

粉末冶金镍基高温合金 FGH96 高温疲劳寿命分散性特征

苗国磊¹, 杨晓光^{1,2}, 石多奇^{1,2}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 通过宽载荷水平大子样试验研究了缺陷对粉末冶金镍基高温合金 FGH96 的疲劳寿命分散性的影响, 获得 FGH96 在宽载荷水平下的疲劳寿命分布特征. 通过扫描电镜对疲劳失效断口进行统计分析, 揭示缺陷在不同载荷条件下的作用. 结果表明: ① FGH96 中导致疲劳失效的缺陷主要为非金属夹杂; ② 在高应力水平下(1200, 1100 MPa)下, 导致表面萌生裂纹的夹杂是最差疲劳寿命的主导因素, 使得疲劳寿命分散性较大; ③ 在中间应力水平(1000 MPa)下, 在材料内部萌生裂纹的夹杂并不影响疲劳寿命的分散性; ④ 在低应力水平(900 MPa)下, 疲劳破坏均萌生于内部, 在材料内部夹杂处萌生的裂纹并不影响疲劳寿命的分散性. 因此, 在高应力水平下的寿命预测需要考虑缺陷信息.

关 键 词: 粉末冶金高温合金; 缺陷; 疲劳寿命分散性; 载荷水平; 大子样

中图分类号: V250.3

文献标志码: A

Behavior of fatigue life variability of nickel-based powder metallurgy superalloy FGH96 at elevated temperature

MIAO Guo-lei¹, YANG Xiao-guang^{1,2}, SHI Duo-qi^{1,2}

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of defects on fatigue life variability of nickel-based powder metallurgy superalloy FGH96 were investigated by conducting fatigue tests in large sample case at different stress levels. The fatigue life distribution characteristics of FGH96 were obtained. The fatigue fracture analysis of all the tests by scanning electron microscopy showed: (1) the defects contributing to fatigue failure mainly were non-metallic inclusions; (2) under higher stress levels (1200, 1100 MPa), inclusion in the surface was the life-limiting factor, resulting larger life variability; (3) in the middle stress levels (1000 MPa), crack initiation in the internal inclusion did not affect the fatigue life variability; (4) under lower stress level (900 MPa), fatigue crack was initiated in the internally, there were no effects of internal inclusions on fatigue life variability. Therefore, the defects need to be considered in the life prediction at higher stress level.

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057401)

作者简介: 苗国磊(1989—), 男, 博士生, 主要从事高温结构强度、航空发动机适航技术方面的研究.

通讯作者: 杨晓光(1962—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事高温结构强度及材料的疲劳与断裂、本构理论及疲劳寿命预测等方面的研究.

引用格式: 苗国磊, 杨晓光, 石多奇. 粉末冶金镍基高温合金 FGH96 高温疲劳寿命分散性特征[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 424-428. MIAO Guolei, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi. Behavior of fatigue life variability of nickel-based powder metallurgy superalloy FGH96 at elevated temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 424-428.

Key words: powder metallurgy superalloy at elevated temperature; defects; fatigue life variability; stress level; large sample

在采用试验获得材料的 S-N 曲线时,通常将远高于试验寿命均值或低于试验寿命均值的试验数据点视为非正常点,因而将这样的试验点略去。而近年来,国外研究者^[1-2]通过试验研究认为这些远高于及远低于试验寿命均值的试验数据由不同的失效机理决定的。并从材料的微观结构出发,研究其对疲劳寿命试验数据分散的影响。

材料的晶粒尺寸、取向、夹杂的尺寸及位置等的随机分布,造成材料在晶粒尺度上是不均匀的。在名义均布载荷条件下,微观结构的不均匀性造成其晶粒尺度上受力的不均匀。在疲劳载荷条件下,就会在一些特定的微观结构处(如夹杂、较大晶粒聚集处等)萌生疲劳裂纹。由于微结构分布的随机性,造成疲劳寿命具有一定的分散性。

Jha, Golden 等研究了 Ti-10-2-3^[3], Ti-6246^[4], Ti-64^[5], γ -TiAl^[6] 等钛合金的疲劳寿命分散性特征,揭示了造成疲劳寿命分散性的几种特征微结构。美国空军实验室^[4,7-9]研究了含有夹杂的第 1 代粉末冶金高温合金 IN100 的疲劳寿命分散性行为,揭示了缺陷在疲劳寿命分散性中的作用,指出最差疲劳寿命由缺陷控制。随着粉末冶金工艺水平的提升,第 2 代粉末冶金镍基高温合金的缺陷得到了一定的控制。第 2 代粉末冶金高温合金的疲劳寿命分散性特征可能与第 1 代有所不同,因此还需要大量的试验研究。Cashman^[10]研究了第 2 代粉末冶金高温合金 René 88DT 低循环疲劳寿命分散性行为,发现在高应力水平下,裂纹萌生于表面;在低应力水平下,裂纹萌生于材料内部。疲劳寿命呈现双 S-N 曲线现象。Miao 等^[11-12]研究了 René 88DT 超高周疲劳的疲劳竞争机制,在低应力下裂纹萌生于材料内部。Chang^[13]研究了缺陷的密度和试样的尺寸对疲劳寿命分散性规律的影响。国内在粉末合金的缺陷也有不少的研究^[14-19]。这些研究通常研究单一缺陷的力学行为或是采用传统的寿命预测思路来把控缺陷的影响规律。采用大子样分散性试验研究可能提供研究缺陷问题的新思路。国外研究者^[20-26]也建立了相应的基于材料微观结构的疲劳寿命分散性模拟计算方法。而国内在这方面的研究还较少。

本文研究中国第 2 代粉末冶金镍基高温合金 FGH96 在高温下的疲劳寿命分散性行为。试验应力水平从高循环疲劳载荷至低循环疲劳载荷。通

过对所有试样进行微观统计分析,揭示缺陷在疲劳寿命分散性中的作用。

1 试验材料及方法

1.1 材 料

本文采用的材料为第 2 代粉末冶金镍基高温合金 FGH96,采用的是标准的实际应用中的材料,并未人为引入缺陷。通过电子背散射衍射技术(EBSD)得到如图 1 所示的 FGH96 的晶粒尺寸分布,其隐去孪晶晶界之后统计得到的晶粒平均尺寸(即夹杂等效圆面积的直径)为 23.8 μm 。从图 2 中可以看出,FGH96 中存在大量孪晶(图中红色线为 $\Sigma 3$ 孪晶晶界)。图 3 为晶粒的反极图,从图中可以看出 FGH96 晶粒取向随机分布。

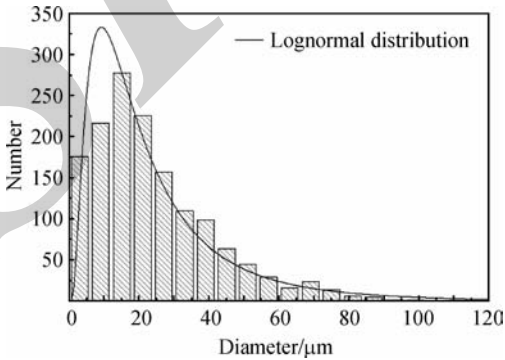


图 1 FGH96 晶粒尺寸分布
Fig. 1 Grain diameter distribution of FGH96

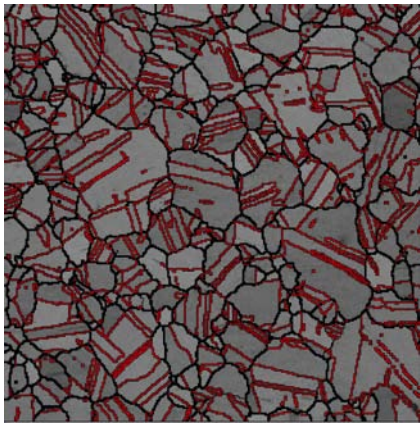


图 2 FGH96 材料的孪晶晶界
Fig. 2 Twin crystal boundaries within the microstructure of FGH96

1.2 试 验

本文试验在岛津液压疲劳试验机上进行。试

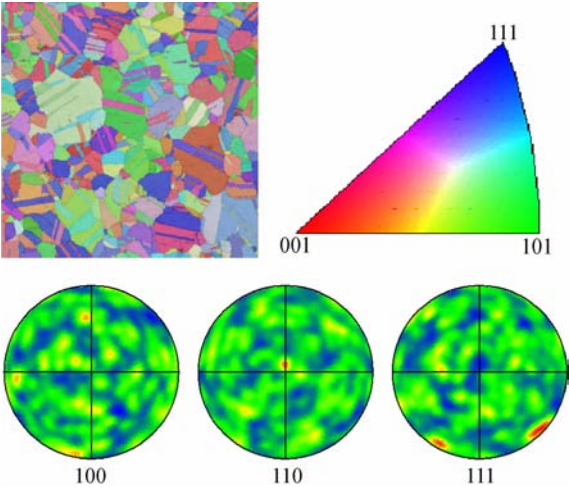


图 3 FGH96 晶粒的反极图

Fig. 3 Inverse pole figure map of FGH96 grain

验的温度为 600 ℃,采用应力控制方式. 试验的最大应力水平 $\sigma_{\max}$ 分别为 900, 1 000, 1 100, 1 200 MPa, 试验的应力比 $R=0.05$, 频率为 5 Hz. 试验采用标准疲劳试验试样^[27], 如图 4 所示. 在相同应力水平下, 最多的一组进行了 12 根试样的试验.

粉末冶金镍基高温合金对表面的加工缺陷如刀痕等较为敏感, 因此本文对所有试样先进行了低应力研磨, 再对表面进行电解抛光处理, 以消除表面加工痕迹, 保证每件试样尽量处于相同的表面状态. 处理后的试样, 经 X 射线测定其残余应力可以忽略. 电解抛光在 25 V 直流电和 -20 ℃ 的条件下进行, 电解抛光液中各成分体积比为: 乙醇: 乙二醇丁醚: 高氯酸 = 55 : 35 : 10.

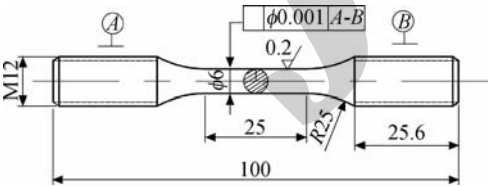


图 4 试样尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Shape and dimensions of the specimen (unit:mm)

2 结果及讨论

2.1 疲劳寿命分散性特征

FGH96 的疲劳寿命如图 5 所示. 从图中可以看出, 在高应力水平(1 200 MPa)下, 疲劳寿命分散性仍然较大. 这与非粉末冶金镍基高温合金有所不同: 通常非粉末冶金高温合金高应力水平下疲劳寿命分散性较小. 这就使得采用传统的寿命

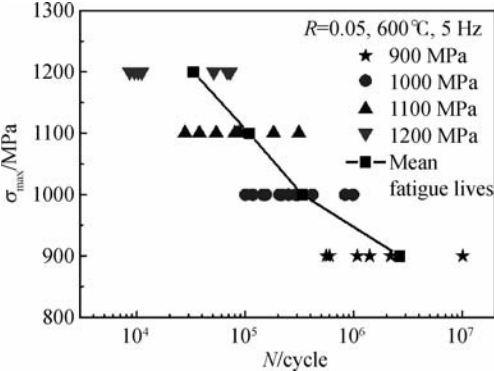


图 5 FGH96 疲劳寿命试验数据

Fig. 5 Testing fatigue life of FGH96

预测模型预测粉末冶金镍基高温合金的低循环疲劳寿命难以保证预测精度.

从图 6 所示的概率坐标纸上可以看出, 在 $\sigma_{\max}=1200$ MPa 下, 疲劳寿命并非服从对数正态分布, 而是表现出“阶梯状”特征, 表明在 1 200 MPa 下出现两种失效机制. 这一现象与 Jha 等^[4,9]研究结果相类似. 但是其他载荷条件下, 并没有出现阶梯状特征, 这与 Jha 等研究的 IN100 的现象不同.

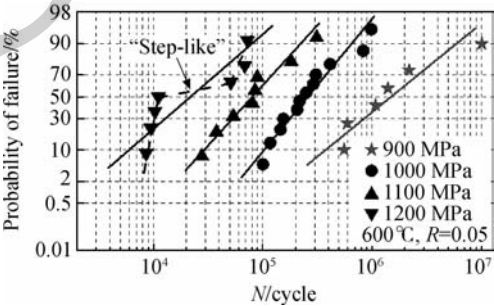


图 6 疲劳寿命的累计失效分布

Fig. 6 Cumulative failure distribution of fatigue life

2.2 缺陷在疲劳寿命分散性中的作用

对所有断口进行扫描电镜分析. 统计裂纹萌生源的位置, 得出 3 种裂纹萌生位置: ①表面萌生; ②亚表面萌生; ③内部萌生. 图 7 所示为 3 种典型的裂纹萌生类型. 内部萌生呈现出“鱼眼”特征. 从图 8 中可以看出, 随着裂纹萌生位置最近转向材料的内部, 其疲劳寿命越长.

对所有裂纹萌生位置进行分析, 统计得到如图 9 所示的裂纹萌生源类型. 可以看出在 600 ℃ 条件下, 共有两种裂纹萌生模式: ①夹杂萌生裂纹; ②解理萌生裂纹. 没有发生在气孔处萌生导致破坏的情况. 在高应力水平下(1 200 MPa 和 1 100 MPa), 出现表面夹杂萌生情况; 在中间应力水平

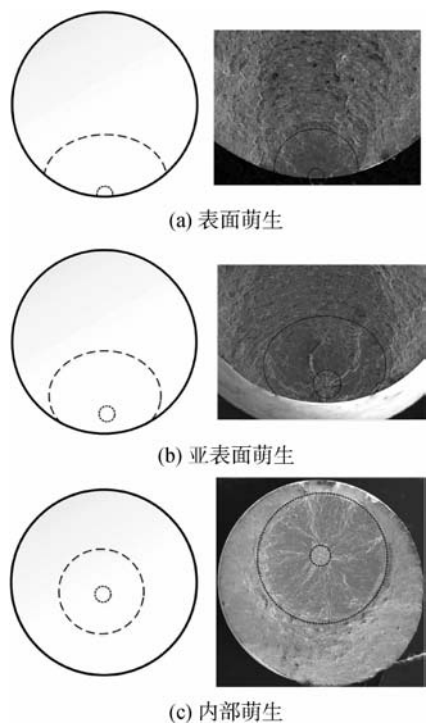


图 7 裂纹萌生的 3 种位置

Fig. 7 Three kinds of fatigue crack initiation sites

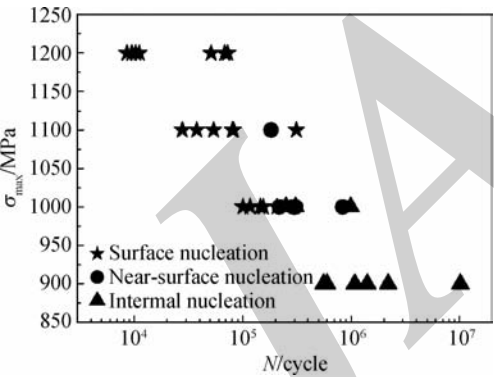


图 8 裂纹萌生位置统计结果

Fig. 8 Statical results of fatigue crack initiation sites

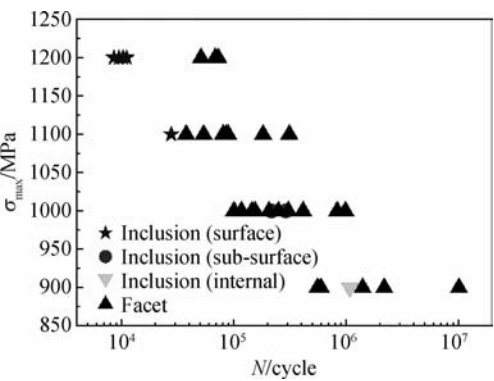


图 9 裂纹萌生源类型

Fig. 9 Source types of fatigue crack initiation

下(1000 MPa),出现亚表面夹杂萌生;在低应力水平下(900 MPa),出现内部夹杂萌生情况. 表面夹杂导致高应力水平下疲劳寿命分散性较大,是最差寿命的限制因素. 低应力情况下,亚表面及内部的夹杂并不会增大疲劳寿命分散性.

3 结 论

通过 FGH96 的疲劳寿命分散性研究可以得出:

- 1) 随着应力水平的降低,裂纹萌生位置逐渐由材料表面转向材料内部,疲劳寿命也越长.
- 2) 裂纹萌生源只有夹杂萌生和解理萌生,没有气孔萌生情况.
- 3) 夹杂是高应力水平下最差寿命的限制因素,在高应力水平下,夹杂增大疲劳寿命分散性,而在低应力水平下,萌生于亚表面及内部的夹杂并不影响疲劳寿命分散性.

参考文献:

[1] Cashman G T. A review of competing modes fatigue behavior[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(3): 492-496.

[2] Chan K S. Roles of microstructure in fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(9): 1428-1447.

[3] Jha S K, Chandran K S R. An unusual fatigue phenomenon: duality of the S-N fatigue curve in the β -titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(8): 1207-1212.

[4] Jha S K, Larsen J M, Rosenberger A H. Towards a physics-based description of fatigue variability behavior in probabilistic life-prediction[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(5): 681-694.

[5] Golden P J, John R, Porter W J. Variability in room temperature fatigue life of $\alpha + \beta$ processed Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11): 1764-1770.

[6] Jha S K, Larsen J M, Rosenberger A H. The role of competing mechanisms in the fatigue life variability of a nearly fully-lamellar γ -TiAl based alloy [J]. Acta Materialia, 2005, 53(5): 1293-1304.

[7] Caton M J, Jha S K. Small fatigue crack growth and failure mode transitions in a Ni-base superalloy at elevated temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(9): 1461-1472.

[8] Jha S. Collaborative research and development (CR&D) delivery order 0037: mechanisms causing fatigue variability in turbine engine materials[R]. AFRL-RX-WP-TM-2008-4084, 2008.

[9] Jha S K, Caton M J, Larsen J M. A new paradigm of fa-

- tigue variability behavior and implications for life prediction[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 468-470: 23-32.
- [10] Cashman G T. A statistical methodology for the preparation of a competing modes fatigue design curve[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2007, 129(1): 159-168.
- [11] Miao J. Very high cycle fatigue behavior of nickel-based superalloy René 88 DT[D]. Michigan, US: the University of Michigan, 2010.
- [12] Miao J, Pollock T M, Jones J W. Crystallographic fatigue crack initiation in nickel-based superalloy René 88DT at elevated temperature[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(20): 5964-5974.
- [13] Chang P N. Competing fatigue mechanisms in Ni-based superalloy René 88DT[D]. Utah, US: University of Utah, 2011.
- [14] 刘新灵, 陶春虎. 粉末高温合金缺陷特性及寿命预测方法研究进展和思考[J]. *材料导报*, 2013, 27(21): 92-96.
LIU Xinling, TAO Chunhu. Research progress and analysis on defect characteristic and life estimation of powder metallurgy superalloy [J]. *Materials Review*, 2013, 27(21): 92-96. (in Chinese)
- [15] 张丽娜, 张麦仓, 李晓, 等. 粉末高温合金中非金属夹杂物问题的研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2001, 24(3): 64-68.
ZHANG Lina, ZHANG Maicang, LI Xiao, et al. Progress in study of nonmetallic inclusion in powder metallurgy (P/M) superalloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2001, 24(3): 64-68. (in Chinese)
- [16] 赵军普, 陶宇, 袁守谦, 等. 粉末冶金高温合金中的原始颗粒边界(PPB) 问题[J]. *粉末冶金工业*, 2010, 20(4): 43-49.
ZHAO Junpu, TAO Yu, YUAN Shouqian, et al. The problem of prior particle boundary precipitation in P/M superalloys[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2010, 20(4): 43-49. (in Chinese)
- [17] 赵勇铭. 夹杂物对粉末冶金涡轮盘应力强度因子及裂纹扩展寿命的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [18] 胡绪腾. 粉末高温合金高温疲劳寿命模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [19] 刘新灵, 陶春虎. FGH96 粉末高温合金损伤行为与寿命预测[J]. *失效分析与预防*, 2011, 6(2): 124-129.
LIU Xinling, TAO Chunhu. Damage behavior and life prediction of FGH96 powder metallurgy superalloy[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2011, 26(2): 124-129. (in Chinese)
- [20] McDowell D L, Dunne F P E. Microstructure-sensitive computational modeling of fatigue crack formation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(9): 1521-1542.
- [21] Shenoy M, Tjip towidjojo Y, McDowell D. Microstructure-sensitive modeling of polycrystalline IN 100[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(10): 1694-1730.
- [22] McDowell D L. Simulation-based strategies for microstructure-sensitive fatigue modeling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 468-470: 4-14.
- [23] Przybyla C, Prasannavenkatesan R, Salajegheh N, et al. Microstructure-sensitive modeling of high cycle fatigue [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(3): 512-525.
- [24] Przybyla C P, McDowell D L. Microstructure-sensitive extreme value probabilities for high cycle fatigue of Ni-base superalloy IN100[J]. *International Journal of Plasticity*, 2010, 26(3): 372-394.
- [25] Przybyla C P, McDowell D L. Simulated microstructure-sensitive extreme value probabilities for high cycle fatigue of duplex Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27(12): 1871-1895.
- [26] Musinski W D, McDowell D L. Microstructure-sensitive probabilistic modeling of HCF crack initiation and early crack growth in Ni-base superalloy IN100 notched components[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 37: 41-53.
- [27] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3075-2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(编辑: 陈 越)