

文章编号: 1000-8055(2005) 01-0073-05

FGH95 粉末盘材料热/机械疲劳 和等温低周疲劳断裂行为研究

张国栋, 刘绍伦, 何玉怀, 汪武祥, 钟 斌
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 对粉末冶金盘材料 FGH95 进行了同相位, 温度循环为 350℃到 600℃的热/机械疲劳试验和 600℃的等温低周疲劳试验。考察了两种载荷波形下材料的循环应力响应行为和高温疲劳断裂机理以及载荷波形对疲劳寿命的影响。研究表明: 同相位热/机械疲劳寿命比上限温度的等温低周疲劳寿命短。该材料在高温应变疲劳的循环应力响应行为与应变水平的大小以及循环载荷波形有关。试样的微观断口分析显示了在高温应变疲劳试验中同时存在疲劳、蠕变和氧化损伤。在同相位热/机械疲劳载荷下, 穿晶+沿晶断裂为疲劳断裂的主要特征; 在等温低周疲劳载荷下, 裂纹主要为穿晶萌生与扩展。

关键词: 航空、航天推进系统; 同相位; 热-机械疲劳; 蠕变; 氧化; 循环应力

中图分类号: O346.2; V231.95

文献标识码: A

Thermal-Mechanical Fatigue and Isothermal Low Cycle Fatigue Fracture Behavior of Powder Metallurgy Superalloy FGH95

ZHANG Guo-dong, LIU Shao-lun, HE Yu-huai,
WANG Wu-xiang, ZHONG Bin

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

Abstract: High temperature low cycle fatigue behavior of Powder Metallurgy superalloy FGH95 was studied. A basic triangular cycle with a constant temperature of 600℃ and an inphase triangular cycle with maximum and minimum temperature of 350℃ and 600℃ respectively were used for thermal-mechanical fatigue testing. The strain ratio of minimum to maximum strain is - 1.0. The influence of the above two loading cycle on cyclic stress response behavior, mechanism of fracture at high temperature and fatigue life was investigated. At same strain amplitude, it was found that the TMF life of in-phase loading form is shorter than that of isothermal low cycle fatigue loading form. High temperature low cycle fatigue behavior of PM superalloy FGH95 depends not only on loading form, but also on magnitude of stain. The microstructure damage behavior of high temperature low cycle fatigue is discussed. The results show that fatigue, creep and oxidation damage always develops simultaneously during low cycle fatigue at high temperature. Fracture is mainly intergranular and transgranular under inphase thermal-mechanical fatigue. The path of crack initiation and growth is transgranular under conditions of isothermal low cycle fatigue.

收稿日期: 2003- 12- 17; 修订日期: 2004- 04- 06

基金项目: 航空基础科学基金资助项目(00B21008)

作者简介: 张国栋(1977-), 男, 陕西富平人, 北京航空材料研究院助理工程师, 硕士, 主要从事高温疲劳与断裂研究。
http://www.cnki.net

Key words: aerospace propulsion system; in-phase; thermal-mechanical fatigue; creep; oxidation; cyclic stress

在经受循环载荷和热载荷的工程构件中,热/机械疲劳性能是限制材料寿命的主要因素。与等温的高温低周疲劳相比,热/机械疲劳损伤机理研究仍处于初级阶段,其主要原因是进行模拟构件的实际工况的热/机械疲劳试验很困难。人们试图用不同温度、不同应变范围和应变率的等温疲劳试验来估算承受热/机械载荷部件的寿命^[1]。等温疲劳试验,由于不能模拟构件的实际工况,对工程构件的寿命分析和预测带来较大的误差。随着试验技术的发展,通过对热/机械疲劳试验和等温低循环疲劳试验的研究发现:一些材料的热/机械疲劳寿命要比上限温度的等温低循环疲劳寿命短^[2]。热/机械疲劳试验需要先进的试验设备、试验周期长且试验费用高,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目前往往只进行等温低周疲劳试验。但是该类材料的热/机械寿命如果小于等温低周疲劳寿命,那么用等温低周疲劳寿命来代替材料在温度和循环应力联合作用下的热/机械疲劳寿命进行该材料在实际工况下的抗疲劳设计,将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。本工作用有限的试验来研究粉末冶金盘材料 FGH95 等温低周疲劳寿命和热/机械疲劳寿命的大小关系以及载荷波形对材料 FGH95 高温疲劳断裂行为的影响,为该材料的进一步工程应用和如何进行该材料的抗疲劳设计提供一定的数据支持。

1 试验用料和方法

1.1 试验材料与试样

在本研究中所采用的材料为粉末冶金盘材料 FGH95,它的主要化学成分和常规力学性能见文献[3]。本研究中采用热/机械疲劳试样和等温低周疲劳试样见文献[4]。

1.2 试验装置与方法

该研究的热/机械疲劳试验是在 MTS810 热/机械疲劳试验机上进行的;等温低周疲劳试验是在 MTS809 疲劳试验机上进行的。试验机对温度的控制精度可达 0.5%,对应变的控制精度可达 0.05%。本研究中分别进行了应变比 $R\epsilon = -1.0$, $350^{\circ}\text{C} \leftrightarrow 600^{\circ}\text{C}$ 同相位热/机械疲劳试验和 600°C

的等温低周疲劳试验。并对试样的断口进行了电镜扫描观察,以期得到不同载荷波形下材料的高温疲劳断裂损伤机理。

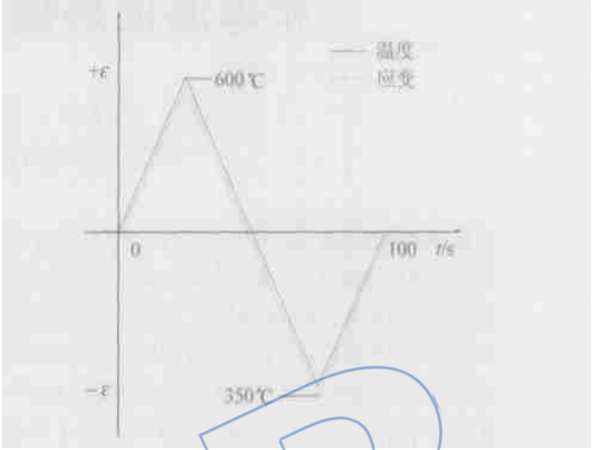


图 1 同相位

Fig. 1 In-phase

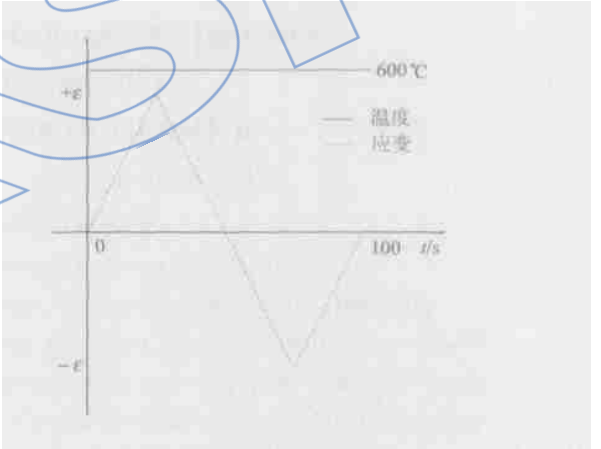


图 2 等温低周疲劳

Fig. 2 Isothermal fatigue

1.3 试验波形

在热/机械疲劳试验中,既存在热载荷又存在机械载荷。热载荷和机械载荷可以同步、异步或它们之间存在一定的相位角。本研究中分别进行了同相位热/机械疲劳试验和等温低周疲劳试验。试验波形分别如图 1 和图 2 所示。

2 试验结果与分析

2.1 载荷波形对循环应力响应行为的影响

对应变比为 $R\epsilon = -1.0$ 同相位热/机械疲劳应力响应行为和等温低周疲劳应力响应行为的研

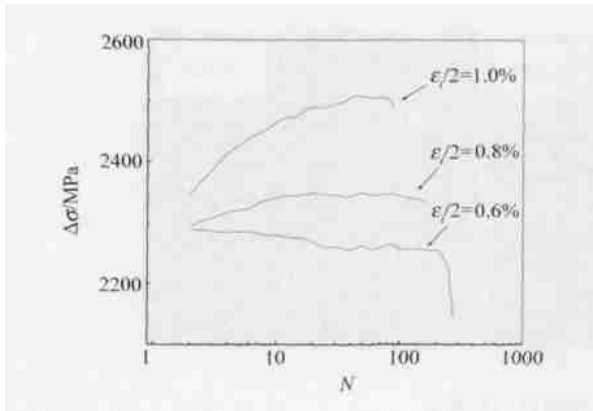


图 3 FGH95 同相位热/机械疲劳循环应力响应
Fig. 3 Cyclic stress response of FGH95 for IP T M F

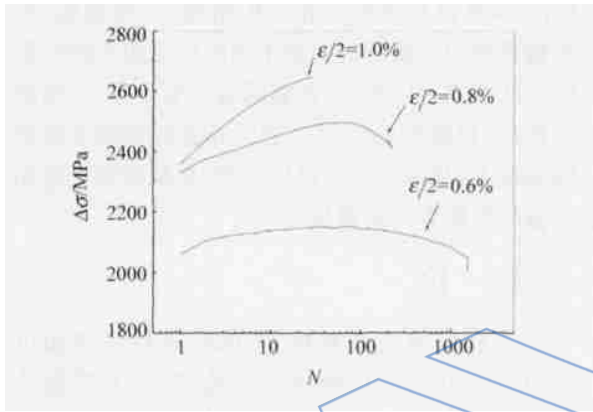


图 4 FGH95 等温低周疲劳循环应力响应
Fig. 4 Cyclic stress response of FGH95 for IF

究发现: 在同相位热/机械疲劳试验中, 当 $\epsilon/2=1.0\%$ 和 $\epsilon/2=0.8\%$ 时, 该材料表现为明显的循环硬化; 随着应变水平的降低, 该材料的循环应力响应行为由循环硬化向循环软化转变; 当 $\epsilon/2=0.6\%$ 时, 材料已表现出了明显的循环软化现象, 如图 3 所示。在等温低周疲劳载荷下, 材料表现为循环硬化, 随着应变水平的降低, 该材料的循环硬化显著程度有所降低, 如图 4 所示。

2. 2 载荷波形对高温疲劳疲劳寿命的影响

对粉末冶金盘材料 FGH 95 进行了应变比 R_ϵ

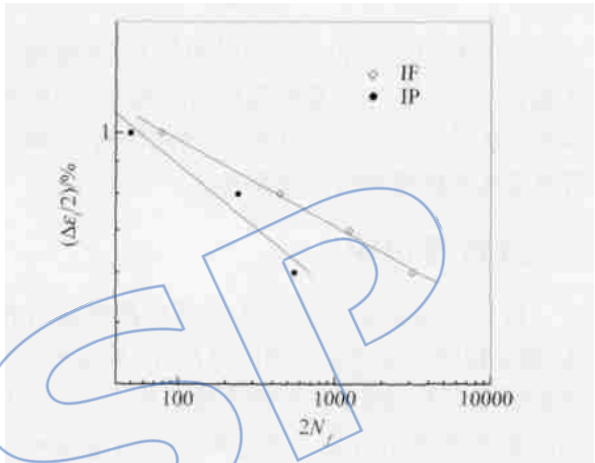


图 5 材料 FGH95 在不同载荷下的寿命曲线
Fig. 5 Life curves under different High Temperature Loadings of FGH95

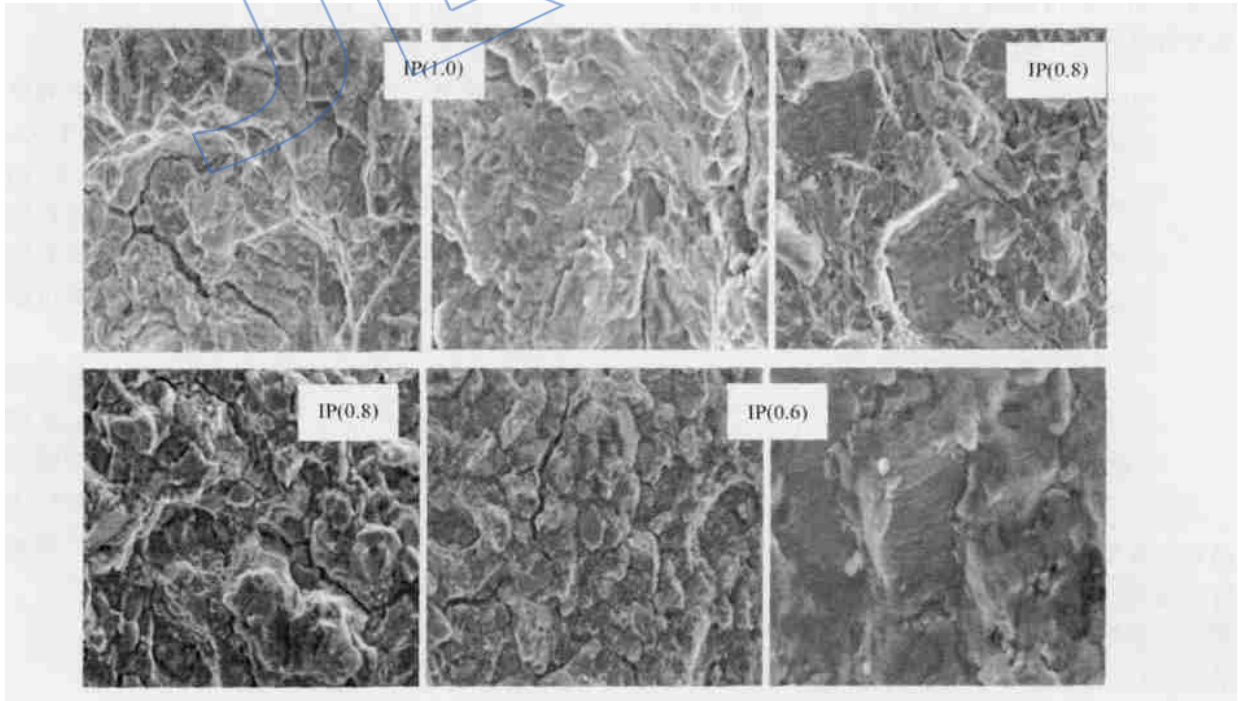


图 6 热/机械疲劳试样断口扫描图象
Fig. 6 SEM image on the fracture of the specimens for in-phase T M F

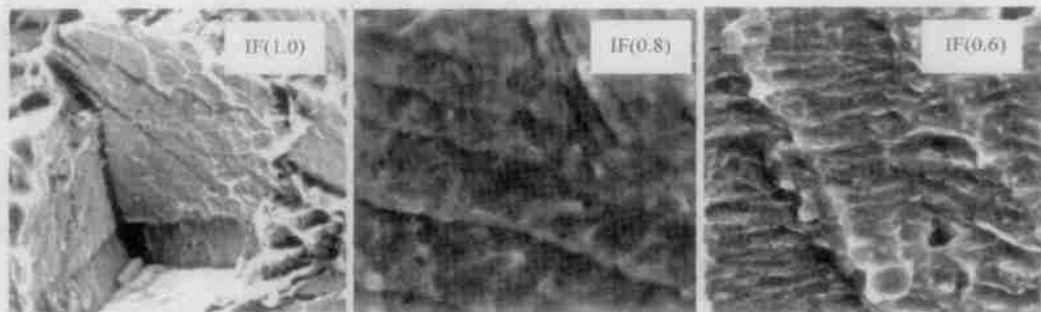


图 7 等温低周疲劳试样断口扫描图像

Fig. 7 SEM image on the fracture of the specimens for IF

= - 1.0, 350°C⇌600°C下的同相位热/机械疲劳试验和 600°C下的等温低周疲劳试验, 试验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出: 同相位热/机械疲劳寿命比等温低周疲劳寿命要短。

3 分析与讨论

材料在高温条件下经历循环载荷时疲劳损伤、蠕变损伤和氧化损伤同时存在, 而不同的损伤在总损伤中所占的比例与疲劳载荷的形式^[5]以及应变水平的大小有关。通过对粉末冶金盘材料 FGH95 高温疲劳试样断口的扫描电镜观察发现: 对于同相位热/机械疲劳, 试样的失效形式主要以蠕变和疲劳为主, 在疲劳裂纹扩展区出现了明显的疲劳条带和沿晶特征, 随着应变水平的降低和疲劳寿命的增长, 沿晶特征越明显, 如图 6 所示。

引起的损伤越显著。图 8 给出了粉末冶金盘材料 FGH95 在总应变范围相同的情况下, 同相位热/机械载荷和等温低周载荷下塑性应变大小的比较图。从图 8 可以看出: 在相同总应变条件下, 同相位热/机械疲劳的塑性应变比等温低周疲劳的塑性应变大, 从而导致了同相位热/机械疲劳寿命比等温低周疲劳寿命最短。

4 结论

对粉末冶金盘材料 FGH95 进行了同相位 350°C⇌600°C热/机械疲劳试验和 600°C等温低周疲劳试验下循环应力响应行为、损伤机理和疲劳寿命的研究发现:

(1) 同相位热/机械疲劳寿命比上限温度的等温低周疲劳寿命短。

(2) 该材料在高温应变疲劳的循环应力响应行为与应变水平的大小以及循环载荷波形有关。在等温低周疲劳载荷下, 材料表现为循环硬化, 随着应变水平的降低, 该材料的循环硬化显著程度有所降低; 在同相位热/机械疲劳试验中, 随着应变水平的降低, 该材料的循环应力响应行为由循环硬化向循环软化转变。

(3) 试样的微观断口分析显示了在高温应变疲劳试验中同时存在疲劳、蠕变和氧化损伤。在同相位热/机械疲劳载荷下, 穿晶+沿晶断裂为疲劳断裂的主要特征; 在等温低周疲劳载荷下, 裂纹主要为穿晶萌生与扩展。这是导致在同相位热/机械载荷下疲劳寿命缩短的主要原因。

参考文献:

- [1] Boismier D A, Sehitoglu H. Thermomechanical Fatigue of Mar-247: Part 2- Life Prediction[J]. ASME Journal of Engineering and Materials Technology, 1990, 112: 80~89.

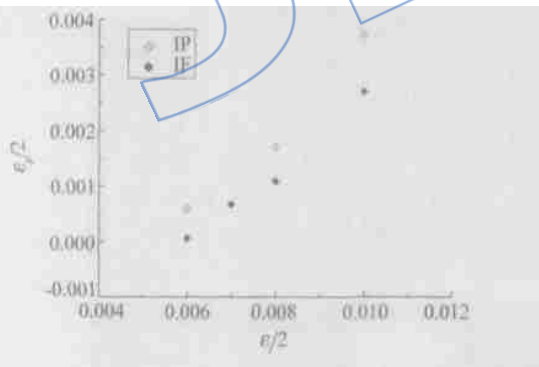


图 8 不同械载荷波形下的塑性应变

Fig. 8 Plastic strain under different loading-form

而对于等温低周疲劳, 试样的失效形式主要以疲劳为主, 在疲劳裂纹扩展区出现了明显的滑移线和疲劳条带, 随着应变水平的降低和疲劳寿命的增长, 疲劳条带特征越明显, 如图 7 所示。由于疲劳损伤和蠕变损伤的大小和塑性应变的大小有关, 一般来说, 塑性应变分量越大, 则疲劳和蠕变

[2] Beck T, Pitz G. Thermal-Mechanical and Isothermal Fatigue of IN 792C C[J]. *Materials Science and Engineering A* 1997, Vol 234- 236: 719~722.

[3] 中国航空材料手册[Z]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[4] 金属力学性能试样(Q/6S 977- 91)[R]. 北京: 航空航天部第六二一研究所, 1992.

[5] 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.

ZHANG Guo-dong, LIU Shao-lun, HE Yu-huai, et al. The Effects of Phase Angle on Thermomechanical Fatigue Behavior and Life Ds Superalloy DZ125 [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(3): 383~387.

致谢审稿人

《航空动力学报》对 2004 年第 19 卷第 1~6 期审稿专家们的辛勤劳动和对本刊的大力支持表示衷心的感谢!

第 19 卷审稿专家名单(按姓氏笔画为序):

丁水汀	于达仁	马一太	马宏伟	王占学	王正明	王仲奇	王保发	王补宣	王保国
王延荣	王建军	王家骅	王曦	方宗德	孔瑞莲	尹泽勇	叶志锋	左洪福	任革学
任玉新	朱之丽	朱孝业	朱梓根	朱惠人	朱耀忠	孙纪国	孙健国	白广忱	刘冰
刘波	刘火星	刘文廷	刘兴洲	刘启洲	华耀南	吕文林	乔渭阳	李军	李琳
李其汉	李晓东	李润方	李宏新	吉洪湖	苏彬	苏伟生	杨士杰	杨茂林	吴宏
吴大观	吴玉林	吴行章	吴海玲	季路成	何立明	何洪庆	严传俊	陆山	陆亚钧
陆震	沈赤兵	陈大光	陈乃兴	陈浚	陈焕倬	宋保银	邵万仁	邹正平	尚义
茆诗松	罗汀	单鹏	张平	张光星	张善群	张绍基	张振鹏	张靖周	范玮
林宇震	金捷	姚华	席光	胡骏	胡平信	郑克扬	孟庆明	赵宁	赵坚行
赵雷	赵晓路	饶寿期	郭海丁	郭迎清	耿中行	姜长生	姜培学	骆长天	袁新
陶智	陶增元	徐国华	徐国强	徐通源	高歌	高德平	梁德旺	谈和平	顾仲权
顾维藻	聂万胜	聂超群	聂景旭	桂辛民	侯敏杰	唐明	黄太平	黄伟光	黄金泉
黄熙君	符松	曹义华	曹玉璋	曹用涛	康锐	常海萍	董金钟	彭晓峰	温卫东
谢蔚民	程礼	程涛	程谋森	蒋浩康	楚武利	蔚夺魁	蔡元虎	蔡体敏	廉筱纯
樊思齐	廖明夫	欧阳祖行							