

低成本镍基单晶高温合金研究进展

朱崇伟^{1,2} 张志鹏^{2,3} 王家健^{1,2} 刘纪德² 李金国²

(1. 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 沈阳 110016; 2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016; 3. 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要 镍基单晶高温合金是航空发动机涡轮叶片的核心材料, 但高 Re 含量导致其成本高昂。以“成分-工艺-组织-性能”为主线, 对低成本镍基单晶高温合金的研究进展进行综述。合金分为二代改良型、无 Re 创新型和多代跨域型, 通过 W、Mo、Ta 等元素协同替代 Re 实现强化。拉伸性能呈中温峰值、高温衰减特征; 蠕变性能受沉淀强化、固溶强化、错配度及扩散系数调控; 抗氧化性能依赖 Al、Cr、Ta 形成保护层, 且氧化与疲劳存在耦合效应。展望了机器学习、多尺度模拟等新兴方法, 旨在为低成本高性能单晶高温合金的研发提供参考。

关键词 镍基单晶高温合金; 蠕变性能; 成分设计; 抗氧化性

中图分类号 G353.11; TG132.3⁺2; TG146.1⁺5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20260009

Research Progress in Low-cost Nickel-based Single Crystal Superalloys

ZHU Chongwei^{1,2}, ZHANG Zhipeng^{2,3}, WANG Jiajian^{1,2}, LIU Jide², LI Jinguo²

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016; 2. Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 3. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: Nickel-based single crystal superalloys are key materials for turbine blades in aero-engines, while high Re content leads to prohibitive costs. The research progress in low-cost nickel-based single crystal superalloys was reviewed centred on "composition-process-microstructure-property". Alloys are divided into second-generation modified types, Re-free innovative type and multi-generation cross-domain type, which achieve strengthening through the synergistic replacement of Re by W, Mo and Ta. Tensile properties are characterized by medium-temperature peak and high-temperature attenuation. Creep properties are regulated by precipitation strengthening, solid solution strengthening, lattice mismatch and diffusion coefficient. Oxidation resistance relies on the protective layer formed by Al, Cr and Ta, and a coupling effect is generated between oxidation and fatigue. Finally, emerging methods such as machine learning and multi-scale simulation were prospected, aiming to provide theoretical references for research and development of low-cost and high-performance single crystal superalloy.

Key Words: Ni-based Single Crystal Superalloy, Creep Properties, Composition Design, Oxidation Resistance

镍基单晶高温合金作为航空发动机、地面燃气轮机高端装备热端部件(如单晶涡轮叶片、导向叶片)的关键材料,其承温能力直接决定发动机的推力、效率与服役可靠性^[1]。自 20 世纪 70 年代美国普惠公司研发出第 1 代无 Re 单晶合金 PWA1480 以来,单晶合金已发展至第 4 代,其代次划分的主要依据是 Re 及后续 Ru 元素含量。第 1 代单晶合金不含 Re;第 2 代单晶合金的

Re 含量约为 3%(典型范围为 2.5%~3.5%,质量分数,下同),如 CMSX-4、PWA1484 等^[2];第 3 代单晶合金的 Re 含量进一步提高至约 6%(典型范围为 5.5%~6.5%),如 CMSX-10、René N6 等^[3];第 4 代单晶合金在 6%Re 基础上额外添加约 3%Ru(典型范围为 8.5%~9.5%),如 TMS-138、RR3010 等,Ru 的加入可抑制 TCP 相析出、优化 γ/γ' 组织稳定性^[4]。近年来,国内外

收稿日期:2026-05-11;修订日期:2026-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52571054)

第一作者:朱崇伟,男,1985 年出生,高级工程师,E-mail: cwzhu22b@imr.ac.cn

通信作者:刘纪德,男,1978 年出生,正高级工程师,E-mail: jdlou@imr.ac.cn

李金国,男,1975 年出生,研究员,E-mail: jgli@imr.ac.cn

引用格式:朱崇伟,张志鹏,王家健,等. 低成本镍基单晶高温合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(10): 1 441-1 451.

ZHU C W, ZHANG Z P, WANG J J, et al. Research progress in low-cost nickel-based single crystal superalloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1 441-1 451.

研究者已报道了更新一代单晶合金的研发进展^[5],其特征为 Re 与 Ru 的协同添加,Re 含量通常控制在 4%~6.5%,Ru 含量提高至 4%~6%。通过进一步优化合金元素的配比与热处理工艺,获得更优异的高温蠕变性能和组织稳定性。Re 的引入通过三重机制显著提升合金蠕变性能:①Re 原子在 γ 基体中强烈偏聚,在位错周围形成稳定的 Cottrell 气团。由于 Re 原子半径显著大于 Ni 原子,产生的晶格畸变能高,对位错运动形成强钉扎作用,显著提高固溶强化效果^[6]。②Re 在 γ -Ni 中的互扩散系数极低,显著降低合金的有效扩散系数。高温蠕变中,位错攀移受扩散控制,Re 的添加有效抑制攀移过程,降低稳态蠕变速率,延长蠕变寿命^[7]。③Re 偏聚于 γ 相,增大其晶格常数,增大 γ/γ' 错配度绝对值。高温下形成更致密的界面位错网,有效阻碍位错切过 γ' 相及在 γ 通道中的运动,位错网间距与错配度绝对值成反比,界面强化效果随 Re 含量增加而增强^[8]。

随着航空发动机涡轮进口温度的不断提高,现代先进航空发动机的涡轮进口温度已突破 1 600 °C,这一温度的实现是单晶叶片材料、热障涂层与复杂气冷结构设计三者协同作用的结果。单晶高温合金本身的承温能力通常在 1 100 °C 左右,远低于 1 600 °C 的燃气温度,必须依靠热障涂层的隔热效果以及叶片内部复杂冷却通道的设计,以保证叶片在严苛的工况下安全服役。在此背景下,高代次(第 3 代及以上)单晶合金的应用需求日益迫切,其通过添加 Re、Ru 等难熔元素获得了更优异的高温蠕变性能和组织稳定性,能够更好地承受叶片内部残留的热应力与离心应力。然而,Re 元素的稀缺性与昂贵的价格成为制约其推广的关键瓶颈。随着单晶高温合金使用温度的不断提升,合金中 Re、W、Mo、Ta 等难熔元素的总含量呈逐步上升趋势^[9]。郑运荣等^[10]基于中国市场原材料成本建立的估算模型显示,Re 占单晶合金原材料成本的 60% 以上,且价格波动剧烈(2020~2025 年涨幅超 66.7%),导致第 3 代合金成本是第 1 代的 3~4 倍。在能源领域,燃气轮机叶片的服役周期长达数万小时,对合金的长期稳定性提出了极为严苛的要求。传统高 Re 合金虽能满足这一要求,但其高昂的成本严重制约了其在能源装备中的大规模应用。因此,研发低成本单晶高温合金不仅能降低初始材料成本,还通过优化成分设计,使合金在降低 Re 含量的同时保持优异的长期组织稳定性,从而满足长时间服役周期的可靠性需求,实现经济性与耐久性的协同。

近年来,国内外研究者围绕降低 Re 含量和改善低 Re 含量合金的力学性能开展了系统性研究,形成了 3 类典型的低成本合金研发路径:①第 2 代合金改良型,

在典型 2 代合金 CMSX-4、Rene N5 等合金的成分基础上,通过提高 W、Mo(γ 相固溶强化元素)与 Ta、Nb(γ' 相强化元素)含量补偿 Re 的缺失,如国产 DD6(含 2% 的 Re)、美国 CMSX-8(含 1.5% 的 Re)、美国 Rene N515 和 Rene N500 等,合金原材料成本较原型合金降低了 20%~30%^[11-12]。②无 Re 创新型,突破传统 Re 依赖路径,通过多元素协同设计优化微观结构,如德国 ERBO/15(无 Re、高 Ti+高 Mo)、美国 CMSX-7(无 Re、高 W+高 Ta),在 1 093 °C/124 MPa 下蠕变寿命达 CMSX-4 的 90% 以上^[13]。③多代跨域型,将 3 代/4 代合金的强化理念融入低成本设计,如英国 ABD-1(含 1.6% 的 Re,基于 Alloys-by-Design 方法)、国产低 Re 合金(在 1 100 °C 高温下的蠕变性能接近第 3 代合金 TMS-75 的 80%)^[14-15]。

本综述以“成分-工艺-组织-性能”为核心逻辑主线,系统梳理低 Re/无 Re 低成本镍基单晶高温合金的研究进展。首先归纳合金的成分体系与分类,阐明不同代次合金中元素的调控机制与替代策略。通过对比中高温蠕变、抗氧化等关键性能,结合 γ/γ' 结构、错配度等微观参量,揭示其性能主导因素与强化机理。在此基础上,分析当前研究面临的主要挑战,并对未来发展方向进行展望,以期为该领域的高效、系统化研发提供参考。

1 低成本单晶高温合金成分设计与调控

1.1 低成本合金的分类与成分特征

镍基单晶高温合金的成分设计本质是通过典型合金元素含量的精确调控,实现 γ/γ' 双相组织的协同强化。 γ 相是基体,具有面心立方结构, γ' 相 $[\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta})]$,有序 L_{12} 结构]为强化相,通过共格沉淀强化提高合金的强度。而 Re、W、Mo、Co、Ta 和 Cr 等典型合金化元素分别起到强化 γ 相、 γ' 相、两相界面或抗氧化腐蚀等方面的作用,尤其是 Re 元素可以显著提升单晶高温合金的蠕变性能,被视为镍基单晶高温合金的标志性强化元素。但 Re 元素昂贵的原材料价格和战略稀缺性,导致对其过度的依赖会产生极大的风险。目前,低成本单晶高温合金的主要研究目标是在降低 Re 含量的同时,通过其他元素的协同作用维持甚至提升单晶高温合金的强化效果^[16],其成分演变呈现降 Re 和控制有害相析出的路径。

第 1 代单晶高温合金(如美国 PWA1480、英国 SRR99、法国 AM3、中国 DD8 等)均不含 Re,主要依赖 Al、Ti 形成 γ' 相(体积分数约 60%)实现沉淀强化,并通过加入 W、Mo 等元素实现 γ 相的固溶强化^[17]。这类

合金的高温强度性能可满足早期发动机服役需求,但与更高代次的单晶合金相比,高温蠕变性能有限,且抗热腐蚀能力较弱^[18]。局限性源于两方面:一是 γ 相固溶强化程度低,难以抵御高温下位错的快速运动;二是 γ' 相稳定性不足,高温下易发生定向筏化,导致强化效果衰减。随着Re元素独特强化效果的发现,相继研发出了含3%Re的第2代单晶合金和含Re量更高的第3代单晶^[19]。低成本单晶合金研制主要针对的是目前应用最为广泛的第2代单晶合金。二代改良型低成本单晶合金是以典型的第2代单晶合金成分为基础,通过降Re元素+提高W、Mo、Ta、Al等元素含量的策略实现成本降低与性能补偿,这类低成本合金也是当前应用

最成熟的低成本合金体系,代表性合金为美国GE公司研发的Rene N515合金^[20]。无Re创新型合金突破降Re思路,通过多元素协同设计重构 γ/γ' 强化体系,调控Al、Ta、Ti含量实现 γ' 相沉淀强化效果的有效提升,通过Co、W、Mo等元素含量的优化以获得更佳固溶强化效果,同时通过Hf、B、C等微量元素实现小角度晶界的强化,代表合金为ERBO/15、CMSX-7、DD98等^[21]。多代跨域型合金融合了高代次合金的强化理念与低成本需求,基于大数据计算筛选设计了低Re含量的二代单晶高温合金,代表合金包括ABD-1等^[22]。表1为国内外主流体系低成本合金的名义成分、关键性能及适用场景,并与二代合金CMSX-4进行对比。

表1 低成本单晶高温合金对比^[23]Tab.1 Comparison of low-cost single crystal superalloys^[23]

合金体系	$w(\text{Re})/\%$	成本对比(相对CMSX-4, %)	关键强化元素含量/%	适用工况
DD6(中国)	2.0	70~75	$w(\text{W})=8.0, w(\text{Mo})=2.0, w(\text{Ta})=7.5$	中高温(760~1 093 ℃)
CMSX-7(美国)	0	60~65	$w(\text{W})=9.0, w(\text{Ta})=9.0, w(\text{Ti})=0.8$	中温高应力(760~980 ℃)
CMSX-8(美国)	1.5	65~70	$w(\text{W})=8.0, w(\text{Ta})=8.0, w(\text{Cr})=5.4$	中高温通用
ERBO/15(德国)	0	55~60	$w(\text{W})=7.9, w(\text{Mo})=4.2, w(\text{Ti})=3.3$	高温低应力($\geq 1\ 000$ ℃)
ABD-1(英国)	1.6	70~75	$w(\text{W})=8.5, w(\text{Cr})=8.0, w(\text{Ta})=8.5$	中温高应力(760~980 ℃)
Rene N515(美国)	1.5	75~80	$w(\text{Mo})=6.3, w(\text{Mo})=2.0, w(\text{Ta})=6.5$	中高温(760~1 093 ℃)

1.2 关键合金元素的作用机制

低成本合金的成分设计核心是通过元素协同作用替代Re的强化效果。W、Mo倾向于在 γ 相中富集,通过增大晶格畸变提升固溶强化程度,且成本仅为Re的1/5~1/3,但过高含量会导致TCP相析出,其中Mo协同W提升 γ 相强度^[24]。Ta、Nb、Ti是 γ' 相的形成元素,优先固溶于 γ' 相,通过提高 γ' 相反相畴界能增强抗位错切割能力^[25],Ti也可促进W、Mo在 γ 相中的偏聚^[26]。Nb作为 γ' 特征形成元素,是当前非典型低成本单晶的重要调控组元,区别于传统W-Mo替代路线。LENG F等^[27]通过对比0.5%的Nb与1.0%的Nb低Re(3.6%Re)三代合金发现,Nb提升 γ' 相中Al、Ta溶质分配系数,提高 γ' 反相畴界能;1.0%的Nb可将 γ' 体积分数由62.3%提升至66.2%,优化 γ/γ' 晶格错配,同时促进Re、Mo在 γ 基体富集,双重强化基体与析出相,成为除W/Ti外新型低成本设计思路,但Nb过量易诱发Laves脆性相析出、恶化抗氧化性能,工业控制 $w(\text{Nb})\leq 1.0\%$ 是主流设计阈值。Hf、Zr、Y等微量元素(通常 $\leq 0.5\%$),对合金的界面稳定性、抗氧化性能具有关键调控作用,是补齐低成本合金“性能短板”的重要手段。有研究表明,联合添加Hf和B可显著抑制晶界不连续析出团簇,提升大角度晶界耐受性;单独添加Hf或B对晶界强化效果有限,二者协同作用可大幅提升宽温域

蠕变寿命^[28]。在PtAl涂层中掺杂Zr表现出优异的抗氧化性,因为Zr增强了氧化层的致密性^[29]。Y是典型的抗氧化元素,可改变氧化膜生长机制,适量Y可抑制原子扩散、降低 γ/γ' 晶格错配应力,细化筏化组织,提升蠕变寿命^[30]。N、S、P、O等有害元素虽含量极低(通常为 10^{-6} 级),但对合金的高温性能与组织稳定性危害显著,需严格控制^[31]。S会偏聚于 γ/γ' 界面,降低界面结合力,同时抑制 Al_2O_3 连续氧化膜的形成,加速合金内氮化与硫化物析出^[31-32]。P易在 γ' 相、 γ/γ' 界面析出,形成 Ni_3P 等脆性相,导致合金高温塑性下降。P含量需控制在 5×10^{-6} 以下,否则会使合金在1 100 ℃时的伸长率从15%降至8%以下^[34]。O会与Al、Ti形成 Al_2O_3 、 TiO_2 等夹杂物,成为疲劳裂纹源^[35]。

1.3 低成本合金的设计策略

依托固溶强化、扩散阻滞、晶格错配三重补偿机制,以W、Mo、Ta、Ti复合添加弥补降Re带来的性能损失,是当前低成本单晶主流设计思路。

(1)固溶强化补偿 Re凭借极高的固溶系数实现 γ 基体强化,降Re后通过提升W、Mo添加量弥补强度缺口^[36]。W、Mo固溶强化系数低于Re,但DD6、CMSX-7等合金通过提高W(8.0%~9.0%)、Mo(2.0%)配比,配合Ti促进W/Mo在 γ 相富集,进一步放大固溶效果,ERBO/15是该设计的典型合金^[37]。

(2) 扩散行为补偿 Re 极低的原子扩散系数可阻碍位错攀移; W、Mo 扩散系数偏高, 但搭配 Ta、Ti 可改变元素在两相间分配比例, 降低基体有效扩散速率, 实现高温变形抗力补偿^[40-41]。

(3) 晶格错配补偿 Re 可提高 γ 晶格尺寸、增大错配绝对值, 促进致密界面位错网生成; 利用高 Vegard 系数的 W、Mo 扩张 γ 晶格, 辅以 Ti、Ta 微调 γ' 晶格参数, 精准调控 γ/γ' 错配度, 保障界面强化效果。

基于三重补偿思路, 依据服役温度、载荷差异灵活调配元素配比, 在削减 Re 用量前提下平衡蠕变、拉伸与抗氧化性能, 为低成本合金工业化成分开发提供理论支撑。

2 低成本单晶高温合金的力学性能

2.1 力学性能的温度依赖规律

低成本镍基单晶高温合金的力学性能呈典型的温度依赖性。该类合金普遍表现出中温区强度升高的反常屈服特征, 屈服强度峰值出现在 760 °C 左右, 见图 1。含 1.5% Re 的第 2 代低成本合金在此温度下屈服强度超 1 000 MPa, 无 Re 型合金峰值可提升至 1 292 MPa^[32-33]。当温度升高至 1 100 °C 时, 由于热激活效应增强, 合金屈服强度普遍降至峰值的 40% 以下。

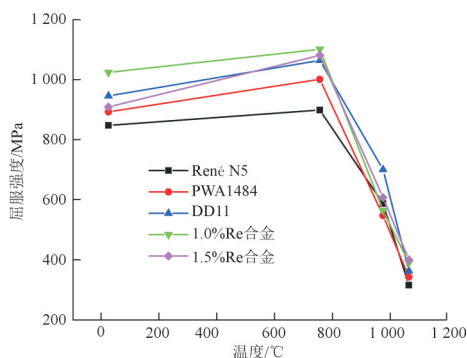


图1 低成本合金与其他商用二代单晶高温合金的屈服强度对比

Fig.1 Yield strength comparison between low-cost alloys and other commercial second-generation single crystal superalloys

成分调控对力学性能的影响具有双向性, W、Mo 作为 Re 替代元素, 需控制 W 含量为 7%~9%、Mo 含量为 2%~4% 以避免 TCP 相析出或 γ 相强化不足; C 元素在中温可通过 MC 碳化物提升塑性, 但在高温下会消耗 Ta、W 等关键元素, 加剧应力集中。此外, 低成本合金因 Re 缺失易出现强度-塑性失衡, 需通过优化 γ' 相尺寸、调控碳化物形态、提高小角度晶界强度等方式实现力学性能的协同提升。当前研究往往通过“试验测试-微观表征-模拟验证”的技术路径对单晶高温合金力

学性能进行研究。ZHOU Z R 等^[8]通过对比 1.0% 的 Re 与 1.5% 的 Re 合金, 发现两种合金均在 760 °C 达到屈服强度峰值, 呈现典型的中温反常屈服行为, 其中 1.0% 的 Re 合金屈服强度 (1 099 MPa) 略高于 1.5% 的 Re 合金 (1 086 MPa), 而 1.5% 的 Re 合金在 980 °C 与 1 070 °C 的高温屈服强度上更具优势。进一步研究表明, Re 含量升高可促进 γ/γ' 界面形成更规整、更致密的位错网络, 同时抑制堆垛层错过度扩展, 使高温变形机制更稳定, 而适当降低 Re、提高 W 含量 (如 1.0% 的 Re 合金), 则可通过促进 L-C 锁形成, 进一步提升中温屈服强度。LENG F 等^[41]通过分子动力学模拟证实 760 °C 屈服点处位错密度最高, 从理论层面为中温反常屈服现象提供了依据。

2.2 不同温度拉伸变形与断裂机制特征

低成本镍基单晶高温合金的拉伸变形机制与断裂机制具有显著的温度依赖性, 核心受 γ/γ' 相结构演变、位错运动方式及元素扩散行为调控。室温到 600 °C 变形以 γ 基体中位错滑移为主导, γ' 相作为刚性第二相阻碍位错运动。 γ 基体中全位错沿 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 滑移系启动, 因低温下热激活能不足, 位错难以穿越 γ' 相, 多在 γ/γ' 界面处塞积, 形成致密位错环。部分合金中会出现 γ' 相内堆垛层错局部扩展, 缓解应力集中, 提升合金塑性。此温度区间内, Re、W 等固溶元素的原子氛围阻碍位错滑移, 低成本合金因 Re 含量降低, 位错运动阻力略小于传统高 Re 合金, 屈服强度相对较低但塑性更优^[40]。断裂机制以脆性剪切断裂为主, 断裂面平行于 $\{111\}$ 滑移面。低温下位错塞积难以通过塑性变形释放, 导致 γ/γ' 界面产生应力集中, 进而引发沿界面的剪切裂纹萌生与扩展^[42]。600~900 °C 呈现典型反常屈服特征, 变形机制趋于复杂。 γ 基体中全位错分解为不全位错, 在 γ' 相内形成堆垛层错, 并与超位错发生交滑移。LÜ P S 等^[43]借助 TEM, 发现此温度区间内 L-C 锁与 K-W 锁的形成是中温高强度的主要原因, 这些位错锁组态有效钉扎位错运动, 大幅提升屈服强度。部分合金在 900 °C 左右出现双屈服现象, 第一屈服源于 γ/γ' 界面位错解锁, 第二屈服与 γ' 相内位错增殖相关。值得注意的是, 当中温下位错以堆垛层错方式切过 γ' 相时, 层错在 γ' 相内部扩展并与 γ/γ' 界面发生交互作用, 导致界面结合力下降, 进而引发 γ' 相与基体的局部剥离^[44]。此处所指的相粒子即 γ' 相 (Ni_3Al), 其是镍基高温合金中最核心、最常见的强化相, 也是该温度区间内位错运动的主要障碍。此温度区间内, Ti、Ta 等元素的偏聚进一步增强 γ' 相反相畴界面能, 强化抗位错切割能力, 低

成本合金通过优化 W、Mo 与 Ta 含量配比,可实现中温区强度与传统高 Re 合金持平^[41]。断裂模式从剪切断裂向微孔聚集型断裂过渡,部分合金呈现混合断裂特征。在 900~1 100 °C 下,热激活效应显著,变形机制由中温区的位错滑移与切割转向位错攀移主导。由于热激活能充足,基体位错可通过攀移绕过 γ' 相,而非切割穿过,从而降低变形阻力。同时, γ' 相自身发生热激活软化,其有序结构的长程有序度降低,抗位错切割能力下降,进一步促进变形。 γ/γ' 界面结合力随温度升高而减弱,界面处位错网的阻碍作用降低,位错更易穿越相界面进入 γ' 相。上述机制共同作用,使合金呈现明显的应变软化特征,屈服强度随温度升高而持续下降^[45]。断裂机制以微孔聚集型韧性断裂为主导,断口布满均匀分布的韧窝。高温下 γ' 相软化与元素扩散促进微孔形核、长大与聚合;微孔多在 γ/γ' 界面、 γ 通道内或第二相粒子附近形核,随应力增加不断长大并相互连通,最终导致断裂^[8]。

3 低成本单晶高温合金的蠕变性能

蠕变性能是衡量低成本镍基单晶高温合金能否满足航空发动机涡轮叶片服役需求的核心指标,其服役场景可根据应力-温度耦合特征分为中温高应力(760~980 °C,对应叶片叶根、榫头部位)与高温低应力($\geq 1\,000$ °C,对应叶片叶尖、前缘部位)两类^[46]。当前研究围绕“降 Re 不减蠕变寿命”的核心目标,通过对比低成本二代合金与典型二代合金的蠕变行为,揭示了 γ/γ' 双相结构调控对蠕变性能的主导作用,形成了以“固溶强化-错配度-扩散系数”为核心的性能调控体系。

3.1 低成本单晶合金的蠕变性能

以国产 DD6 合金为代表 [$w(\text{Re})=2\%$, $w(\text{W})=8\%$, $w(\text{Ta})=7.5\%$],通过提高 W(γ 相固溶强化)与 Ta(γ' 相强化)含量补偿 Re 的强化作用,其蠕变寿命与国外 CMSX-4^[47]相当。该类合金通过 γ/γ' 双相协同强化,可满足航空发动机高压涡轮叶片服役需求。GAO Y T 等^[48]对无 Re 单晶合金在 980 °C、163~248 MPa 下蠕变性能的研究表明,应力从 248 MPa 降至 163 MPa 时,蠕变寿命从 173 h 延长至 1 950 h(提升了 10 倍),最小蠕变速率从 $1.2 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 降至 $8 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,且稳态蠕变阶段持续时间从 20 h 延长至 1 000 h,这说明无 Re 合金在低应力下具有优异的抗蠕变潜力,但高应力下蠕变性能略有衰减,见图 2。CMSX-8 [$w(\text{Re})=1.5\%$],CMSX-7(无 Re)与 ABD-1 [$w(\text{Re})=1.6\%$] 等合金的蠕变性能也大致呈现中温持平、高温略低的趋势。其中 CMSX-8 在 760 °C $\times$ 760 MPa 中温高应力条件下,蠕变寿命与

CMSX-4 接近(约 250 h),但 1 100 °C $\times$ 137 MPa 高温低应力下蠕变寿命仅为 CMSX-4 的 75%^[49]。ERBO/15 合金不含 Re, $w(\text{Ti})=3.3\%$ 和 $w(\text{Mo})=4.2\%$,其高温低应力性能突出,在 1 100 °C $\times$ 124 MPa 下蠕变寿命与 CMSX-4 接近,但中温高应力性能显著不足,760 °C $\times$ 840 MPa 下寿命仅为 CMSX-4 的 40%^[50]。这源于其高 Ti 含量设计:Ti 虽能促进 W 和 Mo 在 γ 相中的分配倾向,最终增大了 γ 相的固溶强化程度,但 Ti 在 γ' 相的固溶强化系数远小于 Ta,导致中温下 γ' 相易被位错切过,加速蠕变断裂^[51]。

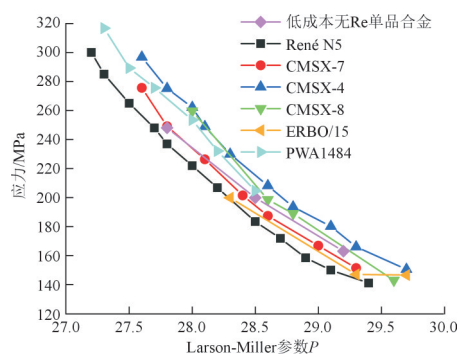


图2 不同镍基单晶高温合金的 Larson-Miller 曲线^[48]

Fig.2 Larson-Miller curves of Ni-based single-crystal superalloys^[48]

3.2 蠕变性能的主控因素

基于热力学计算与试验验证,低成本二代单晶合金的蠕变性能由沉淀强化、固溶强化、 γ/γ' 错配度及有效扩散系数共同调控,但中高温区间的主控因素存在显著差异^[52]。在高温低应力蠕变($\geq 1\,000$ °C)条件下,主控因素为 γ 相固溶强化程度与 γ/γ' 错配度。 γ 相固溶强化通过 Re、W、Mo 等元素的偏聚实现,这些元素在 γ 相中的固溶强化系数极高,可显著阻碍高温下的位错攀移^[53]。ERBO/15 合金虽无 Re,但通过高 Mo(4.2%)与 Ti 诱导 W 偏聚,其固溶强化效应达 347.6 MPa,高于 CMSX-4 的 297.7 MPa,从而保证了高温蠕变性能^[21]。同时,更大的 γ/γ' 错配度绝对值可减小高温蠕变中 γ/γ' 界面位错网间距。MURAKUMO T 等^[56]、GUAN Q Y 等^[57]研究发现,对于具有负 γ/γ' 错配度的单晶高温合金,通过降低 γ/γ' 错配度可提高合金在 1 100 °C 下的蠕变性能。在中温高应力蠕变(760~980 °C)条件下,主控因素为 γ' 相固溶强化程度。中温下合金难以形成稳定的 γ/γ' 界面位错网, γ' 相作为有序金属间化合物 [$\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ta})$],其强度远高于 γ 相(无序固溶体)。固溶强化由 Ta、Nb 等元素主导,其固溶强化系数远高于 Ti^[58-59]。

在中温高应力(760~980 °C)条件下,主控因素为

γ' 相固溶强化,堆垛层错、L-C 锁、K-W 锁以及变形微孪晶是调控中温蠕变抗力的关键亚结构因素^[57]。中温区间热激活能不足以驱动位错攀移,位错以滑移、切过 γ' 为主要变形方式,Ta、Nb 固溶提升 γ' 本征强度,从本源提高抗剪切能力。与此同时,受施密特因子与晶体取向调控,不同取向试样滑移系开动差异显著:[011]取向易多系滑移交互、大量全位错分解生成贯通型连续堆垛层错,层错缺少有效阻碍作用,易造成裂纹快速扩展;而[111]取向 $\langle 112 \rangle \{111\}$ 滑移系开动临界切应力更高,难以生成连续层错,转而在 γ' 内析出弥散微孪晶,微孪晶钉扎位错滑移、产生显著的加工硬化,大幅提升中温蠕变寿命^[57]。Re、W、Ta 通过调控层错能,改变层错与微孪晶的生成数量,成为低成本合金成分优化重要依据。JIANG H R 等^[58]依托 760 °C 不同应力蠕变试验进一步证实,外加应力大小可直接改变滑移系开动特征与层错、L-C 锁演化规律,800 MPa 较低应力下多滑移系同步激活,层错相交生成大量稳定 L-C 锁,蠕变抗力优异;随应力升高至 900 和 1 000 MPa,变形逐步转为单滑移系主导,定向连续堆垛层错大量增多、原有 L-C 锁发生解离,位错剪切阻力明显下降,蠕变寿命由 200 h 骤降至 30 h。ERBO/15 合金因高 Ti 低 Ta 设计, γ' 固溶强化偏弱,同时 Ti 升高层错能,难以形成致密位错锁,且无法通过析出微孪晶实现二次强化,多重因素叠加导致中温蠕变性能仅为 CMSX-4 的 40%。

在高温低应力($\geq 1\,000\text{ °C}$)蠕变条件下,合金中会形成致密的 γ/γ' 界面位错网,该位错网能有效阻碍位错运动,其间距取决于 γ/γ' 错配度绝对值,而与 γ' 相自身的强度关系较小^[23]。此时,位错运动以攀移为主,因此 γ 相的固溶强化程度(通过 Re、W、Mo 等元素实现)和有效扩散系数成为主控因素。以无 Re 合金 ERBO/15 为例,其通过高 Mo 和 Ti 诱导 W 在 γ 相中偏聚,获得了高达 347.6 MPa 的 γ 相固溶强化程度,虽不含 Re,仍实

现了与 CMSX-4 相当的高温蠕变性能。在高温低应力服役条件下,长期热暴露劣化同样是影响低成本单晶蠕变寿命的重要因素。课题组前期研究表明,第 2 代低 Re 单晶合金随时效温度升高、保温时间延长, γ' 按 Ostwald 机制粗化,高温下富 W、Mo、Re 的 TCP 脆性相逐步析出,二者共同弱化析出强化^[59]。DU J G 等^[60]针对含 3.0% Re 的第 3 代合金研究发现,1 050 °C 长期时效使 γ' 由 0.31 μm 粗化至 0.71 μm , γ 通道加宽、界面位错构型转变,最终高温蠕变寿命显著下降。因此低成本成分设计需合理调配难熔元素,抑制 γ' 粗化与 TCP 析出,改善长期蠕变稳定性。

3.3 不同类型低成本合金蠕变行为的对比分析

表 2 为典型低成本镍基单晶高温合金的蠕变性能。对比可知,低成本合金的蠕变性能呈现出显著的“工况敏感性”,这源于其差异化的强化路径设计。以 CMSX-7 为代表的无 Re 合金,通过高 Ta 和高 W 含量确保了 γ' 相具有较高的体积分数与反相畴界能,使其在中温高应力条件下表现出优异的抗蠕变能力,甚至优于部分降 Re 合金。然而,此类合金在高温低应力工况下,由于 γ 基体固溶强化相对不足,位错攀移速率加快,蠕变性能衰减明显。与之形成鲜明对比的是 ERBO/15 合金,该合金虽完全不含 Re,但通过高 Mo 含量以及 Ti 诱导 W 在 γ 相中偏聚的设计,构建了极强的 γ 基体固溶强化效果。使其在 1 100 °C 的高温环境下仍能有效阻碍位错攀移,蠕变寿命接近二代商用合金 CMSX-4。但这种设计在一定程度上降低了中温性能,因为 Ti 对 γ' 相的强化效率低于 Ta,导致中温下位错易于切割 γ' 相,从而加速蠕变断裂。DD6、CMSX-8 等二代改良型合金则通过保留少量 Re 并结合 W、Ta 的协同提升,试图在 γ' 相强化与 γ 相固溶强化两种机制间取得平衡,呈现出较为均衡的“中高温通用”特性,这也是其目前工程应用最为广泛的原因。

表 2 典型低成本镍基单晶高温合金的蠕变性能对比^[11-12, 50, 61-64]

Tab.2 Creep property comparison of typical low-cost Ni-based single crystal superalloys^[11-12, 50, 61-64]

合金体系	$w(\text{Re})/\%$	合金类型	中温高应力蠕变 (760~980 °C)	高温低应力蠕变 ($\geq 1\,000\text{ °C}$)	典型蠕变性能
DD6(中国)	2.0	二代改良型	高(与 CMSX-4 相当)	中高	760 °C×750 MPa:寿命约 150 h;980 °C×200 MPa:寿命>200 h
CMSX-7(美国)	0	二代改良型	高(760 °C×760 MPa 下约 250 h)	中(1 100 °C 下为 CMSX-4 的 75%)	982 °C×248 MPa:蠕变寿命与 CMSX-4 相当
CMSX-8(美国)	1.5	无 Re 创新型	高	中高	760 °C×760 MPa:寿命约 250 h;1 100 °C×137 MPa:寿命为 CMSX-4 的 75%
ERBO/15(德国)	0	无 Re 创新型	低(760 °C 下为 CMSX-4 的 40%)	高(1 100 °C 下接近 CMSX-4)	760 °C×840 MPa:寿命为 CMSX-4 的 40%;1 100 °C×124 MPa:寿命接近 CMSX-4
ABD-1(英国)	1.6	多代跨域型	高	中高	800 °C×500 MPa:蠕变寿命优于 CMSX-4;1 038 °C×159 MPa:蠕变寿命与 René N5 相当

4 低成本单晶高温合金的抗氧化性能

4.1 高温氧化层的形成机制与结构演变

高温服役过程中,低成本镍基单晶的基体化学成分与微观偏析共同主导氧化膜生成规律,Al、Cr为构建保护性氧化层的核心元素,W、Mo、Ta、Ti、Hf等难熔与稀土元素参与氧化反应,生成多元复合氧化物,显著改变氧化层分层结构、致密度与界面结合状态^[65]。常规配比下,Al优先发生选择性氧化生成致密 α - Al_2O_3 ,Cr协同形成 Cr_2O_3 ,二者复合构成内层防护基体,有效阻滞氧向内扩散^[66]。通过调控Al、Cr配比可改变氧化相变进程,低温易生成亚稳态 θ - Al_2O_3 ,随温度升高逐步向热力学稳定 α - Al_2O_3 转变,提升防护层连续性^[67]。

W、Mo、Ta等难熔元素对氧化行为呈双面作用,Mo高温极易生成挥发性 MoO_3 ,挥发过程在氧化层内部形成孔隙缺陷,破坏氧化膜完整性;W、Ta氧化生成 NiWO_4 、 $(\text{Ni},\text{Co})\text{Ta}_2\text{O}_6$ 、 CrTaO_4 等复合尖晶石氧化物,该类产物与基体热膨胀系数差异显著,在热循环载荷下易诱发氧化层开裂剥落,是低成本合金(降Re、增W、Mo)高温抗循环氧化劣于传统高Re合金的关键诱因^[68]。Ti氧化生成 TiO_2 ,多富集在氧化中间层,与Ni、Al结合生成多元尖晶石,增厚氧化过渡区,加速氧渗透^[69]。Hf、Y等稀土元素偏聚于氧化膜/基体界面,细化 Al_2O_3 晶粒尺寸、降低界面空洞生成概率,大幅提升氧化层粘附性能,抑制高温服役起皮失效。受元素偏析影响,铸态合金枝晶干富集W、Cr,枝晶间富集Al、Ta,致使局部氧化速率不均,枝晶区易生成大量NiO、Cr系尖晶石,枝晶间区域更易形成连续 Al_2O_3 层,经均匀化热处理消除元素偏析后,氧化层厚度均匀性明显提升,氧化增重可降低35%以上^[70]。整体上低成本合金氧化呈典型多层结构:外层以 $(\text{Ni},\text{Co})\text{O}$ 、 NiCr_2O_4 等非保护性尖晶石为主,中间层混杂 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 CrTaO_4 ,内层为致密 Al_2O_3 防护层,氧化层下方伴随Al匮乏型 γ' 耗竭区,耗竭区深度由Al向外扩散速率与各元素交互扩散行为共同决定^[71-72]。

针对低成本合金基体本身的高温氧化行为研究,成为突破“降本-性能-寿命”协同瓶颈的关键。YUN D W等^[73]通过“试验设计-人工神经网络”对Ni-Co-Cr-Al-W-Mo-Ta-Re-Ru体系的量化研究,进一步建立了元素含量与抗氧化性能的定量关联模型,量化W、Mo、Ta等难熔组分的负面氧化贡献,为低成本合金成分精准优化提供数据支撑。PEI H Q等^[68]对比DD6与高Re单晶,发现DD6因Re降低、W和Mo含量提升,难熔复合氧化物占比偏高,热循环中氧化裂纹萌生风险更大。HU Y

B等^[71]提出 γ' 耗竭区溶质分布差异改变元素扩散通道,直接调控氧化动力学速率。GUO H Y等^[9]针对第3代低成本合金的1100~1200℃等温氧化试验证实,氧化遵循阶段性扩散机制:低温阶段以Ni、Cr优先氧化为主,高温随Al扩散能力提升逐步转变为Al主导选择性氧化,随温度升高Mo、W氧化含量提升,非保护性氧化物增多,氧化动力学显著加快,见图3。

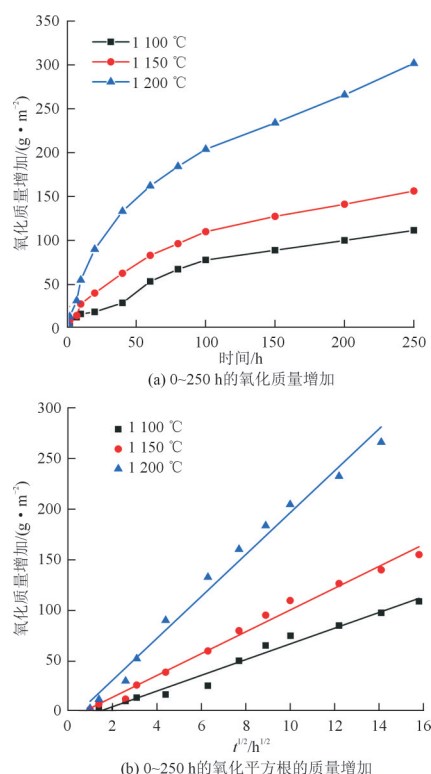


图3 低成本第3代镍基单晶高温合金的氧化动力学曲线^[9]
Fig.3 Oxidation kinetics curves of low-cost third-generation Ni-based single crystal superalloys^[9]

4.2 氧化与疲劳的耦合作用机制

在航空发动机涡轮叶片的实际服役环境中,高温氧化与低周疲劳(LCF)、热疲劳并非独立作用,而是通过“氧化诱导裂纹萌生、疲劳加速氧化损伤”的双向耦合效应,显著加速材料失效。针对低成本单晶合金在复合载荷下的行为,近期研究揭示了具体的耦合机理与量化特征。LI Y M等^[74]针对含3%的Re的低成本单晶高温合金在800~1000℃、0.6%~0.9%应变振幅下的低周疲劳-氧化耦合行为进行研究,揭示了氧化层性质对裂纹萌生与扩展的决定性作用。高温下,合金表面形成的外部脆性 $(\text{Ni},\text{Co})\text{O}$ 层及含 $\text{Ni}(\text{W},\text{Mo})\text{O}_4$ 、 $(\text{Ni},\text{Co})\text{Ta}_2\text{O}_6$ 的混合氧化物层,是疲劳裂纹的核心萌生源。这类氧化物的断裂韧性($K_{\text{IC}} \approx 1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)远低于基体($K_{\text{IC}} \approx 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$),在循环应力作用下易率先开裂并诱发基体裂纹,导致1000℃下的LCF寿命较

800℃缩短了60%。然而,(Ni,Co)O层的优先剥落具有正向调控效应。当应变振幅较高(如0.9%)时,剧烈的位错运动可剥离表面脆弱的氧化层,暴露下方高韧度的(Ni,Co)Al₂O₃-Cr₂O₃混合层,使裂纹萌生时间延长30%。在裂纹扩展阶段,氧化与疲劳呈现协同加速,这是由于循环应力促使氧原子沿裂纹快速渗透, γ' 耗竭层增厚,使氧化层内裂纹扩展速率提升了40%;另一方面,裂纹尖端处的氧化产物(如 α -Al₂O₃)虽可形成“氧化诱导闭合”效应延缓扩展,但氧化导致的 γ/γ' 界面脆化最终主导了失效路径^[67]。GUO H Y等^[75]针对该类合金的热疲劳行为研究,明确了温度循环与氧化损伤的正反馈机制。热循环过程中,氧化层(α -Al₂O₃)与基体的热膨胀失配引发周期性热应力,导致氧化层产生横向楔形裂纹。1100℃下500次热循环后,裂纹密度较静态氧化增加3倍,直接破坏了氧化膜的完整性。氧化层开裂后,氧气在裂纹尖端的快速富集诱导了(Ni,Co)Ta₂O₆等脆性相的形成,显著增大了裂纹尖端应力集中系数(从2.5增至4.0)。结果表明,1100℃下含氧化损伤的合金热疲劳裂纹扩展速率是无氧化损伤合金的2.3倍。该研究进一步量化了加热时间与温度的耦合效应。1100℃下单次加热8min的试样,因裂纹尖端氧化充分形成钝化层(曲率半径从0.6μm增至1.7μm),局部应力集中降低,其热疲劳寿命较加热4min的试样延长了40%^[75]。

5 研究存在的挑战

5.1 性能与成本平衡难题

在研发低成本镍基单晶高温合金时,如何在降低成本的同时维持合金性能,是目前面临的最大挑战之一。当减少Re、Ru等昂贵且对性能提升关键元素含量时,合金的高温强度、蠕变性能等通常会受到一定程度的影响。虽然通过调整其他元素配比和改进制备工艺在一定程度上可补偿性能损失,但实现性能与成本的平衡仍十分困难。降低Re含量后,即使增加了Al、Ta等元素,合金的高温蠕变性能与含高Re量的传统合金相比,仍可能存在一定差距,而要进一步提高性能则可能需要添加其他相对昂贵的元素或采用更为复杂且成本较高的制备工艺,这又与降低成本的目标相矛盾。因此,需要深入研究合金成分、微观结构与性能之间的关系,开发更为精准的合金设计模型和制备工艺优化方法,以实现性能与成本的最佳平衡。

5.2 工艺性协同设计

单晶高温合金的工程化应用不仅取决于力学性

能,还受到工艺性的制约,主要包括铸造工艺性、热处理工艺窗口、机加工工艺性、涂层兼容性 & 焊接工艺性等方面。铸造工艺性涉及单晶选晶成功率、杂晶与雀斑缺陷控制,高熔点难熔元素的添加会显著影响凝固行为与缺陷敏感性;热处理工艺窗口指固溶温度范围与时效敏感性,成分调整可能导致窗口收窄,对控温精度提出更高要求;机加工工艺性体现为切削性、磨削性及表面完整性,高固溶强化元素含量会增加加工难度;涂层兼容性涉及合金与防护涂层的界面结合力、互扩散行为及热膨胀系数匹配,成分变化可能影响涂层服役寿命;焊接工艺性则关注焊接裂纹敏感性 & 热影响区组织演变。上述工艺性短板若未在合金设计初期予以考量,将极大限制其工程应用范围。因此,低成本单晶高温合金的研发必须构建“成分-工艺-组织-性能-工艺性”的协同设计理念,在追求性能提升的同时确保全流程可制造性。

5.3 新型合金体系开发困难

寻找全新的低成本镍基单晶高温合金体系面临诸多困难。一方面,现有的合金设计理论和经验在指导新型低成本合金体系开发时存在一定局限性。传统的合金设计主要围绕提高性能展开,对于成本因素的综合考虑相对不足。在开发新型合金体系时,需要在保证高温性能的基础上,充分考虑成本因素,这需要对合金元素的作用机制、元素之间的相互作用以及合金的微观结构演变有更深入的理解,而目前相关研究还不够完善。另一方面,新型合金体系的开发需要大量的试验探索和数据积累。从合金成分的初步设计、试样制备到性能测试,每个环节都需要耗费大量的时间和资源。由于合金体系的复杂性,结果往往具有较大的不确定性,这增加了新型合金体系开发的难度和成本。此外,新型合金体系还需要考虑与现有制备工艺和应用场景的兼容性,进一步加大了开发的难度。

5.4 新兴研究方法 & 未来方向

近年来,机器学习与多尺度模拟的交叉融合为低成本镍基单晶高温合金的高效研发提供了新思路。在机器学习辅助合金设计方面,HUANG Y Y等^[76]通过融合物理冶金模型与CALPHAD计算,将合金成分与服役条件转化为8项关键微观特征参数,构建可解释型蠕变寿命预测模型,模型决定系数 $R^2=0.945$,预测精度优于传统经验模型;借助SHAP权重分析量化各组织参量对蠕变性能的贡献规律,为低Re合金精准成分调控提供量化依据。在多尺度模拟与主动学习结合领域,SUN L G等^[77]耦合分子动力学与BP神经网络算法,依托少量试验数据完成主动采样,精准预判超细孪

晶诱发的强度反常软化行为,完善孪晶强化理论,为优化中温蠕变抗力、定向设计微观组织提供理论支撑。上述智能化研究手段可大幅削减传统试验试错频次,降低研发成本,未来有望搭建“成分-微观结构-高温性能”全链条智能设计体系,进一步推动低Re低成本单晶高温合金的工程落地。

6 结 论

(1)低成本单晶合金划分为二代改良型、无Re创新型、多代跨域型三大体系,通过调控W、Mo实现 γ 基体固溶强化、Ta、Nb、Ti优化 γ' 析出强化,搭配Hf、B、Y微量合金化改善界面与抗氧化性能,在削减Re用量的前提下,原材料成本较CMSX-4下降了20%~45%,形成成熟的Re替代三元补偿设计准则。

(2)低成本单晶合金力学性能普遍存在760℃中温反常屈服特征,低温变形以 γ 内位错界面塞积为主,中温依靠堆垛层错与L-C锁产生加工硬化、强度峰值突出,高温热激活加剧位错攀移与 γ' 软化,合金强度持续回落,元素配比调控层错能是强塑性协同优化关键。

(3)低成本单晶合金蠕变性能具有显著工况依赖性,CMSX-7、ABD-1等中温高应力性能优异,ERBO/15凭借高Mo-Ti设计适配高温低应力服役,国产DD6实现中高温性能均衡,中温蠕变由 γ' 相强度、层错与位错组态主导,高温蠕变受控于 γ 相固溶强化与 γ/γ' 错配度。

(4)低成本单晶合金依靠Al、Cr形成致密 α -Al₂O₃防护层保障抗氧化性,过量W、Mo、Ti易生成尖晶石与挥发性氧化物,劣化氧化膜完整性。服役中氧化-疲劳耦合损伤突出,表层脆性氧化物诱发裂纹萌生,氧渗入形成 γ' 贫铝耗竭区加速断裂,微量Hf、Y可改善氧化膜结合力。现有合金易出现TCP相析出与 γ' 粗化问题,后续可借助机器学习、多尺度模拟等技术优化成分,推进产业化应用。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y C, CHENG H, WANG H, et al. Study on the method of avoiding resonance for double-walled single-crystal turbine blades based on crystallographic orientation design: A technique for solving macroscopic vibration problems from a microscopic scale[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2026, 168: 111 013.
- [2] LÓPEZ-GALILEA I, HECKER L, WEBER S. Effect of super-solidus heat treatments on microstructure and homogenization of CMSX-4 plus single crystal nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2026, 41: 1 323-1 336.
- [3] DOYLE J C, SAUNDERS E A, WOOLRICH J M, et al. Comparing the oxidation behaviour of three generations of single crystal nickel-based superalloys at an intermediate service temperature[J]. *Corrosion Science*, 2026, 261: 113 582.
- [4] HOBBS R A, ZHANG L, RAE C M F, et al. The effect of ruthenium on the intermediate to high temperature creep response of high refractory content single crystal nickel-base superalloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, A489(1): 65-76.
- [5] JITHIN S D, SELVARAJ S K, VIJAY VISHAAL K E, et al. Comparative analysis between 5th and 6th generation superalloys and previous generation superalloys[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 3 530 689.
- [6] GE C T, LIU L R, LÜ P S, et al. Microstructure and stress rupture properties degradation of a 2nd generation single crystal superalloy during short-duration overheating[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 44: 111 960.
- [7] PARSA A B, SAKSENA A, GAULT B, et al. High-temperature and low-stress tertiary creep and the transition from rafting to topological inversion in single-crystal Ni-base superalloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(39): 18 225-18 245.
- [8] ZHOU Z R, LIU L R, LÜ P S, et al. Tensile properties and deformation mechanisms of two low-cost second-generation single crystal superalloys designed by optimization of Re and W compositions at various temperatures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170 840.
- [9] GUO H Y, TAN Z H, LI Y M, et al. Diffusion of alloying elements during high temperature oxidation in a low-cost third generation Ni-based single crystal superalloy[J]. *Materials Characterization*, 2024, 211: 113 913.
- [10] 郑运荣,韩雅芳. 燃气涡轮用单晶高温合金的成本因素[J]. *金属学报*, 2002, 38(11): 1 203-1 209.
- [11] 王开国,李嘉荣,刘世忠,等. DD6单晶高温合金760℃的蠕变性能研究[J]. *材料工程*, 2004, 32(5): 7-11.
- [12] 王开国,李嘉荣,刘世忠,等. DD6单晶高温合金980℃蠕变性能研究[J]. *材料工程*, 2004, 38(8): 7-11.
- [13] WEI B S, LIN Y, HUANG Z W, et al. A novel Re-free Ni-based single-crystal superalloy with enhanced creep resistance and microstructure stability[J]. *Acta Materialia*, 2022, 240: 118 336.
- [14] 杜思宇,刘丽荣,罗烽月,等. 碳含量和热处理对DD91镍基单晶高温合金再结晶行为的影响[J]. *金属热处理*, 2025, 50(11): 66-71.
- [15] 刘金来,孙晶霞,孟杰,等. 一种第3代单晶高温合金的组织稳定性与持久性能[J]. *金属学报*, 2024, 60(6): 770-776.
- [16] WU X, MAKINENI S K, LIEBSCHER C H, et al. Unveiling the Re effect in Ni-based single crystal superalloys[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 389-341.
- [17] MILLIGAN W W, ANTOLOVICH S D. Yielding and deformation behavior of the single crystal superalloy PWA 1480[J]. *Metallurgical Transactions*, 1987, A18(1): 85-95.
- [18] HAN G M, YANG Y H, YU J J, et al. Temperature dependence of anisotropic stress - rupture properties of nickel-based single crystal superalloy SRR99[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(8): 1 717-1 721.
- [19] MILLER M K, BABU S S, VITEK J M. Stability of γ' precipitates in a PWA1480 alloy[J]. *Intermetallics*, 2007, 15(5): 757-766.
- [20] LÓPEZ-GALILEA I, WEBER S. Development of super-solidus

- heat treatments for the second-generation single-crystal Ni-based superalloy ERBO/1: Experiments and 1D kinetic simulations [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 39: 6 794-6 805.
- [21] HORST O M, ADLER D, GIT P, et al. Exploring the fundamentals of Ni-based superalloy single crystal (SX) alloy design: Chemical composition vs. microstructure [J]. *Materials & Design*, 2020, 195: 108 976.
- [22] REED R C, ZHU Z, SATO A, et al. Isolation and testing of new single crystal superalloys using alloys-by-design method [J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A667: 261-278.
- [23] 艾诚, 李凯文, 郭敏, 等. 低成本二代镍基单晶高温合金的研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(9): 2 857-2 868.
- [24] AI C, LI K W, XU X J, et al. Effects of substituting Mo for W and temperature on γ/γ' lattice misfits of second generation Ni based single crystal superalloys [J]. *Intermetallics*, 2025, 180: 108 710.
- [25] GAO Y T, DONG J S, WANG L, et al. Enhancing microstructural stability and creep properties by Ta addition in Ni-based single crystal superalloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2024, A909: 146 873.
- [26] CHEN J B, CHEN J Y, WANG Q J, et al. Enhanced creep resistance induced by minor Ti additions to a second generation nickel-based single crystal superalloy [J]. *Acta Materialia*, 2022, 232: 117 938.
- [27] LENG F, LIU L R, LV P S, et al. Creep properties and deformation mechanisms of two Nb-containing low-cost third-generation single crystal superalloys [J]. *Intermetallics*, 2026, 191: 109 213.
- [28] ZHAO Y S, ZHANG J, LUO Y S, et al. Improvement of grain boundary tolerance by minor additions of Hf and B in a second generation single crystal superalloy [J]. *Acta Materialia*, 2019, 176: 109-122.
- [29] LI Y T, XIAO J F, GAO S, et al. Preparation and isothermal oxidation resistance of Zr-doped PtAl coating on a Ni-based single crystal superalloy [J]. *Materials Today Communications*, 2025, 46: 112 864.
- [30] WANG N, LIU J D, XU W, et al. Unraveling the dual role of yttrium in the creep deformation mechanism of Ni-based single crystal superalloys: A synergistic effect of lattice misfit and atomic diffusion [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, 263: 129-139.
- [31] ZHANG G Q, WANG L, PANG Y Y, et al. Enhancement of creep properties with trace nitrogen in a low-cost nickel-based single crystal superalloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2024, A918: 147 420.
- [32] ZHAN X, WANG D, ZHANG Z P, et al. Effect of trace sulfur on the hot corrosion resistance of Ni-base single crystal superalloy [J]. *Corrosion Science*, 2023, 224: 111 528.
- [33] 张宗鹏, 张思倩, 王栋, 等. ppm级S对第2代抗热腐蚀镍基单晶高温合金恒温氧化行为的影响 [J]. *铸造*, 2019, 68(3): 232-236.
- [34] LI Y, TAN Y, YOU X G, et al. Effect of trace impurity elements on the high-temperature oxidation resistance of a high-purity nickel-based superalloy [J]. *Corrosion Science*, 2023, 211: 110 904.
- [35] ZHANG Y N, CAO X, WANJARA P, et al. Oxide films in laser additive manufactured Inconel 718 [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61 (17): 6 562-6 576.
- [36] ROTH H A, DAVIS C L, THOMSON R C. Modeling solid solution strengthening in nickel alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, A28(6): 1 329-1 335.
- [37] SUBRAMANYAM A, LUDWIG A, PFETZING J, et al. Development of single-crystal Ni-base superalloys based on multi-criteria numerical optimization and efficient use of refractory elements [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2018, A49: 4 134-4 145.
- [38] PRÖBSTLE M, NEUMEIER S, FELDNER P, et al. Improved creep strength of nickel-base superalloys by optimized γ/γ' partitioning behavior of solid solution strengthening elements [J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A676: 411-420.
- [39] AMOYAL Y, MAO Z, SEIDMAN D N. Effects of tantalum on the partitioning of tungsten between the γ - and γ' -phases in nickel-based superalloys: Linking experimental and computational approaches [J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(18): 5 898-5 911.
- [40] LÜ P S, LIU L R, ZHAO G Q, et al. Temperature effects on tensile behaviors and relevant deformation mechanisms of a low-cost nickel-based single crystal superalloy containing 1.5% Re [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 926: 166 819.
- [41] LENG F, LIU L R, LÜ P S, et al. Effect of temperature on tensile properties of a third-generation low-cost single crystal superalloy: Experiments and molecular dynamics simulations [J]. *Materials Science and Engineering*, 2025, A927: 147 956.
- [42] XIONG X H, QUAN D M, DAI P D, et al. Tensile behavior of nickel-base single-crystal superalloy DD6 [J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, A636: 608-612.
- [43] LÜ P S, LIU L R, ZHOU Z R, et al. Entire-servicing-temperature tensile behaviors of a Re-free Ni-based single crystal superalloy with balanced ductility and strength at intermediate temperature [J]. *Materials Characterization*, 2025, 227: 115 280.
- [44] WANG T J, ZHANG H, LIU C H, et al. Effect of temperature on tensile behavior, fracture morphology and deformation mechanisms of Nickel-based single crystal CMSX-4 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 912: 165 175.
- [45] TAN Z H, WANG X G, DU Y L, et al. Temperature dependence on tensile deformation mechanisms in a novel Nickel-based single crystal superalloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, A776: 138 997.
- [46] 韩凤奎, 刘蓓蕾, 吴保平, 等. 不同温度下镍基单晶高温合金蠕变断裂特征 [J]. *机械工程材料*, 2022, 46(10): 56-60.
- [47] YANG B S, LI B. Creep notch effect in DD6 Ni-based single crystal superalloy: Experimental and modeling studies [J]. *Materials Science and Engineering*, 2025, A931: 148 221.
- [48] GAO Y T, DONG J S, LOU L H. Stress-dependent creep behavior of a low-cost Re-free nickel-based single crystal superalloy at 980 °C [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 38: 854-867.
- [49] ESTRADA RODAS E A, GORGANNEJAD S, NEU R W. Creep-fatigue behaviour of single-crystal Ni-base superalloy CMSX-8 [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(9): 2 155-2 171.
- [50] RETTIG R, MATUSZEWSKI K, MÜLLER A, et al. Development of a low-density rhenium-free single crystal nickel-based super-

- alloy by application of numerical multicriteria optimization using thermodynamic calculations [C]//Proceedings of the 13th International Symposium on Superalloys. Erlangen: TMS, 2016.
- [51] MISHIMA Y, OCHIAI S, HAMAO N, et al. Solid solution hardening of nickel [J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1986, 27(9): 656-664.
- [52] EPISHIN A I, FEDELICH B, VIGUIER B, et al. Creep of single-crystals of nickel-base γ -alloy at temperatures between 1 150 °C and 1 288 °C [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A825: 141 880.
- [53] LI Y M, TAN Z H, WANG X G, et al. Stress rupture anisotropy of a Ru-containing fourth-generation single crystal superalloy at 760 °C and 1 100 °C [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A856: 144 006.
- [54] ZHANG J X, MURAKUMO T, KOIZUMI Y, et al. Interfacial dislocation networks strengthening a fourth-generation single-crystal TMS-138 superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2002, A33(12): 3 741-3 746.
- [55] ZHANG J X, MURAKUMO T, HARADA H, et al. Dependence of creep strength on the interfacial dislocations in a fourth generation SC superalloy TMS-138 [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(3): 287-293.
- [56] MURAKUMO T, KOBAYASHI T, KOIZUMI Y, et al. Creep behaviour of Ni-base single-crystal superalloys with various γ' volume fraction [J]. Acta Materialia, 2004, 52(12): 3 737-3 744.
- [57] GUAN Q Y, LI Y M, WANG X G, et al. Creep anisotropy of a low-cost third generation single crystal superalloy at 760 °C and 1 120 °C [J]. Materials Science and Engineering, 2025, A922: 147 632.
- [58] JIANG H R, LI Y M, TAN Z H, et al. Unveiling the stress sensitivity of creep behavior and deformation mechanism in a novel 3rd-generation low-cost Ni-based single crystal superalloy at intermediate temperature [J]. Materials Science and Engineering, 2026, A969: 150 449.
- [59] ZHU C W, ZHANG Z P, LIU J D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of a novel low-cost second-generation ni-based single crystal superalloy after long-term thermal exposure [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2025, 38(11): 2 035-2 046.
- [60] DU J G, LI Y M, TAN Z H, et al. Effect of thermal exposure on the microstructure and creep properties of a low-cost third-generation Ni-based single crystal superalloy [J]. Intermetallics, 2026, 192: 109 254.
- [61] WAHL J B, HARRIS K. New single crystal superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8 [C]//Seven Springs Mountain Resort, Champion, Pennsylvania, USA.
- [62] ERNESTO A, ESTRADA R, SANAM G, et al. Creep-fatigue behaviour of single-crystal Ni-base superalloy CMSX-8 [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42(9): 2 155-2 171.
- [63] REED R C, TAO T, WARNKEN N. Alloys-by-design: Application to nickel-based single crystal superalloys [J]. Acta Materialia, 2009, 57(19): 5 898-5 913.
- [64] SHEN C, SUZUKI A, KONITZER D G. Multiscale modeling of heat treatment processing for single-crystal Ni-base Superalloys [C]//Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [65] PEI H Q, WEN Z X, YUE Z F. Long-term oxidation behavior and mechanism of DD6 Ni-based single crystal superalloy at 1 050 °C and 1 100 °C in air [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 704: 218-226.
- [66] LI P, JIN X C, ZHAO J C, et al. Oxidation behaviors and compressive strength evolution of DD6 Ni-based single-crystal superalloy at 1 100 °C [J]. Corrosion Science, 2022, 208: 110 684.
- [67] MARTIN A, CORMIER J, RAME J, et al. Influence of microstructure on the oxidation behaviour of the Ni-based single crystal superalloy AM1 between 850 and 1 050 °C in air [J]. Corrosion Science, 2024, 229: 111 872.
- [68] PEI H Q, WEN Z X, LI Z W, et al. Influence of surface roughness on the oxidation behavior of a Ni-4.0Cr-5.7Al single crystal superalloy [J]. Applied Surface Science, 2018, 440: 790-803.
- [69] HAUGSRUD R. On the high-temperature oxidation of nickel [J]. Corrosion Science, 2003, 45: 211-235.
- [70] YU H, ZHAO Q, MARTÍN D S, et al. Enhancing high-temperature oxidation resistance in directed energy deposition-processed Ni-based superalloys via heat treatment [J]. Corrosion Science, 2025, 257: 113 281.
- [71] HU Y B, CHENG C Q, CAO T S, et al. A study on the multiple stages of oxidation kinetics in a single crystal nickel-based superalloy [J]. Corrosion Science, 2021, 188: 109 512.
- [72] HARIHARAN K, LANDES M, RAMSPERGER M, et al. High temperature oxidation of Ni-based superalloy 247 produced by electron beam powder bed fusion additive manufacturing [J]. Corrosion Science, 2025, 257: 113 301.
- [73] YUN D W, SEO S M, JEONG H W, et al. Effect of refractory elements and Al on the high temperature oxidation of Ni-base superalloys and modelling of their oxidation resistance [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 8-19.
- [74] LI Y M, GUO H Y, WANG X G, et al. Oxidation micromechanics and contribution during the low-cycle fatigue failure of a Ni-based single crystal superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2025, 190: 108 586.
- [75] GUO H Y, LI Y M, WANG X G, et al. Influence factors of thermal fatigue behavior of a low-cost third generation Ni-based single crystal superalloy [J]. Materials Characterization, 2025, 224: 114 976.
- [76] HUANG Y Y, LIU J D, ZHU C W, et al. An explainable machine learning model for superalloys creep life prediction coupling with physical metallurgy models and CALPHAD [J]. Computational Materials Science, 2023, 227: 112 283.
- [77] SUN L G, ZHANG S, QIN Z J, et al. Temperature dependent strength prediction of nanotwinned nickel-based single crystal superalloys by integrating atomistic simulation and machine learning [J]. Mechanics of Materials, 2026, 216: 105 623.

(编辑:彭瑾)