

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5271

镍基多晶高温合金疲劳研究进展

沈文涛^{1,2}, 张 昭³, 刘 强^{1,2,3}, 巫荣海^{3,4}, 罗恒军^{1,2}, 郭良刚³, 李 恒³

(1. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618000 2. 二重集团德阳航空科技有限公司, 四川 德阳 618000; 3. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072 4. 西北工业大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘 要:镍基多晶高温合金作为航空发动机及燃气轮机热端部件的关键材料,其高温疲劳行为直接决定了构件的服役安全与寿命。本文综述了镍基多晶高温合金疲劳力学响应、微观组织演化、损伤机制与失效分析、寿命预测与数值模拟等方面的研究现状和进展。研究表明,合金在高温下的宏观力学响应展现出强烈的路径依赖性、非比例效应及相位角敏感性,其根源在于热-力载荷与微观组织的深度耦合。在微观层面,疲劳过程伴随着 γ'/γ 强化相的动态演化及位错机制的竞争,这些演化直接导致了循环硬化/软化等不可逆性能退化。在损伤与失效层面,载荷相位通过调控应力-温度场,主导了沿晶与穿晶断裂模式的竞争,并可能诱发寿命交叉现象。在机理溯源层面,内部缺陷是裂纹萌生的主导因素,而氧化与环境效应则显著加速裂纹扩展。在预测模型层面,研究范式正从宏观唯象模型向融合物理机制的跨尺度集成模型与数据驱动智能方法演进。宏观模型提供了工程可用的寿命预测框架;而基于晶体塑性理论、机器学习及疲劳/蠕变双指标参数的先进方法,提升了对损伤演化量化表征与全寿命预测的精度。本文最后展望了通过深度融合多尺度物理机理与人工智能技术,实现从经验模型向机理与数据双驱动精准寿命预测的未来趋势。

关键词:多晶高温合金;高温疲劳;微观组织;损伤失效

中图分类号: TG111.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0855-15

Progress in Research on the Fatigue of Nickel-based Polycrystalline Superalloys

SHEN Wentao^{1,2}, ZHANG Zhao³, LIU Qiang^{1,2,3}, WU Ronghai^{3,4}, LUO Hengjun^{1,2},
GUO Lianggang³, LI Heng³

(1. China National Erzhong Group Deyang Wanhong Die Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China; 2. Erzhong Group (Deyang) Aviation Science & Technology Co., Ltd., Deyang 618000, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. Shenzhen Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Nickel-based polycrystalline superalloys are critical materials for hot-section components in aeroengines and gas turbines, whose high-temperature fatigue behavior directly affects the service safety and lifespan of these components. This article systematically reviews the current research status and advances in fatigue mechanical response, microstructural evolution, damage mechanisms and failure analysis, lifetime prediction, and numerical simulation of nickel-based polycrystalline superalloys. Studies have shown that the macroscopic mechanical response of these alloys at high temperatures exhibits strong path dependence, nonproportional effects, and phase-angle sensitivity, which originate from the deep coupling between thermomechanical loading and the microstructure. At the microscale, the fatigue process involves the dynamic evolution of γ'/γ strengthening phases and competition among dislocation mechanisms, directly leading to irreversible performance degradation, such as cyclic hardening/softening. With respect to damage and failure, load phasing,

收稿日期: 2025-12-10

基金项目: 德阳市科技计划项目(旌湖实验室重点研发专项, 2023GTFD001); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2024A1515010578); 凝固技术全国重点实验室开放课题(2025-TS-11)

作者简介: 沈文涛, 1981 年生, 硕士, 高级工程师. 主要从事高温合金科学与技术研究工作. Email: shenwentao@wh.sinomach-ez.cn

通信作者: 刘 强, 1990 年生, 博士, 高级工程师. 研究方向为先进金属结构材料及其精确热成形技术. Email: liuqiang@wh.sinomach-ez.cn

巫荣海, 1989 年生, 博士, 副教授. 研究方向为高温材料多尺度表征与计算研究. Email: ronghai.wu@nwpu.edu.cn

引用格式: 沈文涛, 张昭, 刘强, 巫荣海, 罗恒军, 郭良刚, 李恒. 镍基多晶高温合金疲劳研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 855-869.

SHEN W T, ZHANG Z, LIU Q, WU R H, LUO H J, GUO L G, LI H. Progress in research on the fatigue of nickel-based polycrystalline superalloys[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 855-869.

by modulating the stress-temperature field, dominates the competition between intergranular and transgranular fracture modes and may induce lifetime crossover phenomena. In terms of mechanism tracing, internal defects are the dominant factors in crack initiation, whereas oxidation and environmental effects significantly accelerate crack propagation. In predictive modelling, the research paradigm is evolving from macroscopic phenomenological models to multiscale integrated models that incorporate physical mechanisms and data-driven intelligent approaches. Macroscopic models provide an engineering-usable framework for lifetime prediction, whereas advanced methods based on crystal plasticity theory, machine learning, and fatigue-creep dual-parameter indicators improve the accuracy of damage evolution quantification and full-life prediction. Finally, a future trend toward precise lifetime prediction driven by both mechanisms and data, achieved through the deep integration of multiscale physical insights and artificial intelligence technologies, is proposed.

Key words: polycrystalline superalloy; high-temperature fatigue; microstructure; damage and failure

镍基高温合金凭借其优异的高温强度、抗蠕变性能和耐腐蚀特性^[1-3],成为现代航空发动机及燃气轮机热端不可替代的关键材料。从涡轮叶片承受的极端离心载荷到涡轮盘经历的非对称热循环,该类材料在超临界工作环境中的服役稳定性直接决定了动力装置的性能边界与可靠性阈值。当部件长期处于高温动态载荷交互作用时,由循环应力引发的疲劳失效已成为热端构件意外断裂的主要诱因,其在蠕变-疲劳-氧化多场耦合条件下的渐进式损伤过程不仅诱发微裂纹早期形核,更进一步导致灾难性破裂事故,由此带来的安全风险与经济损失突显了高温疲劳行为研究的迫切工程价值^[4-5]。锻造合金作为传统制备体系,依赖于塑性变形优化晶粒取向;粉末冶金合金通过热等静压技术实现近净成形,显著提升成分均匀性^[6-7];增材制造方法凭借逐层堆积特性开拓了复杂构件的短流程制造新途径^[8-10]。镍基高温合金的单晶与多晶合金在疲劳机制上的关键差异主要源于晶界:单晶合金缺乏晶界,疲劳裂纹通常在表面滑移带萌生并以穿晶方式扩展,表现出显著取向依赖性,但在高温下因无晶界弱化而具有优异的抗疲劳性能;多晶合金则因晶界存在,裂纹易在晶界应力集中处萌生,扩展受晶界阻碍或沿晶界进行,尤其在高温下晶界氧化和蠕变交互作用会加速沿晶断裂,使其疲劳行为更复杂且对微观结构更敏感。因此关于镍基多晶高温合金疲劳行为的研究多围绕力学响应、微观组织演化等核心方向展开:力学响应层面,通过循环应力应变曲线和疲劳寿命,剖析循环载荷作用下的非对称循环硬化/软化机制等力学行为、疲劳寿命等基本特征^[11];微观组织演化层面,追踪晶粒、晶界、 γ' 强化相、位错等在高温循环加载过程中的演化规律^[12-13];深入损伤与失效机制,探讨孔隙/夹杂物诱导裂纹萌生敏感性、氧化环境对裂纹扩展速率的加速效应,并通过多尺度表征手段解析穿晶/沿晶断裂模式的竞争关系,建立微观组织与损伤的关联关系^[14];使用数值模拟方法,评述

基于Chaboche本构模型^[15]、黏塑性本构模型(visco-plastic self-consistent, VPSC)、晶体塑性有限元模型(crystal plasticity finite element method, CPFE)^[16]等宏微观模型的微观变形预测和寿命评估方法,以及机器学习^[17]和数字孪生等新兴技术在疲劳行为映射中的突破性应用。结合多晶镍基高温合金疲劳行为的研究现状,本文综述了多晶镍基高温合金疲劳领域的相关进展,展望未来研究趋势。

1 高温疲劳力学响应研究

镍基高温合金在航空发动机、燃气轮机等热端部件中承受着复杂的热机械载荷,其疲劳力学响应呈现多因子强耦合、路径依赖和非线性的鲜明特征。深入理解其损伤机理与寿命控制因素,是开展高温构件寿命预测与可靠性设计的基础。镍基高温合金的疲劳性能需通过多层次指标综合表征,及其物理意义共同揭示了材料在高温循环载荷下的损伤演化规律和失效本质。从宏观服役行为到微观损伤机制,核心指标可归纳为3大类:①疲劳寿命指标,是构件安全设计的直接依据:疲劳极限(10^7 次循环不失效的临界应力幅)反映高周次振动耐久性;低周疲劳强度衡量低周次塑性失效临界值;疲劳寿命直接表征抗失效能力。②循环变形响应指标:总应变范围($\Delta\epsilon_t$)及其弹塑性分量($\Delta\epsilon_e$ 、 $\Delta\epsilon_p$)分别量化可恢复变形与不可逆损伤累积效率;应力幅($\Delta\sigma$)和循环硬化/软化行为体现材料抵抗循环变形的能力;保载试验中的应力松弛量则敏感捕捉高温下蠕变-疲劳交互效应。③裂纹扩展行为指标以疲劳裂纹扩展速率(da/dN)为核心,结合裂纹扩展门槛值(ΔK_{th})及环境敏感因子,反映材料抵抗裂纹萌生与扩展的韧性本质,尤其适用于长寿命构件损伤容限设计。这些指标相互关联,共同构建了从初始塑性累积到微裂纹萌生、直至宏观断裂的全过程评价体系,为高温环境下的寿命预测与失效防控提供科学基础。

载荷路径与热-力相位等加载条件对镍基高温

合金的疲劳行为影响显著,疲劳寿命远低于等温低周疲劳^[20]。非比例加载 Alloy 738LC 使 Mises 等效应力范围随主应变比的降低而显著增大,这与奥氏体不锈钢的恒定响应形成鲜明对比,根源在于其高屈服强度导致的弹性主导变形行为^[1]。如图 1 和图 2 所示,Inconel 718 在同相(IP-TMF)载荷下因蠕变损伤积累产生递增的拉应力,而在反相(OP-TMF)载荷下则表现为压应力主导^[20-22]。在总应变范围为 1.6% 时,寿命排序为 $-45^{\circ} < \text{IP} < \text{OP} < 135^{\circ}$,意味着疲劳寿命并非随相位角单调变化。同时,拉伸段的平均温度对寿命有显影响,从 344 °C 升高至 606 °C 可导致寿命衰减达 4 倍^[23]。在 IN740H 中应变比为 0 的平均

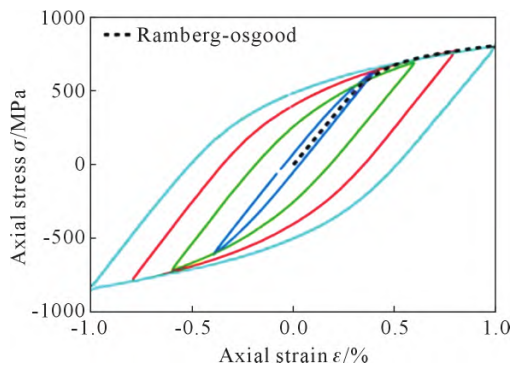


图 1 In718 合金实验(650 °C)与 Ramberg-Osgood 模型(应变范围为 $\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.6\%$ 、 $\pm 0.8\%$ 、 $\pm 1.0\%$)半寿命周期 $N_f/2$ 应力-应变滞回曲线的比较^[21]

Fig.1 Comparison of the stress-strain hysteresis curves at half-life $N_f/2$ for In718 alloy experiments (at 650 °C) and the Ramberg-Osgood model (with strain ranges of $\pm 0.4\%$, $\pm 0.6\%$, $\pm 0.8\%$, $\pm 1.0\%$)^[21]

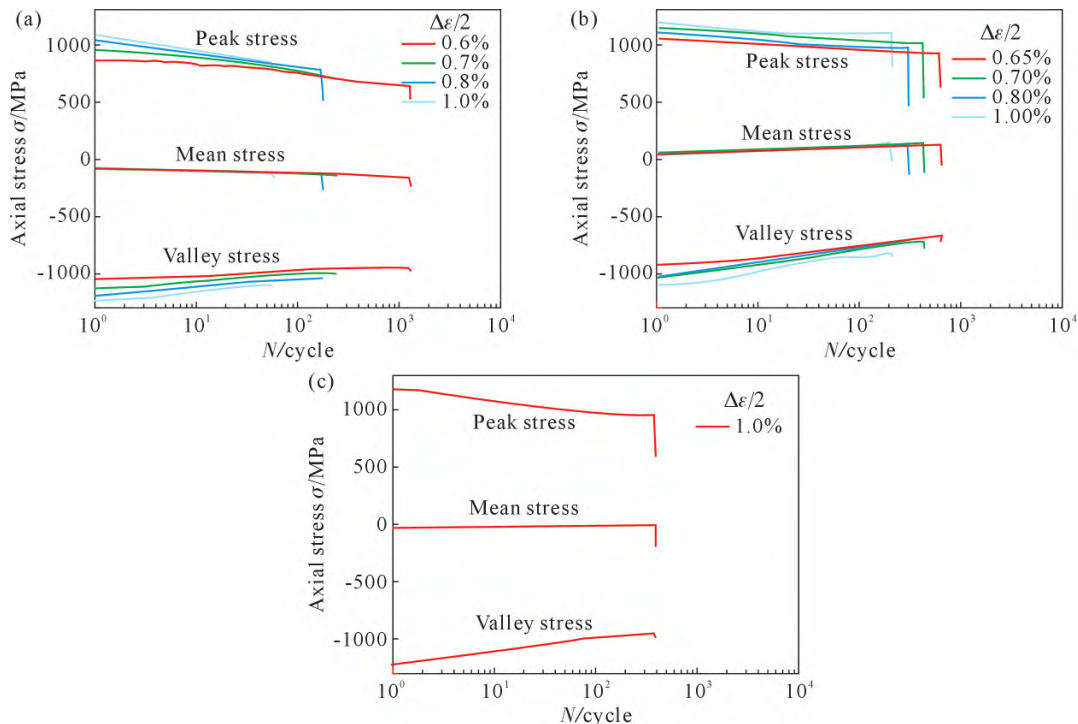


图 2 不同载荷条件下峰值、谷值和平均应力的比较:(a) TC-IP; (b) TC-OP; (c) TC-90^[21]

Fig.2 Comparison of peak, valley and average stresses under different load conditions: (a) TC-IP; (b) TC-OP; (c) TC-90^[21]

拉应力未降低寿命,塑性应变累积最低($c=-0.214$),而应变比为 0.5 的损伤指数高达 $c=-0.775$ ^[24]。在同相条件下,FGH4098 表现出循环软化(高温半周期)和循环硬化(低温半周期),平均应力为负;反相条件下则呈现相反的硬化/软化行为,平均应力为正。TMFGH742 在非对称应力控制疲劳中表现拉伸向棘轮应变积累,平均应力升高加速循环软化进程^[26]。FGH96 合金的硬化/软化行为由内应力分量主导:在低应变幅($\leq 0.6\%$)下,背应力诱导软化;而在高应变幅($\geq 0.8\%$)下,则由有效应力驱动硬化^[27]。DZ445 合金在拉伸保载下诱发持续软化,而 Inconel 718 在压缩保载后却能生成高达 124 MPa 的拉伸平均应力(650 °C),如图 2 所示,揭示了非对称循环塑性的复杂本质^[21, 28-29]。值得注意的是,DZ125 在长保载时间(>10 min)下出现的耐久寿命反常突增现象,预示着损伤机制可能发生了根本转变,如氧化物致裂纹尖端闭口或应力重分布^[30]。

材料的实际疲劳性能不仅取决于本构响应,更受到微观结构不均匀性与构件几何不连续性的深刻影响。对于增材制造高温合金,亚表面的工艺缺陷(如未熔合气孔、球形孔洞)更易引发疲劳裂纹萌生并导致寿命分散。SLM Inconel 718 中约 85 μm 的亚表面熔合不足缺陷,直接导致其在 650 °C 低应力下的疲劳寿命分散带拓宽至 3 倍^[31]。此外,增材制造特有的微观结构进一步加剧了路径敏感性。由于强织构和低扭曲角晶界的存在,增材制造 Inconel 718 的

剪切疲劳极限较传统锻造合金降低了 45%^[19]。孔、缺口等几何特征通过引入局部的多轴应力状态和显著的应力集中,从根本上改变了构件的疲劳行为。带孔结构的定向凝固合金在 OP-TMF 下的寿命较 IP-TMF 缩短 12%~34%^[32]。GH3536 合金含孔试样的寿命降低幅度高达 80%~91%,但通过优化孔洞取向,可将损失减至 63%(图 3),证明了几何设计优化的巨大潜力^[33]。通过带缺口 DZ125 合金的反相位热机械疲劳实验,揭示了缺口引起的显著力学效应。缺口导致了明显的棘轮效应,即在循环载荷下应变/位移的持续单向累积,且显著降低了疲劳寿命,缺口半径越小(应力集中系数 K_t 越大),寿命衰减越严重^[34]。表面初始裂纹的存在使问题更为严峻,FGH96 表面仅 400 μm 的裂纹就足以使其 600 $^{\circ}\text{C}$ 寿命衰减至室温的 1/50,凸显了表面完整性对高温寿命的极端重要性^[35]。

2 微观组织演化机制

镍基高温合金在高温疲劳过程中的微观组织演化呈现服役环境驱动的多尺度动态重构特征。该演化过程通过第二相转变、位错组态重组与晶界行为,直接调控材料的循环响应、损伤萌生与裂纹扩展,最终导致力学性能的不可逆退化。

高温疲劳环境下,强化相的稳定性、缺陷结构与损伤模式会发生显著转变,成为性能退化的内在根源。Inconel 718 在 730 $^{\circ}\text{C}$ 的疲劳-蠕变交互作用下,主要强化相 γ' 会向稳定的 δ 相转变,形成 50 nm 的棒状相,从而削弱沉淀强化效果^[29]。更为严重的是,应力辅助的相变会显著加速这一过程,应力时效使 IN718 中 γ' 相粗化 189%(达 189.1 nm),同时 δ 相长大至 1.19 μm ,这不仅降低了强度,也弱化了裂纹闭合效应^[36]。此外,杂质元素与缺陷也会诱发局部组织失稳,FGH96 中的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 夹杂物会诱发周围 γ' 相形成贫化区,使其成为低应变幅下优先萌生裂纹的敏感区域^[37]。增材制造合金由于快速凝固特

性,其低角度晶界占比(12%)远低于锻造合金(43%),这种差异直接影响了位错运动与裂纹扩展路径^[19]。损伤模式则强烈依赖于服役条件,DZ445 合金的失效机制随保载时间发生转变:短保载(<180 s)时以晶界氧化为主导;而长保载(>180 s)时则转变为韧窝控制的蠕变-韧性混合模式^[28]。表面改性如喷丸强化,可通过产生约 30 μm 的细晶层和诱导 δ 相重排将表面硬度提升至 536 HV,但其强化效果依赖于表面完整性,需消除弹坑等次生缺陷^[22]。梯度合金 FGH9X 组织参数量化揭示,粗晶区(80 μm)初生 γ' 相仅 1.47%,晶粒尺寸指数主导裂纹闭合效应^[38]。温度、保载时间与载荷路径作为关键外部驱动力,协同作用于材料微观组织,诱发特定的动态响应。HT700 合金在 800 $^{\circ}\text{C}$ 保载后, γ' 相粗化导致临界剪切应力降至 159.3 MPa,位错机制随之从切割 γ' 相转变为 Orowan 绕过^[39]。如图 4 所示为 CM247DSLC 合金原始状态、低周疲劳、1 min 保载和 5 min 保载的 γ' 相形貌,在 850 $^{\circ}\text{C}$ 保载 5 min 后, γ' 相发生筏化且 γ 通道宽度增至 60 nm,致使 Orowan 应力下降一半^[40]。DZ445 合金在长达 8 min 的保载后,位错机制进一步从超位错切割演变为在相界面形成位错网^[41]。热机械疲劳的相位角通过调控应力-温度场,进而选择性地激活不同的微观变形机制。CM247LC 在 IP 载荷中形成 V 型层错锁,而在 OP 工况下则因 γ 通道内位错滑移而生成 $60^{\circ}<111>$ 方向的微孪晶,IP-1.6%应变幅下表现为持续软化,而 OP 工况则因微孪晶的形成呈现全程硬化特征^[25]。FGH96 冷却速率调控 γ' 相尺寸(46.3~88.8 nm),常规疲劳中 49.7 nm 时达到峰值 64081 周次,保载疲劳却随 γ' 细化寿命持续提升,反映位错行为转变:粗 γ' 导致层错密集,细 γ' 导致滑移抑制^[42]。

材料的服役性能由其制造工艺预设的微观结构所决定,并在外载荷下通过晶体学各向异性与动态回复等过程展现出来。增材制造 GH4169 因柱状晶(49.3 μm)与链状 Laves 相垂直分布,导致疲劳极限

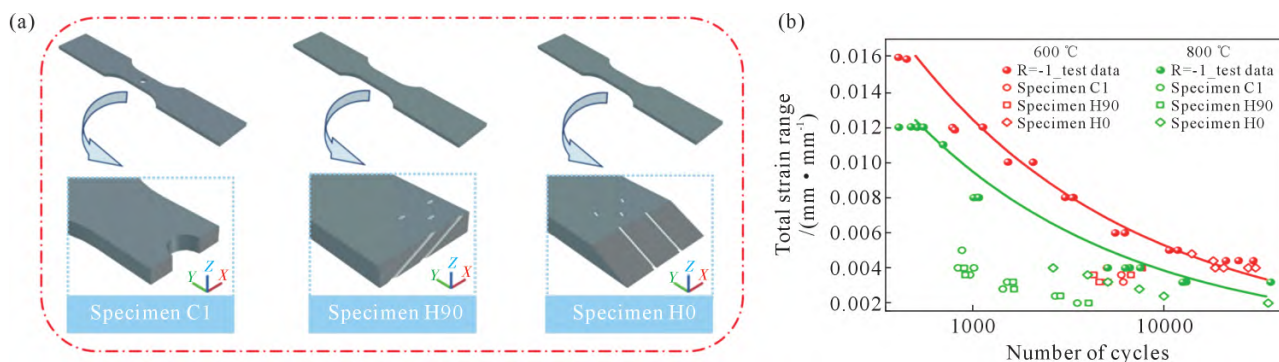


图 3 3 种孔型的平板疲劳寿命分析:(a) 3 种孔型示意图;(b) 寿命-应变范围曲线^[33]

Fig.3 Fatigue life analysis of the three types of plate: (a) schematic diagrams of the three hole types; (b) life-strain range curve^[33]

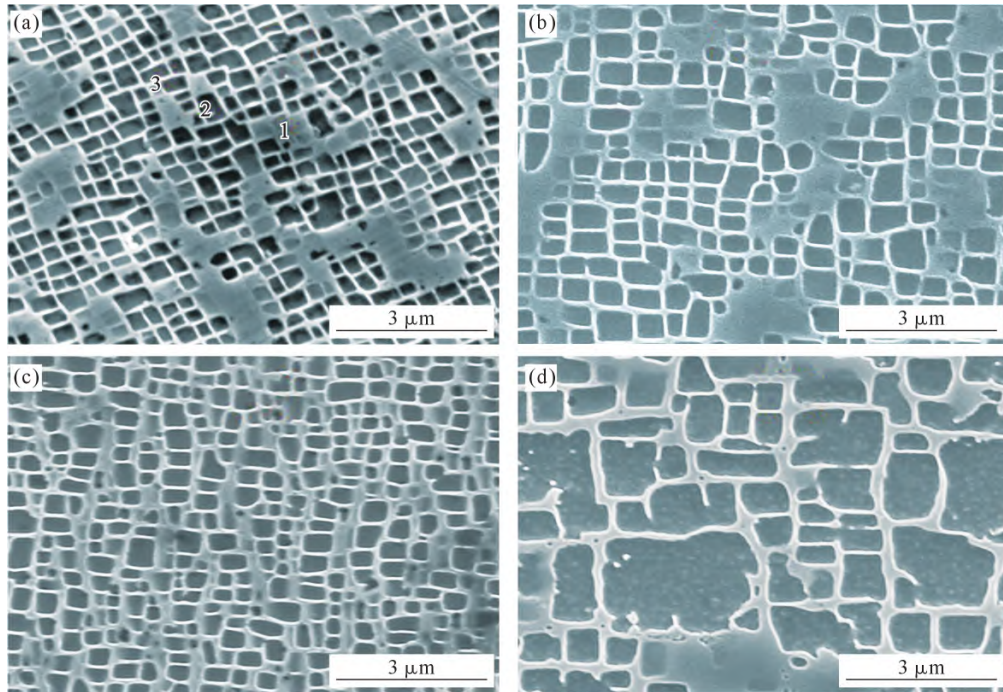


图4 CM247DSLC合金 γ' 相在不同实验条件下的形貌:(a)原始合金的扫描电子显微照片;(b)低周疲劳;(c)1 min 保载时间蠕变-疲劳;(d)5 min 保载时间蠕变-疲劳^[40]

Fig.4 Morphology of the γ' phase of the CM247DSLC alloy under different experimental conditions: (a) SEM image of the original alloy; (b) low-cycle fatigue; (c) 1-minute load dwell time creep-fatigue; (d) 5-minute load dwell time creep-fatigue^[40]

呈现强各向异性(垂直方向 343 MPa *vs.* 水平方向 182 MPa)^[43]。IN713C 合金中具有高 Schmid 因子(0.49)的 Goss 晶粒优先激活滑移带^[44]。IN740H 在 750 °C 高应变幅下会生成形变孪晶,而 600 s 保载则促进亚晶界的演化^[45]。GH4169 中 δ 相的形貌对裂

纹扩展有决定性影响:短时效生成的球状 δ 相可延缓扩展,而长时效生成的针状 δ 相则使扩展速率激增 83%,如图 5 所示,随着失效时间从 5 h 延长至 24 h,从球状演化为针状^[46]。高/低应力下的高周和超高周疲劳疲劳寿命差异显著,随着应力水平降低,K418合

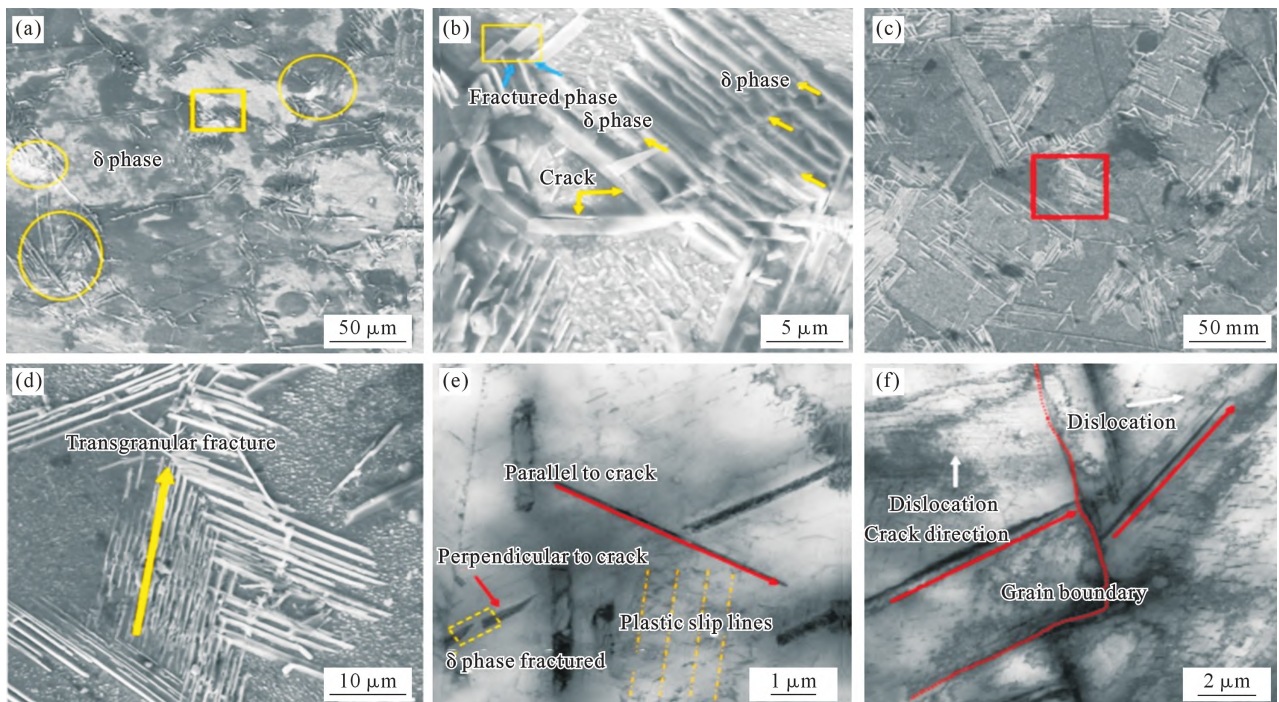


图5 纵向截面微观结构:(a) HT5 样品的 SEM 图像;(b) HT6 样品的 SEM 图像;(c) HT7 样品的 SEM 图像;(d) HT5 样品的 TEM 图像;(e) HT6 样品的 TEM 图像;(f) HT7 样品的 TEM 图像(HT5: 9 h; HT6: 12 h; HT7: 24 h)^[46]

Fig.5 Longitudinal section microstructure: (a) SEM image of the HT5 sample; (b) SEM image of the HT6 sample; (c) SEM image of the HT7 sample; (d) TEM image of the HT5 sample; (e) TEM image of the HT6 sample; (f) TEM image of the HT7 sample (HT5: 9 h; HT6: 12 h; HT7: 24 h)^[46]

金的失效模式从孔洞主导转变为晶面解理主导^[47]。

3 损伤机制与失效分析

为深入理解镍基高温合金疲劳失效机理,遵循由宏观至微观、逐层深入的分析路径。宏观上,通过对疲劳断口的形貌观察,可直观判断载荷类型、应力水平及裂纹扩展模式。进一步地,聚焦于微观尺度,借助 SEM)与 TEM 等技术,能够揭示裂纹尖端的微观组织结构演变、二次裂纹的萌生与扩展路径,以及更为精细的位错组态特征。这些微观信息直接关联材料的循环变形机制与抗力本质。综上,从宏观断口形貌到微观裂纹行为与位错组态的跨尺度关联分析,是系统阐明镍基高温合金损伤断裂物理机制、建立寿命预测模型乃至指导材料优化设计的重要研究脉络。

在镍基高温合金损伤断裂研究中,宏观断口分析是揭示宏观尺度失效行为与微观损伤机制之间关联的首要且关键步骤。铸造合金的宏观断口高度不规则,布满大量铸造缺陷(气孔、缩松),裂纹通过连接这些位于不同平面上的缺陷进行扩展,形成疲劳台阶。细晶材料因更多缺陷位于晶界,断口呈现更高的缺陷比例和更差的宏观疲劳性能^[48]。增材制造 K418B 的疲劳断口显示失效均起源于增材制造工艺引入的亚表面微观缺陷(如孔隙、未熔合缺陷)。断口清晰地显示出以缺陷为核心、呈放射状的裂纹萌生区,以及由疲劳辉纹主导的扩展区和最后瞬时断裂形成的韧窝区^[49]。热-力耦合疲劳试验显示,IP-TMF(同相)在低 ΔK 下呈现沿晶断裂,随扩展可能向穿晶转变;OP-TMF(反相)则以穿晶断裂为主,伴有清晰疲劳辉纹。细晶材料比粗晶呈现更明显的沿晶倾向和更高的裂纹扩展速率^[37]。宏观断口模式严格取决于温度-应变相位:IP-TMF 为混合型,随保时增加,沿晶特征增强;OP-TMF 则以穿晶为主,辉纹清晰;等温疲劳则为完全穿晶,如图 6 所示。宏观上 TMF 寿命远低于同最高温的等温疲劳,IP-TMF 寿命最短^[50]。OP-TMF 缺口试样的宏观断口展现出严重的多裂纹萌生特征,大量裂纹在缺口根部表面萌生,最终断裂发生在试样中心。这与光滑试样或传统等温疲劳中单一的、从表面扩展的主裂纹模式截然不同,是应力集中与表面氧化协同作用的典型宏观表现^[35]。在蠕变-疲劳交互作用下,宏观断口呈现沿晶与穿晶的混合模式。随着保载时间延长或应力降低,沿晶特征愈加显著。晶粒尺寸是决定性因素之一,细晶材料因晶界总面积大,宏观上表现出以沿晶为主的断裂和更短的寿命^[51]。

在镍基高温合金损伤断裂研究中,裂纹分析作为核心手段,是实现关键性损伤机制识别及损伤演化规律定量表征的基础。铸造合金的微观失效由铸造缺陷主导,裂纹几乎总是从各类铸造缺陷处萌生。扩展主要沿晶界进行,原因是晶界在高温下较弱,且常分布着脆性碳化物和更多微孔。块状 MC 碳化物作为脆性相,充当了裂纹扩展的优先通道或起源点^[48]。表面氮化物夹杂是 GH4065A 超低 C/N 合金疲劳裂纹的主导萌生源,并发现了一个临界尺寸阈值:只有尺寸达到或超过平均晶粒尺寸(细晶约 $8\ \mu\text{m}$)的氮化物才成为有效裂纹源^[52]。裂纹萌生模式因晶粒类型和应变幅而异。细晶在“跃变”应变幅处出现表面多处萌生小裂纹快速合并的独特模式;粗晶多为多源萌生;不规则晶则表现出氧化萌生与沿晶面解理萌生的竞争模式,后者能量消耗低,易于早期开裂^[53]。热-力耦合疲劳试验显示,IP-TMF 因高温拉伸应力促进晶界蠕变孔洞;OP-TMF 因低温高应力导致表面氧化膜开裂引发穿晶裂纹;等温疲劳主要表现为滑移带开裂^[50]。裂纹扩展路径是晶体学滑移与晶界效应竞争的结果。IP 条件下,高温拉伸促进应力辅助晶界氧化和弱化,导致沿晶扩展;OP 条件下,低温高应力促进滑移主导的穿晶扩展。特殊晶界和局部高应变区能有效促使裂纹偏转和二次裂纹形成,是重要的抗扩展机制,如图 7 所示^[37]。缺口疲劳实验中,裂纹萌生于缺口根部最大主应力区域,并伴严重氧化。扩展过程受到强烈的氧化辅助,氧化产物沿裂纹累积,削弱材料并引起热失配应力。早期扩展方向垂直于表面,后期转向受名义应力控制^[34]。在蠕变-疲劳交互作用下微观损伤是疲劳(穿晶滑移)、蠕变(晶界孔洞/滑动)和氧化(晶界氧化)共同作用的结果。其主导机制随载荷条件转变:高应变幅/短保时,滑移带引发的穿晶开裂主导;低应变幅/长保时,晶界处的蠕变与氧化损伤主导,导致沿晶开裂^[51]。随着蠕变-疲劳加速载荷的提高,裂纹萌生与早期扩展路径发生迁移。疲劳裂纹不仅沿原始晶界扩展,更在因长期老化产生的亚晶界上大量形核和连接,呈现典型的沿晶蠕变裂纹特征,即空穴迁移机制^[52]。电子束焊接接头的疲劳裂纹扩展实验显示,裂纹扩展行为表现出明显的速率反转现象。低 ΔK 下,焊缝区的裂纹扩展速率低于母材,粗大柱状晶导致的曲折扩展路径以及焊缝与母材强度错配产生的屏蔽效应,降低了裂纹尖端有效驱动力。高 ΔK 下则相反,焊缝区因塑性较差(存在 Laves 相、 δ 相少),裂纹尖端钝化能力弱,变形更集中,导致扩展速率高于母材^[54]。

在镍基高温合金损伤断裂研究中,位错组态分

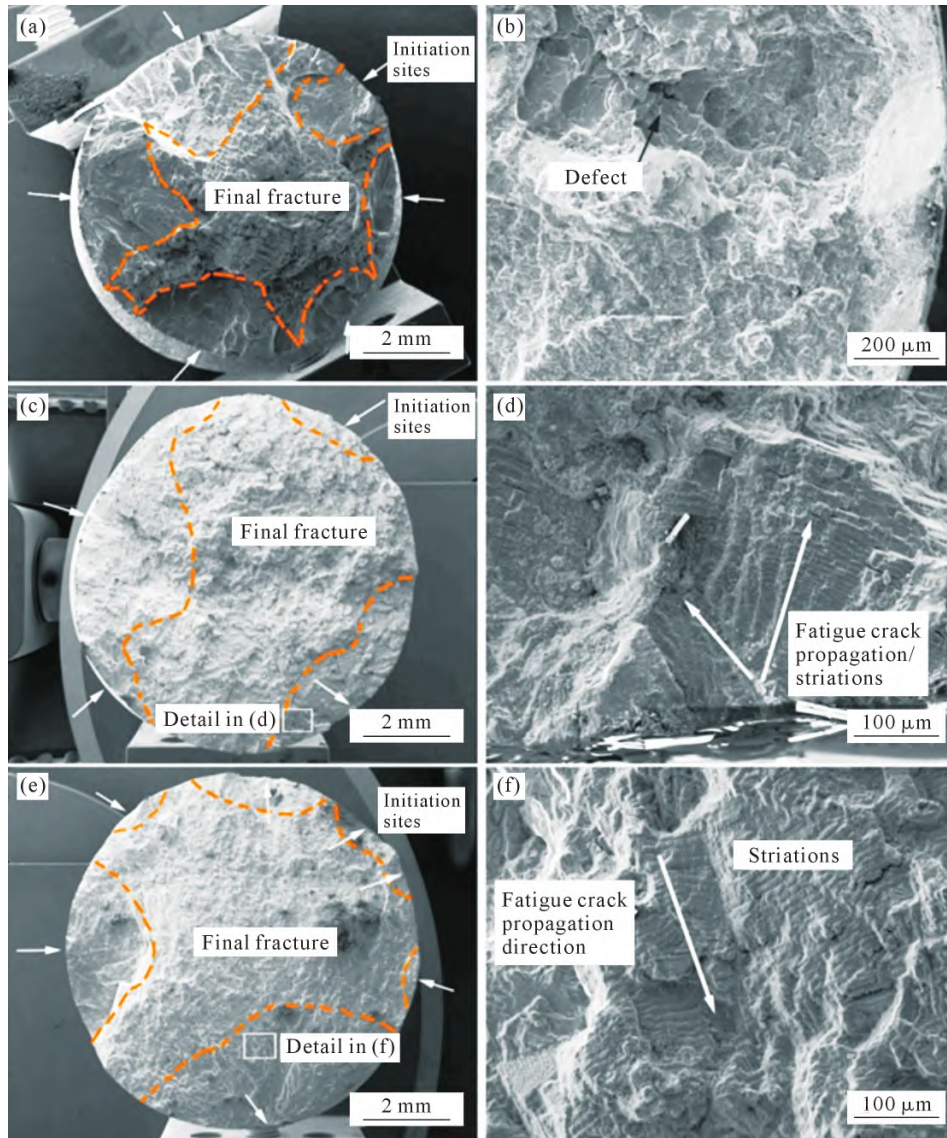


图 6 疲劳断口表面:(a, b) ILCF;(c, d) TMF-IP;(e, f) TMF-OP^[50]
Fig.6 Fatigue fracture surfaces: (a, b) ILCF; (c, d) TMF-IP; (e, f) TMF-OP^[50]

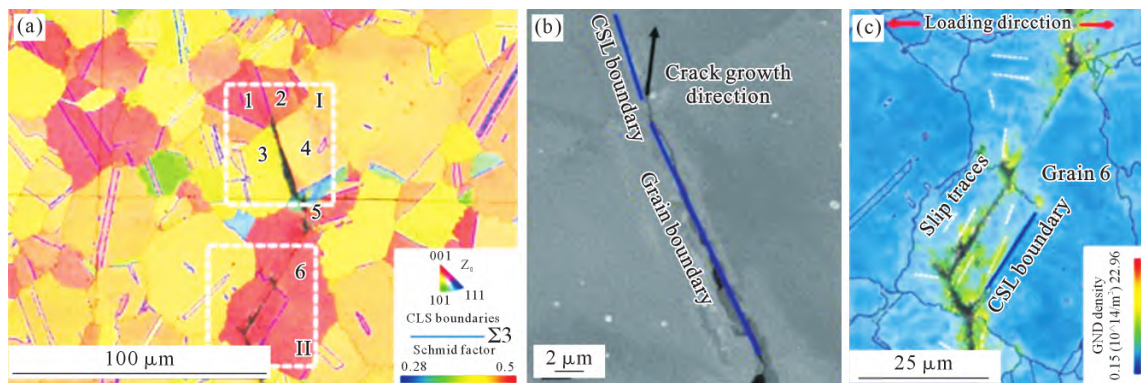


图 7 粗晶 - 异相的裂纹扩展:(a) 施密德因子分布图;(b) 区域 I 的裂纹扩展图像;(c) 区域 II 的 GND 分布^[37]
Fig.7 CG-OP crack propagation: (a) SF distribution map; (b) crack tip of area I; (c) GND distribution map of area II^[37]

析是揭示微观变形机制、连接微观缺陷与宏观裂纹扩展行为的关键桥梁,阐明了损伤起源、量化塑性演变,并为寿命预测与材料优化提供直接的实验依据。热-力耦合疲劳试验显示,IP-TMF 裂纹路径附近几何必需位错密度更高,表明其塑性变形更剧烈、更不

均,与沿晶损伤模式相符^[37]。IP-TMF 下形成类蠕变的蜂窝状位错网络,导致循环硬化;OP-TMF 高应变幅下出现类似面心立方金属的持久滑移带结构,促进应变局域化;等温疲劳下则观察到层错切割或清晰的滑移带^[50]。同样有研究显示,IP-TMF 下,高密

度的位错对剪切 γ' 相和形成的位错网络分别导致了循环软化和硬化。OP-TMF 下,大量的扩展与孤立堆垛层错以及交叉堆垛层错主导了变形,其产生与高温下层错能降低有关,决定了独特的穿晶断裂模式^[20]。在室温 ~650 °C 的高周疲劳实验中发现,650 °C 下动态应变时效效应减弱,TEM 直接观察到沿滑移带分布的细小碳化物颗粒及其周围的高位错密度区。如图 8 所示,碳化物析出硬化了局部滑移面,改变了位错运动模式(从平面滑移转向更均匀

的分布),是高温下滑移离域化和寿命提升的根本原因^[55]。 γ' 相尺寸是控制裂纹萌生抗力的核心:粗大的 γ' 相(>80 nm)促进多滑移系的波浪状滑移,有利于延长萌生寿命。然而,老化过程中析出的特定碳化物(尤其是界面 M_6C) 作为强障碍物,会改变局部应力场并引发微裂纹,从而可能抵消 γ' 相粗化的益处,甚至成为主导疲劳行为的因素^[56]。微动疲劳磨损区表现出显著的晶格畸变(高 GROD 值)、高局部取向差(高 KAM 值)以及高 Schmid 因子。这直接证明,在

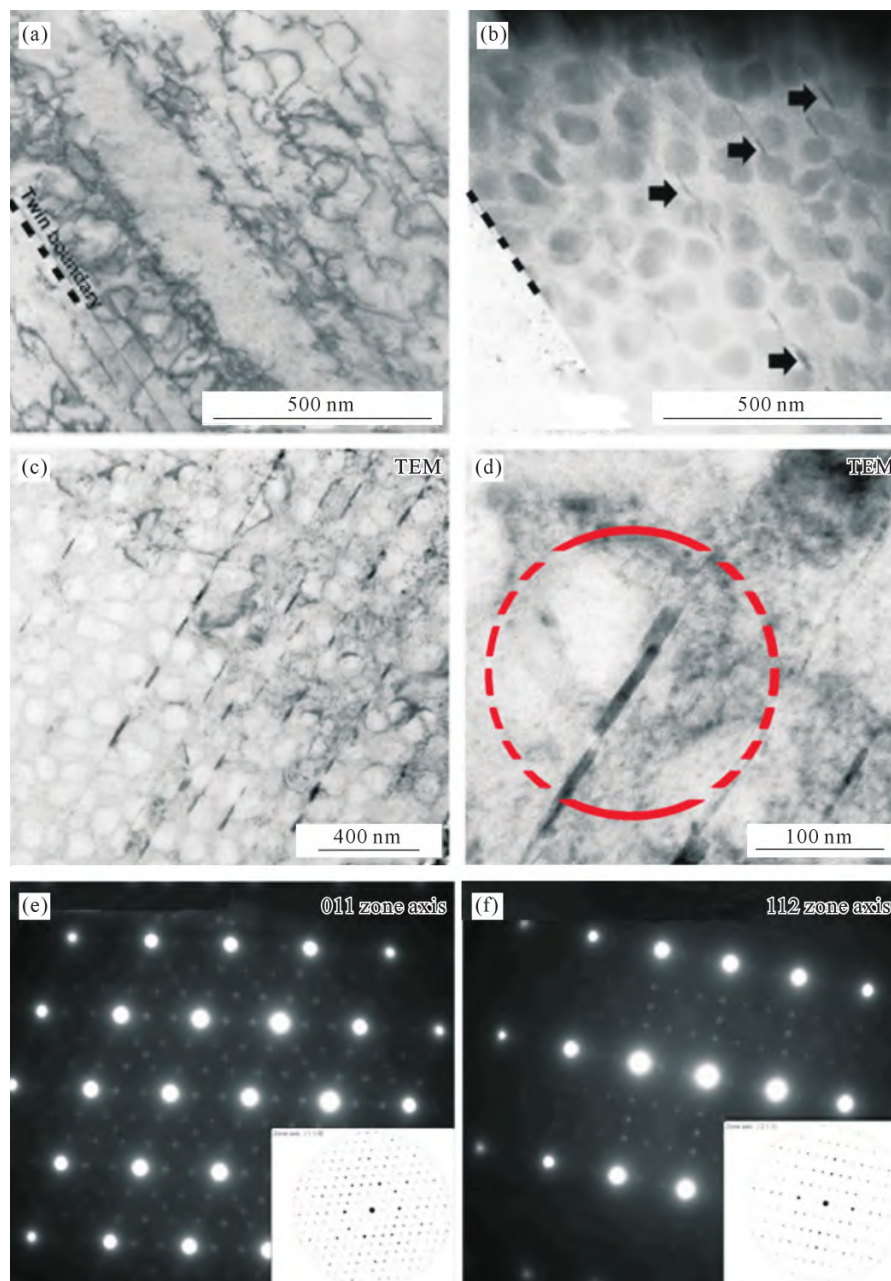


图 8 650 °C 测试试样疲劳循环过程中的细观析出现象:(a) 孪晶界附近区域的高角度环形暗场 STEM 像;(b) 相衬 STEM 像显示 γ' 剪切变形及 γ 基体中的细观析出;(c) 常规 TEM 像,与(a)、(b)图像相对称;(d) 疲劳过程中滑移带析出物的高倍 TEM 像;(e, f) 图(d)红色圆圈所示区域的衍射图谱,该图谱对应 Ni_3Al 相与 $M_{23}C_6$ 碳化物的复合衍射特征^[55]

Fig.8 Fine-scale precipitation during fatigue cycling for a sample tested at 650 °C: (a) high-angle annular dark field STEM images from a location near a twin boundary; (b) the associated STEM image in phase contrast showing shearing of γ' and fine-scale precipitation in the γ matrix; (c) the associated conventional TEM image. Images are flipped with respect to (a) and (b); (d) high-magnification TEM images of the precipitation along slip bands that form during fatigue; (e, f) diffraction pattern from the volume displayed by the red circle in (d). The diffraction patterns correspond to the combination of the Ni_3Al phase and $M_{23}C_6$ carbide^[55]

微动循环的剪切应力作用下,发生了高密度的位错积累和局部滑移,这种塑性应变局域化是驱动微裂纹形核的根本原因^[57]。通过对比高 ΔK 下裂纹尖端的 EBSD-KAM 图,明确了位错尺度上的差异机制。母材区 KAM 值较高但分布相对均匀,表明其细晶组织能实现协调的、较为分散的塑性变形,有助于延缓裂纹扩展。焊缝区 KAM 值分布则高度局域化,塑性变形集中在裂纹前端的少数粗大晶粒内,形成狭窄的塑性通道,导致严重的应变局部化,从而加速了裂纹沿这些通道的快速扩展。

4 寿命预测与数值模拟

镍基高温合金作为航空发动机和重型燃气轮机热端部件的核心材料,其服役性能直接决定了整个装备的寿命与可靠性。在高温、交变载荷和苛刻环境的耦合作用下,材料的疲劳失效是一个从微观损伤萌生、累积到宏观裂纹扩展直至最终断裂的跨尺度复杂过程。传统基于宏观应力/应变的经验模型(如 $S-N$ 曲线)虽在工程设计中简便易用,但受限于对微观机制的表征不足,难以精准预测复杂载荷谱下的构件寿命。近年来,随着计算材料科学和先进表征技术的发展,疲劳寿命预测的研究范式正经历深刻变革。一方面,从唯象走向机理,研究者通过晶体塑性有限元(CPFEM)、位错动力学等方法,致力于在介观和微观尺度构建物理机制驱动的损伤模型;另一方面,跨尺度协同和数据驱动正成为重要趋势,结合机器学习等方法整合多尺度信息,以构建兼具物理可解释性与预测精度的新型寿命模型。本节将从宏观唯象、介观尺度、微观机制及跨尺度集成 4 个层面,系统综述当前镍基高温合金疲劳损伤建模与寿命预测方法的研究进展,分析其各自优势、局限性与适用场景,并展望该领域的发展方向与潜在挑战(表 1)。

宏观唯象模型作为工程设计的基石,自疲劳研究之初便已发展成熟,它以连续介质力学框架和经验公式为核心,实现对寿命的直接、高效预测。随着对

高温疲劳损伤物理本质理解的深入,该类模型正从纯经验走向半经验范式,并且通过耦合损伤变量和微观组织参数来刻画损伤演化的动态过程。针对蠕变-疲劳交互作用,Kumar 等考虑初始蠕变阶段参数建立了基于应变能密度的模型,显著提升了长时保载下寿命预测的准确性^[45]。在超高周疲劳方面镍基高温合金李晶界和特定滑移系($\{111\}<110>$)的激活主导了内部解理面的形成,基于此提出了一个基于临界平面理论和微观解理面应力强度因子的修正疲劳指示参数模型^[58]。通过整合 CPFEM 和 Tanaka-Mura 位错塞积模型框架,新模型成功模拟裂纹萌生与扩展的竞争过程,定量揭示了晶粒取向、晶粒尺寸细化及缺陷位置对 AM-GH3536 合金低周疲劳寿命的显著影响^[59]。通过对传统的 Manson-Coffin 进行参数修正,可有效量化粉末冶金中夹杂物对疲劳寿命的影响^[60]。在热力耦合疲劳方面,基于氧扩散动力学的模型进一步揭示了环境损伤的主导作用^[61]。GH4169 高温合金的热机械疲劳研究中,Chaboche 模型模拟了循环软化、拉压不对称性及温度变化引起的变形行为,还能结合蠕变损伤反映不同相位角下的应力-应变演化规律^[62]。同样,在增材制造 Inconel 718 的多轴疲劳分析中,Chaboche 模型基于 von Mises 等效度量,能够准确模拟其在不同温度与加载路径(轴向、扭转及其组合)下的循环应力-应变响应^[63]。

晶体塑性作为一种可以反映晶粒变形和滑移系运动的介观模型,已在疲劳模拟研究中大量应用。通过损伤的量化溯源,精准预测了 FGH4098 中李晶界应变集中峰(偏移边界 1~2 μm),该位置与实验观测的裂纹萌生点高度吻合,如图 9 和 10 所示^[64]。GH4169 蠕变-疲劳中晶界的蠕变损伤可通过 CIP 参数进行量化,显示保载 1800s 后的损伤较纯疲劳工况升高了 4 倍^[65]。通过开发梯度增强的位错晶体塑性有限元模型,发现 RR1000 合金非比例路径疲劳因载荷方向变化激活更多滑移系,通过交互作用显著提升了几何必需位错密度与局部储存能,从而

表 1 现有疲劳模型及精度对比

Tab.1 Comparison of existing fatigue models and their accuracy

Type	Typical method	Advantage	Limitation	Life prediction typical error
Mesoscopic phenomenology	M-C Model	Simple and efficient, with strong engineering applicability	Ignoring micro-level mechanisms; not suitable for extrapolation	± 2 times
	Chaboche model			
Mesoscopic scale	Crystal plasticity	Reflects local deformation and crack initiation	High computational cost, difficult to cover the full life	$\pm(30\sim 50)\%$
Microscopic mechanism	Dislocation dynamics	Reveals the physical essence, supports mechanism research	Scale limitations, difficult to apply directly	Primarily qualitative; quantification requires coupling
	Phase field			
Cross-scale/ data-driven	Multi-scale coupling	Balances accuracy and efficiency, with broad prospects	Complex methods, high verification cost	$\pm(20\sim 30)\%$
	Machine learning			

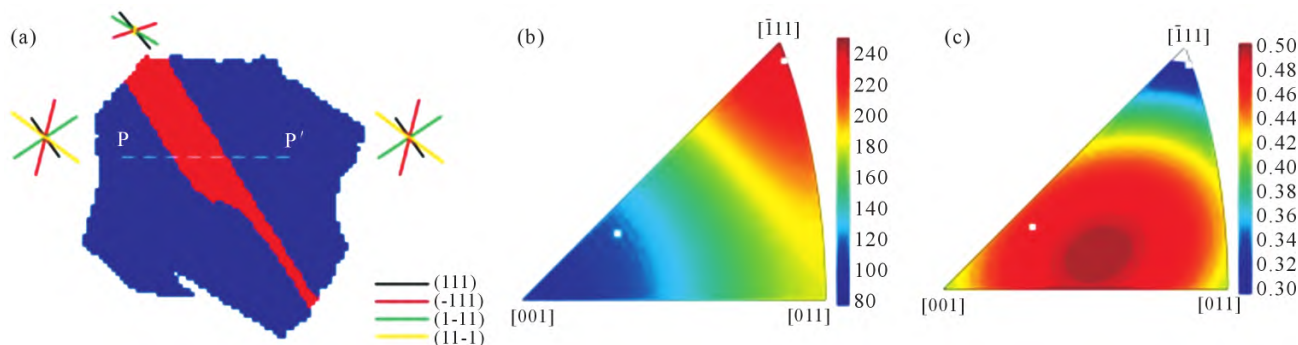


图9 用于孪晶界分析的晶粒:(a)含有退火孪晶的晶粒形貌。孪晶与母晶对的对应 $\{111\}$ 滑移迹线以不同颜色绘制,线的长度表示施密特因子的相对大小;(b) $\{111\}<110>$ 滑移系沿载荷方向的弹性模量;(c) $\{111\}<110>$ 滑移系沿载荷方向的施密特因子^[64]

Fig.9 Grains used for twin boundary analysis: (a) typical large grain containing an annealing twin boundary. The corresponding $\{111\}$ slip traces of the twin and parent grain pair are plotted with different colours, with the length of the lines representing the relative magnitude of the Schmid factors; (b) Elastic modulus of the $\{111\}<110>$ slip systems along the loading direction;

(c) Schmid factors of the $\{111\}<110>$ slip systems along the loading direction^[64]

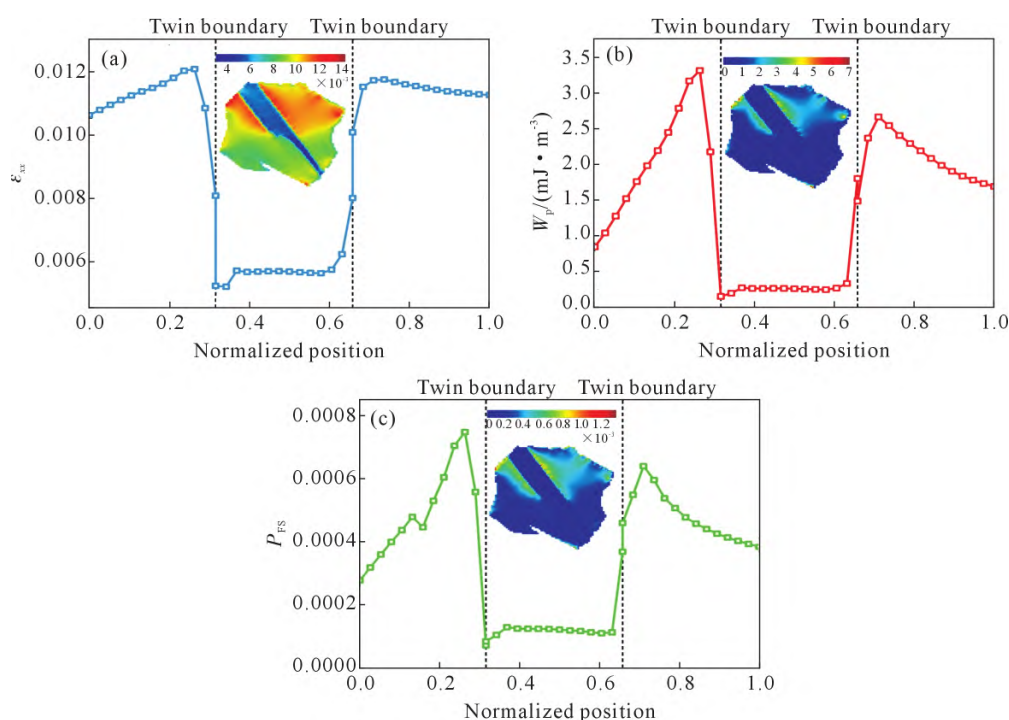


图10 沿图9所示的路径P-P'在650 °C下经过15次循环载荷后的变化(垂直虚线表示孪晶界的位置):(a)应变分量;(b)ASSEDD;(c)Fatemi-Socie参数^[64]

Fig.10 Along the path P-P' depicted in Fig. 9 at 650 °C after 15 loading cycles (the vertical dotted lines represent the positions of the twin boundaries): (a) strain component; (b) ASSEDD; (c) Fatemi-Socie parameter^[64]

加速损伤积累,降低疲劳寿命^[66]。通过将晶体塑性理论(如耦合 γ/γ' 相的滑移机制)与数值方法(如快速傅里叶变换FFT)相结合,能够精准解算晶格失配应力等细观参量,从而在700~1050 °C宽温域内将循环响应预测误差控制在3%以内,实现了对材料行为的精准预报^[67]。基于晶体塑性有限元模型,疲劳指示参数(FIPs)可以建立微观塑性变形与非均匀应力场及裂纹萌生的关联,通过耦合应力强度因子与蒙特卡洛方法,构建了一个能同时考虑夹杂物分布、启裂位置竞争及热残余应力的预测模型^[68]。更有研究集成晶体塑性有限元与神经网络,以高达93.1%的准确率构建了储能-寿命映射关系,定量揭示柱状晶晶界处

的储能集中会导致寿命降低40%^[69]。在局部应力场重构中,激光重铸IN718通过Ohno-Wang模型反演出重铸区的三向拉应力峰,这为解释局部高达10倍的使用寿命降幅提供了关键依据^[70]。

微观机制模型致力于从原子、位错、晶界等微观结构层次,直接揭示并量化疲劳损伤萌生与早期演化的物理本源。离散位错动力学(discrete dislocation dynamics, DDD)方法成功模拟了多晶镍基合金在循环载荷下穿晶裂纹尖端的变形,再现了裂纹尖端前方由位错累积主导的循环棘轮应变现象,该现象具有高度局部化特征,且位错攀移被认为是高温下的主导机制^[71]。针对热机械疲劳(thermo-mechanical fa-

tigue, TMF)中的损伤,结合泰勒模型和相场/蒙特卡洛方法的集成模型成功预测了 Hastelloy X 合金在 TMF 过程中组织的演变,并引入基于临界取向分布函数(orientation distribution function, ODF)值的新参数来预测失稳裂纹扩展^[72]。在蠕变-热疲劳-氧化领域,相场模型通过添加一个包含交互系数的方程描述蠕变损伤与疲劳损伤的非线性耦合,并基于氧化动力学提出两种策略来量化氧化诱导的疲劳损伤,有效预测了薄壁多孔结构在蠕变-热疲劳条件下的裂纹扩展行为^[73]。Xue 等^[74]开发了统一的相场框架来模拟蠕变-疲劳耦合下的裂纹扩展,其模型通过降解局部断裂韧性来表征循环应力和塑性应变造成的损伤,揭示了由于蠕变区较小应力梯度导致裂纹尖端前方损伤增强的蠕变-疲劳交互作用机制。Liu 等^[75]则进一步将晶体塑性理论与相场法结合,发展了晶体塑性相场模型(CP-PFM),该模型以累积剪切应变耗散能作为相场演化的主要驱动力,成功模拟了 FGH4097 合金中疲劳裂纹沿密排面扩展的微观组织敏感性行为,如图 11 所示。综上所述,当前研究呈现出从传统唯象模型向高保真机理模型发展的趋势,特别是 DDD 和多种相场模型(纯相场、耦合晶体塑性的相场、以及进一步耦合蠕变-氧化的相场)的应用,使研究者能够更精细地捕捉位错运动、微观结构演变、蠕变-疲劳-氧化多场耦合等关键物理过程,为建立基于物理机制的镍基高温合金疲劳寿命跨尺

度预测模型奠定了坚实基础。

传统模型在复杂非线性问题上常显乏力,而数据驱动方法为该领域带来了革命性的工具。支持向量机(support vector machine, SVM)与随机森林(random forest, RF)等算法,能够以相位角、总应变幅和拉伸平均温度等关键特征为输入,直接预测粉末冶金合金的 TMF 寿命,误差小于 2 倍,其中 $\Delta\epsilon_i$ 的贡献度高达 48%^[23]。神经网络不仅能预测寿命,更能揭示内在规律。以 FGH96 循环过程中的力峰值变化数据训练 BP 神经网络,成功量化了多轴路径下的额外损伤,使寿命预测的分散带缩窄了 $\pm 10\%$, 通过对比 BP 神经网络、支持向量回归和随机森林模型,利用区间化的载荷、几何、路径矢量和过程数据来训练模型,成功预测出带有概率分布的疲劳寿命区间,在精度上相较于传统经验模型有所提升^[76]。在物理约束下,将晶粒尺寸效应通过连续损伤力学(continuum damage mechanics, CDM)框架引入晶界面积比参数,实现了从均质材料到结构复杂的梯度涡轮盘的寿命映射^[51]。Song 等^[77]提出了一种基于分解协同时变 Kriging 替代模型(DCTKS)的蠕变疲劳寿命预测方法。该方法通过结合多学科分析模型,建立了涡轮盘的动态代理模型,并实现了对蠕变疲劳寿命的高效预测。Chen 等^[78]进一步构建了航空发动机涡轮盘蠕变疲劳寿命预测的数字孪生系统框架。该框架通过整合温度数据和历史载荷数据,实现了对涡轮盘结构蠕

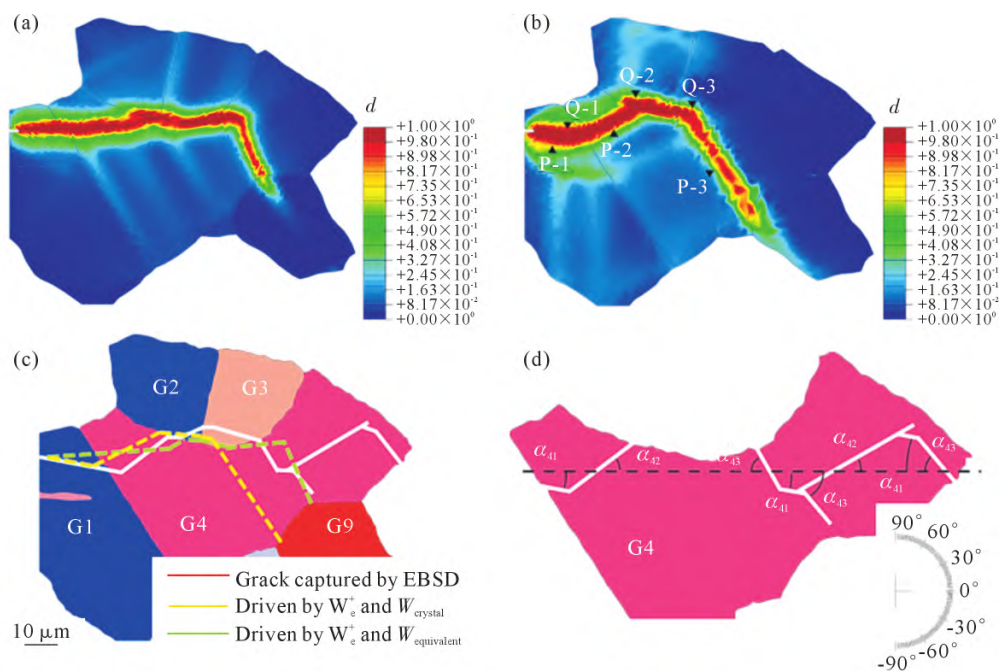


图 11 实验与模拟对比:(a, b) 以等效塑性耗散功和晶体学功为主要驱动力的模型;(c) EBSD 观测结果的裂纹形态;(d) G4 晶粒内所有裂纹扩展角^[75]

Fig.11 Comparison between the experimental and simulation results: (a, b) models with equivalent plastic dissipation work and crystallographic work as the main driving forces; (c) crack morphology demonstrating the EBSD observations; (d) all crack growth angles within the G4 grain^[75]

变疲劳损伤的实时计算,并据此给出了剩余寿命的在线预测。Yagci等^[79]提出了一种针对民用航空高压涡轮盘的结构健康监测方法。该方法通过构建多学科数字孪生模型,结合系统性能、热力学和结构分析的多学科分析模型,将载荷数据与部件累积损伤相连接。该方法能够实现对涡轮盘健康状态的个体化监测,并通过数字孪生技术预测剩余使用寿命。

5 总结与展望

镍基高温合金的疲劳行为本质上是一个多尺度耦合的系统性问题,其核心科学挑战在于理解宏观力学响应与微观组织演化之间的动态交互作用。研究表明,疲劳寿命并非单一因素决定,而是受载荷路径、温度场及环境介质的协同调控,表现出强烈的非线性和时间依赖性。微观层面, γ'/γ'' 强化相的粗化、溶解及位错筏化等演化过程直接驱动材料软化,而初始缺陷、晶体取向和组织则预设了损伤萌生的局部敏感区。更重要的是,损伤演化跨越从晶格缺陷到宏观裂纹的多个尺度,其路径和速率受相场、温度及微观组织异质性的共同调制,导致失效模式从内部缺陷主导转向表面萌生,复杂多变。

当前研究已初步揭示了疲劳行为的物理图像,但仍存在若干关键瓶颈:①多尺度耦合机制尚未定量刻画,特别是热-力-化学环境下的跨尺度损伤传递规律;②微观组织演化的实时观测与模拟精度不足,限制了对动态过程的预测能力;③寿命预测模型虽从宏观本构向数据驱动范式演进,但物理机制与数据的融合仍显薄弱,尤其在极端条件下可靠性有限。

未来研究需打破尺度壁垒,实现从机理深化到工程应用的跨越。重点方向可聚焦于以下方面。

(1)多尺度实验与表征技术革新 发展原位、实时的高温疲劳测试平台,结合高分辨率电镜、同步辐射等手段,追踪从位错运动到宏观裂纹的全过程,揭示环境效应(如氧化、腐蚀)与机械载荷的交互机制。

(2)跨尺度建模与仿真集成 构建融合相场法、晶体塑性及连续介质力学的多尺度模型,量化微观组织演化与宏观性能的关联。同时,利用机器学习挖掘多源数据(如实验、仿真、工况数据),建立物理信息驱动的本构关系,提升模型外推能力。

(3)疲劳机理的定量化与预测精度提升 深入研究局部应变集中、损伤萌生与扩展的定量准则,特别是晶体取向、织构及缺陷分布的统计影响。开发基于损伤机制的寿命预测框架,结合概率方法评估不确定性,实现从经验规律到物理机制的转变。

(4)新材料设计与工艺优化 基于疲劳机理指导

合金成分与微观结构设计,如通过调控 γ' 相分布、晶界工程或添加微量元素,增强抗疲劳性能。同时,优化制造工艺(如增材制造、热处理)以减少初始缺陷,提升材料均质性。

(5)工程应用与寿命监测 推动研究成果向航空发动机、燃气轮机等关键部件寿命评估转化,发展在线监测与数字孪生技术,实现疲劳寿命的动态预测,为安全运行提供决策支持。

通过上述方向的突破,有望推动镍基高温合金疲劳研究从现象描述走向机理量化,最终实现材料设计—制造—服役的全链条精准调控。

参考文献:

- [1] 刘伟,李科,赵燕茹,朱静,孟庆坤,马瑞亭. 固溶温度对 GH4169 高温合金微观结构与力学性能影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(8): 809-815.
LIU W, LI K, ZHAO Y R, ZHU J, MENG Q K, MA R T. Effects of solution treatment temperature on the microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(8): 809-815.
- [2] 王梦真,林健,呼啸,王大刚,卫强. GH4169 镍基合金板材高温拉伸性能研究[J]. 铸造技术, 2023, 44(12): 1109-1115.
WANG M Z, LIN J, HU X, WANG D G, WEI Q. Study on the tensile properties of GH4169 alloy sheet at high temperature [J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1109-1115.
- [3] 王建国,刘东,杨艳慧. GH4169 合金非均匀组织在加热过程中的演化机理[J]. 金属学报, 2016, 52(6): 707-716.
WANG J G, LIU D, YANG Y H. Mechanisms of non-uniform microstructure evolution in GH4169 alloy during heating process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(6): 707-716.
- [4] 高圣勇,王一雯,苏孺,吴大勇,康杰,包燕平. GH4169 高温合金低周疲劳变形行为研究[J]. 稀有金属, 2022, 46(3): 289-296.
GAO S Y, WANG Y W, SU R, WU D Y, KANG J, BAO Y P. Low-cycle fatigue behavior of GH4169 superalloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(3): 289-296.
- [5] 罗青松,相恒高,魏代修,殷亚军,祁志祥,郑功,许昊,周冰,陈畅. TiAl 合金低周疲劳失效机理综述[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 907-916.
LUO Q S, XIANG H G, WEI D X, YIN Y J, QI Z X, ZHENG G, XU H, ZHOU B, CHEN Y. Overview of the low-cycle fatigue failure mechanism of TiAl alloy [J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 907-916.
- [6] 宋晓俊,王超渊,汪煜,周磊,邹金文. 挤压参数对镍基粉末冶金高温合金微观组织影响研究[J]. 铸造技术, 2020, 41(11): 1024-1029.
SONG X J, WANG C Y, WANG Y, ZHOU L, ZOU J W. Effect of extrusion parameters on microstructure of Ni-based P/M superalloy[J]. Foundry Technology, 2020, 41(11): 1024-1029.
- [7] 胡彬彬,王臻. 燃气轮机热端部件用高温合金的研究进展[J]. 科技与创新, 2024(17): 107-109.
HU B, WANG Z. Research progress on high-temperature alloys for

- gas turbine hot end components[J]. Science and Technology & Innovation, 2024(17): 107-109.
- [8] 张再云,刘印刚,李森泉. 激光增材制造 316L 及 IN718 的原位合金化及其微观组织与力学性能研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(2): 160-166.
- ZHANG Z Y, LIU Y G, LI M Q. Research on in-situ alloying of 316L and IN718 via laser additive manufacturing and its microstructure and mechanical properties[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 160-166.
- [9] 党晓玲,王婧. 增材制造技术国内外研究现状与展望[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(2): 35-38.
- DANG X L, WANG J. Research status and prospects of additive manufacturing technology at home and abroad[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(2): 35-38.
- [10] 宋波,张金良,章媛洁,胡凯,方儒轩,姜鑫,张莘茹,吴祖胜,史玉升. 金属激光增材制造材料设计研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(1): 1-15.
- SONG B, ZHANG J L, ZHANG Y J, HU K, FANG R X, JIANG X, ZHANG X R, WU Z S, SHI Y S. Research progress of materials design for metal laser additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 1-15.
- [11] 裴海清. 镍基单晶合金高温氧化及热疲劳行为研究[D]. 西安:西北工业大学, 2019.
- PEI H Q. The high-temperature oxidation and thermal fatigue behaviors of Nickel-based single crystal superalloy [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [12] 刘君,孙志超,唐文亭. K403 镍基铸造合金热暴露后的微观组织与性能[J]. 铸造, 2013, 62(7): 612-615.
- LIU J, SUN Z C, TANG W T. Microstructure and properties of K403 Nickel based alloy after thermal exposure[J]. Foundry, 2013, 62(7): 612-615.
- [13] 韩世进,常城. 发动机高压涡轮叶片的氧化损伤分析[J]. 航空维修与工程, 2022(3): 26-28.
- HAN S J, CHANG C. Oxidation damage analysis of high-pressure turbine blades of engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(3): 26-28.
- [14] 周中波,杨明波,张建中,韦皓博. K403 合金高压导向叶片的组织及热疲劳机理分析[J]. 铸造技术, 2023, 44(3): 246-251.
- ZHOU Z B, YANG M B, ZHANG J Z, WEI H B. Microstructure and thermal fatigue mechanism of K403 alloy high pressure guide-vane[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 246-251.
- [15] 方舟,吴英弘,王维民. GH4169 高温合金高温低周疲劳行为及 Chaboche 本构分析[J]. 锻压技术, 2025, 50(6): 204-213.
- FANG Z, WU Y H, WANG W M. High temperature and low cycle fatigue behavior and Chaboche constitutive analysis on superalloy GH4169[J]. Forging & Stamping Technology, 2025, 50(6): 204-213.
- [16] 蒋安琪,霍元明,周子鑫,严祯荣,何涛,王昭昭,纪宏超,孙悦,王新宇. 晶体塑性理论及其在金属高低周疲劳寿命预测中的应用[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(1): 1-15.
- JANG A Q, HUO Y M, ZHOU Z X, YAN Z R, H T, WANG Z Z, JI H C, SUN Y, WANG X Y. Crystal plasticity theory and its application to prediction of high and low cycle fatigue life of metals [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(1): 1-15.
- [17] 张国栋,苏宝龙,廖玮杰,王晓峰,邹金文,袁睿豪,李金山. 机器学习在高温合金粉末盘构件疲劳寿命预测中的应用[J]. 铸造技术, 2022, 43(7): 519-524.
- ZHANG G D, SU B L, LIAO W J, WANG X F, ZOU J W, YUAN R H, LI J S. Prediction of fatigue life of powder metallurgy superalloy disk via machine learning[J]. Foundry Technology, 2022, 43(7): 519-524.
- [18] SAKANE M, ISOBE N. Tension-torsion multiaxial creep-fatigue lives of the Nickel-based superalloy Alloy 738LC[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: 106575.
- [19] PARK S, TANAKA Y, OKAZAKI S, FUNAKOSHI Y, KAWASHIMA H, MATSUNAGA H. Inferior fatigue resistance of additively-manufactured Ni-based superalloy 718 and its dominating factor[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107801.
- [20] ZHANG L, YU Z W, ZHANG L C, JIANG R, ZHAO L G, SONG Y D. Thermo-mechanical fatigue deformation and fracture mechanisms of nickel-based powder metallurgy superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 108: 108083.
- [21] SUN J Y, YUAN H. Life assessment of multiaxial thermomechanical fatigue of a nickel-based superalloy Inconel 718[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 120: 228-240.
- [22] LU J Q, HUANG Y. Effects of creep and oxidation to thermomechanical fatigue life assessment for nickel-based superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107873.
- [23] SHEN J, HU X A, MI D, QIAN Z M, TENG X F, SONG X, JIANG Y, NIE X F. Thermomechanical fatigue behavior and lifetime modeling of powder metallurgy superalloy considering phase angle effect[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 164: 107164.
- [24] KUMAR C, JENA P S, SINGH R K, HARMAN G A, SAHU J K. Strain ratio effect on microstructural evolution during low cycle fatigue exploitation of nickel base superalloy IN740H [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 194: 104551.
- [25] KUMAR R, PATNAIK S, JAYABALAN B, MUKHERJEE S, KRISHNA E H, CHATTERJEE D, PRASAD K, MANDAL S. Deformation behavior and failure mechanism during in-phase and out-of-phase thermomechanical fatigue in directionally solidified CM247LC superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2025, 203: 109274.
- [26] KONG W W, WANG Y Q, CHEN Y P, LIU X, YUAN C. Investigation of uniaxial ratcheting fatigue behaviours and fracture mechanism of GH742 superalloy at 923 K[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142173.
- [27] LI Z G, QIN H Q, XU K J, XIE Z B, JI P C, JIA M M. Study on high-temperature low-cycle fatigue behavior of the FGH96 superalloy based on internal stress division[J]. Metals, 2023, 13(10): 1705.
- [28] DING B, REN W, DENG K, LI H Q, LIANG Y C. An abnormal increase of fatigue life with dwell time during creep-fatigue deformation for directionally solidified Ni-based superalloy DZ445 [J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37(3): 277-284.
- [29] BARTOŠÁK M, HORVÁTH J, GÁLÍKOVÁ M, SLANÝ M, ŠULÁK I. High-temperature low-cycle fatigue and fatigue-creep behaviour of Inconel 718 superalloy: Damage and deformation mechanisms[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 186: 108369.

- [30] HU X A, ZHANG Q, JIANG Y, RAO G F, MIAO G L, HE W F, NIE X F. The effect of cyclic loading on the creep fatigue life and creep strength of a DS superalloy: Damage mechanism and life modeling[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105452.
- [31] WANG M L, YANG X G, LI B, SHI D Q, MIAO G L, GUO S Q, FAN Y S. The dominant role of defects on fatigue behaviour of a SLM Ni-based superalloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107894.
- [32] SONG X, JIANG Y, HU X A, NIE X F. Thermomechanical fatigue and life prediction method of a precision cast superalloy with electrical discharge machining drilled holes[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 166: 107253.
- [33] LUO L Y, WANG W J, YANG Q Z, MI D, WANG X, HU X A. Strain-controlled low-cycle fatigue behavior of a superalloy considering extensive temperature range and stress concentration[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2025, 48(2): 639-652.
- [34] HU X A, SHI D Q, YANG X G. Thermomechanical fatigue experimental study on a notched directionally solidified Ni-base superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 674: 451-458.
- [35] SHI Y, YANG X G, YANG D D, SHI D Q, MIAO G L, WANG Z F. Evaluation of the influence of surface crack-like defects on fatigue life for a P/M nickel-based superalloy FGH96[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 137: 105639.
- [36] DENG H Z, WANG L, LIU Y, SONG X, MENG F Q, YU T. Fatigue crack propagation behavior of IN718 superalloy aged with temperature/stress coupled field [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 153: 106514.
- [37] ZHANG L, WANG Y Z, YU Z W, JIANG R, BAXEVANAKIS K P, ROY A, ZHAO L G, TIAN G F, SONG Y D. Thermo-mechanical fatigue crack growth in a nickel-based powder metallurgy superalloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 186: 108413.
- [38] CAO L Y, CHEN Y, SUN Y L, CHENG F, DENG H W, ZHANG Y, CHENG X, LI Z, LI J. Regional high temperature fatigue crack growth behavior of a microstructure-gradient nickel-based superalloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 890: 145871.
- [39] ZHAO Z L, ZHANG P, LI S Z, ZHANG J, SHI W D, ZHANG C J, LI Y F, YAN J B, YANG F, ZHANG C. Fatigue-creep behaviors of Ni-Fe based superalloy under various testing conditions [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 4694-4701.
- [40] RAI R K, SAHU J K, DAS S K, PAULOSE N, FERNANDO C. Creep-fatigue deformation micromechanisms of a directionally solidified nickel-base superalloy at 850 °C [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(1): 51-62.
- [41] DING B, SUN M, WANG Z P, NA T, REN W L, LIN Z Z, SHEN Z, ZHONG Y B. Influence of temperature on the saturation effect of creep-fatigue life for directionally-solidified Ni-based superalloy DZ445 [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 946: 149074.
- [42] PENG Z C, ZHENG Z B, WANG X Q, ZOU J W. The microstructure effect on fatigue and dwell-fatigue in a nickel-based superalloy[J]. *Intermetallics*, 2022, 151: 107740.
- [43] ZHAO Z N, SUN S Y, ZENG Y, WEI J J, FAN Z M, LU Y J, YANG W Z, LI L. Study on the anisotropic high cycle fatigue performance of L-DEDED Ni-based superalloy: Microstructure, failure mechanism and fatigue limit evaluation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 182: 108202.
- [44] LI X L, LI W, LASHARI M I, SAKAI T, WANG P, ZHANG Y C, CAI L, HAMID U, DING X M. Elevated-temperature gigacycle fatigue properties of nickel based superalloy: Grain related cracking mechanism and life prediction modelling[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 261: 108254.
- [45] KUMAR C, KUMAR P. Creep-fatigue damage evolution in a nickel-based superalloy: An experiment-inspired modeling approach for life prediction[J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 195: 108872.
- [46] CHEN X M, YU Y J, LIN Y C, HU H W, NIE L Y, ZHOU X J, ZHANG J, LU X Z. Revealing the influence of initial δ phase on high-temperature low-cycle fatigue behavior of GH4169 superalloy[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 168: 109029.
- [47] LI X L, ZHANG Y C, LI W, ZHOU S Q, WANG P. High-cycle and very-high-cycle fatigue behavior and life prediction of Ni-based superalloy at elevated temperature[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(12): 3431-3447.
- [48] PANG K J, HUANG Y. Fatigue life assessment of a porous casting nickel-based superalloy based on fracture mechanics methodology [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 136: 105575.
- [49] MI D, LIAO W W, LI B C, XIONG W, LI X P, LI J Q, QIAN Z M, LONG X Y, JIANG C. A multiaxial fatigue life prediction framework for additively manufactured K418B nickel-based superalloy used in turbine blisks[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 183: 110245.
- [50] ŠULÁK I, OBRTLIK K. Thermomechanical and isothermal fatigue properties of MAR-M247 superalloy[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 131: 104443.
- [51] ZHANG B, WANG R Q, HU D Y, LI H B, JIANG K H, WEI J M, ZHANG H. Creep-fatigue lifetime prediction of GH720Li superalloy considering effect of grain size[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35(3): 863-871.
- [52] 李林翰, 张继, 张文云, 田强, 秦鹤勇, 张北江. 镍基高温合金 GH4065A 高温疲劳断裂机制研究[J]. *材料工程*, 2025, 53(1): 72-80.
- LI L H, ZHANG J, ZHANG W Y, TIAN Q, QIN H Y, ZHANG B J. Fatigue fracture mechanism of Ni-base superalloy GH4065A at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(1): 72-80.
- [53] TIAN Q, QIN H Y, HE J J, GUAN X F. The effect of grain size and anomalous shape on low cycle fatigue of nickel-based superalloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*. 2024, 188: 108526.
- [54] WEN S M, LIU Z C, MI D, LI B C, YANG S H, JIANG C. Revealing the fatigue crack propagation mechanism of a Ni-based superalloy electron beam welded joint through in-situ SEM observation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 162: 106955.
- [55] GU Y J, STINVILLE J C, CALLAHAN P G, ECHLIN M P, POLLOCK T M, EL-AWADY J A. Slip delocalization and diffusion mediated carbide formation during fatigue of a nickel-base super-

- alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 145: 106077.
- [56] PARNAIK A, PAVAN A H V, SILCHONOK S S, KISLOV N G, NARAYAN R L. High-cycle fatigue behavior of Haynes 282 superalloy subjected to accelerated ageing[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 182: 108234.
- [57] ZHU P Z, ZHANG Y M, DONG Z G, XU N W, KANG R K, SHAN K, BAO Y. Study on fretting wear and fatigue fracture of cast nickel-based superalloy K417G dovetail specimen[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 183: 110283.
- [58] QIN Z, LI B, CHEN C, CHEN T Y, CHEN R, ZHANG H, XUE H Q, YAO C F, TAN L. Crack initiation mechanisms and life prediction of GH4169 superalloy in the high cycle and very high cycle fatigue regime[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 720-736.
- [59] ZHANG X, LIU X G, DENG C Y, GONG B M, LI X G, LIU Y. Fatigue life prediction of additively manufactured nickel-based superalloy by integrating crystal plasticity and Tanaka-Mura model [J]. International Journal of Fatigue, 2026, 204: 109364.
- [60] FENG Y F, ZHANG L, WANG Y Z, YU Z W, JIANG R, ZHOU X M, ZOU J W, WANG X Q. Low-cycle fatigue life prediction of powder metallurgy superalloy considering characteristic parameters of inclusions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 47(1): 20-34.
- [61] LU J, YUAN H. Effects of creep and oxidation on thermomechanical fatigue life assessment for nickel-based superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176: 107873.
- [62] 张祿,余志伟,张磊成,江荣,宋迎东. GH4169 高温合金热机械疲劳循环损伤机理及数值模拟[J]. 金属学报, 2023, 59(7): 871-883.
- ZHANG L, YU Z W, ZHANG L C, JIANG R, SONG Y D. Thermo-mechanical fatigue cycle damage mechanism and numerical simulation of GH4169 superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(7): 871-883.
- [63] BEMFICA C, NASCIMENTO V, FESSLER E, ARAÚJO J A, CASTRO F. Multiaxial fatigue of Inconel 718 produced by selective laser melting at room and high temperature[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107108.
- [64] ZHANG W T, JIANG R, ZHAO Y, ZHANG L C, ZHANG L, ZHAO L G, SONG Y D. Effects of temperature and microstructure on low cycle fatigue behaviour of a PM Ni-based superalloy: EB-SD assessment and crystal plasticity simulation [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159: 106818.
- [65] LI K S, WANG R Z, YUAN G J, ZHU S P, ZHANG X C, TU S T, MIURA H. A crystal plasticity-based approach for creep-fatigue life prediction and damage evaluation in a nickel-based superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 106031.
- [66] LU X, DUNNE F P, XU Y L. A crystal plasticity investigation of slip system interaction, GND density and stored energy in non-proportional fatigue in nickel-based superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 139: 105782.
- [67] SHAHMARDANI M, HARTMAIER A. Constitutive modeling of cyclic plasticity at elevated temperatures for a nickel-based superalloy[J]. International Journal of Fatigue. 2021, 151: 106353.
- [68] PINEAU A, ANTOLOVICH S D. Probabilistic approaches to fatigue with special emphasis on initiation from inclusions [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93: 422-434.
- [69] YE W Y, HOHL J, MUSHONGERA L T. Prediction of cyclic damage in metallic alloys with crystal plasticity modeling enhanced by machine learning[J]. Materialia, 2022, 22: 101388.
- [70] ZHANG T L, SUN J Y, YUAN H. Cyclic plasticity modeling and fatigue life assessment of the recasting material of a nickel-based superalloy induced by laser manufacturing[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 147: 106154.
- [71] HUANG M S, TONG J, LI Z H. A study of fatigue crack tip characteristics using discrete dislocation dynamics[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 54: 229-246.
- [72] ESMAEILZADEH M, QODS F, ARABI H, SADEGHI B M. Evolution of the texture and microstructure in a nickel based superalloy during thermo-mechanical fatigue(TMF), using a modified integrated model and experimental results [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 191-207.
- [73] DU C Y, CUI H T, ZHANG H J. Creep-thermal fatigue behavior of thin-walled structures with holes and a creep-thermal fatigue-oxidation phase field model[J]. International Journal of Fatigue, 2025, 191: 108696.
- [74] XUE F, CHENG T L, LEI Y K, WEN Y H. Phase-field modeling of crack growth under coupled creep-fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 189: 108577.
- [75] LIU P F, CHEN Z H, XU C, DONG J X, JIANG H. A crystal plasticity phase-field model for microstructure sensitive fatigue crack growth in a superalloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 311: 110526.
- [76] XIE R K, ZHONG X C, QIN S H, ZHANG K S, WANG Y R, WEI D S. Predicting multiaxial fatigue life of FGH96 superalloy based on machine learning models by considering failure process and loading paths[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 175: 107730.
- [77] SSONG L K, BAI G C, FEI C W. Dynamic surrogate modeling approach for probabilistic creep-fatigue life evaluation of turbine disks[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 95: 105439.
- [78] CHEN Z Y, LU X W, XIE W Y, XIONG X J, LIU C L. Design of digital twin system for creep-fatigue life management [A]. 8th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023)[C]. Hangzhou: SPIE, 2023: 137-142.
- [79] YAGCI T, HOSCHLER K, PANNIER S, PITEAU J, SCHÜTTE J F K. A structural health monitoring (SHM) approach using a multidisciplinary digital twin for high-pressure turbine discs in civil aviation [A]. Proceedings IRF 2020 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure[C]. Porto: INEGI-Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2020: 491-502.

(责任编辑:宫文婧)