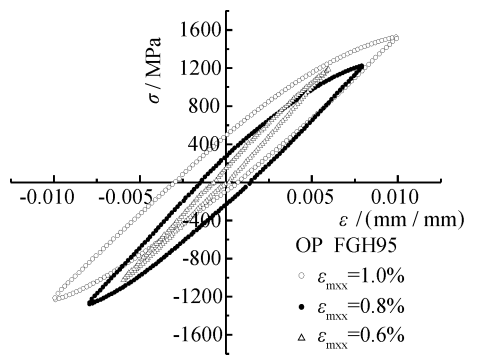


图 4 FGH95 反相位应力-应变滞后回线

Fig. 4 Stress-strain loop of Out-of-phase in FGH95 alloy

2 试验结果与分析

2.1 典型的滞后回线

图 3 ~ 图 6 中 FGH95 和 FGH96 合金的热机械疲劳应力-应变滞后回线的特征表明,此合金表现出高强度低塑性的特点。当应变水平较高时 ($\epsilon_{\max} \geq 0.5\%$),材料的同相位热机械疲劳表现出明显的应力-应变滞后回线,而当应变水平较低时 ($\epsilon_{\max} < 0.5\%$),材料的同相位热机械疲劳没有明显的应力-应变滞后回线。从图中可以发现:滞后环拉压对称,而定向合金 DZ125 热机械疲劳滞后环拉压不对称^[9],这说明热机械疲劳滞后环的形状与材料的基本力学性能和循环条件有关。

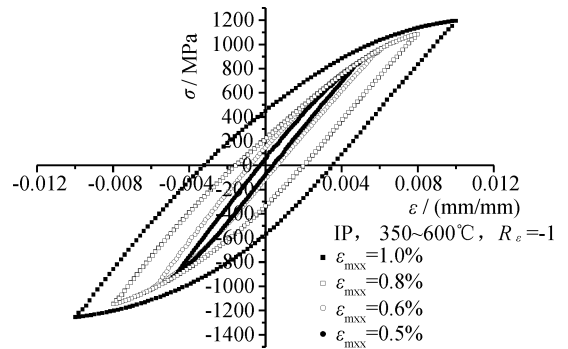


图 5 FGH96 同相位应力-应变滞后回线

Fig. 5 Stress-strain loop of In-phase in FGH96 alloy

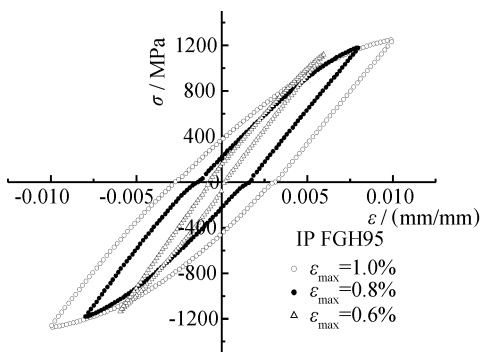


图 3 FGH95 同相位应力-应变滞后回线

Fig. 3 Stress-strain loop of In-phase in FGH95 alloy

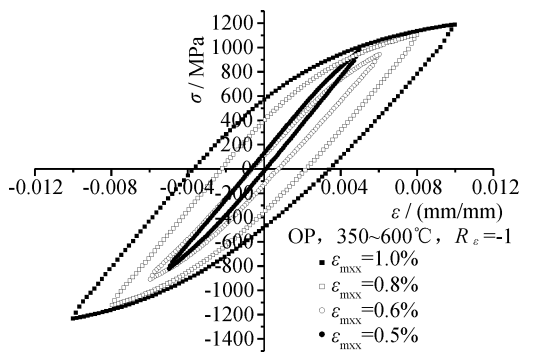


图 6 FGH96 反相位应力-应变滞后回线

Fig. 6 Stress-strain loop of Out-of-phase in FGH96 alloy

2.2 FGH96 与 FGH95 合金热机械疲劳应力-应变滞后回线的比较

通过对比 FGH96 与 FGH95 合金的热机械疲劳应力-应变滞后回线的特征发现,在相同总应变范围内,FGH96 合金的热机械疲劳循环塑性比 FGH95 合金的热机械疲劳循环塑性大,如图 7 和图 8 所示。

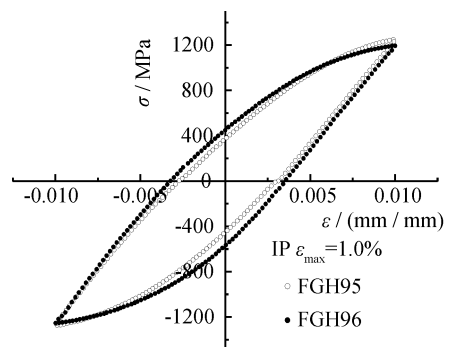


图 7 同相位应力-应变滞后回线

Fig. 7 Stress-strain loop of In-phase

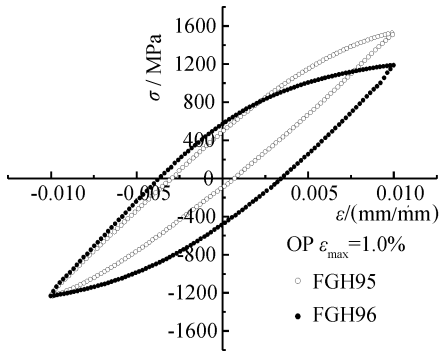


图 8 反相位应力-应变滞后回线

Fig. 8 Stress-strain loop of Out-of-phase

2.3 循环应力响应

通过对比 FG95 和 FG96 合金的热机械疲劳循环应力响应行为研究可知,合金的循环应力响应行为与热机械载荷水平相关。当应变水平较大时,合金表现出明显的循环硬化,随着应变水平的降低,合金循环应力响应行为演化为循环软化,如图 9 ~ 图 12 所示。

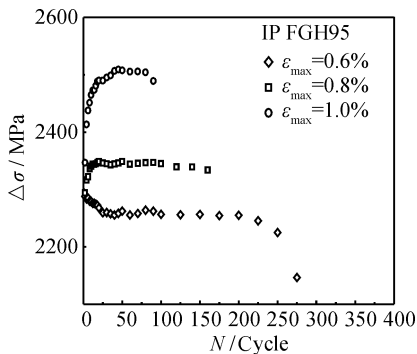


图 9 FG95 同相位热机械疲劳循环应力响应

Fig. 9 Cyclic stress response of FG95 alloy for IP TMF

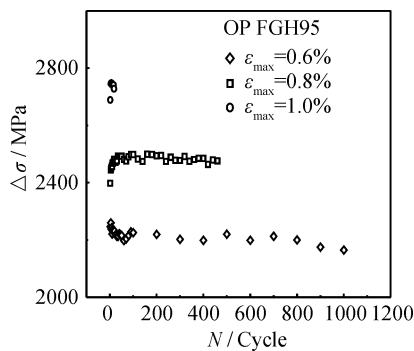


图 10 FG95 反相位热机械疲劳循环应力响应

Fig. 10 Cyclic stress response of FG95 alloy for OP TMF

2.4 热机械疲劳寿命

图 13 和图 14 为两种合金在对称循环试验条件

下的热机械疲劳寿命曲线。从图可以看出,无论是同相位,还是反相位,FG96 合金的热机械疲劳寿命均比 FG95 合金热机械疲劳寿命长,这说明 FG96 合金的热机械疲劳性能明显好于 FG95 合金的热机械疲劳性能。

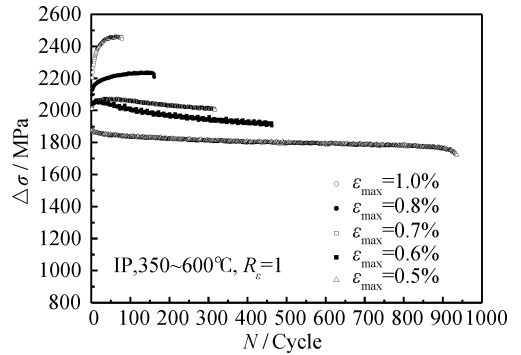


图 11 FG96 同相位热机械疲劳循环应力响应

Fig. 11 Cyclic stress response of FG96 alloy for IP TMF

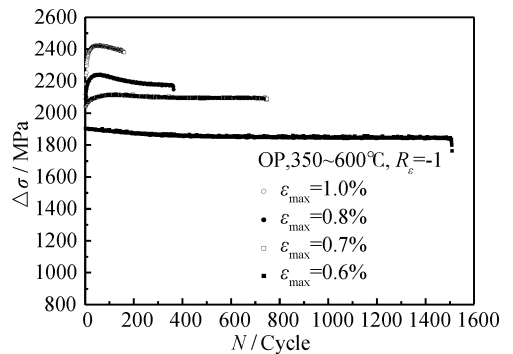


图 12 FG96 反相位热机械疲劳循环应力响应

Fig. 12 Cyclic stress response of FG96 alloy for OP TMF

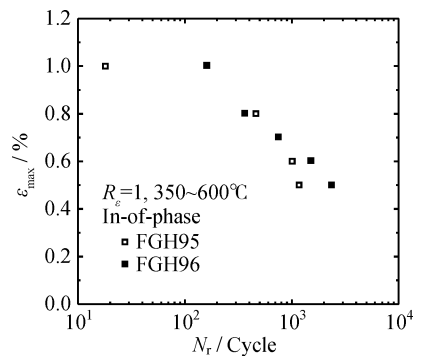


图 13 同相位热机械疲劳应变-寿命

Fig. 13 Strain vs life of IP TMF

3 分析与讨论

通过对 FG96 合金和 FG95 合金的热

机械疲劳循环应力响应行为的研究发现,在相同变形条件下,FGH95 合金的热机械疲劳循环应力比 FGH96 合金的热机械疲劳循环应力大,如图 15 和图 16 所示。从而导致了 FGH95 合金的热机械疲劳寿命比 FGH96 合金的热机械疲劳寿命短。

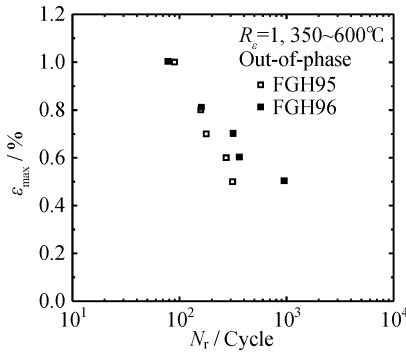


图 14 反相位热机械疲劳应变-寿命
Fig. 14 Strain vs life of OP TMF

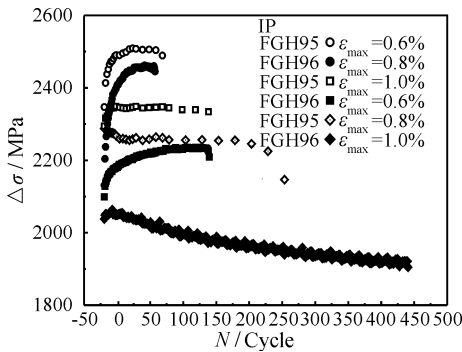


图 15 同相位热机械疲劳循环应力响应
Fig. 15 Cyclic stress response for IP TMF

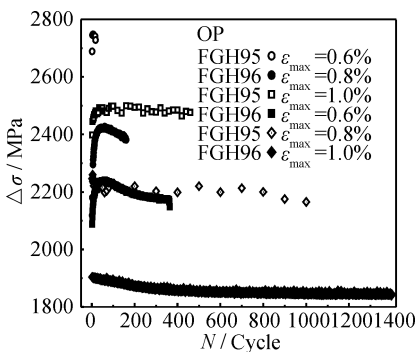


图 16 反相位热机械疲劳循环应力响应
Fig. 16 Cyclic stress response for OP TMF

4 结论

(1) FGH95 和 FGH96 合金的热机械疲劳应力-应变滞后回线拉压对称,合金表现出高强度低塑性的特点。

(2) 在相同总应变范围内,FGH96 合金的热机械疲劳循环塑性比 FGH95 合金的热机械疲劳循环塑性大。

(3) FGH95 和 FGH96 合金的热机械疲劳循环应力响应行为与热机械载荷水平相关。当应变水平较大时,合金表现出明显的循环硬化,随着应变水平的降低合金循环应力响应行为演化为循环软化。

(4) 在相同的变形条件下,FGH96 合金的热机械疲劳循环应力比 FGH95 合金的热机械疲劳循环应力小,从而导致了 FGH96 的热机械疲劳性能好于 FGH95 的热机械疲劳性能。

参考文献:

- [1] BECK T, PITE G. Thermal-mechanical and isothermal fatigue of IN792CC [J]. Materials Science and Engineering (A), 1997, 234 ~ 236: 719 - 722.
- [2] 张国栋,刘绍伦,何玉怀,等. FGH95 粉末盘材料热/机械疲劳和等温低周疲劳断裂行为研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 73 - 77.
- [3] 汪武祥,何峰,邹金文. 粉末高温合金的应用与发展[J]. 航空工程与维修, 2002, 6: 26 - 28.
- [4] 崔伟华,万建松,岳珠峰,等. 镍基粉末冶金 FGH95 高温合金的拉伸及低周疲劳性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12): 2119 - 2123.
- [5] 国为民,吴剑涛,张凤戈,等. 镍基高温合金粉末中的夹杂及其对合金疲劳性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2000, 10(3): 23 - 28.
- [6] 何承群,余泉茂,胡本芙. FGH95 合金 LCF 断裂寿命与夹杂特征关系的研究[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 247 - 252.
- [7] 魏大盛,杨晓光,王延荣,等. 保载条件下 FGH95 材料的疲劳特性及寿命建模[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 425 - 430.
- [8] 冯引利,曹凤兰,王卫国,等. FGH96 亚尺寸粉末冶金盘低循环疲劳寿命可靠性分析及试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 53 - 57.
- [9] 张国栋,刘绍伦,何玉怀,等. 相位角对定向合金 DZ125 热/机械疲劳行为与寿命影响的试验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 383 - 387.

Thermal-Mechanical Fatigue Performance of Powder Metallurgy Superalloy FGH95 and FGH96

ZHANG Guo-dong, HE Yu-huai, SU Bin

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In-phase (IP) and Out-of-phase (OP) thermal-mechanical fatigue (TMF) behavior of powder metallurgy (PM) superalloy FGH95 and FGH96 were studied with maximum and minimum temperature of 350°C and 600°C. Stress-strain loop, cyclic stress response and fatigue life of TMF in two kinds of superalloy were analyzed. Stress-strain loop of TMF showed the characteristic of tension-compression symmetry and of low plasticity with high strength. Cyclic stress response depended on magnitude of stain. At the same strain amplitude, it is found that the TMF cyclic stress of FGH96 is lower than the TMF cyclic stress of FGH95 alloy, and the cyclic plasticity of FGH96 alloy is more better than the cyclic plasticity of FGH95 alloy. Consequently TMF performance of FGH96 alloy is better than TMF performance of FGH95 alloy.

Key words: thermal-mechanical fatigue; In-phase; Out-of-phase; stress-strain loop; cyclic stress; fatigue life