



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025
福建 厦门

C04-高温合金
C04-Superalloys

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C04. 高温合金

分会主席：赵云松、张健、杜金辉、苏海军、李龙飞

报告

C04-01

高温合金创新发展与工业化挑战

张继

钢铁研究总院

首先探讨了高温合金从创新发展到工业化生产所需克服的问题。包括高温合金新材料和新技术研发初始阶段的理念，新技术跨越“死亡之谷”进入市场、实现价值的途径，以及如何跨过“达尔文海”以创造价值。进而以三个实例讨论高温合金创新发展与工业化的关系，(1) 板材高温合金的工艺性能与应用选择，针对新用途开展的固溶强化型板材高温合金超温服役氧化损伤及其对力学性能影响研究；(2) 根据特定摩擦学条件，揭示钴基耐磨合金的磨损机制，根据关键的基体相变热力学、动力学，提出优化的技术途径；(3) 讨论产品事实数据与生成式人工智能在高温合金生产中应用所面临的挑战。

C04-02

航空发动机单晶涡轮叶片服役性能影响机制研究

赵云松

中国航发北京航空材料研究院

镍基单晶高温合金在航空发动机极端工况下的服役性能严重依赖于对氧化、氢脆、晶界缺陷及杂质元素（如 S）的多维度控制。研究发现，氧化行为与相界面演化具有强关联性： γ/γ' 相界面在高温氧化过程中扮演核心角色，氧化区从 400°C 起优先在界面形核，随温度升至 700°C 扩展至 γ 和 γ' 相。关键元素配比（如 Cr/Re 比）优化能显著提升抗氧化性，而 Re 元素通过增大晶格错配度导致界面应力集中，反而削弱了界面稳定性。氢脆机制的深入解析显示：H 在 γ/γ' 界面的富集能降低 Ni-Ni 和 Ni-Al 键合强度，并降低 γ' 相层错能，加速位错剪切及裂纹萌生；在高温氢环境中，H 通过促进空位聚集形成微孔洞（HELP 机制）与应变滞后（HEDE 机制），协同放大界面弱化效应。此外，杂质元素 S 的影响具有多重破坏性：微量 S（如 10ppm）即可改变氧化层粘附性并促进 TCP 相析出，其对蠕变的损害源于位错通道的堵塞与晶界脆化的协同作用。晶界缺陷调控方面，碳和硼的微量添加能强化小角度晶界的稳定性，通过晶界元素偏析（Cr、Mo、Re 及 B）降低界面自由能，并优化位错分布，显著提升高温低周疲劳寿命。本报告从多个尺度揭示了相界面动态演化、氢-硫元素界面作用及晶界作用机制对单晶合金性能的主导作用，强调了跨尺度设计策略对平衡抗氧化、抗氢脆与抗疲劳性能的关键意义，为航空发动机叶片材料的成分-工艺-性能一体化优化提供了理论依据。

C04-03

Ru 对镍基单晶高温合金高温蠕变性能影响机理的原子尺度新探索

李娜¹、吴渊²、吴小香³、王丽¹、何骏阳^{*1}、赵云松⁴、吕昭平²

1. 粉末冶金全国重点实验室
2. 新金属材料全国重点实验室
3. 苏州大学
4. 中国航发北京航空材料研究院

Ru 是高代次镍基单晶高温合金保持超高温承载能力/蠕变抗力的关键元素。然而目前，领域内对 Ru 原子的占位行为及其与蠕变缺陷的交互作用的理解仍不深入，基于 Ru 合金化机理的高代次镍基单晶高温合金的成分设计亟需加强。本研究设计制备了两种具有不同 Ru 含量（3 wt.% 和 5 wt.%）的新型镍基单晶高温合金。持久实验发现，当 Ru 含量增加至 5 wt.% 时，5 wt.% Ru 的合金在 1140 °C 以下的蠕变寿命更长。组织表征可知，上述蠕变性能的提升主要源于 Ru 与 Re 元素的共偏析效应：Ru 促进 Re 在 γ/γ' 界面位错网和 γ' 内切入位错等缺陷区域的富集，从而有效地抑制了位错运动，并延缓了微观结构的退化过程。然而，

在高于 1140 °C 的蠕变条件下，尽管共偏析现象仍然存在，由于 Ru 在缺陷处的占位更具竞争性，致使 Re 的富集程度下降约 20%。同时， γ' 相热稳定性的降低进一步削弱了合金的高温蠕变性能，最终导致 5 wt.% Ru 的合金蠕变寿命下降。本研究提供了 Ru 在镍基单晶高温合金中的作用机制的全新原子尺度视角，为超高温服役条件下新一代高温合金的成分设计与性能调控提供了关键的理论依据。

C04-04

Al 含量对第三代镍基单晶高温合金中 TCP 及 γ/γ' 相的异常析出行为研究

吕圣炜^{1,2}、玄伟东^{*1}、程凯旋¹、任忠鸣¹

1. 上海大学

2. 上海大学材料科学与工程学院

作为镍基单晶高温合金的关键强化元素，Al 元素通过调控 γ' 相的尺寸、体积分数及立方化程度显著影响着合金的高温力学性能。然而，过量 Al 添加会加剧凝固末期 γ/γ' 共晶反应，同时降低合金的初熔温度，严重损害合金的热加工性能和高温组织稳定性。为确保稳定的 γ' 相含量，现有研究的合金体系中 Al 含量都处于一个比较固定的范围内。因此，需要进一步开展合金中 Al 含量的优化研究，确定其如何影响合金的微观组织结构以提高性能。

本文系统地研究了不同 Al 含量（4.5wt.%，5.7wt.%，6.4wt.%）对一种第三代镍基单晶高温合金微观组织结构、高温蠕变性能、析出行为以及元素偏析的影响。通过梯度调整合金中的 Al 含量，揭示了 Al 元素通过调节合金 γ' 相和位错网络的演变来抑制损伤的强化机制，实现了微观组织与力学性能的协同优化。新的结果表明，随着 Al 含量从 4.5wt.% 增加到 5.7wt.%， γ' 相形态从接近球形转变为方形。在 1100°C/140MPa 条件下，蠕变寿命显著提高到 269.05 小时。进一步将 Al 含量提高到 6.4wt.%，虽然增加了 γ' 相含量，但蠕变断裂寿命减少至 132.08 小时。表征结果表明，Al 含量对 γ/γ' 两相晶格常数的调制进一步影响了晶格错配和 γ' 相形态，从而改变了合金的位错迁移和蠕变行为。4.5wt.%Al 合金未能形成足够的 γ' 相，位错网络稀疏且不规则，位错运动不受阻碍，导致快速断裂；5.7wt.%Al 合金呈现出发达、规则的筏状结构，表现出更好的固溶效果和蠕变抗性；6.4wt.%Al 合金中部分 γ' 相粗大生长，在蠕变过程中，筏状结构无序且不规则，无法有效提高合金的抗蠕变性。另外，Al 含量的不同也导致了蠕变过程中 TCP 相的反常析出现象。Al 含量较低时，合金保持了更好的基体组织稳定性，TCP 相形核的化学驱动力不足，只有在温度和应力长时间的耦合作用下，难熔元素借由位错的运动向同一处偏聚，才引起少量 P 相析出。而 Al 元素的过量添加会导致固溶元素在基体的溶解度降低，使得 Re、Cr 等元素在 γ/γ' 两相界面位置偏聚，同时过量的 Al 原子会置换出游离的 Ni 原子构建供 σ 相异质形核的层错。Al 元素过量添加后 σ 相反常析出现象也是造成高 Al 合金提前脆断，蠕变寿命大幅降低的主要原因。本研究将为镍基单晶高温合金中 Al 和其它多元素协同调控及合金成分的优化设计提供重要的实验基础和理论依据。

C04-05

显微组织损伤指导的第二代镍基单晶高温合金剩余蠕变寿命预测机器学习模型

刘嘉曦*

北京科技大学

蠕变性能是影响航空发动机涡轮叶片服役安全的重要因素，明确叶片合金显微组织损伤对蠕变性能的影响并发展剩余蠕变寿命预测方法具有重要工程意义。本研究针对第二代镍基单晶高温合金，通过开展 980~1150 °C 最长时间为 500 h 的热暴露或蠕变预损伤实验，并对损伤态合金 980 °C/250 MPa 下的蠕变寿命进行测试，系统研究了合金在近服役温度下显微组织损伤及其对蠕变性能的影响规律。在此基础上，构建了融合多尺度显微组织特征的机器学习剩余蠕变寿命预测模型。通过对比不同特征维度机器学习模型的预测性能，证实了引入 γ/γ' 两相界面密度与枝晶间显微组织参量可显著提高模型对实验合金剩余蠕变寿命的预测准确度，最终优选模型的预测精度 (R2) 可达 0.96。本研究发展的寿命预测模型有助于单晶涡轮叶片的服役损伤评价以及视情维修策略制定，所筛选的显微组织参量对其它单晶合金建立蠕变寿命评估方法时的显微组织参量选取具有指导意义。

C04-06

热障涂层与壁厚耦合作用对第三代单晶合金 DD33 高温持久性能的影响

刘静^{1,2}, 王莉^{1*}, 于明涵^{1,2}, 徐丽萍^{3,4**}, 闵师领^{1,2}, 李佳声¹, 王迪¹, 姜祥伟¹, 董加胜¹, 楼琅洪¹

1. 中国科学院金属研究所 高温结构材料研究部
2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院
3. 广东省科学院新材料研究所
4. 广东省现代表面工程技术重点实验室

为提高航空发动机涡轮叶片承温能力, 先进叶片往往采用高代别单晶合金, 具有薄壁冷却结构, 通常在叶片表面涂覆热障涂层。然而, 关于热障涂层对不同壁厚高代别单晶合金持久性能的影响规律及作用机理尚不清楚。因此, 本研究以第三代镍基单晶高温合金 DD33 为研究对象, 采用大气等离子喷涂工艺(APS)在不同壁厚(0.5 ~ 1.5 mm)样品表面涂覆热障涂层, 对比研究不同壁厚含涂层/无涂层试样在 1100 °C/120 MPa 条件下持久过程中组织演变及性能。研究发现热障涂层对单晶合金持久性能的影响具有明显壁厚依赖性, 壁厚 0.5 mm 时, 与无涂层试样相比, 涂覆热障涂层试样的持久寿命提高了约 43.8%。壁厚 1 mm 时, 涂层对持久寿命无明显影响。而壁厚 1.5 mm 时, 涂层试样持久寿命较无涂层试样降低了约 45.2%。通过电子探针显微分析(EPMA)与电子背散射衍射(EBSD)等分析技术, 对不同壁厚试样断后显微组织观察与变形行为分析发现, 壁厚 0.5 mm 样品, 热障涂层提高了初始有效承载面积、降低有效应力, 延缓试样变形及氧化, 进而减缓 γ/γ' 相退化以及裂纹的萌生与扩展, 持久寿命提升。然而, 壁厚 1.5 mm 时, 热障涂层对初始有效承载面积的提升效果有限, 且随持久的进行, 试样变形加速表面陶瓷层的开裂及剥落, 进而促进 γ/γ' 相退化以及裂纹的萌生与扩展, 持久寿命降低。本工作获得了热障涂层对不同壁厚高代别单晶合金薄壁试样高温持久性能的影响规律, 揭示了热障涂层对不同壁厚薄壁单晶持久性能的作用机理, 为先进单晶叶片近服役损伤评价奠定理论基础。

C04-07

高代次镍基单晶高温合金蠕变行为研究

赵俊博¹、龙海波^{*1}、赵云松²、韩晓东^{1,3}

1. 北京工业大学固体所
2. 中国航发北京航空材料研究院
3. 南方科技大学

镍基单晶高温合金是先进航空发动机热端部件的核心材料, 其蠕变性能直接影响服役寿命。虽然添加 Ru 是发展长蠕变性能镍基单晶高温合金的重要手段, 但是针对含 Ru 高代次合金中组织的强化及弱化机制尚缺乏系统研究。本研究揭示了 Ru 元素的双重作用, 一是降低 γ' 相尺寸和抑制拓扑密堆相等作用提高蠕变寿命, 二是在超温条件下降低 γ' 相的稳定性, 二者的竞争机制造成添加 Ru 降低超温蠕变寿命的现象。基于上述发现, 本研究提出降低 γ' 相尺寸和提高 $\gamma'-\gamma$ 相稳定性的组织协同设计理念, 并在该理念的指导下研制出 1110°C-137MPa 条件蠕变寿命高达 748 h 的高代次合金, 达到国际同代次合金的水平。进一步地, 本研究通过混合焓的设计理念在一种第二代镍基单晶高温合金中添加新合金元素, 通过该元素实现 γ' 相尺寸的降低、 $\gamma'-\gamma$ 相稳定性的提高及 γ 相中化学短程序的增多, 从而实现不同条件下蠕变寿命的全面提升。该研究为高代次长蠕变寿命镍基单晶高温合金的组织结构设计及优化提供一定的实验指导和理论依据。

C04-08

高温合金熔炼与铸造成用高性能高温功能材料的研究进展

李红霞

中钢集团洛阳耐火材料研究院

高温合金是现代航空发动机、重型燃气轮机等关键结构材料和热端部件。提高我国高温合金材料性能、品质, 除冶炼技术创新提高合金洁净度外, 高温合金制备过程所用耐火材料的选择、高温服役行为及其对合金中有害杂质元素、夹杂物形成的影响等至关重要。报告概述了高温合金从母合金熔炼到真空熔炼铸造所用关键耐火材料的研究进展及发展方向。

C04-09

Mo 对一种四代镍基单晶高温合金组织和蠕变机制的影响

赵新宝*、程远、夏万顺、岳全召、谷月峰、张泽

浙江大学

Mo 是镍基单晶高温合金的重要固溶元素，其含量变化对单晶的组织 and 蠕变性能有显著影响。本文基于一种第四代镍基单晶高温合金，考察了 Mo 元素的含量变化对合金的凝固组织、热处理组织、组织稳定性和高温性能的影响。研究发现，Mo 含量的上升降低铸态枝晶偏析和共晶含量；经过热处理后，Mo 促进 Re、Cr 和 Mo 等强化元素向 γ 相中分配，扩大 γ 和 γ' 两相错配度。热暴露中可以抑制合金在 900°C 长时间热暴露中的 γ' 相粗化，但在 1100°C 显著促进 TCP 相的析出，发现了层错诱导 TCP 相析出的新机制。1100 °C/137 MPa 高温低应力蠕变中，Mo 作用于蠕变孔洞和 TCP 相的形成影响合金的断裂行为，同时影响界面位错网的形成、 γ 通道的宽化以及枝晶元素偏析的不均匀性，从而影响变形机理和蠕变寿命。800°C/735 MPa 中温高应力蠕变中，Mo 通过降低 γ' 和 γ 相的层错能、降低 γ 通道宽度而提高蠕变抗力，多种强化因素耦合使合金持久寿命显著提升。通过 Mo 元素作用机理研究，为低成本高性能单晶合金的设计提供基础理论参考。

C04-10

镍基高温合金中硫含量越低越好？——硫化物析出机制与有效硫活度模型研究夏敏*¹、刘二康¹、吴文涛¹、赵友亮¹、谭欣¹、胡馨支¹、薛兆江¹、葛昌纯¹、邢伟杰²、张丽辉²、赵云松²、骆宇时²

1. 北京科技大学

2. 北京航空材料研究院

针对国产超低硫（3 ppm）镍基高温合金晶界或相界硫化物析出量反超相同成分进口高硫（5 ppm）镍基高温合金的工业现象，本研究创新性提出微量元素对有效硫活度驱动的硫化物析出行为的影响机制。通过电子探针显微分析（EPMA）与微观结构表征发现：进口合金中微量元素 Hf 通过选择性键合将硫原子固定于热力学稳定相 $Y-(Hf,M)2SC$ ，显著降低有效硫活度；而国产合金中硫以高活度游离态或低熔点化合物 $Ni3S2$ 存在，导致硫化物在晶界或相界大量析出。基于硫形态-析出动力学关联性研究，创新性建立“有效硫活度模型”，首次揭示硫形态对析出驱动力的调控权重。研究表明，硫形态调控可突破单纯降硫含量的效能极限，提升硫致脆性临界阈值。研究成果为解决镍基高温合金热端部件中硫元素“低含量、高危害”的科学难题，提供了从“含量控制”到“活度调控”及“形态调控”的理论突破与技术创新。

C04-11

Constitutional Supercooling-induced Freckle Nucleation Mechanism of Nickel-based Superalloy During Directional SolidificationYuliang Jia*^{1,2}, Yongjia Zhang³, Shuai Wang⁴, Feng Cheng⁴, Changkun Shi², Zekai Shi³, Yingliu Du², Binghui Ge⁴, Xu Shen³, Zhigang Lü¹

1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University

2. Anhui Yingliu Hangyuan Power Technology Co., Ltd

3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology

4. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University

Freckles formed during directional solidification of single-crystal nickel-based superalloys reduced the mechanical properties of turbine blades, posing a significant challenge to the manufacturing of high-quality colossal single-crystal gas turbine blades. However, the mechanism of the formation and distribution of freckles in large-sized blades remain unclear, and prior interpretation of freckle formation by dendrite fragmentation has not been empirically confirmed. Here the constitutional supercooling-induced freckle nucleation mechanism in large-sized blades of heavy-duty gas turbines during directional solidification was investigated. Rather than utilizing simple-structure samples or small-sized samples, casting experiments on 300 mm large-sized blades, composed of five typical single-crystal/directional superalloys (GTD111DS, 247LCDS, Ren eN4, Ren eN5, and

CMSX-4), were conducted. Numerical analysis of the real experiment data demonstrates a noteworthy law consistent with the principles of solidification thermodynamics: alloys with lower critical constitutional supercooling thresholds tend to form more freckles, which matches the freckle formation tendency obtained from the experiment: CMSX-4 > Ren 6N5 > 247LCDS > Ren 6N4 > GTD111DS. To unravel the mechanism, we conduct advanced multi-component, coupled-field dendrite growth simulations based on the phase-field–lattice Boltzmann model. The results indicate that the necessary information for judging freckles during dendrite growth simulation, such as element segregation, and dendrite orientation, are exceedingly consistent with the measured values in the experiments. The constitutional supercooling-induced freckle formation mechanism under low temperature gradient condition for large-size blades was revealed.

C04-12

高水蒸气环境下镍基高温合金的腐蚀行为与机理研究

赵丹、玄伟东*、邵冠兰、车雪雨、尹茗慧、刘铭、任忠鸣

上海大学

推进氢能动力技术在航空发动机领域的产业化应用,是实现“碳中和”目标的关键技术路径之一。然而,氢燃料燃烧产生的高温水蒸气会使合金发生严重腐蚀。本文系统研究了镍基高温合金 CMSX-4 在 1100°C 水蒸气中的腐蚀行为和腐蚀机理。结果表明,合金最终形成从外到内依次为 NiCr2O4/CoCr2O4, TiTaO4, NiAl2O4, Al2O3 的四层氧化膜结构。Ni 和 Co 通过外氧化生成 NiO 与 CoO。合金内部,Al、Ti、Ta 和 Cr 依次发生内氧化,形成 Al2O3、TiO2、Ta2O5、Cr2O3。随着反应进行,Cr2O3 与 NiO/CoO 反应生成第一层 NiCr2O4/CoCr2O4, TiO2 与 Ta2O5 反应形成第二层 TiTaO4, Ni 氧化产生的 NiO 与 Al2O3 在第三层反应形成 NiAl2O4。高温水蒸气通过两种机制加速腐蚀:一方面,水蒸气解离产生的氢质子使 NiO 中空位形成能降低 2.2eV,促进氧化物内空位形成,加速合金元素和氧元素扩散,进而加速合金腐蚀;另一方面,高温水蒸气促进 Cr2O3 挥发,导致内部氧化物层中形成孔洞,破坏氧化膜致密性并加速腐蚀进程。

C04-13

Re 对一种二代单晶合金高温低应力蠕变行为的影响

王功昊^{1,2}、王栋^{1,2}、张健^{*1,2}

1. 金属研究所

2. 中国科学技术大学

Re 是单晶高温合金的重要强化元素,随着 Re 含量的提升,合金的承温能力逐渐加强,但合金成本随之提升。针对二代合金的 Re 成分下限,研究了三种不同 Re 含量(1.0%Re、1.7%Re、2.4%Re)合金的蠕变行为,以 W 补充合金 Re 含量差异保持 Re、W 总含量一致。980°C/248MPa 蠕变实验表明,1.7%Re 合金与 2.4%Re 合金蠕变寿命无显著差异,大幅优于 1.0%Re 合金。进一步分析发现,1.7%Re 合金与 2.4%Re 合金蠕变稳态阶段维持时间更长,蠕变第三阶段蠕变速率提升更缓。此外,三种合金蠕变中断实验表明,蠕变稳态阶段期间实验合金 γ/γ' 两相组织开始转化为筏排组织,界面位错网开始出现并在蠕变第三阶段初期最终形成。1.0%Re 合金 γ 基体的固溶强化作用较弱加速位错运动,促进了界面位错网形成缩短了合金蠕变稳态阶段时间,蠕变加速阶段间距较大的位错网对位错的阻碍作用较弱导致了更高的蠕变速率,进而积累更多的塑性变形并引发断裂破坏。

C04-14

基于高稳定耐火材料的单晶高温合金熔模铸造应用研究

徐辉¹、侯新梅^{*1}、王恩会¹、赵云松²、董龙沛²、陈光耀³

1. 北京科技大学

2. 北京航空材料研究院

3. 上海大学

作为先进航空发动机不可或缺关键部件之一的高代次镍基单晶涡轮叶片(以下简称单晶叶片),其纯

净度和表面质量直接影响航空发动机的气动性能、服役可靠性及安全性。目前单晶叶片近净形熔模精密铸造（以下简称熔铸）制备用 Al_2O_3 基重熔坩埚和型壳因高温热震和化学稳定性差异导致合金洁净度和表面质量缺陷超标，成为限制单晶叶片良品率提升的主要瓶颈之一。本工作基于单晶叶片高稳定性耐火材料需求，开发设计新型 $\text{CaO}_x\text{MgO}_{(6+x)}\text{Al}_2\text{O}_3$ (CMA) 系列耐火原料(以下简称 CMA)。CMA 耐火原料具有高熔点，较低的热膨胀系数、高的化学稳定性及与金属熔液不润湿性等优异特性。基于 CMA 制备的重熔坩埚和型壳在实验室初步浇注过程中可有效控制合金纯净度和铸件表面质量，具有良好的工业化应用前景。

C04-15

镍基单晶高温合金的疲劳损伤机理

王栋*、黄亚奇、李亚微、申健、张健

中国科学院金属研究所

镍基单晶高温合金铸件在服役时受到循环载荷作用，疲劳是单晶铸件主要失效模式之一。由于裂纹萌生阶段占据大部分疲劳寿命，理解裂纹萌生机制是提升疲劳性能的基础。本文开展了从低到高不同应力幅控制的疲劳试验，并结合原位观测和微观组织表征，研究了单晶合金疲劳裂纹萌生机制。结果表明：在高应力幅下，低周疲劳裂纹萌生与大尺寸骨架状碳化物的氧化和开裂有关。在低应力幅下，最大尺寸铸孔是高周疲劳裂纹源，观察到三种可能的裂纹萌生机制：（I）铸孔边碳化物氧化开裂；（II）铸孔边滑移带剪切开裂；（III）铸孔边元素扩散造成 Kirkendall 空位聚集。在更低应力下，大尺寸铸孔局部应力集中导致多滑移系开动，造成 γ' 晶体转动，诱发超高周疲劳裂纹。当应力幅降低至某一临界值时，疲劳裂纹不再从铸孔处萌生，主要受控于表面氧化或萌生于共晶。共晶区域存在变形累积，变形更加均匀而非局部化，以致疲劳寿命更长。本研究为提升单晶合金疲劳性能、保证安全服役奠定基础。

C04-16

Re 元素对 Ir-Rh 高温合金组织结构与力学性能的影响

和思亮¹、文嘉栋¹、魏燕²、王学航²、蔡宏中²、王献²、葛华龙³、胡昌义²、陈力²

1. 昆明贵金属研究所，贵金属功能材料全国重点实验室

2. 云南省贵金属新材料控股集团股份有限公司，云南贵金属实验室有限公司

3. 云南大学，材料与能源学院，材料基因工程研究中心

铱（Ir）基高温合金已经成为制备第三代航天姿/轨控发动机喷管部件的关键材料，但其室温脆性与薄弱的抗氧化性能依然是亟待突破的技术难题。Re 是典型的固溶强化元素，但其对 Ir 基高温合金室温力学性能与高温抗氧化性能的影响尚不清楚。本文以 Ir-7Rh (wt.%) 合金为研究对象，分别添加 0.5, 1.0 与 1.5 (wt.%) 的 Re，系统研究了 Re 对 Ir 基高温合金微观组织、室温加工性能与高温抗氧化性能的作用。结果表明：Rh 和 Re 能与 Ir 形成 fcc 结构的单相固溶体，在局部区域出现短程有序结构。Rh 主要偏聚于合金枝晶间区域，而 Re 主要偏聚于枝晶干区域，Re 含量的提升会加剧合金枝晶偏析程度。Re 的添加能改善合金室温塑性，伴随 Re 含量的提升，合金室温硬度逐渐下降，而压缩屈服强度逐渐提高。在 1500°C 恒温氧化过程中，Re 含量的增加导致合金氧化失重先轻微下降后显著升高，Ir-7Rh-1Re 合金表现出较好的高温抗氧化性能。本研究为发展先进航天喷管材料用 Ir 基高温合金提供了理论依据与技术支持。

C04-17

高温合金反重力铸造过程的充型凝固模拟与组织性能演化

杜大帆，彭望君，安家托，翟群智，董安平，孙宝德

上海交通大学材料科学与工程学院，上海市东川路 800 号，200240，上海

反重力调压精铸具有较强充型能力、更少缺陷和更高机械性能等优点，在制造复杂薄壁和高质量铸件发挥着重要作用。本研究针对高温合金反重力铸造过程，探究了压力作用下薄壁区域充型、组织演化和力学性能等科学问题。以 Al-Cu 合金为研究对象，将相场法与多松弛格子玻尔兹曼法耦合模拟了薄壁空间中轴晶和定向生长枝晶在不同对流状态下的生长形貌。等轴晶在不同对流条件下均产生了溶质羽流，且上游的一次枝晶较下游一次枝晶更发达。当存在 -27.733 Pa/m 的压力梯度时，上下游一次枝晶的不对称度从

0.52 降低到了 0.17, 左右两侧枝晶的倾斜角度从 17.56° 降低到了 15.48°。同时, 在定向生长枝晶的生长过程中, 薄壁空间中对流形式由自然对流和强迫对流共存状态逐渐变为以自然对流为主。此外, 通过组织表征、拉伸试验和原位同步辐射 X 射线衍射等手段比较了反重力铸造和传统重力铸造高温合金的微观结构演化和断裂机制。反重力铸造高温合金表现出更致密的微观结构, 以及更高的晶格应变, 表明其具有更好的应力和应变适应能力, 从而增强了其强度和塑性变形。

C04-18

应力及生长取向一种长寿命单晶高温合金 TCP 相析出行为的影响

文明月^{*1}、刘金来²、于金江²

1. 沈阳理工大学

2. 中国科学院金属研究所

深入理解单晶高温合金中的 TCP 相的析出行为对提高其热稳定性与高温力学性能具有重要意义, 本文面向 1100 °C 长期服役条件下应力及样品取向对 TCP 相的析出行为的影响开展研究, 针对与基体具有特定取向关系的针状 σ 相以及板条状 μ 相的形貌、晶体结构以及合金成分的影响开展研究。当样品生长取向不变时, 应力作用抑制了针状 σ 的生长, 显著促进了 μ 相的粗化, 降低了 Mo 元素在 TCP 相中的成分比例, 提高了 Re、Ta 元素在 TCP 相中的成分比例, 深入分析发现这种现象与应力造成的原子扩散以及晶体缺陷的共同作用相关。随后研究了应力不变, 样品生长取向对 TCP 生长行为的影响规律, 发现样品生长取向越靠近 $\langle 111 \rangle$ 方向, 针状 σ 相越容易稳定生长, μ 相的粗化速率降低, 生长取向越靠近 $\langle 110 \rangle$, σ 相越易分解, μ 相的粗化速率越显著。其中 μ 相中存在两类面缺陷, 应力及样品取向影响着 (112) 面孪晶形成的概率, 从而改变了 μ 相的粗化行为。

C04-19

生长取向对镍基单晶高温合金显微组织及稳定性能的影响

杨志强、胡松松^{*}、陈赢政、何铭、李文道、白伟民、王鑫铭

湘潭大学材料科学与工程学院

制备 $\langle 001 \rangle$ 取向的单晶工作叶片和导向叶片时镍基单晶高温合金的生长取向是存在明显差异的。本文深入探究了生长取向对镍基单晶高温合金凝固行为及组织稳定性的影响, 以期优化单晶叶片的制备工艺提供参考。实验结果表明, 随着生长取向偏离角的增加, 枝晶形貌不对称性加剧, 一次枝晶间距增大, 糊状区宽度减少, 显微孔洞稍增加, 枝晶的分化位置从试样边缘逐渐转向中心处, 枝晶干与枝晶间元素偏析减轻, 共晶含量的降低、 γ' 强化相尺寸变大、 γ' 体积分数增加。标准热处理难以获得均匀的热处理组织, γ' 相呈规则近似立方体, 枝晶间出现大量固溶微孔。随生长取向偏离角的增加, 残余共晶体积分数降低。1000 °C 热暴露过程中, 随着生长取向偏离角的增加, 枝晶间共晶体积分数降低, 枝晶干析出 TCP 相的时间提前, 枝晶干处 γ' 相尺寸粗化速率增加、尺寸分布均匀性降低、筏化合并程度增大、溶解率和溶解速率增大, γ 相宽化程度略显增加。热暴露后期, 生长取向对组织稳定性的影响减弱, TCP 相含量、基体相宽度、 γ' 强化相体积分数、 γ' 强化相均匀性趋于稳定, 并无明显差异。

C04-20

双性能粉末涡轮盘技术的应用与挑战

田高峰^{*}、陈阳、周磊、王旭青

中国航发北京航空材料研究院

镍基粉末高温合金因其具有一系列优异的性能而成为制备先进航空发动机涡轮盘等关键部件的必选材料。根据涡轮盘实际服役工况研发的双性能镍基粉末高温合金涡轮盘 (简称双性能粉末涡轮盘) 是在单一盘件上实现轮缘 (粗晶组织) 与轮毂 (细晶组织) 的差异化性能, 可以显著提升航空发动机的推重比、燃油效率及服役寿命, 是航空发动机提高推重比的关键途径之一。通过对比 3 种典型的双性能粉末涡轮盘制造技术, 总结了双性能粉末涡轮盘技术在航空发动机上的应用状况, 提出在微观组织精准调控、残余应力与变形协调、性能验证与模型缺失、低成本制造等还存在若干挑战。并对未来发展趋势进行展望。

C04-21

热疲劳裂纹扩展过程中 GH4738 合金的塑性变形、再结晶和氧化行为

郑磊*、王国伟、刘红亮、张博宁

北京科技大学

对于发动机部件而言，热疲劳是一种典型的涉及循环热应力/应变的失效模式。然而，以晶内 γ 和晶界碳化物为特征的镍基高温合金的组织演变及其与热疲劳裂纹扩展的微观相互作用尚不清楚。在本研究中，对 GH4738 合金进行了从 25 °C 到 700 °C 的循环温度变化，以揭示包括应力分布、塑性变形、再结晶、氧化以及裂纹扩展在内的协同损伤机制。热疲劳裂纹主要沿着晶界扩展，扩展速率从 3.5 $\mu\text{m}/\text{周}$ 逐渐减小到 1.5 $\mu\text{m}/\text{周}$ 。与高达大约 800 MPa 的宏观热应力相比，不同尺寸的 M23C6 碳化物所诱发的局部热应力对裂纹扩展影响较小。在变形基体中观察到密集的滑移带和稀疏的变形孪晶，表明塑性变形主要是以位错滑移为主，孪晶为辅。当沿晶裂纹的扩展方向几乎与 {111} 滑移带平行时，偶尔会形成平行于 {111} 面的穿晶裂纹。此外，位错通过溶质的短路扩散促进裂纹表面的氧化损伤，从而产生无 γ 析出区和再结晶区。无 γ 析出区厚度的定量分析为预测热疲劳裂纹的萌生时间提供了参考。

C04-22

轻质 γ' 相强化 Co-Al-Ti-(Nb) 高温合金加速设计与组织优化黄海友*¹、王玄琬¹、李姿欣¹、姜渊东¹、吴丹丹¹、刘沛²、李永胜³、刘洋¹、Turab Lookman¹、宿彦京¹

1. 北京科技大学

2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

3. 南京理工大学

γ' 相强化是高温合金中一种关键的高温强化机制，能够保证合金在高温下具有优异的机械性能。本文提出了一种机器学习 (ML) 指导的方法来设计具有 γ' 相强化的轻质钴基高温合金。为了提高机器学习预测模型的性能，提出了一种结合特征空间数据距离和模型精度的双目标特征过滤方法。所构建的随机森林 (RF) 模型利用了关键特征，包括原子轨道的最低能量、d 轨道能级和化合价，从 70,000 个候选成分池中筛选出以 L1₂- γ' -phase 为特征的 Co-Al-Ti 高温合金。实验验证证实了 Co-Al-Ti 合金体系中存在 γ/γ' 两相结构，并测量得到合金的 γ' 相溶解温度为 1011-1105 °C、密度为 7.73-8.00 g/cm³。时效实验同时发现，Co-Al-Ti 合金体系中的 γ' 相在时效过程中较快出现筏化现象，热稳定性不足。

通过相场 (PF) 模拟研究了 Co-Al-Ti 合金体系时效过程的微观结构演变，模拟了 γ' 相从早期近立方形貌到筏化形貌的变化过程，并分析了 γ' 相体积分数、粒径、数密度的动力学演化及元素分布特征，揭示组织粗化与元素偏聚机制，为合金成分优化提供理论依据。

通过加入 Nb 元素改善 Co-Al-Ti 合金 γ' 相热稳定性。实验发现，Nb 元素添加可以细化 Co-Al-Ti 合金的显微组织，使 γ' 相平均尺寸从 774.6 nm 降低至 305.5 nm，既能有效钉扎位错，又不易发生快速粗化，从而提高了合金的机械强度和热稳定性。

本研究构建了结合机器学习、相场模拟和实验验证的结合形成了 γ' 强化高温合金发现与优化协同框架。ML 能够快速筛选高潜力体系；PF 模拟提供了对 γ' 沉淀物的微观结构演变和元素分布的洞察；并通过实验对预测和模拟结果进行验证。这种集成方法是材料基因工程“理性设计-实验验证”先进研发模式的实践应用，可推动轻质 γ' 强化钴基高温合金的发展。

C04-23

温度-应变速率耦合作用下 GH4151 合金的拉伸行为

崔天亮^{1,3} 谢兴飞^{1,2,3} 吕少敏^{1,2,3} 曲敬龙^{1,2,3} 杜金辉^{1,2,3}

1 北京钢研高纳科技股份有限公司 北京 100081

2 四川钢研高纳锻造有限责任公司 四川 618000

3 钢铁研究总院 高温材料研究所 北京 100081

为阐明涡轮盘在服役工况中温-应力耦合作用下的损伤机制，本研究选用难变形 GH4151 高温合金为研

研究对象，通过扫描电镜（SEM）、透射电镜（TEM）、能谱分析（EDS）及电子探针显微分析（EPMA）等多尺度表征手段，系统探究了不同温度区间的拉伸行为与显微组织演变规律，进而解析其断裂失效机制。实验表明：GH4151 合金的塑性随温度升高呈非单调变化特征，即先降后增，断裂模式由混合断裂向沿晶断裂转变。在 650–800 °C 高温区间塑性显著降低的根源在于晶界动态脆化效应：位错塞积诱导的弹性应力场梯度促进了氧原子向晶界的扩散富集。变形机制分析揭示：650 °C 时主导机制为位错剪切 γ 相诱导层错（SFs）形成；800 °C 时部分层错转化为微孪晶（MTs），多滑移系位错与微孪晶的交互作用致使应力-应变曲线呈现显著锯齿化波动。基于原子尺度 EDS 及热激活能计算证实，动态应变时效源于位错与经由管道扩散的置换原子（Cr、Co）之间的钉扎效应。

C04-24

增降氧过程对高温合金粉末表面特性和合金性能的影响

郑亮*、张强、张利冲、刘玉峰、张轶波、刘娜、许文勇、李周、张国庆

北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室

金属粉末是粉末冶金涡轮盘件和 3D 打印复杂构件的基础材料。在生产过程中，材料以粉末状态存在的工序主要包括粉末制备、粉末筛分、粉末除气以及衔接上述工序间的存储与转运等。存储和转运（增氧）过程中，粉末接触环境介质导致氧含量升高，会导致固结成形后原始颗粒边界缺陷的形成，从而对构件力学性能产生不利影响。通过适当的粉末除气处理工艺（降氧），可再将氧含量降低，改善合金的力学性能，从而满足零件的服役要求。掌握在存储/转运和除气过程中高温合金粉末的表面特性及其对合金组织和力学性能的影响，对于合金和零件制备过程的质量控制和工艺优化至关重要。本文采用 FESEM、XPS、HAADF-STEM 以及 TPD-MS 等表征手段研究了镍基高温合金粉末的原始表面状态以及存储和脱气等增/降氧过程对合金组织和性能的影响。结果表明：不同粒度原始态粉末的表面组成均为 NiO/Ni(OH)₂、TiO₂、CoO 和 Cr₂O₃，0~15 μm 粒径粉末（细粉）和 150~180 μm（粗粉）粒径粉末平均氧化膜厚度分别为 3 和 11 nm。细粉和粗粉在空气环境中存储后氧含量逐渐增大，在 3~10 天达到稳定值，分别约为 250 和 40 ppm。存储（增氧）后 0~53 μm 粉末制备的块体合金氧含量升高，拉伸性能强度变化不大，塑性下降，持久寿命下降。0~15 μm 细粉加热过程中（室温~1000 °C）会发生气体脱附，粉末表面气体的脱附温度范围主要在 100~600 °C，150~180 μm 粗粉加热过程脱附不明显。0~53 μm 的粉末采用 300 °C+600 °C 温度组合方式除气（降氧）后制备的合金氧含量从初始状态的 195 ppm 下降到 113 ppm。进一步采用高温合金粉末升温脱附曲线中峰位所处温度精确定制除气保温温度，通过 25 °C+150 °C+310 °C+470 °C 的低、中、高温组合多级除气处理使空气中存储过的高温合金粉末氧含量降至 87~96 ppm。高温合金粉末增氧机制主要包括表面氧化和表面吸附，而降氧机制主要为粉末表面吸附的含氧气体的脱出。本文为高温合金粉末除气降氧策略提供了新思路。

C04-25

磷微合金化对镍铁基合金中温蠕变行为作用机制的应力相关性

王常帅^{1,2}、吴云胜³、吴昊^{1,2}、赵勇^{1,2}、裴玉冰^{1,2}、王天剑^{1,2}、聂丽萍^{1,2}、高振桓^{1,2}、江雷^{1,2}、徐子煜^{1,2}、巩秀芳^{1,2}、周兰章³

1. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室， 德阳 618000

2. 东方电气集团东方汽轮机有限公司， 德阳 618000

3. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心，沈阳 110016

磷（P）微合金化是改善镍铁基合金中温、高应力、短时蠕变性能的重要途径，但低应力、长时蠕变过程中影响尚不明确，明确 P 微合金化在不同应力条件下的作用机制，对不同服役条件下镍铁基合金的 P 微合金化设计具有重要意义，因此，本文系统阐述了 P 微合金化对镍铁基合金不同应力水平下中温蠕变行为的作用机制。结果表明：P 微合金化对蠕变行为影响具有显著的应力相关性，其有益作用随应力的降低而减弱且最优磷含量降低。蠕变变形和断裂行为分析表明，P 微合金化降低晶内位错移动速率、减少晶界位错密度且增加晶界强度，使蠕变损伤由微裂纹向蠕变孔洞转变，从而改善蠕变性能，然而，随蠕变过程进行，P 在晶界偏聚程度显著增大且其对晶界 M23C6 影响减弱，降低相邻晶粒变形协调性和晶界结合力，其对蠕变行为的有益作用减弱，因此，其有益作用随应力的降低而减弱，采用 P 微合金化改善合金蠕变性

能需考虑服役条件。本研究为 P 微合金化镍铁基合金设计提供了技术支持与理论依据。

C04-26

Mechanistic Study of Grain Boundary Evolution in IN617 Nickel-Based Superalloy During High-Temperature Creep

Yue Wang*, Guma Yeli, Haitao Wang, Li Shi, Kejian Li, Bing Liu

Tsinghua University

Very high-temperature gas-cooled reactor is one type of the most promising nuclear reactors. The intermediate heat exchanger (IHX), a crucial component for transferring heat from the VHTR core, is expected to serve for several decades under low stresses of 3–8 MPa and at high temperatures of 850–1000 °C. Therefore, a high focus is placed on the high-temperature creep performance of the structure materials of IHXs. IN617, a Ni-based superalloy, has been considered the preferred structural material for IHXs. Creep tests were conducted on IN617 under 10 different combinations of temperature and stress in our early work. Evident dynamic recrystallization phenomena were observed in five of those combinations. In the present work, the microstructure characteristics of dynamic recrystallization of IN617 during creep were concentrated on. In addition, creep curves, percentage elongation after fracture, and percentage reduction of area for specimens experiencing dynamic recrystallization were given. The changes in grain size and grain boundary character after dynamic recrystallization were discussed. The microstructure characteristics of fracture surfaces were shown. The research deepens a better understanding of the microstructure evolution laws of IN617 during creep.

C04-27

4777DS1 高温合金与陶瓷型芯间界面反应和润湿性研究

杨强¹, 张琼元², 王富¹

¹西安交通大学机械工程学院, 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西, 西安 710049

²东方电气集团东方汽轮机有限公司, 清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 四川 德阳, 618000

高温合金熔体与陶瓷材料之间的润湿性与界面反应会直接影响到铸件的表面质量以及合格率。本文以 4777DS1 高温合金与 SiO₂ 基陶瓷型芯为研究对象, 采用座滴实验法研究了该合金在不同温度下与陶瓷型芯的润湿行为, 通过 SEM、EDS 和 XRD 等手段研究了不同温度下合金与陶瓷型芯的界面反应过程及反应产物, 进一步基于热力学分析法阐释了界面反应机制。结果表明, 温度对合金与陶瓷型芯之间的润湿行为和界面反应有显著影响, 润湿角随着温度的升高呈现出先减小后增大的趋势, 在 1480°C 时达到最大值 139°, 表明该温度下合金与陶瓷型芯润湿性较差, 具有较好的铸造性能。在 1520°C 时润湿角最小, 界面反应较为剧烈, 其界面反应产物主要为 Al₂O₃、SiO₂ 和 HfO₂, 且在反应层上还分布着一些富含硅和钨的晶体状产物。本研究可以为减小合金与陶瓷型芯反应, 提高叶片铸件表面质量与合格率提供技术支持与理论依据。

C04-28

粉末循环使用对激光选区熔化 GH4169 合金组织及拉伸行为的影响

宋巍、朱玉平、梁静静、周亦甯、孙晓峰、李金国*

中国科学院金属研究所

激光选区熔化 GH4169 合金粉末循环使用可以显著降低制备成本、缩短生产周期。但是, 循环使用的合金粉末使得成形的部件在组织缺陷、性能行为上均存在差异。本文研究了不同循环使用次数后 GH4169 合金粉末缺陷、粒径分布等对成形件热处理态组织、拉伸变形机制的影响。分析了热处理试样的断口形貌和断口附近透射组织特征, 详细阐述了拉伸断裂方式和强韧化机制。结果表明: 粉末多次循环使用后平均粒径由 30.45 μm 增大至 41.80 μm, 表面愈加粗糙使得流动性由 14.85 s/50 g 增加到 18.62 s/50 g, 较差的流动性导致热处理试样出现孔洞缺陷, 合金拉伸强度下降接近 100 MPa, 但断裂方式和变形机制不变。热处理态合金析出了纳米尺寸的块状碳化物、短棒状 δ 相、Laves 相以及 γ'' 和 γ' 强化相, 在拉伸过程中有效的钉扎位错, 使合金在室温和 650 °C 的最大抗拉强度分别达到 1430 MPa 和 1205 MPa, 优于或接近已报道的

锻造、铸造及增材制造 GH4169 合金。本研究结果为激光选区熔化 GH4169 合金的粉末循环使用、热处理制度制定和拉伸变形机制分析提供参考。

C04-29

激光增材制造镍基单晶高温合金的组织缺陷调控研究

陈超越*、王江、任忠鸣

上海大学

本文针对 L-DED 沉积 DD5 单晶高温合金的杂晶形成机理及控制、热循环诱导的原位热处理效应对于非均质组织的演化规律以及沉积后样品的退火工艺等关键问题，开展了系统研究。基于激光增材修复单晶高温合金的微观组织和缺陷控制研究发现，经过固溶预处理后铸态基板的元素偏析降低，共晶相和碳化物减少。更高的固溶预处理温度（1295 °C）可以均匀化枝晶干和枝晶间的组织差异，抑制枝晶间的粗大 γ' 相和 γ/γ' 共晶组织，减少碳化物含量。基于不同基板预固溶处理条件下的单晶基板，采用相同的工艺参数沉积了 36 层（约 16 mm）的样品，分析了结合界面处和沉积层内部的杂晶形成机制。结果表明，较低的基板热处理温度条件下， γ/γ' 共晶、枝晶间残余的粗大 γ' 相，导致了局部熔池的坍塌，使得枝晶生长取向发生变化，形成杂晶；在沉积层内部，由于残余应力诱导的再结晶是杂晶形成的主要原因。本文还研究了不同单层抬升量条件下杂晶组织的演变，随着单层抬升量的降低，沉积层中有更多杂晶被重熔，而随着沉积高度的进一步增加，顶部杂晶的体积分数增加，同时出现裂纹缺陷。开展针对原位热循环作用下激光增材修复单晶高温合金的微观组织演化行为研究。结果表明，热循环过程可以分为连续升温 and 连续降温过程，热循环诱导了沉积过程中 γ' 相的重新析出、长大和粗化过程。在单晶基板的热影响区内，热循环会促进二次 γ' 相的析出。通过优化固溶预处理工艺可以有效降低热影响区长度。冷却速度随着沉积高度的增加而降低，受到热循环效应和冷却速度的共同控制，碳化物体积分数先减小，在靠近顶部的位置，体积分数先增加后减小。

C04-30

粉末冶金镍基高温合金的超塑性成形研究

闫金帅、孙浩程、朱礼龙、江亮、阮晶晶*

烟台大学精准材料高等研究院

粉末冶金变形高温合金因其优异的综合力学性能被广泛应用于航空发动机热端部件，但其成形困难。通过热压缩实验获取流变应力应变曲线，经摩擦与温度修正建立本构模型可以用于合金变形行为预测，指导合金热变形工艺参数。然而，该方法的准确性高度依赖实验数据的质量，实验过程中压头与试样间的摩擦、热传导及绝热温升等因素对实验数据的有效性造成负面影响。本研究针对上述问题，采用恒温炉对试样与压头同步加热，有效消除了样品两端热传导效应，保证了试样温度的均匀性；利用原位数字图像相关（DIC）技术实时监测压缩过程中试样的几何形状变化，获得压缩过程中随应变变化的摩擦因子，对流变应力应变曲线进行摩擦与温度修正，构建了粉末冶金变形高温合金的本构模型。在此基础上，建立了合金的热加工图，确定了安全的加工窗口。通过小试样拉伸实验揭示了材料的超塑性工况，结果与热加工图呈现良好一致性。结合等温锻造设备与预测的超塑性工况区间，成功锻造出中型尺寸锻件。

C04-31

磷微合金化对不同热加工历史的 GH984G 合金热变形行为的影响

吴云胜^{1,2}、王常帅^{3,4}、管现军^{1,2}、侯介山^{1,2}、周兰章^{*1,2}

1. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心
2. 中国科学院金属研究所中国科学院核用材料与安全评价重点实验室
3. 清洁高效透平动力装备全国重点实验室
4. 东方电气集团东方汽轮机有限公司

磷微合金化技术显著提升 650°C~700°C 超超临界燃煤电站核心锅炉管道用镍铁基合金的承温能力，对提高电站热效率及降低碳排放具有重要意义，但热变形难度增大、变形组织难以调控成为限制该技术应用

的核心问题。针对管材部件制备工艺的复杂性及各工序变形材料热加工历史的差异性，本研究关注磷微合金化对具有不同热加工历史（均匀化态、锻态、热轧态）的镍铁基 GH984G 合金热变形行为的影响，阐明磷对热变形关键进程（动态再结晶）的作用机制，**开发基于工序状态的含磷合金热变形工艺技术。**

结果表明，**磷通过改变连续动态再结晶（CDRX）形核进程影响合金的热变形行为。**首先磷促进 MC 碳化物析出，产生 MC 促进 CDRX 形核效应，其次固溶于基体的磷原子阻碍 CDRX 形核过程中的位错运动，形成固溶拖曳效应。均匀化态合金晶粒粗大，热变形中 CDRX 发挥重要作用，其热变形受 MC 促进 CDRX 形核及磷原子固溶拖曳双重作用的影响，再结晶程度随磷含量的增加呈先降低后增加的变化趋势；锻态合金晶粒细小，CDRX 仅在低温下发挥作用，其热变形仅受 MC 促进 CDRX 形核效应的影响，再结晶程度随磷含量的增加而增加；热轧态合金晶粒显著细化，以非连续动态再结晶（DDRX）为主，热变形行为几乎与磷含量无关。**不同热加工历史合金的最优热加工参数范围存在明显差异。**均匀化态合金的最优热加工参数位于高温低应变速率区（1050°C~1200°C/0.01s⁻¹~0.2s⁻¹），在高温高应变速率区（1100°C~1200°C/1.0s⁻¹~10s⁻¹）出现加工失稳现象，且随着磷含量的增加，最优热加工参数范围缩小，加工失稳参数范围扩大。热轧态合金最优热加工参数位于高温高应变速率区（1000°C~1200°C/1.0s⁻¹~10s⁻¹），磷含量对最优热加工参数的影响较小。**根据上述基于工序状态的含磷合金热变形工艺技术，已成功制备出 GH984G 合金 Φ560×80mm 大口径管材。**

C04-32

双相细晶 GH4065A 变形高温合金高温疲劳损伤与断裂行为研究

李林翰^{1,2}, 张文云^{1,2}, 沈中敏^{1,2}, 段然^{1,2}, 刘康康^{1,2}, 张北江^{1,2}

¹北京钢研高纳科技股份有限公司

²四川钢研高纳锻造有限责任公司

作为新一代航空发动机用主干变形高温合金，GH4065A 合金具有高合金化、超低碳、双相细晶的组织特征。研究合金在高温疲劳条件下的损伤与断裂行为，对保障合金锻件在先进航空发动机上长期服役的安全性与稳定性，具有重要意义。本研究采用多尺度非原位/准原位表征手段，分别通过细晶组织试样与粗晶组织试样、均质完全再结晶组织试样与含残留未完全再结晶组织试样的对比研究，揭示了合金在不同加载条件下的疲劳失效主导机制。结果表明：细晶状态下，氮化物主导高载荷表面起始断裂失效与低载荷近表面/内部起始断裂失效，一次 γ' 界面相比孪晶，对裂纹扩展起到更好的阻碍作用；粗晶状态下，滑移诱发的解理断裂主导失效。合金少量未完全再结晶组织对疲劳性能无明显影响，未完全再结晶区域整体对疲劳滑移变形有较高抗力，对内部的氮化物诱发裂纹的扩展和滑移带诱发的开裂都有很好的限制作用。本研究对 GH4065A 合金在国产商发上的长时服役寿命评估与失效研究具有重要理论参考价值。

C04-33

基于温场均匀性的镍基高温合金单晶叶片向下定向凝固新技术

王富*

西安交通大学

迟滞效应是采用传统圆环型模壳及圆桶型加热/冷却系统制备镍基高温合金单晶铸件时，在定向凝固过程中出现的一种本征现象。该效应会导致杂晶和雀斑的大量形成，显著降低单晶铸件的成品率。为了有效控制迟滞效应，本文提出了一种基于温场均匀性的向下定向凝固（TUDWDS）新技术，系统比较了该工艺与传统高速凝固（HRS）工艺在控制雀斑和杂晶缺陷方面的效果，并通过实验和模拟方法验证了其控制迟滞效应的能力。研究表明，TUDWDS 工艺具有凝固方向与重力方向一致的特点，能够从根本上消除定向凝固过程中糊状区内的溶质纵向对流，从而完全消除雀斑缺陷。此外，与 HRS 工艺相比，TUDWDS 的平行加热/冷却系统提供了更为均匀的温度场，显著减少了单晶铸件中的杂晶缺陷。这些结果表明，TUDWDS 工艺在控制迟滞效应方面表现出强大的能力。此外，新工艺有助于强化传热方向，进而提升定向凝固过程中的整体换热效果和热梯度，进一步减少因较低热梯度而导致的缺陷。因此，该工艺在单晶铸件的工业生产中具有广阔的应用前景。

C04-34

单晶涡轮叶片凝固组织、缺陷和性能的二次取向相关性

杨文超*

西北工业大学

报告采用籽晶法制备了具有不同二次取向单晶叶片，通过对其凝固组织进行系统分析，讨论了在不同二次取向条件下单晶叶片缘板区域枝晶生长行为；借助 ProCAST 和 Fluent 仿真模拟，明确了枝晶在高次分枝过程中的取向变化，讨论了温度场演化对枝晶生长行为的影响，明确了枝晶生长对杂晶、破碎枝晶和小角晶界等凝固缺陷的影响机理，提出了二次取向调控单晶叶片凝固缺陷控制方法；从不同二次取向的单晶叶片本体取样，研究了不同二次取向控制条件下单晶叶片的蠕变性能，提出了基于位错运动、微孔形成、裂纹萌生和扩展并导致样品断裂的蠕变性能二次取向效应机制。

C04-35

基于机器学习和多目标优化的镍基高温合金设计：实现高蠕变寿命与低热膨胀系数

彭望君、杜大帆*、董安平、孙宝德

上海交通大学

镍基高温合金凭借其优异的高温性能在航空航天领域具有重要应用。本研究针对传统试错法在合金设计中存在的效率低下和探索空间受限等问题，提出了一种基于机器学习的多目标优化设计方法，旨在实现合金蠕变寿命提升与热膨胀系数降低的协同优化。首先构建了包含蠕变寿命和热膨胀系数（CTE）的合金性能数据库。通过互信息算法定量分析特征与性能指标的关联性，筛选出与蠕变寿命显著相关的关键特征变量；同时采用三步特征选择法确定影响 CTE 的核心特征。然后，基于优选的特征，建立梯度提升回归（GBR）预测模型，蠕变寿命和 CTE 预测模型的测试集决定系数（R²）分别达到 0.88 和 0.85。最后，应用遗传算法优化，实现单目标优化：蠕变寿命提升 12.18%、CTE 降低 10.02%；多目标优化：获得新型合金 Ni62.5Ta11Cr8Al5.5W5Re4Mo3Co1 蠕变寿命达到 6784.08 小时，CTE 降至 12.50 e-6·°C-1，较原数据库，蠕变寿命提升 12.18%，CTE 降低 10.02%。此外，研究引入 SHAP（Shapley Additive Explanations）方法解析关键特征对性能的影响机制，显著提升了模型的可解释性。本研究为镍基高温合金的高效设计提供了新思路，对航空航天材料开发具有重要指导价值。

C04-36

元素扩散和残余应变的耦合作用对含 NiCrAlYSi 涂层 DZ125 合金近服役条件下互扩散区晶粒演变的影响

翟梦园、孙栋、李一航、李龙飞、郑为为、冯强*

北京科技大学 新金属材料全国重点实验室

航空发动机涡轮叶片涂层/合金基体界面互扩散区晶粒的产生会降低叶片承载面积，进而影响服役性能。已有的研究表明，该区域晶粒的形成及演变与吹砂引入的残余应变及元素互扩散相关，但具体作用机制尚不明确。本研究以仅吹砂处理和吹砂后表面沉积 NiCrAlYSi 涂层的 DZ125 合金为对象，通过分析扩散热处理及近服役温度热暴露过程中互扩散区（IDZ）的显微组织演变，揭示了涂层/合金基体界面互扩散区晶粒的生长机制。结果表明：扩散热处理阶段互扩散区胞状再结晶的形成主要由于元素的扩散作用，吹砂引入的残余应变不足以诱发显著再结晶；随着热暴露时间的延长，在残余应变与元素梯度共同驱动下，互扩散区晶粒的持续生长导致 IDZ/DZ125 合金基体界面前移，并与元素互扩散作用协同促进粗大 γ' 相和 Cr₂₃C₆相析出。900 °C 时互扩散区晶粒生长主要受元素扩散主导，而 1000 °C 时由残余应变与元素扩散共同驱动，其中 Cr 元素为影响晶粒生长的关键元素。本研究为后续明确不同互扩散区深度对力学性能的影响奠定了基础。

C04-37

利用激光釉化评估钇 (Y) 对高 γ' 含量镍基高温合金增材制造成型性能的影响

李云婷、王俊*、康茂东

上海交通大学

热裂纹是制约增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 高 γ' 含量镍基高温合金发展的关键问题, 主要包括凝固开裂与液化开裂机制。近年来, “偏析工程”策略被证实可有效缓解热裂倾向, 尤其在 AM 镍基合金与高熵合金中已显示出显著成效。例如, 通过合金元素如 Zr、C 和 Al 的设计调控, 已在多种合金体系中实现了裂纹的抑制。本研究提出一种以稀土元素钇 (Y) 为核心的偏析工程方法, 利用其在枝晶间的强偏析行为与极低固溶度, 构建富 Y 相网络结构, 以调控枝晶间液膜稳定性, 达到降低热裂风险的目的。进一步, Y 元素对氧化性能的潜在提升作用, 使其具备实现抗热裂与高温性能协同优化的独特优势。为在低成本前提下评估新合金成分的可打印性, 采用激光釉化 (laser glazing) 技术模拟激光增材制造中的熔池行为。通过 Thermo-Calc 热力学模拟计算不同 Y 含量下的凝固开裂因子 (Solidification Cracking Index, SCI), 结果显示, SCI 值随 Y 含量变化呈非单调趋势, 指示出存在最优 Y 含量窗口。实验方面, 制备不同 Y 含量的纽扣锭并进行激光釉化处理, 系统观察多道次熔池组织与裂纹特征。结果表明, Y 含量升高导致单位面积裂纹数量减少, 但裂纹长度、宽度与深度有所增加。EBSD 分析显示 Y 元素促使晶粒尺寸减小, 机制源于其对凝固前沿过冷度的提升与形核率的增强。结合 FIB-Ring-DIC 实验进一步揭示了 Y 对枝晶间残余应力的调控作用, 有助于减缓局部应力集中, 降低裂纹萌生风险。综上, 本研究表明 Y 元素通过多重机制综合降低了 AM 镍基合金的热裂倾向, 并验证激光釉化作为新合金设计的有效筛选手段, 为高性价比合金开发和稀土元素在 AM 领域的推广应用提供了理论基础与实验支撑。

C04-38

热处理对激光粉末床熔融 IN718 高温合金微观组织和强化机制的影响规律

杨培鑫、苏海军*、胡全栋、郭一诺、霍传腾

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

IN718 高温合金是航空航天领域中温热端部件领域应用最广的材料之一。激光粉末床熔融技术 (LPBF) 能够有效解决传统制备技术形成的组织粗大、宏观偏析等瓶颈问题, 但成形过程中高的冷却速率和大的温度梯度易导致沉积态中难以析出强化相, 且热处理工艺与打印高温合金不匹配易引起强塑性失衡。本文探究了热处理对 LPBF 成形 IN718 高温合金微观组织的演变规律和强化机理, 发现热处理改善了 IN718 的微观偏析, 提高了组织的均匀性。中温固溶处理冷却速率的降低有利于延长 δ 相的析出时间, 并增加了其体积分。此外, 复杂位错和第二相颗粒在拉伸变形过程中阻碍了位错的滑移, 提升了力学性能。另外, 异质成核中心的 CrFeNb 颗粒有效地促进了晶粒的细化, 且未引入额外的残余应力。在热处理过程中 CrFeNb 扩散并溶解, 形成富 Nb 的脆性相, 晶内出现大量亚晶界。在三种强化机制的共同作用下, IN718/CrFeNb 复合材料在室温下的力学性能得到了明显提升。本研究为 IN718 高温合金组织的均细化及性能提升提供了实验和理论依据。

C04-39

镍基高温合金单晶定向凝固过程的多物理场建模与凝固缺陷调控

李军*、任能、杨绿伟、曾龙、夏明许、李建国

上海交通大学

由于复杂的几何尺寸以及特殊的热场环境, 导致镍基高温合金单晶叶片定向凝固制备中产生雀斑、杂晶、条纹晶等缺陷。定向凝固中凝固缺陷的形成是一个集晶粒形核、生长、熔断、运动、溶质再分配与迁移等行为共同作用下的多相共存、多物理场共同作用、跨尺度的复杂过程, 其形成过程的数值模拟预测具有很大的挑战。研究团队建立了定向凝固过程的欧拉两相流凝固模型及元胞自动机-欧拉多相流的枝晶生长/重熔预测模型, 成功预测了 1) 镍基高温合金在定向凝固过程中溶质富集流以及通道偏析的形成、发展和消亡的行为; 2) 通道偏析形成状况下的树枝晶的生长、重熔和断裂行为; 3) 以及溶质冲刷及热应力作用下的枝晶变形行为等。发现了径向热流在定向凝固过程中的通道偏析形成和消失, 以及对枝晶生长和熔断扮演

了尤为关键的角色。揭示了高温合金铸件中通道偏析的产生、呈现出特殊分布规律的机理，以及雀斑链的产生、雀斑晶粒分布规律和尺寸特征的等物理机制。为镍基单晶高温合金铸件中雀斑等缺陷的控制和消除提供了重要的理论指导。并结合对各类凝固缺陷产生机制的认识，发展了基于复杂叶片横截面形貌的自适应应变拉速方法，有效改善了雀斑、杂晶等凝固缺陷。

C04-40

相场法快速设计单晶高温合金热处理工艺

陈佳^{*1,2}、郭敏¹、杨敏¹、苏海军¹、刘林¹

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室
2. 清华大学航天航空学院应用力学实验室

单晶高温合金作为航空发动机和工业燃气轮机热端部件的关键材料，多采用定向凝固技术制备。然而，该技术形成的凝固组织通常存在枝晶偏析和晶间二次相，需通过多级热处理进行调控，以消除该不均匀性并析出 γ' 强化相。需指出的是，热处理制度选择不当会导致局域初熔，形成微米级的孔洞缺陷。此类缺陷不仅改变 γ' 相的体积分数与空间分布特征，还将显著降低合金的高温疲劳抗力等力学性能。针对以上问题，本研究提出了基于相场模拟的热处理工艺设计策略，通过建立固相线温度与成分变量之间的关系，利用相场模拟实现了固溶过程中初熔温度的实时追踪；进一步结合 γ' 相组织特征评估因子，对时效温度和时间进行了快速筛选。基于此，以 Co-30Ni-11Al-4W-1Ta-4Ti-5Cr (at.%) 多元单晶高温合金为研究对象，对其热处理制度进行优化，优化后的工艺为：固溶-1260°C/0.5 h + 1270°C/2.5 h + 1280°C/5 h + 1285°C/6.5 h + 1287°C/5.5 h，时效-1050°C/2.7 h + 860°C/20 h。实验验证发现，经优化工艺处理后的试样的组织和成分分布均匀，晶间二次相含量低于 0.1% 且未出现固溶孔洞， γ' 相体积分数为 75%，等效边长为 480 nm，形状因子为 0.72。

C04-41

Exploring avenues for tailoring the thermal stability of hierarchical microstructures in Ni-based superalloys via phase targeted alloy design

Florian Vogel*

Hainan University

The performance of Ni-based high-temperature structural materials for critical components in jet engines and gas turbines, is defined by the alloys' high-temperature properties and microstructural stability. Performance, service life and sustainability of such alloys are critically intertwined and controlled by microstructure and phase chemistry. Ni-based superalloys comprise a γ matrix (A1) with cube-shaped γ' precipitates (L12), a hierarchical microstructure is created when additional nanoscale γ particles emerge within γ' precipitates. Such hierarchical microstructures show a prominent impact on mechanical and high-temperature creep properties of Ni-based superalloys [1,2]. However, research has identified two metastability pathways: The γ particles either emerge as spheres and then transform to plates which further grow and split γ' precipitates, or they grow and then gradually dissolve within γ' precipitates. Both scenarios result in a loss of the strengthening effect. Such behavior is determined by phase chemistry and intrinsically linked to thermodynamics, i.e. enthalpy of mixing of γ' , elastic energy and interface energy, and kinetics controlled by diffusivity.

Here, we explore the impact of adding γ forming elements to Ni86.1-nAl8.5Ti5.4Xn with X = Cr, Co, Mo, Ru, W, Hf or Re and n = 1–4 at.%, on formation and thermal phase stability of hierarchical microstructures. We show that phase targeted alloy design by adding γ forming species enables to specifically trigger partitioning to the hierarchical γ particles, and thereby to control their morphology and thermal stability. We utilized transmission electron microscopy (TEM), atom probe tomography (APT) and ThermoCalc to ascertain the fundamental mechanisms underpinning the formation and thermal stability of hierarchical microstructures in the context of thermodynamics and kinetics. We compare our experimental phase chemistry data to predictions made by ThermoCalc. Our work demonstrates avenues for enhancing the thermal stability of hierarchical microstructures

via phase targeted alloy design.

C04-42

Temperature-Dependent Deformation Mechanisms of γ' Phases in a Newly Developed NiCoCr-based Superalloy

Zhongfeng Chen, Anping Dong*, Yunwei Pan, Baode Sun
Shanghai Jiao Tong University

The γ' -strengthened NiCoCr-based superalloys are extensively used in aerospace, energy, and chemical industries. This work focuses on tensile properties and evolution of deformation mechanism in a newly developed NiCoCr-based superalloy, designated K439B, at temperatures ranging from 25 °C to 1000 °C. The results demonstrate that the deformation mechanisms of this alloy are temperature-dependent. Slip bands and strongly-coupled dislocation pairs shear γ' precipitates at 25 °C, resulting in high yield strength and work hardening rate. At 600 °C and 700 °C, the Lomer-Cottrell (L-C) locks are observed, and stacking faults shearing γ' precipitates become the primary deformation mechanism. At temperatures reaching 800 °C, the yield strength exhibits an anomalous increase originating from the formation of Kear-Wiltsdorf (K-W) locks. When the temperature exceeds 800 °C, the primary deformation mechanism is transformed into dislocations bypassing γ' through the Orowan mechanism. The present study elucidates the deformation mechanism of this novel designed superalloy, thereby furnishing a theoretical foundation for the further development of the alloy system.

C04-43

激光填粉焊接 GH4099 合金的组织与性能研究

卢爱琪、张尚洲*、孙小飞、秦松
烟台大学精准材料高等研究院

本研究针对 GH4099 镍基高温合金在常规焊接中（如 TIG 焊）因高能量输入导致变形及潜在焊接缺陷的问题，采用粉末填充激光焊技术。通过调控坡口角度、激光功率、焊接速度与送粉速率优化焊缝质量，并协同焊后热处理（PWHT）强化组织。利用 EBSD、SEM-EDS 及 TEM 表征接头微观组织演变，结合显微硬度和室温拉伸性能测试评估性能。结果表明：增加焊接速度能显著细化熔池区晶粒尺寸，增加激光功率则因热积累效应致使晶粒粗化。PWHT 有效消除了焊接引起的元素偏析，诱导焊态亚稳态 TiC 碳化物向稳定相 Cr_{23}C_6 转变，促进大量 γ' 强化相 ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) 均匀析出（体积分数达 35%），显著强化焊接接头。热处理后接头室温平均抗拉强度从焊态 898 MPa 提升至 1103 MPa（母材强度 1189MPa），延伸率从焊态 15% 增加至 20.1%（母材 33%），主要源于晶界处链状的 Cr_{23}C_6 碳化物形成。本研究为优化该合金焊接工艺及工艺评估提供基础。

C04-44

基于二次离子质谱法的高温合金中痕量稀土镧微区分布研究

高颂*^{1,2,3}、韩弢^{1,2,3}、王亚宁^{1,2,3}、高玄之^{1,2,3}、张艳^{1,2,3}、田悦鸣^{1,2,3}、郑松波^{1,2,3}

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室
3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室

镧 (La) 作为添加剂可提升高温合金抗氧化性能，但其微区分布失衡会导致力学性能恶化（如晶界脆化）。传统的宏观分析无法解析痕量元素区域性特征，本研究通过二次离子质谱 (SIMS) 与场发射扫描电镜 (FE-SEM) 联用技术，结合自主研发的微区标准物质，实现了单晶高温合金中痕量 La (<100 ppm) 的高精度微区定量分析。技术体系包含：①优化 SIMS 二次离子扫描模式与能量偏置 (0 至 -50 eV)，消除 $^{139}\text{La}^+$ 与 $^{96}\text{Mo}^{27}\text{Al}^{16}\text{O}^+$ 等同位素干扰；②采用微区均匀性 La 标准物质（不确定度 $\leq 5\%$ ）校正灵敏度；③配合微米离子束压痕标记 ($3 \times 3 \mu\text{m}^2$) 精准定位析出相区域，结合 FE-SEM 建立微区组织-成分关联图谱。结果显示，La 元素在析出相富集达基体的 2-6 倍，横向/深度分辨率达 $5/0.1 \mu\text{m}$ ，检出限达 0.5 ppb (0.0005

$\mu\text{g/g}$)。该技术为航空发动机高温合金中稀土掺杂工艺的优化提供了定量支撑,并可推广至核材料、高熵合金等领域的关键元素微区分布研究。

C04-45

钴基高温合金中 μ 相元素择优占位及面缺陷转变机制的研究

葛炳辉^{*1}、陈伟¹、赵云松²、费晓宇³、南鹏飞¹、张永胜³、金辉鑫⁴

1. 安徽大学

2. 北京航空材料研究院

3. 曲阜师范大学多学科科学高等研究院

4. 东京理工大学材料科学与技术系

我们利用先进的球差校正电子显微镜,结合原子分辨率元素分析及第一性原理计算,深入探究了高温合金中拓扑密堆 μ 相中的面缺陷。研究识别了两种不同类型面缺陷的原子结构,提出了它们之间的相互转换机制,并发现过渡金属元素(如 Cr)在 μ 相基体及缺陷界面处存在显著的择优分布现象,这种分布降低了缺陷形成能,增强了结构稳定性。该工作为深入理解 μ 相面缺陷对蠕变行为和高温耐久性等作用机制提供了直接的原子尺度证据和理论支持,为设计高性能高温合金提供了关键见解。

C04-46

第三代镍基单晶高温合金高温超高周疲劳准原位研究

易文静¹、黄亚奇²、王绍钢³、王栋²、李亚微²、王莉²、Cormier Jonathan⁴、张健^{*2}

1. 创意与艺术学院智造系统工程中心, 上海科技大学

2. 高温结构材料研究所, 中国科学院金属研究所

3. 沈阳材料科学国家实验室, 中国科学院金属研究所

4. Institut Pprime, UPR CNRS 3346, Physics and Mechanics of Materials Department, ISAE-ENSMA, 1 avenue Clément Ader, BP 40109, Futuroscope-Chasseneuil, CEDEX 86961, France

单晶叶片服役时部分区域(前缘/尾缘/叶尖等)工作温度超 1000°C , 并受振动载荷作用, 造成高温超高周疲劳损伤。本文以第三代单晶合金为研究对象, 准原位观测高温超高周疲劳损伤过程, 阐明高温氧化与铸孔交互作用对裂纹萌生影响, 深入理解损伤机理。结果表明: 裂纹源为次表面大铸孔(约为最大孔尺寸 90%)。疲劳加载后, 样品表面发生高温氧化出现横向裂纹, 同时次表面铸孔附近局部损伤累积产生双向滑移。随着周次增加, 表面氧化加剧且横向裂纹扩展, 次表面双向滑移数量增加。当加载至 $\sim 15\%N_f$ 时, 表面氧化层沿滑移带开裂, 且双向滑移耦合作用诱发纵向裂纹。氧沿着开裂的氧化层和滑移带由外向内扩散, 与次表面铸孔相遇造成铸孔内氧化。随着疲劳进行, Al 向铸孔界面扩散, 在铸孔附近产生贫化区和 Kirkendall 微孔, 析出针状 AlN 脆性相, 使铸孔附近强度减弱, 裂纹更易沿双向滑移带开裂萌生。裂纹扩展模式为 Mode-II 型, 仅存在单向滑移。本研究为提升单晶合金超高周疲劳性能、保证长时服役奠定基础。

C04-47

“两机”用高纯净高性能铸造高温合金研究

彭伟平, 卢华东, 金开锋, 赵帅, 李璐璐

江苏奇纳新材料科技有限公司

高温合金作为航空发动机、燃气轮机的涡轮叶片、燃烧室部件的关键制备材料, 面对更高进口温度的严苛服役环境, 制备关键构件的高纯净度高温合金母合金起到关键作用。本文以工业制备等轴 Rene80 合金、定向 IN792 合金、单晶 DD5 合金为对象, 分析了金属原材料预处理、熔炼工艺及过滤系统对母合金氧氮水平与浮渣能力的影响规律, 研究不同工艺对高温合金母合金的夹杂物及高温持久性能的影响规律。结果表明: 原材料经过表面处理和烘烤, 可进一步降低 O 与杂质元素 Cl、Ca 等元素引入合金中; 实验得出最佳精炼温度与精炼时间, 完成脱氧与合金化过程; 浇铸系统优化为双档渣双过滤, 分段过滤残留冶炼杂质, 使合金浮渣水平稳定控制在 0.5% 以下, 为铸造高纯净高性能高温合金母合金提供了量产数据支撑。

C04-48

新型镍基粉末高温合金热处理冷却过程中的 γ' 相演变王杰^{1,3}、黄海亮^{*2}

1. 钢铁研究总院高温材料研究所
2. 烟台大学精准材料高等研究院
3. 北京钢研高纳科技股份有限公司

作为镍基粉末高温合金中的主要强化相， γ' 相的演变对合金的组织调控和热加工性能具有重要影响。本文采用恒定温度/时间-不同冷速冷却实验研究了新型镍基粉末高温合金 A1 在亚固溶及过固溶热处理冷却过程中不同种类 γ' 相的演变，定量分析了冷速对 γ' 相尺寸、面积分数以及密度等的影响，采用线性回归方法拟合得到了 γ' 相尺寸与冷速的定量关系。结果表明：亚固溶冷却过程中， γ' 相存在溶解、析出和长大行为。随着冷速逐渐降低，亚固溶保温过程中未溶解的一次 γ' 相发生溶解，当冷速降为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，晶界处一次 γ' 相数量和尺寸增加；未溶解的二次 γ' 相发生长大，同时有新的二次 γ' 相在基体中析出长大；三次 γ' 相则在 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 冷速下析出，随后长大。过固溶冷却过程中， γ' 相只发生析出和长大。不同温度下二次 γ' 相和三次 γ' 相平均直径和冷速关系式中的平均决定系数 R^2 为 0.94。研究结果可为合金的组织调控和热加工工艺优化提供数据和理论支撑。

C04-49

FeHf₂ 异质结构的高温热处理难点与解决措施

黄俊涵、罗乙娟*

学院路 30 号北京科技大学

Hf 原子由于大尺寸原子效应以及与其他溶质原子之间的混合负焓，在高熵合金、单晶 Ni 基合金等新材料领域中拥有巨大的应用潜力。但 Hf 原子极易形成大尺寸脆性金属间化合物，如 FeHf₂，造成材料机械性能断崖式降低。常用高温热处理手段不能够彻底解决 FeHf₂ 析出问题。在本研究中，通过原位扫描电镜、TEM 以及 FIB 手段，解析了 FeCrAl 合金中 FeHf₂ 金属间化合物高温热行为。结果揭示了高温热处理方式对于抑制大尺寸 FeHf₂ 析出过程不具有彻底性，本质原因是部分 FeHf₂ 以 HfC 为核心的异质结构存在。FeHf₂ 与 HfC 之间具有优良的错配关系，FeHf₂-HfC 的异质结构提高了 FeHf₂ 析出温度。为彻底解决 FeHf₂-HfC 异质结构析出问题，采用碳原子改性处理，并通过高温淬火+中温退火方式促进纳米 HfC 相析出。

墙报

C04-P01

Al 含量对一种第二代镍基单晶高温合金蠕变性能及组织稳定性影响研究

岑宇欣^{1,2}、闵师领^{1,2}、李佳声²、王莉^{*2}、董加胜²、楼琅洪²

1. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院
2. 中国科学院金属研究所 高温结构材料研究部

目前镍基单晶高温合金以 Re、Ru 为主的强化理念在全球资源紧缺环境下难以适用，因此亟待开发新型低成本高性能合金设计方案。基于 Al 具有价格低廉及储量丰富优势，本工作系统研究了 Al 含量(5.4-5.9 wt.%)对一种二代镍基单晶高温合金蠕变性能与高温组织稳定性的影响规律及作用机制。结果表明，随 Al 含量增加合金中温蠕变(850 °C/650 MPa)寿命由 62 h 提高至 186 h；高温蠕变条件下(1100 °C/137 MPa)，当 Al 含量提高至 5.75 % 时，蠕变寿命达到峰值(188 h)，继续提高 Al 含量至 5.9 % 时，蠕变寿命下降至 159 h。1100 °C 长时热暴露实验发现，不同 Al 含量合金 γ/γ' 界面扩散行为存在差异，5.9 % Al 合金 γ' 相粗化速率显著高于其余合金，因而其在高温蠕变过程中应变软化更加明显，蠕变寿命缩短。不同蠕变阶段的组织演化机制分析表明 Al 含量的提高降低 γ/γ' 晶格错配度，使蠕变过程中形成的位错网更为致密，从而获得更大的蠕变抗力，并且 Al 含量提升减小了基体通道宽度，Orowan 阻力增大，降低了稳态蠕变速率，从而显著延长蠕变寿命。本工作通过研究 Al 含量对合金显微组织、蠕变性能的影响机制，获得了一种低成本

高性能的镍基高温合金，为解决镍基单晶高温合金成本与性能的矛盾问题提供了一种新思路。

C04-P02

镍基定向柱晶高温合金在低氧分压下腐蚀行为研究

车雪雨、玄伟东*、赵丹、邵冠兰、尹茗慧、刘铭、任忠鸣

上海大学

航空发动机燃气环境中，燃料不完全燃烧或空气掺混不均可导致局部氧分压低至 10^{-10} ~ 10^{-20} atm。值得注意的是，即使在此极端低氧条件下，镍基高温合金仍表现出显著腐蚀倾向。本研究聚焦镍基高温合金 CM247LC 在 1100°C 、 10^{-5} atm 氧分压条件下的氧化膜演化机制。结果表明：随着腐蚀时间延长，合金氧化膜厚度逐渐增加。腐蚀时间达到 10h 时，合金表面氧化膜出现大量剥落。合金氧化过程受金属阳离子向外扩散和氧向内扩散协同控制，合金氧化膜最终形成四层结构，分别由最外层 NiO/CoO、次外层 Cr_2O_3 、次内层 TiTaO_4 和最内层 Al_2O_3 组成。氧化初期，低氧分压诱导合金发生内氧化，优先形成 Al_2O_3 沉淀；同时合金内 Cr、Ti 和 Ta 元素扩散形成 Cr_2O_3 、 TiO_2 和 Ta_2O_5 。随着反应进行， TiO_2 和 Ta_2O_5 发生固相反应，在 Cr_2O_3 下方生成 TiTaO_4 。氧化时间延长到 30min 后，Ni 和 Co 元素发生外氧化形成最外层 NiO/CoO； Al_2O_3 沉淀持续向内生长为保护性氧化膜，并在 Al_2O_3 与基体界面处形成大量纳米级 HfO_2 颗粒。低氧分压降低了氧的化学势梯度，减弱了氧扩散的驱动力，从而显著降低氧化速率。

C04-P03

钨纤维增韧钨复合材料的纤维异常再结晶行为

陈畅*、陈寅、王珊、汪京、罗来马

合肥工业大学

钨材料是未来核聚变装置中极具应用潜力的面向等离子体材料。然而，钨的脆性限制了其应用。基于纤维增韧原理，本文以拉拔钨纤维 (Wf) 作为增韧相，设计了钨纤维增韧钨基 (Wf/W) 复合材料，研究了 Wf 含量以及烧结温度对复合材料组织与性能的影响规律，探究了复合材料的异常再结晶机理。结果表明：Wf 的引入以有效提高 W 材料的韧性，Wf/W 复合材料弯曲过程中表现出明显“伪韧性”特征。1400 $^{\circ}\text{C}$ 烧结时，Wf 含量为 50% 的复合材料具有最好的韧性，断裂能达 5.31KJ/m²。然而，当烧结温度超过 1400 $^{\circ}\text{C}$ 时，由于复合材料中钨颗粒与 Wf 表面的冶金结合，诱发了钨纤维表面异常再结晶和晶粒生长，再结晶晶粒尺寸随着烧结温度的提高以及 W 粉粒径的减小而变大，导致 Wf 脆化，复合材料的韧化失效。为此，在 Wf 表面镀一层 Y₂O₃ 薄膜可阻止其异常再结晶，使 Wf 保持良好的力学性能，并且可以促进基体/纤维的界面开裂，从而有效提升了复合材料的韧性。本研究为钨基复合材料的强韧化提供了技术支持与理论依据。

C04-P04

NiCoCr 基合金的力学性能与变形机理研究

陈奕、周鑫、朱礼龙、江亮、阮晶晶*

烟台大学

氧化物弥散强化 (ODS) 合金通过 Hall-Petch 或 Orowan 机制阻碍位错运动，在很大的温度范围内提高了合金的强度和抗蠕变性能。然而，生产 ODS 合金的传统机械合金化工艺流程长、效率低、成本高且难以加工复杂形状。为解决这一问题，NASA 通过 ICME 开发了新型增材制造用 ODS 合金 GRX-810，其具有极高的强度和延展性，与目前广泛应用的 AM 高温合金相比，ODS-GRX-810 在 1093 $^{\circ}\text{C}$ 下的机械性能提高了 2 倍，抗蠕变性能提高了 10 倍以上，抗氧化性能也提高了 2 倍。打印的 GRX-810 合金部件可满足极端环境应用的需求，但粉末制备工艺和 SLM 工艺都对外严格保密。因此，我们希望设计出相较于 GRX-810 成本更加低廉、性能更加优异的合金。GRX-810 合金中加入 Re 以提高高温强度，所需成本高昂。我们提出了 Ta 和 Mo 等元素取代 Re 以提高材料高温强度的思路，同时结合 Thermo-Calc 热力学计算软件确定合金的具体成分及热处理工艺参数，以设计出兼顾机械性能、可打印性和成本的 NiCoCr 合金。我们对合金的力学性能以及变形机理进行了研究，优化后合金的力学性能达到预期效果，并且在合金中发现了大量的层错与变形孪晶，这使得合金具有优异的强塑性性能。

C04-P05

交变磁场热处理对 UGTC47 高温合金组织稳定性及蠕变性能的影响机制研究

樊志明¹、玄伟东^{*1}、张滢¹、周金鑫¹、徐松哲¹、王保军¹、段方苗²、李卫明²、白小龙²、任忠鸣¹

1. 上海大学

2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司

热处理是优化高温合金铸件微观组织的关键手段。然而，传统的热处理方法容易出现过处理或欠处理现象，限制了高温合金的发展和应用潜力。本研究介绍了一种在热处理过程中加入交变磁场（AMF）的新型热处理策略。AMF 热处理后，枝晶干与枝晶间元素偏析系数降低， γ' 相中 Al、Ti、Ta 等 γ' 形成元素的分配系数显著提高。扩散速率的提高使残余共晶体积分数从 0.72% 降低到 0.21%，平均 γ' 相尺寸从 0.25 μm 增加到 0.36 μm ，体积分数提高至 62.3%。980°C/205 MPa 蠕变试验表明，AMF 热处理后蠕变速率降低，平均蠕变寿命从 171 h 延长至 204 h。TEM 揭示了位错与 γ' 相之间的相互作用：在未经过 AMF 热处理的样品中，位错网络主要分布在 γ/γ' 相界面处，且有层错贯穿于整个 γ' 相中。磁场热处理后， γ 相通道中析出纳米级二次 γ' 相，在界面处和 γ 相通道中都存在位错网络，阻碍了位错运动，从而提高了蠕变寿命。

C04-P06

铸件形状对 K417G 高温合金中温高应力蠕变性能的影响机制研究

张滢、玄伟东^{*}、樊志明、段磊鑫、任忠鸣

上海大学

高温合金蠕变性能是航空发动机涡轮叶片等关键部件长寿命设计的核心指标。传统研究聚焦于合金成分优化与凝固工艺调控，忽视了铸件几何形状对组织及蠕变寿命的影响。本文以 K417G 合金为研究对象，通过设计“哑铃状”与“胡萝卜状”两种典型异形试棒，揭示了铸件形状对微观组织和 760°C/645MPa 蠕变性能的影响机制。结果表明，胡萝卜状试样主要为等轴晶，枝晶粗大，二次枝晶间距为 62.5 μm ；哑铃状试样主要为柱状晶，二次枝晶间距为 28.75 μm ，且共晶尺寸相对较小。哑铃状试棒 760°C/645MPa 蠕变寿命为 178h，与胡萝卜状试棒相比，持久寿命提升了 133h。通过晶体取向分析-建立模型-Abaqus 模拟的方法对蠕变过程中稳态阶段和断裂前 Mises 应力、应变及蠕变损伤进行了分析，并成功对蠕变曲线进行了拟合，建立的晶体塑性本构模型可以预测不同形状试样的蠕变寿命。

C04-P07

长期时效对单晶高温合金组织演化及持久性能的影响

付芸迪^{*1,2}、申健²、黄亚奇²、卢玉章²、王栋²、张健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 高温结构材料研究部 沈阳 110016

针对某型航空发动机涡轮进口温度提高的使用需求，在第一代单晶高温合金 DD26 基础上添加 2 wt.% 铼元素，研制了一种低铼二代单晶合金。本文对此合金在 900 °C 条件进行 3000 小时长期时效，研究长期时效处理对此合金显微组织演化和高温持久性能的影响。分别在长期时效 0 h, 500 h, 1000h 取样进行 975 °C/255 MPa 持久性能测试，采用光镜、扫描电镜与透射电镜表征显微组织。实验结果表明：热处理态合金组织 γ' 平均尺寸为 355nm；体积分数为 67%。通过理论计算，合金的平均电子空穴数 N_v 值约为 2.208；平均 d 轨道能级 M_d 值约为 0.967，预测 TCP 相析出倾向较低。随长期时效时间增加， γ' 相尺寸明显增大， γ' 粒子尺寸粗化速率 $k=1.3 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}^3/\text{h}$ ，组织未出现筏化，合金组织中有少量针状和块状的析出相析出，通过 EDS 与 SAED 技术鉴别析出相为 M6C 型碳化物相，3000 h 长期时效后体积分数仅为 0.225%，3000 h 长期时效过程中未析出 TCP 相，表现出较好的组织稳定性。热处理态持久寿命 123 h，长期时效 500 h、1000 h 后为 126 h、125 h，持久性能无明显差异。1000 h 长期时效过程中， γ' 相的尺寸与体积分数较热处理态有一定增加，尺寸从 330 nm 增长至 598 nm，体积分数从 67% 略微增长为 75%， γ' 相分布均匀，保持着立方状。 γ' 相的粗化导致其对位错的阻碍作用减弱，但同时 γ' 相体积分数增加，合金组织随时效时间变得更加均匀，综合作用下合金长期时效后持久性能没有明显变化。

C04-P08

镍钴基变形高温合金高温蠕变 γ' 相筏化机制及组织稳定性控制盖永超^{*1,2}、张瑞¹、周子荐¹、崔传勇¹、谭毅²

1. 中国科学院金属研究所

2. 大连理工大学

新型发动机的发展急需具备高温长时服役能力的变形高温合金，而在长时服役过程中合金会出现 γ' 相筏化和晶界处贫化区等现象，这将严重影响合金的服役稳定性，因此如何提高合金的高温长时组织稳定性成为关键。本工以一种新型镍钴基变形高温合金为研究对象，进行高温蠕变测试(850°C/100MPa)，揭示合金中的纳米级 γ' 相筏化机制及晶界 γ' 相贫化区形成过程，发现 γ' 相筏化主要受 γ/γ' 相界面处基体层错诱导元素扩散影响，而传统单晶高温中的 γ' 相筏化过程是 γ/γ' 两相的错配应力差为元素扩散提供了驱动力，虽然单晶与变形高温合金的 γ' 相筏化过程均为元素扩散，但两者服役温度和晶格错配度的差异决定了元素扩散方式不同。研究结果还揭示了 γ' 相贫化区的形成是由于晶界迁移导致，该区域由于缺少 γ' 相的强化会促进蠕变过程中微孔的形成，进而加快蠕变断裂。基于上述研究，通过对合金进行成分优化(Ti、Ta 元素)，调整合金中 γ' 相的回溶温度，从而改变了合金中的 γ' 相形态， γ' 相由晶内单峰分布转变为双峰分布，有效地抑制了合金在高温长时蠕变过程中 γ' 相筏化和贫化区的形成，显著地提高了合金高温持久寿命。该研究将为开发高温长寿命变形高温合金提供理论基础，从而保证先进航空发动机动力系统的安全性和可靠性。

C04-P09

Si 和 Co 对 Cu-Ni-Al 合金组织结构及力学性能的影响

高明浩、邹存磊*

大连交通大学

在航空航天、工程机械等领域通常要求机械部件能够在极端环境（高温、高压、高载荷）下工作，但是在这样环境下传统的润滑材料如润滑油和润滑脂会失去其润滑效果，以至于机械部件的磨损极其严重，所以寻找新型润滑材料成为科研人员的工作重点。借鉴镍基高温合金中立方状 γ' -Ni₃Al 相的共格强化机制，基于 Cu-Ni 面心立方结构的晶格匹配特性，研究人员开发了 Cu-Ni-Al 合金体系，通过立方状 γ' 相共格析出有效提升铜基体高温性能，此外 CuO 润滑相在 600°C 以上显现显著润滑优势，拓展材料在室温至高温全温域的自润滑能力。在此基础上，又借鉴镍基高温合金中的多种元素强化机制，保证合金强度的同时，增强合金的塑性。本研究在 Cu₅₀Ni_{37.5}Al_{12.5} 合金中添加 Si 和 Co 来优化该合金的结构和性能，进行优质铜合金的制备。为了保证合金的强度和均匀性，采用真空磁力悬浮熔炼炉熔炼，再将合金进行固溶时效处理，然后将热处理后试样进行表征和力学性能测试。室温下，在 Cu₅₀Ni_{37.5}Al_{12.5} 合金的显微硬度为 277.8HV，添加 2.06wt.%Co 的显微硬度达到 282.35HV，添加 0.49wt.%Si 的显微硬度达到 278.79HV，同时添加 2.06wt.%Co 和 0.49wt.%Si 的显微硬度达到 276.57HV。

C04-P10

应力状态对一种无 Re 镍基单晶高温合金在 980°C 下蠕变行为的影响

高玉婷^{1,2}、董加胜^{*1}、楼琅洪¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

单晶涡轮叶片在服役过程中，叶身不同位置的温度和应力分布差异显著。通常，温度较高 (>850°C) 的区域应力较低 (<450 MPa)。叶片在不同阶段需承受复杂变化的燃气温度和转速带来的温度场与应力场耦合作用，给涡轮叶片材料带来极大挑战。虽然添加战略性元素（如 Re、Ru）可增强合金的高温耐久性，但其成本高昂且易引发 TCP 相析出，影响热稳定性。相比之下，Ta 作为重要强化元素，能够提高合金的组织稳定性和力学性能。因此，本文研究了一种新型低成本无 Re 镍基单晶高温合金在不同应力状态下的蠕变变形和损伤机制。

通过观察各阶段显微组织演变，并结合位错变形机制的应力阈值理论，研究了应力状态对一种无 Re 单晶高温合金在 980°C 下蠕变行为的影响。采用 SEM 和 TEM 分析了合金在 980°C、不同应力

(248MPa/200MPa/163MPa) 下的蠕变行为。结果表明，随应力降低，蠕变寿命显著延长，从 248MPa 下的 183h 延长至 163MPa 下的 2050h，提升了 10 倍，表现出强烈的应力依赖性。在蠕变初期，主要发生位

错滑移和交滑移；随后转变为稳态时期 γ' 筏化和位错网络的完全形成，并伴随局部应力积累，248MPa 下还观察到 Orowan 环。随蠕变应变加速，大量 $\langle 110 \rangle$ 超位错从高内应力区切入 γ' 相，同时位错攀移贯穿整个蠕变过程。此外，本文还详细研究了不同应力下的蠕变损伤机制，发现试样内部的孔洞、TCP 相及碳化物等多种因素共同作用导致合金最终断裂。值得注意的是，248MPa 下，组织中未观察到 TCP 相，表明 TCP 相的析出更易受时间的影响。

C04-P11

Ta 增加对无 Re 镍基单晶高温合金在 750°C 下蠕变行为的影响

高玉婷^{1,2}、董加胜^{*1}、楼琅洪¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

添加难熔元素 (Re, Ru 等) 一直是提高单晶高温合金叶片服役性能的重要方法之一，但是过量难熔元素的添加会促进 TCP 相析出，削弱强化效果。近年来，低/无 Re 单晶高温合金成分设计是重要的研究方向之一。Ta 作为单晶高温合金的重要强化元素，不易形成 TCP 相，通常有利于力学性能提升。因此研究 Ta 含量对低/无 Re 单晶高温合金蠕变性能的影响至关重要。

本文以不同 Ta 含量的无 Re 镍基单晶合金 (7 wt.%、8 wt.% 和 9 wt.%) 为研究对象，利用 SEM 和 TEM 等手段分析其蠕变行为。结果表明，Ta 增加显著延长了初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段，蠕变寿命从 267h 提升至 864h，提高了 2.2 倍。在初始阶段 (4h)，TEM 分析显示，7Ta 合金中存在两种方向层错，而其他两种合金仅存在单方向层错；同时，9Ta 合金中大量基体位错在水平通道内通过交滑移扩展，在相界面留下 90° 弯折位错。在稳态阶段 (100h)，基体位错在 γ/γ' 相界面缠结堆积，形成界面位错网； γ' 相中存在不同方向且相互垂直的层错，交互形成大量堆垛层错锁。蠕变断裂后，剪切进入 γ' 相的位错及位错对数量增加；8Ta 和 9Ta 合金中仍存在大量不同方向的层错，且层错锁仍稳定存在；9Ta 合金的界面位错网相比其他两种合金退化较轻，且仍能保持一定形貌。从 (110) 面观察到层错锁呈多种不同形貌，高分辨 HAADF 图像证实了 SISF/SESF 处存在微区相变。从 Ta 的固溶强化理论角度分析，Ta 增加导致元素重新分布，增强了 γ 基体和 γ' 相的固溶强化效果，从而显著降低了初始蠕变量和蠕变速率。这些因素共同作用，使合金在增加 Ta 后展现出更优异的中温蠕变性能。

C04-P12

An insight into Mn substitution for Ni about the structure stability and mechanical properties in Sanicro 25 austenitic heat-resistant steel by first-principles

Shengli Gong*

Lanzhou University of Technology

With the development of society, people's demand for electricity is increasing day by day, and the discharge of pollutants is also increasing sharply, which leads to the acceleration of environmental pollution. The development of power industry in the direction of high efficiency and cleanliness has become a key issue. Sanicro 25 austenitic heat-resistant steel developed by Sandvik Company in Sweden on the basis of NF709 is expected to become a new generation of austenitic heat-resistant steel for ultra-supercritical thermal power units at 630~650°C due to its excellent structural stability and high-temperature mechanical properties. There are many kinds of alloy elements, among which the content of rare precious metal Ni is high. In order to reduce the cost, we use the first-principles calculation method to simulate the reduction of Ni in Sanicro 25 austenitic heat-resistant steel, build a basic model based on the main element Fe-Cr-Ni system, and study the influence of Mn on its structural stability and mechanical properties from the atomic scale. The calculation results of formation energy, binding energy and Gibbs free energy show that the structural stability of Sanicro 25 austenitic heat-resistant steel is still good after Mn is used instead of Ni, and the structural stability is even better at 630~650°C. By analyzing the electronic properties, it was found that the system showed good thermal stability after a certain amount of Mn was substituted. The elastic modulus analysis shows that the compressive strength of the system is improved after substitution, and the stiffness of the corresponding materials changes in different degrees. With the increase of strain, the tensile stress of each system increases first and then decreases. In a word, it is feasible to replace Ni

with Mn in Fe-Cr-Ni system, which is an important method to save Ni in the field of Sanicro 25 austenitic heat-resistant steel.

C04-P13

钽对镍基单晶高温合金热机械疲劳行为的影响

韩世超^{1,2}、谢光^{*2}、葛志成³、申健²、张少华²、张健²

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

3. 广州大学

镍基单晶高温合金作为航空发动机涡轮叶片的核心材料,在服役过程中需承受复杂的温度-载荷循环交互作用。与传统疲劳相比,热机械疲劳(TMF)同步施加温度与应变循环,能较好的模拟合金的服役行为。本研究针对第二代镍基单晶高温合金,在400–1000℃温度区间,开展应变控制反相热机械疲劳(OP-TMF)实验,对比研究了含Ta与无Ta合金的热机械疲劳行为和失效机制。结果表明,含Ta合金的热机械疲劳寿命显著增加,并表现出更大的抗拉伸变形能力及更低的塑性损伤累积速率。

断口分析表明,两种合金的裂纹均萌生于表面氧化层,并沿垂直于加载方向扩展,随后沿孪晶界扩展。但0Ta合金垂直加载方向扩展更短距离后即沿孪晶扩展。微观组织研究表明,Ta的添加促进了(Ti,Cr)TaO₄中间层氧化物的形成,并抑制了内层Al₂O₃的粗化,提高了合金的抗氧化性能,可能抑制裂纹萌生。含Ta合金的变形孪晶厚度更小、密度更高、分布更均匀,有利于抑制局部集中变形,延缓裂纹沿孪晶界扩展。此外,含Ta合金仅有微量拓扑密堆相(TCP)析出,未观察到裂纹于TCP形核与扩展,对力学性能无不利影响。

本研究初步阐明了Ta元素对单晶热机械疲劳损伤的作用机理,为航空发动机热端部件的合金设计提供了实验数据与理论支撑。

C04-P14

变形诱发 Inconel 718 合金中 γ'' 相非均匀析出行为研究

郝虎、刘晨曦*

天津大学

γ'' 相因其独特的共格应变硬化机制和缓慢的析出动力学,使 Inconel 718 合金具备优异的高温服役性能和良好的成形性。然而, γ'' 相的析出取向和形貌易受外部应力和塑性变形的影响。Inconel 718 合金一般采用锻造、轧制等塑性加工工艺成形,时效处理后通常会观察到非均匀析出的 γ'' 颗粒。因此,揭示变形引起 γ'' 相非均匀析出的结构因素,对其构型调控至关重要。为此,本研究旨在明晰预变形下 Inconel 718 合金中 γ'' 相的非均匀析出特征,并进一步揭示相关结构机制。首先对 Inconel 718 合金进行冷轧加工,随后进行直接时效处理,通过 TEM、EBSD 等技术表征 γ'' 相析出形貌及相关微观组织的演变特征,得出以下结论:(1)预冷轧变形引起 γ'' 相非均匀析出,表现为 γ'' 相垂直变体间数量分数和平均尺寸的不等效。(2)冷轧变形导致 Inconel 718 合金中晶格畸变的 β 晶粒是诱发 γ'' 相非均匀析出的主要结构因素。这些结果解释了塑性变形引起的 FCC- γ 晶格畸变是导致第二相颗粒非均匀析出的原因。

C04-P15

一种控制单晶高温合金再结晶的循环回复热处理方法研究

贺宁峰^{1,2}、谢光¹、卢玉章¹、王栋¹、李亚微¹、张健^{*1}

1. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

单晶高温合金的再结晶会重新引入晶界,破坏单晶完整性,进而损害其力学性能。本文以第二代镍基单晶高温合金 CMSX-4 为研究对象,研究了一种控制再结晶的循环回复热处理方法,并揭示了其控制机理。

选取轴向与[001]取向偏差小于5°的CMSX-4单晶棒,制备 $\Phi 5 \times 8$ mm的圆柱试样,经轴向压缩产生3%塑性变形后(合金临界塑性变形量 $< 1\%$),通过宏观腐蚀去除表面应力层。试样真空封管后,进行多次循环回复热处理,最后通过标准热处理评估再结晶情况。每个回复热处理循环以2~5℃/min的速率从1000~1100℃升温至1260~1290℃,随后炉冷至1000~1100℃。

结果表明,循环回复热处理显著抑制了单晶合金的再结晶。标准热处理前,增加一次、二次循环回复

热处理后,再结晶面积及晶粒数量显著降低。经过三次循环回复热处理后,试样中未观察到再结晶。研究认为,循环回复控制再结晶的机理主要体现在两个方面:对位错的调控和对 γ' 相大小及分布的优化。循环回复热处理能使 γ' 相溶解并重新析出,同时加速了位错的湮灭和重排,有效降低了位错密度。在一次循环中, γ' 相部分溶解,促使位错通过滑移和攀移机制湮灭,显著降低位错密度。二次循环中, γ' 相进一步溶解, γ 通道扩展促进位错运动,形成位错网。后续循环中,位错缠结基本消除,形成稳定的位错网,从而大幅降低再结晶驱动力。而且,枝晶间的大尺寸 γ' 相在峰值温度未完全溶解,在冷却时长大,形貌和分布得到优化。小尺寸 γ' 相溶解,而大尺寸 γ' 相含量随循环次数增加。最终形成均匀分布的大尺寸 γ' 相,可能抑制小角晶界的运动,从而有效控制再结晶。本研究为航空发动机涡轮叶片用镍基单晶高温合金的再结晶控制提供了技术支持与理论依据。

C04-P16

耦合 GW 模型和人工神经网络的燃机用镍基单晶高温合金蠕变应力、应变及剩余寿命预测方法

侯木春¹、李龙飞¹、杨德宇¹、王栋²、张健²、冯强*¹

1. 北京科技大学 新金属材料全国重点实验室
2. 中国科学院金属研究所 高温结构材料研究部

重型燃气轮机涡轮叶片服役环境恶劣,叶片的服役条件和蠕变损伤难以评估,尤其是难以实时监测叶片伸长量和预测剩余蠕变寿命。本研究以一种燃机用镍基单晶合金为研究对象,使用渐变截面蠕变试样,在 900 °C 下开展了不同应力(38-250 MPa)和时间(1000-12000 h)的蠕变中断实验,系统构建了实验条件-显微组织参量(γ' 相体积分数、筏排指数及 γ 通道宽度)的数据集。同时,基于长时蠕变曲线特征修正了宏观 Graham-Walles (GW) 模型,建立了适用于长时蠕变的应变预测模型。最终,开发了耦合宏观蠕变行为与微观组织演变的人工神经网络(ANN)模型来预测合金的剩余蠕变寿命。结果表明:修正 GW 模型可精确描述蠕变减速与缓慢加速阶段的应变-时间关系,其参数与应力呈显著线性相关性;ANN 模型通过输入显微组织参量及时间,可高精度预测蠕变应力($R \geq 0.96$)和应变($R \geq 0.98$),验证实验显示剩余寿命预测精度较高。本研究构建了燃机叶片材料服役损伤量化评估的跨尺度分析框架,为延寿决策奠定了工程化应用基础。

C04-P17

熔盐堆结构材料热加工优化:基于预应变诱导缺陷结构的 GH3539 合金动态再结晶调控机制

黄梅千^{1,2}、周子荐¹、崔传勇*¹、张瑞¹、王新广¹、孙晓峰¹、周亦甯¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

在全球能源体系深度变革背景下,发展第四代超临界光热发电系统已成为实现“双碳”战略目标的核心技术路径。当系统工作温度突破 800°C 阈值时,熔盐环境对结构材料提出“高温强度-耐熔盐腐蚀-热机械疲劳寿命”三重协同强化的极限要求。本研究聚焦现役 Hastelloy N 合金在极端热-力-化耦合场中的性能失效机制,基于合金设计理念与难熔元素协同强化理论($W \geq 20$ wt.%),创新构筑了固溶强化型 GH3539 合金体系。针对高 W 含量导致的严重元素偏析、热加工开裂等瓶颈问题,提出“预变形-热处理”协同调控新方法:基于多尺度表征技术与元素多通道扩散理论耦合分析,引入预变形工艺(变形量 $\leq 15\%$),诱导位错网络重构,构建铸态偏析相-扩散势垒的跨尺度关联模型。实验表明:预变形产生的位错网络为元素扩散构建快速通道,缩短均匀化时间,抑制晶粒粗化;晶界 M₆C 碳化物经应变诱导亚稳相溶解-再析出机制重构后,其平均尺寸由 1.2 μm 细化至 0.8 μm ,提升晶界结合能,减少开裂倾向;通过动态材料模型构建热加工图,在 1200°C/1s⁻¹ 参数下获得 84.6% 的动态再结晶率。该方法有助于解决吨级铸锭偏析难题,提高合金组织均匀性。本研究建立的“缺陷调控-组织优化-性能增强”多尺度关联模型,为先进光热发电系统关键材料的理性设计提供了新范式。

C04-P18

激光粉末床熔融成形 GH4099 高温合金微观组织和力学性能各向异性研究

霍传腾¹、苏海军*¹、王琳²、杨培鑫¹、郭一诺¹

1. 西北工业大学

2. 西安航天发动机有限公司

GH4099 高温合金在 900 °C 以下长期服役条件下表现出优异的性能，在航空航天热端部件制造中具有重要应用价值。激光粉末床熔融 (LPBF) 作为新型近净成形技术，为复杂结构件制备提供了创新解决方案，但其逐层叠加的制造特性导致微观组织呈现显著各向异性。本文通过响应面法系统优化了 GH4099 高温合金的 LPBF 成形工艺参数，并深入探讨了合金组织演化规律与力学性能各向异性机制。实验结果表明，沉积态试样以外延生长柱状晶为主，晶内弥散分布纳米级碳化物。经热处理后，试样发生了再结晶和晶粒生长，析出了大量 γ' 相，最终样品表现为柱状晶和等轴晶的混合状态。室温下沉积态试样的裂纹萌生与扩展主要发生在晶内，而热处理后 γ' 相通过钉扎位错运动使断裂模式转变为沿晶断裂；高温中碳化物的生长弱化了晶界，促使裂纹沿晶界扩展。合金在沿晶粒短轴和长轴加载时表现出不同的变形机制，孪晶在沿晶粒长轴加载时提供了更高的塑性变形能力。本文为调控增材制造高温合金各向异性提供理论依据。

C04-P19

ODS 强化 INCONEL 718 合金中 Y-Al-O 相演化和强化机理研究

李士成、李冲、刘永长*

天津大学材料科学与工程学院

研究了添加 Y_2O_3 对 INCONEL 718 镍基高温合金组织演变、相变和力学性能的影响。通过高能球磨、快速热压和热处理将 Y_2O_3 纳米颗粒均匀分散到 INCONEL 718 基体中。x 射线光电子能谱 (XPS) 和透射电子显微镜 (TEM) 分析表明， Y_2O_3 与 Al 优先相互作用，形成尺寸小于 10 nm 的 Y-Al-O 团簇。在烧结和固溶处理过程中，由于界面能差异和原子扩散，YAH (六方 $YAlO_3$) 转变为 YAM (单斜 $Y_4Al_2O_9$)。添加 0.5 wt.% 的 Y_2O_3 显著提高了屈服强度 (室温 1403 MPa, 650°C 1124 MPa) 和极限抗拉强度，这是由于晶粒细化、位错强化和氧化物分散机制所致。然而，过量的 Y_2O_3 (0.8 wt.%) 会导致颗粒团聚，增加颗粒间距，降低延展性。与未掺杂的 INCONEL 718 相比较， Y_2O_3 掺杂试样的断口呈现出细小韧窝的穿晶断口。分子动力学模拟证实了 YAM 的热力学稳定性，与实验结果一致。这项工作为优化用于高温应用的氧化物弥散强化 INCONEL 718 合金提供了重要的见解。

C04-P20

高温合金中微量和痕量元素分析方法研究进展

李甜*¹、王睿婷¹、胡梦桥¹、栗生辰¹、李宝城²

1. 国标 (北京) 检验认证有限公司

2. 国合通用测试评价认证股份公司

高温合金是一类能在高温、高压、腐蚀或氧化环境中保持优异力学性能和化学稳定性的金属材料，主要应用于航空发动机、燃气轮机、核电等极端工况领域。本文综述了高温合金中杂质元素含量检测的分析方法，包括原子吸收光谱法 (AAS)、电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-OES)、电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)、X 射线荧光光谱法 (XRF)、光电直读发射光谱法、辉光放电质谱法 (GD-MS)、激光诱导击穿光谱法 (LIBS) 等，同时调研了国内外标准物质和标准样品的现状。重点介绍了国内外方法的适用范围、研究现状和优缺点，并探讨了该领域的发展趋势。高温合金化学成分分析标准目前年代较久，以经典化学法为主，仪器分析法相对缺失。固体标准物质和标准样品的成功研制，有助于固体进样分析方法技术的推广应用，同时满足快速检测的行业需求。多种分析技术的联用和智能化发展将成为未来镍基高温合金元素检测的重要方向，为材料性能优化和质量控制提供更可靠的技术支持。

C04-P21**基于高通量实验的 CoNi 基高温合金元素作用研究**李文道*¹、Jeffrey M. Wheeler²、韩宏泳³、李龙飞³、冯强³

1. 材料科学与工程学院, 湘潭大学

2. 纳米冶金实验室, 苏黎世联邦理工学院

3. 北京材料基因工程高精尖创新中心, 新金属材料国家重点实验室, 北京科技大学

结合高通量扩散多元节和高速纳米压痕技术研究了 W、Ti 和 Ta 对 Co-20Ni-7Al-8W-4Ti-1Ta 合金组织稳定性和力学性能的影响。首先, 通过扩散多元节实现了较大的成分空间: W 为 2~8 at.%, Ti 为 4~10 at.%, Ta 为 1~5 at.%. 样品经固溶和长时效热处理后, 通过 SEM、EPMA 和高速纳米压痕, 快速测定和建立了合金成分、微观组织和力学性能之间的量化关系。其中, 高速纳米压痕拥有显著高于传统纳米压痕的测试速率, 平均每个测试点仅需 1 秒左右, 可以快速测定同一样品不同区域的力学性能, 本工作共获取 22801 个纳米压痕测试数据。结果表明, Ta 在含量超过约 3.6 at.% 时强烈促进 χ 相的析出, 而 Ti 和 W 的阈值则分别高于 10 和 8 at.%. W 对于维持高的 γ' 相含量起着关键作用, 其次是 Ta 和 Ti。另一方面, 上述三种合金元素中, W 具有最显著的强化效果, 能够显著提高合金硬度和弹性模量, 其次是 Ta, 然后是 Ti。因此, 鉴于 W 对 γ' 相稳定性及合金强度的显著贡献, 在 CoNi 基高温合金中应该添加适量的 W。最后, 根据高通量实验结果确定了优化的成分范围, 以实现低密度、高 γ' 相面积分数和合金强度的综合性能。

C04-P22**基于机器学习辅助预测高温合金热加工性能研究**李文鹏*^{1,2,3}、王广磊^{2,3}、张华¹、曲敬龙^{2,3}、杜金辉^{2,3}

1. 烟台大学

2. 北京钢铁研究总院

3. 四川高钠高钠锻造有限责任公司

高温合金在成形过程中塑性变形复杂, 准确评估温度、应变速率及应变量对其热加工性能的影响, 对组织控制和工艺设计至关重要。传统热加工图主要基于温度与应变速率构建, 在全面反映复杂成型条件下的应变量影响存在一定的局限性。本文以镍基高温合金 GH4141 为研究对象, 构建了两种能够综合考虑温度、应变速率及应变量影响的机器学习热加工性能预测模型。在此基础上, 进一步结合本构方程、三维热加工图及微观组织演变分析, 建立了一种耦合预测方法, 以确定该合金的最优热加工工艺窗口。研究表明, 模型预测的微观组织演变趋势与实验结果高度一致。动态再结晶 (DRX) 程度与功率耗散因子 (η) 呈显著正相关, 且两者均随温度升高和应变速率增大而增强。值得注意的是, 在低温高应变速率条件下, 材料易发生流动失稳, 局部热软化促使绝热剪切带 (ASB) 形成, 此时 DRX 程度与 η 值呈现相反的变化趋势。通过结合热加工性能预测与微观组织分析, 本研究将不同热变形参数下的组织演变划分为失稳区、部分再结晶区、完全再结晶区和晶粒过度长大区四个区域, 为 GH4141 合金的组织控制和工艺设计提供了理论依据和模型支持。

C04-P23**极端服役环境 X 射线显微 CT 在高温合金材料领域的应用**

李仁庚*

南京工业大学

随着高温合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用, 在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、定量化、数字化原位研究, 成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描 (CT) 技术, 结合亚微米级精密控制转台和机械控制, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块 (拉伸/压缩/弯曲/疲劳), 构建热-力耦合系统, 实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下高温合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 CT 设备的成功研发, 将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C04-P24

Mar-M247 系列合金短期 ($\leq 500\text{h}$) 与长期 (长达 10000h) 氧化行为差异分析李鑫¹、汪松林¹、陆*^{1,2}

1. 中国科学院上海应用物理研究所
2. 中国科学院大学

Mar-M247 系列铸造镍基高温合金因其出色的高温力学性能, 常被选用于承受极端热机械载荷的部件。然而, 其在高温氧化环境下的长期稳定性是保障部件安全运行的关键因素。为此, 本文系统地研究了 Mar-M247 和 Mar-M247LC 合金在 800-950°C 空气中的短期氧化行为以及 Mar-M247LC 合金在 900°C 空气中的长期氧化行为。研究表明: 800-950°C, 500h 氧化后, Mar-M247 和 Mar-M247LC 氧化动力学曲线符合亚抛物线规律, 氧化激活能分别为 327.7 kJ/mol 和 281.4 kJ/mol。氧化膜的生长主要由 Cr^{3+} 向外扩散主导。除此之外, 观察到氧化层内形成的氧化物栓, 推测其有助于增强氧化膜与基体的附着性。长期氧化研究中, 在初始 2000 小时内, 氧化动力学遵循亚抛物线规律, 反应指数 “n” = 3.29, 抛物线速率常数 $K_p = 1.39 \times 10^{-3} \text{mg}^2 \text{cm}^{-4} \text{h}^{-1}$ 。氧化层呈现典型三层结构: 外层主要由 NiO、 Cr_2O_3 、 TiO_2 和 NiCr_2O_4 尖晶石组成; 中间层富集 WO_3 (NiWO_4)、 TiO_2 和 Ta_2O_5 (CrTaO_4); 内层则为连续的 Al_2O_3 层。值得注意的是, 氧化 2000 小时后, 氧化层开始发生剥落。剥落导致层内氧分压及水蒸气分压升高, 进而显著加速了钨氧化物 (如 WO_3) 的挥发。研究表明, 短期氧化 ($\leq 500\text{h}$) 与长期氧化 (长达 10000h) 行为存在显著差异: 短期氧化以稳定的亚抛物线动力学和致密氧化层形成为特征, 而长期氧化则伴随氧化层剥落和由此引发的挥发性氧化物 (如 WO_3) 加速退化, 导致保护性失效。这项工作为了解镍基超合金在高温下的氧化机制和失效过程提供了重要的见解, 对涡轮机部件等高温应用领域的合金设计和寿命预测具有重要意义。

C04-P25

微量元素对第三代镍基单晶合金晶界显微组织及高温低应力蠕变性能的影响

李远^{1,3}、路松²、赵云松*¹

1. 中国航发航材院
2. 北京科技大学
3. 清华大学

为提高某第三代镍基单晶高温合金的小角度晶界容限, 本研究采用定向凝固技术制备不同微量元素碳 (C) 和硼 (B) 含量的 12° 晶界双晶试样, 进行 100~2000 小时的长期时效实验及 1120°C/80MPa 应力垂直晶界加载的高温低应力蠕变实验, 结合第一性原理计算和晶界电荷密度模拟, 系统研究了 C 和 B 在晶界的偏析行为及其对晶界稳定性与高温低应力蠕变性能的作用机制。结果表明: C、B 的添加对合金完全热处理组织没有影响, 单独添加 C 或 B 可延缓长期时效时晶界胞状组织的析出, 而 200ppmC+150ppmB 复合添加可以将晶界胞状组织析出时间延缓至 200 小时。晶界原子探针检测结果显示, C 与 B 在晶界的偏聚促进了难熔元素原子在晶界的偏聚, 提高难熔元素在晶界的浓度。合金高温低应力蠕变实验结果表明: 单独添加微量元素 C 或 B 对试样蠕变寿命提升有限, 而 200ppmC+150ppmB 复合添加可有效延长蠕变寿命至 40h, 与无微量元素添加的基础合金相比提高 300%, 并使断口形貌由沿晶断裂转变为沿晶-穿晶混合断裂。第一性原理计算和晶界电荷密度模拟结果表明, C、B 与难熔元素原子在晶界偏聚降低晶界自由能, 且 C、B 在 $\text{Ni } \Sigma 5[001](210)$ 晶界的偏聚可提升晶界电荷密度并强化晶界附近 Ni-Ni 键结合强度。在微量元素晶界偏聚导致的晶界能降低、晶界电荷密度提高与晶界原子键结合强度上升的作用下, 合金晶界高温力学性能显著提高。本研究为优化微量元素成分调控及设计高性能镍基单晶高温合金提供了理论依据。

C04-P26

基于层错能调控高温合金的变形行为

梁东旭、杨帅、江亮、阮晶晶*

烟台大学

GH3625 合金是用于制造聚光太阳能电站(CSP)吸热器的主要材料, 其长期稳定性决定了聚光太阳能电站的安全与效益。然而, 在长期服役过程中, GH3625 合金的微观组织发生演变, 进而对合金性能产生影响。本研究聚焦均匀化 GH3625 合金和热暴露 GH3625 合金的持久性能。研究发现, 热暴露后, 合金的持久性能提升, 这与合金在热暴露过程中析出的 γ'' 相有关。均匀化 GH3625 合金在 595°C/552MPa 持久测试

后,合金中产生了纳米孪晶,该合金的持久性能反常的优于热暴露 GH3625 合金,这与均质化合金中析出的纳米孪晶有关。此外,均质化合金在 705 °C 进行持久性能测试后,观察到了更加细小的纳米孪晶,这与合金在高温下的层错能上升有关。本研究证实了 γ' 相、变形孪晶和层错均有利于提升 GH3625 合金的持久性能。在观察微观结构后,我们基于 CALPHAD 的层错能计算了 595 °C 和 705 °C 下的层错能分别为 737.8 mJ/m² 和 747.0 mJ/m²,这一数值过高,与相关文献报道的 IN625 的孪晶形成条件并不吻合。考虑化学偏析后,595 °C 和 705 °C 下的层错能分别降至 94.6 mJ/m² 和 107.9 mJ/m²。本研究不仅为 GH3625 高温合金在 CSP 电站中的长期稳定性提供了基础数据,还首次提出了基于化学偏析的层错能计算方法,为合金变形机制提供了新见解。

C04-P27

CaO 耐材与镍基高温合金熔体的界面脱硫反应机理研究

林晨宇^{1,2}、盛乃成^{*1}、范世钢¹、孙士杰¹、侯桂臣¹、崔传勇¹、李金国¹、周亦甯¹

1. 师昌绪先进材料创新中心,中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

微量元素越来越成为影响高温合金关键性能的因素之一。而硫在高温合金中是一个极具破坏性的杂质元素,偏聚于晶界,导致晶界严重弱化,从而显著降低合金的高温强度、高温塑性、热加工性能和抗氧化性能,并促进高温热脆性和热裂。大量研究表明硫含量低于 1ppm 时能够极大提升合金的性能。通过耐材与合金熔体的界面反应脱硫是目前最经济高效的方式之一。本文以 CaO 耐材为研究对象,采用浸取法模拟实际的母合金熔炼过程,通过控制合金成分,熔炼温度及熔炼时间,深入阐述了 CaO 耐材的深度脱硫机理。结果表明:合金成分对 CaO 的界面脱硫反应影响尤为严重,Al, Hf, Ti 及 Ta 等活性元素参与 CaO 脱硫反应,其中 Al 与 CaO 反应生成液态的 $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ 相,传递界面脱硫反应的反应物,而 Hf, Ti 及 Ta 与 CaO 反应生成固态产物,阻碍各相传递。控制熔料时间表明 CaO 的脱硫反应界面是不断更新的过程,能够持续稳定与合金熔体发生脱硫反应。本研究为制备超低硫镍基高温合金提供了技术支持与理论依据。

C04-P28

固溶处理对一种镍基沉淀强化高温合金显微组织和拉伸性能的影响

刘成豪^{*1,2,3}、王广磊^{1,2}、冯浩³、李花兵³、曲敬龙^{1,2}、杜金辉^{1,2}

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司
2. 四川钢研高纳锻造有限责任公司
3. 东北大学 冶金学院

热处理是实现组织调控和性能优化的重要手段。本文研究了固溶温度及其冷却方式对一种镍基沉淀强化型高温合金环锻件显微组织和拉伸性能的影响。固溶温度通过影响晶界 γ' 相溶解来控制晶粒长大,当固溶温度超过 γ' 相全溶温度时,热处理晶粒发生迅速长大。固溶冷却方式影响析出物形貌,随固溶冷速降低(油冷>空冷>炉冷), γ' 相和 M23C6 碳化物发生不同程度粗化,尤其晶界位置。固溶温度及其冷却方式对拉伸性能的影响随温度升高而变得明显,尤其高温阶段。亚固溶热处理(低于 γ' 相全溶温度)的拉伸强度和塑性总是高于过固溶热处理(高于 γ' 相全溶温度)。拉伸强度尤其屈服强度随固溶冷速降低而呈现下降趋势,而高温拉伸塑性却相反。粗晶组织的拉伸性能受固溶冷速的影响程度比细晶组织的更大。这与微观位错变形机制、晶粒变形协调性和拉伸断口形貌等对应。固溶处理通过协同调控晶粒尺寸、晶内 γ' 相含量及尺寸和晶界析出物形态来影响拉伸性能,高温晶界状态的影响不可忽视。

C04-P29

原位环境透射电镜揭示镍基高温合金晶界对初始氧化的影响

刘明哲¹、赵云松²、陈艳辉^{*1}、卢回¹、李昂¹、王立华¹、韩晓东¹

1. 北京工业大学 固体微结构与性能北京市重点实验室
2. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点研究所

晶界的类型和性质是影响多晶合金机械性能和腐蚀性能的重要因素。Inconel 718 镍基高温合金具有优异的力学性能,但晶界处的优先氧化会加速其开裂并降低工业应用性能。受晶界影响的初始氧化行为对腐蚀和降解起着决定性作用,因此对合金的广泛应用至关重要。利用原位环境透射电子显微镜(ETEM)对 Inconel 718 合金不同晶界的初始氧化行为进行了系统研究。结果表明,晶界的抗氧化性随晶界能量的降低

而增加。高角度晶界是氧的优先扩散通道，表现出严重的晶间氧化。孪晶界抑制了氧的扩散，表现出良好的抗氧化性。该研究揭示了多晶合金晶间氧化的机理，为提高多晶材料的抗氧化性提供了新思路。

C04-P30

碳含量对一种变形镍基高温合金组织性能的影响

刘文丽*

东北大学

刘文丽^{1,2}, 侯坤磊^{2,3}, 王平¹, 马颖澈^{2,3}

¹东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

²中国科学院金属研究所 核用材料与安全评价重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

³师昌绪创新材料研究中心(中国科学院金属研究所), 辽宁 沈阳 110016

碳(C)是镍基高温合金中重要的微量元素,其含量的微小变化可能造成力学性能的显著差异。本文研究了C含量对一种新型镍基高温合金GH4750显微组织和力学性能的影响。结果表明,当C从0.02 wt.%增加到0.04 wt.%,再增加到0.08 wt.%,MC型碳化物的含量和平均尺寸增加,并且碳化物钉扎晶界,使晶粒尺寸从~35 μm 降低到~31 μm ,再降低到~22 μm 。随C含量升高,室温和750 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸强度呈现先增后减的趋势,而延伸率变化规律与之相反。室温拉伸断裂机理揭示:当碳化物数量较少时,对晶界的钉扎作用有限,晶界易发生较大的塑性变形而开裂。随碳化物尺寸和数量增加,带来了大量阻碍位错运动的新界面,位错运动受到极大阻力,晶界强度提升的同时,界面微孔及微裂纹难以形成与扩展,有利于强度的提高。然而当碳化物尺寸过大,位错运动到MC碳化物与基体的界面位置会造成塞积现象,导致碳化物破碎,与基体脱连,在外加应力的作用下,破碎MC碳化物周围的微孔易扩展连接形成沿晶裂纹;750 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸断裂的原因则有所不同:在0.02C合金中,相邻晶粒施密特因子相差较大,变形程度不同导致晶界处应力集中,以沿晶断裂为主。在0.04C合金中,晶粒内部施密特因子大,滑移系容易开动,孪晶界作为位错运动的障碍,迫使位错塞积,从而使强度提高。0.08C合金中,高施密特因子滑移系的位错在晶界、孪晶界或碳化物处塞积,造成沿晶开裂以及孪晶脱落的现象。此外,750 $^{\circ}\text{C}$ /320MPa蠕变寿命随C含量的增加单调降低,这归因于较大的晶粒尺寸提高了抗蠕变性能。随着碳含量增加,晶粒尺寸减小,晶界处可能存在更多的微孔洞和微裂纹成核的潜在位点,这不利于提高应力断裂寿命。综合考量室温拉伸性能、高温拉伸性能以及蠕变性能,本研究确定该新型镍基高温合金GH4750的最佳碳含量为0.04 wt.%。

C04-P31

Y元素对一种高碳单晶高温合金与陶瓷型壳界面反应的影响

刘晓朋^{1,2}、黄亚奇²、卢玉章²、郑伟²、申健²、王栋²、张健^{*2}

1. 材料科学与工程学院 中国科学技术大学

2. 高温结构材料研究部 中国科学院金属研究所

单晶高温合金铸件在定向凝固过程中,合金中的活性元素会与陶瓷型壳发生界面反应,影响铸件表面质量。本文以一种高碳(C含量约0.12~0.18wt.%)镍基单晶高温合金DD26为研究对象,对比研究了不同Y含量单晶合金与陶瓷型壳的界面反应行为,揭示了高碳单晶合金中Y元素参与界面反应的微观机理。结果表明:高Y(1.5wt.%)合金中,Y与Al元素向铸件表面偏聚,与型壳中的 SiO_2 与 Al_2O_3 发生反应生成 Y_2O_3 与少量 Al_2O_3 , Y_2O_3 与 Al_2O_3 继续反应生成不同Y/Al原子比的铝酸钇;随着Y降低(0.2wt.%),产物 Y_2O_3 与 Al_2O_3 均被耗尽,依次生成 $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ 、 YAlO_3 和 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$;当Y进一步减少(0.002wt.%),生成的 Y_2O_3 较少,不能将产物 Al_2O_3 完全消耗,残余的产物 Al_2O_3 与 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 共存;当Y降低到1ppm以下时界面反应产物仅有 Al_2O_3 。单晶合金中含量较高的C元素并未直接参与Y元素与陶瓷型壳间的界面反应,而是通过增加合金-型壳之间的润湿性,降低了Y参与界面反应的含量下限,加剧了界面反应。本研究为降低单晶合金定向凝固过程中的界面反应、提高铸件表面质量提供了理论依据。

C04-P32

晶界取向角对抗热腐蚀镍基双晶高温合金高温低周疲劳性能的影响

马力^{1,2}、王栋²、张功²、申健²、张健*²

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

疲劳损伤是单晶涡轮叶片的主要失效形式之一。在铸造这些单晶叶片尤其大尺寸叶片时，不可避免地会形成晶界缺陷。晶界缺陷的存在破坏了 γ/γ' 组织的完整性，进而引发变形不均匀，加速了疲劳裂纹的形成。本研究基于双籽晶定向凝固技术，制备了晶界取向角分别为 5° 和 20° 的镍基双晶高温合金。低周疲劳测试 (980 °C/±0.3%) 表明，晶界取向角增大导致合金疲劳寿命呈现指数型衰减趋势：含 5° 晶界合金的循环寿命达到含 20° 晶界合金的 5 倍。值得注意的是，虽然不同取向角合金的裂纹萌生模式保持一致（近表面孔洞），但随晶界角度增加，裂纹源与晶界的距离显著缩短，裂纹扩展路径也由穿晶模式转变为沿晶模式。此外，氧化作用促进了裂纹的扩展，进而加速了合金的失效。位错组态分析发现，与含 5° 晶界的合金相比，含 20° 晶界合金的变形更加不均匀。晶界对位错运动的阻碍作用增强，导致含 20° 晶界合金的循环硬化水平增加。弥散的碳化物和硼化物可有效缓解晶界附近的位错塞积，降低局部应力集中。

C04-P33

机器学习赋能的增材制造镍基高温合金设计

穆亚航^{1,2}、甘容维^{1,3}、梁静静*^{1,2}、李金国^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

3. 东北大学

鉴于增材制造 (AM) 镍基高温合金普遍存在裂纹敏感性高、高温力学性能不足等瓶颈问题，本研究融合热力学计算、高通量实验与机器学习 (ML) 技术，构建“裂纹预测-性能提升-成分优化”全链条研究体系，旨在突破传统合金设计中强度与可打印性的固有权衡限制。本研究以中科院金属所开发的 ZGH451 合金为基体，采用激光定向能量沉积 (LDED) 工艺系统研究成分-组织-性能关联机制。通过整合实验室实测数据与 Thermo-Calc/JMatPro 热力学计算结果，建立增材制造专用镍基高温合金的多维数据库（成分-裂纹敏感性-组织-性能）。基于该数据库训练随机森林算法模型，实现裂纹敏感性与持久强度的精准预测。进一步通过 LDED 制备 Ti/Al 成分梯度样品，结合 SEM 定量表征 γ' 相组织参数、维氏硬度及纳米压痕微区性能测试，构建成分-组织-性能映射关系。最终耦合 ML 预测模型与高通量实验验证，实现合金成分的协同优化。

本研究基于热力学-实验融合数据构建了裂纹敏感性预测模型，该预测模型具有优异泛化能力，训练集与验证集的相关系数 (R^2) 分别为 0.96 与 0.81。SHAP 特征重要性分析表明：Ti、Al、C、B 对裂纹敏感性影响显著，其余元素影响排序为 $Re > W > Cr > Mo > Ta > Co$ 。以 Ti、Al 元素为例，制备了 Ti/Al 成分梯度样品，通过微观结构演变分析及力学性能测试，获得了定量组织参数 (γ' 相体积分、方圆度和平均尺寸) 和显微硬度，最终确定了 Ti/Al 元素添加的最优区间。随后基于热力学-实验协同的成分梯度设计策略，优化得到的合金在 900°C 下实现 709 MPa ± 24 MPa 的抗拉强度与 28% ± 4.5% 的延伸率，强度-塑性协同效应显著优于现有的增材制造镍基合金。基于 Larson-Miller 参数提出了应力修正型 $LMP\sigma^n$ 参数，实现多应力/温度条件下持久性能的归一化对比。经成分当量及热处理参数特征降维后，构建的持久强度预测模型五折交叉验证精度达 0.96。持久性能预测模型的验证结果表明：当前仍缺乏兼具低裂纹敏感性与高持久性能的增材制造镍基高温合金，经多目标优化设计的新合金 (ZGH450) 力学性能能够达到一代单晶水平。本研究建立的 ML 赋能镍基合金设计范式，为同步降低增材制造裂纹敏感性并提升合金高温性能提供了创新方法论框架，其全链条研究体系对新型高温合金开发具有广泛的指导意义。

C04-P34

一种在宽温域下具有高强塑性组合的 CoNi 基单晶高温合金

潘春辉、玄伟东*、吕圣炜、马应、任忠鸣

上海大学

为突破现有高温合金在宽温域下强塑性难以协同提升的瓶颈，本工作成功开发了一种新型 CoNi 基单

晶高温合金。通过创新性多组元合金化设计,该合金在定向凝固过程中形成了完美的单晶结构,彻底消除了晶界这一宽温域下的潜在薄弱环节。得益于高度稳定且体积分数显著提升的纳米级 γ' 强化相以及固溶元素的协同强化作用,该合金在 25 °C 至 1050 °C 的较宽温度范围内展现出卓越的强塑性组合性能。拉伸力学性能测试表明:该合金在低温端 (25 °C) 兼具超高强度 (抗拉强度=873.58MPa) 与优异韧性 (伸长率=54.78%);在中高温区 (750、950、1050 °C) 不仅维持着较高强度水平 (758.6 MPa、653.12 MPa、434.32MPa),同时表现出显著的塑性储备 (43.9%、24.32%、31.62%)。微观结构表征揭示其性能优势源于单晶结构固有的完整性、 γ' 相在高温下的极端稳定性与抗粗化能力、以及位错与 γ'/γ 界面相互作用的优化,有效抑制了低温解理断裂与高温位错攀移等失效机制。本合金为下一代高性能航空发动机/燃气轮机热端部件提供了在剧烈温度变化环境下兼具超高强度、优异塑性与损伤容限的理想候选材料。

C04-P35

镍基铸造高温合金 4716CC2 的高温拉伸、蠕变行为及显微组织演化

秦卓斌、赵新宝*、龙老虎、夏万顺、岳全召、谷月峰、张泽

浙大高温合金研究所

镍基铸造高温合金 4716CC2 具有良好的高温强度、抗高温蠕变和抗高温氧化性能,主要用于制备燃气轮机透平叶片。本文研究了 4716CC2 合金的高温拉伸和蠕变行为,分析了合金在不同条件下的组织演化规律和变形机理。结果表明,4716CC2 合金在 700 ~850 °C 拉伸时具有较高的抗拉强度和屈服强度,随着温度的升高,屈服强度无明显下降,但存在显著的中温脆性;合金在 980 °C 拉伸时有明显的塑性形变,但其抗拉强度下降明显。在 700 °C 下的拉伸断裂方式为穿晶断裂,随着温度的升高,断裂方式由穿晶断裂转变为沿晶断裂,裂纹萌生薄弱区域由 MC 型碳化物向 γ'/γ 共晶组织转变。在 980 °C 不同应力条件下,合金的蠕变断裂呈现出沿晶断裂和穿晶断裂的特征,随着应力减小,合金的最小蠕变速率下降明显。当应力减小到 150 MPa 和 120 MPa 时, γ' 相形成 N 型筏排组织,反相畴界 (APB) 耦合的位错对穿过粗大的 γ' 相,位错密度随着应力的降低而减小。通过拉伸、蠕变行为及显微组织演化研究,为后续改进合金成分设计和优化热处理制度提供理论依据。

C04-P36

GH4169 合金在 800°C 水蒸气环境下的高温腐蚀行为及氧化膜动态演化机制

邵冠兰、玄伟东*、赵丹、车雪雨、任忠鸣

上海大学材料科学与工程学院

在全球“双碳”目标推动下,氢动力在航空发动机和燃气轮机领域的应用是我国能源结构绿色转型的关键。氢燃料燃气轮机中,高温合金叶片在高温水蒸气环境下的腐蚀问题直接影响设备安全。本研究以镍基高温合金 GH4169 为对象,在 800 °C 下进行 2 h、10 h、20 h 水蒸气腐蚀实验,借助 XRD、SEM、TEM 等手段分析腐蚀产物、微观组织及界面特性,探究其腐蚀机理。结果表明,800 °C 水蒸气腐蚀后合金氧化层分为两层,外层为 Cr_2O_3 层 (中间含有富 Fe 氧化物),第二层为 TiO_2 和 Cr_2O_3 复合的 TiCr_2O_5 层。二次相区域腐蚀更严重,由外至内依次形成 NiFe_2O_4 、 NbCrO_4 、 TiNb_2O_7 与 Cr_2O_3 的复合层,此外,靠近基体区域生成了 Al_2O_3 颗粒。腐蚀机理表明, NbCrO_4 由 Ni_3Nb 中 Nb 元素与向外扩散的 Cr 元素在 O_2 作用下生成,在其下方形成贫 Cr 区,空位促进 Ti 原子扩散生成 TiO_2 ,并与 Nb_2O_5 固溶产生 TiNb_2O_7 。800 °C 水蒸气环境中,腐蚀速率随时间先减缓后升高,原因可能是初始阶段致密的 Cr_2O_3 氧化层阻碍氧气扩散使腐蚀速率降低,而长时间腐蚀下氧化层出现孔洞,屏障作用削弱导致腐蚀速率加快。该研究为 GH4169 合金在高温水蒸气环境中的应用提供理论指导,助于优化氢燃料燃气轮机热端部件材料性能,推动我国氢动力装备技术突破。

C04-P37

基于液态金属喷淋冷却的单晶/柱晶高温合金定向凝固技术研究

帅三三*、张小新、玄伟东、任忠鸣

上海大学

单晶/柱晶涡轮叶片是航空发动机和燃气轮机核心热端部件,其制备技术和规模化生产水平是“两机”发展水平的重要体现。液态金属冷却定向凝固技术 (LMC) 温度梯度是高速定向凝固技术 (HRS) 3 倍以上,能制备冶金质量和综合力学性能更优异的单晶叶片。但液态金属冷却定向凝固技术存在元素污染、温

度梯度恒定性和均匀性及大模组铸件冶金质量控制亟待解决的关键问题。基于此，本课题组提出了基于液态金属喷淋冷却（LMSC）的单晶/柱晶叶片定向凝固技术，开发了通过使用液态金属 Sn 喷淋模壳进行冷却实现高温梯度定向凝固装置。相比于传统高速定向凝固技术（HRS），LMSC 定向凝固技术可以显著提高热流密度，增强冷却效果，大幅提高温度梯度，且可以通过调节 Sn 液喷淋流量调节冷却强度从而调节温度梯度。通过 LMSC 定向凝固技术对典型单晶/柱晶高温合金叶片进行制备研究，研究结果发现，基于 LMSC 的定向凝固技术可以明显减小高温合金一次枝晶间距，细化 γ' 相；同时，该技术可以减小杂质、雀斑等缺陷形成倾向，改善元素偏析程度，从而提升叶片的综合性能。

C04-P38

Ta 对镍钴基高温合金组织演变和力学性能的影响研究

宋语妍*、刘文涛、周靖程、阮晶晶、朱礼龙

烟台大学精准材料高等研究院

本研究系统分析了 Ta 元素对新型镍钴基高温合金在长时热暴露过程中的组织演变和力学性能的影响。通过对 Ta 含量分别为 0、1.5、4wt% 的合金进行 800°C 和 850°C 的长时热暴露，发现随着 Ta 含量的增加， γ' 相体积分数有所增加，且 γ' 相的粗化率逐渐降低。在热暴露过程中， γ' 相的形态在短时暴露后呈球形，长时暴露后转变为立方体形状，且在 850°C 暴露时更早出现这种转变，其形态演变与 γ/γ' 错配密切相关。维氏硬度测试表明，随着暴露时间延长，合金的总硬度降低，原因在于 γ' 尺寸增大削弱了 Orowan 强化，且在热暴露后期二次 γ' 相析出减少或未析出，导致沉淀强化效果减弱。

C04-P39

GH4720Li 合金中 γ' 相在热力耦合作用下的演变规律

孙国庆*、王涛、万志鹏、李钊

中国航发北京航空材料研究院

GH4720Li 高温合金具有良好的高温性能和长期组织稳定性，被广泛应用于先进航空发动机的涡轮盘等转动件中。在实际使用过程中，往往希望 GH4720Li 合金具有良好的综合性能，既要提高合金强度，又要提高合金塑性，因此对合金的制备工艺提出了更高的要求。GH4720Li 合金中的 γ' 相的数量和尺寸对 GH4720Li 合金的力学性能起着决定性的作用，本文以锻态 GH4720Li 合金为研究对象，研究了加热时间、冷却方式对锻态合金和热压缩态合金中 γ' 相的影响规律和作用机制。结果表明：在 1110°C 下，锻态合金和热压缩态合金随着加加热时间和冷却速度的提高，一次 γ' 相的尺寸和数量未发生明显变化，三次 γ' 相的尺寸减小、数量增多；热压缩态合金相比锻态合金发生了更明显的三次 γ' 相粗化现象。EBSD 结果显示，高的位错密度会促进 γ' 相的粗化。本研究建立了加热时间、冷却速度、位错密度对 γ' 相尺寸和数量的定量关系，为 GH4720Li 合金盘锻件的制备提供了技术支持和理论依据。

C04-P40

GH4720Li 合金中 γ' 相在热力耦合作用下的演变规律

孙国庆*、王涛、万志鹏、李钊

中国航发北京航空材料研究院

GH4720Li 高温合金具有良好的高温性能和长期组织稳定性，被广泛应用于先进航空发动机的涡轮盘等转动件中。在实际使用过程中，往往希望 GH4720Li 合金具有良好的综合性能，既要提高合金强度，又要提高合金塑性，因此对合金的制备工艺提出了更高的要求。GH4720Li 合金中的 γ' 相的数量和尺寸对 GH4720Li 合金的力学性能起着决定性的作用，本文以锻态 GH4720Li 合金为研究对象，研究了加热时间、冷却方式对锻态合金和热压缩态合金中 γ' 相的影响规律和作用机制。结果表明：在 1110°C 下，锻态合金和热压缩态合金随着加加热时间和冷却速度的提高，一次 γ' 相的尺寸和数量未发生明显变化，三次 γ' 相的尺寸减小、数量增多；热压缩态合金相比锻态合金发生了更明显的三次 γ' 相粗化现象。EBSD 结果显示，高的位错密度会促进 γ' 相的粗化。本研究建立了加热时间、冷却速度、位错密度对 γ' 相尺寸和数量的定量关系，为 GH4720Li 合金盘锻件的制备提供了技术支持和理论依据。

C04-P41

初始组织状态对 GH4720Li 合金力学性能影响

万志鹏、孙国庆*、王涛、李钊、韦康、万志鹏 Wan

中国航发北京航空材料研究院

对一次 γ' 相偏聚分布细晶组织、均匀细晶组织和均匀粗晶组织三种组织状态下 GH4720Li 合金的晶粒与强化相特征以及力学性能进行了分析，研究了合金组织特征参数对合金力学性能的影响，重点分析了晶界和晶内 γ' 相的分布规律对合金持久及蠕变性能的影响。结果表明：在晶粒尺寸与晶内强化相分布特征相同的条件下，晶界一次 γ' 相的分布特征不会影响合金的抗拉强度与 680°C/830MPa 下的持久性能，具有一次 γ' 相偏聚分布特征的材料，由于部分区域缺少强化相对晶界滑动的约束作用，而使得 625°C/730MPa 蠕变性能和 730°C/530MPa 持久性能较差。而均匀粗晶组织虽然强度较细晶组织低，但由于晶界一次 γ' 相数量少，不利于持久裂纹的扩展，因此，具有均匀粗晶组织材料在 680°C/830MPa 下具有更高的持久塑性。

C04-P42

通过切削构建双尺度互锁亚表面结构以实现 GH5188 高温合金的强塑协同提升

汪潇、王鑫、习粤湘、魏琴琴*、罗国强、沈强

武汉理工大学

GH5188 锻态钴基高温合金在极端热-力耦合条件下具有优异高温强度，但传统加工容易诱发严重加工硬化和高位错密度，限制其拉伸塑性与抗拉强度。本研究通过干式正交切削实现了“切削强化”——在切削速度（30–90 m/min）与切削深度（0.05–0.15 mm）协同作用下，表层发生连续动态再结晶，形成平均尺寸 9.8–12.7 μm 的细晶网络，同时保留 36–50 μm 的粗晶，构建了“双尺度互锁”亚表面组织。EBSD 定量分析显示，位错密度自表面（ $2.39 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ）向 400 μm 深度（ $1.22 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ）呈幂律衰减，形成显著梯度。该组织使 GH5188 在 30 m/min、0.15 mm 条件下抗拉强度由 739 MPa 增至 1214 MPa，塑性应变由 31.5% 增至 87%；在 90 m/min、0.15 mm 条件下，塑性应变更提高至 96.8%。研究建立了切削参数-微观组织-力学性能映射，证明 30 m/min 切削速率与 0.15 mm 切深组合可在提升强度的同时大幅增强塑性，为高温合金加工-强化一体化提供了新思路。

C04-P43

Hf 对 K4222 高温合金组织和高温持久性能的影响

王佳月¹、李文道*¹、胡聘聘²、肖程波²

1. 湘潭大学，材料科学与工程学院，湘潭 411100

2. 中国航发北京航空材料研究院，先进高温结构材料重点实验室，北京 100095

K4222 合金是一种镍基沉淀硬化型等轴晶铸造高温合金，常被用于制备航空发动机的机匣、导向器、导向叶片等热端部件。随着航空发动机整体性能的提升，对热端部件材料的力学性能也提出了更高的要求。Hf 作为典型的晶界强化元素，探究其含量对合金组织及高温持久性能的影响，能够为镍基铸造高温合金中合理设计 Hf 含量以提高高温力学性能提供理论指导。

本研究采用真空感应熔炼法制备了 Hf 含量分别为 0 wt.%、0.72 wt.% 和 1.5 wt.% 的 K4222 合金，研究了不同 Hf 含量的 K4222 合金的显微组织演变以及高温持久性能。研究表明，Hf 含量的增加会促使 K4222 合金中形成 ($\text{Ni}_5\text{Hf}+\gamma$) 共晶。经热处理后，Hf 添加量为 0.72 wt.% 的合金中的共晶基本消除，然而添加量为 1.5 wt.% 的合金中仍存在少量 Ni_5Hf 相。随着 Hf 含量从 0 wt.% 增加到 0.72 wt.% 和 1.5 wt.%，K4222 合金在 899°C/172MPa 条件下的平均持久寿命从 51.7 h 增加到 104.1 h 和 160.9 h，但塑性有一定程度的下降。这主要归因于，Hf 的添加使合金中 MC 碳化物的含量有所增加。此外，MC 碳化物的形貌随着 Hf 含量增加由长条状转变为细小的颗粒状，这降低了蠕变过程中碳化物的开裂倾向，有利于提高晶界强度。添加 Hf 后，合金在蠕变时 γ' 相会发生筏化，同时变形机理由位错绕过 γ' 相转变为位错切割 γ' 相。

C04-P44

激光选区熔化高温合金中的晶粒倾斜设计

王鹏^{1,2}、梁静静¹、朱玉平¹、李金国*¹

1. 中科院金属研究所
2. 中国科学技术大学

在金属增材制造技术中，原位调控晶粒生长方向是一项基础但尚未解决的挑战，这一挑战制约了内部微观组织与宏观形状需求叠加设计的发展。本研究首次通过激光粉末床熔融（L-PBF）技术，利用几何相关的工艺参数成功制备出“倾斜晶粒”。随后，结合多物理场模型与“单晶籽晶”实验，揭示了其背后的驱动力机制。研究发现了一系列有趣现象：在逐层打印过程中，成型区域内形成了非对称的温度与流体耦合场。该场在各方向上的作用会影响倾斜晶粒的晶体取向及其相对应比例。尤为重要的是，倾斜微观组织中隐藏着一种独特的竞争生长机制，这在以往的增材制造研究中尚未记载。基于驱动力分解的启发式结果，研究提出了指导三维倾斜晶粒设计的科学概念，并针对实际应用阐明了用于定制不同倾斜角度的工艺设计标准与建议。这项工作为倾斜晶粒的设计提供了深刻见解，并为激光粉末床熔融技术中零部件的多维度叠加设计奠定了基础。

C04-P45

基于位错成核机制的高延展性 TiAl 合金设计

王世平、冯晓斌、段波、李国栋*

武汉理工大学

TiAl 合金具有密度低、比强度高、耐热性能好等良好的性能，是航空发动机叶片的理想材料。由 γ -TiAl 和 α_2 -Ti₃Al 交替组成的 PST (polysynthetic twinned) TiAl 单晶，在室温下表现出高屈服强度和延展性。然而，其高性能与位错形核机制之间的关系尚未明确。本研究通过分子动力学模拟，探讨了界面位错和滑移面法向应力对 γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al 合金中位错形核的影响。研究发现，在初始屈服阶段观察到三种类型的位错，分别为 γ -TiAl 中的孪生位错，超晶格位错以及 α_2 -Ti₃Al 中的柱面位错。对屈服条件的分析表明，对于这三种类型的滑移系统，临界分切应力和临界正应力之间存在近似的线性关系，该关系进一步通过第一性原理计算的广义堆垛层错能验证。基于这种关系，提出了一种高延展性 TiAl 合金的设计策略，通过预应力在两相临界分切应力之间引入应力差异，这样可以实现分段屈服从而增加材料的延展性。为了验证该策略在实际应用中的有效性，对 PST TiAl 单晶进行了预压缩，以引入两相之间的强度差异，其断裂伸长率较未处理样品提升约 300%，而屈服强度仅出现有限下降，表明通过预应力调控可实现性能优化。

C04-P46

Pt-Ir-Rh 高温合金的组织结构与力学性能研究

王学航¹、李旭铭²、魏燕¹、和思亮²、王献¹、蔡宏中¹、胡昌义*¹

1. 云南省贵金属新材料控股集团股份有限公司，云南贵金属实验室有限公司
2. 昆明贵金属研究所，贵金属功能材料全国重点实验室

Pt 基高温合金因其优异的抗氧化性能与结构稳定性，在航空航天等极端服役环境中具有广阔的应用前景。Rh 元素具备出色的高温抗氧化性能，且与 Ir 之间存在协同的固溶强化效应，可进一步提升合金的综合性能。本文以 Pt-Ir-Rh 三元合金体系为研究对象，设计并制备了三种不同 Ir 含量的 Pt-Ir-10Rh 合金，系统研究了 Ir 含量变化对合金显微组织、室温与高温力学性能以及高温氧化行为的影响。研究结果表明，合金均为面心立方结构的单相固溶体，组织致密，元素分布均匀。随着 Ir 含量的提高，晶粒尺寸逐渐增大，偏析现象增强，合金脆性有所上升。Rh 元素的引入在室温下提高了合金的强度与塑性，在高温下显著改善了合金的蠕变寿命和力学性能。氧化行为分析显示，Rh 可有效抑制 Ir 氧化物的快速挥发，提升合金的抗氧化能力。上述研究结果为 Pt 基高温合金在复杂高温服役条件下的成分设计与性能优化提供了理论依据与技术支持。

C04-P47

X 射线光电子能谱技术在镍基高温合金表面元素价态分析中的应用研究

王亚宁^{1,2,3}、高玄之^{1,2,3}、韩弢^{1,2,3}、张涛^{1,2,3}、王子豪^{1,2,3}、高颂^{*1,2,3}

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室
3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室

镍基高温合金表面在氧化/热腐蚀过程中，元素价态演变直接决定其失效模式。传统 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析复杂合金时，存在峰位漂移、谱峰重叠、主观拟合偏差等难题，导致表面元素价态定量困难。本研究针对 DD5、FGH96、GH4169 及 K447 四种典型合金，建立了 XPS 测定镍基高温合金表面 20 种元素价态的分析方法：

参数优化：通过校准，确定光斑尺寸 (650 μm)、通能 (40 eV)、扫描次数 (10~30) 等关键参数以提高分析灵敏度；

谱库构建：基于纯物质对照 (金属单质、氧化物) 与单因素剥离法，建立 26 种元素的实验/理论结合能标准图谱库，消除元素间能谱峰干扰；

研究表明：建立的 XPS 分析体系可定量解析 20 种元素的表面价态分析，对 Al、Mn、Co、Y 等 10 种元素的分析检出限 ≤ 0.2 at%。该技术为航空发动机叶片的氧化动力学分析、抗氧化涂层设计及腐蚀失效诊断提供了高置信度的原位表征工具，可推广至第三代单晶合金等新型号研发领域。

C04-P48

Re 元素对高 W/Cr 含量镍基单晶高温合金组织和性能影响的研究

王一为、玄伟东*、吕圣炜、高鑫、任忠鸣

上海大学

少量 Re 元素 (≤ 2 wt.%) 对高 W/Cr 含量 ($W \geq 8$ wt.%, $Cr \geq 8$ wt.%) 镍基单晶高温合金的组织稳定性和力学性能的影响机制尚未明确。本文在一种高 W/Cr ($W \geq 8$ wt.%, $Cr \geq 8$ wt.%) 无 Re 的镍基单晶高温合金基础上，加入不同含量的 Re (1%、2%)，对比研究 Re 元素对高 W/Cr 含量合金铸态和热处理态显微组织的影响，并探究 Re 元素对高 W/Cr 含量合金高温拉伸性能和蠕变性能的影响机制。结果表明：随着 Re 的添加，高温拉伸和蠕变性能呈非线性变化，1Re 合金性能较优，2Re 合金强度降低、蠕变寿命骤降。Re 的引入使拉伸断裂模式由剪切断裂为主的混合断裂 转变为微孔聚集型断裂。Re 的低扩散特性抑制元素迁移，改变枝晶间距、 γ' 相体积分数和尺寸等，但拓宽固液相线温度区间。少量 Re (1wt.%) 优化组织稳定性，过多则促进 TCP 相析出，稳定性下降。热处理后合金元素偏析程度降低，但仍有偏析倾向。本研究为优化高 W/Cr 含量镍基单晶高温合金的组织稳定性和高温强度提供依据。

C04-P49

挤压温度和挤压比对 GH4169 合金微观组织影响研究

吴晗¹、付书红^{*1}、杨艳慧²、苏力东²、秦瑞庭³、李媛媛³

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 西北工业大学
3. 内蒙古北方重工集团有限公司

GH4169 (Inconel 718) 是一种广泛应用于航空航天领域高温部件 (如涡轮叶片、导向器) 的镍基沉淀强化高温合金，其性能高度依赖于热加工工艺获得的微观组织。本研究针对锻造开坯后的 GH4169 合金，结合有限元模拟与实验验证，构建了热挤压过程的温度-应力场耦合模型，并系统分析了不同挤压温度 (980–1060 $^{\circ}\text{C}$) 和挤压比 (3:1–6:1) 对组织演变的影响。结果表明：随着温度升高，动态再结晶程度显著提高 ($>98\%$)， δ 相体积分减少，其形貌从短棒状转变为球形；当温度 1020 $^{\circ}\text{C}$ 时，晶粒发生粗化。挤压比的增大进一步促进再结晶，6:1 挤压下晶粒尺寸达 13 μm ，且高温下二次粗化显著。本研究通过数值模拟与工艺试验结合，明确了 GH4169 合金热挤压的最优工艺窗口 (1000–1020 $^{\circ}\text{C}$, 3:1–5:1)，为组织均匀性调控和高温构件可靠性提升提供了理论依据。

C04-P50

定向柱晶带冠涡轮叶片疏松控制研究

吴雨萌¹、张迈²、赵云松²、姚志浩*¹

1. 北京科技大学

2. 中国航发北京航空材料研究院

目前先进涡扇/涡轴/涡桨发动机低压涡轮及动力涡轮工作叶片普遍采用带叶冠及篦齿的复杂结构，然而，叶冠结构带来的突变截面增加了定向凝固过程固液界面不稳定性及温度场、流场复杂性，导致疏松缺陷产生的风险升高。本研究聚焦某 DZ406 高温合金涡轮叶片叶冠结构的疏松缺陷控制，采用基于实测温度反演传热边界条件的 ProCAST 有限元模拟与微纳 CT 实验验证相结合的方法，系统研究了模组结构、补缩方式及抽拉速率等主要定向凝固工艺参数对疏松形成的影响规律与作用机理，并在前人研究的无量纲 Niyama 判据基础上总结优化出了考虑叶冠几何构型的疏松形成判据。研究结果阐明了叶冠区域疏松缺陷的形成过程，通过优化模组设计和定向凝固工艺参数，实现了疏松缺陷分布预测、叶片定向凝固工艺优化以及叶冠疏松缺陷抑制，具有一定的工程参考价值。

C04-P51

Mo、W 对一种新型铸造镍基高温合金组织及性能的影响

谢树磊¹、王旻*²、马颖澈²

1. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院

2. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心

Mo 和 W 作为高温合金关键固溶强化元素，其配比及含量显著影响合金高温力学性能，然而二者不同含量及比例之间的协同强化机制尚不明确。本研究针对一种新型沉淀强化型镍基铸造高温合金，开展了固溶强化元素 Mo、W 的不同含量及比例对合金力学性能及热暴露稳定性影响的研究。

本研究在两种 Mo、W 总含量水平下（2.5at%、3.5at%），分别设置了三种原子比成分（Mo:W=1:0、2.74:1、0:1），系统探讨了 Mo、W 元素含量及配比对 K 该镍基高温合金高温力学性能的影响规律。实验结果表明：（1）Mo、W 总含量及 W 占比的提高有效提升了合金在标准态及热暴露后的 800°C 拉伸及持久性能。标准状态下含 3.5 at%W 的合金的持久寿命为 653h，较原始成分提高了 348%，其拉伸屈服强度提高至 836MPa；（2）在经过 850°C/300h 热暴露后，3.5 at%W 合金的 800°C 高温持久寿命与拉伸强度依旧能维持在 202h 与 736MPa；（3）强度提升伴随塑性显著降低，标准态断口分析显示，随着 W 占比提高，断口由含 Mo 合金的典型韧窝特征（延伸率>5%），变为单含 W 合金的解理断裂模式（延伸率<2%），其中各成分下拉伸与持久断口的微裂纹主要形成于晶内碳化物附近；（4）微观分析表明，各成分标准态合金均由 γ/γ' 双相组织、MC 型碳化物及 M₂₃C₆ 型碳化物构成。SEM 表征显示随着 W 元素含量及比例的提高，标准态下 γ' 强化相体积分数显著提高，其平均粒径也由 65 nm 细化至 55 nm。经 850°C/300h 热暴露处理后，单一 W 合金的 MC 相界面处出现大量针状拓扑密排（TCP）相—相析出；（5）能谱分析显示，Mo、W 元素在标准态下主要偏聚于 MC 碳化物相，其中 3.5 at%W 平均质量占比高达 19.4%。

实验结果与相关研究表明，随着 W 元素含量的增加及其原子比例的提升， γ 基体的固溶强化效应显著增强，同时偏析进入 γ' 相的 W 元素含量亦同步提高，这促使 γ' 相的体积分数增加和尺寸细化，其弥散强化作用显著提高。但随着 W 比例的提高以及 Mo 的含量减少，在拉伸塑性变形过程中 MC 与基体界面处更易产生裂纹，导致合金塑性显著下降。另外 W 在 MC 中含量的提升，也是热暴露过程中更易形成富 W 针状相的原因。

C04-P52

后处理对选区激光熔化制备的新型镍基高温合金组织及性能的影响研究

徐鹤、梁静静、李金国*

中国科学院金属研究所

镍基高温合金在增材制造过程中，存在缺陷多、残余应力大等问题，严重影响了零件的性能和寿命，需要通过后处理进一步调控合金组织和性能，而目前还缺乏适用于增材制造的热处理工艺。因此，本文以金属所研发的增材制造用高温合金 ZGH401 为研究对象，采用 SEM、EBSD 和 TEM 等研究热等静压和固溶时效对合金组织和性能的影响。结果发现，与沉积态 ZGH401 相比，热等静压减少了合金的微裂纹，降

低了残余应力，固溶后的组织分布更为均匀，固溶时效增大了 γ' 相的体积分数及方形度。后处理后的合金拉伸性能有所改善，强度塑性均得到提高，室温，650°C 以及 900°C 下的抗拉强度分别提高了 31%、29% 和 50%，其中 900°C 的断裂方式由沉积态的沿晶断裂转变为混合型断裂，高温低应力的持久性能提高了 400-500%，断口处有 δ 相析出，晶界处存在细小的碳化物颗粒。本课题旨在改善组织性能后的 ZGH401 合金可以凭借承温能力及高温性能成为合格的增材制造专用高稳定型合金，为探索增材制造专用的后处理工艺奠定了基础。

C04-P53

稀土元素 (La、Ce) 含量对 Cu-Ni-Al 合金 组织结构及力学性能的影响

杨川荣*

大连交通大学

高温铜基自润滑复合材料是工业应用中必不可少的材料，具有优异的电学性能、导热性能和耐磨性。在航空航天、汽车、电力等领域有着广泛的工业应用。通过添加 Ni 和 Al 来提升合金的强度、高温稳定性和耐腐蚀性。通过热处理（固溶+时效）析出 γ' 相 (Ni₃Al)。稀土元素因其化学性质活泼而受到人们的特别关注和广泛应用。大量实验及研究表明，稀土元素的掺杂可以显著提高高温合金的抗氧化性、抗腐蚀性和力学性能。因此，稀土元素也被称为“工业维生素”，是拓宽新一代高温合金制造工艺、提高合金综合性能的有效途径，是高性能铜合金设计的关键手段。La、Ce 的加入可以使 O、S 等元素与稀土元素形成高熔点化合物（如 La₂O₃、Ce₂S₃），起到净化除杂作用，减少孔洞，提高致密度。合金在凝固过程中 La、Ce 优先偏聚于晶界，抑制晶粒长大，形成细小的等轴晶组织，起到晶粒细化作用。在高温维氏硬度实验中，600°C 保温 5h 后，发现添加稀土元素 (La、Ce) 的 Cu-Ni-Al 合金硬度比未加稀土元素的合金高温硬度提升 10~20HV。未来通过成分-工艺协同优化，稀土 Cu-Ni-Al 合金将在航空航天、新能源、电子器件等领域发挥更大作用。

C04-P54

固溶处理冷却速率对一种第三代单晶高温合金及其涡轮叶片显微组织与力学性能的影响

杨万鹏*、李嘉荣、刘世忠、李晓鹏、陈巧、赵金乾

中国航发北京航空材料研究院

为优化第三代单晶高温合金涡轮叶片的显微组织与力学性能，特别是针对复杂叶片结构带来的热处理难度，本研究旨在探索真空条件下的固溶处理冷却速率对合金与叶片显微组织和力学性能的影响机制。分别采用 3 种固溶处理充氩冷却压力完成了合金与叶片真空热处理，观察了叶片叶身与榫头部位的 γ - γ' 共晶组织与 γ' 相，并分别依据拉伸试验规范（标准号：HB 5195）与持久试验规范（标准号：HB 5150）测试了合金的 760°C 拉伸性能与 1100°C/137MPa 持久性能。结果表明：3 种固溶处理冷却速率对第三代单晶高温合金涡轮叶片叶身、榫头部位 γ - γ' 残余共晶影响较小，叶身无残余共晶，榫头含较少残余共晶；随固溶处理冷却速率增加，完全热处理态的 γ' 相平均尺寸减小；固溶处理冷却速率对合金 760°C 拉伸性能无明显影响，随固溶处理冷却速率减小合金 1100°C/137MPa 持久寿命增加。本研究结果有助于辅助第三代单晶高温合金复杂结构涡轮叶片真空热处理关键工艺参数的选择，以实现显微组织与力学性能的最佳匹配。

C04-P55

形变孪晶对二代镍基单晶高温合金冷热疲劳过程中表面裂纹扩展的影响研究

尹阔¹、李龙飞¹、赵云松²、冯强^{*1}

1. 北京科技大学 新金属材料全国重点实验室

2. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室

镍基单晶高温合金在冷热疲劳过程中极易形成表面裂纹，而形变孪晶是影响单晶合金力学性能的关键因素之一。本文以第二代镍基单晶高温合金为研究对象，开展了 1100 °C-25 °C 不同循环周次的冷热疲劳实验，探究了形变孪晶在冷热疲劳过程中的演化规律及其对表面裂纹扩展的作用机制。结果表明：在冷热疲劳过程中，由于高温氧化和热应力的共同作用导致合金表面萌生裂纹并逐渐向内部扩展。同时发现合金内部产生了大量的形变孪晶，而形变孪晶会促进表面裂纹的扩展。随着冷热疲劳循环周次的延长，由形变孪晶诱导的表面裂纹长度进一步增加。进一步分析表明，形变孪晶的形成与 {111}<112> 滑移系的激活相关。在形变孪晶生长过程中，由于 γ' 相的阻碍作用导致其厚度减小。此外 Co、Cr 和 Re 元素在孪晶界面处的偏

聚会形变孪晶的生长起到促进作用。本研究明确了冷热疲劳过程中形变孪晶对表面裂纹扩展的促进作用，为提升二代镍基单晶高温合金的冷热疲劳性能和其服役安全提供了数据支撑和理论依据。

C04-P56

服役后定向 GTD-111 镍基高温合金组织演化与拉伸性能

余明洋、赵新宝*、谷月峰、夏万顺、岳全召、张泽

浙江大学高温合金研究所

GTD-111 镍基高温合金因其优异的高温性能，被广泛应用于制造燃机涡轮动叶。本文通过扫描电子显微镜 (SEM) 等表征方法，研究了定向 GTD-111 合金的叶片在服役约 12000 小时后组织的变化，以及服役后在 982°C 下拉伸性能与组织之间的关联关系。所有拉伸过程均为韧性断裂，裂纹源为枝晶间的碳化物。与叶柄相比，叶身在服役时承受更高的温度和应力后，主要强化相 γ' 相发生明显粗化， γ' 相对合金的强化作用有明显的减弱；MC 型碳化物分解产生了 η 相和 M23C6 型碳化物。但是叶身在高温下拉伸性能和叶柄基本相当。进一步分析发现，在拉伸后叶身中分解的碳化物内部，及其与合金基体结合的界面处，产生的裂纹相较叶柄都更少，并且周围没有出现明显的应力集中。这是因为 MC 型碳化物发生分解后产生 η 相与 MC 型碳化物相比硬度更低，可以有效降低拉伸时碳化物周围的应力集中，减少裂纹的产生，提高合金在高温下的拉伸性能。

C04-P57

固溶温度对一种新型镍钴基单晶高温合金组织与性能影响的研究

喻金涛、玄伟东*、任忠鸣

上海大学

镍钴基高温合金是一种新型的高温结构材料，具有许多优于传统镍基高温合金的性能。但是高温下晶界会成为服役过程中的薄弱环节，所以采用定向凝固技术可以消除镍钴基高温合金的晶界，从而得到镍钴基单晶高温合金，提升合金在高温下的组织稳定性和综合力学性能。本文以一种新型镍钴基单晶高温合金为研究对象，对比研究了固溶温度对合金组织的影响，进而通过不同温度下的拉伸实验，探究了合金组织在拉伸过程中对强度和塑性的影响规律与作用机制。研究结果表明：通过优化热处理工艺，显著改善了合金组织均匀性，提升了 γ' 相体积分数和立方化程度。提升热处理温度，有利于 γ' 相体积分数提升，但是过高会产生初熔，影响合金性能。合金拉伸强度在 760°C 达到峰值，而塑性在 760°C 最低后显著回升，于 1100°C 达到最佳，断裂行为由脆性向韧性转变。本研究为发展镍钴基单晶高温合金微观组织调控方法以及提升其性能提供了技术支持和理论依据。

C04-P58

晶界对高温合金抗富氧燃烧性能的影响

张桂淋^{1,2}、张少华*¹、张健¹

1. 中国科学院金属研究所，沈阳，110016

2. 中国科学技术大学，合肥，23002

目前，关于晶界对材料抗富氧燃烧性能的影响机理还缺乏深入的研究。本文以一种抗富氧燃烧高温合金为研究对象，采用高速冷却法制备了定向和单晶组织，研究了晶界对抗富氧燃烧性能的影响。结果表明：在室温、高压纯氧条件下，单晶合金的抗富氧燃烧性能显著优于定向合金。对燃烧后的形貌进行观察，单晶合金燃烧后热影响区均呈现均匀的波浪形，枝晶间的热影响区长度显著高于枝晶干的热影响区。而定向凝固合金的热影响区呈现非均匀的波浪形，除了枝晶间位置存在较长的影响区外，在晶界附近发现了更宽更长的热影响区；研究认为，热影响区的波浪形是由于成分偏析导致的，枝晶间的低熔点相会优先融化导致热影响区范围变大。而晶界作为元素扩散快速通道，促使易燃元素沿晶界向燃烧前沿扩散，从而造成晶界附近燃烧温度显著高于基体燃烧温度，使得晶界位置热影响呈现更宽、更长的形貌。本研究为抗富氧燃烧高温合金材料的晶界调控提供理论依据。

C04-P59

合金材料高温熔化及润湿性能的原位表征

张海媛*

天津中环电炉股份有限公司

高温合金材料广泛应用于工业成产、钢铁冶金、航空航天、焊接、复合材料制造等领域，而这些领域中的很多现象都与材料高温特性及界面润湿行为相关，所以高温下固-液之间的润湿，尤其是高温下金属与金属/金属与其他材料之间润湿性对整个流程的研究解析十分重要。本工作采用高温原位座滴法，将熔融金属/合金等的高温润湿行为可视化，研究了高温高真空条件下几种金属/合金体系的表面润湿性及高温特性，有助于了解材料的高温热物性能。

C04-P60

一种难焊高温合金铸件的补焊修复新技术

张昊翔^{*1}、罗峰月²、邢伟杰¹、张丽辉¹、张强¹、任晓冬¹、张勇¹、张楚博¹、陈金宾¹

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 太行实验室

高温合金旨在实现高承温能力，通常含有较高含量的沉淀强化元素（如 Al、Ti）和难熔元素，导致其可焊性较差，例如 K423A 合金。本研究提出并采用全保护环境钨极惰性气体保护焊（FEP-TIG）技术用于 K423A 铸件补焊修。相较传统补焊修复技术，FEP-TIG 具有更好的焊点可达性和焊点背部保护效果。采用三种不同的焊接电流进行铸件补焊，所有焊点均无缺陷，展现了 FEP-TIG 优异的工艺宽容度。利用先进电子显微技术系统评估了焊点的微观组织。研究揭示了受焊接电流和凝固条件影响的热影响区（HAZ）中多种枝晶形貌。焊后热处理诱导了热影响区中 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}) \gamma'$ 相的析出以及母材（BM）中 M_{23}C_6 碳化物的析出，从而影响了两区的力学性能。本研究为难焊高温合金铸件补焊提供了一项可靠的技术，并为 K423A 合金铸件补焊的深入研究奠定了理论基础。

C04-P61

Al、Cr、Ti 对 Ni-Cr-Co 基高温合金高温氧化行为的高通量研究

张梦迪、吴冲冲*

烟台大学

Ni-Cr-Co 基高温合金广泛应用于涡轮叶片、涡轮盘等关键部件，该材料在 760°C-870°C 长时间服役过程中，高温氧化是其非常重要的失效形式，对其氧化机理的分析和成分优化非常必要。本研究使用“3D 打印-高温扩散”高通量方法制备了不同 Ti 含量的 Al-Cr 双梯度高通量样品，系统研究了常见抗氧化元素 Al、Cr、Ti 对 Ni-Co-Cr 合金抗氧化性能的影响规律，可以为该材料的成分优化提供思路。结果表明，在不含 Ti 合金中，当 Al/Cr 为 0.186 时，样品内部可形成连续的 Al_2O_3 膜。Ti 对 Al 的氧化起协同作用，随着 Ti 含量的增加，临界 Al/Cr 比减小。Ti 在可形成连续内氧化膜的高 Al/Cr 区域，Ti 含量越高，外氧化膜中的 Cr_2O_3 越疏松，不含 Ti 样品的抗氧化性约好。在无连续内氧化膜的低 Al/Cr 区域，Ti 含量越高，样品的致密性越好，合金中的扩散通道越少，抗氧化性越好。

C04-P62

新型镍基粉末高温合金不同服役条件下的性能研究

张熙宇¹、王晨¹、赵格格¹、王二鹏¹、黄再旺²、江亮^{*1}

1. 烟台大学

2. 中南大学

镍基高温合金凭借优异的高温力学性能和抗氧化能力，在航空航天、能源动力等领域具有重要应用前景。本研究开发了新型镍基 JZZY 高温合金，系统探究了新型镍基 JZZY 高温合金在不同服役条件下的性能。结果表明，新型镍基 JZZY 高温合金各方面性能优异，应用前景广阔。此研究结果可为新型镍基 JZZY 高温合金的热处理工艺的制定和实际生产应用提供理论依据。

C04-P63

扭转晶界对镍基单晶高温合金 DD5 拉伸断口形貌及变形机制的影响

张翔宇、玄伟东*

上海大学

镍基单晶高温合金因其优秀的高温力学性能被广泛应用于航空发动机热端部件，但其性能往往受到缺陷的制约，晶界作为一种主要缺陷对性能的影响十分严重。一次枝晶偏离所产生的晶界研究已相当深入，但二次枝晶扭转所产生的晶界对高温合金性能影响的研究尚不充分。本文重点研究了不同二次枝晶扭转角度下晶界的演变。结果表明，随着二次枝晶取向差的增大高温合金的塑性呈现明显下降趋势，抗拉强度和屈服强度与单晶试样相比没有明显变化，另外，从断口形貌可以看出随着二次枝晶扭转角度变大，断口特征逐渐由韧性断裂转变为脆性断裂，最后，通过透射电子显微镜对不同二次枝晶扭转角的拉伸后试样位错分布进行表征，讨论了位错随拉伸行为的变化以及扭转晶界与塑性变形机制的关系。

C04-P64

基于固溶元素设计增材专用镍基高温合金成分

张雪*、梁静静、李金国

中国科学院金属研究所

增材制造 (AM) 镍基高温合金因高冷却速率易产生裂纹，严重制约其应用。本研究基于热力学计算与实验验证相结合的策略，探究了固溶元素对合金可打印性、组织稳定性及高温强化机制的影响，旨在建立增材专用镍基合金成分设计准则。结果表明：调控固溶元素控制凝固区间及晶间固溶强度，成功实现无裂纹打印。控制枝晶间 W、Mo、Re 总量，有效抑制了 1000°C 长期热暴露过程中有害针状碳化物的析出。中温下 γ' 相强化主导，W 元素强化作用显著；高温下 γ/γ' 错配度起决定性作用，Re 元素强化效果突出。据此设计并制备了增材制造专用镍基高温合金 ZGH452，其高温性能显著优于现有绝大多数增材镍基高温合金。本研究为增材制造专用高性能镍基高温合金的成分设计提供了关键理论依据。

C04-P65

后处理工艺对 LPBF 难焊接高温合金的组织与性能的影响

张艳博¹、鲁凯举²、胡锐*¹、梁秀兵²

1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室

2. 军事科学院国防科技创新研究院

激光粉末床熔融制造的“难焊接”高温合金在高温下存在严重的塑性损失，尤其是水平制造的试样。本研究表明，过固溶处理可有效缓解高 γ' 体积分数镍基高温合金在 850 °C 下的塑性损失，与大多数先进的高性能激光粉末床熔融 (LPBF) 制造的高温合金相比，在室温和高温环境下具有优异的强度与塑性。在不影响强度的情况下，水平构建试样的断裂延伸率 (9.1%) 相比于亚固溶处理的样品 (2.2%) 得到了显著提升。这种提高归因于晶界碳化物的离散分布，避免了晶界脱粘和沿晶裂纹的产生。最后，通过 TEM 观察变形组织和定量计算，揭示了过固溶处理试样室温下优异的拉伸性能源于 Orowan 绕过一次 γ' 沉淀以及位错剪切二次 γ' 沉淀。此外，L-C 锁和层错剪切 γ' 沉淀延缓了不稳定颈缩的形成，从而在室温下实现强塑性协同提升。在 850 °C 下，除了与室温相近的位错与 γ' 沉淀的相互作用外，形成了扩展层错或微孪晶协调塑性变形，从而在高温下减轻了高温塑性损失。

C04-P66

脉冲电流诱导激光增材制造镍基高温合金高密度退火孪晶的强韧性协同效应

张志鹏^{1,2}、刘纪德*¹、王建军²、李金国¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 东北大学

镍基高温合金作为航空航天热端部件的核心材料，其强韧性协同提升是该领域内的重要挑战。增材制造技术虽能实现复杂结构的高效成形，但该技术制备的合金仍存在残余应力和组织不均匀等问题，限制了合金强韧性的进一步提升。本文提出一种基于脉冲电流处理 (EPT) 的创新后处理方法，将其作为激光增材制造 718Plus 合金的后处理，为提升合金性能开辟了新路径。深入讨论了 EPT 对合金微观组织和拉伸性能的影响。结果表明，EPT 能快速消除合金中的 Laves 相，降低残余应力并促进再结晶。此外，EPT 通

过提高晶界迁移率和降低基体堆垛层错能的协同作用，促进了高密度退火孪晶的形成。塑性变形过程中，高密度退火孪晶通过阻碍位错运动、协调晶粒间的塑性变形，以及与层错、纳米变形孪晶和 Lomer-Cottrell 锁的协同作用，显著提升了合金的延展性，同时并未牺牲强度。该研究为增材制造镍基高温合金的后处理及强塑性协同优化提供了新策略，有望推动镍基高温合金在航空航天等领域向高性能、低能耗方向升级。

C04-P67

镍基高温合金梯度热处理过程中相变潜热与析出相特征研究

赵志豪*

烟台大学精准材料高等研究院

镍基高温合金涡轮盘热处理工艺优化需精准调控相变动力学过程，相变潜热释放对温度场动态演化及微观组织形成机制具有决定性作用。本研究基于端淬-梯度冷却实验，通过不同特性的热电偶阵列监测，获取了不同热电偶响应条件下的冷却曲线，以及不同冷却速率下 γ' 相相变温度。结合不同冷速条件下 γ' 相特征与热力学计算结果，阐明了冷却速率对相变潜热、 γ' 相相变温度的影响规律，并建立了热电偶响应特性与析出相特征之间的映射关系。本研究为快速建立镍基高温合金的 CCT 和 TTT 曲线提供了新方法，并为热处理工艺设计提供了理论指导。

C04-P68

硫元素对 K417G 合金氧化及持久性能影响研究

曹夕¹，朱旭辉²，于淼²，盛乃成¹，孙士杰¹，范世钢¹，侯桂臣¹，周亦青¹

1. 师昌绪先进材料创新中心，中国科学院金属研究所

2. 中国航发沈阳发动机研究所

硫 (S) 作为高温合金关键界面活性杂质，其晶界偏聚行为显著制约航空发动机热端部件可靠性。本研究通过真空感应熔炼制备四组硫含量梯度的镍基高温合金，系统开展 1000°C/300h 恒温氧化实验与 760°C/645MPa 持久测试，结合扫描电镜 (SEM) 形貌解析、能谱仪 (EDS) 微区成分分析及 X 射线衍射 (XRD) 物相鉴定等技术，探究了硫元素含量对 K417G 高温合金氧化性能和中温持久性能的影响机制。结果表明：硫含量升高引发氧化膜失稳与持久寿命协同衰减。当硫含量 > 8 ppm 时，氧化增重速率非线性跃升，保护性氧化膜因 Al/Cr 扩散受阻发生开裂，硫富集界面阻断 Al/Cr 扩散，促进非保护性氧化物形核；同时硫诱导晶界弱化，引发局部应力集中，导致合金持久寿命下降。本研究建立硫含量-氧化膜完整性-持久寿命的定量关联模型，指导合金中硫元素控制要求，以保障 K417G 合金在航空发动机热端部件中的服役可靠性。

C04-P69

Synergy of mechanical property and combustion resistance of a novel SLM Ni-Cr-based superalloys with Cu addition

Zifu Li*

Binzhou Institute of Technology

The influence of Cu on the microstructure, mechanical properties, and oxygen-rich combustion behavior of a novel Ni-Cr-based superalloy produced by selective laser melting (SLM) was investigated. As-built alloys displayed columnar and cellular substructures with high-density dislocations and Laves phases distributed at cell boundaries, with feature sizes increasing with Cu content. Post-heat treatment microstructural evolution shown δ phase precipitation along grain boundaries and γ' - γ'' co-phase with a distinct sandwich morphology. peak tensile strength was achieved at 1.0 wt.% Cu. Flame resistance initially improved with increasing Cu content, reaching minimum burning length and rate at 1.5 wt.% Cu. The microstructure exhibits columnar grains with holes and microcracks in the heat-affected zone, while a Cu/Ni-rich layer in the melting zone hindered oxygen diffusion. The Ni_{0.95}Cu_{0.05}O oxide further suppressed combustion kinetics. Cu content significantly influenced flammability resistance and mechanical properties, with optimal synergy observed at 1.0-1.5 wt.% Cu.

C04-P70**Effect of long-term aging at 980°C on microstructural evolution of single crystal superalloy DD6**

Jichun Xiong, LIJIE HU, JIAN YU, JIAN ZHANG, YUNSONG ZHAO, YUSHI LUO, JIARONG LI*

Beijing Institute of Aeronautical Materials

The microstructural evolution of the second generation single crystal superalloy DD6 with [001] orientation after long-term aging at 980°C for 2000h, 6000h, 10000h, 15000h respectively without stress were investigated. The results show that with the increase of the long-term aging time, the size of γ' increase in the dendrite core, then coarsen and connect each other, and finally become rafting. The acicular precipitation, rod-like precipitates and square precipitation have been observed in the dendrite core area. The γ' phases in the dendrite arm raft firstly, then grow up, and eventually disintegrate. The γ' in the interdendrite maintain cubic after aging at 980°C for 6000h, then coarsen gradually, finally, the γ' raft completely after aging at 980°C for 15000h. SAD results show that the acicular precipitation, rod-like precipitates and square precipitation are all M₆C carbide, and rich in W, Mo Re.

C04-P71**Mechanisms of σ phase precipitation and dissolution behavior in a Cr-rich Ni-based superalloy during long-term aging**Yuanpeng Yang^{1,2}, Chang Liu¹, Jiasheng Dong^{*1}, Langhong Lou¹

1. Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China

σ phase, one of the most prevalent topologically close-packed (TCP) phases in Ni-based superalloys, is typically regarded as having a deleterious effect on mechanical properties. In this study, σ phase precipitation and dissolution behavior during long-term aging at 900 °C were systematically investigated in a Cr-rich polycrystalline Ni-based superalloy, using multiple characterization methods such as transmission electron microscopy, phase extraction, and X-ray diffraction. The results indicated that Cr and W segregation drives the preferential precipitation of lath-like σ phase in the γ matrix. As aging proceeds, σ phase nucleates at M₂₃C₆ interface and grows toward matrix. The formation of a highly coherent nucleation M₂₃C₆/ σ interface is facilitated via long-range three-Cr-periodic atom matching. A favorable orientation relationship between the three phases, namely $[011]_{\gamma} // [011]_{M_{23}C_6} // [110]_{\sigma}$, $(1-11)_{\gamma} // (1-11)_{M_{23}C_6} // (001)_{\sigma}$ and $(-2-11)_{M_{23}C_6} // (-110)_{\sigma}$, promotes σ phase nucleation. While the growth σ/γ interface alleviates the lattice distortion by forming a stepped atomic configuration. Additionally, σ phase forms internal defects to minimize σ/γ interface lattice mismatch. The competitive effect of substantial M₂₃C₆ carbides on Cr atoms dominates the σ phase dissolution in the later-stage aging. This study provides insights into the σ phase nucleation and growth mechanisms and the optimization of alloy design for high-Cr Ni-based superalloys.

仅发表论文

C04-PO01**铸态 GH4251 合金热模拟压缩过程对动态再结晶的影响**翟雪婷^{*1}、王涛¹、万志鹏¹、孙宇²

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 哈尔滨工业大学

GH4251 合金在 800°C服役环境下能够展现出优异的抗蠕变性能和高温强度, 已发展成为先进航空发动机耐高温承力环形件候选材料。然而, 其高体积分数 γ' 相导致的低塑性特征严重制约了热加工成形效率。现有研究表明, 通过调控热变形参数可有效改善 γ' 相分布形态, 进而优化材料塑性。但关于多场耦合条件下动态再结晶机制与 γ' 相演化规律的定量研究仍显不足, 这直接影响了该合金热加工工艺的优化设计。本研究对均匀化处理后的铸态 GH4251 合金进行单道次等温热压缩实验, 基于 Arrhenius 双曲正弦函数建立了包含温度补偿应变速率参数的流动应力本构模型。结合显微组织多尺度表征手段, 系统阐明了 γ' 相体积

分数演变规律及其空间分布特征。结果表明,随着变形温度的提高和应变速率的降低,GH4251合金的动态再结晶临界应变减小, γ' 强化相的体积分数增大, γ' 强化相分布更加均匀。本研究构建的热力耦合本构模型可应用于该材料构件模锻工艺仿真,为发展高合金化难变形镍基高温合金动态再结晶机制提供理论依据。

C04-PO02

Ta 元素对 GH4780 合金组织稳定性的影响机制研究

冯天豪^{1,3}、谢兴飞^{*1,2}、朱礼龙³、吕少敏^{1,2}、曲敬龙^{1,2}、杜金辉^{1,2}

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司
2. 四川钢研高纳锻造有限责任公司
3. 烟台大学精准材料高等研究院

镍基变形高温合金因其优异的综合力学性能,在航空发动机及工业燃气轮机中应用广泛。随着对航空发动机性能要求的不提高,新型镍基变形高温合金的开发工作迫在眉睫。GH4780合金作为一种可锻、可铸的新型镍基变形高温合金,因其在750℃服役环境下优异的性能表现而引起广泛关注。镍基变形高温合金的长时组织稳定性对其在高温服役环境下的性能至关重要,组织的稳定性体现在 γ' 相粗化、拓扑密排相(TCP)析出以及晶界稳定性方面。本文通过对比标准热处理态及在近服役温度(700-800℃)下长期热暴露后的GH4780合金显微组织,研究了Ta元素含量对GH4780合金微观组织稳定性的影响规律。结果表明:随着热暴露时间延长, γ' 相逐渐粗化,其形貌由球形转变为立方体状;Ta元素在此过程中能有效抑制 γ' 相的粗化,进而维持合金的组织稳定性。然而,过量的Ta元素含量在长期热暴露过程中会导致 η 相在晶界析出,损害合金的性能。本研究系统归纳了GH4780合金组织稳定性研究的核心进展,并从微观组织演化机制、合金化成分调控策略以及多尺度计算方法三个层面展开系统阐述,为新一代高性能合金的设计提供了理论支撑。

C04-PO03

难变形高温合金 GH4079 均匀化处理前后的组织演变规律

何佳讯^{*1}、韦康¹、王涛¹、任俊宇²、赵张龙²

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 西北工业大学

GH4079为典型的难变形高温合金,合金化程度很高,沉淀强化元素Al+Ti+Nb含量为9.0%,主要用于制造航空发动机中的涡轮盘。高的Al+Ti+Nb含量极易导致合金凝固过程中产生严重偏析,而合理的均匀化处理工艺可以显著减轻合金的偏析程度。本文研究了GH4079合金铸态条件下析出相组织特征和元素偏析情况、均匀化处理后的微观组织演变和元素再分配的变化规律。结果表明,GH4079合金铸态条件下主要析出相为 $\gamma+\gamma'$ 共晶相、 $M_{23}C_6$ 、MC、Laves相;Mo、Nb、Ti元素偏聚于枝晶间,W,Cr元素偏聚于枝晶干;合金在1165℃出现低熔点相熔化现象。经均匀化处理后,枝晶偏析基本消除,合金成分均匀。本研究为GH4079合金均匀化处理工艺的制定提供了技术基础。

C04-PO04

镍基高温合金定向凝固型壳诱发缺陷及控制

贾玉亮^{*1}、白小龙²、戴勇¹、刘伟²、李林¹、张丽¹、蔡俊成¹、叶锋¹、李超¹、杜应流¹

1. 安徽应流机电股份有限公司
2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司

单晶叶片高温(1500℃左右)、长时(1~4h)的定向凝固对型壳质量提出了严苛要求,而随着单晶叶片产业规模增长,型壳质量及其诱发缺陷愈发成为叶片制备的控制重点。本文介绍与阐释了单晶叶片几种典型型壳裂纹、型壳诱发晶体缺陷的形成原因和控制措施。关于型壳常见裂纹,应用无添加矿化剂的氧化锆浆料,可以保障轻型燃机叶片制备,E级燃机叶片则容易出现微裂纹而诱发杂晶,但无法保障F级燃机叶片成型,F级燃机叶片需使用含有添加剂的氧化铝型壳;氧化铝型壳热膨胀系数比氧化硅型壳热膨胀系数小 $1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,自由端设置过小则可能造成型壳焙烧后发生裂纹;F级单晶叶片螺旋成型型壳制备时非常容易形成裂纹,需使用树脂+蜡料的复合螺旋,以及可避免杂晶的底部支撑工艺。关于型壳诱发晶体缺陷,不

同蜡料修补叶片蜡模后，型壳表面状态存在差异，容易诱发等轴晶缺陷；型壳剥离造成单晶叶片表面发生点状再结晶，对机械清壳、化学清壳的规范性提出了很高要求；型壳面层浆料纯净度和单晶炉温度场波动是条带晶异质形核重要原因与控制方向。

C04-PO05

Hot Compression Behavior and Hot Processing Map of CoCrMo Alloy Prepared by Vacuum Induction Melting-Electroslag Remelting

Xinxu Li*, ang Yu, Lei Li, YuanKai Liu, XiKe Liu, Yu Meng

BEIJING BAIMTEC MATERIAL CO., LTD

The hot compression behavior of cast CoCrMo alloy prepared by vacuum induction melting-electroslag remelting duplex process is systematically explored under the conditions of temperature range of 950 ~ 1150 °C and strain rate of $10^{-2} \text{ s}^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$. Through the analysis of true stress-strain curve, it is found that the increase of deformation temperature can significantly reduce the flow stress (the peak stress at 1150 °C and 10^{-2} s^{-1} is nearly 70% lower than that at 950 °C and 10^{-2} s^{-1}), and the strain rate sensitivity index m fluctuates in the range of 0.1 ~ 0.34, showing the coexistence characteristics of dynamic recrystallization and hot working instability. Based on Arrhenius constitutive equation and power dissipation theory, the hot working diagram of cast CoCrMo alloy is constructed, and its safe machining domain (temperature $\geq 1050 \text{ °C}$, strain rate $\leq 1 \text{ s}^{-1}$) and instability region (temperature $\leq 1000 \text{ °C}$, strain rate $\geq 3 \text{ s}^{-1}$) are defined. The critical condition of instability corresponds to the peak dissipation efficiency of 40%. The research results provide a direct theoretical basis for optimizing the process parameters of casting CoCrMo alloy forging and blanking and avoiding hot working defects, and have engineering guidance value for improving the quality of medical implants and aerospace parts blanks.

C04-PO06

基于正交试验设计的等离子喷涂 BaZrO₃ 热障涂层的制备

李政楷、纪玉龙*、付景国、苏怀宇、邢金昌

大连海事大学

随着燃气轮机工作温度的不断提升，高温镍基合金制成的涡轮叶片等热端部件的工作温度已逐渐接近其使用极限，因此需要在其表面制备热障涂层以保证其在严苛工况下的长时服役稳定性。本研究采用大气压等离子喷涂工艺，在 GH4169 高温合金基体上依次制备了 NiCoCrAlY 金属粘结层和 BaZrO₃ 陶瓷层。并通过正交试验研究了喷涂工艺参数对 BaZrO₃ 涂层微观组织结构和力学性能的影响规律。试验结果表面，BaZrO₃ 涂层呈现了典型的层状结构特征，层间存在着细小的柱状晶结构。喷涂工艺参数对 BaZrO₃ 涂层结合强度、硬度及孔隙率的综合影响顺序为：辅气流量 > 主气流量 > 喷涂距离 > 喷涂速度。辅气流量 3000scm、主气流量 4000scm、喷涂距离 100mm、喷涂速度 200mm/s 是正交试验优化出的最佳喷涂参数。该试验条件下，涂层的孔隙率为 14.35%，硬度为 839.6HV_{0.1}，结合强度为 18.38MPa。本研究不仅系统揭示了工艺参数与 BaZrO₃ 涂层性能之间的内在关系，还为该材料在热障涂层领域的工程应用那个提供了重要的工艺参考和理论指导。

C04-PO07

新型镍基高温合金 GH4780 的热变形行为及再结晶机理

刘扬^{1,3}、谢兴飞^{*1,2}、朱礼龙³、曲敬龙^{1,2}、杜金辉^{1,2}

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司

2. 四川钢研高纳锻造有限责任公司

3. 烟台大学精准材料高等研究院

本研究通过高温压缩系统分析了新型镍基高温合金 GH4780 的热变形行为和再结晶机制。通过对 GH4780 在变形温度为 1030 ~ 1120°C、应变速率为 0.001 ~ 1 s⁻¹、真应变为 0.7 的变形条件下进行高温压缩实验。发现 GH4780 流变应力对温度和应变速率非常敏感，峰值应力随应变速率的增大和变形温度的降低而增大，建立摩擦、温度和应变补偿修正的 Arrhenius 模型本构方程。随着变形温度的升高和应变速率的降低，合金的再结晶面积和晶粒尺寸增大。发现再结晶晶粒以孪晶为基础向外膨胀长大，可以认为这是一

种以孪晶为基础的孪晶诱导再结晶 (TDRX), 形成并加速了再结晶晶粒的长大。在 GH4780 合金中, TDRX 机制和不连续动态再结晶 (DDRX) 机制是动态再结晶的主要机制。

C04-PO08

Effects of Different Heat Treatment Regime Processes on the Mechanical Properties of CoCrMo Wire Alloy

Ang Yu, Xinxu Li*, Yuankai Liu, Chao Li, Xike Liu, Yu Meng

Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd.

The effects of different solution heat treatment processes on the properties of CoCrMo wire alloy were studied. Wire materials were prepared from a master alloy ingot with a specific composition. After heat treatment at different temperatures and times, microstructure observation, hardness tests, and tensile property tests were conducted. The results show that heat treatment significantly affects the alloy properties: aging strengthening at 600 °C for 120 minutes increases the tensile strength by 4.15% and the hardness by 11.23%; recrystallization treatment at 1050 °C for 30 minutes leads to an increase in elongation of 309.76%; solution treatment at 1100 °C for 120 minutes enhances the elongation by 265.85%, while solution treatment at 1200 °C for 120 minutes results in a 48.90% decrease in yield strength and an 80.27% decrease in hardness. In terms of microstructure, the grain size remains stable at grade 8.0 under aging strengthening temperature, increases from grade 4.0 to grade 6.0 with rising recrystallization temperature, and decreases to grade 2.5 under solution treatment at 1200 °C for 120 minutes. This study provides process parameters for optimizing alloy properties and facilitates their application in the biomedical field.

C04-PO09

晶内-晶界强度匹配性对难变形高温合金力学行为的影响

刘志凌^{1,2}、吕少敏^{*2,3}、谢兴飞^{2,3}、曲敬龙^{2,3}、杜金辉^{2,3}、张少明⁴

1. 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100081
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081
3. 四川钢研高纳锻造有限责任公司, 四川 德阳 618099
4. 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081

难变形高温合金作为航空发动机热端部件的关键材料, 其力学性能强烈依赖于晶内强化相与晶界析出相的协同作用。本文研究了晶内二次 γ' 相与晶界 M₆C 型碳化物的强度匹配性对合金强度、塑性及持久性能的影响规律, 揭示了晶内-晶界协同变形机制。结果表明: 晶内二次 γ' 相的尺寸与分布主导位错滑移阻力, 而晶界处 M₆C 型碳化物影响合金塑性。随着晶内二次 γ' 相增大, 合金屈服强度降低。晶界 M₆C 碳化物呈连续链状分布时引发严重塑性损失—室温拉伸延伸率由 19% 骤降至 11.5%, 高温 (750°C) 延伸率由 9% 劣化至 5%, 且沿晶脆性断裂的比例增大。当晶界处碳化物尺寸为 50~100nm 且不成链状、晶内二次 γ' 相尺寸为 100~150nm 时, 晶内-晶界强度得到有效匹配, 合金综合性能最优异。本研究为改善难变形高温合金强塑性倒置瓶颈提供了理论依据与工艺路径。

C04-PO10

固溶冷速对新型镍基高温合金 γ' 相及持久性能的影响

孟新宇^{1,2}、吕少敏^{*2,3}、谢兴飞^{2,3}、曲敬龙^{2,3}、杜金辉^{2,3}

1. 钢铁研究总院 高温材料研究所
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司
3. 四川钢研高纳锻造责任有限公司

镍基高温合金具有稳定的高温力学性能、良好的抗疲劳蠕变性能以及优异的耐环境损伤性能, 是航空发动机关键部件的重要材料。目前, 关于不同固溶冷却速率对合金组织及对力学性能的影响研究还较为缺乏。本文研究了新型镍基高温合金在 3 种不同固溶冷却速率下的微观组织与 650°C 持久性能变化, 并分析了 γ' 相组织对力学性能的影响。研究表明: 晶内二次 γ' 相形貌及尺寸的变化是影响 650°C 持久性能的主要因素, 冷却速度较快 (50°C/h-80°C/h) 时, 合金 γ' 相形成元素的过饱和程度增大, 二次 γ' 相临界形核尺寸减小进而逐渐细化向近球形态转变, 当亚固溶冷却速度较慢 (25°C/h) 时会导致晶内二次 γ' 相定向粗

化形成八重小立方体状。此时镍基高温合金的持久寿命升高至 88h。通过固溶冷却速度的减慢使持久寿命提升了 33%，实现了长时性能的提高。

C04-PO11

后处理态不同 Ta 含量难变形高温合金的热变形行为与微观组织演变

任帅^{1,2}、吕少敏^{2,3}、谢兴飞^{2,3}、侯为学^{2,3}、曲敬龙^{*2,3}、杜金辉^{2,3}

1. 钢铁研究总院 高温材料研究所
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司
3. 四川钢研高纳锻造有限责任公司

不同 Ta 含量难变形高温合金在熔炼过程中具有复杂的凝固过程，导致合金内部存在严重的元素偏析以及大量低熔点析出相，影响合金后续的热塑性变形。本文通过实验研究难熔元素 Ta 的扩散动力学，并利用 Gleeble 热模拟试验机对后处理态不同 Ta 含量难变形高温合金在变形温度涵盖 γ' 相亚固溶温度 1050°C~1150°C 与过固溶温度 1150°C~1200°C，应变速率 0.01~1s⁻¹ 的条件下进行压缩实验。考虑 γ' 相再析出行为，分析变形温度、应变速率及组织特性对热变形的影响，建立 Arrhenius 型本构方程。结果表明：在均匀化过程中，Ta 的扩散最为缓慢，根据 Ta 在不同温度下的残余偏析系数，计算了不同 Ta 含量难变形高温合金合金中 Ta 的扩散激活能和扩散常数，并利用扩散模型建立了 Ta 的均匀化动力学。后处理态不同 Ta 含量难变形高温合金的应力-应变曲线具有典型的动态再结晶特征，计算得出其不同的热变形激活能。观察开裂微观组织发现，后处理态合金组织中绝热剪切变形带是裂纹萌生的主要位置，周围伴随着不同尺寸的碳化物。在过固溶温度区间实现完全动态再结晶，在亚固溶温度区间发生部分动态再结晶，升高变形温度会加速偏析相和细小颗粒的溶解，促进再结晶晶界的迁移，从而提高合金中的再结晶程度，同时， γ' 相形貌对亚固溶温度区间的动态再结晶形成有一定的抑制作用。该研究对不同 Ta 含量难变形高温合金的变形机制以及获得目标微观组织提供指导。

C04-PO12

热变形温度对 GH4706 合金晶粒组织和力学性能的影响

王冲¹、王磊¹、秦鹤勇²、黄烁^{*2}、沈中敏²、段然²、张北江²、赵光普²

1. 东北大学
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

GH4706 合金是一种沉淀强化型 Ni-Fe 基变形高温合金，是重型燃机轮盘锻件主选材料。热变形温度显著影响 GH4706 合金大型轮盘锻件晶粒组织演化，并且通过组织遗传效应对热处理后合金的组织 and 力学性能产生影响。本文基于 GH4706 合金大型锻件制备参数，分别以 1010 °C、1050 °C、1090 °C 和 1130 °C 热变形后进行相同制度的热处理，探究热变形温度对合金晶粒组织和力学性能的影响。结果表明：热变形后，随着热变形温度升高，动态再结晶(DRX)的晶界迁移速率逐渐加快，DRX 尺寸、体积分数及孪晶界(TBs)体积分数均逐渐增加。热处理后，随着热变形温度升高，晶粒长大的晶界迁移速率先大幅减慢后小幅减慢，TBs 体积分数逐渐降低；在 1090 °C 和 1130 °C 条件合金呈现混晶特征且具有晶界弯曲现象，但 1130 °C 条件合金仍残留部分亚结构组织。热变形温度的升高，增加了合金热处理后的持久寿命，基本不影响合金的室温拉伸、650 °C 拉伸和室温冲击韧性。本研究为 GH4706 合金超大尺寸盘锻件晶粒组织调控和提升持久寿命提供技术支撑和理论基础。

C04-PO13

复合氧化膜 Cr₂O₃-Al₂O₃ 增强高温合金抗氧化性能机理研究

王海涛*、孙俊鹏

青岛理工大学

通过中频感应电炉熔炼铸造了 K273 高温合金，通过合金化植入了铝元素。根据氧化增重的方法分析了试验合金 1000 度 500 小时的抗氧化性能。氧化膜形貌与成分分别运用扫描电镜和 X 射线衍射仪分析研究。通过建立半导体型氧化物模型从微观离子电子的移动角度深入研究了其对氧化膜抗氧化性的影响。研究表明由 Cr₂O₃、Al₂O₃ 及尖晶石 MCr₂O₄ 组成的复合氧化膜，组织平坦致密，颗粒度均匀细小，使试验合金达到了强抗氧化性。复合氧化膜优良的抗氧化机理在于 P+N 型半导体氧化膜形成之后，大量消耗了内

部过剩的离子，使其可移动的离子电子数量极大降低，进而氧化膜内部的离子电子移动速度极大降低，因此金属基体的氧化速度急剧下降，增强了合金的高温抗氧化性能。

C04-PO14

B/Si 间隙原子介导高强高温钛合金

王元泽、张金钰*、刘刚、孙军

西安交通大学

目前工业上使用的高温钛合金大多使用温度在 600°C，强度低，热稳定性较差且加工成型能力差等原因是使得高温钛合金使用温度一直处于瓶颈阶段。本工作采用 Bo-Md 图设计出一种新型高温钛合金，相较于传统 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系高温钛合金去除了 Zr 元素的添加，引入 Nb, B, C 等元素提升其室温力学性能及高温力学性能：初步设计后基于团簇理论进行进一步成分优化。通过生成金属间化合物 TiB 减少高温钛合金中的织构，并通过成为异质形核核心来减少 α GB（晶界 α 相）生成，从而避免大量连续 α GB 作为裂纹源影响高温钛合金力学性能。并且通过轧制及固溶时效处理控制 α p 比例和球化，时效处理析出弥散的 α s 提高强度，通过 TiB 和硅化物来钉扎位错提高强度，同时 TiB 可以限制硅化物的分布从而减少硅化物在 α/β 界面处的偏聚，进一步改善其力学性能。目前室温下的屈服强度可达 1200MPa 级别，远超过传统高温钛合金的力学性能，达到高强钛合金的水平。1.通过对 Ti6242 组织进行研究，将其调控在双态组织具有最佳的力学性能，室温下屈服强度 900MPa，延伸率 11%。2.对初步设计高温钛合金 Ti-6Al-4.84Sn-3Nb-0.5Mo-0.35Si-0.1B 通过跨相区轧制控制 α p 比例，固溶时效析出弥散 α s 进一步提升强度，并通过在 TiB 表面析出 α s 膜，进一步协调塑性，室温下屈服强度达到 1234MPa，延伸率达到 10%，实现了优异的强塑性结合。3.进一步采用微合金化的思路优化成分 Ti-6Al-4.84Sn-3Nb-0.5Mo-0.35Si-0.1B-0.2C，通过轧制加时效处理室温下屈服强度可达 1270MPa，延伸率 7.5%。

C04-PO15

Study on chemical compositions of B1914 alloy and the improvement of as-cast mechanical properties

Zichen Wang*

BEIJING BAIMTEC MATERIAL CO., LTD

As an equiaxed crystal superalloy with a C content of no more than 0.02% and boron elements of 0.08% to 0.12%, B1914 is widely used in the manufacture of power generation or marine turbine impellers that require long-term service. At present, most of the studies focus on the microstructure and mechanical properties of the alloy after heat treatment, but the mechanism of action of as-cast microstructure and mechanical performances between different chemical compositions are relatively scarce. In this paper, the microstructure characteristics (including dendrite morphology and carbide distribution) and the corresponding tensile strength at different temperatures were systematically studied by adjusting the ratio of major elements (such as Cr and Mo) and γ' phase enhancement elements (Al and Ti) of B1914 alloy. SEM (Scanning Electron Microscope), OM (Optical Microscope), were used to reveal the intrinsic correlation mechanism between chemical composition, microstructure and mechanical properties. Then a quantitative relationship model of "composition-structure-performance" was constructed, which provided theoretical basis and technical support for the composition optimization design and casting process control of B1914 alloy.

C04-PO16

Research on High Temperature Performance of HfO₂@TiCp/GH3536 Composites

Yu Zhang¹, Meihui Song^{*1}, Yan Li¹, Yuansheng Wang¹, Yanchun Li¹, Shulin Gong¹, Xiaochen Zhang¹, Zhuo Chen², Yongqun

Yang², Huimin Yang³

1. Institute of Advanced Technology, Heilongjiang Academy of Sciences

2. Aerospace Haiying (Harbin) Titanium Co., Ltd.

3. Department of Material and Chemical Engineering, Heilongjiang Institute of Technology

In this paper, the sol-gel method was used to modify the surface of hafnium oxide with submicron TiC particles. After surface modification, submicron HfO₂@TiC particles were mixed with GH3536 spherical

powders by mechanical ball milling to form HfO₂@TiC+GH3536 composite powders, which were used for SLM forming, to prepare HfO₂@TiCp/GH3536 composites. The effects of VED, modification of hafnium oxide and heat treatment on the microstructure and high temperature properties of HfO₂@TiCp/GH3536 composites was investigated. The main results are as follows:

In the range of 800~1000 °C, the high temperature tensile strength of HfO₂@ TiCp/GH3536 composites firstly increased and then decreased with VED increasing. However, the elongation of the composites increased with VED increasing. After modification of TiC particles, the tensile strength of the composites decreased with the increase of HfO₂ content.

In the range of 800~1000 °C, the oxidation mass gain per unit area of HfO₂@ TiCp/GH3536 composite materials significantly increased with the increase of temperature. The oxidation mass gain increased first and then decreased with rise of VED. The oxidation mass gain decreased with the increase of hafnium oxide content. The oxidation kinetic curve of TiCp/GH3536 composites formed by different VED below 1000 °C conformed to the parabolic law. With the increase of hafnium oxide content, the antioxidant capacity of the composites increased and the oxidation kinetics curves were more closed to the parabolic law.

The oxidation resistance of HfO₂@TiCp/GH3536 composites improved by reducing the contact area between oxygen elements and TiC particles, which weakened the diffusion of Ti elements. The oxide layers of HfO₂@TiCp/GH3536 composites were mainly composed of Cr₂O₃, TiO₂ and a small amount of spinel NiFe₂O₄ and NiCr₂O₃. With the increase of oxidation time and temperature, the thickness of the oxide layers gradually increased and the oxide layers falled off under thermal stress. The higher the content of hafnium oxide, the later the time of the oxide film shedding.

C04-PO17

Ti₂AlNb 基合金的室温与高温力学性能及其机理研究

赵金甫、张航、张金钰*、刘刚、孙军

西安交通大学

轻量化、高效能、低成本是航空航天结构材料发展的主要追求目标。Ti₂AlNb 合金因具有密度低、比强度高、耐高温氧化、抗蠕变性能优异等优点逐渐成为在航空航天发动机领域最具潜力的轻质结构材料之一。然而作为一种金属间化合物，Ti₂AlNb 合金的本征脆性导致其具有塑性差、韧性低的缺点，严重限制了其广泛应用，因此，如何通过材料成分设计、组织控制等方式改善其缺点从而开发出高性能 Ti₂AlNb 基合金就成为亟待解决的现实问题。

本研究致力于提升 Ti₂AlNb 合金的室温和高温力学性能，并深入探究其内在机理。在成分设计方面，近年来，有关 Ti₂AlNb 基合金中添加第四元合金化的研究已有大量报道，但研究主要集中在简单的单种元素添加的合金体系中。为此，从优化合金综合性能出发，本研究设计了 Mo、Zr、Si 的三种合金元素同时添加的多元 Ti₂AlNb 基合金，Mo 元素可以改善合金热加工性能，提高合金强度和抗氧化性，细化 O 相片层组织，调整微观组织结构；Zr 元素可以提高 Ti₂AlNb 合金的蠕变强度和抗氧化性；Si 元素可以提高合金强度和抗氧化性。在微观组织调控方面，本研究采用控制轧制温度与变形量使合金在轧制过程中实现动态再结晶与组织均匀化，获得细小等轴晶粒组织，阻碍位错运动提高室温和高温屈服强度、抗拉强度并改善塑性；同时热处理时精确控制加热温度、保温时间和冷却速度，促进 O 相有序析出，O 相与基体共格关系良好，分散应力阻碍裂纹萌扩，增强室温和高温综合力学性能，尤其高温环境下有序强化作用明显，使合金高温强度和韧性同步提升。

本研究采用真空电弧熔炼的办法制备合金，熔炼得到的合金经均匀化、轧制、热处理等工艺后得到合金试样。在力学性能测试方面，对合金进行室温及在 650°C、750°C、800°C、900°C 等不同温度下进行拉伸测试。结果表明，经过多种元素添加和微观结构优化后的 Ti₂AlNb 合金，在室温下屈服强度提高了 15%，在 650°C 高温环境下，屈服强度分别提高了 30%，同时延伸率保持在 10% 左右，展现出优异的高温强度和塑性协调能力。

通过 SEM、TEM、EBSD 等技术分析合金微观组织，发现热轧后组织呈现金等轴状，晶粒明显细化，O 相的平均尺寸仅为 0.5μm，晶粒取向有一定的方向性；O 相作为强化相对 B2 相的位错主要起钉扎作用，

拉伸时 B2 相中出现明显的滑移现象,晶界错配度降低,减少应力集中现象从而提高了合金整体力学性能。

综上所述,本研究通过元素添加与微观结构设计相结合,有效提升了 Ti_2AlNb 合金的室温和高温力学性能,并深入探究了其内在机理,为 Ti_2AlNb 合金在航空航天等高端装备领域的应用提供了重要的理论依据和技术支持。

C04-PO18

高纯净低氧含量 Rene77 母合金的工艺优化及性能研究

赵帅*、彭伟平、卢华东、李璐璐

江苏奇纳新材料科技有限公司

Rene77 高温合金作为航空发动机涡轮叶片、燃烧室部件的关键制备材料,面对更高推重比、更高进口温度的严苛服役环境,制备关键构件的高纯净度高温合金母合金起到关键作用。本文以工业制备高纯低氧 Rene77 高温合金母合金为对象,分析了纯金属原材料经过多组工序预处理、不同熔炼工艺及过滤系统对母合金氧氮水平与浮渣能力的影响规律,研究不同工艺对高温合金母合金的夹杂物及高温持久性能的影响规律。结果表明:原材料经过大力度抛丸表面处理、烘烤、可进一步降低 O 与杂质元素 Cl、Ca 等元素引入合金中;实验得出最佳精炼温度与精炼时间,完成脱氧与合金化过程;浇铸系统优化为两道档渣、两道双过滤,分段过滤残留冶炼杂质,使合金浮渣水平由 1.5% 稳定控制在 0.5% 以下,高温持久时间达到 70.8 小时,较优化前提升 33.04%。以上研究为铸造高纯高温合金母合金降低引入杂质与控制合金氧含量提供了量产数据支撑。

C04-PO19

Research progress in Tungsten alloys on the evaluation of alloying design, processing routine, and mechanical properties

Bin Sun¹, Wen Su¹, Tianhong Gu¹

¹Xi'an Jiaotong-Liverpool University

Tungsten alloys are pivotal for nuclear energy applications due to their exceptional properties, including high melting point, radiation resistance, and mechanical strength. However, their utility is constrained by low-temperature brittleness and performance degradation under extreme conditions. This review systematically examines the fabrication, post-processing, and mechanical properties of tungsten alloys, including tungsten heavy alloys (WHAs) and tungsten-based high-entropy alloys (HEAs). By optimizing alloy composition and employing advanced fabrication techniques, significant improvements in ductility, strength, and ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) reduction have been achieved in past works. Key findings of the review highlight the synergistic effects of compositional design and process optimization in addressing the inherent brittleness of pure tungsten. Thermomechanical treatments are found as a factor to further enhance grain refinement and interfacial bonding, mitigating anisotropic behavior and improving mechanical performance. Moreover, the review evaluates the mechanical testing, including tensile, bending, and fracture toughness, and underscores the critical role of microstructure in determining alloy properties. This review provides future research directions to emphasize innovative alloying strategies and advanced processing methods to overcome existing limitations, paving the way for superior tungsten-based materials in extreme-environment applications. This comprehensive review provides a foundation for further exploration and validation of tungsten alloys in nuclear and aerospace engineering.

C04-PO20

镍基高温合金棒材异常粗晶的一般形成机制与控制策略

刘华松*¹、郭啸东²、王楷萌²、何西扣¹

1. 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院

2. 鞍钢集团北京研究院有限公司

在热处理环节发生组织异常粗化是镍基高温合金的常见质量问题。本研究以三种不同特征的高温合金棒材实际粗晶为对象,结合 EBSD、EPMA、OM、SEM 表征与晶粒长大动力学分析、相场模拟分别完成了机理阐释。基于此提出,由晶粒尺寸和析出相钉扎作用耦合引发的异常晶粒长大是粗晶缺陷的普遍形成

机制，而残余应力、残余偏析可加剧这一行为。因此，调整晶粒尺寸与碳化物状态、避免二者的匹配关系进入异常晶粒长大范围是控制热处理粗晶的核心思路。进而，通过相场模拟与实验构建了异常晶粒长大的发生条件，并结合生产工艺与产品要求提出了最具潜力的粗晶控制策略，包括变形工艺优化、固溶制度优化等。

C04-PO21

粉末材料多尺度 MPFEM 模拟与修正屈服准则建立

巴美怡^{1,a*}, 孙宇^{1,b*}, 胡连喜^{1,c*}, 高飞^{2,d}

1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江省省哈尔滨市 150001

2. 山东大学 齐鲁医学院口腔医学院, 山东省济南市 250012

报告人联系方式: bamy4510@163.com, 15776684510

金属粉末材料在增材制造、粉末冶金等先进制造领域占据核心地位，其多尺度特征、可调控孔隙率、粉体流变特性及可控机械强度使其备受关注。然而，传统实验手段在探究粉末微观行为与致密机制方面存在显著局限，且实验获取粉末体变形力学响应及本构关系成本高、效率低、误差大，制约了对粉末冶金工艺的深入理解与优化。多尺度数值模拟为解决上述问题提供了有效途径，其中多粒子有限元法（MPFEM）融合有限元法（FEM）的连续介质分析能力和离散元法（DEM）的离散颗粒追踪优势，可有效表征颗粒系统的刚性位移、弹塑性变形及其相互嵌入的变形行为，为粉末冶金数值模拟开辟新方向。本文基于 DEM-FEM 耦合框架构建细观 MPFEM 模型。在模型构建方面，建立了细观 MPFEM 粉末体堆积模型以描述粉末体的初始堆积状态，采用细观 MPFEM 粉末体单轴压缩模型来模拟压制过程，并对模型参数进行设定及验证，探究了 MPFEM 单轴压缩坯料变形流动规律。在材料特性研究上，针对 EP741NP 高温合金粉末，研究了其塑性流变应力特性，涵盖温度、应变速率、相对密度对粉末体流变应力的影响。通过该模型，精准获取粉末颗粒在细观尺度下的重排机制、弹塑性变形过程、应力及应变场演化和接触力网络分布等特征，揭示致密化机理与粉末体成形的非线性力学响应。此外，基于研究结果建立修正的粉末体椭球形屈服准则，为粉末冶金工艺优化、塑性成形理论拓展以及相关工程应用提供了坚实的理论基础。

闪报

C04-S01

含纳米 M2C 碳化物低 Si 含量 ERNiMo-2 焊丝熔敷金属的强韧化研究

朱玉成*

中国科学院上海应用物理研究所

本文以商用 Hastelloy N 合金焊丝(ERNiMo-2)以及对应调整的低 Si 含量 ERNiMo-2 焊丝为研究对象，较为系统地研究了对应熔敷金属的显微组织和力学性能。同标准 Si 含量的商用 ERNiMo-2 焊丝相比，低 Si 焊丝熔敷金属组织中含有更多纳米析出相，该析出相在枝晶间围绕 M6C- γ 共晶相或沿晶界析出。拉伸实验结果表明，在室温和 700°C 条件下，低 Si 含量 ERNiMo-2 焊丝熔敷金属的强度均高于标准焊丝的焊缝金属。通过透射电镜(TEM)观察分析，Si 含量的降低使得熔敷金属中析出了纳米 M2C 型碳化物，纳米尺寸的 M2C 碳化物不仅提高了材料的强度，同时对合金塑性也有积极影响。本研究的结果对 ERNiMo-2 焊丝中的 Si 元素含量优化有明确的指导意义。

C04-S02

基于机器学习辅助预测高温合金热加工性能研究

李文鹏^{*1,2,3}、王广磊^{2,3}、张华¹、曲敬龙^{2,3}、杜金辉^{2,3}

1. 烟台大学

2. 北京钢铁研究总院

3. 四川高钠高钠锻造有限责任公司

高温合金在成形过程中塑性变形复杂，准确评估温度、应变速率及应变变量对其热加工性能的影响，对组织控制和工艺设计至关重要。传统热加工图主要基于温度与应变速率构建，在全面反映复杂成型条件下

的应变影响存在一定的局限性。本文以镍基高温合金 GH4141 为研究对象，构建了两种能够综合考虑温度、应变速率及应变影响的机器学习热加工性能预测模型。在此基础上，进一步结合本构方程、三维热加工图及微观组织演变分析，建立了一种耦合预测方法，以确定该合金的最优热加工工艺窗口。研究表明，模型预测的微观组织演变趋势与实验结果高度一致。动态再结晶（DRX）程度与功率耗散因子（ η ）呈显著正相关，且两者均随温度升高和应变速率增大而增强。值得注意的是，在低温高应变速率条件下，材料易发生流动失稳，局部热软化促使绝热剪切带（ASB）形成，此时 DRX 程度与 η 值呈现相反的变化趋势。通过结合热加工性能预测与微观组织分析，本研究将不同热变形参数下的组织演变划分为失稳区、部分再结晶区、完全再结晶区和晶粒过度长大区四个区域，为 GH4141 合金的组织控制和工艺设计提供了理论依据和模型支持。

C04-S03

用第一性原理研究 Mn 替代 Ni 对 Sanicro 25 奥氏体耐热钢组织稳定性和力学性能的影响

巩胜利*

兰州理工大学

随着社会的发展，人们在电力方面的需求日益增大，污染物排放量也急剧增长，导致环境污染加速，电力行业向高效清洁的方向发展成为较为关键的议题。瑞典山特维克公司在 NF709 基础上研发的 Sanicro 25 奥氏体耐热钢因其具有优异的结构稳定性和高温力学性能，有望成为 630~650°C 等级超超临界火电机组的新一代奥氏体耐热钢。其合金元素种类较多，其中稀贵金属 Ni 元素含量较高。为了降低成本，我们采用第一性原理计算的方法对 Sanicro 25 奥氏体耐热钢中 Ni 元素的减量化进行模拟研究，基于主要元素 Fe-Cr-Ni 体系构建基本模型，从原子尺度研究了 Mn 元素对其结构稳定性和力学性能的影响。形成能、结合能以及吉布斯自由能等计算结果表明在 Sanicro 25 奥氏体耐热钢中使用 Mn 元素替代 Ni 元素后仍具有较好的结构稳定性，且在 630~650°C 使用温度下结构稳定性表现的更为优异；通过分析电子性质，发现一定量的 Mn 替代之后体系表现出较好的热稳定性；弹性模量分析可知替代后使得体系的抗压强度有所提高，不同替代对应材料刚度发生不同程度的变化；随着应变的增加，各体系拉应力均先增大后减少。总之，Fe-Cr-Ni 系中以 Mn 代 Ni 是可行的，是 Sanicro 25 奥氏体耐热钢领域节约 Ni 的重要方法。