

试样尺寸对定向合金 DZ125 热机械疲劳寿命的影响

Effects of Specimen Dimension on Thermomechanical Fatigue Life in DS Superalloy DZ125

张国栋, 于慧臣, 何玉怀, 苏 彬

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHANG Guo-dong, YU Hui-chen, HE Yu-huai, SU Bin

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

摘要: 对 DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金进行了三种相位和两种试样尺寸的热机械疲劳实验研究。实验结果表明: 在热机械载荷下, 试样表面和内部温度梯度以及蠕变和氧化损伤的存在, 导致试样工作段直径影响热机械疲劳寿命。当应变水平较高(疲劳寿命较短)时工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命和工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命无明显差别。当应变水平较低(疲劳寿命较长)时工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命比工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命长。

关键词: 热机械疲劳; 尺寸; 蠕变; 氧化; 损伤; 寿命

中图分类号: TG146.1+5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)05-0028-03

Abstract: Thermomechanical fatigue (TMF) life of three temperature-strain phase angles and two specimen dimensions was studied in directional solidification (DS) superalloy DZ125. The results showed that fatigue, creep and oxidation damage always developed during TMF, temperature gradient occurred on surface and inside of specimen. Specimen dimension affected TMF life in DS superalloy DZ125. At high strain levels with shorter fatigue life, there were no evidence difference between TMF life of 8mm diameter specimen and fatigue life of 6mm diameter specimen. At low strain levels with longer fatigue life, TMF life of 8mm diameter specimen is longer than that of 6mm diameter specimen.

Key words: thermomechanical fatigue; dimension; creep; oxidation; damage; life

航空发动机以及燃气轮机的涡轮盘和涡轮叶片, 在其服役期间由于环境温度的不断变化, 导致这些零件不仅承受着循环载荷所产生的机械应力, 而且还承受着由于温度变化或温度梯度而引起热循环应力。等温疲劳实验, 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。通过对热机械疲劳实验和等温低循环疲劳实验的研究发现: 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^[1,2]。研究结果表明, 金属材料在热机械循环条件下其疲劳特性比在单纯恒定高温条件下更复杂, 特别是对发动机涡轮盘和涡轮叶片的使用寿命具有重要的影响^[2~4]。近 20 年来, 国内外学者就热机械疲劳特性、损伤特性、疲劳寿命预测^[5~7]以及疲劳裂纹扩展性能^[8]等进行了深入的研究, 获得了一些有益的结果。然而, 为热机械疲劳寿命预测模型的选择提供依据的热机械疲劳损伤机理的研究目前尚处于初级阶段。由于在进行热机械疲劳实验时, 多采用感应加热

和空气吹冷的方式来实现温度循环, 因此加热和冷却的速率以及热机械疲劳实验所用试样的几何尺寸是影响热机械疲劳实验的关键因素。本工作对两种直径的 DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金试样进行了热机械疲劳实验研究, 考察试样的几何尺寸对热机械疲劳实验结果的影响, 为建立可靠的热机械疲劳实验方法提供一定的数据支持。

1 实验

1.1 材料与试样

在本研究中所采用的材料为 DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金。采用工作段直径分别为 $\phi 8\text{mm}$ 和 $\phi 6\text{mm}$ 的热机械疲劳试样。

1.2 实验方法

本实验是在 MTS810 热机械疲劳试验机上进行。其对温度的控制精度可达 0.5%, 对应变控制精度

可达 0.05%。本研究进行了应变比 $R_\epsilon = -1$, 应变与温度之间的相位差为 0° (同相位)、 180° (反相位) 和 135° 相位, $500^\circ\text{C} \rightleftharpoons 1000^\circ\text{C}$ 以及 $550^\circ\text{C} \rightleftharpoons 1000^\circ\text{C}$ 的热机械疲劳实验。

1.3 热机械疲劳实验控制方式

本实验是在热机械疲劳机 MTS810 上进行, 它是通过封闭的液压伺服加载系统实现机械加载。试样通过液压夹头与试验机连接, 并通过电磁感应线圈高频感应加热, 采用压缩空气吹冷, 如图 1 所示。温度测量通过热电偶控制。应变是通过引伸仪(陶瓷棒卡在试样上的方式)测量。疲劳加载系统和温度控制系统都是由计算机自动监控。

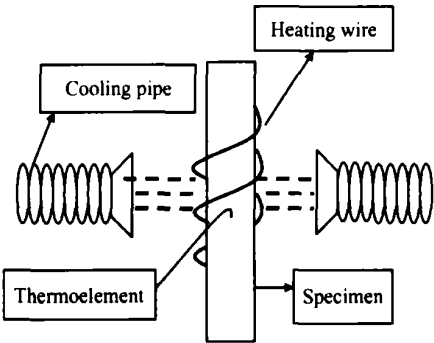


图 1 试样加热和冷却方式

Fig. 1 Heating and cooling system for specimen

2 结果与分析

2.1 热机械疲劳载荷施加方式

对 DZ125 合金进行了同相位、反相位和 135° 相位的热机械疲劳实验, 得到的温度与机械应变的相位和历程见图 2- 图 4。在同相位热机械疲劳实验中热载荷和机械载荷的变化是同步的, 其实验波形如图 2 所示。在反相位热机械疲劳实验中热载荷和机械载荷之间的相位相差 180° , 其实验波形如图 3 所示。在 135° 相位热机械疲劳实验中, 温度和机械应变之间的相位相差为 135° , 其实验波形如图 4 所示。可以看出, 热机械疲劳实验的温度控制非常成功, 温度历程没有明显的跳跃和偏离三角波形的温度点。

2.2 试样尺寸对热机械疲劳寿命的影响

为了研究试样尺寸对热机械疲劳性能的影响, 本研究进行了工作段直径分别为 $\phi 8\text{mm}$ 和 $\phi 6\text{mm}$ 的热机械疲劳试样在应变比 $R_\epsilon = -1$, 应变与温度之间的相位差为 0° (同相位)、 180° (反相位) 和 135° 相位, $500^\circ\text{C} \rightleftharpoons 1000^\circ\text{C}$ 以及 $550^\circ\text{C} \rightleftharpoons 1000^\circ\text{C}$ 下的热机械疲劳实验。

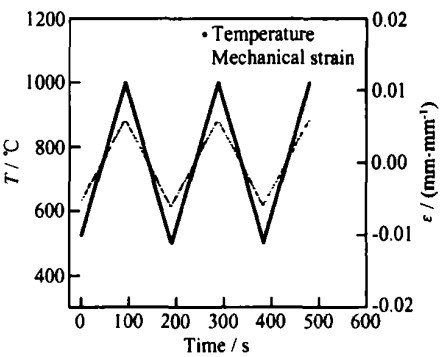


图 2 同相位三角波

Fig. 2 In-phase triangle waveform

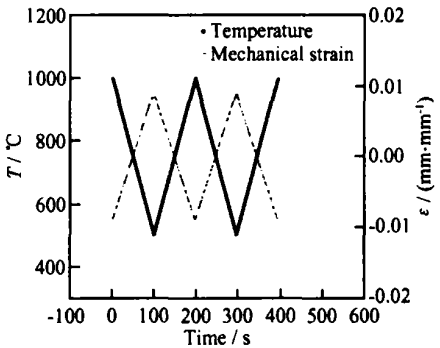


图 3 反相位三角波

Fig. 3 Out-of phase triangle waveform

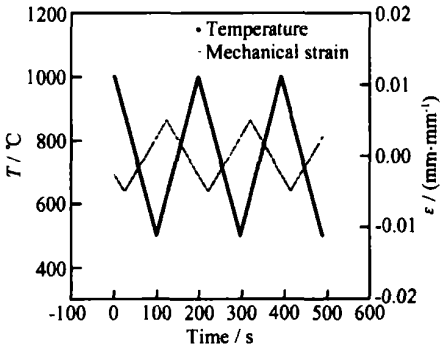


图 4 135° 相位三角波

Fig. 4 135° phase angle waveform

(diamond phase waveform)

由于下限温度只相差 50°C , 因此, 近似认为下限温度的差别对 DZ125 合金的热机械疲劳寿命无明显的影响。

通过实验比较得到的结果如图 5- 图 7 所示。从图 5 可以看出: 在同相位热机械载荷下, 当疲劳寿命小于 100 周时, 工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命与工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命相当; 而当疲劳寿命大于 100 周时, 工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命比 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命要长。 135° 相位热机械载荷下得到了于同相位热机械载荷下相类似的结果,

如图 6 所示。

在反相位热机械载荷下, 工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命比 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命明显长, 如图 7 所示。

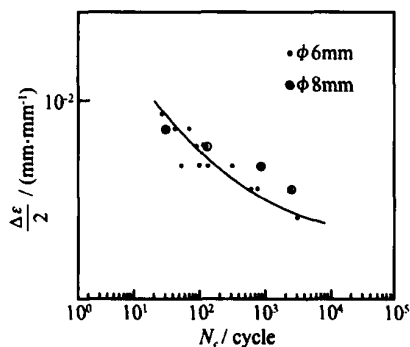


图 5 同相位热机械疲劳寿命

Fig. 5 Fatigue life of in-phase TMF

2.3 分析和讨论

在热机械疲劳过程中, 疲劳裂纹的形成往往都表现为多源起裂, 疲劳、蠕变和氧化损伤同时存在。对于不同的应变水平和热机械载荷形式, 疲劳损伤、蠕变损伤和氧化损伤各自在总损伤中的比重有所不同。实验温度对疲劳损伤、蠕变损伤和氧化损伤有很大的影响。一般地, 对于多晶体镍基高温合金而言, 氧化既可以加速穿晶裂纹的萌生和扩展, 又可以促进合金发生沿晶断裂, 因此氧化降低了合金的低周疲劳寿命。氧化损伤的程度又受外加应力幅值的影响, 外加应力幅值较低时, 氧化损伤的程度相对较小。拉伸氧化有助于裂纹的萌生和扩展, 重复的氧化损伤导致裂纹向基体扩展。在高温加载期间, 高温合金往往也会发生一定量的蠕变变形, 这种蠕变变形有助于穿晶裂纹扩展方式向沿晶裂纹扩展方式的转化, 加速疲劳裂纹的扩展过程, 因此, 蠕变引起高温疲劳寿命下降。蠕变损伤的作用效果与塑性应变分量的大小有关, 一般地, 塑性应变分量越大, 则蠕变引起的损伤越显著。

热机械疲劳实验中温度是通过焊接在试样表面的热电偶控制。当升温 and 降温速率较快时, 试样表面的温度与试样内部的

温度不能同步, 存在一定的温度梯度(试样表面温度比试样内部温度变化快)。这种温度梯度可以通过降低升温 and 降温的速率和减小试样工作段的直径来消除。如果升温 and 降温的速率达到足够小, 温度梯度将与试样工作段的直径无关。但升温 and 降温速率的减小将带来热机械疲劳循环周期的加长, 造成实验周期的加长, 因此应寻找出升温 and 降温速率与试样工作段直径的最佳结合点, 提高实验精确度和缩短实验周期。

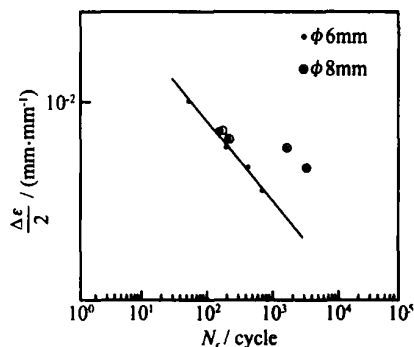


图 6 135° 相位热机械疲劳寿命

Fig. 6 Fatigue life of 135° phase angle (diamond phase) TMF

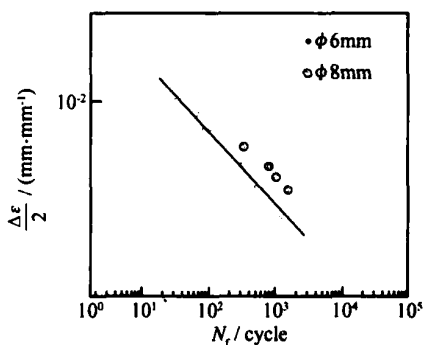


图 7 反相位热机械疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life of out-of-phase TMF

在本研究中由于工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样表面与试样内部的温度梯度比工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样表面与试样内部的温度梯度小, 因此, 工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样内部的温度比 $\phi 8\text{mm}$ 试样内部的温度高、变化快。

在热机械载荷下, 当应变水平较高(疲劳寿命较短)时, 裂纹主要在试样的表面以穿晶萌生, 而且试样的扩展寿命很短, 即: 当出现了疲劳裂纹时, 试样很快发生了断裂, 此时蠕变和氧化损伤对疲劳寿命的影响不大。因此, 当应变水平较高(疲劳寿命较短)时, 工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命与工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命无明显差别。

当应变水平较低(疲劳寿命较长)时, 随着应变水平的降低, 裂纹在试样表面的萌生方式由穿晶方式向沿晶方式转变, 裂纹主要以沿晶扩展。应变水平愈小, 寿命愈长, 温度愈高, 循环次数愈多, 沿晶特征愈明显。疲劳裂纹沿晶萌生需要的能量比穿晶萌生小^[9], 此时蠕变和氧化损伤加快了裂纹的扩展。因此, 当应变水平较低(疲劳寿命较长)时, 由于工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样内部的温度比工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样内部的

(下转第 35 页)

不同还原剂的涤纶织物化学镀银实验,表明镀层表面形貌、晶粒大小有所不同,银元素质量分数都在 95% 以上,且结晶度都在 45% ~ 60% 之间,其中蔗糖镀银表面光滑、晶粒最小,胂镀银晶粒较大,其他镀银晶粒居中。

(2) 电磁波屏蔽效能随着镀层厚度的增加开始增加较明显,随后趋于一稳定值。

(3) 当增重率基本相同时,不同还原剂镀银织物的电磁波屏蔽效能有所不同,其中蔗糖镀银织物电磁波屏蔽性能最好,SE 可以达到 75dB 以上,其次为胂、酒石酸钾钠和甲醛镀银织物,而葡萄糖镀银织物电磁波屏蔽效果较差。

参考文献

[1] 曾炜, 谭松庭. PET 纤维表面化学镀镍工艺及其性能研究[J]. 表面技术, 2004, 33(1): 56- 58.

[2] AKBAROV D, BAYMURATOV B, AKBAROV R. Optimizing process parameters in polyacrylonitrile production for metallization with nickel[J]. Textile Research Journal, 2005, 75(3): 197- 202.

[3] SIMOR M, RAHEL J, CERNAK M, et al. Atmospheric pressure plasma treatment of polyester nonwoven fabrics for electroless plating[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172: 1- 6.

[4] 林一帆. 织物化学镀金属研究[J]. 上海工程技术大学学报, 1997, 11(1): 24- 30.

[5] HAN E G, KIM E A, OH K W. Electromagnetic interference

shielding effectiveness of electroless Cu-plated PET fabrics[J]. Synthetic Metals, 2001, 123: 469- 476.

[6] SEONG H K, KYUNG W O, JAE H B. Electrochemically synthesized polypyrrole and Cu-plated nylon/ spandex for electrotherapeutic pad electrode[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 91: 4064- 4071.

[7] 黄少强, 邱文革, 李生华. 非金属材料表面化学镀银[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(1): 75- 80.

[8] JIANG S Q, NEWTON E, YUEN C W M, et al. Chemical silver plating and its application to textile fabric design[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96: 919- 926.

[9] 张丽芳, 李文明, 刘金玲, 等. 导电 PAN 纤维及其复合材料的制备与性能[J]. 纤维复合材料, 1996, (1): 10- 15.

[10] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论及实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 28- 56.

[11] 周梁青. 化学镀电磁辐射防护织物表面电阻的形成机理和影响因素的探讨[J]. 产业用纺织品, 2004, 22(4): 36- 39.

[12] 顾国锋, 胡航. 化学镀电磁辐射防护织物的屏蔽效能分析[J]. 广西物理, 2005, 26(1): 38- 40.

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2003E102); 陕西省科技厅资助项目(2004K08-G17); 西安市科学技术局资助项目(GG04055); 陕西省教育厅资助项目(06JK299)

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-12-18

作者简介: 张辉(1968-), 男, 副教授, 在读博士, 主要从事功能性纺织材料与产品的研究, 联系地址: 陕西省西安市金花南路 19 号西安工程大学 138 信箱(710048)。

(上接第 30 页)

温度高、变化快, 导致了工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样疲劳寿命比 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命短。

3 结论

(1) 热机械载荷下, 当应变水平较高(疲劳寿命较短)时工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命和工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样的疲劳寿命无明显差别。

(2) 在热机械载荷下, 当应变水平较低(疲劳寿命较长)时, 工作段直径为 $\phi 6\text{mm}$ 试样疲劳寿命比工作段直径为 $\phi 8\text{mm}$ 试样的疲劳寿命短。

(3) 在热机械载荷下, 试样表面和内部温度梯度以及蠕变和氧化损伤的存在, 导致试样工作段直径影响热机械疲劳寿命。

参考文献

[1] BECK T, PITZ G. Thermo-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/机械疲劳和低温周疲劳断裂行为研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 73-

77.

[3] 王建国, 王连庆, 王红缨, 等. 保持时间对涡轮盘材料 GH4133 合金热机械疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 20- 25.

[4] 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的试验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 383- 387.

[5] STRAN GMAN T E. Thermo-mechanical fatigue life model for coated superalloy turbine components [A]. Superalloys 1992[C]. Warrendale, PA: The Minerals Metals & Materials Society, 1992. 795- 804.

[6] REM Y L. Fatigue life prediction under thermo-mechanical loading in a nickel-base superalloy [A]. Thermo-mechanical Fatigue Behavior of Materials, ASTM Committee E9 on Fatigue[C]. ASTM STP 1186, 1993. 3- 16.

[7] 张国栋, 刘绍伦, 何玉怀, 等. 定向合金 DZ125 热/机械疲劳寿命预测模型评估[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 17- 22.

[8] 何玉怀, 刘绍伦, 赵希宏. Ni₃Al 合金热/机械疲劳裂纹扩展速率试验及其寿命预测研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 93- 96.

[9] 方键儒, 姜启川, 韩增祥, 等. 热作模具钢在高温热机械应力循环下的疲劳断裂行为[J]. 材料工程, 2002, (10): 11- 14.

收稿日期: 2006-03-09; 修订日期: 2006-10-25

作者简介: 张国栋(1977-), 男, 硕士, 主要研究方向为高温疲劳与断裂, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱(100095)。