

文章编号:1000-8055(2013)07-1613-05

高温条件下 DZ125 缺口疲劳性能试验

胡晓安¹, 王井科², 杨晓光¹, 石多奇¹, 黄 佳¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 空军装备研究院 装备总体论证研究所, 北京 100076)

摘 要: 研究了定向凝固合金 DZ125 U 型平板缺口试样在 850 ℃ 下的缺口疲劳行为, 进行了理论应力集中因子分别为 1.91, 3.01 和 4.35 下的疲劳试验, 原位观察了疲劳裂纹的萌生位置和扩展方向, 并进行了疲劳寿命分析和裂纹萌生与扩展分析. 结果表明: 理论应力集中因子关联缺口疲劳寿命. 随着名义应力的增加, 缺口疲劳寿命对理论应力集中因子更敏感, 而在低应力范围内, 正好相反. 通过原位观测技术, 试验中还发现缺口疲劳裂纹的萌生和扩展并没有在最大轴向应力的缺口根部, 而是缺口附近最大主应力位置.

关 键 词: 疲劳; 缺口; 应力集中因子; 裂纹; 高温; 定向凝固合金

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Experiment on DZ125 notch fatigue behavior at high temperature

HU Xiao-an¹, WANG Jing-ke², YANG Xiao-guang¹,
SHI Duo-qi¹, HUANG Jia¹

(1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Equipment Demonstration and Research Institute,
Air Force Equipment Academy, Beijing 100076, China)

Abstract: Notched fatigue behavior of directional solidified superalloy DZ125 at 850 ℃ was investigated. Different U type notched specimens with three stress concentration factors including 1.91, 3.01, and 4.35 were tested. Crack initiation and propagation were observed in situ. The fatigue life and crack initiation and propagation were analyzed. The results indicate that stress concentration factor is an important parameter infect the life to fatigue failures, while converse results obtained at low stress range. With the increase of nominal stress, the notch fatigue life became more sensitive to stress concentration factor. Through in situ observation, it's found that the locations of the crack initiation and propagation were not at the root of the notch, but at the location with maximum principal stress.

Key words: fatigue; notch; stress concentration factor; crack; high temperature; directional solidified superalloy

由于气动和冷却设计要求, 航空发动机涡轮叶片通常会带几何突变、几何不连续等结构特

征, 使得在离心力和高温热载荷下, 局部存在大量的应力梯度区域, 且应力呈现多轴状态. 对于定向

收稿日期: 2012-06-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130711.1810.201307.1613_027.html

作者简介: 胡晓安(1986—), 男, 江西萍乡人, 博士生, 主要从事航空发动机高温结构及材料的强度、本构及寿命理论的研究.

通讯作者: 杨晓光(1962—), 男, 上海人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事高温结构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.

凝固镍基高温合金材料,其缺口构件的低循环疲劳行为由于受到尺寸、晶粒大小和方向、应力集中因子、应力梯度、高温条件和使用环境等诸多因素的影响而变得更加复杂。

目前,国内外关于镍基高温合金尤其镍基定向凝固和单晶材料的缺口疲劳的研究还不多,CHU等^[1-2]对光滑和缺口定向凝固合金DZ951的高循环疲劳行为进行了研究,结果表明温度对DZ951的疲劳性能、破坏机制都有重要影响,而且发现缺口对构件疲劳行为影响很大,在高循环疲劳载荷作用下,裂纹在缺口根部多个位置萌生。Moore^[3]对CM247LC定向凝固合金缺口试样在750℃和950℃下的疲劳研究表明,应力集中使得疲劳寿命降低,而温度对寿命的影响也是显著的,950℃下缺口试验寿命下降的程度要低于750℃下,且裂纹萌生位置不在缺口根部,而是与最大Hill应力位置重合,此外Moore等^[4]还对定向凝固合金缺口蠕变行为进行了研究。CHEN等^[5]对镍基多晶材料Inconel 718缺口疲劳的研究表明:裂纹萌生疲劳极限随着温度升高而增加,而裂纹扩展疲劳极限则恰好相反。Filippini^[6]对镍基单晶高温合金CMSX-4缺口低循环疲劳研究表明,疲劳破坏受到缺口的几何形状和面心立方晶体微观结构的影响。REN和Nicholas^[7]研究了缺口尺寸对Udimet 720材料圆棒试样高循环疲劳极限的影响,结果表明:缺口尺寸从小缺口变化到中缺口,会对疲劳极限产生一定影响,而从中缺口变化到大缺口,则几乎不影响,电子扫描电镜观察表明裂纹在缺口尖端萌生。

对于国产定向凝固合金DZ125,周天朋等人^[8]对小孔构件进行了低循环疲劳和保载疲劳试验,结果表明裂纹起始位置在小孔应力最大点附近的缺陷处。杨晓光和王井科等^[9]提出了一种考虑应力集中因子的基于临界距离理论的缺口疲劳预测方法,该方法应用于DZ125材料和TC4钛合金材料均给出了很好的预测结果。其他针对DZ125的扩展研究主要集中在疲劳蠕变交互作用^[10-11],不同试验尺寸^[12]、取向^[13]和相位角对热机械疲劳寿命^[14]的影响以及焊接力学性能^[15]上,用以获得应变比、应变范围、保载时间和试验温度、相位角等参数对循环应力应变响应、微观破坏机制和寿命的影响,而考虑应力梯度的缺口疲劳研究还十分欠缺。因此,开展高温条件下定向凝固合金不同理论应力集中因子 K_t 的缺口试样的低循环疲劳试验,研究其寿命影响规律和失效机

理,具有十分重要的理论和工程意义。

1 试验材料及方法

DZ125合金的主要化学成分(质量分数):C为0.07%~0.12%,Cr为8.4%~9.4%,Co为9.5%~10.5%,W为6.5%~7.5%,Mo为1.5%~2.5%,Al为4.8%~5.4%,Ti为0.7%~1.2%,Ta为3.5%~4.1%,B为0.01%~0.02%,Hf为1.2%~1.8%,Ni为余量。试验用DZ125合金铸坯母材采用真空感应炉,浇铸成直径为70~90 mm的圆形试棒,再经线切割加工成试验用试样,并保证晶粒的生长方向与试棒的轴向(L方向)平行,试验前沿试样的轴向方向和缺口表面都用粒度为1200的SiC砂纸细磨,以排除试样表面加工缺陷的干扰。试样的几何尺寸如图1所示,相关编号和试验数量如表1所示。

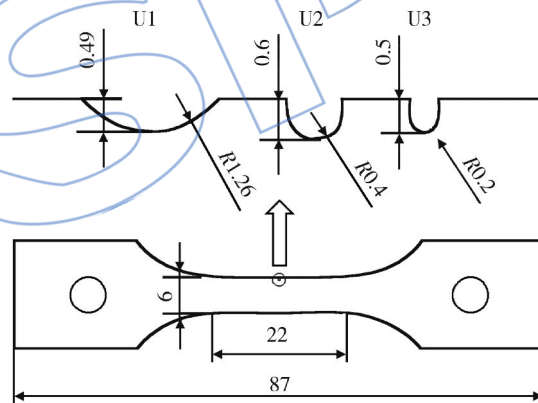


图1 U型缺口试样及其尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen and size of U-type notches (unit:mm)

表1 U型缺口试样几何参数

Table 1 Geometry parameters of U-type notches

试样 编号	缺口深度 h/mm	根部半径 r/mm	理论应力集 中因子 K_t	试样 根数
U1	0.49	1.26	1.91	2
U2	0.60	0.40	3.01	6
U3	0.50	0.20	4.35	3

试验参照《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》(GB/T 15248)和《金属材料轴向加载疲劳试验方法》(HB 5287-1996),试验在一台计算机控制的100 kN的万能试验机(型号EHFEM100K2)上进行,加热方式采用三段式电热丝加热炉进行加热,采用比例-积分-微分(proportion-integration-differ-

entiation, PID) 控制器保证控制温度与实际温度的温差在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 内, 试验环境为实验室静态空气介质, 采用轴向应力控制的拉伸和卸载方式. 此外, 为了实时观察裂纹的萌生、扩展情况, 使用 Quenstar 公司的 QM100 长焦显微镜, 透过加热炉上的小孔, 得到缺口周围的光学影像. 同时, 用图像传感器 (charge-coupled device, CCD) 将光学影像转换为数字信号显示在电脑上, 从而实现原位 (实时) 观测缺口边裂纹的萌生、扩展. 试验采用应力控制的三角波加载, 加载方向沿试样轴向, 控制名义载荷比 $R = 0.1$, 温度选取为 DZ125 材料的典型工作温度 850°C , 加载频率为 0.5 Hz .

2 DZ125 缺口疲劳试验结果及分析

2.1 不同 K_t 下的疲劳寿命

定义缺口试样最大轴向应力与试样缺口根部净截面名义应力之比为理论应力集中因子 K_t . 不同 K_t 下的缺口疲劳试验寿命如图 2 所示, 横坐标为断裂循环数, 纵坐标为缺口根部截面名义应力.

图 2 中可以看到: 寿命和 K_t 的关联效应十分明显, 采用光滑试样获得的传统意义上的 Manson-Coffin 方程, 采用名义应力和局部最大应力作为损伤参数, 均给出不同 K_t 下的寿命进行准确预测, DZ125 材料缺口疲劳寿命模型应当包含

K_t 重要参数. 同时在根部截面名义应力较大的区域, 寿命对 K_t 更加敏感, 主要原因是在应力控制条件下, 由于蠕变效应, 使得局部发生了棘轮效应, 累积的塑性应变造成疲劳破坏的发生, 而对于低应力区域, 结果正好相反, 寿命关联 K_t 不那么明显.

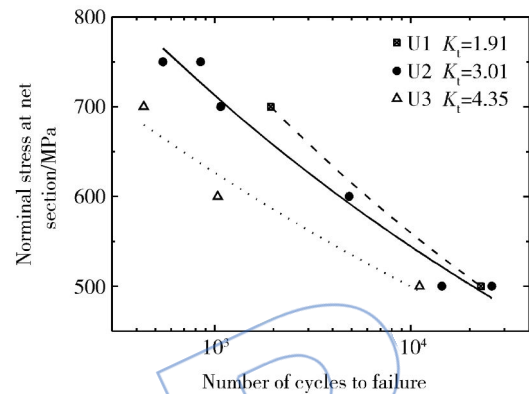


图2 DZ125 缺口疲劳试验数据

Fig. 2 Data of DZ125 notched fatigue test

2.2 DZ125 缺口构件裂纹萌生和扩展

运用 QM100 长焦显微镜结合 CCD 图像传感器, 试验实现了实时、原位详细记录了高温环境下、定向凝固合金 DZ125 缺口构件表面, 疲劳裂纹从萌生到短裂纹 ($100 \sim 800\ \mu\text{m}$) 扩展的整个过程, 如图 3 所示. 图中显示了不同时刻裂纹萌生和

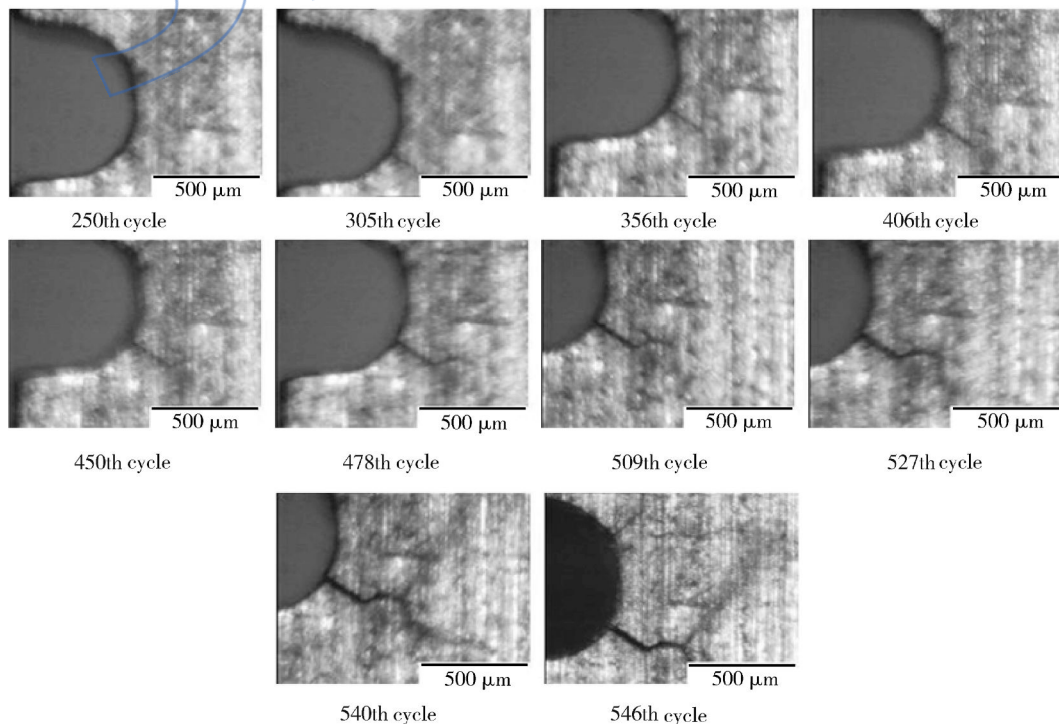


图3 试验中缺口试样裂纹萌生及扩展情况

Fig. 3 Crack initiation and propagation of notched specimen from tests

扩展的详细情况,可以看到裂纹萌生位置并没有在最大轴向应力的缺口根部.对缺口试样进行各项异性的线弹性有限元分析,图4显示的是缺口根部厚度方向中间截面的最大主应力和轴向应力沿着缺口表面的分布.通过对比表明:缺口件最大主应力和观察到的裂纹萌生位置十分接近,因此最大主应力和理论应力集中因子很可能是主导疲劳破坏的关键因素.

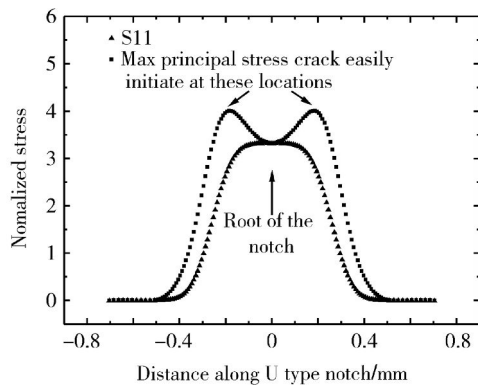


图4 U型缺口试样缺口上的轴向应力和最大主应力分布

Fig. 4 Axial stress and max principal stress along U-type notched specimen

对于裂纹扩展的观察表明:裂纹沿着最大主应力方向扩展.图5的微观金相分析再次证明两条主裂纹萌生位置均不是在缺口根部,而是对称分布在缺口尖端两侧,大约在最大主应力附近.图5中还可以看得:单条主裂纹在试样的正反面扩

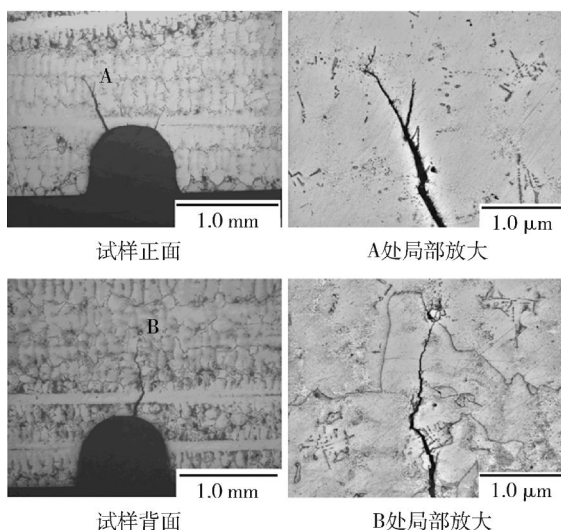


图5 缺口试样的微观晶向组织

Fig. 5 Microstructure of notched specimens

展不完全一致,这可能受到定向凝固合金微观结构的影响.

3 结 论

通过对定向凝固合金 DZ125 不同理论应力集中因子的单边 U 型平板缺口试样在 850 °C 下的缺口疲劳试验研究表明:基于传统光滑试验的唯象理论不能给出缺口疲劳的合理寿命预测,缺口疲劳试验寿命与理论应力集中因子关联,缺口疲劳寿命方程应当包含理论应力集中因子这一重要参数,对裂纹萌生和扩展的观察表明:裂纹萌生和扩展位置并不是传统意义上的缺口根部的最大轴向应力点,而是沿着缺口位置最大主应力方向.

参考文献:

- [1] CHU Zhaokuang, YU Jinjiang, SUN Xiaofeng, et al. High temperature low cycle fatigue behavior of a directionally solidified Ni-base superalloy DZ951[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 488(1/2): 389-396.
- [2] CHU Zhaokuang, YU Jinjiang, SUN Xiaofeng, et al. High cycle fatigue behavior of a directionally solidified Ni-base superalloy DZ951[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1/2): 355-361.
- [3] Moore Z J. Life modeling of notched CM247LC DS nickel-based superalloy[D]. Master Dissertation, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [4] Moore Z J, Neu R W. Creep fatigue of a directionally solidified Ni-base superalloy-smooth and cylindrically notched specimens[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2010, 34(1): 17-31.
- [5] CHEN Qiang, Kawagoishi N, Nisitani H. Evaluation of notched fatigue strength at elevated temperature by linear notch mechanics[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(9): 925-931.
- [6] Filippini M. Notched fatigue strength of single crystals at high temperature[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 3787-3792.
- [7] REN Weiju, Nicholas T. Notch size effects on high cycle fatigue limit stress of Udimet 720[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 357(1/2): 141-152.
- [8] 周天朋, 杨晓光, 侯贵仓, 等. DZ125 带小孔构件低循环/保载疲劳试验与分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1526-1531.
ZHOU Tianpeng, YANG Xiaoguang, HOU Guicang, et al. Experimental analysis of low cycle and creep fatigue for directionally solidified DZ125 with a hole[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1526-1531. (in Chinese)
- [9] YANG Xiaoguang, WANG Jingke, LIU Jinlong. High temperature LCF life prediction of notched DS Ni-based superalloy using critical distance concept[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 23(11): 1470-1476.

- [10] 刘金龙,杨晓光,石多奇,等.不同保载时间作用下的定向凝固合金 DZ125 的高温低循环疲劳试验研究[J].航空材料学报,2010,30(5):88-91.
LIU Jinlong, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi, et al. Experimental study on low cycle fatigue of directionally solidified superalloy DZ125 with different holding time[J]. Journal of Aeronautical Material, 2010, 30(5): 88-91. (in Chinese)
- [11] SHI Duoqi, LIU Jinlong, YANG Xiaoguang, et al. Experimental investigation on low cycle fatigue and creep-fatigue interaction of DZ125 in different dwell time at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering, 2010, 528(1): 233-238.
- [12] 张国栋,于慧臣,何玉怀,等.试样尺寸对定向合金 DZ125 热机械疲劳寿命的影响[J].材料工程,2007(5):28-30.
ZHANG Guodong, YU Huichen, HE Yuhuai, et al. Effects of specimen dimension on thermomechanical: I fatigue life in DS superalloy DZ125[J]. Journal of Material Engineering, 2007(5): 28-30. (in Chinese)
- [13] 张国栋,刘绍伦,何玉怀.材料取向对定向合金 DZ125 热/机械疲劳行为与寿命的影响[J].材料工程,2003(增刊): 190-192.
ZHANG Guodong, LIU Shaolun, HE Yuhuai. Influence of crystal-orientation on the behavior and life of thermal-mechanical fatigue in DS superalloy DZ125[J]. Journal of Material Engineering, 2003(Sup.): 190-192. (in Chinese)
- [14] 张国栋,刘绍伦,何玉怀.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 Guodong, LIU Shaolun, HE Yuhuai. The effects of phase angle on thermomechanical fatigue behavior and life in DS superalloy DZ125[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 383-387. (in Chinese)
- [15] YANG Xiaoguang, DONG Chengli, SHI Duoqi. Experimental investigation on both low cycle fatigue and fracture behavior of DZ125 base metal and the brazed joint at elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2011, 528(22): 7005-7011.