

GH4169 高温合金裂纹萌生数值模拟

申顺

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为研究金属材料微观组织特征对其疲劳寿命的影响,基于 Tanaka-Mura 裂纹萌生寿命预测模型对高温合金 GH4169 的疲劳裂纹萌生过程进行数值模拟。利用 Voronoi 图法生成具有代表性的微观组织模型,并考虑晶粒内相互平行的多滑移特性建立微裂纹萌生模型,模拟 GH4169 在循环载荷作用下的裂纹萌生过程。将裂纹萌生寿命的模拟结果与 GH4169 疲劳试验数据相比较,说明了 Tanaka-Mura 裂纹萌生寿命预测模型的有效性。

关键词:高温合金;裂纹萌生;Tanaka-Mura 模型;Voronoi 图法

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0122-03

Numerical Simulation of Crack Initiation in GH4169 Superalloy

SHEN Shun

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the influence of the microstructure characteristics of metal materials on its fatigue life, the fatigue crack initiation process of superalloy GH4169 is simulated numerically based on the Tanaka-Mura crack initiation life prediction model. The Voronoi diagram method is used to generate a representative microstructure model, and the micro-crack initiation model is established in consideration of the parallel multi-slip characteristics in the grains, and the crack initiation process of GH4169 under cyclic loading is simulated. Comparison is performed between the numerical simulation results of crack initiation life and the GH4169 experimental data, which shows the validity of the life prediction model.

Keywords: superalloy; crack initiation; Tanaka-Mura model; Voronoi diagram

0 引言

GH4169 是一种含有镍、铬和铁等多种元素的变形高温合金,在 650 °C 以下具有高强度、良好的抗疲劳和耐腐蚀性能以及优良的加工和焊接性能等优点,因此被广泛用于航空航天等应用条件较为恶劣的环境中。疲劳和断裂是引起工程结构和构件失效的主要原因^[1],而疲劳裂纹是疲劳破坏的主要原因。通常将疲劳失效的过程分为疲劳裂纹萌生、裂纹扩展和快速断裂 3 个阶段^[2]。其中裂纹萌生寿命有时会占到整个疲劳寿命的 80%~90%,因此对疲劳裂纹萌生过程的研究具有非常重要的意义。目前对材料的裂纹萌生寿命研究主要是基于大量实验数据的唯象法,这种方法需要耗费大量的时间和经济成本。随着疲劳裂纹萌生理论的逐渐完善和计算机仿真技术的快速发展,越来越多的学者开始采用有限数值模拟的方法研究疲劳裂纹萌生过程。

1 裂纹萌生理论模型

金属大多是多晶体。当构件受到外部载荷作用时,晶粒内部的位错会沿着晶面产生相对滑动,从而造成如图 1 所示的材料表面的侵入和挤出现象,即为滑移带。大量研

究表明,材料的疲劳裂纹大都在滑移带处萌生,微裂纹扩展并相互连接到一起形成主裂纹,这就是裂纹萌生的过程。

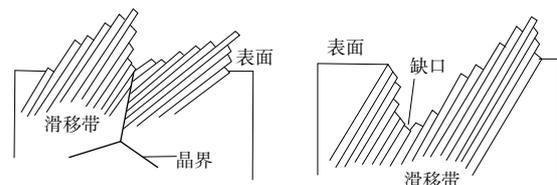


图 1 疲劳裂纹起源

目前,裂纹的萌生与扩展已经可以通过实验进行观察^[3]。大量的实验研究也表明在大多数多晶金属材料中,沿滑移带的不可逆滑移是疲劳裂纹萌生的根本原因^[4]。

TANAKA K 和 MURA T^[5]通过对多晶体试样进行疲劳试验,于 1981 年首次提出了基于累计损伤理论的疲劳微裂纹沿晶粒内的滑移线萌生的模型,如图 2 所示。TANAKA K 和 MURA T 认为,晶粒滑移带在载荷作用下,其位错偶极子会不断地向滑移层两边堆积,从而引起变形能的增加。将滑移带中每次循环产生的变形能进行累积叠加可得到产生的总变形能 U_s 。 U_s 可表示为切变模量、泊松比、位错阻力以及加卸载平均切应力变程的函数。当

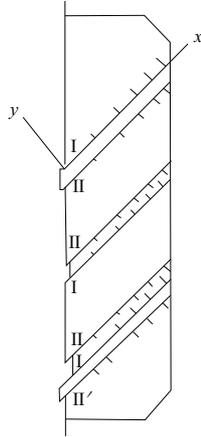


图2 Tanaka-Mura 位错模型

产生的总变形能与晶粒的表面能相当的时候,认为该位错形成微裂纹。每条裂纹开裂所需的能量如式(1)所示。

$$U_s = N\Delta U_s = 4aW_s \quad (1)$$

最终得到了疲劳载荷下裂纹萌生的循环寿命,如式(2)所示。

$$N = 4aW_s / (\Delta\tau - 2k) \Delta\gamma = \frac{8GW_s}{\pi(1-\nu)a(\Delta\tau - 2k)^2} \quad (2)$$

式中: G 是切变模量; ν 是泊松比; W_s 为单位面积的起裂能; a 是每个晶粒所对应的滑移带的长度; $\Delta\tau$ 是循环加卸载平均切应力变程; k 是位错滑移阻力; N 为特定滑移带形成微裂纹所需要的循环次数。

由式(2)可知,除了滑移带长度和平均切应力变程外,其他参数均为与材料相关的常数,因此只要得到这两个变量的值,即能得到微裂纹起裂的循环次数 N 。

国内外诸多学者运用 Tanaka-Mura 位错理论进行了裂纹萌生过程的数值模拟。陈小进^[6]通过 Python 语言对 ABAQUS 进行二次开发,模拟了钛合金电子束焊接头不同区域的裂纹萌生过程,殷良伟^[7]建立了高温下电子束焊接头裂纹萌生模型,左永基^[8]在 Tanaka-Mura 模型的基础上探讨了晶粒尺寸和疲劳载荷对裂纹萌生的影响。

2 多晶模型

2.1 GH4169 微观组织观察

为了观察和测量 GH4169 的微观组织,从厚板试验件上取下部分材料进行金相观察实验。经研磨抛光后,使用腐蚀液腐蚀。腐蚀液配比为 $\text{CuCl}_2 : \text{CH}_3\text{OH} : \text{HCl} = 1 : 1 : 2$,在金相显微镜下进行观察,得到图 3 所示的 GH4169 金相组织图。

从图 3 中可以看出 GH4169 呈现出等轴晶组织特征,其晶粒等级约为 5.5~6 级,取平均晶粒尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 。

工程实际中定义裂纹萌生的临界尺寸为 0.3mm ,即当主裂纹长度达到 0.3mm 时,认为裂纹萌生阶段结束,此时模型的循环次数对应为裂纹萌生寿命。为方便计算且保证模拟区域具有足够多的晶粒,定义模拟区域为 $0.5 \text{mm} \times 0.5 \text{mm}$ 的正方形。

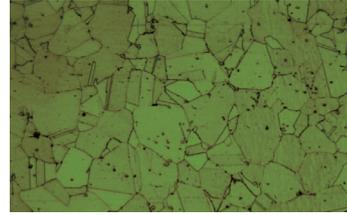


图3 GH4169 微观组织金相图

2.2 建立微观组织模型

先根据实际测得的晶粒尺寸,采用 Voronoi 图法建立具有代表性的等轴晶模型,实际微观组织中晶粒都有各自不同的排列取向,所以在模拟中给每个晶粒随机赋予一个角度用来代表其晶粒取向。图 4 即为用 Voronoi 图法建立的等轴晶模型,其中每个等轴晶粒具有任意的晶粒取向。因此微观上晶粒具有正交各向异性,而宏观上材料表现为各向同性。由于在金相试验中测得的等轴晶平均尺寸为 $50 \mu\text{m}$,在 $0.5 \text{mm} \times 0.5 \text{mm}$ 的范围内生成了大概 100 个晶粒,模型如图 4 所示。对模型赋予材料参数。GH4169 的基本材料参数如表 1 所示^[9]。

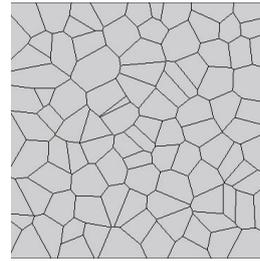
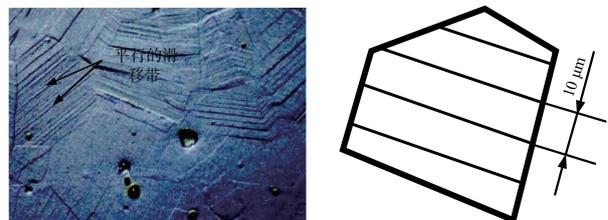
图4 晶粒尺寸 $50 \mu\text{m}$ 的等轴晶模型

表1 GH4169 基本材料参数

弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/GPa	泊松比 ν
208	1 300	0.3

2.3 多滑移带平行系统

为了模拟裂纹沿滑移带起裂的过程,先要在晶粒内生成滑移带,并将其作为潜在的裂纹路径。根据文献[10]的疲劳试验观测结果,如图 5(a)所示,晶粒在疲劳载荷作用下,其内部形成了几乎互相平行的滑移带。在数值模拟模型中,每个晶粒都有一条经过其生长核心的滑移带,然后每隔 $10 \mu\text{m}$ 作出其他平行的滑移带,结果如图 5(b)所示。



(a) 实验观测图像

(b) 数值模拟模型示意图

图5 晶粒内多滑移带平行系统

3 裂纹萌生模拟结果分析

3.1 裂纹萌生过程

根据 Tanaka-Mura 裂纹萌生模型,对所建立的有限元模型进行数值模拟。模型加载的最大应力为 765 MPa。图 6(a)-图 6(e) 所示的是裂纹萌生的不同阶段,其中 N 为不同阶段形成裂纹时所对应的循环寿命。 $N=5\ 860$ 时第一条裂纹萌生于滑移带与加载轴呈 45° 的晶粒内。随后,新的裂纹开始在其他晶粒内萌生,此时裂纹萌生的位置还较为分散,裂纹呈现出多点随机起裂特征。随着循环次数的不断增加,在已经起裂的裂纹附件萌生了新的裂纹,此时出现了裂纹连接现象,如图 6(c)和图 6(d)所示。随着裂纹不断扩展与连接,开始出现较长的主裂纹,如图 6(e)所示。当裂纹长度达到 0.3 mm 时,裂纹萌生模拟结束。

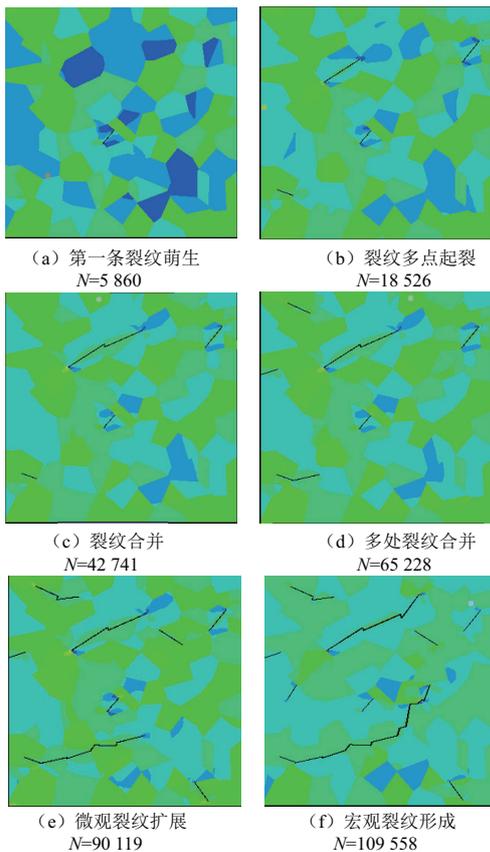


图 6 裂纹萌生模拟过程

3.2 试验验证

制备 GH4169 高温合金疲劳试验件如图 7 所示。试验件尺寸如图 8 所示。制备的试验件抗拉强度为 1 275 MPa。



图 7 GH4169 疲劳试验件

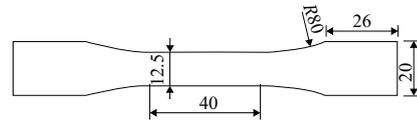


图 8 GH4169 试验件尺寸

对 GH4169 高温合金进行疲劳试验,试验件加载级为抗拉强度的 60%,对应应力分别为 765 MPa。得到 GH4169 在常温下疲劳寿命约为 123 683 周次。试验得到的寿命是整个疲劳寿命,包括裂纹萌生、扩展及瞬时断裂的寿命。本文仅仅模拟裂纹萌生阶段的寿命。而研究者认为裂纹萌生寿命占总寿命的 80%左右。因此本文将模拟出的寿命与试验平均寿命的 80%进行对比来验证模型的合理性。

本文模拟得到的 GH4169 裂纹萌生寿命为 109 558 周次,试验得到 GH4169 疲劳寿命的 80%为 98 946 周次,模拟结果与实验值吻合良好。

4 结语

本文以 GH4169 高温合金为研究对象,基于 Tanaka-Mura 模型对 GH4169 裂纹萌生过程进行数值模拟。从微观角度解释了一些宏观的疲劳现象。全文研究主要成果如下:

- 1) 基于 Voronoi 图法建立了符合 GH4169 微观组织特征的二维模型;
- 2) 赋予每个晶粒不同的晶粒取向,并赋予其材料参数,建立起体现晶体各向异性的微观模型;
- 3) 基于 Tanaka-Mura 位错模型,成功模拟出裂纹萌生过程及萌生寿命。

经与实验数据对比,模拟结果与实验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 吴婷,田常录,钱文杰. CFRP 加固含裂纹钢板疲劳性能研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(1):47-49.
- [2] 吴楠,张显程,王正东,等. GH4169 合金在 650 °C 下疲劳小裂纹萌生和扩展行为[J]. 航空材料学报,2015,35(6):71-76.
- [3] CHAN K S. Roles of microstructure in fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue,2010,32(9):1428-1447.
- [4] 牟闻伟,陆山. 基于宏-细观模型的疲劳裂纹萌生数值模拟[J]. 机械强度,2012,34(3):379-383.
- [5] TANAKA K, MURA T. A dislocation model for fatigue crack initiation[J]. Journal of Applied Mechanics, 1981, 48(1): 97-103.
- [6] 陈小进. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头裂纹萌生数值模拟及试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [7] 殷良伟. Ti₂AlNb 焊接接头微区高温本构关系及疲劳裂纹萌生模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [8] 左永基. 考虑电子束焊接接头微观组织特性的疲劳裂纹萌生数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [9] 吴冰,李晋炜,毛智勇,等. 镍基高温合金电子束焊接接头疲劳性能[J]. 焊接学报,2013,34(8):109-112,118.
- [10] 吴楠. 微观组织和初始缺陷对镍基合金 GH4169 疲劳裂纹萌生及扩展行为的影响[D]. 上海:华东理工大学,2016.

收稿日期:2020-10-28