材料研究与应用 2025,19(3):497-504 Materials Research and Application

DOI:10.20038/j.cnki.mra.2025.000311



# 定向凝固UGTC47合金低周压缩保载疲劳过程显微组织演化

李家兴1,陆民刚2,郑为为1

(1. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司,北京 100016)

**摘要:** 重型燃机涡轮叶片在高温下运行时,受离心力与热应力等应力的交替作用,易产生疲劳失效,从而对 重型燃机的安全运行构成严重威胁。为使重型燃机平稳运行,通过应变控制的低周压缩保载疲劳试验,系 统地研究了定向凝固UGTC47合金在疲劳循环过程中显微组织演化及其对疲劳性能的影响。研究发现, 标准热处理态UGTC47合金在900和950℃下表现出不同的循环应力响应行为。UGTC47合金在900℃ 时存在显著的循环硬化、循环稳定和循环软化阶段,而在950℃时存在非常短的循环硬化,随即进入缓慢的 循环软化阶段,直至快速软化失效。UGTC47合金在900和950℃品度下,其应力应变迟滞回线均呈现显 著的拉压不对称现象。标准热处理态UGTC47合金,在900和950℃低周压缩保载疲劳过程中出现不同程 度的显微组织退化。UGTC47合金在900℃时,其枝晶干γ′相尺寸略有增加、立方度稍减小、体积分数无明 显变化,也未形成γ′相筏排组织,且γ通道宽度增加较少,组织稳定性较好;在950℃时,合金枝晶干γ′相的 体积分数在500周次出现显著降低,γ′相在100周次即形成P型筏排组织,且随着循环周次的增加,γ′相筏排 完善程度和γ通道宽度迅速增加,显微组织退化速度明显大于900℃的。该研究结果为UGTC47合金在重 型燃气轮机透平叶片上的应用提供了数据支撑,对于具有自主知识产权的燃气轮机叶片设计、使用具有不 可或缺的工程价值。(专精特新·特殊环境材料服役行为专辑十五之十一) 关键词: 定向凝固UGTC47合金;低周疲劳;压缩保载;迟滞回线;组织演变;P型筏排;重型燃气轮机;涡轮

大键词: 定问凝固 UG1C47 合金; 低向疲劳; 压缩保载; 达滞回线; 组织演变; P型筏排; 重型燃气轮机; 涡轮 叶片

**中图分类号:**TG132.3 **文献标志码:**A 文章编号:1673-9981(2025)03-0497-08

**引文格式:**李家兴,陆民刚,郑为为.定向凝固UGTC47合金低周压缩保载疲劳过程显微组织演化[J].材料研究与应用,2025, 19(3):497-504.

LI Jiaxing, LU Mingang, ZHENG Weiwei. Microstructure Evolution of Directionally Solidified UGTC47 Alloy Under Low Cycle Fatigue with Compression Dwelling Time[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(3):497-504.

# 0 引言

重型燃气轮机具有大功率、高效率、低排放和长 寿命等特点,是能源高效转换与洁净利用系统的核 心动力装备<sup>[1]</sup>。在燃气轮机的运行过程中,特别是 在日启停频繁的燃机机组中,叶片所处的环境经历 着周期性的变化,离心力与热应力反复交替,使得材 料在高温下遭受严重的应力、应变循环损伤,当应力 或应变集中区域积累的损伤超过材料的最大限度 时,便会形成塑性变形和裂纹,最终导致部件以低周 疲劳的形式失效。通常此类疲劳破坏表现为无明显 塑性变形的突然断裂,对燃气轮机的安全运行构成 严重威胁<sup>[2-11]</sup>。

对于平稳运行的燃气轮机,涡轮叶片的失效主 要考虑蠕变载荷的作用,但对于日启停模式的燃气 轮机涡轮叶片来说,保载的低周疲劳循环更能反映 其服役环境特征<sup>[11]</sup>。对于与UGTC47合金成分相 近的MAR-M247等轴晶合金,Šulák<sup>[12]</sup>等研究发现, 在900℃应变控制的疲劳条件下引入10 min的拉伸 保载时,在所有应变条件下的循环应力应变线都表 现出明显的循环软化,平均应力向压缩应力偏移,疲 劳寿命显著下降。对断裂样品微观组织的观察证 明,保载的引入导致位错有足够的时间回复是造成 疲劳软化效果增强的主要原因。Yu<sup>[13]</sup>等对某等轴 晶镍基高温合金850℃应变控制的低周疲劳研究发 现,该合金对压缩保持时间的敏感性较高,而对拉伸 保持时间的敏感性相对较低,这对疲劳寿命产生了 不利的影响。刘金龙<sup>[14]</sup>等对定向凝固DZ125合金 开展了850℃应力比为0的低周拉伸保载疲劳试验 并发现:保载时间从1s延长到1 min时,循环应力应 变曲线发生了明显变化,应力保持时应变出现显著

**收稿日期:**2024-06-30

基金项目:中国联合重型燃气轮机技术有限公司资助项目(UGTC-HT-WXKT-2022-038)

作者简介:李家兴,硕士研究生,研究方向为高温合金热端部件服役损伤评价。E-mail:lijiaxing\_2021@163.com。

增加,相应的疲劳寿命显著减小;但当保载时间继续 增加至4min时,循环应力应变曲线几乎不再变化, 疲劳寿命也趋近于稳定。初步的分析认为,保载产 生的蠕变损伤对疲劳寿命产生了影响。目前,大多 数低周疲劳行为的研究更关注断裂模式,很少关注 疲劳过程显微组织演化行为。但是,对于运行时间 长达上万小时的涡轮叶片来讲,运行过程中由于显 微组织退化对性能造成的影响不可忽略。

我国G/H级重型燃机透平动叶主选材料为定向凝固UGTC47合金,但是有关该合金在低周疲劳循环载荷作用下的显微组织损伤规律尚不明确。因此,系统深入地研究定向凝固UGTC47合金在低周疲劳载荷作用下的显微组织演变规律及其对疲劳性能的影响,对于具有自主知识产权的燃气轮机叶片设计、制造和运行维护至关重要,对于提升重型燃气

轮机的安全设计水平具有不可或缺的工程价值。

本文以国产定向凝固 UGTC47 高温合金材料 为研究对象,系统研究其在近服役温度低周压缩保 载疲劳模式下的显微组织演化规律及疲劳行为,为 该合金在重型燃气轮机透平叶片上的应用提供数据 支撑。

# 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验材料为UGTC47定向凝固试棒,其由中国 科学院金属研究所提供,尺寸为直径16mm×200 mm,并且所有试棒均经1246℃保温2h固溶处理、 1080℃保温4h一级时效处理和870℃保温24h二 级时效处理的标准热处理工艺。表1为UGTC47合 金名义成分。

控制的轴向拉-压加载方式进行。其中,应变比为

-1、应变速率为0.005 s<sup>-1</sup>,频率为0.1 Hz,梯形波

表1 UGTC47的名义成分 Table 1 Nominal composition of UGTC47 alloy

						,			
成分	Cr	Ti	Al	Со	Hf	Та	W	С	Ni
含量 w/%	8	0.7	5.4	9.0	1.4	3.2	9.3	0.07	余量

# 1.2 实验方法

为模拟重型燃燃气轮机透平叶片在服役过程中的疲劳循环载荷,设计了如图1所示的低周压缩保载疲劳试验,试验参数列于表2。将制备好的疲劳样品置于MTS 370.1疲劳试验机上进行低周疲劳试验,试验参照GB/T 15248—2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法,在大气环境中采用应变



加载,压缩保载600 s。900 ℃时应变幅为 ±0.457%,950 ℃时应变幅为±0.397%。每个温 度下测试两个样品,断裂寿命取平均值。图2为低 周疲劳试样示意图,应力轴方向为[001]定向凝固柱 晶方向。为研究低周疲劳过程的显微组织演化,每 个温度下均选择100周次和500周次做中断试验。



(a)—900 °C;(b)—950 °C₀

#### 图1 低周疲劳试验工艺路线示意图

Figure 1 Schematic diagram of low cycle fatigue test process route

#### 表2 UGTC47合金低周疲劳试验参数

#### Table2 Low cycle fatigue test parameters of UGTC47 alloy

温度/℃	总应变/%	保载时间/s	加载波形	应变比R	频率f/Hz	中断时间/周次	
900	0.457	600	<b>拉</b> 亚 冲	1	0.1	100 500	
950	0.397	600	栉形彼	-1	0.1	100,500	



#### 图2 低周疲劳试验试样示意图

Figure2 Schematic diagram of low cycle fatigue test sample

为了分析近服役温度低周疲劳载荷作用下合金 的显微组织演化规律,对不同条件低周疲劳中断试 样的显微组织进行观察和定量表征。疲劳试样标距 段尺寸为直径5.5 mm×16 mm,在标距段处采用电 火花线切割法制备金相试样,随后用酒精进行超声 波清洗,再采用热镶法获得横截面和纵截面试样,镶 嵌好的金相试样按照标准制样程序磨抛。对γ/γ/相 的观察采用化学侵蚀的方法,侵蚀剂为1%HF+ 33% HNO<sub>3</sub>+33% CH<sub>3</sub>COOH+33% H<sub>2</sub>O(体积 比)。利用 ZEISS SUPRA 55型场发射扫描电子显 微镜对试样进行显微组织观察。选用二次电子模式 (Secondary electron, SE)观察枝晶干中心的 $\gamma/\gamma'$ 两 相组织。随机拍摄5张20000倍的SEM照片用于 枝晶干显微组织参量的定量统计,使用 Photoshop 和 Image pro plus 软件对 γ'相的尺寸、体积分数、筏 排程度和γ通道宽度进行统计。

利用日本电子公司生产的 JEOL JEM-2100型 扫描透射电子显微镜(Scanning transmission electron microscope, STEM)对疲劳循环过程中的 位错亚结构进行观察。对于疲劳中断的样品,透射 试样选自试样标距区纵截面,利用电火花线将其切 割得到3 mm厚的薄片,通过金刚石砂纸机械减薄 至50—80 μm,通过冲片机冲孔获取直径3 mm的小 圆片,并利用双喷仪进行化学减薄,配制的电解液为 7% HClO<sub>4</sub>+4% CH<sub>3</sub>COOH+89% CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH(体 积分数),实验温度为-25℃、电压为30V。

## 2 结果及分析

# 2.1 低周疲劳性能

经标准热处理的UGTC47合金,在900℃、最大 应变为0.457%、压缩保载时间600s的条件下,进 行非对称循环载荷低周疲劳性能测试,合金寿命为 1077个循环周次。在950℃、最大应变为0.397% 时,进行同样条件的低周疲劳性能测试,合金寿命为 995个循环周次。尽管950℃时应变幅已经降低到 了0.397%,但其寿命依然低于900℃。

图 3 为温度 900 和 950 ℃下合金的循环应力响 应曲线。图 3(a)为合金疲劳加载循环过程中最大 应力随循环周次的变化轨迹。当温度为 900 ℃时, 在前 200 周次内合金一直表现为循环硬化特征,继 续增加周次合金基本处于循环稳定状态,直至疲劳 裂纹萌生和扩展导致合金快速软化及疲劳失效;当 温度为 950 ℃时,循环加载约 80 周次后,合金即从非 常短暂的循环硬化进入较为缓慢的循环软化阶段, 直至疲劳裂纹迅速扩展汇合导致疲劳失效,疲劳强 度较 900 ℃度有大幅降低(见图 3(a))。由于本研究 压缩阶段保载为 600 s,在压缩保载阶段,两个温度 下均出现明显的应力松弛,950 ℃条件下的应力松



弛绝对值略高于900 ℃(见图3(b)和(c))。

材料的循环应力-应变行为反映了在低周疲劳 过程中材料的真实应力-应变特征,是低周疲劳性能 研究的重要方面之一。应力应变迟滞回线的面积即 为循环滞后能密度。低周疲劳损伤由试样吸收的滞 后能密度来控制,因此使用应力应变迟滞回线的面 积可以来描述材料的疲劳损伤行为<sup>[14-16]</sup>。图4为合 金在900和950℃的应力应变迟滞回线。从图4可 以看出,两个温度下合金的应力应变迟滞回线均为 环形。900℃时,随着低周疲劳循环周次的增加,迟 滞回线向上偏移,面积变化不明显,但存在明显的拉 压不对称特征,峰值应力达到约600 MPa,但谷值应 力不到200 MPa。950 ℃时,至循环100周次后,迟 滞回线向上偏移但不明显,面积略有增加,表明低周 循环过程中疲劳损伤的累积不断增大。尽管两个温 度下的应变幅值略有差异,但当循环周次相同时, 950 ℃的迟滞回线面积均大于900 ℃,表明950 ℃疲 劳损伤的累积大于900 ℃。950 ℃下同样存在拉压 不对称性,但峰值应力及峰值和谷值的应力差明显 低于900 ℃的,表明950 ℃时循环软化的作用更强, 疲劳损伤的累积更大。





循环硬化与软化现象是材料内部微观结构变化 在宏观力学行为上的体现,与材料的位错运动密切 相关。合金在低周疲劳循环加载过程中会表现出循 环硬化、循环软化和循环稳定现象。对于镍基高温 合金,其循环硬化/软化现象是位错间相互作用和γ 相演化两方面因素综合作用的结果[17-18]。对 UGTC47 合金来说,其在 900 和 950 ℃条件下的循 环应力响应行为有所差别。900℃条件下低周疲劳 循环应力响应曲线在初始硬化之后,逐渐表现为循 环稳定现象。这是由于在高温外力加载作用下,合 生在界面处,部分形成不规则位错网,阻碍位错运 动,产生硬化作用。同时,运动位错的湮灭和重排等 动态回复过程又导致循环软化。当硬化速率与软化 速率达到平衡时,合金表现出循环稳定现象。 900 ℃表现出的循环稳定现象就是循环硬化和软化 平衡的结果。当温度为950℃时,较高的温度可以 加速原子的扩散速率有利于位错的回复[19-20],因此 在短暂的循环硬化后进入缓慢的循环软化阶段,直 至裂纹萌生和扩展而失效。

#### 2.2 低周疲劳过程微观组织演变规律

高温合金的低周疲劳性能受温度、显微组织状

态、应变速率和测试环境等多种因素影响<sup>[21-23]</sup>。本研究中两个温度下疲劳性能的差异主要来源于温度和显微组织状态的差别。为了明确在不同温度下低周疲劳循环过程中的显微组织演变特征,开展了两个温度下的低周疲劳中断试验,中断点选择100周次和500周次。

图 5 为标准热处理态 UGTC47 合金经 900 ℃不 同循环周次低周疲劳试验后横截面和纵截面枝晶干  $\gamma/\gamma'$ 的形貌。图 5(a1)和(a2)为标准热处理态 UGTC47合金原始横截面和纵截面枝晶干 $\gamma/\gamma'$ 的形 貌。其中, y'相呈规则的立方状,体积分数约为 64%,尺寸约为420 nm,γ通道宽度约为80 nm。图 5(b1)、(c1)和(d1)分别为900℃时100、500和1077 (断裂)循环周次中断试样横截面枝晶干γ/γ'的形 貌,相较于标准热处理态,随着低周疲劳循环周次的 增加,横截面枝晶干γ′相变化不明显,仅表现为立方 状的边角由平直逐渐变得圆滑,立方度有所下降,尺 寸略微增大(见图中圆圈所示)。图5(b2)、(c2)和 (d2)分别为纵截面枝晶干 $\gamma/\gamma'$ 两相组织,与横截面 相比,γ'相立方度的下降更明显,由于纵截面观察位 置偏离枝晶干中心位置,因此γ/相尺寸略大。断裂 时,平行于应力轴方向γ'相开始出现相互连接,γ通

道宽度很不均匀,局部宽度明显增加(见图中箭头所示)。对于γ'相强化的镍基高温合金,γ'相形貌受界 面能和弹性能的共同作用。Fährmann等<sup>[24]</sup>对 Ni-Al-Mo三元合金的研究表明,γ/γ'两相错配度约为 零时,界面能将占主导, $\gamma'$ 相呈现球体或椭球体状;  $\gamma/\gamma'$ 两相错配度远离零时, $\gamma'$ 相形状为立方体状。  $\gamma'$ 相立方度的降低,表明 $\gamma/\gamma'$ 两相错配度的绝对值 减小。



(a1)—横截面的标准热处理态枝晶干 $\gamma'$ 相;(a2)—纵截面的标准热处理态枝晶干 $\gamma'$ 相;(b1)—100周次横截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(b2)—100周次纵截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(c1)—500周次横截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(c2)—500周次纵截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(d1)— 横截面断裂枝晶干 $\gamma'$ 相;(d2)—纵截面断裂枝晶干 $\gamma'$ 相。

 $(a1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section for standard heat treated state;  $(a2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section for standard heat treated state;  $(b1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after 100 cycles;  $(b2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after 100 cycles;  $(c1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after 500 cycles;  $(c2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after 500 cycles;  $(d1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after break;  $(d2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after 500 cycles;  $(d1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after break.

图 5 UGTC47 合金 900 ℃经不同循环周次低周疲劳试验后横截面和纵截面枝晶干 y′相

Figure 5  $\gamma'$  phase of dendritic core in cross section and longitudinal section of UGTC47 alloy after low cycle fatigue test at 900 °C

图 6 为标准热处理态合金经 950 ℃不同循环周 次低周疲劳试验后试样横截面和纵截面枝晶干γ′ 相的典型形貌。图 6 (a1)、(b1)、(c1)分别为 950 ℃ 时 100、500 和 995(断裂)循环周次试样横截面枝晶 干γ/γ′两相组织,与900℃不同,950℃低周疲劳循 环过程中枝晶干γ′相的形貌发生明显转变。经100 循环周次之后,γ′相的立方度有所下降,尺寸略微 增大;经历500循环周次后,虽然γ′相尺寸变化不



(a1)—100周次横截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(a2)—100周次纵截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(b1)—500周次横截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(b2)—500周次纵截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(c1)—断裂的横截面枝晶干 $\gamma'$ 相;(c2)—断裂的纵截面枝晶 干 $\gamma'$ 相;

 $(a1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after 100 cycles;  $(a2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after 100 cycles;  $(b1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after 500 cycles;  $(b2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after 500 cycles;  $(c1)-\gamma'$  phases of dendrite core in the cross section after break;  $(c2)-\gamma'$  phases of dendrite core in the longitudinal section after break.

图 6 UGTC47 合金 950 ℃经不同循环周次低周疲劳试验后横截面和纵截面枝晶干 γ′相

Figure 6  $\gamma'$  phase of dendritic core in cross section and longitudinal section of UGTC47 alloy after low cycle fatigue test at 950 °C

大,但γ'相体积分数降低,且聚集连接现象十分明 显;断裂后γ'相的聚集连接进一步加剧,体积分数 进一步下降。图6(a2)、(b2)、(c2)分别为950℃时 100、500和995(断裂)循环周次试样纵截面枝晶干 γ/γ'两相组织,试样经100循环周次后γ'相明显变 圆且立方度下降,当循环500周次后γ'相呈现显著 的P型筏排,γ通道宽度明显增大,随着循环周次的 增加筏排完善程度增加。

为了明确温度对UGTC47合金枝晶干γ'相演 化的影响,对经不同循环周次后枝晶干的显微组织 进行了定量统计。图7为两个温度下不同周次循环 后枝晶干γ'相尺寸和体积分数及γ'相筏排完善程 度和γ通道宽度的对比图。相比于标准热处理态, 在900℃低周疲劳载荷作用下,整个疲劳过程中γ' 相体积分数的变化不明显,直至断裂时仍大于 60%;γ'相尺寸仅在断裂样品中稍有增大,约为510 nm;γ'相筏形完善程度,在整个疲劳过程中始终处 于较低的水平;γ通道宽度在循环初期(100周次内)

由标准热处理态的约80 nm 快速增加至约150 nm, 但随着疲劳过程的进行通道宽度的增加变得缓慢。 在950℃低周疲劳载荷作用下,100循环周次内,组 织的变化与900℃大致相似,都表现为γ'相粗化、γ 通道宽度快速增加;在100周次至500周次之间,组 织呈现显著的退化,γ′相体积分数下降至57%左 右,γ′相筏形完善程度增大到约0.27,γ通道宽度增 加至约250 nm,已经高于900℃断裂时的试样;至 995个循环周次(168.6 h)断裂后,γ'相体积分数下 降至54%左右,这已经与950℃/25 MPa/5000 h 蠕 变载荷作用下的体积分数接近[25]。受压缩保载应 力的影响,UGTC47合金在低周疲劳载荷作用下倾 向于形成P型筏排组织,但900℃下直至断裂γ相也 未形成筏排化组织。经对比发现,该合金在900℃ 低周疲劳载荷作用下的组织稳定性更好,没有出现 显著退化,但在950℃组织则呈现显著退化,且退化 速率远高于蠕变载荷。



(a)—γ′相尺寸和体积分数;(b)—γ′相筏排完善程度和γ通道宽度。

(a)— $\gamma'$  size and volume fraction; (b)— $\gamma'$  rafting degree and  $\gamma$  channel width.

图 7 UGTC47 合金经 900 和 950  $\degree$ 不同循环周次低周疲劳试验后枝晶干 $\gamma'/\gamma$ 相组织参量



#### 2.3 低周疲劳过程亚微观组织演变规律

图 8为UGTC47合金在 900 和 950 ℃经第 100

和 500 周次低周疲劳中断后的位错形貌。从图 8(a) 可见,在 900 ℃低周疲劳循环的初期,位错首先在γ 相通道中滑移,位错密度较低且位错线较短。表明,



(a)—900 ℃/100 周次;(b)—900 ℃/500 周次;(c)—950 ℃/100 周次;(d)—950 ℃/500 周次。
(a)—after 100 cycles at 900 ℃; (b)—after 500 cycles at 900 ℃; (c)—after 100 cycles at 950 ℃; (d)—after 500 cycles at 950 ℃.

图 8 UGTC47 合金经 900 和 950 ℃不同循环周次低周疲劳试验的位错亚结构 Figure 8 Dislocation substructure of UGTC47 alloy after low cycle fatigue test at 900 and 950℃

位错之间的交互作用较弱,但位错与析出强化γ'相 产生交互作用,必须增大外加载荷才能维持应变恒 定,从而导致循环应力增加,即发生循环应硬化现 象。从图 8(b)可见,经 500周次后,位错密度有所增 加,γ相通道中运动位错之间的交互作用增强,同时 位错线弯曲。表明,位错发生交滑移,或以绕过的方 式越过γ'相,硬化和软化基本平衡。而对应的 950℃循环第100周次时,已经可以观察到位错交互 作用形成的位错网络,长位错线弯曲,可以绕过或攀 移的方式越过γ'相,表明循环处于软化阶段(见图 8 (c));当循环周次延长至 500周次时,已经可观察到 切入γ'相的位错,表明循环过程中软化的作用大于 硬化(见图 8(d))。

# 3 结论

(1)UGTC47 合金在 900 和 950 ℃低周压缩保 载疲劳载荷作用下的循环应力响应行为存在明显的 不同,900 ℃时存在循环硬化、稳态和软化阶段,而 950 ℃时在循环初期经历较短的循环硬化后,随即 进入缓慢循环软化阶段,直至断裂。同时,两个温度 下均出现拉压不对称现象。

(2)UGTC47合金在低周压缩保载疲劳载荷作 用下的组织稳定性受温度的影响更为显著。900℃ 下的组织稳定性更好,枝晶干γ′相尺寸和体积分数 无明显变化,未形成筏排组织且γ通道宽度增加幅 度较低。950℃下较短时间内即形成P型筏排组织, 且随着循环周次的增加,γ′相筏排完善程度和γ通 道宽度迅速增加。

## 参考文献:

- [1] 東国刚,陈坚,张晓毅,等.重型燃气轮机结构完整性 分析[J].动力工程学报,2022,42(12):1213-1222.
- [2] 刘柳.一种镍基单晶高温合金低周疲劳行为的研究 [D]. 沈阳:东北大学,2016.
- [3] LI P, LI Q Q, JIN T, et al. Comparison of low-cycle fatigue behaviors between two nickel-based singlecrystal superalloys[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 63: 137-144.
- [4] FELTNER C E, LAIRD C. Cyclic stress-strain response of FCC metals and alloys—II dislocation structures and mechanisms [J]. Acta Metallurgica, 1967, 15(10): 1633-1653.
- [5] FELTNER C E, LAIRD C. Cyclic stress-strain response of FCC metals and alloys—I phenomenological experiments [J]. Acta Metallurgica, 1967, 15 (10) : 1621-1632.
- [6] HE Z, ZHANG Y, QIU W, et al. Temperature effect on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy [J]. Materials Science

and Engineering A, 2016, 676: 246-252.

- [7] ZHANG J, GUO Y Y, ZHANG M, et al. Low-cycle fatigue and creep-fatigue behaviors of a secondgeneration nickel-based single-crystal superalloy at 760 °C[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33: 1423-1432.
- [8] CHU Z K, YU J J, SUN X F, et al. High temperature low cycle fatigue behavior of a directionally solidified Nibase superalloy DZ951 [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 488(1-2): 389-397.
- [9] GOSWAMI T. Low cycle fatigue-dwell effects and damage mechanisms [J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(1): 55-76.
- [10] WANG A, LIU L, WEN Z, et al. The influence of dwell time on low cycle fatigue behavior of Ni-base superalloy IC10[J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36(8): 795-803.
- [11] RODRIGUEZ P, MANNAN S L. High temperature low cycle fatigue[J]. Sadhana, 1995, 20(1):123.
- [12] ŠULÁK I, OBRTLÍK K. Effect of tensile dwell on high-temperature low-cycle fatigue and fracture behaviour of cast superalloy MAR-M247 [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 185: 92-100.
- [13] YU H C, DONG C L, LI Y. Fatigue behavior and life prediction of an equiaxed crystal nickel-base superalloy under different dwell times and strain ratios [J]. Advanced Materials Research, 2014, 891: 1105-1110.
- [14] 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):88-92.
- [15] MA X, SHI H, GU J, et al. Temperature effect on low-cycle fatigue behavior of nickel-based single crystalline superalloy [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2008, 21(4): 289-297.
- [16] BRIEN V, DÉCAMPS B. Low cycle fatigue of a nickel based superalloy at high temperature: deformation microstructures [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 316(1-2): 18-31.
- [17] 张仕朝,于慧臣,李影.不同应变比下GH3030合金的 高温低周疲劳行为[J]. 机械工程材料,2014,38(1): 56-59.
- [18] 姚俊,郭建亭,袁超,等. 铸造镍基高温合金 K52 的低 周疲劳行为[J]. 金属学报,2005,41(4):357-362.
- [19] 王拴柱. 金属疲劳[M]. 福州:福建科学技术出版 社,1985.
- [20] LEE S Y, LU Y L, LIAW P K, et al. Hold-time effects on elevated-temperature low-cycle-fatigue and crack-propagation behaviors of HAYNES® 188 superalloy[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44: 2945-2956.
- [21] KACKER S, SISSANO J A, SCHULZ D N. Synthesis and properties of copolymers of ethylene/

carbon monoxide with styrene/carbon monoxide [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2000, 38(4): 752-757.

- [22] 张迈,张辉,赵云松,等. 镍基铸造高温合金低周疲劳 研究进展:影响因素、变形机理及寿命预测[J]. 稀有 金属材料与工程,2021,50(11):4174-4184.
- [23] LIU Y, KANG M, WU Y, et al. Crack formation and microstructure-sensitive propagation in low cycle fatigue of a polycrystalline nickel-based superalloy with

different heat treatments [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 108: 79-89.

- [24] FÄHRMANN M, FRATZL P, PARIS O, et al. Influence of coherency stress on microstructural evolution in model Ni-Al-Mo alloys [J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1995, 43(3): 1007-1022.
- [25] 李家兴. UGTC47合金近服役温度蠕变/低周疲劳载 荷作用下显微组织演化及其对蠕变性能的影响[D]. 北京:北京科技大学,2024.

# Microstructure Evolution of Directionally Solidified UGTC47 Alloy Under Low Cycle Fatigue with Compression Dwelling Time

#### LI Jiaxing<sup>1</sup>, LU Mingang<sup>2</sup>, ZHENG Weiwei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China United Gas Turbine Technology Co. Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: When a heavy-duty gas turbine operates at high temperature, hot end components such as turbine blades are exposed to a series of cycle loading conditions, which may lead to fracture failure. In this study, low-cycle fatigue test with compression dwelling time under strain control was conducted and the microstructure evolution of UGTC47 alloy during fatigue and its influence on fatigue properties were systematically investigated. It is found that UGTC47 alloy with standard heat treatment shows different cyclic stress responses at 900 °C and 950 °C. At 900 °C there is a significant cycle hardening, cycle stabilization stage and cycle softening stage, while at 950 °C it enters a slow cycle softening stage after a very short cycle hardening until rapid softening failure. The stress-strain hysteresis loops at both temperatures show significant tension and compression asymmetry. Microstructure degradation of the standard heat treated UGTC47 alloy during the low cycle fatigue at 900 °C and 950 °C is quite different. The microstructure showed good stability at 900 °C. The volume fraction of  $\gamma'$  phase did not change significantly, the  $\gamma'$  phase size only increased slightly, the  $\gamma'$  phase basically remained square shape, no rafting structure was formed, and the  $\gamma$  channel width increased less. However, the situation at 950 °C was quite different. The volume fraction of  $\gamma'$  phase decreased significantly at 500 cycles, and P-type rafting of  $\gamma'$  phase was formed at the beginning of cycling about 100 cycles. With the increase of cycling, the rafting degree of the  $\gamma'$  phase and the width of  $\gamma$  channel increased rapidly. Microstructure degradation at 950 °C was significantly greater than that at 900 °C. The results provide data to support for the application of UGTC47 alloy in heavy-duty gas turbine blades, and have significant engineering value for the design and use of gas turbine blades with independent intellectual property rights.

**Keywords:** directional solidified UGTC47 alloy; low cycle fatigue; compression dwelling; hysteresis loop; microstructure evolution; P-type rafting; heavy gas turbine; turbine blade

(学术编辑:常成)