

文章编号:1673-9469(2026)01-0081-12

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.011

镍基高温合金 GH4065A 的研究现状与发展趋势

王艳辉^{1,2}, 宋锦灏¹, 冯文静², 张欢欢², 李丽^{1,2*}, 王亮³

- (1. 河北工程大学 河北省智能工业装备技术重点实验室, 河北 邯郸 056038;
2. 中航上大高温合金材料股份有限公司 河北省高温合金再生技术重点实验室, 河北 邢台 054800;
3. 河北省国创京津冀科技发展有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘要: 高温合金作为高温关键材料, 不仅体现材料科学与冶金工艺的前沿水平, 也是衡量一个国家航空发动机与燃气轮机制造能力的重要标志。镍基高温合金 GH4065A 通过优化 γ' 相含量与成分设计, 在高温强度、组织稳定性和加工适应性方面表现出优异特性。该文回顾并评述了国内外高温合金的发展历程与现状, 从组织调控、疲劳行为、焊接性能等方面论述了 GH4065A 的研究进展。研究发现, GH4065A 组织与性能受枝晶偏析、 γ' 相演化及再结晶行为等多种因素影响; 合金在 650 °C ~ 750 °C 下具有优异的抗氧化性和热稳定性, 疲劳行为受晶粒尺度、夹杂物与未再结晶组织影响; 双斑电子束焊与惯性摩擦焊可获得高质量接头, 焊后热处理可改善组织均匀性与性能稳定性。目前关于 GH4065A 的研究仍主要集中在实验室尺度, 其在复杂服役条件下的蠕变-疲劳耦合行为及寿命预测模型仍不完善, γ' 相溶解、析出与再结晶的耦合关系缺乏定量化描述。最后提出了未来在多尺度组织调控、复杂环境下服役机制及工程化应用方面的发展方向。

关键词: 高温合金; GH4065A; 组织调控; 疲劳行为; 焊接性能

中图分类号: TG146.15

文献标识码: A

Research Status and Development Trends of Nickel-Based Superalloy GH4065A

WANG Yanhui^{1,2}, SONG Jinhao¹, FENG Wenjing², ZHANG Huanhuan², LI Li^{1,2*}, WANG Liang³

- (1. Key Laboratory of Intelligent Industrial Equipment Technology of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Key Laboratory of Superalloys Recycling Technology of Hebei Province, Zhonghangshangda Superalloys Co., Ltd., Xingtai, Hebei 054800, China; 3. Hebei Guochuang Jingjinji Technology Development Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract: Superalloys, as essential materials for high-temperature service, not only embody the frontier level of materials science and metallurgical processes, but also serve as a crucial indicator of a nation's capability in developing advanced aero-engines and gas turbines. The nickel-based superalloy GH4065A exhibits excellent high-temperature strength, microstructural stability, and processability through optimization of the γ' phase content and compositional design. This paper reviews and evaluates the development and current status of superalloys both domestically and internationally, focusing on the research progress of GH4065A in terms of microstructural control, fatigue behavior, and welding performance. Studies have shown that the microstructure and properties of GH4065A are influenced by multiple factors, including dendrite segregation, γ' phase evolution, and recrystallization behavior. The alloy demonstrates outstanding oxidation resistance and thermal stability at 650~750 °C, while its fatigue behavior is affected by grain size, inclusions, and unrecrystallized structures. Double-spot electron beam welding

收稿日期: 2025-09-29

基金项目: 河北省创新能力提升计划项目(24461001D); 河北省高等学校科学技术研究产学研合作专项(CXY2024040); 河北省自然科学基金资助项目(E2022402107)

第一作者: 王艳辉(1986—), 男, 河北邢台人, 博士, 教授, 从事金属加工成形方面的研究。

* 通信作者: 李丽(1981—), 女, 山东威海人, 博士, 教授, 从事金属加工成形方面的研究。

and inertia friction welding can produce high-quality joints, and post-weld heat treatment can improve microstructural uniformity and performance stability. Currently, research on GH4065A is still primarily at the laboratory scale, and its creep-fatigue coupling behavior under complex service conditions, as well as life prediction models, remain inadequate. Moreover, the coupled relationships among γ' phase dissolution, precipitation, and recrystallization lack quantitative description. Finally, future directions are proposed in the areas of multi-scale microstructural control, service mechanisms under complex environments, and engineering applications.

Key words: superalloy; GH4065A; microstructural control; fatigue behavior; welding performance

高温合金是一类能够在高于 600 °C 的高温环境下长期服役的金属材料,因其具有良好的组织稳定性以及优异的高温强度、抗蠕变性能、抗氧化和抗腐蚀性能,被广泛应用于航空、航天、能源和石化等领域,尤其是应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件,如高压涡轮叶片、燃烧室和导向器等^[1-2]。随着先进航空发动机对工作温度和服役寿命的要求不断提高,研发新一代高温合金已成为航空航天领域的重要研究方向之一^[3]。

根据基体合金元素的不同,高温合金主要分为三类:铁基、镍基和钴基高温合金^[4]。其中,铁基高温合金因成分与不锈钢相近、成本较低,常用于对高温强度要求不太苛刻的部件;钴基高温合金以优异的抗氧化和抗腐蚀性能见长,但其强化机制有限,应用范围受到一定制约。相比之下,镍基高温合金因其独特的 γ/γ' 两相结构,在高温下仍能保持良好的强度和组织稳定性,是应用最广、性能最优的一类高温合金^[5-6]。

对高温合金的研究最早可追溯到 20 世纪 40 年代,美国在航空发动机的研制中迫切需要高温材料以替代传统耐热钢。最早的铁基高温合金在不锈钢基础上发展而来,但因其强化机制有限,使用温度较低,很快便无法满足需求^[7-8]。随后,美国及英国率先研发出镍基和钴基高温合金,通过固溶强化与时效析出强化显著提升了材料的高温性能。20 世纪 50 到 70 年代,镍基高温合金逐渐成为主流,尤其是在涡轮叶片与盘件的应用中展现出优越性能^[9-10]。随着冶金技术的进步,研究者相继提出了晶粒度控制、 γ' 相强化、碳化物弥散分布等组织优化方法,使镍基合金的蠕变寿命和抗疲劳性能显著提高^[11-12]。20 世纪 70 年代末至 80 年代,单晶高温合金的出现标志着涡轮叶片材料的重大突破,美国、英国和法国先后开发了第一代至第四代单晶合金,其工作温度逐步提升至 1 100 °C 以上^[13-14]。目前,第六代单晶合金已进入应用阶段,优化添加了 Re、Ru 等难熔元素,并结合热障涂层技术使发动机涡轮进口温度接

近合金熔点的 90%^[15-16]。

我国对高温合金的研究起步于 20 世纪 50 年代,最初以引进和仿制国外合金为主,早期代表为 GH3030。随后 GH4033、GH4049 等合金相继问世,通过固溶强化与碳化物析出强化提升了高温强度,满足了 600 °C ~ 700 °C 范围内的应用需求^[17-18]。进入 20 世纪 80 年代,我国在高温合金领域逐步形成了完整的研发体系,代表性成果为 GH4169(相当于 Inconel 718),该合金兼具优异的焊接性、疲劳性能和热强性,被广泛用于压气机盘、涡轮盘和紧固件,是应用最广泛的国产镍基变形高温合金之一^[19-20]。21 世纪以来,伴随国家重大专项实施,我国高温合金进入快速发展阶段,为满足大推力航空发动机苛刻服役环境,先后研发出 GH4742、GH4099 等合金,其蠕变寿命和疲劳强度得到显著提升,部分指标接近国际先进水平^[21-22]。粉末高温合金 FGH4095、FGH100 等已应用于涡轮盘制造,大幅提升了发动机的可靠性和服役寿命^[23-24]。近年来,随着新一代航空动力装备的不断发展,我国在新型合金体系与先进工艺领域持续探索,GH4065A 作为近年来研制的镍基高温合金,通过优化 γ' 相含量与尺寸分布,在 750 °C 下蠕变、疲劳及组织稳定性等性能方面显著优于 GH4169。同时,GH4065A 具备良好的热加工适应性和焊接性能,解决了 GH4169 使用温度上限(约 650 °C)难以突破的瓶颈,展现出在 750 °C ~ 800 °C 温度区间应用的巨大潜力,具备可批量化生产的优势,被视为我国未来重点发展的主干变形涡轮盘材料^[25-26]。本文从微观组织调控、疲劳行为、焊接性能等方面论述镍基高温合金 GH4065A 的研究进展,并提出 GH4065A 在工程应用中的发展前景与亟待解决的问题。

1 变形机理与组织调控研究

GH4065A 作为高合金化镍基变形高温合金,成分如表 1 所示。因其复杂的合金化设计体系及

表 1 GH4065A 合金化学成分质量分数 (单位: %)
Tab. 1 Chemical compositions of GH4065A (unit: %)

C	Cr	W	Co	Fe	Ti	Al	Nb	Mo	Ni
≤0.08	18.50~21.00	3.50~5.00	14.00~16.00	≤4.00	3.80~4.30	2.30~2.70	≤0.50	2.00~3.00	余量

高体积分数的 γ' 相,在凝固、热加工及热处理过程中表现出独特的组织演化规律,这些组织特征直接决定了其力学性能和服役可靠性,因此成为近年来的研究热点。赵光普团队^[27]于 2015 年开展的早期研究系统揭示了 GH4065A 组织演化规律与力学性能,研究发现该合金在锻态下由于 γ' 相含量较高表现出不完全动态再结晶特征,再结晶晶粒受大尺寸 γ' 相钉扎作用而难以长大, γ' 相因晶界短路扩散而粗化,未再结晶区则存在大量细小 γ' 相,有效阻碍位错运动并形成亚结构(图 1)。通过合理的热处理可基本消除未再结晶组织。通过比较亚固溶与过固溶处理的差异,发现亚固溶状态下获得的细晶组织(约 8.0 级)表现出优异的强度与持久性能,室温屈服强度超过 1 250 MPa, 650 °C 下屈服强度超过 1 100 MPa, 650 °C/970 MPa 条件下试样持久寿命均超过 200 h,性能接近第二代粉末涡轮盘合金水平。研究表明,合理的

组织控制可在强度与持久性能之间实现平衡,为 GH4065A 在航空发动机涡轮盘中的应用奠定了基础。

后续学者进一步从铸态组织及均匀化工艺入手,探讨了 GH4065A 初始组织特征及其对后续热加工行为的影响。税焱^[28]对 GH4065A 合金的铸态组织及均匀化工艺进行了研究,发现铸态组织中主要存在 γ - γ' 共晶、硼化物及 TiN 相(图 2),且 Nb、Ti、Mo 等元素在枝晶间富集,W 元素则在枝晶干富集,表现出显著偏析特征(图 3)。对 GH4065A 进行均匀化实验,发现在 1 160 °C、保温 10 h 条件下的试样中,枝晶和共晶组织基本消除,Nb、Ti、Mo 的残余偏析指数降至 0.2 左右,W 的残余偏析指数约为 0.4,达到较合理水平。进一步提高温度或延长反而会导致晶粒粗化,对于 $\Phi 508 \text{ mm} \times 1 500 \text{ mm}$ 的大尺寸铸锭,计算表明其在加热过程中需 7.43 h 使中心部位接近设定温度,

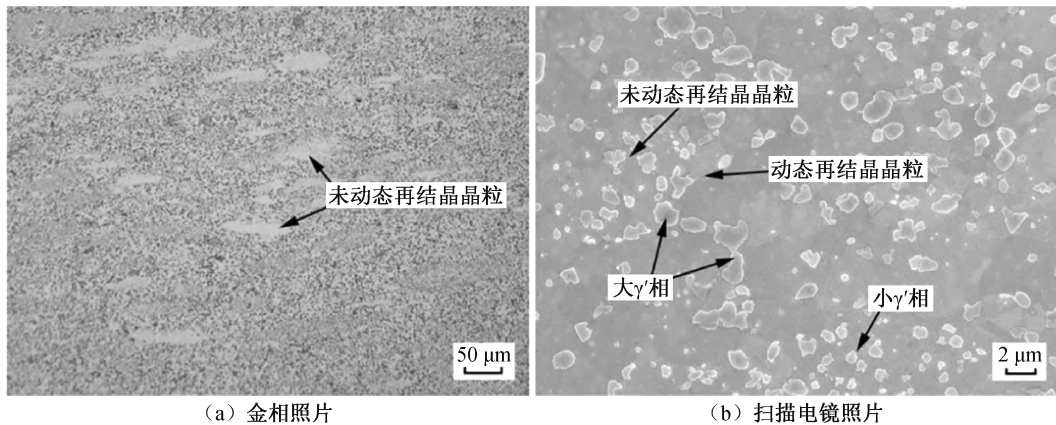


图 1 GH4065A 合金锻件典型的显微组织^[27]

Fig. 1 Typical microstructure of the GH4065A alloy forging^[27]

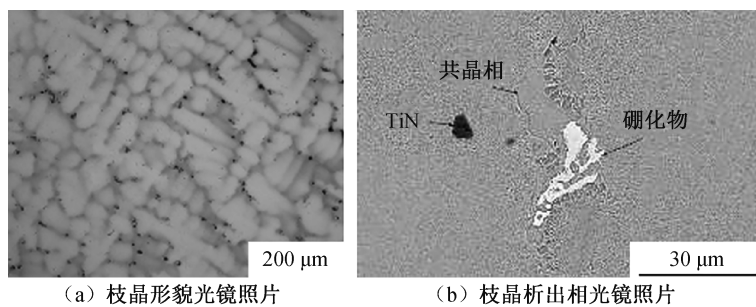


图 2 铸态 GH4065A 枝晶形貌及析出相形貌^[28]

Fig. 2 Morphology of dendrites and precipitated phases in as-cast GH4065A^[28]

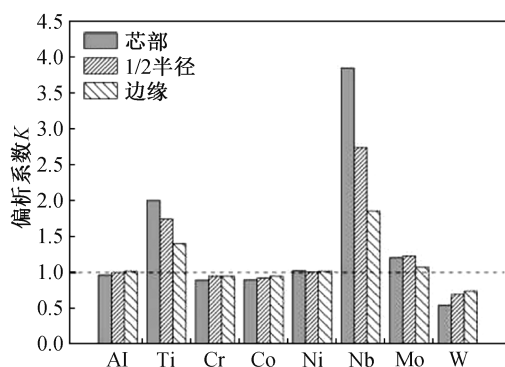


图3 铸态 GH4065A 各元素不同位置偏析系数^[28]
Fig. 3 Segregation coefficients of elements at different positions in as-cast GH4065A^[28]

因此在工程实践中采用 1 160 °C、保温约 20 h 的工艺以兼顾偏析消除与晶粒稳定。除了通过均匀化工艺优化铸态组织,也可通过高压凝固技术改善合金初始组织质量,研究表明^[29],在 2 MPa 的外加压力下进行凝固,缩孔缺陷将大幅减少,组织致密度提高(图 4),Nb 元素偏析明显减轻,同时二次枝晶间距减小,晶粒得到细化。研究发现压力提高了熔点和过冷度,从而增加了相变驱动力,促进新晶形核和组织优化,为优化 GH4065A 初始组织提供了新的思路。

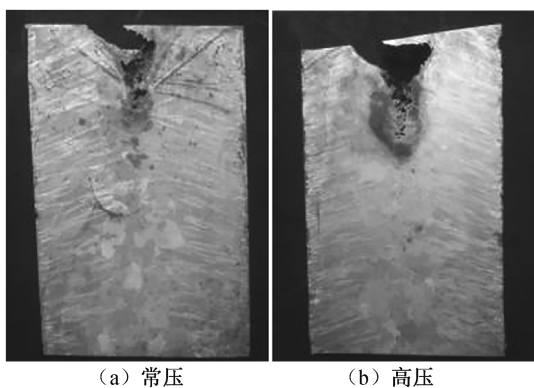


图4 铸态 GH4065A 宏观形貌^[29]

Fig. 4 Macrostructure of as-cast GH4065A^[29]

γ' 相作为合金的关键强化相,其溶解行为会直接影响合金的热变形行为及热处理效果, Ji 等^[30]于 2023 年对 GH4065A 晶粒长大动力学与 γ' 相溶解行为进行了研究,发现在亚固溶温度下,晶粒尺寸随保温时间的延长基本保持稳定, γ' 相逐渐溶解并趋于稳定。而在固溶及超固溶温度(≥ 1110 °C)下, γ' 相迅速溶解并失去对晶界迁移的钉扎作用,晶粒在 60 min 内显著长大(图 5)。研究建立了晶粒长大与 γ' 相溶解的动力学模型,可预测不同热处理条件下的组织演化,指出大尺寸 γ' 相沿晶界

分布时对晶界迁移具有显著阻碍作用,且大尺寸 γ' 相溶解是晶粒快速粗化的根本原因,这一结果为热处理工艺优化和涡轮盘合金的组织精准控制提供了理论依据。

GH4065A 在热变形过程中表现出典型的高强化阻碍效应,税焯团队^[31]对 GH4065A 在多道次压缩过程中的组织演变规律进行了深入研究,发现由于 GH4065A 中 γ' 相含量较高,单道次大变形往往难以在大尺寸铸锭中实现完全再结晶,而通过多道次逐步累积应变则能有效改善组织均匀性。在两道次各 50% 的压缩量下,合金的累计应变量可达到 75%,其组织已接近单道次 70% 压缩量下的完全再结晶状态,晶粒细小且分布均匀,对应的累计真应变大于 1.39,被认为是实现完全再结晶的关键阈值。当单道次变形量不足 50% 时,组织中容易出现未完全再结晶的“项链组织”,或因保温时间过长而导致晶粒粗化,从而破坏组织的均匀性。有限元模拟进一步验证了这一结论,在 $\Phi 508$ mm 大型铸锭的两墩两拔工艺下,坯料中心能够实现完全再结晶,但两端部位的累积等效应变不足以达到 1.39,仍需增加后续火次以获得全面再结晶。合金在低碳设计下缺乏碳化物的晶界钉扎作用,因此更易在热变形过程中发生晶粒长大,同时, γ' 相的析出行为对再结晶组织稳定性有显著影响,若控制不当则会诱发异常晶粒长大。多道次变形工艺的优化需合理分配道次数和单次变形量,结合对 γ' 相析出与溶解过程的调控,以实现细小均匀且稳定的组织结构。

为了更深入理解 GH4065A 高温变形的内在机理, Li 等^[32]于 2024 年系统研究了 GH4065A 镍基高温合金在高温变形过程中的热变形行为与动态再结晶(Dynamic Recrystallization, DRX)机制,发现该合金的流动应力随变形温度升高和应变速率降低而显著下降。在 $\gamma+\gamma'$ 双相区变形时, γ' 相通过钉扎效应抑制再结晶晶粒长大(图 6),同时促进多种 DRX 形核机制,包括以晶界弓出为特征的不连续动态再结晶、亚晶旋转为主的连续动态再结晶、孪晶诱导再结晶以及 γ' 相诱导再结晶。当温度升高至 γ' 相溶解温度(1 114 °C)以上进入单相区时, γ' 相溶解导致其促进形核和钉扎作用减弱,DRX 机制以不连续动态再结晶为主,连续动态再结晶辅助作用下降,孪晶诱导再结晶和 γ' 相诱导再结晶机制基本消失。研究还发现高应变速率下试样绝热温升效应显著,促进了再结晶过程,这些

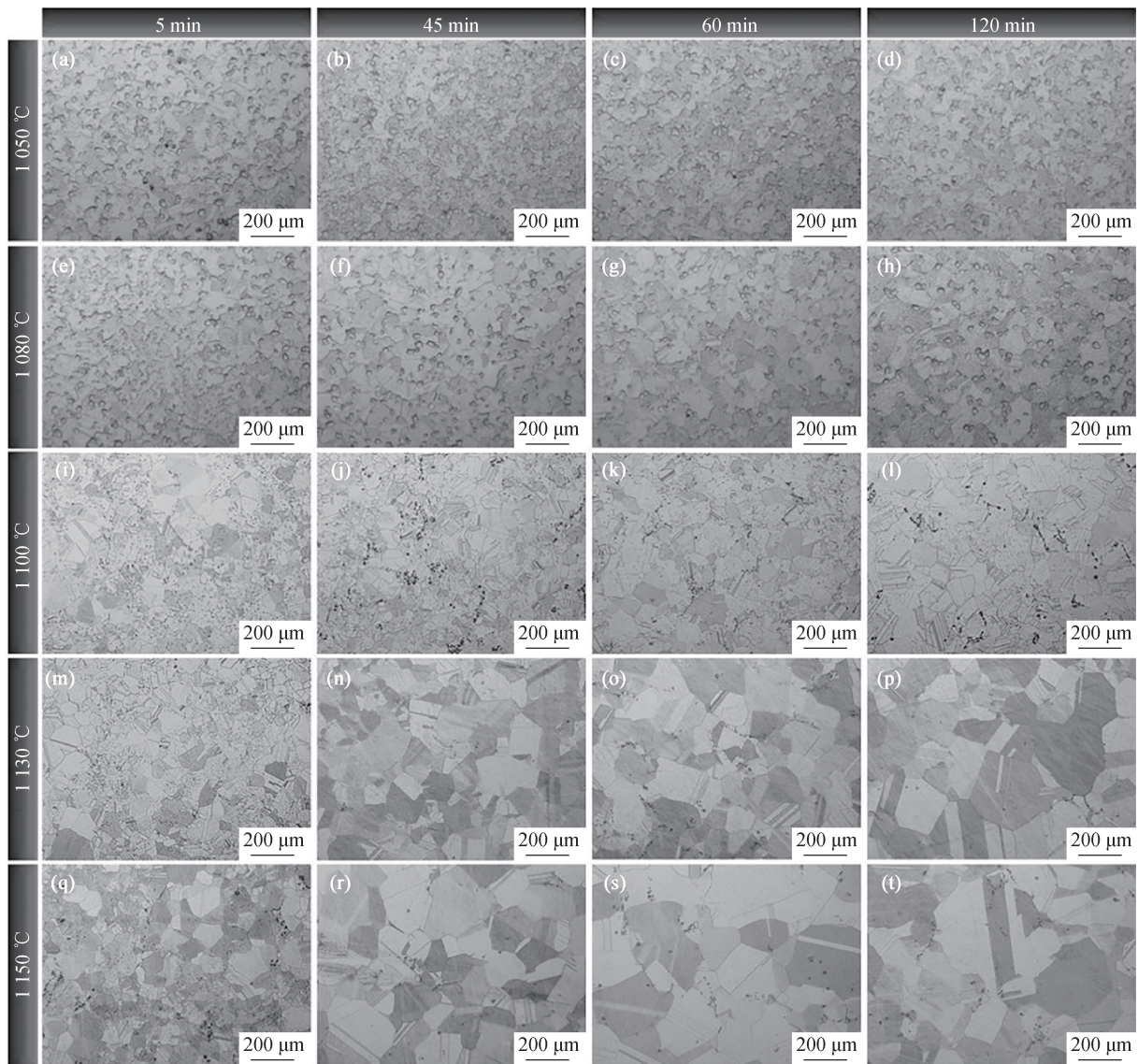


图 5 经过不同热处理制度处理 GH4065A 的晶粒结构金相照片^[30]

Fig. 5 OM micrographs showing grain structure of the GH4065A treated with different heat-treatment regimes^[30]

机制研究为优化 GH4065A 合金热加工工艺提供了重要理论依据。

2 服役性能与失效机理研究

针对 GH4065A 的服役性能,已有研究围绕其高温氧化行为、疲劳断裂机理、长期服役稳定性及工程化成形等方面开展了系统工作,研究内容从早期服役环境适应性分析逐步深化到复杂服役条件下的失效机制与性能优化,形成了较为完整的性能-组织-机制体系。

高温合金须具备优异的抗高温氧化性能以确保其在高温氧化性环境中能够形成稳定、连续且致密的保护性氧化膜,从而有效抑制材料的进一步氧化退化^[33]。黄焯团队^[34]于 2016 年通过 650 °C ~

750 °C 恒温静态氧化实验,结合增重法、扫描电子显微镜、X 射线衍射、电子探针显微分析等手段研究 GH4065A 的氧化行为与机制。研究发现,以平均氧化增重速率为评定标准,合金在该温度范围均为完全抗氧化级别(增重速率 $<0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),抗氧化能力与典型涡轮盘材料 FGH96、GH4720Li 相当;氧化产物呈“内-外双层”结构,内层为富铝氧化物颗粒,外层为富铬氧化膜,700 °C 以上试样表面生成金红石型 TiO_2 (图 7);氧化动力学遵循抛物线规律,受钛离子与铬离子穿过氧化膜的扩散过程共同控制,氧化激活能为 158 kJ/mol。该研究为 GH4065A 在高温氧化环境中的服役稳定性提供了早期理论依据,并为后续高温疲劳及组织稳定性研究奠定了基础。

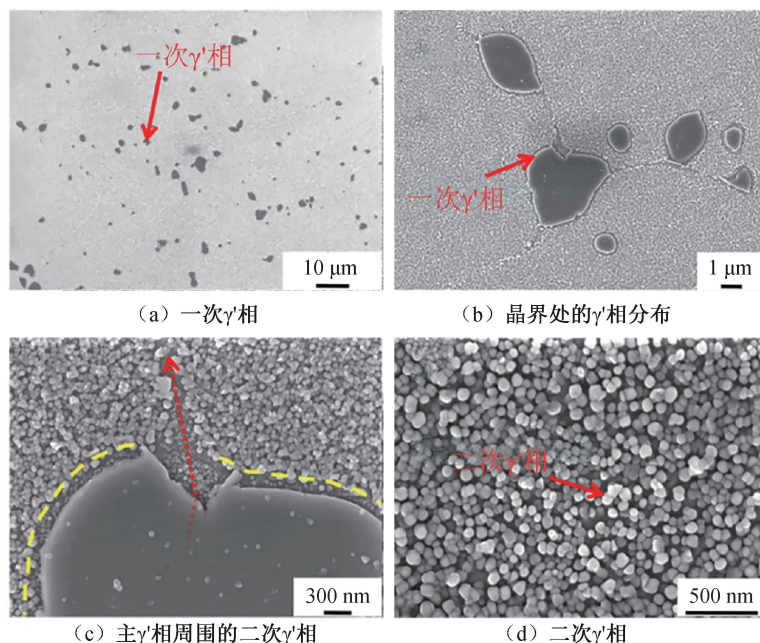


图6 GH4065A合金原始组织样品的 γ' 相扫描电镜图像^[32]

Fig. 6 SEM images of γ' phase in the original microstructural sample of GH4065A alloy^[32]

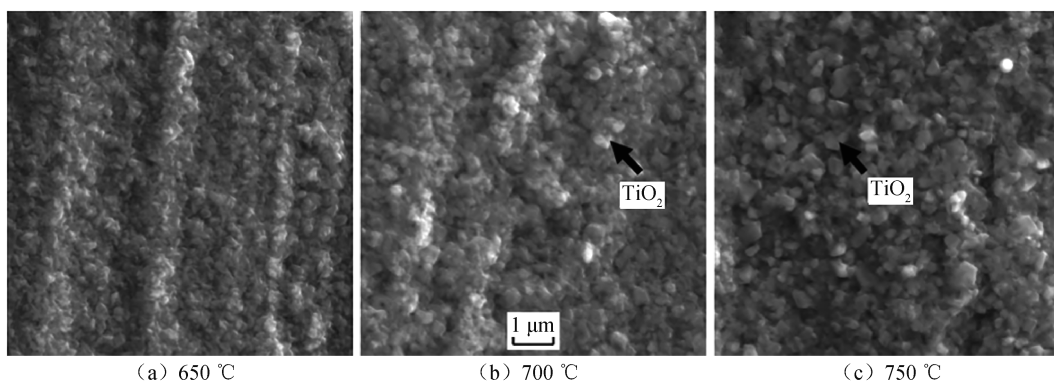


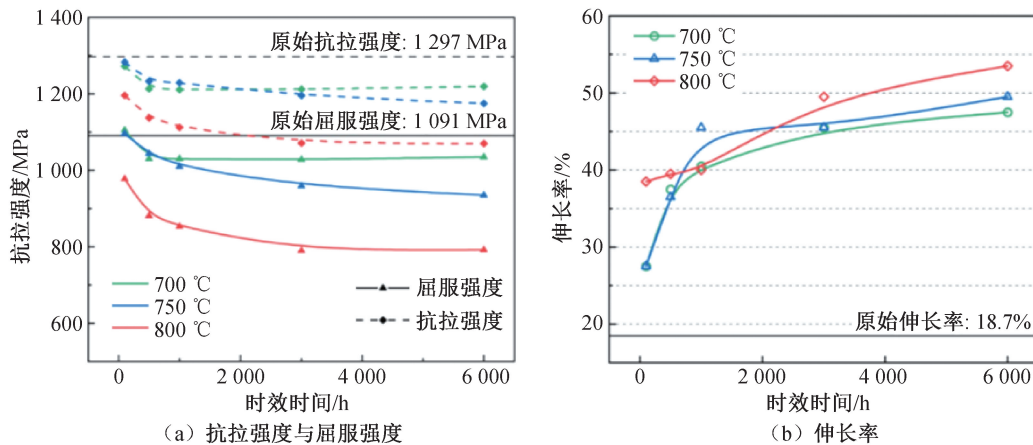
图7 GH4065A合金在不同温度氧化100 h后氧化膜的表面形貌^[34]

Fig. 7 Surface morphologies of oxide scales of GH4065A alloy after oxidation for 100 h at different temperatures^[34]

随着航空发动机服役寿命的不断延长,研究逐渐聚焦于长期时效条件下的组织稳定性及其对力学性能的影响^[35],Bai等^[36]于2023年通过分析合金中温(600℃~800℃)塑性与断裂特征发现,长期时效处理可彻底消除中温脆化,断裂特征从沿晶断裂转为韧窝断裂;W、Mo向晶界扩散偏聚,结合晶界 M_6C 碳化物可提升晶界强度;时效处理后700℃下拉伸强度超1 200 MPa,断后伸长率显著提升,杂质元素S、P晶界浓度无变化,排除其干扰,证实W、Mo扩散与 M_6C 是消除脆化的关键。次年,通过对GH4065A进行700℃~800℃、100~6 000 h长期时效处理,分析GH4065A微观组织与力学性能演变^[37],发现长期时效处理后晶粒与一次 γ' 相较稳定,二次 γ' 相出现粗化现象,晶界析出

富W、Mo的 M_6C 碳化物;700℃时效处理的试样拉伸强度超1 200 MPa,之后随着温度升高,强度下降,变形机制从Orowan弯曲转为基体通道位错滑移;800℃时效、6 000 h后试样断后伸长率达到53.5%(图8),研究发现W、Mo晶界扩散与 M_6C 可以促进塑性变形。该研究揭示了GH4065A在长期服役中的组织演变机制,为合金在复杂服役环境下的性能稳定提供了理论支撑。

在此基础上,研究进一步深入到高温应力环境下的疲劳行为与断裂机理,李林翰等^[38-40]于2024—2025年围绕镍基高温合金GH4065A疲劳相关机制及组织对疲劳性能的影响开展了系统性研究,通过扫描电子显微镜、电子背散射衍射、能量色散X射线谱等显微分析手段,结合不同条件下的

图 8 700 °C 下时效合金的拉伸性能^[37]Fig. 8 Tensile properties of aged alloys at a testing temperature of 700 °C^[37]

疲劳实验,分别研究了高温疲劳断裂机制、熔焊缺陷对疲劳性能的影响及未完全再结晶组织在疲劳断裂中的作用。对于高温疲劳断裂机制,该团队对细晶态(平均晶粒尺寸 8 μm)和粗晶态(平均晶粒尺寸 16 μm)试样开展 400 °C、650 °C 下不同载荷水平的疲劳实验^[38]。研究发现,合金夹杂物主要为氮化物,其中仅尺寸大于细晶试样平均晶粒尺寸的氮化物会成为疲劳断裂源;细晶组织下高应变幅($\geq 0.9\%$)时断裂源为表面氮化物,650 °C 下的试样疲劳寿命低于 400 °C 下的试样,低应变幅($< 0.9\%$)时,650 °C 下试样的疲劳寿命高于 400 °C 下的试样;粗晶组织在 400 °C 下以准解理断裂为主,晶粒增大使夹杂物诱发裂纹概率骤降。在熔焊缺陷对疲劳性能的影响研究中,该团队通过对比无焊点、密排焊点、疏散排布焊点的带中孔薄板试样在低周和低高周复合疲劳下的性能^[39],发现熔焊缺陷主要为未熔合孔洞、凝固裂纹与液化裂纹(图 9),700 °C 下低周疲劳寿命下降幅度为 44%~83%,600 °C~700 °C 下复合疲劳寿命降幅超 85%(图 10);密排焊点试样的低周寿命略低于疏散焊点,但对复合疲劳影响小,且复合疲劳下缺陷会增大沿晶扩展倾向。同时,该团队通过表征未完全再结晶组织,对比了合金均匀细晶组织试样和含有未完全再结晶组织的非均匀组织试样疲劳性能^[40],发现未完全再结晶组织因残留偏析产生,分为未再结晶和部分再结晶两类组织,且两类未完全再结晶组织均密集地析出小尺寸一次 γ' 相(1~2 μm),显微硬度(476 HV)高于完全再结晶区域(454 HV);该组织对疲劳滑移变形的抵抗能力较强,可限制裂纹扩展,疲劳变形主要由完全再结晶组织承担,未完全再结晶组织适量存在时对疲劳性能无显著影响。

GH4065A 工程应用方面的研究成果在合金服役性能验证方面具有重要意义,罗阳团队^[41]对大尺寸 GH4065A 低压涡轮盘锻件成形工艺方案进行分析,结合 DEFORM 数值模拟优化参数并开展生产试制,并对锻件解剖取样检测,发现试制锻件低倍下无缩孔、裂纹等缺陷,高倍下组织为 γ - γ' 双相细晶组织(晶粒度 10 级),400 °C 时抗拉强度超 1 500 MPa,650 °C 时超 1 400 MPa,水浸超声探伤达 AAA 级,满足技术要求。该研究实现了 GH4065A 从实验室机理探索到工程化应用的关键跨越,验证了前期研究成果在实际构件中的可行性,为后续高温构件设计及性能提升提供了重要工程支撑。

3 焊接性能研究

近年来,针对 GH4065A 合金在焊接过程中出现的接头缺陷多、组织稳定性不足等问题,大量研究相继展开并逐步形成了较为完善的技术体系。

在焊接技术方面,GH4065A 相关研究主要涵盖高能束焊、摩擦焊以及塑性连接等方向,研究重点由焊缝缺陷控制逐步转向组织调控与界面性能优化。针对传统单斑电子束焊接易产生裂纹的问题,赵桐等^[42]研究发现,单斑焊接能量集中导致焊缝区 Nb、Ti 元素偏析,形成低熔点 Laves 相,引发横向热裂纹;双斑电子束焊接通过高速偏转线圈形成前后两个束斑,分散能量并降低冷却速度,后侧束斑的重熔作用为气体逸出与液体回流提供时间,最终焊缝满足《高温合金、不锈钢真空电子束焊接质量检验》(HB 7608—1998) I 级标准。时效处理(760 °C/8 h)后,接头 25 °C~750 °C 下强度系数

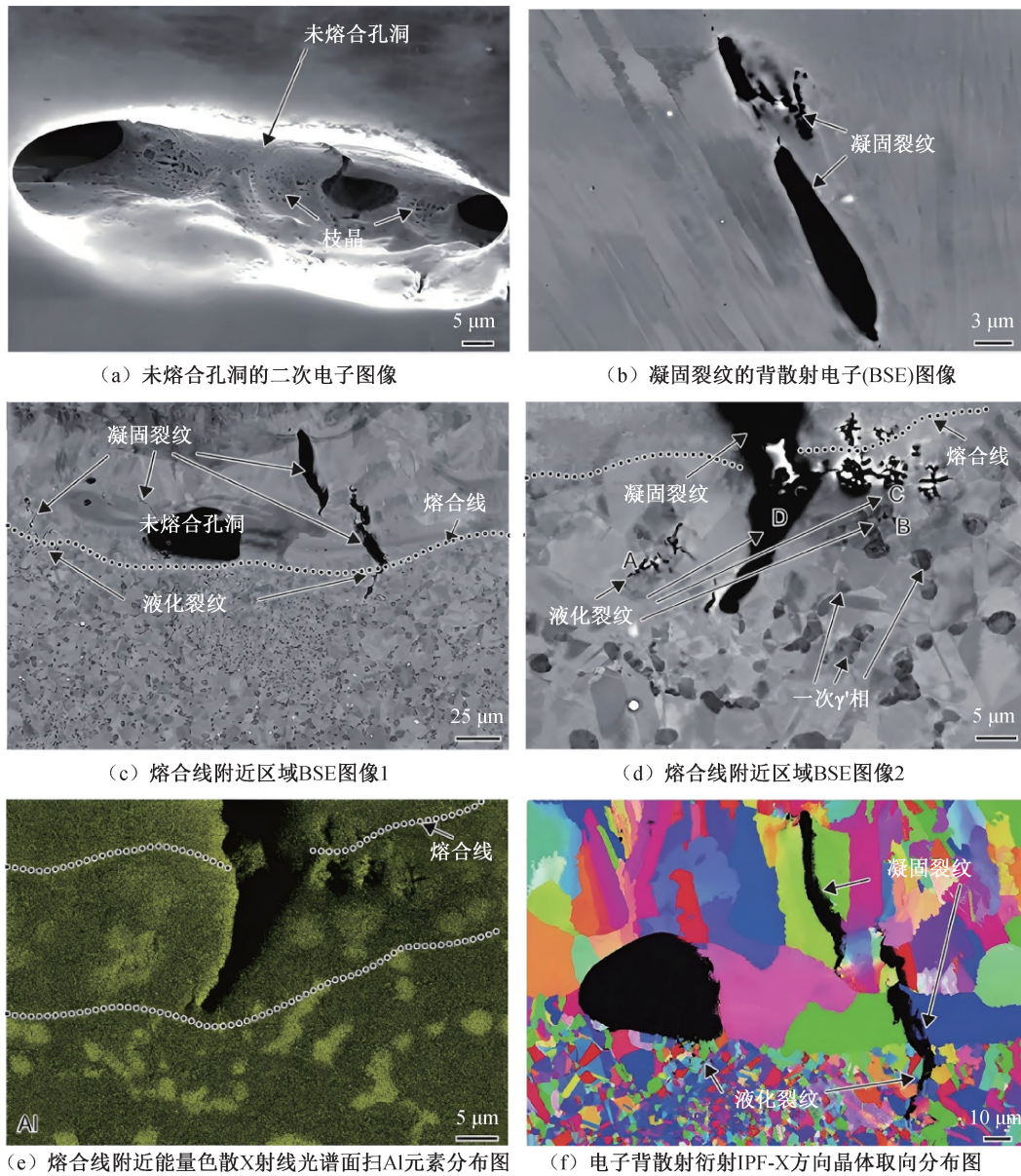


图9 GH4065A 焊点剖面组织上的缺欠组织^[39]

Fig. 9 Defective microstructures in the cross-sectional microstructures of GH4065A weld joint^[39]

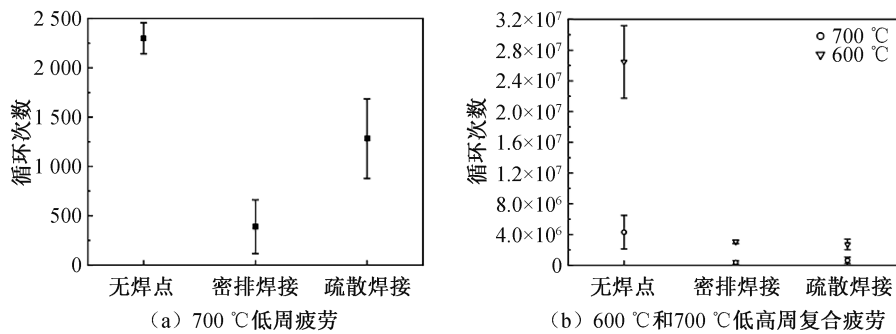


图10 薄板试样低周疲劳和低高周复合疲劳测试断裂循环数^[39]

Fig. 10 Fatigue fracture cycles of thin-plate specimens under lowcycle fatigue and combined low/high-cycle fatigue testing^[39]

超96%,750 °C下延伸率达9%(表2),虽低于母材(Base Metal, BM)的12.6%,但可满足发动机服役需求。

惯性摩擦焊(Inertia Friction Welding, IFW)作为代表性的固相连接技术,其优势在于焊接过程

表 2 不同温度下 GH4065A 合金母材和焊缝的拉伸性能^[42]Tab. 2 Tensile properties of base material and weld joint of GH4065A alloy at different temperatures^[42]

试样	温度 T/°C	拉伸性能				
		抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A/%	断面收缩率 Z/%	强度系数
焊缝	25	1 518	1 195	16.5	31.0	0.98
	650	1 390	1 100	12.0	31.5	0.96
	750	1 170	1 050	9.0	11.0	1.06
母材	25	1 553	1 152	24.0	28.4	—
	650	1 448	1 055	23.6	22.8	—
	750	1 102	1 001	12.6	28.8	—

中母材不熔化,可减少 γ' 相溶解与元素偏析,从而有效保持接头的强化相分布与成分均匀性,提升高温强度与蠕变性能。Wang 等^[43]于 2022 年针对 IFW 接头的微观结构与力学性能展开研究,发现该 IFW 接头主要包含塑性变形区(Plastic Deformation Modified Zone, PDMZ)、热力影响区(Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)、焊核区(Weld Zone, WZ),TMAZ 因高温与扭转变形发生完全动态再结晶 DRX,形成细等轴晶,显微硬度最高;PDMZ 存在 torsional 变形与部分 DRX,硬度次之;WZ 虽完成 DRX 但晶粒粗化,硬度较低。 γ' 相方面,晶界处 γ' 相因扩散激活能低、扩散速率高,与纤维组织内 γ' 相存在尺寸差异;拉伸试验中,随温度升高,断裂位置从母材转移至 WZ,屈服强度从 1 372 MPa 降至 1 085 MPa。2024 年,秦志伟等^[44]研究发现, GH4065A 同质惯性摩擦焊接头分为 WZ、TMAZ 与 PDMZ, WZ 因摩擦热与塑性变形协同作用,发生完全动态再结晶,晶粒尺寸达 10.16 μm , γ' 相完全溶解;TMAZ 温度较低,形成 3.9 μm 的细等轴晶;PDMZ 则保留部分长条状变形晶粒。时效处理(760 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$)可使 WZ 重新析出细小 γ' 相,接头 650 $^{\circ}\text{C}/950\text{ MPa}$ 下蠕变断裂时间从 7.51 h 延长至 147.28 h,断裂位置从 WZ 转移至 BM。同年,李海龙等^[45]进一步构建了 GH4065A 惯性摩擦焊接本构模型,通过 Gleeble-3800 热模拟机在 1 000 $^{\circ}\text{C} \sim 1\,150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、0.01 $\sim 10\text{ s}^{-1}$ 条件下开展热压缩试验,对比 Johnson-Cook 与 Arrhenius 双曲正弦模型发现,Arrhenius 模型考虑了动态再结晶导致的软化效应,预测精度更高,将其应用于有限元仿真中,轴向镦粗量误差仅 5.6%,为焊接工艺参数优化提供了理论支撑。这些研究不仅揭示了 GH4065A 接头的显微组织演化规律,也为工艺参数优化与性能预测提供了理论基础。

塑性连接方面,苏力东等^[46]通过 1 050 $^{\circ}\text{C} \sim 1\,110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、20 $\sim 40\text{ MPa}$ 、20 $\sim 35\text{ min}$ 参数试验发现,

连接温度 1 080 $^{\circ}\text{C}$ 、压力 30 MPa、时间 30 min 为最优工艺,此时界面以晶界弓出形核的非连续性动态再结晶为主,伴随亚晶转动的连续性动态再结晶,再结晶晶粒跨越原始界面生长,实现界面完全愈合,接头组织均匀且变形量适中,避免了高参数下晶粒粗化与低参数下连接不充分的问题。

焊后热处理(Post Weld Heat Treatment, PWHT)是优化 GH4065A 焊接接头性能的关键环节, Cao 等^[47]于 2023 年研究了焊后时效处理对 GH4065A IFW 接头微观结构与高温蠕变性能的影响。研究发现时效处理未显著改变接头各区域(BM、TMAZ、WZ)的晶粒特征与一次 γ' 相,但使 WZ 的三级 γ' 相、BM 的二级 γ' 相尺寸增大,且二者形态与体积分数无明显变化;760 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 时效处理下, WZ 三级 γ' 相从 12.4 nm 长大至 17.6 nm,接头在 650 $^{\circ}\text{C}$ 和 950 MPa 施加应力条件下的蠕变断裂时间从 7.51 h 提升至 147.28 h;但过度时效(760 $^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$)会促使 BM 晶界析出连续 M_{23}C_6 碳化物,同时 BM 二级 γ' 相过度长大,导致 BM 蠕变抗性下降。次年,该团队围绕 GH4065A IFW 接头经不同 PWHT(730 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 、760 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$)后的高温疲劳行为展开研究^[48],发现 TMAZ 晶粒尺寸小于 WZ 与热影响区(Heat-Affected Zone, HAZ),接头处高温低周疲劳失效均发生于 TMAZ-HAZ 边界;PWHT 温度升高会导致接头疲劳性能退化,760 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ PWHT 下接头疲劳寿命较 730 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 时下降超 50%,且存在更显著的循环软化与不均匀疲劳损伤;TMAZ-HAZ 边界区因 IFW 后的晶粒尺寸差异及 PWHT 后的 γ' 相再析出不均匀导致局部强化不均,进而引发不均匀塑性变形与疲劳失效。

4 结论

1) GH4065A 铸态组织偏析严重,通过合理均匀化可消除枝晶偏析,亚固溶处理与多道次累积变形可获得细小均匀组织并实现强度与持久性能

平衡; γ' 相在动态再结晶过程中发挥钉扎作用,不同变形温度与应变速率下存在多种形核机制,为热加工过程优化提供了理论依据。现有研究主要停留在定性分析阶段,对 γ' 相溶解、析出及再结晶的耦合关系缺乏系统的定量模型,难以实现组织演化的精准预测,且工艺优化仍主要依赖于经验与试验。

2)已证实GH4065A在650℃~750℃下具有优异的抗氧化与热稳定性,100~6000h时效中一次 γ' 相稳定存在,晶界碳化物析出及W、Mo偏聚提高了晶界强度;疲劳断裂行为受晶粒尺度、夹杂物及未再结晶组织显著影响。然而,当前对复杂服役环境下的组织演化及蠕变-疲劳协同失效机制研究不足,寿命预测模型仍不完善。

3)双斑电子束焊与惯性摩擦焊可有效抑制偏析与裂纹形成,接头在高温下仍保持较高强度和蠕变寿命;塑性连接实现了界面完全愈合,焊后热处理进一步改善了组织均匀性与性能稳定性。但目前研究多集中于实验室尺度,对缺陷演化及服役寿命影响的系统研究仍然不足。

未来关于GH4065A的研究可从以下几个方面展开:(1)智能化组织调控与工艺优化研究。建立 γ' 相溶解-析出-再结晶的多尺度耦合模型,结合数值模拟与机器学习技术实现热加工工艺的智能优化,提升组织均匀性和性能稳定性。结合真实应变场的大型锻件实验与数值模拟,研究组织演化规律,为热加工工艺的工程化设计提供理论与数据支撑。(2)多场耦合服役机理与寿命预测研究。系统研究GH4065A在高温氧化、腐蚀及蠕变-疲劳交互环境下的组织稳定性与损伤演变机制,构建基于微观机制的寿命预测模型,并结合长期服役实验数据完善可靠性评估体系,为高温构件的设计寿命与失效防控提供科学依据。(3)焊接可靠性优化研究。进一步优化高能束与固相焊接工艺参数,发展动态焊后热处理及残余应力调控技术,建立焊接应力-组织-性能的多尺度耦合模型,完善接头寿命评估与性能预测方法,推动GH4065A在涡轮盘及关键高温构件中的标准化、工程化与长期服役应用。

参考文献:

- [1] GABB T. Advances in superalloys[J]. JOM, 2012, 64(2):239-240.
- [2] SMITH T M, ESSER B D, ANTOLIN N, et al. Phase transformation strengthening of high-temperature superalloys[J]. Nature Communications, 2016, 7:13434.
- [3] 徐超,吴畏,吴勇,等. 镍基高温合金极薄带精密轧制技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2025, 17(7):206-218.
XU C, WU W, WU Y, et al. Research progress on precision rolling technology of nickel based high-temperature alloy ultra-thin strip[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(7):206-218.
- [4] KARACA I, BÜYÜKAKKAS S. Microhardness characterization of Fe-and co-based superalloys[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 2019, 43(3):1311-1319.
- [5] MAKINENI S K, SINGH M P, CHATTOPADHYAY K. Low-density, high-temperature co base superalloys[J]. Annual Review of Materials Research, 2021, 51:187-208.
- [6] GOODFELLOW A J. Strengthening mechanisms in polycrystalline nickel-based superalloys[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(15):1793-1808.
- [7] 文程志,王善林,信纪军,等. IC10镍基单晶高温合金电子束焊接接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(8):132-139.
WEN C Z, WANG S L, XIN J J, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joint of IC10 Ni-based single-crystal superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(8):132-139.
- [8] 荣义,侯为学,王磊,等. P元素含量对GH4738合金高温持久性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(8):2094-2103.
RONG Y, HOU W X, WANG L, et al. Effect of P content on creep rupture property of GH4738 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(8):2094-2103.
- [9] WANG Y J, JIA Z, LU W J, et al. A review of the tribology of nickel-based superalloys[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(16):2400729.
- [10] 鹿超,闵小华,林涛,等. Nb、Ta对镍基高温合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(7):193-198.
LU C, MIN X H, LIN T, et al. Effects of Nb and Ta on microstructure and properties of Ni-based superalloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(7):193-198.
- [11] AI X, SHI L J, LUO F H, et al. Thermomechanical fatigue of nickel-based single-crystal superalloys[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 284:109262.
- [12] IRMAK F, HANEKOM K, TORKAMAN A, et al. A novel yield criterion for nickel-based superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2023, 145(5):051016.
- [13] 李维鹏,罗坤杰,王惠生,等. 沉淀相对镍基718合金高温高压水环境应力腐蚀裂纹萌生行为影响研究

- [J]. 中国腐蚀与防护学报,2025,45(4):947-955.
- LI W P, LUO K J, WANG H S, et al. Effect of precipitation on stress corrosion cracking initiation of nickel based 718 alloy in high temperature and high pressure water[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2025,45(4):947-955.
- [14] KAÑETAS P J P, CALVO J, RODRIGUEZ-CALVILLO P, et al. EBSD study of delta-processed Ni-based superalloy[J]. Metals,2020,10(11):1466.
- [15] VAISAKH BABU S, SETTI D. Grindability of additively manufactured Inconel 718[J]. Journal of Manufacturing Processes,2024,112:238-247.
- [16] CHEN N, ZHENG D, NIU P D, et al. Strength-ductility synergy of additively-manufactured GH3536 superalloys achieved by dual-heterostructures[J]. Journal of Materials Science & Technology,2026,246:140-160.
- [17] WANG J T, ZHANG J B, SHI X, et al. Anodic dissolution behaviors of GH4049 superalloy in NaNO_3 and NaCl solutions and its electrochemical machining for film cooling hole[J]. Chemical Engineering Journal,2025,518:164729.
- [18] MA J Z, LI W G, ZHANG X H, et al. Tensile properties and temperature-dependent yield strength prediction of GH4033 wrought superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A,2016,676:165-172.
- [19] SALEH B, LIU S G, ZHANG L, et al. Wear characteristics of GH4169 superalloy at elevated temperatures[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering,2024,25(1):39.
- [20] ZHOU W, CHEN X H, WANG Y L, et al. Microstructural evolution of wrought-nickel-based superalloy GH4169[J]. Metals,2022,12(11):1936.
- [21] 李振团, 秦鹤勇, 赵光普, 等. GH4742 合金大型轮盘锻件不同部位的组织性能演变[J]. 钢铁研究学报,2025,37(7):950-959.
- LI Z T, QIN H Y, ZHAO G P, et al. Evolution of organization and properties of different parts of GH4742 alloy large wheel forging[J]. Journal of Iron and Steel Research,2025,37(7):950-959.
- [22] QIN H Y, TIAN Q, ZHANG W W, et al. Microstructure evolution of GH4742 Ni-based superalloy during hot forming[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2022,31(7):5652-5667.
- [23] 凌小君, 郑小梅, 夏日, 等. 高温合金 FGH4095 温度和时间依赖的单向加载蠕变本构关系[J]. 力学季刊,2024,45(4):961-969.
- LING X J, ZHENG X M, XIA R, et al. Temperature and time dependent creep constitutive relationship of superalloy FGH4095 under unidirectional loading[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2024,45(4):961-969.
- [24] WANG A M, DAI J J, FU R, et al. GH4096 superalloy high-temperature oxidation and corrosion behaviors[J]. Journal of Materials Research and Technology,2025,36:7818-7831.
- [25] 张北江, 赵光普, 张文云, 等. 高性能涡轮盘材料 GH4065 及其先进制备技术研究[J]. 金属学报,2015,51(10):1227-1234.
- ZHANG B J, ZHAO G P, ZHANG W Y, et al. Investigation of high performance disc alloy GH4065 and associated advanced processing techniques[J]. Acta Metallurgica Sinica,2015,51(10):1227-1234.
- [26] 杜金辉, 赵光普, 邓群, 等. 中国变形高温合金研制进展[J]. 航空材料学报,2016,36(3):27-39.
- DU J H, ZHAO G P, DENG Q, et al. Development of wrought superalloy in China[J]. Journal of Aeronautical Materials,2016,36(3):27-39.
- [27] 赵光普, 黄烁, 张北江, 等. 新一代镍基变形高温合金 GH4065A 的组织控制与力学性能[J]. 钢铁研究学报,2015,27(2):37-44.
- ZHAO G P, HUANG S, ZHANG B J, et al. Microstructure control and mechanical properties of the newest nickel-based wrought superalloy GH4065A[J]. Journal of Iron and Steel Research,2015,27(2):37-44.
- [28] 税焱. 变形高温合金 GH4065A 的铸态组织及均匀化研究[J]. 钢铁钒钛,2021,42(4):131-137.
- SHUI L. Study on as-cast microstructure and homogenization of wrought superalloy GH4065A[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2021,42(4):131-137.
- [29] 李靖, 税焱, 周扬, 等. 高温合金 GH4065A 在高压下凝固的组织研究[J]. 钢铁钒钛,2021,42(5):170-174.
- LI J, SHUI L, ZHOU Y, et al. Study on the microstructure of superalloy GH4065A solidified under high pressure[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2021,42(5):170-174.
- [30] JI Z Y, JIA C L, PAN X Y, et al. Grain growth kinetics and γ' dissolution behavior of a novel disc superalloy GH4065A[J]. JOM,2023,75(12):5884-5892.
- [31] 税焱, 付建辉, 赖宇. GH4065A 镍基高温合金多道次压缩变形组织演变规律[J]. 锻压技术,2023,48(3):244-254.
- SHUI L, FU J H, LAI Y. Microstructure evolution laws of multi-pass compression deformation for nickel-base superalloy GH4065A[J]. Forging & Stamping Technology,2023,48(3):244-254.
- [32] LI J, AN X H, WANG T, et al. Thermal deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of GH4065A alloy considering the effect of γ' phase[J]. Intermetallics,2024,175:108545.

- [33] WU R H,ZHAO Y S,YIN Q,et al. Atomistic simulation studies of Ni-based superalloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*,2021,855:157355.
- [34] 黄烁,张北江,田强,等. 高温合金 GH4065A 的恒温静态氧化行为[J]. *钢铁研究学报*,2016,28(7):55-60.
HUANG S,ZHANG B J,TIAN Q,et al. Isothermal and static oxidation behavior of superalloy GH4065A[J]. *Journal of Iron and Steel Research*,2016,28(7):55-60.
- [35] YANG K,SUN Y H,TAN Z Y,et al. A probabilistic approach for aero-engine component performance margins design[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*,2025:09544100251362520.
- [36] BAI Y B,ZHANG R,CUI C Y,et al. Eliminating embrittlement of GH4065A superalloy at intermediate temperature by a novel grain boundary strengthening mechanism[J]. *Materials Letters*,2023,335:133798.
- [37] BAI Y B,ZHANG R,CUI C Y,et al. Thermal stability of GH4065A superalloy based on microstructural and performance evolution following long-term aging[J]. *Metals and Materials International*,2024,30(2):333-347.
- [38] 李林翰,张继,张文云,等. 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,et al. Fatigue fracture mechanism of Ni-base superalloy GH4065A at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering*,2025,53(1):72-80.
- [39] 李林翰,张继,田成刚,等. 熔焊缺陷对镍基高温合金 GH4065A 疲劳行为的影响[J]. *航空材料学报*,2024,44(4):85-95.
LI L H,ZHANG J,TIAN C G,et al. Effect of welding defects on fatigue behavior of Ni-base superalloy GH4065A[J]. *Journal of Aeronautical Materials*,2024,44(4):85-95.
- [40] 李林翰,张继,张文云,等. GH4065A 高合金化变形高温合金未完全再结晶组织及其对疲劳性能影响[J]. *大型铸锻件*,2024(5):7-10+29.
LI L H,ZHANG J,ZHANG W Y,et al. Effect of incompletely recrystallization on fatigue properties of GH4065A high alloyed wrought superalloy[J]. *Heavy Casting and Forging*,2024(5):7-10+29.
- [41] 罗阳,张文云,陈丽芳,等. 某航空发动机用 GH4065A 合金低压涡轮盘锻件研制[J]. *铝加工*,2022(4):64-68.
LUO Y,ZHANG W Y,CHEN L F,et al. Development of GH4065A alloy low pressure turbine disk forging for an aeroengine[J]. *Aluminium Fabrication*,2022(4):64-68.
- [42] 赵桐,唐振云,刘巧沐,等. GH4065A 合金电子束焊接工艺及接头组织性能[J]. *材料导报*,2020,34(22):22105-22110.
ZHAO T,TANG Z Y,LIU Q M,et al. Electron beam welding process and microstructure and properties of joint of GH4065A alloy[J]. *Materials Review*,2020,34(22):22105-22110.
- [43] WANG Z T,HUANG S,ZHANG W Y,et al. Microstructure characterization and mechanical property of the GH4065A superalloy inertia friction welded joints[J]. *Metals*,2022,12(8):1390.
- [44] 秦志伟,赵强,张露,等. 镍基高温合金 GH4065A 与 IN718 惯性摩擦焊接研究进展[J]. *精密成形工程*,2024,16(10):28-40.
QIN Z W,ZHAO Q,ZHANG L,et al. Research progress on inertial friction welding of nickel-based superalloy GH4065A and IN718[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*,2024,16(10):28-40.
- [45] 李海龙,潘星雨,刘青,等. GH4065A 高温合金惯性摩擦焊接本构模型及热变形行为研究[J]. *精密成形工程*,2024,16(10):1-9.
LI H L,PAN X Y,LIU Q,et al. Constitutive model and thermal deformation behavior of GH4065A superalloy in inertia friction welding[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*,2024,16(10):1-9.
- [46] 苏力东,孟庆琪,宁永权,等. GH4065A 高温合金塑性连接过程中界面组织演变行为[J]. *材料工程*,2025,53(1):99-109.
SU L D,MENG Q Q,NING Y Q,et al. Interfacial microstructure evolution behavior during plastic deformation bonding of GH4065A superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*,2025,53(1):99-109.
- [47] CAO S,LI X G,LIU J T,et al. Effect of post-welding aging treatment on the microstructure and high-temperature properties of inertia friction welded GH4065A joint[J]. *Materials*,2023,16(10):3639.
- [48] LI X G,LIU J T,LIU Q,et al. High-temperature fatigue behavior of inertia friction welded joints of GH4065A Ni-based superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*,2024,37(11):1935-1946.

(责任编辑 唐彦彦)