

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C04-高温合金
C04-Superalloys

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C04. 高温合金分会

分会主席：杜金辉、冯强、张军、张健、肖程波

C04-01**镍基变形高温合金冶金缺陷控制研究**

杨树峰

北京科技大学

C04-02**透射电子显微镜分析应力条件下 IN718 合金中变体选择性效应**刘芳辰¹、孟凡强^{*1}、邓汉忠²、刘杨³、王磊³

1. 中山大学
2. 辽宁工程技术大学
3. 东北大学

IN718 是一种通过 γ'' 强化 Ni 基高温合金，在工业中得到广泛的使用。 γ'' 相的尺寸、分布以及与基体的晶格失配程度是直接影响合金的高温性能的关键因素。本研究聚焦了在 700°C, 4000h 的时效处理过程中，拉伸应力对 IN718 晶体结构以及析出相长大行为的影响。实验样品选取经过标准热处理的 IN718 样品，其中一组样品直接进行时效处理，另一组在时效过程中施加 300MPa 拉伸应力。中子衍射的结果显示，在施加拉伸应力的样品中，可以清晰的观察到 γ'' 相的 (116)、(204)、(004)、(112) 衍射峰。然而，在无应力直接时效的样品中，仅能观察到 γ'' 相的 (204)、(112) 衍射峰。SEM 和 EBSD 的结果显示，应力时效会促使 IN718 强化相的以牺牲部分变体为代价的择优生长，择优生长的变体与应力方向与强化相生长方向的夹角相关。透射电子显微镜观察结果显示择优生长的变体在其尖端的失配应变大于其中部。更大的弹性应变能使得择优变体更易沿轴向进行生长。

C04-03**一种析出强化高导热 CoFeNi 中熵合金的开发**张澜庭^{*1}、刘庆冬¹、刘明洋¹、张孟超²、李慧²

1. 上海交通大学
2. 上海大学

CoCrNi 或 CoFeNi 系为代表的中熵合金因成分简单、强塑性高和高温组织稳定等优点，近年来受到广泛关注。其中，CoFeNi 系合金同时具有简单且较为宽广的 FCC 和 BCC 相区，具备设计更高强度的 BCC 结构合金的自由度。通过基于热力学计算的成分优化，我们成功开发了一种 BCC 结构的非等原子比的高强 CoFeNi 系中熵合金 (Co₄₅Fe₄₀Ni₁₅ (at%))，其同时具备优越的热导率，达到常规 Fe 基合金的 3~4 倍。热力学和动力学计算表明，该合金的凝固温度范围窄 ($\leq 0.5^\circ\text{C}$)，在增材制造快速凝固中几乎不产生偏析，因而具有良好的可打印性。回火时，该合金具有显著的析出强化特征，峰值硬度达 510 ± 10 HV。在 400~550°C 回火时，BCC 基体内析出类似 omega 相的富 Ni 针状相，起到主要的硬化作用；高温 ($> 550^\circ\text{C}$) 回火时，合金硬度随回火温度升高而下降，富 Ni 析出相逐渐转变为 FCC 相，其结构和成分与热力学计算预测结果相符。高强度和高导热特点，使得该合金适用于制造模具，加之增材制造带来的随形水路设计，使高端微型模具的自由设计成为可能。工程应用结果表明，这种增材制造的高导热 CoFeNi 中熵合金，不但可以有效提高模具的均温性而提高产品质量，而且因提高冷却速率而缩短开模时间，同时还可以通过提高模具寿命而平衡模具的材料成本。该 CoFeNi 合金的设计思路为新型高性能中熵高温合金的开发与制造提供了更广探索空间。

C04-04

P/Fe 交互作用对 Ni 基模型合金微观组织和蠕变性能的影响

李绍伟^{*1,2}、刘芳¹、孙文儒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

镍基变形高温合金由于其优异的高温力学性能、耐腐蚀性和高温焊接性成为制造涡轮盘和其他热端核心零部件的关键材料。为进一步提高合金的力学性能，P 微合金化因其低成本同时能大幅提升合金的蠕变性能而不牺牲其他性能的优势成为设计变形高温合金的有效途径。然而，P 表现为有益作用的 GH4169、GH4133、HT700 和 718Plus 等合金均为 Ni-Cr-Fe 基合金，随着 P 含量增加，合金蠕变寿命先上升后降低，即存在着一个最佳 P 含量。对于 Ni-Cr 基的 Waspaloy 合金，即使极微量的 P 也会恶化蠕变性能，随着 P 含量升高，其蠕变寿命不断下降。由此可以推断，P 和 Fe 的交互作用在提升合金蠕变性能方面至关重要。

本研究通过在 Ni17Cr(0Fe) 和 Ni17Cr15Fe(15Fe) 两种模型合金体系中分别加入 0/0.027/0.042/0.096 wt.% 的 P 含量，研究了 P 在两种合金体系中对微观组织和 650°C/120MPa 蠕变性能的影响。结果表明，随着 P 含量增加，0Fe 合金蠕变寿命逐渐降低，而 15Fe 的蠕变寿命合金先升高后降低，在 0.027wt.% 时出现峰值。经 SEM 和 TEM 表征，发现两合金系 0P 时晶界有大量球状 α -Cr 相析出，对晶界有钉扎强化作用。球差电镜结果表明，随着 P 含量增加，大量 P 原子会在晶界偏聚，而由于 P 原子与 Cr 原子存在竞争机制，因此 P 的晶界偏聚抑制 α -Cr 相析出，从而减弱 α -Cr 相对晶界的强化作用。P 在晶界的原子偏聚能降低晶界能，强化晶界，但当 P 原子含量过多时，在 0.096wt.% P 合金中开始析出富 P 相，且 0Fe 合金析出富 P 相较 15Fe 合金系更多，说明 Fe 的加入提高了 P 在合金中的固溶极限。

此外，在 15Fe 合金系均发现有纳米级 γ' 相析出，随着 P 含量增加， γ' 相平均尺寸先减小后增大，在 0.027 wt.% P 时达到最小值 (40 nm)，在 0.096wt.% P 时急剧增大至 85 nm，而在 0Fe 合金中均未发现 γ' 相析出。球差电镜结果表明， γ' 相在低 P 含量合金中析出时，Cr、Fe 原子有限占据 Al 位，而 P 原子则在 γ' 相中随机分布，无明显择优占位倾向。P 原子的进入降低了 γ/γ' 相的错配度，从而降低了 γ' 相的临界形核半径和析出驱动力，使 γ' 相形核率增加，从而促进了 γ' 相析出。APT 结果表明， γ' 相在 0.096P-15Fe 合金中析出时，P 原子大量进入 γ' 相并偏聚在 γ/γ' 相界面处，使两相错配度增加，从而促使 γ' 相长大。计算表明，15Fe 合金中位错切割与绕过 γ' 相的临界尺寸为 58 nm，结合 TEM 结果可知，15Fe 系合金中 0P 与 0.096 wt.% P 合金在蠕变过程中逐步由位错切割 γ' 相转为 Orowan 绕过机制，而 0.027 wt.% P 和 0.042 wt.% P 合金则主要为切割机制，因此蠕变性能更佳。而在 0Fe 合金中，晶内的变形机制主要为位错滑移和攀移，因此 0Fe 合金蠕变性能整体弱于 15Fe 合金。

本研究可为优化 P 微合金化设计和提高合金蠕变性能提供参考。

C04-05

基于位错运动不可逆性的 K4169 合金高低周疲劳寿命预测

何金珊*

北京科技大学

K4169 合金由于其优异的机械性能，易于制造，低成本以及 -196°C-650°C 宽泛的温度区间而广泛应用于航天复杂结构件。然而，由于飞机频繁的启停和巡航振动，低周、高周疲劳交错发生是引起构件失效的主要形式之一。已有研究表明，循环加载过程中，位错不可逆运动，如位错交滑移、湮灭、自由移动等，造成局部位置的不可逆塑性应变累积是导致疲劳损伤的本质原因。然而，由于宏观模型难以描述显微组织内部的局部力学参量，难以实现对高/低疲劳寿命进行同时预测。

而通过构建晶体塑性有限元模型 (CPFEM)，可以监测在疲劳加载过程中显微组织内部的局部应力/应变变化。但是，目前已报道的基于 CPFEM 的累积耗散能等准则忽略了位错运动的不可逆性，因此造成疲劳寿命的预测误差较大。因此，在构建疲劳损伤准则时，考虑位错不可逆运动对于同时预测高低周疲劳寿命的精确性至关重要。

本工作提出了一种在累积耗散能基础上考虑位错不可逆运动的疲劳损伤准则，并结合 CPFEM，成功预测了微晶铸造 K4169 合金的高低周疲劳寿命，相比与传统累积耗散能准则误差降低了 75%。同时，通过原子力显微镜测量驻留滑移带的“挤出”和“侵入”高度并结合 CPFEM 预测了不同加载条件下的不可逆系数，构建了系数与疲劳寿命的双对数线性关系。此外，进一步通过构建不同晶粒尺寸、缺陷结构的 RVE 模型，研究了疲劳性能的显微组织敏感性。结果表明，随着晶粒尺寸下降，其累积耗散能随之下降，进而使疲劳寿命增加；当缺陷超过阈值尺寸时，随着缺陷尺寸以及长宽比的增加，疲劳寿命随之降低。

C04-06

一种镍基高温合金的高温含氧氯化氢短时腐蚀行为

周一鸣^{1,2}、谢光*¹、伊进宝³、王莉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

3. 中国船舶集团有限公司第七〇五研究所第五研究部主机动力室

研究背景及意义：

目前，国内外针对高温及高浓度氯化氢条件下开展的高温合金腐蚀工作仍较少，具体的高温合金腐蚀机制仍不清楚，本文通过分析一种镍基高温合金在含氧氯化氢气氛、高温环境下的短时腐蚀行为，为耐高温氯化氢腐蚀高温合金成分设计提供参考。

实验条件：

选择一种高 Cr、Ti 含量，Al 含量适中的镍基铸造高温合金，经过标准热处理后，用体式显微镜、SEM 分别对晶粒尺寸、微观组织进行观察。用电火花线切割加工成 15×10×1.5mm 的试片，试片的所有表面用 800#砂纸打磨并倒角，超声清洗后测量最终尺寸并称重。将样品悬挂于试样架上，置于管式炉内，通入 5vol.%HCl-0.5vol.%O₂-Ar 的气氛，流量平均约为 20ml/min，预洗气 30min 后升温至 960℃，保温不同时间后冷却至室温，取出样品称重，获得质量变化的平均值，收集设备冷凝端形成的腐蚀产物，重复上述过程至实验结束。总腐蚀时长 2.5h，设置中断点 15min、30min、1h、1.5h、2h。采用 XRD 对试片表面及挥发性腐蚀产物进行物相分析，采用 SEM、EDS 对试片截面进行腐蚀层形貌及元素分布观察。

主要研究结果及结论：

实验合金在含氧氯化氢气氛中的质量变化呈先上升后下降趋势，根据腐蚀行为差异可分为保护期（0-1h）及加速期（1-2.5h）。大部分合金元素形成挥发性氯化物，其中含 Cr、Ti 及 Mo 的氯化物含量相对较高。保护期中，形成富 Ni、Cr、Al 及 Ti 等元素的较致密初始外腐蚀层，提供了一定保护性，但随着腐蚀进行，初始层将剥落或通过固相反应被消耗从而失去保护性。腐蚀进入加速期后，外腐蚀层为针状、团簇状的不致密的富 Cr、Ti 氧化物；在腐蚀层与基体界面发生持续的 Al 的氯化-氧化反应（ $\text{Al}+\text{Cl}_2\rightarrow\text{AlCl}_3+\text{O}_2\rightarrow\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cl}_2$ ），其中 Cl₂ 的循环消耗及生成，作为腐蚀反应的催化剂，导致在加速期，内层疏松的层状 Al₂O₃ 及贫化层异常增厚加速。

保护期中，大部分合金元素的氯化物在腐蚀层外被氧化，此时氯化-氧化反应并未持续进行，腐蚀速率较小；加速期中，富 Cr、Ti 的外腐蚀层内的氧分压足以使主要 γ' 形成元素 Al 的氯化物氧化，此时氯化-氧化反应在腐蚀层内持续进行，导致腐蚀速率增大。

C04-07

高熵型 Ni-Fe-Cr 基高温合金的成分设计与性能表征

王阳、苏兆翼、冉子祚、张爽*、邹存磊、赵亚军、董闯

大连交通大学

高熵合金是由五种或五种以上等量或大约等量金属形成的合金，其抗断裂能力、抗拉强度、抗腐蚀及抗氧化特性通常要比传统合金更好，因此备受关注。本文主要针对 Ni-Fe-Cr 基高温合金实施高熵合金化成分设计，首先将合金化元素分为 Fe、类 Cr(包括 Cr、Mo、Si、Nb)和类 Ni(包括 Ni 和 Mn)元素三大类，C

作为小原子间隙固溶于合金中;然后根据“团簇加连接原子”模型给出的面心立方置换固溶体的 16 原子团簇式,实施成分设计。获得六组高熵型 Ni-Fe-Cr 基高温合金成分,即 $C_{0.03125}-Cr_{4.4375/3.4375}-Mo_{0.25}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625}-Ni_{6/7}-Mn_{0.125}-Fe_{5/6}$ 和 $C_{0.03125}-Cr_{4.6875/3.6875}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625}-Ni_{6/7}-Mn_{0.125}-Fe_{5/6}$ (数字写在元素符号下角标表示对应元素的原子个数, Cr、Ni 和 Fe 三种元素的原子个数分别有两种选择)。进而实施样品制备、结构表征、力学及化学性能测试等实验。结果表明:六组高熵型 Ni-Fe-Cr 基高温合金组织均为单一奥氏体相;室温硬度分别为 183.02 HV、182.10 HV、176.99 HV、171.99 HV、181.99 HV 和 176.13 HV,与参照合金 GH1015 (180-190 HV) 基本一致,略高于参照合金 GH2302 (160-170 HV) 和 GH2984 (165-170 HV);合金 $C_{0.03125}-Cr_{4.4375}-Mo_{0.25}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625}-Ni_6-Mn_{0.125}-Fe_5$ 的室温抗拉强度为 591 MPa,延伸率为 38.59%,其在 900°C 高温下的抗拉强度为 131.19 MPa,延伸率为 62.19% (满足参照合金 GH1015 在 900°C 高温下延伸率 $\geq 40\%$ 的要求);电化学腐蚀实验结果表明类 Cr 元素含量越高,合金的耐点蚀当量与点蚀电位 (Epit) 越高,其耐点蚀能力也越强,相同类 Cr 元素含量情况下合金中添加 Mo 元素的耐蚀性能更好,且随着类 Ni 元素含量的增高合金耐蚀性能也会增加。

C04-08

单晶高温合金蠕变行为及变形机理研究

杨文超*

西北工业大学

蠕变断裂是航空发动机涡轮叶片主要的失效形式之一。恶劣的服役条件以及复杂的结构设计使得涡轮叶片不同部位的服役环境不尽相同,主要分为高温低应力和中温高应力。本报告系统介绍了一种国产第三代镍基单晶高温合金在不同条件下的蠕变行为,阐明了不同温度和应力条件下的蠕变机制。对于高温蠕变行为,揭示了应力诱导位错网分化机制,澄清了位错类型与蠕变行为关系,阐明了从基础蠕变阶段的位错滑移、交滑移转变为稳态阶段的位错攀移,并进一步转化为加速阶段的 Orowan 绕过或位错对剪切的行为机制;对于中温蠕变行为,明确了中温蠕变过程中的取向转动路径,提出了基于取向转动的中温蠕变变形机理,阐明了取向转动对中温蠕变各向异性的影响规律。研究成果能我国先进单晶涡轮叶片的结构设计及新一代单晶高温合金材料的研发提供理论支持和指导。

C04-09

不同代次镍基单晶高温合金初始氧化的原位观察

刘明哲¹、赵云松²、卢回¹、曹立伟¹、牛浩琦¹、陈艳辉*¹、李昂¹、王立华¹

1. 北京工业大学固体微结构与性能研究所
2. 北京航空材料研究所先进高温结构材料重点研究室

自从第二代单晶高温合金问世以来,由于热障涂层的应用,涡轮叶片合金中 Cr 的浓度一直被限制在较低水平 (约为 5% 或更低)。热氧化引起的涂层皱缩和膨胀可能会导致涂层剥落并引起内部合金失效,特别是在先进的薄壁涡轮叶片中。初始氧化表面形态和元素分布通常被认为是理解高温合金失效行为的关键。在这项工作中,使用环境透射电子显微镜对典型的第一代至第四代单晶高温合金在 20 - 800 °C 范围内的初始氧化行为进行了系统的纳米级原位研究。随着氧分压的增加,氧化物在 γ/γ' 界面成核,并沿 γ 通道扩展,生长为 γ' 相。在薄箔样品中,氧化促进了基体元素从内部的 γ 相和 γ' 相扩散到合金的 γ/γ' 界面。随着 Re 含量的增加,由于 Re_2O_7 在高温合金 γ/γ' 界面蒸发,导致合金的抗氧化性能下降。本研究为优化先进单晶高温合金的成分以及提高其抗氧化性提供了技术指导。

C04-10

一种提高单晶高温合金综合性能的新策略

夏万顺、赵新宝*、岳全召、谷月峰、张泽

单晶高温合金是以航空发动机为代表的各类燃气轮机的关键叶片材料，其承温能力决定了发动机的效率及推重比。以提高承温能力为目标，过去的合金设计主要针对合金的高温持久性能，先进第 5、6 代单晶合金在 137MPa 应力下持久寿命达 1000 小时的服役温度超过 1100℃。与高温性能相比，先进单晶合金在中、低温条件下往往表现不佳，降低了涡轮叶片在复杂温度、应力环境下的可靠性。本研究提出了一种提高单晶高温合金综合性能的新策略。对一种自主研发的第 4 代单晶合金，高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 和原子探针表明，一步时效处理后快速液氮淬火可促进~10 nm 的 γ' 相 ($\gamma'\gamma$) 在低过饱和度下大量析出。差示扫描量热分析、密度泛函理论计算和动力学模型证明了这些纳米尺度 γ' 析出相在 900℃ 下具有高稳定性。进一步 HRTEM 分析表明，合金在蠕变过程中位错通过绕过、切过 $\gamma'\gamma$ 相产生了额外的沉淀强化。因此，由小尺寸 $\gamma'\gamma$ 和大尺寸一次 γ' 组成的沉淀相双模分布降低了合金中、低温条件下的蠕变速率，使 800℃/735 MPa 下的蠕变断裂寿命提高了近一倍。此外，液氮冷却对一次 γ' 相及主要两组组织影响较小，合金在 900℃/392 MPa 和 1100℃/137 MPa 下的中、高温蠕变性能与单模组织相当。本研究重新定义了小尺寸沉淀相的重要性，拓宽了未来高温合金发展的组织结构设计理念。

C04-11

高代次镍基单晶高温合金中 TCP 相的形核机制与相变序列

刘晨、杨文超*、张军、刘林

西北工业大学

随着航空发动机的发展，对单晶涡轮叶片承温能力的要求不断提高。一般来说，通过添加 Re、Cr、W 等难熔元素提高镍基单晶高温合金的承温能力。然而，难熔元素含量的增加会导致 TCP 相的析出倾向增大。TCP 相为脆性相，不仅易成为裂纹源和裂纹扩展通道，还会削弱基体相的固溶强化效果，严重威胁航空发动机的安全。因此，揭示 TCP 相的形核和相变过程对高代次镍基单晶高温合金的成分设计及服役寿命提升具有重要的科学指导意义。

本文采用原位 TEM 和 3D-APT 等先进手段揭示了一种含 Re 高代次镍基单晶高温合金中 TCP 相的形核机理和相变序列。研究发现，合金在 1100℃ 热暴露初期，由于合金元素如 Re、Co、Cr 在 γ/γ' 两相界面附近的成分偏聚， σ 相和 P 相优先在 γ/γ' 两相界面靠近 γ 基体相一侧共格析出；在 1100℃ 热暴露后期，TCP 相主要由 μ 相构成。通过分析 TCP 相与 γ 基体以及 TCP 相之间的晶格错配度，结合第一性原理对 σ 相、P 相和 μ 相体系自由能的计算，提出了 1100℃ 热暴露过程中 TCP 相的三种相变序列：① γ 基体 $\rightarrow \sigma$ 相 $\rightarrow \mu$ 相；② γ 基体 $\rightarrow P$ 相 $\rightarrow \mu$ 相；③ γ 基体 $\rightarrow \sigma$ 相 $\rightarrow P$ 相 $\rightarrow \mu$ 相。

C04-12

二代镍基单晶高温合金冷热疲劳过程中内部孔洞处裂纹的萌生机制

尹阔¹、李龙飞¹、赵云松²、冯强*¹

1. 北京科技大学

2. 北京航空材料研究院

冷热疲劳过程中镍基单晶高温合金内部会不可避免地形成裂纹，威胁叶片的服役安全，避免内部裂纹过早的萌生是提升叶片服役寿命的重要途径。本文以二代镍基单晶高温合金为研究对象，进行了 1100℃-25℃ 不同循环周次的冷热疲劳实验，探究了合金内部显微孔洞在冷热疲劳过程中的演化规律及显微孔洞处微裂纹的萌生机制。结果表明：异形显微孔洞周围由于应力集中导致形成再结晶及形变孪晶，且随着冷热疲劳循环周次的增加，孔洞周围再结晶的面积显著增大，几何必须为错密度升高。显微孔洞处形成的再结晶和孪晶有利于裂纹的萌生，经 1000 周次循环后合金内部显微孔洞处因再结晶的作用已形成了微裂纹。显微孔洞形变区域内部分位错已切入 γ' 相并形成小角度晶界，后续伴随晶体转动转变为大角度晶

界。本研究为提升二代单晶高温合金的应用可靠性及服役安全性提供了指导和数据支撑。

C04-13

表面强化单晶高温合金微观组织演化与抗疲劳

罗思海*、何卫锋、党晓凤、周光妮

空军工程大学

单晶涡轮叶片是先进航空发动机的核心部件，其榫头部位疲劳断裂已严重影响航空发动机研制和运行安全。针对提高单晶叶片榫头疲劳性能的重大需求，开展单晶高温合金喷丸和微激光喷丸强化对单晶高温合金微观组织演化与疲劳验证研究。结果表明，喷丸后在单晶表面形成了纳米晶，缺口疲劳试验件旋转弯曲疲劳寿命提高 5 倍，但存在 1000℃ 下发生再结晶的问题；微激光喷丸强化后单晶高温合金表面出现 1μm 左右的重熔层和数十微米的变形层，其中重熔层中形成了稳定的纳米氧化铝颗粒，且微激光喷丸后光滑试件疲劳寿命提高 30.64%，高于同等条件下喷丸效果，且在 1000℃ 下未发生再结晶现象。在此基础上，发展了一种基于同步辐射微衍射能量扫描定量位错密度的新方法，建立了位错密度与显微硬度之间的定量关系，量化了激光冲击定向高温合金的强化机理。

C04-14

Re 对镍基单晶高温合金氢损伤行为的影响研究

卢广先^{1,2}、赵云松*¹、王毅³、赵婷婷³、温志勋²、张剑¹、骆宇时¹

1. 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

2. 西北工业大学清洁高效透平动力装备全国重点实验室

3. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

为抑制传统化石燃料燃烧导致的碳排放，燃氢航空发动机与燃气轮机成为研究热点，作为发动机热端部件的主要材料之一，镍基单晶高温合金在临氢环境下服役所产生的氢损伤成为制约燃氢发动机发展的关键问题之一。本工作通过电化学充氢法探究了镍基单晶合金的氢损伤机理，发现充氢导致合金室温及高温拉伸应变显著下降，断口包含表面脆性区及大量微裂纹，微裂纹沿解理面中滑移带进行扩展，且微孔洞的形核长大加速了微裂纹的扩展，氢显著增加位错及层错密度，并降低合金层错能。氢微印试验表明氢固溶于 γ 基体并显著偏聚于 γ/γ' 相界，第一性原理计算结果表明，氢偏聚 γ/γ' 相界将削弱界面结合强度，且促进界面处空位形成。Re 元素的添加显著提高合金的抗氢损伤性能，Re 对于氢致空位形成及削弱界面强度具有最强的抑制效果。通过键合电子密度分析，我们发现氢降低界面结合强度主要源于其对最近邻原子间成键强度的削弱作用，而 Re 与最近邻基体原子之间形成的强共价键可有效抵制氢原子对局域键合强度的削弱作用。本研究揭示了镍基单晶合金氢损伤机理及 Re 元素增强合金抗氢损伤性能的微观机制，为抗氢损伤单晶合金的研制及氢能发动机的发展提供了理论指导。

C04-15

高温合金定向凝固组织控制技术探索

任忠鸣

上海大学

C04-16

Zr 元素在铸造镍基高温合金中的赋存状态及其对组织性能的影响

崔艳娜、周阳、王俊*

上海交通大学

围绕铸造高温合金冶金质量稳定性的需求，本工作主要针对微量元素 Zr 在铸造镍基高温合金

K417 中的作用机理开展研究, 揭示了微量元素 Zr 在镍基高温合金中的准确分布位置及赋存状态, 阐明了 Zr 元素对 K417 高温合金凝固特性、缺陷形成及高温力学性能的影响规律, 确定了其添加方式和含量控制范围依据。研究表明, Zr 元素在铸态样品中以 Ni₁₁Zr₉ 金属间化合物的形式沿共晶组织与合金基体间的界面边界分布, 包括晶内和晶间的共晶组织, 而在高温持久样品中则以 Ni₅Zr 的形式沿共晶组织周围分布。Zr 元素的存在能有效降低 K417 合金的固相线温度, 凝固区间随 Zr 含量的提高先减小后扩大; 同时对合金共晶组织、碳化物、 γ' 相形貌、尺寸与体积分数产生显著影响, 在 Zr 含量为 700 ppm 时, K417 合金在 900 °C/ 314 MPa 和 950 °C/ 225 MPa 下的持久寿命达到最大值。

C04-17

铸造工艺对 K4800 合金微观组织和室温力学性能的影响

杨光昱*、阚志勇、吴昊、张晨锦、介万奇

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

本文对比研究了重力铸造、离心铸造和调压铸造工艺下 K4800 合金 xxx 试验件的微观组织和室温力学性能。研究发现, 离心铸造 K4800 合金的晶粒尺寸仅由重力铸造的 4.52 mm 细化至 2.22 mm, 而调压铸造能显著细化至 0.28 mm。与此同时, 缩松等铸造缺陷的面积分数由重力铸造的 1.75% 减少至离心和调压铸造的 0.27% 和 0.25%。离心和调压铸造细化了析出相尺寸, 但不同铸造工艺下铸态 K4800 合金均由晶界 MC 碳化物和硼化物, 以及细小弥散分布的晶内 γ' 相组成。调压铸造 K4800 合金展现出最优异的室温力学性能, 其屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 798 MPa, 1152 MPa 和 11.6%。相比于重力和离心铸造试样, 其抗拉强度提高了 39.9% 和 21.8%, 延伸率提高了 70.4% 和 52.5%, 这主要归因于晶粒细化、 γ' 相尺寸细化和铸造缺陷减少的共同作用。

C04-18

高钨高温 K416B 合金中 W、Al 元素协同作用

费翔^{1,2}、盛乃成^{*1}、谢君¹、于金江¹、侯桂臣¹、李金国¹、周亦胄¹、孙晓峰¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料学院

为研究 W、Al 元素对高钨高温合金微观组织及机械性能的影响, 确定最佳的 W、Al 含量。利用 Thermo-Calc 计算软件对不同 W、Al 含量的组织进行计算模拟, 发现当 W、Al 含量分别超过 15.7 wt. % 和 5.9 wt. % 时, 合金中就会析出异常组织富钨 α -W 相。根据计算结果, 设计不同 W、Al 含量的正交实验, 利用 SEM、EPMA 对合金组织进行表征。研究发现, 富钨 α -W 相析出的实验结果与计算结果基本一致。W 元素主要影响合金中富钨 α -W 相的析出, 而 Al 元素不仅影响富钨 α -W 相的析出, 且会影响共晶含量以及 γ' 相尺寸, 二者皆随 Al 含量的增加而增加。对不同 W、Al 含量的合金进行室温拉伸以及 975 °C/235 MPa 下的持久寿命实验。分析发现, W、Al 元素主要影响室温塑性, 过高的 W、Al 含量促进富钨 α -W 相的析出增加了裂纹形核位点, 降低了合金室温塑性。在高温持久变形过程中, W 含量越高, 筏化的 γ' 相越连续, 增加位错攀移的难度; Al 含量增加, 界面位错网络密度增加, 位错之间相互缠结, 位错运动难度加大, 在一定程度上提高了合金的持久寿命; 但过高的 W、Al 含量析出的富钨 α -W 会较大幅度的降低合金的持久寿命。W、Al 含量分别为 15.7 wt.% 和 5.9 wt.% 时, 合金的综合机械性能最佳。

C04-19

大尺寸定向叶片柱状晶缺陷与裂纹的耦合形成及控制

贾玉亮^{*1,2}、王帅³、程峰³、李杰¹、张勇佳⁴、胡可辉²、曹强⁵、施长坤¹、沈旭⁴、吕志刚²、葛炳辉³、杜应流¹

1. 安徽应流航源动力科技有限公司

2. 清华大学

3. 安徽大学
4. 华中科技大学
5. 西门子能源有限公司

研究背景及意义:

重型燃气轮机作为能源产业最先进的装备,运行高效而清洁。F 级重型燃气轮机功率到了 300MW 以上,联合循环效率 60%的水平。这其中,大尺寸透平叶片制造是重型燃气轮机关键技术之一。本文针对 300MW 级重型燃机 247LCDS 合金定向叶片在制备过程中的两项关键技术,柱状晶缺陷控制和裂纹控制进行系统研究。验证了柱状晶缺陷的核心影响因素,判定了裂纹的冷裂、热裂性质,阐明了这两类缺陷的形成机制,发现两类缺陷形成因素之间相互交叉耦合,基于缺陷形成机理制定了创新性工艺,同时解决了两类缺陷,成功制备 300MW 级重型燃轮 247LCDS 合金定向叶片。

实验条件和技术:

采用美国 CM 公司生产的 247LCDS 合金,应用德国 ALD 单晶炉进行 300MW 级重型燃机一级定向叶片制备。经腐蚀检测,在叶身发现羽状晶、晶粒超宽、取向偏离等柱状晶缺陷。经荧光检测,在叶尖盖板位置发现多处裂纹。采用 EBSD、EDS 和 SEM 对晶粒和裂纹进行微观表征,采用华铸 CAE 进行定向凝固温度场、叶片晶粒形态及铸造应力的数值模拟研究。

主要研究结果及结论:

研究表明,叶片腐蚀后呈现的羽状晶、晶粒超宽、取向偏离等柱状晶缺陷,核心影响因素是起始段的晶粒形态。经浇注切样 EBSD 测试和数值模拟发现,起始段的尺寸越厚大,形成的晶粒数量越多,在起始段中不同取向的晶粒生长相互竞争和淘汰,最终形成的柱状晶越细越直,各类柱状晶缺陷发生几率则很低,反之,小尺寸起始段的初始晶粒粗大、取向各异,继续生长很容易形成各类柱状晶缺陷。因此,厚大起始段工艺优于小尺寸起始段,可制备无柱状晶缺陷叶片。

叶片荧光检测后,显示数条裂纹形成在叶尖部位,在叶盆和叶背无规律分布,但全部终止在盖板处。由宏观腐蚀和 EBSD 观察可知,每个裂纹是由多条细小裂纹构成,裂纹在晶界和柱状晶内部均有分布,裂纹附近区域没有发生塑性变形。同时由 SEM 结果显示,裂纹内部的 γ 和 γ' 分离而没有发生变形,断开的 γ' 也没有发生变形。由此判定,这种裂纹为热裂,形成于凝固过程的高温区。叶片在定向凝固过程中,叶尖与起始段相连接,通过铸造应力数值模拟可见,厚大起始段凝固收缩导致叶尖处形成过大应力而产生裂纹,而在小尺寸起始段则没有发现叶尖裂纹。因此,小尺寸起始段工艺优于厚大起始段,可制备无裂纹叶片。

综上所述,基于柱状晶缺陷和裂纹的形成机制,这两种缺陷控制对起始段有着不同而矛盾的工艺要求,厚大起始段可获得无柱状晶缺陷而有裂纹的叶片,小尺寸起始段可获得无裂纹而有柱状晶缺陷的叶片。最终创新性设计了分阶起始段,保障了起始段中的晶粒数量和竞争生长,同时减小了定向凝固过的铸造应力,获得了无柱状晶缺陷、无裂纹的大尺寸定向叶片。

C04-20

强磁场下镍基高温合金凝固组织演变与性能研究

赵勇、张军*、苏海军、王军、郭敏、刘林

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

强磁场下凝固科学的发展为高温合金凝固组织调控提供了新的思路。本研究系统考察了强磁场下镍基高温合金定向凝固组织和深过冷凝固组织的演变规律,并评估了合金的拉伸持久性能。结果表明,在定向凝固过程中施加强磁场会促使 DD3 单晶高温合金发生柱状到等轴转变(磁致 CET 转变)且与凝固速率相关;在深过冷凝固过程中,在相同过冷度(~ 200 K)下施加强磁场会显著细化 K4169 等轴晶高温合金的晶粒尺寸。利用磁致 CET 转变制备了 K4169 等轴晶高温合金,其室温屈服强度为 880 MPa、抗拉强度为 1048 MPa、延伸率为 9%;进一步制备了 DZ125 双组织高温合金,其室温屈服强度为 820 MPa、760 $^{\circ}\text{C}$ /724 MPa 的持久寿命为 58 h。模拟和实验表明,强磁场诱发的热电磁流体动力学是磁致 CET 转变的原因,同时也是过冷凝固中磁致晶粒细化的原因之一。此外,强磁场会促使深过冷熔体中二十面体短程有序结构的数量增加,

从而提供大量形核衬底导致晶粒的显著细化。本研究结果为等轴晶高温合金和双组织高温合金的凝固制备提供了新的方法。

C04-21

单晶高温合金叶片中雀斑缺陷的预测

王富*

西安交通大学

随着先进发动机对单晶涡轮叶片承温能力要求的提升,导致单晶叶片需要采用含更多难熔元素的高代次高温合金来制备,同时叶片结构也变得更加复杂。然而,这些优化措施却导致在定向凝固过程中,单晶叶片中雀斑缺陷的形成变得更加频繁。一旦雀斑缺陷形成,叶片将被判为废品,这显著降低了叶片的成品率。因此,对雀斑缺陷进行准确预测变得至关重要。目前,针对雀斑缺陷的预测主要采用基于对流强度的 Ra 数模型。然而,现有模型未考虑形状效应对雀斑缺陷形成的影响,这导致无法直接准确预测雀斑缺陷在工业单晶叶片生产中的形成情况。本文提出了一种新型的 Ra 模型,该模型引入了形状效应的影响,包括棱角效应、曲率效应、台阶效应、阴影效应等,采用该模型定量的预测了工业生产中单晶铸件中雀斑缺陷的形成。

C04-22

Cr 和 Re 对镍基单晶高温合金在 900°C 长时热暴露过程中 γ' 相粗化行为的影响机制

侯木春、鲁凡、李龙飞、冯强*

北京科技大学

重型燃气轮机涡轮叶片在服役过程中长期处于较高、较恒定的温度(870-1020°C)下, γ' 相粗化行为严重影响着合金力学性能。本文以不同 Cr 和 Re 含量的镍基单晶合金 DD10 (0Re13Cr)、0Re (0Re10Cr) 和 2Re (2Re10Cr) 为研究对象,进行了 900°C 长时(>10000h)热暴露实验,并利用三维原子探针(APT)分析了热暴露过程的 γ/γ' 两相成分分配行为,探究了 Cr 和 Re 对镍基单晶合金长时 γ' 相粗化行为的影响机制。结果表明:与 0Re 合金相比,2wt.%Re 的添加可有效降低 γ' 相粗化速率,而 3wt.%Cr 的添加使 γ' 相粗化速率降低更为明显。进一步分析表明,Cr 和 Re 的添加均可通过降低合金的有效扩散速率和 γ/γ' 相界面能减缓 γ' 相粗化行为。一般认为,Re 元素可有效降低 γ' 相粗化速率、提高蠕变性能。然而,本工作中发现无 Re 合金中适当提高 Cr 含量,使 Cr 在 γ/γ' 相中浓度差异进一步加大,对 γ' 相粗化的控制作用甚至高于 Re 元素。本研究为发展低成本燃机用镍基单晶合金的成分设计与优化提供指导。

C04-23

第二代镍基单晶高温合金蠕变行为与壁厚关系的研究

郑磊*、吕金娟、张鉴、张博宁

北京科技大学

航空发动机的空气冷却技术,可提升镍基单晶高温合金叶片在极端高温和高负荷条件下的运行可靠性。然而,叶片的内部冷却流道会使其壁厚减小,进而引发厚度衰减效应,即壁厚减小导致蠕变速率提高、蠕变断裂寿命降低。本文以第二代镍基单晶高温合金为研究对象,探索了蠕变寿命的厚度衰减效应机理。基于蠕变亚结构演变规律和有限元分析的研究表明,在高温低应变速率下,薄试样中开动较少滑移系,引起较低的加工硬化,并且高密度的 $a<100>$ 超位错、可动位错对和单个螺型超位错对 γ' 相剪切,共同导致了高蠕变速率;在低温高应变速率下,薄厚试样的初始和稳态蠕变变形均受控于 $\{111\}<112>$ 型滑移系,而随厚度降低,试样由单轴应力状态转变为平面应变状态,导致开动滑移系的数量变少、协调变形能力降低。研究结果为涡轮叶片设计和可靠性服役提供了重要的实验数据和理论依据。

C04-24

Ta/Ti 对镍基单晶高温合金中 γ/γ' 相元素分配行为的影响

付江、闵小华*

大连理工大学

Ta 和 Ti 作为最常见的难熔元素经常被用来添加至镍基单晶高温合金中，这是因为两种元素可以强化 γ' 相并提高组织稳定性。在多元系合金中，每种元素并非独立存在，Ta 和 Ti 的加入势必会对其他合金元素在 γ/γ' 两相间的分配行为产生作用。然而前期研究多集中在 Ta 和 Ti 对其他单种合金元素的影响，鲜有对复杂多种元素的协同效应深入探究，尤其是通过改变 Ta、Ti 含量对其他元素产生的交互作用。因此，本文保持镍基单晶高温合金中 $(Ta+Ti)=3.12at.\%$ 总量不变，通过改变 Ta 和 Ti 的含量设计出 $Ta/(Ta+Ti)=0、0.33、0.66、1$ 四种不同成分的多元系合金。采用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、扫描透射电子显微镜(STEM)等实验方法对标准热处理态后的组织进行表征，分析了 γ' 相的平均尺寸半径、体积分数、立方度以及两相晶格错配度，探究了合金成分在 γ/γ' 相的分配行为；同时采用第一性原理的方法建立 γ/γ' 相界面模型，单独研究置换原子的占位及相分配行为，以此辅助验证多元系合金复杂的元素交互作用。结果表明：当 $Ta/(Ta+Ti)=0.66$ 时， γ' 相平均尺寸半径以及体积分数达到最大；随着 Ta 含量的增加， γ' 相立方度以及两相错配度绝对值减小。基于 STEM 实验和第一性原理计算发现，在多元系合金和 γ/γ' 相界面模型中 Ti 最容易占据 γ' 相的 Al 位，并且抑制其他元素占据 Al 位；四种合金中的元素 Al、Ta、Ti 倾向分配于 γ' 相，Cr、Mo、Co 倾向分配于 γ 相；当 Ta 含量对 Ti 的完全替换时，W 出现了“逆分配”的现象，由 γ' 相逆转至 γ 相；当 $Ta/(Ta+Ti)=0.33、0.66$ 时，W 分配较为均匀。在单掺杂界面模型中，置换元素 Co 倾向于占据 γ 相；其余置换元素均倾向于占据 γ' 相，且驱动力大小为 $Ta>W>Mo>Cr>Ti$ 。

C04-25

一种第三代镍基单晶高温合金超高温蠕变二三阶段转变机理研究

李亚微、王莉、张健

中国科学院金属研究所

随着航空发动机涡轮叶片服役温度不断提高，高代别单晶逐渐工程应用，单晶合金的超高温 ($>1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) 蠕变行为受到广泛关注。单晶合金蠕变温度越高，第三阶段起始应变量往往越低，且二三阶段转变越快。工程应用中，较低应变量时就发生的快速转变可能导致单晶叶片在服役过程中无任何征兆突然失效，严重影响服役安全可靠。然而，单晶合金超高温蠕变二三阶段转变的机理目前尚不清楚。

本文以第三代镍基单晶高温合金 DD33 为对象，采用 SEM 和 TEM 研究了 $1100\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， 120 MPa 下位错组态的演化规律，进而明确了超高温蠕变二三阶段快速转变机理。结果表明，较低温度特别是 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，大量 $\{100\}$ 面上的 $a<110>$ 超位错在蠕变第二阶段切入 γ' 相，并形成 K-W 锁；进入第三阶段（起始应变量 $\sim 2\%$ ），非致密 $a<100>$ 超位错数量增多，而 K-W 锁明显减少。随温度上升至 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，第二阶段主要位错组态为起源于台阶状位错网的致密 $a<100>$ 超位错，其通过纯攀移方式在 γ' 相内运动；在第三阶段（起始应变量 $\sim 1\%$ ），较多滑移面为 $\{111\}$ 面的 $a<110>$ 超位错出现。

因此， $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，K-W 锁的减少以及非致密 $a<100>$ 超位错攀移对应变速率不断累积的贡献促进了二三阶段转变；而 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，位错网强化效果的减弱导致二三阶段转变更快发生。

C04-26

增材制造高温合金材料设计与工艺研究

李金国

中国科学院金属研究所

C04-27

磁场下激光粉末床增材制造 GH4099 镍基高温合金的强塑性协同调控研究

陈超越*

上海大学

基于激光粉末床熔融（L-PBF）的镍基高温合金增材制造技术，可以实现复杂几何结构的一体化直接成形以及优异的高温性能。然而，沉积态中的强织构以及跨越数个沉积层的柱状晶特征，难以通过改善工艺参数优化解决。本文针对 γ' 相沉淀强化型 GH4099 镍基高温合金，提出磁场下 L-PBF 激光增材制造技术开展沉积态和热处理态的多尺度微观组织及力学性能研究。研究表明，磁场下 L-PBF 成形 GH4099 合金平均晶粒及晶胞尺寸降低，织构强度减弱，等轴晶比例的上升，位错密度降低。力学性能结果表明，施加静磁场后沉积态试样在不同成形方向强度无明显损失的前提下，断后延伸率在均得到明显的提升。同时，磁场对于沉积态的微观组织调控效果可以遗传至热处理态，并使其强度和塑性均显著高于无磁场下制备 GH4099 合金的热处理态性能。上述研究结果表明，磁场可以显著改善 L-PBF 成形微观组织，进而实现其沉积态和热处理态的强度和塑性性能。

C04-28**元素 Nb 和 Ta 对一种新型增材制造高温合金组织和开裂的影响**

刘文涛、朱礼龙*、江亮

烟台大学

高温合金中 Nb 和 Ta 元素的添加会提高 γ' 强化相的体积分数，但是过量添加不仅会降低高温合金的熔点，还会促进一些脆性金属间化合物 Laves 相和 η 相的生成。而当 Nb 和 Ta 元素含量过高时，通过 Thermo-Calc 等热力学计算软件计算相图具有局限性。为了更好地了解添加 Nb 和 Ta 元素对增材制造高温合金相结构的影响，需要通过实验法进行研究。传统的实验方法需要制备大量的单个样品，将会耗费大量的时间。而通过多筒混粉激光定向能量沉积增材制造技术制备梯度合金只需要制备几个梯度合金，大大提高实验效率。本研究在一种新型增材制造高温合金基础上，通过激光定向沉积增材制造技术制备不同 Nb 和 Ta 元素含量的梯度高温合金样品。系统研究了 Nb 和 Ta 元素含量对增材制造高温合金微观组织和开裂的影响规律。Nb 元素在增材制造态的枝晶间和二次枝晶臂偏析富集，进而形成富 Nb 和 Mo 元素的 Laves 相。当 Nb + 0.5 Ta > 5 wt% 时，Laves 相并不能完全固溶。除此以外，当 Nb + Ta > 8 wt%，会出现针状 η 相，且难以完全固溶。通过对比增材制造和固溶热处理的差式扫描量热仪（DSC）结果，Laves 相的完全固溶温度在固相线以上，固溶热处理后只能消除一部分增材制造试样的 Laves 相。通过对比产生 Laves 相和开裂的区域发现产生开裂的区域和析出 Laves 相的区域重合。由于增材制造镍基高温合金过程中 Nb 元素的偏析行为，混粉后的 Nb 粉更难以固溶到高温合金粉末中；尤其是当混合粉末中的 Nb 粉比例较大时，大量的 Nb 元素会在高温合金粉末间隙中富集进而形成 Laves 相。这些 Laves 相不仅难以通过固溶热处理完全消除影响合金后续的力学性能，还会在增材制造过程中的后续层的不断快速加热和快速冷却的过程中成为开裂的起始点。

C04-29**增材制造高温合金结构元件后处理过程中内部残余应力演化规律研究**郑人仁^{1,2}、史松宜^{1,2}、谢锦丽^{1,2}、秦海龙^{*1,2}、毕中南^{1,2}

1. 钢铁研究总院 高温合金新材料北京市重点实验室

2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

激光增材制造技术是一种一体化制造成型技术，在复杂形状零部件制造中具有突出优势，近几年被广泛应用于航空航天领域。然而，由于增材制造过程中非平衡、强约束以及较大的温度梯度等工艺特性，使得其残余应力导致的翘曲变形和开裂问题更加突出。本研究以高性能高温合金 IN738 结构元件作为研究对象，采用一种新型内部残余应力测定方法——改进型轮廓法，对激光选区熔化成型后和后处理后结构元件

的内部残余应力进行测定,分析后处理过程中残余应力数值和分布形态的演化规律。本研究采用的改进型轮廓法是通过计算切割平面受单位载荷时的应力、位移分布情况构造对应的应力、位移基函数,基于弹性叠加原理利用位移基函数线性拟合切割面变形轮廓,从而获得切割面上残余应力分布情况。该方法的计算效率更高、测试适用范围更广,目前已推广应用至核电、高铁等其他重点装备关键部件的残余应力测定表征工作中。

C04-30

静磁场辅助镍基高温合金激光增材制造

杜大帆、孙沁瑶、董安平、孙宝德

上海交通大学材料科学与工程学院

随着激光增材制造(Laser Additive Manufacturing)成型工艺在航空航天、核电及高端装备制造领域的快速发展和应用,然而“缺陷、变形与尺寸超差”成为制约镍基高温合金构件激光增材制造技术发展和应用的三大主要技术难题。解决这些技术难题,除了开展增材制造专用金属粉末的合金设计和制备基础研究之外,基于零件的结构特点,揭示金属零件激光增材制造过程中微熔池的凝固机理并对凝固过程实现主动控制至关重要。外加磁场可以有效控制金属凝固过程并改变凝固组织,因此通过磁场影响金属激光增材制造的凝固过程,对深入研究增材制造过程的凝固行为和改善增材制造材料的组织和性能具有重要意义。本报告主要总结了近年课题组在利用外加静磁场对镍基高温合金增材制造凝固过程研究方面的进展,阐述了外加磁场对粉末床熔融和激光能量直接沉积增材制造过程微熔池流动和组织演化的影响。

C04-31

新型异质镍基粉末高温合金

于苏洋^{*1}、王旭青¹、董亚丽²、施荣沛¹、王晓峰¹

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 北京航空航天大学

粉末高温合金作为制备航空及空天动力中关键转动件的原材料已经发展多年,目前遇到承温能力较难进一步提升和高温下材料强度与损伤容限性能较难协同等一系列技术挑战。本文介绍了一种基于异质混晶组织概念开发的新型粉末高温合金。该思路通过将不同成分的合金粉末进行混合,并在后续的致密化和热处理过程中利用不同粉末成分中 γ' 相固溶温度和含量的差别制备由亚固溶细晶和过固溶粗晶均匀分布的异质混晶组织材料。与传统均质基准合金相比,所制备试验合金的650℃拉伸强度和韧性没有变化,650℃/825MPa的蠕变抗性略有提升。最重要的是,该材料在650℃下120s保载疲劳裂纹扩展速率显著下降,仅为基准合金中的40%。该方法成功地在不降低材料的静强度和蠕变抗性的同时,协同提升了材料的损伤容限性能。介-微观表征表明,该合金的性能提升来源于混晶材料中发生的异质变形诱导强化和增韧机制。该思路可应用于新型粉末高温合金的设计开发和已有合金的性能提升改进。

C04-32

纯净度对镍基单晶高温合金组织与性能的影响

张小新^{1,2}、王英豪^{1,2}、孟杰³、余建波^{1,2}、玄伟东^{1,2}、任忠鸣^{*1,2}

1. 上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室

2. 上海大学 材料科学与工程学院

3. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心

合金中的N、O元素因与Ti、Al等活泼元素具有较强的亲和力,极易形成高熔点、难分解的非金属夹杂物(或团簇),极大地降低合金的综合力学性能。然而,目前合金纯度(N、O含量)对镍基单晶高温合金组织、缺陷及力学性能影响机制尚无系统性的研究。此外,以往研究的高温合金中N和O总量最低为10 ppm,

对于更低的 N、O 含量能否进一步改善铸件组织及力学性能尚不清楚。因此本文以第二代无铌镍基单晶高温合金 DD98M 为研究对象,首先以商业纯 DD98M 合金为原料探索了定向凝固工艺参数(抽拉速度和浇铸温度)对合金凝固组织与性能的影响;接着选取最佳工艺参数,采用快速凝固法(HRS)研究了纯度(掺氮、商业纯、超纯,对应的 N、O 含量总和分别为 21 ppm、10 ppm 和 4 ppm)对合金凝固组织和力学性能的影响机制;最后为进一步探究高温度梯度下纯度对合金凝固组织与力学性能的影响,采用液态金属冷却法(LMC)进行了类比研究。获得了如下主要结论:

(1) 较高的抽拉速度将细化枝晶组织,加重 Al、Ti 元素的偏析,导致共晶体积分数增加。而凝固缩孔数量随着抽拉速率的增加呈现出先增多后减少的趋势。这主要是由于较快的拉速使得补缩通道受阻,从而导致更多的缩孔产生,而随着拉速的增加,发达的高次枝晶相互搭接又缩小了微观“熔池”,降低了缩孔数量。对于气孔而言,由于高拉速下形成的致密枝晶阻碍了凝固时气体的逸出,所以气孔数量随着拉速的增加而减少。随着浇铸温度的降低,一次枝晶间距与二次枝晶间距增大,合金流动性降低,从而加重了合金的整体偏析程度,使得孔洞数量(包括缩孔和气孔)增加。当凝固工艺参数为 1550°C、6 mm/min 时, γ' 相占比达到最大值,此时合金的室温和高温拉伸强度也最高。

(2) HRS 工艺下,随着纯度的增加,PDAS 从 406 μm 减小至 322 μm 。此现象与氮化物或氧化物无关,可能是由扩散系数减小、平衡系数增大,或 N 含量的降低造成的枝晶临界形核过冷和孕育时间缩短所导致的。同时,偏析程度和共晶体积分数均随着纯度的增加而降低,这主要是由 PDAS 的降低所致。由于一次枝晶间距的降低,再加上 N 和 O 能够降低合金液体的填充能力,因此微孔(包括缩孔和气孔)的数量与体积分数随着纯度的提高而降低。纯度的提高对 γ' 相形貌与尺寸无明显影响,但使相界面处的偏析程度降低。由于纯度的提升降低了 PDAS 和孔洞的体积分数,提升了合金组织结构的均匀性、连续性和致密性,使得合金的室温抗拉强度和屈服强度分别提升了 32.6%和 12.1%,高温抗拉强度和屈服强度分别提升了 27.6%和 6.2%。

(3) 与 HRS 工艺相比,LMC 工艺温度梯度高,使得 PDAS 大幅度降低,抑制了微孔的形成。但由于设备因素,LMC 工艺制备的三种纯度样品中的氮含量均大幅升高,分别为 92 ppm、53 ppm、44 ppm,而 O 含量变化不大(三种纯度合金分别称为 N92、N53、N44)。氮含量的升高促进了含 Ti 夹杂物(如 TiN、TiC)的形成。LMC 工艺下,随着 N 含量的降低,合金中夹杂物数量减少,使得 Ta、Ti、Al 和 W 的偏析有所缓解,抑制了共晶的形成。合金中气孔的体积分数随着 N 含量的降低而减小。但缩孔的体积分数则随着 N 含量的降低呈现出先减小后增加的趋势。这主要是因为 N53 中更多的 TiN 造成的晶格膨胀补偿了凝固过程中的体积收缩,抑制了缩孔的形成。此外, TiN 的减少降低了 γ' 相中 Ti 元素的消耗,提高了 γ' 相的尺寸与占比。最终,氮含量降低带来的孔缺陷数量与夹杂物数量的减少和强化相体积分数的增多,使得合金 N44 的室温抗拉强度和屈服强度较 N92 分别提升了 18.1%和 13.8%,高温抗拉强度和屈服强度分别提升了 42.8%和 76.9%。与 HRS 工艺相比,LMC 工艺下合金高温拉伸强度提升,这表明 PDAS 的降低对高温力学性能的贡献较纯度提高的贡献更大。

C04-33

单晶高温合金蠕变行为及机理研究

江亮

烟台大学

C04-34

Effect of high-temperature long-term aging on microstructure and properties of HT700R superalloy

Yao Lu^{*1}, Shengzhi Li², Lanting Zhang^{1,3}, Bingbing Zhao^{1,3}, Xianping Dong^{1,3}

1. Shanghai Jiaotong University

2. Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd. Turbine Plant

3. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming

Thermal power generation is the main source of electricity in our country and the largest contributor to the

greenhouse gas emissions. Developing the high-parameter advanced ultra-supercritical (USC) plant can improve generation efficiency, reduce power production costs, and decrease greenhouse gas emissions. Robust creep resistance and exceptional oxidation resistance of HT700R superalloy at high temperatures make its application within USC steam turbines at a power plant in Shanghai. The microstructure evolutions and shifts in mechanical properties of HT700R superalloy were studied during both short-term aging (650 °C+800 °C) and long-term aging (650 °C). After short-time aging, fine γ' phases were uniformly distributed within the grains, with granular σ phases and rod-like γ' phases appearing along grain boundaries. The alloy's ultimate tensile strength (UTS), yield strength (YS), and elongation were 638 MPa, 1042 MPa, and 24.5%, respectively, displaying a combination of ductile and quasi-cleavage fracture. Following long-term aging, the intragranular γ' phase grew coarser, and its volume fraction increased. The Cr-rich phases transformed into $M_{23}C_6$ phases, while TiC phases initially coarsened and then partially degraded to form $M_{23}C_6$ phases. Discontinuous γ' phases, $M_{23}C_6$ phases, and TiC phases along the grain are gradually coarsened to be connected, creating localized precipitate-free zones (PFZs). This led to changes in the mechanical properties of HT700R, with UTS and YS increasing by 7.2% and 16.6%, respectively, but a notable decline in elongation and impact energy by 24.1% and 48.4%. The coarser, chain-like precipitates, including $M_{23}C_6$ phases and TiC phases, at grain boundaries broadened and connected, contributing to brittle fracture. The findings are crucial for understanding and assessing the stability of the microstructure and properties of this superalloy during long-term service at 650 °C, so that the maintenance and replacement intervals can be rationalized.

C04-35

放电等离子烧结电流对 GH4169 合金组织和性能的影响

马立勇^{*1,2,3}、孟宝^{1,3}、宋庆丰²、韩子健^{1,3}、冯秋硕^{1,3}、万敏^{1,3}

1. 北京航空航天大学
2. 河北建筑工程学院
3. 北京航空航天大学宁波创新研究院

放电点等离子烧结 (SPS) 是制备航空航天用镍基 GH4169 超级合金的先进技术, 主要分为四个阶段: 初始压实阶段、烧结窗口阶段、高温烧结致密化阶段和冷却阶段。在保温阶段, 电迁移效应将加速超耐热合金粉末的初始致密化。电塑性效应会加速位错运动, 从而提高材料的塑性, 降低变形阻力。施加脉冲电流后, 由于电塑性效应, 材料会出现局部致密化。致密化率是非热效应和热效应共同作用的结果。当加热速度为 200°C/min 时, 样品的表面激活能为 786.20 kJ/mol, 而当加热速度为 100°C/min 时, 表面激活能降至 355.75 kJ/mol。电场通过降低烧结活化能促进了材料的致密化。

C04-36

锯齿化晶界对 IN738LC 蠕变性能的影响

吴昊*、聂丽萍、高振桓、巩秀芳、王常帅
东方电气集团东方汽轮机

锯齿化晶界热处理对高温合金的力学性能较标准热处理有明显改善。本研究针对 IN738 LC 晶界锯齿化热处理工艺, 对比了标准热处理、固溶+控冷处理+标准热处理、热等静压(HIP)+控冷处理+标准热处理三种不同制度的组织演变和蠕变性能, 分析了锯齿化晶界形成原因和对蠕变性能作用机制, 并通过不同热处理工艺的组织特征参数提取, 建立起锯齿化晶界指数, 来定量评价工艺对组织的影响。结果表明: 标准热处理后晶界由 γ/γ' 共晶相, MC 碳化物和不连续分布 γ' 相的共同钉扎, 晶界规整平滑; 固溶后控冷处理后, MC 碳化物依旧钉扎在枝晶间, γ/γ' 共晶相回溶, γ' 相在晶界上连续析出并改变晶界形貌, 形成锯齿晶界。

固溶冷却速率不同,晶界上析出的 γ' 数量、尺寸和形态不同,对锯齿形状有强烈影响, γ' 相形状和尺寸是造成锯齿晶界振幅不同的主要因素;HIP 后标准热处理可形成锯齿化晶界,而经 HIP+控制冷却+标准热处理能够进一步改变 MC 碳化物和 γ' 相的尺寸,从而影响锯齿化晶界程度和最终蠕变寿命;与标准热处理对比,优化工艺后可使材料在高温/低应力状态下蠕变寿命提升约 30%。

C04-37

烧结温度及压力对放点等离子烧结高温合金致密化行为的影响

宋庆丰¹、韩子健²、冯秋硕²、马立勇^{*1,2}

1. 河北建筑工程学院
2. 北京航空航天大学

基于 FKM-GTN 模型,本文构建了 Inconel 718 镍基高温合金电场辅助烧结过程的数值仿真模型,模拟了电-热-力多场耦合下的烧结过程。研究发现,电场辅助烧结技术能有效制备 Inconel 718 高温合金,且烧结压力和温度对合金致密化有显著影响。增大烧结压力可加速合金致密化,但超过 50 MPa 后影响减弱;提高烧结温度也能促进致密化,但超过 1150°C 后效果有限。此外,在特定烧结压力下,合金致密化对温度的敏感性有所不同。烧结过程主要分为升温 and 保温阶段,致密化主要发生在保温阶段,速率可达 10^{-3} s^{-1} 。这些发现为优化 Inconel 718 合金的电场辅助烧结工艺提供了重要参考。

C04-38

基于高通量扩散多元节方法的 CoNiTiV 合金研究

李营、张增伟、阮晶晶*、朱礼龙、江亮

烟台大学精准材料高等研究院

在工业中被广泛应用的镍基高温合金由于独特的 γ' 共格强化方式,其高温下展现出优异的性能。但镍自身熔点限制了镍基高温合金在更高温度下的应用。而钴的熔点更高,以钴为主元素的钴基高温合金或许有更大的高温应用潜力。通过扩散多元节方法可以快速获取大量实验数据,建立起钴基高温合金的成分-相-结构-性能的数据库。

此研究选取已报道的钴基高温合金作子合金、NiCoAlTiTaCr 作母合金进行扩散多元节的制备。利用微米力学测试系统、电子探针分析了扩散多元节节点处的成分与硬度,确定扩散层位置与 γ/γ' 界面,并根据成分-硬度关系选取 CoNiTiV 合金。采用原位高温 XRD 对 CoNiTiV 合金分析,并对 4#合金进行 Gleeble 压缩试验与透射电镜分析。

结果显示:(1)在传统钴基高温合金中添加合金化元素可以形成有序 γ' 共格强化相,得到的 CoNiTiV 合金有着良好的综合力学性能。(2)不同 XRD 测试温度下的 γ/γ' 晶格错配度随着 V/Ti 比的增大而减小。高镍合金的 γ/γ' 晶格错配度更高。随着温度升高,高钴合金的 γ/γ' 晶格错配度也逐渐增大。(3)合金的硬度随着温度升高有线性下降的趋势。(4)CoNiTiV 合金在热压缩过程中存在着加工硬化与软化机制的竞争关系。25°C 压缩实验的真应力明显高于高温压缩的应力水平。随着压缩温度的升高,软化机制的作用变大。当压缩温度达到 750°C 时,软化机制占据了主导地位,使材料更早屈服并降低屈服强度。(5)压缩产生了大量的纳米孪晶,其数量减少随着压缩温度升高而减少。衍射斑点印证了富 Ti、V 有序 γ' 相的存在。

C04-39

铸造高温合金返回料研究进展

宋尽霞^{*1}、肖程波¹、王博²、郑为为³、薛佳宁⁴、盛乃成⁵、黄强¹、康永旺¹、王定刚¹、马秀萍¹

1. 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
2. 江苏隆达超合金航材有限公司
3. 北京科技大学新金属国家重点实验室
4. 北京北冶功能材料有限公司

5. 中国科学院金属研究所

铸造高温合金在航空发动机、燃气轮机上广泛用作涡轮叶片、机匣等关键部件，其零件的材料利用率通常只有 10%~20%，我国每年产生的铸造高温合金返回料高达数千吨。目前国内只有部分等轴晶合金返回料获得应用，而定向、单晶合金返回料均未正式应用，造成 Ni、Co、Cr、W、Mo、Ta 等战略性金属资源的严重浪费和对自然环境的巨大压力。由于铸件生产时经历高温熔铸过程，其返回料中通常含有较多对性能有害的夹杂物和杂质元素，必须经过净化工艺处理后才能回收利用。本研究选取广泛应用的等轴晶合金 K465、定向合金 DZ125 和单晶合金 DD5，根据其返回料中夹杂物和杂质元素特征，在对返回料分级分类进行前处理的基础上开展真空感应熔炼、电渣、电子束等纯净化工艺研究。通过在真空感应熔炼中采取多级过滤、加入脱氧剂、优化精炼温度和时间等措施，实现对返回料中 O、N 等杂质元素以及夹杂物的有效去除，吨级 K465/DZ125/DD5 真空感应熔炼返回料纯净度达到 O、N、S 总量 $\leq 15\text{ppm}$ 。针对含铅返回料中高比重 HfO_2 难去除的问题，在真空感应熔炼基础上，对 DZ125 返回料合金进行电子束精炼，利用电子束精炼的高温、高真空以及马兰戈尼效应进一步去除返回料中的杂质元素和夹杂物，使返回料合金纯净度进一步提升，O、N、S 总含量不超过 10ppm，浮渣含量 $\leq 0.02\text{cm}^2/\text{kg}$ ，达到新料水平。本研究还对不同返回料比例的 K465、DZ125 返回料合金成分、组织和性能进行了初步评价，结果表明返回料加入对 K465、DZ125 合金成分和显微组织影响不大，返回料比例 $\geq 50\%$ 的 K465、DZ125 合金拉伸、持久、高周疲劳等力学性能达到新料水平。

C04-40

IN693 高温合金的高温氧化和耐熔融玻璃腐蚀行为及机理

李应举*、刘天宇、冯小辉、郑策、杨院生

中国科学院金属研究所

核废料处理是核工业发展的重要一环。玻璃固化处理是目前核废料处理最有效的手段，而玻璃固化熔炉电极材料在苛刻服役环境中的高温和熔融玻璃腐蚀是影响熔炉使用寿命的关键。IN693 合金在玻璃介质中呈现出较当前广泛使用的 IN 690 合金更优的抗腐蚀性能，成为下一代玻璃固化熔炉电极的候选材料。本工作通过调控 IN 693 合金中 Al 元素的含量实现了合金表面 Al_2O_3 膜由内氧化转变为外氧化，显著提高了合金的抗氧化性能。在该合金模拟实际工况通电条件下的腐蚀行为研究中发现，合金中 Al 元素含量过高或过低均不利于腐蚀过程中表面生成连续的 Al_2O_3 膜。并通过模拟揭示了交流电对腐蚀行为的影响机制，为我国自主研发玻璃固化熔炉电极材料提供理论支撑和技术支持。

C04-41

钴基高温合金微观组织演变及相变行为研究

宋秀*、杨鹏飞、王磊、刘杨

东北大学

钴基 GH5605 高温合金，由于在高温下具有优良的稳定性和耐腐蚀性能，被广泛应用于航空发动机的涡轮叶片以及核电等领域。合金长期处于温度和应力服役环境下容易发生应变诱导马氏体相变。本文以 GH5605 钴基高温合金为研究对象，探究合金在应力和温度作用下的微观组织演变规律，揭示热处理、应变量、温度等对合金应变诱导马氏体相变行为的影响规律。结果表明，随着热处理冷却速率的增大，合金中应变诱导出马氏体相的含量逐渐增多，水冷后合金中产生了较多的孪晶，而晶界和孪晶界为马氏体的形核提供了优先位置。低应变量条件下，马氏体大多在晶界处形核，而当应变量较大时，孪晶界亦成为马氏体形核的优先位置。随变形温度的升高，合金应变诱导马氏体变得困难，温度是 GH5605 钴基高温合金应变诱导马氏体相变发生的关键因素。而应变量的大小显著影响了应变诱导马氏体相变的形核位置。

C04-42

新型镍钴基高温合金的高温长时蠕变行为研究

段继萱、安腾*、杜金辉
北京钢研高纳科技股份有限公司

基于微孪晶强化机制设计的新型镍钴基高温合金主要用于制备航空发动机的热端部件，亟需系统研究不同温度和应力条件下新型合金的蠕变失效行为。本文研究了不同组织状态下的镍钴基高温合金在 650°C-800°C 和 300MPa~930MPa 的蠕变规律。细晶组织样品 (27 mm) 在 650°C/930MPa 下断裂时间超 1500h，持久寿命随测试温度而快速下降；粗晶组织样品 (90 mm) 在 800°C/300MPa 下断裂时间超 1000h，持久寿命随应力的提高而快速下降；中等晶粒组织集合了细晶组织和粗晶组织的优异性能，在所有测试条件下都具有相对优异的持久性能。新型镍钴基高温合金优异的长时持久寿命来自于层错切割析出相的失效机制，但是层错的形成与晶粒尺寸、温度和应力范围密切相关。

C04-43**镍基高温合金中 Arrhenius 公式的改进与应用**

杨佩儒，黄远，刘永长
天津大学

在不同应变速率下，在无 γ' 相析出的温度范围内，对 Allvac 718Plus 高温合金的热变形行为进行了研究。首先，我们利用 Arrhenius 方程对热变形行为进行建模，得出平均活化能为 581.1 kJ/mol。同时本文提出了一个改进的 Arrhenius 方法，包括改进的 Zener-Hollomon 参数，以计算估计不同变形条件下活化能的变化，结果表明该方法计算出的热变形活化能相对准确，即在所覆盖的变形条件下，改进模型计算出的标准方差仅为 Arrhenius 方程的 35.4%。改进模型还提出了一个活化能图的自洽算法，对于实验中的各种变形条件，活化能范围在 571.5-589.0 kJ/mol 之间。同时，我们采用 EBSD 技术对实验合金试样的微观结构特征进行了表征，以阐明热变形激活能对微观结构形成的影响。我们发现具有较高活化能的镍基高温合金样品促进了动态再结晶的程度，这表明活化能的增加可能提高了再结晶速率，产生了更细的晶粒。

C04-44**Hf 对含有不同晶界取向角的镍基双晶高温合金微观结构和蠕变性能的影响**

马力^{1,2}、王栋²、张功²、申健²、张健*²

1. 东北大学 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

本文采用双籽晶法通过定向凝固技术制备了含不同取向角 (5° 和 20°) 和不同 Hf 含量 (0-0.4 wt. %) 的镍基双晶板。结果表明，随着 Hf 含量的增加，含有 5° 或 20° 晶界的合金在 980 °C/200 MPa 下的蠕变断裂寿命逐渐增加。与含有 5° 晶界合金的蠕变断裂寿命相比，Hf 对含有 20° 晶界合金的蠕变断裂寿命提高更明显。微观组织发现，在含有 5° 晶界的合金中，随着 Hf 含量的增加，晶界两侧的 γ' 相的尺寸及立方形态完整度变化较小。在含有 20° 晶界的合金中，随着 Hf 的添加，晶界上 MC 碳化物的数量降低。另一方面，Hf 促进了 $M_{23}C_6$ 碳化物的析出， $M_{23}C_6$ 可以有效地缓解应力集中由于界面位错网的形成。本研究将有助于理解 Hf 添加对提高晶界容限的作用，优化单晶高温合金中的 Hf 含量。

C04-45**LMC 工艺的精确模拟及其铸件的高效制备**

申健
中国科学院金属研究所

C04-46

GH4742 合金中不连续脱溶组织对其加工性能及服役性能影响田强^{1,2}、吴武斌³、杜金辉^{*1,2}、段然¹、杨姗洁¹、李想¹

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司

2. 钢铁研究总院有限公司

3. 北京科技大学

GH4742 合金是一种沉淀硬化高温合金，因其优异的高温力学性能广泛应用于涡轮盘、压气机盘、承力环等零件。在 GH4742 合金中发现一种不连续脱溶组织，该组织也广泛存在于多种高合金化的高温合金中。目前关于不连续脱溶组织对高温合金热加工性能和服役性能的影响还存在争议。本研究旨在以 GH4742 合金为载体，研究不连续脱溶组织对合金热加工塑性和部分服役性能的影响规律。研究表明，该组织的存在对 GH4742 合金的热变形塑性有明显的改善作用，也提高了合金的高温持久寿命、降低了其高温蠕变速率；该组织的存在对合金抗疲劳裂纹萌生有负面作用，但对抗疲劳裂纹扩展有正面作用。

研究对象和研究方法：

本实验加工性能的试验样品取自经过真空两联熔铸、反复墩拔开坯的棒材；本实验服役性能的试验样品取自棒材经过热模锻成型的盘件。本研究利用金相显微镜(OM)观察不连续脱溶组织的宏观形貌，利用场发射扫描电镜(SEM)和场发射电子探针(EPMA)对不连续脱溶组织的微观形貌和微区成分进行观测，利用透射电子显微镜(TEM)观测位错和不连续脱溶组织的相互作用。

C04-47**热过程对定向凝固镍基高温合金 DZ409 组织和力学性能的影响**邢静^{1,2}、侯介山¹、蔡航^{1,2}、周兰章^{*1}

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

定向凝固镍基高温合金 DZ409 用于重型燃机用涡轮工作叶片，实际生产加工中，合金叶片经历钎焊、固溶处理、一次时效、二次时效、渗层和涂层工艺的热过程。前期研究证实，一次时效和渗层处理工艺结合可在确保合金组织特征稳定的同时有效缩短热加工时间，为此，本工作对比研究不同次序热过程对 DZ409 合金组织和力学性能的影响及相应机理，为 DZ409 合金叶片实际生产过程工艺流程优化和安全服役提供理论依据。

利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、电子探针(EPMA)和电子背散射衍射(EBSD)等研究发现：经标准热处理 H1 和不同次序热过程(H2、H3、H4、H5)后，合金仍呈现枝晶形貌，枝晶间形成了 MC 型和 $M_{23}C_6$ 碳化物；H1~H5 热过程态合金枝晶间 γ' 平均粒径尺寸为 400~900nm，枝晶干 γ' 平均粒径尺寸为 250~500nm，H1-H5 热过程合金枝晶间与枝晶干 γ' 体积分数为 40~50%，碳化物体积分数为 1.4%~2.0%。室温和 650℃拉伸实验结果表明，H4 热处理态 DZ409 合金呈现最优屈服强度及抗拉强度。分析表明，H4 热过程后合金的 γ' 尺寸和分数均接近根据 L-S 强化理论计算得到的最优值。五种次序热处理后合金的位错运动机制均为强相互作用位错对切割机制。根据强度计算结果， γ' 相的临界分切应力与实际屈服强度吻合度较高，拉伸变形中复合模量强化与位错切割机制共同作用，但 γ' 的位错强化起主要强化作用。

C04-48**基于深度学习的陶瓷型芯烧结过程形变预测**

徐松哲*

上海大学

在燃气轮机空心涡轮叶片熔模铸造过程中，陶瓷型芯主要用于形成叶片内部复杂的冷却通道，以提高涡轮叶片在极端工作环境下的承温能力和耐久性。然而陶瓷型芯在其制备过程中容易发生收缩和变形，进

而造成叶片内部壁厚不均,影响叶片空心内腔的尺寸精度。本文针对陶瓷型芯烧结过程,基于逐像素二分类的 U-net 深度学习神经网络,建立了一个“切片--预测--重构”的三维烧结形变预测框架,用于预测在给定烧结工艺参数下陶瓷型芯的复杂形变。

本文首先在 ABAQUS 仿真软件中建立了陶瓷型芯烧结过程的有限元模型,并在子程序二次开发中构建了烧结粘塑性本构方程。通过与实验扫描的烧结后几何模型进行对比,得到陶芯形变的最大相对误差为 3.2%,验证了烧结数值模型的准确性和有效性,并基于仿真结果分析了烧结工艺参数对陶瓷型芯形变的影响机理和趋势。基于该烧结数值模型计算了不同工艺参数组合下的烧结形变结果,建立了人工智能模型训练的数据库。为探究烧结工艺参数对陶瓷型芯形状改变的影响,本文所提框架对陶瓷型芯烧结前后几何模型进行切片,获得二维图像训练数据,并改进传统的 U-net 神经网络,将烧结工艺参数以特征图的形式嵌入神经网络,对切片图像中的形变进行训练和预测。最后通过三维重建算法,对 U-net 网络预测的切片图像进行重构,获得型芯烧结后的三维形状。针对陶芯烧结前后的切片图像特点,基于传统 U-net 模型精度评价指标 F1 分数,建立了更适用的形变评价指标 (deformation evaluation metric, DEM),改进的 U-net 模型 DEM 为 4.3%,相较于传统 U-net 模型提高了 35.8%,表明了改进的 U-net 模型能更准确捕捉到陶瓷型芯各部位的形变。最后,使用本文所提框架预测了一组新工艺参数下陶瓷型芯的三维烧结形变,预测结果与仿真对比显示,烧结形变的最大相对误差为 2.9%,验证了本文所提预测框架的准确性和可靠性。

墙报

C04-P01

高梯度低铈二代镍基单晶 DD26 氧化行为与机理研究

付海涛¹、杨文超^{*1}、申健²、张军¹、刘林¹

1. 西北工业大学

2. 中国科学院金属研究所

镍基单晶高温合金由于具有优异的高温力学性能,组织稳定性及良好的抗氧化性能而被广泛的应用在工业中先进的航空发动机及燃气轮机的热端部件中,在高温合金实际服役过程中表面涂覆涂层来保护合金,然而,在实际服役过程中,其可能会发生脱落,导致合金发生氧化,从而降低表面强度,损害合金高温下的力学性能,同时,镍基单晶高温合金的氧化行为较为复杂,DD26 单晶是一种不含 Re、Ta 等希贵元素的第一代单晶高温合金,具有良好的高温性能和组织稳定性,在 DD26 合金成分的基础上,添加 Re 元素,使之成为一种二代镍基单晶高温合金,因此,有必要研究这种新型低铈二代镍基单晶高温合金的高温氧化行为,评价其抗氧化性能,为其在实际服役过程中作参考。本文通过不连续的氧化增重法分析了低铈二代单晶在 900℃、1000℃ 下的氧化增重行为,得出合金的氧化动力学曲线,在 1000℃ 条件下氧化初始阶段氧化增重符合抛物线规律,氧化后期,合金的氧化增重快速增加,而在 900℃ 条件下,氧化增重在初始阶段快速增加,随着氧化时间的延长氧化增重趋于平稳,这可能由氧化层的剥落导致,通过 XRD 分析了得出合金在 1000℃ 下氧化产物主要为 Ni(Co)O、Al₂O₃、NiAl₂O₄、NiWO₄、NiCr₂O₄、NiMoO₄,通过 SEM 配备 EDS 观察不同温度及时间下的氧化层结构,结合 XRD,对氧化层结构的组成进行分析,分析时间及温度对氧化层结构的影响,从而得出合金在 900℃ 及 1000℃ 下氧化层结构的演变规律,得出合金的氧化机理。

C04-P02

微量元素 Mg 对一种镍基高温合金铸造性能的影响

周煜晗、杨文超^{*}、张军、刘林

西北工业大学

目前,等轴晶镍基铸造高温合金铸件因为航空发动机的发展要求,其结构复杂并且趋向于大型化、薄壁化等设计,从而导致在铸造过程中铸件往往出现浇不足,疏松缺陷过多等铸造缺陷,严重影响铸件的使

使用寿命以及合格率。基于上述因素,在浇注工艺参数以及主合金元素不变的情况下,以期通过改变或添加微量元素,从而提高合金流动充型能力,减少铸件疏松含量。相较于主合金元素来说,微量元素的变化可以在不影响合金力学性能的情况下,改变合金热物性参数、延长合金枝晶搭接时间,从而改善合金铸造性能。主要明确了 Mg 元素在铸造高温合金中的分布,探究了添加不同 Mg 元素含量对镍基铸造高温合金热物性参数、碳化物等相、合金充型能力以及疏松缺陷的影响及机理。通过对改性后合金充型能力、疏松缺陷的检测,探明了 Mg 元素对铸造性能影响关系,确定了镍基铸造高温合金中最优 Mg 含量。目前研究结果表明:(1)Mg 合金元素主要分布在 MC 碳化物相界面处;(2)随着 Mg 合金元素含量升高,碳化物尺寸大小与面积分数都呈现先上升后下降的趋势,当 Mg 含量为 100ppm 时,两者都达到最低;(3)合金共晶面积分数随着 Mg 元素的升高,呈现先降低后上升的趋势;(4)随着 Mg 含量的升高,合金流动能力呈现下降后上升的趋势,当 Mg 元素含量为 100ppm 时,合金流动能力最长,为 283mm;(5)随着 Mg 含量的升高,合金疏松面积百分数呈现下降趋势,并且 Mg 元素含量为 100ppm 时,合金疏松面积百分数最少,约为 0.04%。

C04-P03

时效处理工艺对 GH6783 组织和性能的影响

陈爽、王涛*、万志鹏、付书红

中国航发北京航空材料研究院

为了解决低膨胀合金低 Al 带来的 SAGBO 效应(stress accelerated grain boundary oxidation, 应力加速晶界氧化脆性倾向),在传统低膨胀高温合金的基础上添加了 5.4%的 Al,研发了第四代 Fe-Ni-Co 基抗氧化低膨胀高温合金 GH6783,其在 800°C 可达完全抗氧化级,具有十分广阔的应用前景。较高含量的 Al 元素不仅改善了合金 SAGBO 效应,同时改变了相组成与演变规律。课题组前期研究发现,晶界处短棒状 β 相,有助于消除材料的 SAGBO 和缺口敏感性,晶内 γ' 相的分布特征会影响材料的强度,且上述组织的变化均发生在合金时效处理过程。为获得优异综合力学性能,研究了不同二级时效热处理工艺对 GH6783 合金的微观组织与力学性能的影响。结果表明:二级时效温度由 680°C 升高至 780°C,晶内一次 γ' 相的数量以及尺寸均逐渐增加,晶内二次 γ' 相的数量逐渐降低,当二级时效温度升高至 780°C 时,晶内无二次 γ' 相析出。合金的强度、塑性与持久性能均随二级时效温度的升高呈现先升高后降低趋势,在二级时效温度为 720°C 时,合金的室温与 750°C 拉伸强度达到最高值,抗拉强度分别达到 1217MPa 与 661MPa。同时在该时效温度下合金持久性能与拉伸塑性仍然保持较高水平。因此,为获得最佳的组织与综合力学性能,合金的最佳二级时效温度为 720°C。

C04-P04

一种高钨镍基单晶高温合金中的 β -NiAl 析出相研究

周昱、赵新宝*、夏万顺、岳全召、谷月峰、张泽

浙江大学

镍基单晶高温合金具有优异的高温力学性能、抗氧化性能和耐腐蚀性能,可用作现代航空发动机涡轮叶片的重要制备材料。本文基于自主研发的一种高钨镍基单晶高温合金,研究了实验合金铸态微观组织形貌与凝固路径、热处理组织的调控。实验合金凝固路径为: $L \rightarrow L_1 + \gamma \rightarrow L_2 + \gamma + \beta\text{-NiAl} \rightarrow L_3 + \gamma + \beta\text{-NiAl} + \gamma' \rightarrow \gamma + \beta\text{-NiAl} + \gamma' + \gamma/\gamma'$ 共晶组织;在铸态组织中有 $\beta\text{-NiAl}$ 相出现,主要分布在合金的枝晶间区域, Ru 元素在 $\beta\text{-NiAl}$ 相中发生显著偏聚。通过对合金热处理工艺的调控,显著降低了铸态合金枝晶中的元素偏析程度,完全消除了铸态合金中的 $\beta\text{-NiAl}$ 相。本工作旨在为新型含 Ru 高代次镍基单晶合金的成分设计和热处理工艺优化提供实验数据和理论支撑。

C04-P05

定向凝固 DZ409 柱晶高温合金的显微组织及晶粒的竞争生长

王晓燕*^{1,2}、吴剑涛^{1,2}

1. 河北钢研德凯科技有限公司
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

研究背景及意义

作为重型燃气轮机涡轮叶片等热端部件的重要材料，定向凝固镍基高温合金的综合性能优化是提升重型燃气轮机效率、延长其寿命的关键。DZ409 合金是我国自主研发的新型定向柱晶高温合金，具有良好的抗腐蚀性能、组织稳定性及良好的高温力学性能，可满足航天用发动机和工业燃气轮机涡轮叶片的长期工作环境。定向凝固组织（诸如枝晶、 γ' 相和碳化物）会受凝固参数的变化对合金性能产生影响。目前，国内针对 DZ409 柱晶合金铸态组织已经开展了大量的研究，其中多数还是集中在定向凝固参数对显微组织的影响。而在定向凝固过程中，铸件不同高度处冷却速率等生长条件存在不同，将导致铸态组织的不均匀性，影响铸件的性能。因此，对于不同生长高度处合金显微组织的演化的研究也是很有必要的。

研究材料及技术

定向凝固实验用母合金材料为 DZ409 高温合金。实验采用高速凝固（HRS）工艺制备 DZ409 柱晶试棒，模组试棒尺寸为 $\Phi 14\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ，模壳温度和浇注温度均为 $1520\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，抽拉速率为 6 mm/min 。利用线切割对抽拉后实验试棒沿高度方向进行纵切和横切。试样经打磨、抛光后用腐蚀剂进行腐蚀。使用光学显微镜以及带能谱（EDS）的扫描电镜（SEM）进行微观组织观察和分析。

主要研究结果及结论

由实验结果可以得出，随着定向凝固 DZ409 柱晶高温合金生长高度的增加，一次枝晶间距增加，可见二次枝晶，短小的二次枝晶垂直于一次枝晶排列。 γ' 相尺寸逐渐减小，且 γ' 相形貌由不规则的立方体状向蝴蝶状转变；枝晶间处 γ' 相尺寸和数量均明显高于枝晶干处。碳化物和 $\gamma+\gamma'$ 共晶组织主要分布于枝晶间区域，且随着生长高度的增加，碳化物的形貌由初始抽拉时细小块状逐渐向条状、骨架状转变。定向凝固过程中，随着生长高度的增加，晶粒的竞争生长使柱状晶数量明显减少，且试棒中心的晶粒在竞争生长中占据优势淘汰边缘晶粒。

C04-P06

Ti 对 DZ409 合金显微组织和典型力学性能的影响

付媛媛*

河北钢研德凯科技有限公司

研究了不同 Ti 含量（3.4、4.3、5.6 wt.%）合金经相同热处理后对 DZ409 合金组织及力学性能的影响。分别利用光学显微镜（OM）、场发射扫描电镜（SEM）和能谱仪（EDS）对热处理后合金的枝晶形貌、MC 碳化物、 γ/γ' 共晶相及 γ' 相的分布情况进行观察分析，同时对热处理后的合金进行典型力学性能测试。结果表明：经热处理后，随着 Ti 含量的增加，合金枝晶形貌逐渐模糊；MC 碳化物和 γ/γ' 共晶相的面积分数和尺寸增大，其中 3.4Ti 合金经热处理后 γ/γ' 共晶相基本完全溶解；枝晶干和枝晶间 γ' 相形貌尺寸和体积分数相差不大。经力学测试分析，随 Ti 含量增加，抗拉强度、屈服强度以及持久寿命逐渐升高，而持久伸长率逐渐下降。

C04-P07

Ta 对一种无 Re 镍基单晶高温合金蠕变行为和强化机制的影响

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

作为发动机的热端部件，单晶涡轮叶片服役环境十分恶劣，往往承受着热应力、振动应力和离心应力等多种应力的耦合作用。在平稳运行条件下，由轴向离心应力引发的蠕变损伤已成为单晶叶片的主要失效形式之一。高合金化虽能延长蠕变寿命，但难熔元素总量被提高，合金中 TCP 相的析出倾向增强，降低了

难熔元素的强化效果，导致合金力学性能显著降低。Ta 作为单晶高温合金中重要的强化元素，不易形成 TCP 相，通常有利于合金组织稳定性和力学性能的提高。因此，本文较为系统地研究了 Ta 的增加对一种无 Re 镍基单晶高温合金蠕变行为和强化机制的影响。

本文以三种不同 Ta 含量的无 Re 镍基单晶高温合金(分别为 7wt.%、8wt.% 和 9wt.%)为研究对象，借助 SEM、TEM 和 HR-XRD 等手段研究了合金在 980 °C/163 MPa 下的蠕变行为和强化机制。结果表明：随 Ta 的增加，蠕变寿命从 680 h 提升到 2050 h，提高了 2 倍。热处理态下，Ta 的增加提高了 γ' 相体积分数，细化了 γ' 相尺寸；断裂后 Ta 的增加导致 γ 基体通道变窄，位错在基体中滑移的临界切应力变大，位错不容易弓进，导致合金的屈服强度提高，还使得合金蠕变过程中筏排结构的完整性提高。同时，Ta 的增加增大了合金在室温和 980 °C 下的绝对错配度，导致 γ/γ' 界面位错网形貌更加规则、均匀和致密，不利于基体位错越过位错网切入 γ' 相，使得切入 γ' 相的超位错密度降低。理论计算表明，Ta 的增加不仅提高了合金的固溶强化作用；还显著减慢了扩散动力学，大大延长了蠕变稳态阶段。因此，Ta 的增加大幅度地提高了合金蠕变寿命。综上所述，从不同的强化机制系统地研究了 Ta 含量对蠕变寿命的影响，为镍基单晶高温合金的设计以及力学性能的改善等问题提供了理论依据。

C04-P08

应力状态对一种新型低成本第二代镍基单晶高温合金高温蠕变行为的影响

吕培森、刘丽荣*

沈阳工业大学

镍基单晶高温合金由于具有优异的高温抗氧化、抗蠕变和抗疲劳性能成为先进航空发动机涡轮叶片的重要材料。为了减少稀贵金属元素 Re 的使用，降低合金成本并提高合金组织稳定性，本研究设计了一种 Re 含量为 1.5 wt.% 的低成本第二代镍基单晶高温合金，利用 SEM，TEM，STEM 和 EBSD 等表征手段研究了试验合金在 1038°C 不同外加应力（137-207 MPa）下的蠕变行为。结果表明：当外加应力从 172 MPa 降低到 137 MPa 时，合金的蠕变寿命由 271 h 增加至 652 h，展现出明显的应力敏感性。此外，基于微观组织表征和变形机制的门槛应力计算结果，讨论了不同应力下的蠕变机理。随着外加应力的增加，合金中的界面位错网由规则的方形结构逐渐转变为不规则的波纹状结构。特别地，在 1038 °C/137 MPa 下，由于变形储能的积累， γ' 筏形组织内的超位错列通过位错的重排和湮灭逐渐演化为位错壁，进而发展为亚晶界。最后，亚晶通过旋转和合并增大取向差并演化为再结晶晶粒。此外，根据门槛应力的计算结果，在 137-207 MPa 的应力范围内，位错攀移在整个稳态阶段的蠕变变形中起着重要作用。然而，蠕变第三阶段时，缩颈变形引起的实际应力增加也会促进位错在低应力（137 和 172 MPa）下切割或绕过筏形 γ' 相，这与 TEM 下位错亚结构的最终演化结果相吻合。本研究结果有助于理解低成本单晶高温合金的高温蠕变机理，并为低成本单晶高温合金的设计提供实验依据。

C04-P09

IN939 合金显微组织调控与热稳定性研究

赵亮¹、王旻^{*1,2}、马颖澈^{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 核用材料与安全评价重点实验室

随着先进航空发动机推重比的提升，对大型热端结构铸件用高温合金的承温能力需求日益提高。现役 IN718C（国内牌号 K4169）合金最高使用温度 650°C，国内外研究者围绕 IN718C 改型以提高其承温能力做了大量工作，然而其服役温度提升十分有限。IN939 合金是一种 γ 相强化型镍基高温合金，承温能力在 800~850°C，被广泛应用于燃气轮机的叶片、燃料喷嘴、扩散器等热端部件，可作为承力框架类部件的重要候选材料。目前现有文献关于铸造 IN939 合金组织性能和热暴露稳定性方面的研究较少，本文针对这两方面开展了研究。

结果表明：（1）通过热处理制度调控 γ 相分布和尺寸，发现 1180°C 固溶 4h 加 845°C 时效 20h 热处理

后, γ' 相平均尺寸约为 80.2nm, 800°C高温拉伸屈服强度和抗拉强度分别高于 780MPa 和 900MPa, 高温伸长率 4.5%; 800°C/430MPa 条件持久寿命达到 180h。从合金综合力学性能考虑, 单级热处理制度明显优于文献报道中标准四段热处理制度。(2) 合金在 800°C热暴露过程中, 随时效时间延长, γ' 相逐渐粗化, 遵循 LSW 粗化理论, 粗化速率为 $213.7\text{nm}^3/\text{h}$ 。MC 型碳化物未发生明显变化; 晶界 M_{23}C_6 型碳化物在长期时效过程中明显长大, 尺寸增加; 热暴露 1000h 后基体中未析出 TCP 等有害相; 合金的强度随着时效时间延长逐渐降低, 塑性呈增加趋势。(3) 研究了单级时效热处理制度对 800°C长期热暴露高温强度下降影响, 发现经过 1180°C/4h+800°C/16h 热处理样品, 在热暴露 1000h 后, 其高温强度下降了 22%, 而经过 1180°C/4h+845°C/20h 热处理样品, 在同样条件下, 强度下降了 15%。这表明初始热处理可影响热暴露 γ' 粗化速率。

综上, 合金经过 1180°C固溶 4h 加 845°C单级时效 20h 热处理制度调控后, 具有优异的综合力学性能, 显著优于文献报道的热处理制度。此外, 在该热处理制度下, γ' 相粗化速率较低, 并且在长期热暴露条件下, 合金的强度下降速度最为缓慢。

C04-P10

双相镍基高温合金构筑成形中多重界面愈合机制的研究

任少飞^{1,2}、刘生³、徐斌¹、孙明月*¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学
3. 苏州实验室

构筑成形技术作为一种制备大尺寸均质化构件的先进技术, 目前已被广泛应用于不锈钢, 钛合金, 高温合金等构件的制备。尽管关于构筑成形过程中的界面愈合机制已经进行大量研究, 但是关于双相高温合金的界面愈合机制仍需要被澄清。本文系统研究了在构筑成形过程中变形温度对双相 ($\gamma+\gamma'$) 镍基高温合金三种连接界面 ($\gamma'-\gamma'$, $\gamma-\gamma$, $\gamma-\gamma'$) 愈合机制的影响。研究表明, 在不同的变形温度下, $\gamma-\gamma$ 的界面愈合机制始终保持不变, 均为项链状分布的不连续动态再结晶。随着变形温度的增加, $\gamma'-\gamma'$ 的界面愈合机制由不连续动态再结晶向高温扩散连接转变。当变形温度为 1100°C时, γ' 中产生的位错由于富集 Cr 元素, 促进了异质外延再结晶的发生。通过异质外延再结晶生长形成的 γ 壳, 有利于原始连接界面的愈合。随着变形温度降低到 980°C, 析出相的变形机制由高温下的位错对切割转变为中温条件下的层错切割, $\gamma-\gamma'$ 的界面愈合机制也相应转变为不连续动态再结晶。尽管在不同的变形温度下, 多重连接界面表现出不同的界面愈合机制, 但接头的力学性能均可以达到母材的同等水平。

C04-P11

C 含量对涡轮盘用 GH4975 合金持久性能的影响

邵文彬^{1,2}、张瑞¹、崔传勇*¹、周子荥¹、周亦胄¹、孙晓峰¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

当温度升高到一定程度后, 变形高温合金的晶界强度显著下降, 可以通过调控 C 元素来改善晶界碳化物分布, 从而提高合金的承温能力。本团队采用热力学计算、SEM、EPMA、TEM 等手段系统地研究了 C 含量对涡轮盘用 GH4975 合金持久性能的影响。结果表明, 随着 C 含量增加, 合金中 MC 碳化物数量和尺寸均发生增长, 晶界处析出大量小块状 M_{23}C_6 碳化物。C 含量的增加提升了合金在 800°C/500MPa 条件下的持久寿命, 在蠕变变形过程中, C 含量的提升强化了晶界强度, 晶内和晶界处应力分布更均匀, 晶内产生高密度的位错在低层错能条件下诱导层错与微孪晶密度增加, 实现晶界晶内协同强化。合金断裂行为由沿晶断裂向穿晶断裂转变。当温度进一步升高到 850°C时, 晶界强度进一步减弱, C 含量的增加提高了晶界强度, 但仍然难以匹配晶内强度, 导致合金断裂行为未发生明显改变。

C04-P12

Co 含量对一种铸造镍基高温合金显微组织和蠕变性能的影响

顾咏涵^{1,2}、欧美琼^{*1}、侯坤磊¹、马颖澈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

为了提高 K4750 铸造镍基高温合金的力学性能,研究了 Co 含量对合金显微组织和蠕变性能的影响。随着 Co 含量从 0wt.% 增加到 4wt.% 和 10wt.%,合金标准热处理后在 750°C/430MPa 下的蠕变寿命由 244h 显著提高到 351h 和 488h,稳态蠕变速率由 $5.43 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$ 降低到 $2.31 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$ 和 $1.79 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$ 。APT 结果显示,0Co (含 4Fe) 合金中 γ 基体和 γ' 中的 Fe 含量分别为 5.35at.% 和 0.95at.%,4Co (不含 Fe) 合金 γ 基体和 γ' 中的 Co 含量分别是 4.72at.% 和 1.32at.%,两种合金中 γ' 相的 Nb 含量分别为 0.12at.% 和 1.6at.%。基于 γ 和 γ' 成分,利用 Vegard 定律计算发现,以 4Co 代替 K4750 合金中的 4Fe 使 γ 晶格常数由 3.63393 Å 降低到 3.62930 Å,而 γ' 晶格常数由 3.64729 Å 增加到 3.64875 Å,从而使 γ/γ' 错配度从 0.367% 增加到 0.534%,增强了 γ' 相的错配强化效应,是含 Co 合金蠕变寿命提升的原因之一。三种合金稳态/加速蠕变阶段的 TEM 结果显示:1) 0Co、4Co 和 10Co 合金都存在位错绕过 γ' 相留下位错环的平面滑移方式;2) 0Co 合金还存在位错交滑移的非平面滑移方式,4Co 和 10Co 合金中还存在位错切过 γ' 相留下层错的平面滑移方式,因为 Co 降低层错能,能够使塞积在 γ/γ' 相界面的位错以层错切过的方式运动,促进了平面滑移,从而抑制了非平面滑移,因此 Co 增强了合金蠕变抗力;3) 10Co 中还形成了 X 型、T 型层错交互结构,可进一步阻碍位错运动,是其蠕变寿命进一步提升的关键原因。综上,引入 Co 能够增大 γ/γ' 错配度、降低合金层错能,进而提高了合金蠕变抗力,研究结果可为同类镍基高温合金成分设计提供理论参考。

C04-P13

Ta、Ti 含量对镍基高温合金力学性能的影响研究

鹿超、闵小华*

大连理工大学

摘要: 难熔合金元素的添加是提高镍基高温合金力学性能的有效策略之一。镍基高温合金中最主要的强化相是具有 $L1_2$ 结构的 γ' 相,其与合金的力学性能密切相关,可以通过添加 Ta、Ti 等 γ' 相形成元素的方法来对合金的性能进行改善。然而过多的 Ti 元素会导致 η -Ni₃Ti 的形成,不利于合金的组织稳定性。由于 Ta 能够在提高合金性能的同时又能保证组织的稳定性,所以研究 Ta 元素替换 Ti 元素对合金力学性能的影响具有重要的实际意义。因此本研究基于 66.70 Ni-8.31 Co-6.25 Cr-1.06 Mo-2.06 W-12.50 Al-(3.12-x) Ti-x Ta (at.%) 合金,采用保持(Ta + Ti)元素总量 3.12 at.% 不变、改变 Ta 和 Ti 含量的方法设计得到具有浓度梯度的 0 Ta-3.12 Ti (at.%)、1.06 Ta-2.06 Ti (at.%)、2.06 Ta-1.06 Ti (at.%) 和 3.12 Ta-0 Ti (at.%) 四种实验合金,并基于 96 原子的 Ni₇₂Al₂₁(Ta_yTi_{3-y})超晶胞模型,采用 3 个 Ta、Ti 原子替换 Al 原子的方法构建与实验合金浓度梯度相对应的 0 Ta-3 Ti (0 Ta-3.12 Ti (at.%)、1 Ta-2 Ti (1.06 Ta-2.06 Ti (at.%)、2 Ta-1 Ti (2.06 Ta-1.06 Ti (at.%) 和 3 Ta-0 Ti (3.12 Ta-0 Ti (at.%) 合金,通过第一性原理计算结合实验的方法研究了不同 Ta、Ti 浓度梯度下合金屈服强度的变化规律及 γ' 相有序强化、 γ' 相与 γ 相间界面强化对力学性能影响的内在机理。结果表明,合金的屈服强度正相关于反相畴界面能(anti-phase boundary energy, APBE),室温下 0 Ta-3.12 Ti (at.%) 合金的屈服强度达到了 666.80 MPa (APBE = 437 mJ/m²),随着 Ta 含量的增多,1.06 Ta-2.06 Ti (at.%)、2.06 Ta-1.06 Ti (at.%) 和 3.12 Ta-0 Ti (at.%) 合金的屈服强度分别提高到 719.44 MPa (APBE = 540 mJ/m²)、825.88 MPa (APBE = 640 mJ/m²) 和 842.88 MPa (APBE = 671 mJ/m²)。此外, γ' 相中的 $a\langle 110 \rangle$ 超位错由(111)面交滑移到(100)面阻碍位错的运动,且增加 Ta 的含量会降低交滑移的驱动力。TEM 观察分析发现合金相界面处的位错网络间距随着 Ta 含量的增多而减小,错配度绝对值和格里菲斯断裂功表明,Ta 含量的增多提高了合金两相界面的结合强度,改善了合金的性能。

C04-P14

GH4738 镍基高温合金的高温热腐蚀研究信丹¹、黄海亮*¹、杨彦红²、王广磊³、曲敬龙³、陈阳¹、吴冲冲¹、赵建康¹、王一诺¹、马文婷¹

1. 烟台大学

2. 中国科学院金属研究所

3. 北京钢研高纳科技股份有限公司

镍基高温合金是航空发动机热端部件的首选材料，当航空发动机在舰载、近海等海洋环境下服役时，其热端部件很容易遭受热腐蚀，从而导致其在使用过程中过早失效。因此，开展镍基高温合金的耐热腐蚀性能研究对评价及改善其服役寿命具有重要意义。本文研究了 GH4738 合金涂覆 75wt%Na₂SO₄+25wt%NaCl 盐膜在 700°C 和 800°C 下的循环热腐蚀行为。采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)及透射电镜(TEM)分析了腐蚀产物的相组成及膜结构，并探讨了其腐蚀机制。结果表明：在两个温度下，形成的腐蚀产物均出现明显的分层结构，外层主要为 Cr₂O₃，中间层为 TiO₂ 及 Al₂O₃，最内层为 CrS、TiS 等硫化物；且在腐蚀过程中外层富 Cr 氧化膜会在盐膜作用下发生溶解。在较高的温度下，内氧化层和内硫化层深度较厚，表明在更高的温度下，合金的抗热腐蚀性能越差。合金热腐蚀过程中是氧化、硫化和氯化协同作用的结果。

C04-P15**晶界元素偏析调控下的高温合金抗氢脆性能的理论研究**

张子欣、张川晖*

北京科技大学

在纯氢或混氢的燃烧环境中，氢气快速渗入燃气轮机的涡轮叶片材料内部并聚集在晶界、位错等缺陷结构中，进而降低了材料的高温力学性能。本工作以 DZ411 镍基高温合金的重要强化相 Ni₃Al 为研究对象，采用第一性原理方法探索氢与主要成分元素（Cr、Mo、Ti 和 Ta）在 $\Sigma 5$ 晶界的共偏析机理。首先，设计氢均匀偏析与氢富集偏析两种吸附模型，指出陷阱体积与元素种类是氢陷阱性能差异的主要因素；讨论氢偏析浓度与晶界强度的关系，探索氢在晶界的扩散与渗透机制。其次，对比晶界能、强化能等性质，从合金元素改变晶界电子局域环境的角度提出增强晶界强度与断裂性能的微观机制。最后，将合金元素取代晶界处的典型氢陷阱结构，设计既易于捕获氢原子又能限制氢扩散的新型陷阱结构，进而筛选出有效抵抗氢致晶间断裂的偏析元素。研究结果为设计耐氢脆的高性能镍基高温合金提供了理论指导。

C04-P16**基于放电等离子烧结技术制备活性元素掺杂 Ni₃Al 金属间化合物**

李谦*

西安电子科技大学

γ' -Ni₃Al 粘结层具有和单晶高温合金间“相平衡”的特性，可有效解决现有热障涂层粘结层与单晶涡轮叶片间的元素互扩散问题。但由于 γ' 相粘结层中 Al 含量低导致的抗长期氧化性差的问题已成为 γ' 相粘结层实现工业化应用的一大障碍。本研究采用真空放电等离子烧结法分别制备 0.1%，0.3%，0.5%，0.8%，1.0%(wt)Hf、Y 等活性元素掺杂的 Ni₃Al 金属间化合物，再进行 10h 恒温氧化试验，并使用 XRD，SEM，EDS 等表征方法对样品进行表面和截面的测试，结果表明，随掺杂量的增加，Ni₃Al 晶面间距增大，材料显微硬度增大，并且适量活性元素的掺杂可以明显改善氧化膜的均匀性和致密性，提高试样的抗氧化性能和氧化膜的附着力。

C04-P17**温度和二次取向对单晶高温合金拉伸性能的影响**刘苏杰^{1,2}、马广财²、陈星秋²、郭翼*²

1. 中国科学技术大学
2. 中国科学院金属研究所

单晶高温合金定向凝固生产过程中, 会控制铸件沿一次取向[001]生长, 垂直于[001]方向的二次取向并无科学的控制标准。本实验采用第二代镍基单晶高温合金, 研究二次取向在不同温度下对合金拉伸性能的作用机理, 阐明铸造工艺中是否有必要考虑二次取向的问题。实验部分, 以板状铸锭外表面为 0°参考面, 绕[001]主轴依次旋转 5°、37°、47°、57°取四个二次取向扁平拉伸试样, 进行室温和 850°C 下准原位拉伸实验。利用 EBSD 研究介观尺度下不同二次取向样品内几何必须位错密度 (GND) 演化过程, 利用透射电子显微镜研究微观尺度下变形后样品内的位错组态。实验结果显示室温下抗拉强度更高, 因为大量位错在基体通道中塞积以及 γ' 中反向畴界 (APB) 相互作用形成位错网均导致加工硬化, 从而提高合金强度。而 850°C 下混合位错对切入 γ' 呈弓形, APB 交滑移形成 K-W 锁, 位错均匀分布促进塑性提升。两个温度下随着应变增加 GND 均显著升高, 滑移系开动不同导致各取向 GND 演变存在差异。室温时 5°和 37°试样率先开动二次滑移系, 多滑移系协同变形, 使二者塑性略高于其他取向, 但二次取向效应不明显。850°C 时 GND 均匀分布, 37°和 47°试样 GND 增长率快速升高, 表明更多滑移系开动, 而 57°可能只开动主滑移系。850°C 时不同取向之间塑性差异更大, 表明高温下二次取向效应更明显, 归因于塑性变形机制和断裂模式的转变。

C04-P18

Zr、Y 元素含量对 N06025 合金抗氧化性能的影响

杜洋^{1,2}、石照夏^{*2}、鞠泉²、胥国华²、王树财³

1. 烟台大学精准材料高等研究院
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司
3. 抚顺特殊钢股份有限公司

为研究 Zr、Y 元素含量对 N06025 合金抗氧化性能的影响, 利用恒温氧化实验研究了不同 Y、Zr 含量的 N06025 合金在 1200°C 空气中的氧化行为, 采用静态增重法测定其氧化增重, 并采用扫描电子显微镜和附带能谱仪以及电子探针分析仪对表面氧化膜形貌、组成及其截面特征进行观察和分析。结果表明: N06025 合金在 1200°C 的氧化膜分为三层: 外层是 Cr₂O₃ 和 TiO₂ 的混合层; 中间层是 TiO₂ 和 Al₂O₃ 的混合层; 内层是 Al₂O₃ 氧化层。当合金中不含 Y 元素时, Zr 元素对抗氧化性能影响不明显, 添加微量 Y 元素则会极大的提升其抗氧化性能。当合金中含有 Y 元素时, Zr 元素添加过多反而会降低其抗氧化性能。

C04-P19

Re 对一种低密度 Ni₃Al 基单晶高温合金组织和性能的影响

蔡航^{*1,2}、侯介山¹、郭永安¹、周兰章¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

Ni₃Al 基单晶高温合金由于其具有优异的高温性能, 抗高温氧化性以及较低的密度而成为代替传统 Ni 基高温合金的最具有潜力的材料之一。同时, Re 是一种关键元素, 其对高温合金性能的影响也是研究热点, 截至目前, 传统 Ni 基、Co 基以及 Ni-Co 基合金均有大量的相关研究, 然而, 其对 Ni₃Al 基单晶高温合金的影响报道较少。本文结合 DSC、EPMA、OM、EPMA 和 FEI-TEM 等表征手段, 系统地研究了元素 Re 对一种低密度 (<8.0g/cm³) Ni₃Al 基单晶高温合金凝固行为、长期时效组织演化和 1100°C/100MPa 持久性能的影响。1.5wt.%Re 的加入仅略微地提升了特征温度点, 但由于合金流动性的降低以及 Al、Ti 元素的偏析程度加剧, 导致铸态合金枝晶间距显著减小, 并且提高了 γ/γ' 共晶相的体积分数。完全热处理后, 含 Re 合金具有更大的负失配值和更高的 γ' 相立方位度, 这是由于元素 Re 主要固溶于 γ 通道中, 引起 γ 相的晶格常数增大。此外, 在 900°C 的长期时效过程中, Re 的加入可以显著减缓 γ' 沉淀物的粗化速率, 并延迟 γ' 的聚结行为, 主要原因是 Re 引起扩散系数较低的 Cr 元素在 γ 通道中的分配浓度增加以及其本身具有极低的

扩散系数,使合金的有效扩散系数降低。然而,添加 Re 并没有改变 γ' 沉淀的粗化机制,根据实验数据拟合结果, Lifshitz-Slyozov-Wagner (LSW) 理论比无 Re 和含 Re 合金的跨界面扩散控制 (TIDC) 粗化模型更适合描述 γ' 的粗化行为。最后,研究了 Re 对合金在 1100°C/100MPa 下的持久性能的影响,结果表明,合金持久命从 96.8 小时提高到 160.1 小时,两合金的断口形貌均表现出典型拓扑反转形态的 γ 相被连续的 γ' 相包围,意味着 Re 在持久过程中对 γ/γ' 相结构稳定性影响较小。值得注意的是,在 1.5Re 合金中的 γ/γ' 界面处发现更致密的位错网,这表明持久性能的提高是 Re 对 γ/γ' 界面位错网络的优化而引起的。该研究对低密度 Ni₃Al 基单晶高温合金的成分设计具有指导意义。

C04-P20

基于晶界工程的 GH4169 合金力学性能优化研究

边张驰、刘浩翔、刘栩东、贺一轩*

西北工业大学

凭借自身优异的力学性能, GH4169 合金成为目前在航空航天领域中应用最为广泛的商用镍基高温合金之一。作为典型的多晶材料, GH4169 合金力学性能受到晶界控制,而通过晶界工程处理提高了合金内部 CSL 晶界的比例,可以实现对合金综合力学性能的优化。因此,本工作利用轧制加时效实现晶界工程处理,使合金 CSL 晶界体积分数提升至 55%。由于 CSL 晶界相较于随机晶界 (RGB) 具有较高的施密特因子有助于位错通过,抑制位错沿晶界堆积,降低晶间断裂的风险;且 CSL 晶界较高的原子堆积密度 (APD),也会阻碍了氧沿晶界扩散,抑制晶间氧化,提升 GH4169 合金在室温及高温下的塑性。此外,高比例的 CSL 晶界有利于变形过程中孪晶的形成,增强了动态 Hall-Petch 效应,极大提高了蠕变性能。晶界工程处理具有优化合金力学性能的开发前景。

C04-P21

富铁高熵型高温合金的成分设计与性能探索

苏兆翼、王阳、冉子祚、张爽*、邹存磊、赵亚军、董闯

大连交通大学

铁基高温合金是一种在 600~800°C 高温下有一定强度和抗氧化、抗燃气腐蚀的材料,主要以铁为基体、含一定量铬和镍的奥氏体合金。本工作从理论上设计了一种富铁高熵型高温合金,将置换型固溶的合金化元素分为 Fe、类 Cr (铁素体稳定元素,包括 Cr、Mo、Si、Nb) 和类 Ni (奥氏体稳定元素,包括 Ni 和 Mn) 元素三大类,多元合金因此可简化为伪三元体系,而 C 作为小原子间隙固溶于合金中。根据团簇加连接原子模型,由于合金化元素尺寸近似相等,置换型固溶体部分的成分式采用面心立方固溶体的 16 原子团簇式进行设计,共设计出六组合金成分,分别为 $C_{0.03125}-(Cr_{3.4375/4.4375}-Mo_{0.25}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625})-(Ni_{5/6}-Mn_{0.125})-Fe_{7/6}$ 和 $C_{0.03125}-(Cr_{3.6875/4.6875}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625})-(Ni_{5/6}-Mn_{0.125})-Fe_{7/6}$ (数字写在元素符号下角标表示对应元素的原子个数, Cr、Ni 和 Fe 三种元素的原子个数分别有两种选择),其中,置换固溶型元素的原子个数总和固定为 16。进而采用真空电弧炉熔炼进行样品制备,再实施轧制、热处理等工艺进行样品加工,最后进行组织表征、力学性能及耐蚀性能测试等实验。结果表明:六组合金的组织均表现为单一奥氏体相,其中合金 $C_{0.03125}-(Cr_{4.6875}-Si_{0.125}-Nb_{0.0625})-(Ni_5-Mn_{0.125})-Fe_6$ 的室温硬度最高,为 186±5 Hv,高于对照合金 GH2302 (165±5 Hv);其在室温、400°C、600°C 和 750°C 下延伸率和抗拉强度分别为:48%~51% (高于对照合金 N08020 的 40%)、543~563 Mpa, ~50%、482.83 Mpa, ~53%、433.04 Mpa, 和 ~66%、280 Mpa;电化学腐蚀实验结果表明类 Cr 元素含量越高,合金的 Ecorr 越高, Icorr 越小,其耐腐蚀能力越强,相同类 Cr 元素含量情况下合金中添加 Mo 元素的成分耐点蚀性能更好。

C04-P23

Ta/W 比对一种高 W 高 Ta 新型粉末高温合金蠕变行为的影响

李晓鲲^{1,2}、张义文^{*1,2}、贾建^{1,2}、张浩鹏^{1,2}、李新宇^{1,2,3}

1. 钢铁研究总院
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司
3. 东北大学材料科学与工程学院

提高 Ta、W 元素的含量是新型镍基粉末高温合金设计和研究的趋势，高(W+Ta)含量的粉末高温合金拥有优异的高温力学性能。但是，高(W+Ta)含量的粉末高温合金中 W、Ta 如何配比能使合金达到最优的性能，并未有太多研究。因此，我们设计了三种不同 Ta/W 比的高(W+Ta)含量合金，研究 Ta/W 比对合金的影响，重点关注 Ta/W 比对合金蠕变行为的影响。

实验选用了一种高(W+Ta)的粉末高温合金，在保持合金(W+Ta)总量和其他元素含量相同的情况下，采用 4.0/3.5、3.5/4.0、3.0/4.5 三种不同的 Ta/W 比。测试了合金 650°C/1035MPa、750°C/720MPa、815°C/490MPa 等不同条件的蠕变性能，并采用 SEM、EBSD、TEM 等设备进行蠕变断裂试样的组织观察和表征分析。

研究表明：Ta/W 比对合金蠕变性能的影响以 750°C 为界趋势相反，750°C 以下低 Ta/W 比合金蠕变性能较好，750°C 以上高 Ta/W 比合金性能较好；高 Ta/W 比合金 750°C 以下蠕变变形机制以微孪生+ γ' 相内孤立层错剪切为主，750°C 以上蠕变变形机制以 γ' 相内孤立层错剪切为主；低 Ta/W 比合金蠕变变形机制与高 Ta/W 比合金规律相反，这导致以 750°C 为界，Ta/W 比对蠕变性能的影响趋势相反。

C04-P24

一种新型镍基粉末高温合金的蠕变缺陷结构和原子偏聚

李新宇^{1,2}、刘建涛^{1,2}、张义文^{*1,2}

1. 钢铁研究总院有限公司
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

在高温合金蠕变变形过程中，不同{111}滑移面的层错经常发生相互交叉，这对层错的扩展造成一定的影响，将这种现象称作“层错交割”。侧立状态下层错在不同{111}面的交割角度为 70.5°，存在多种交割方式。利用高分辨高角环形暗场(HAADF)像和原子尺度 EDS 对 FGH4108 合金在 750 °C/552 MPa 蠕变断裂后 γ' 内的超点阵层错进行表征。结果表明，层错交割会造成层错面的偏移以及产生 $a/3\langle 001 \rangle$ 不可动压杆位错。层错交割有利于 Co、Cr 在交割位置偏聚，促进 Cottrell 气团的形成，进一步限制先导不全位错的运动。沿着超点阵层错发现了有序层错相(ϵ 相和 η 相)，这会阻碍层错增厚，进而抑制微孪晶形成。因此，层错交割形成后存在位错反应、Cottrell 气团的拖曳作用和有序层错相转变多种因素造成的协同强化作用限制进一步的蠕变变形。

C04-P25

Hf 和 Ta 对镍基粉末高温合金蠕变变形行为的影响

张浩鹏^{1,2}、贾建^{1,2}、刘建涛^{1,2}、张义文^{*1,2}

1. 钢铁研究总院有限公司
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

为了满足先进航空发动机的使用要求，复合添加 Hf 和 Ta 已成为新型镍基粉末高温合金成分设计的趋势之一。但是，对于 Hf 和 Ta 复合添加对合金蠕变变形行为的影响，相关研究较少且作用机理不明确。本文通过向 FGH4096 合金中单独添加 Hf、单独添加 Ta 以及复合添加 Hf 和 Ta，研究 Hf 和 Ta 对不同温度和应力条件下蠕变变形行为的影响。通过蠕变曲线分析，断口形貌观察，蠕变断裂后和在稳态蠕变阶段中断后的组织表征，以及利用球差校正扫描透射电子显微镜(AC-STEM)对溶质原子偏聚与微区相变展开研究，讨论 Hf 和 Ta 对蠕变性能的影响以及影响合金蠕变变形行为的机理。结果表明，Hf 和 Ta 均能延长合金的蠕变断裂时间、降低最小蠕变速率、提高合金的承温能力和持久强度，且 Hf 和 Ta 复合添加比单独添加的效果更好，Hf 还能显著消除合金的缺口敏感性，因此，Hf 和 Ta 复合添加可以使合金的蠕变性能得到全面的提升。本文为新型镍基粉末高温合金成分设计中复合添加适量的 Hf 和 Ta 提供了实验依据和理论支撑。

C04-P26

镍钴基变形高温合金高温长时蠕变机制及 γ' 相演化行为研究盖永超^{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 师昌绪先进材料创新中心
2. 大连理工大学 材料科学与工程学院

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，本工作通过对一种新型镍钴基变形高温合金的高温长时蠕变机制进行研究，指导合金通过优化设计获得优异的长期稳定性。分别开展 800°C/250MPa、850°C/200MPa 以及 850°C/100MPa 等条件下的蠕变实验及 γ' 相在长期蠕变过程中的演化行为研究。结果表明，800°C/250MPa 下合金的变形机制主要以位错滑移为主，850°C/200MPa 条件下合金内部出现了大量的微孪晶，850°C/100MPa 下由于应力条件低于形成微孪晶所需的临界分切应力，合金的变形机制以位错滑移/攀移为主，同时伴有少量的层错。在 850°C/100MPa 下合金的蠕变寿命最高，可达到 1400h。在 850°C/100MPa 下蠕变 500h 后，合金中晶界宽度明显增加，且部分晶界处出现了粗化的 γ' 相，这主要是由于晶界发生迁移导致。随着蠕变时间达到 1390h，晶界迁移距离显著增加，晶界处出现 γ' 相贫化区和条状粗化的 γ' 相。晶粒内部的 γ' 相出现“筏化”现象，通过 EBSD 与 SEM 相结合的实验方法验证了 γ' 相的“筏化”方向不仅与加载方向有关，还与晶粒的晶体取向密切相关。

C04-P27

新型变形高温合金多道次变形对组织均匀性的影响机制

王成宇*^{1,2}、谢兴飞^{1,2}、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

新型镍基变形高温合金在热变形阶段面临热变形抗力大、热加工区间窄和微观组织控制难度大等问题，易出现组织不均匀现象。合金中的不均匀组织会损害材料的机械性能。本文主要研究了新型镍基变形高温合金中 γ' 相的沉淀状态、晶粒组织、储存能和晶粒取向在多道次变形过程中的演变规律，探讨不均匀组织的形成机理及控制措施。研究表明，随着多道次变形的持续进行，一次 γ' 相的尺寸逐渐增大，其所占比例也随之增大，一次 γ' 相周围的细小二次 γ' 相逐渐消失；晶粒组织逐渐均匀，未再结晶大晶粒逐渐细化，再结晶晶粒逐渐长大并伴随着孪晶的生成，材料内部的储存能逐渐降低，残余的未再结晶大晶粒多为硬取向。本研究结果为提高新型变形高温合金的组织均匀性提供了理论基础，从而为该类 γ - γ' 型镍基高温合金的制备提供共性问题的解决方案。

C04-P28

时效温度对 Monel K500 合金微观组织与性能的影响研究

刘震*、胥国华、王天一、黄瑾、孙佳路

北京钢研高纳科技股份有限公司

本文采用扫描、透射、EBSD、XRD 方法表征时效温度对 Monel K500 合金微观组织与性能的影响。时效温度分别为 400°C、500°C、600°C、700°C、800°C，结果表明，随着时效温度的增加，抗拉和屈服强度先升高后降低，在 600 °C 达到峰值；而冲击韧性呈现相反的趋势，冲击韧性随时效温度的增加先降低后增加，600 °C 时为最低值。 γ' 相颗粒的尺寸随着时效温度的增加而增大，这是因为时效温度升高，促进了原子的扩散和析出相的粗化，其长大过程符合 Ostwald 熟化公式。随着时效温度增加，MC 相碳化物颗粒的尺寸和面积分数变化较小，说明时效温度对 MC 相碳化物的影响较小。通过强化公式计算，发现位错强化和析出强化对 Monel K500 合金强度占最重要的比重。

C04-P29

固溶温度对 GH4780 合金组织与性能的影响冯天豪^{1,3}、谢兴飞^{*1,2}、朱礼龙³、苏醒^{1,2}、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

GH4780 合金是一种新型镍基变形高温合金，主要用于制备航空发动机用热端部件。优化固溶工艺是提升变形高温合金性能的有效手段。本文研究了固溶温度（1020℃~1080℃）对 GH4780 合金组织与性能的影响规律，观察分析了 GH4780 合金晶粒尺寸及 γ' 相分布特点，对比研究了固溶温度对 GH4780 合金拉伸和持久性能的影响规律。研究表明，GH4780 合金的平均晶粒尺寸随着固溶温度升高，先维持不变后显著增大，固溶温度范围为 1020℃~1050℃时，平均晶粒尺寸基本维持在约 20 μm ；当固溶温度升高到 1080℃，平均晶粒尺寸增长到约为 280 μm 。另外，固溶温度对 γ' 相的影响作用不明显。另外，随着固溶温度升高，合金的室温抗拉强度降低，760℃拉伸的抗拉强度和延伸率均逐步提高，760℃/460MPa 持久寿命逐步提高。

C04-P30**GH4151 热变形开裂机理研究**刘志凌^{1,2,3}、吕少敏^{*1,2,3}、谢兴飞^{1,2,3}、侯为学^{2,3}、温晓灿^{2,3}、曲敬龙^{1,2,3}、杜金辉^{1,2,3}、张少明²

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

GH4151 合金是一种耐 800℃的新型难变形镍基高温合金，具有优异的高温性能，其合金化程度高，在热变形过程中容易出现开裂现象。本文对 GH4151 合金热变形组织及开裂组织进行表征，对比分析两种组织，研究热变形裂纹的形成及扩展机理。结果表明：GH4151 合金热变形组织为均匀等轴晶，有大量一次 γ' 相且总体呈现均匀分布，存在一些粗大的 MC 型碳化物，未观察到有害相存在。而 GH4151 合金开裂组织未观察到明显晶界，且裂纹周围存在 γ' 相贫化区，晶内二次 γ' 相尺寸从无裂纹区到近裂纹区逐渐减小，在裂纹周围观察到大量 Laves 相，说明该区域在开裂前存在过 Laves 相，Laves 相与基体的变形协调能力低，从而诱发开裂。该区域在热变形过程产生了严重绝热升温，低熔点的有害相析出，是造成开裂的根本原因。沿裂纹扩展路径上有大量氧化物、碳化物分布，绝热温升导致这些硬质相析出，在变形过程中产生应力集中，导致裂纹倾向增加，从而引导裂纹扩展。本文分析了 GH4151 合金热变形过程的裂纹萌生与扩展机理，为其热变形工艺优化提供理论参考。

C04-P31**GH4151 合金热变形行为及再结晶机制研究**任帅^{1,2,3}、吕少敏^{*1,2,3}、谢兴飞^{1,2,3}、侯为学^{2,3}、温晓灿^{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
2. 钢铁研究总院 高温材料研究所
3. 四川钢研高纳锻造有限责任公司

为了系统研究变形高温合金制备过程中组织特征与变形行为的关联及影响规律，而合金制备过程的初始状为铸态合金，因此本文通过 Gleeble 热模拟试验机对未均匀化铸态 GH4151 合金在变形温度为 1000~1200℃及应变速率 0.01~1s⁻¹ 的条件下进行压缩实验，分析变形温度、应变速率及组织特性对热变形的影响。结果表明：铸态 GH4151 合金的应力-应变曲线具有典型的动态再结晶特征。由应力-应变曲线得出铸态 GH4151 合金热变形激活能为 $Q=1241.44\text{KJ/mol}$ 。分析热加工图以及不同热加工区间的微观组织演

变确定最优热加工区为 1130°C~1160°C、 $10^{-2}\text{s}^{-1}\sim 10^{-1.5}\text{s}^{-1}$ ；观察微观组织发现，铸态合金组织中晶内的剪切变形带是裂纹萌生的主要位置，裂纹会沿晶界扩展最终导致合金开裂。铸态组织中偏析相经热变形后产生的细小弥散颗粒会通过颗粒诱导再结晶形核机制形成再结晶的核心，连续动态再结晶和不连续动态再结晶在低温下同时发生。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。变形速率对热塑性和再结晶程度的影响相对较弱，在较高的变形温度下，增大变形速率会导致促进更多位错堆积，加速再结晶的发生，从而减小再结晶的晶粒尺寸。

C04-P32

B 元素对镍基单晶合金小角度晶界组织演变及蠕变性能的影响

李远^{*1,2}、赵云松¹、卢广先^{1,3}、王尧^{1,4}、张剑¹

1. 中国航发航材院

2. 清华大学航空发动机研究院

3. 西北工业大学清洁高效透平动力装备全国重点实验室

4. 东北大学材料与工程学院

在镍基单晶叶片精密铸造过程中，小角度晶界缺陷往往不可避免，这一缺陷显著降低合金力学性能，导致叶片合格率降低。微量元素 B 可以提高合金晶界强度，但会降低合金熔点，因此高代次合金中 B 含量成为提高合金小角度晶界容限的关键问题。本工作在含 12° 小角度晶界的无 B 元素第三代镍基单晶合金中添加 150ppm 的 B 元素，探究了 B 对长期时效后晶界组织和蠕变性能的影响及微观机理，发现 B 元素的添加导致 1100°C/1000h 长期时效后晶界胞状 γ' 相显著减少。B 能够提高合金 1120°C/137MPa 蠕变寿命，使蠕变断裂模式由沿晶断裂转变为沿晶-穿晶混合断裂，表明 B 增加晶界结合强度。原子探针结果表明，B 元素偏聚于晶界，计算结果显示添加 150ppm 的 B 元素导致合金晶界吉布斯自由能显著降低，从而提高晶界组织稳定性。第一性原理计算结果表明，B 在晶界处的偏聚使晶界处原子电荷得到补充，低电荷密度区域消失，B 在这些区域的偏聚有利于提高晶界结合强度。本研究揭示了 B 对合金小角度晶界强度提升的微观机理，为提升高代次镍基单晶合金小角度晶界容限提供实验基础。

C04-P33

一种含 Ru 单晶高温合金拉伸性能研究

刘震^{1,3}、王志成^{*1}、曾强^{1,2}、张华³、秦海龙¹、谢锦丽¹

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司

2. 河北钢研德凯科技有限公司

3. 烟台大学精准材料高等研究院

本文采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)等研究了一种含 Ru 高代次单晶高温合金组织及其室温至 1200°C 的拉伸性能，对拉伸断口及其附近组织进行了分析。结果表明，该合金经过完全热处理后的 γ' 相呈规则的立方状，平均尺寸在 300nm 左右，含量在 65% 左右。室温和 760 拉伸断口可见明显解理台阶和河流花样，呈典型的类解理断裂特征。850°C 拉伸断口同时出现河流花样和细小韧窝，呈类解理与韧窝混合断裂特征。980°C、1100°C 和 1200°C 下断口出现大量的韧窝，呈典型的韧性断裂特征。室温拉伸时，开动滑移系较少，呈单系滑移状态，温度升高到 760°C 和 980°C 时，更多滑移系被激活产生交滑移。随着拉伸温度的升高，断口附近显微孔洞数量不断增多，更多的滑移系被激活，从室温到高温表现为由单一方向的位错结构向复杂交互位错结构转变。

C04-P34

基于小角中子散射的镍基高温合金 γ' 和 γ'' 相析出演化行为原位研究

李亚微¹、谢光^{*1}、柯于斌²、张健¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 散裂中子源科学中心

γ' 和 γ'' 相是镍基高温合金中的重要强化相,其通常采用标准热处理即固溶+双级时效工艺获得。由于缺乏有效的研究手段,对热处理过程中强化相的析出演化规律目前尚无清晰的认识。本文以广泛使用的GH4169合金为对象,采用时间分辨的小角中子散射(SANS)技术原位研究了固溶时效热处理中 γ' 和 γ'' 相的析出演化行为,并借助透射电镜(TEM)和原子探针(APT)对非原位样品进行验证分析。结果表明,合金强化相主要在时效过程中析出,包括球状 γ' 相和 γ' 与 γ'' 复合相(以 $\gamma''/\gamma'/\gamma''$ 三明治结构为主)。其中,球状 γ' 相数量随时效进行不断增多;复合相在一级时效中大量形成,但在二级时效中数量变化不大。此外,2类析出相尺寸均在一级时效时逐渐增大,在二级时效时几乎不变。在整个时效过程中,球状 γ' 相与基体相界面逐渐尖锐,而复合相越来越扁,其界面成分波动始终显著。由此可知, γ' 和 γ'' 相的析出演化行为受控于界面元素扩散机制。以上工作可丰富镍基高温合金相变理论,并为合金热处理工艺优化提供参考。

C04-P35

加工变形量对 TZM 合金组织和力学性能的影响

武婉婷、滕剑威*

烟台大学

我们对冷压成型的 TZM 合金坯料在 1400°C 的温度下分别进行 85% 和 75% 的锻造变形处理。随后对得到的 85% 和 70% 不同变形量棒材在 25°C、1100°C、1200°C、1300°C 和 1400°C 进行拉伸性能测试。利用 SEM、XRD、EDS、EBSD、TEM 等表征方式,对 TZM 合金微观组织和力学性能进行表征。在室温下 85% 合金拉伸强度明显低于 70% 合金强度。在高温条件下,尤其是温度高于 1200°C,85% 合金强度依然低于 70% 合金。除此之外,不同变形量合金微观组织中均发现了少量的孔洞,85% 变形量合金中发现异常长大的晶粒同时也有部分再结晶小晶粒的出现,而在 70% 合金中晶粒相对比较均匀,没有异常尺寸晶粒出现。这可能与合金中位错密度相关,在 85% 大变形过程中由于变形量过大,造成合金中位错交互作用,造成位错湮灭,导致位错密度的降低,造成抗拉强度下降。同时,由于位错密度降低,合金变形过程中造成晶粒异常长大,也会造成 85% 大变形合金抗拉强度的降低。

C04-P36

热处理温度对激光选区熔化 GH4169 合金抗富氧燃烧性能的影响

周家轩¹、张少华*²、张健²、田艳中¹

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

基于自主研制的金属材料富氧燃烧实验设备,结合光学显微镜、扫描电子显微镜等手段,研究了热处理温度对激光选区熔化制备的 GH4169 合金的组织 and 抗富氧燃烧性能的影响。结果表明,沉积态样品呈现典型的鱼鳞形貌,且在枝晶间存在体积分数约为 9.8% 的岛链状 Laves 相,差式扫描量热分析表明 Laves 相熔化温度为 1175°C,远远低于 GH4169 合金液相线温度 1350°C。合金经 980°C 热处理后,Laves 相体积分数降至 2.1%,并在晶界和晶内析出大量针状和短棒状的 δ -Ni₃Nb 相,而 1080°C 热处理样品中 Laves 相和 δ -Ni₃Nb 相几乎全部溶解,析出相为少量颗粒状 Laves 相和块状碳化物相。在氧气浓度为 99.5%、压力为 3.5~6 MPa 的条件下,测试了不同热处理样品的抗富氧燃烧性能,结果表明沉积态样品阻燃性能最差,1080°C 热处理样品抗富氧燃烧性能最优,而 980°C 热处理样品性能居中。燃烧区组织分析表明,沉积态样品在靠近过渡区位置存在大量的孔洞,而 980°C 和 1080°C 热处理样品则仅存在少量的孔洞。文献研究表明,高温合金燃烧前沿温度高达 2500°C,而过渡区温度也超过了 1350°C,此温度远超过了 Laves 相熔化温度,因此沉积态中的孔洞形貌应是 Laves 相熔化后的形貌。更重要的是,Laves 相富含易燃的 Nb、Mo、Cr 等元素,这些元素的优先燃烧会显著恶合金阻燃性能,从而造成沉积态样品阻燃性能最差。其次,晶界作为氧元素快速扩散通道,也是易发生燃烧的位置。而 980°C 样品中晶界处大量富含 Nb 的 δ 相是造成其阻燃

性能较 1080°C 样品低的原因。因此, 消除低熔点相和控制晶界析出相类型是提升材料抗富氧燃烧性能的关键。

C04-P37

合金化元素对一种定向凝固高温合金组织和性能影响

余力*

北京航空材料研究院

航空发动机的高压涡轮工作叶片在应力极其复杂的高温条件下工作, 这就要求叶片材料具有良好的中、高温综合性能。实践表明合金工程化应用过程中, 母合金冶炼工艺、合金成分控制等因素会造成合金高温持久寿命大幅波动。研究了合金化元素对一种定向凝固高温合金组织和力学性能的影响。试验结果表明: 在合金成分范围内, 合金化元素 W、Mo、Al、Ti 含量变化, 可明显改变合金的组织形貌, 适量的合金化元素含量会改变铸态合金组织中共晶相的数量、共晶相的形貌, 热处理后枝晶干 γ , 的形状得到明显改善, 提高了合金 980°C/235MPa、1040°C/137MPa 的高温持久寿命。

C04-P38

含涂层 DZ125 合金涂层/基体界面在近服役条件下的再结晶晶粒演变

翟梦园、郑为为、冯强*

北京科技大学

为提高航空发动机涡轮叶片的耐腐蚀性和使用寿命, 叶片表面通常会涂覆涂层。对实际服役的 DZ125 高压涡轮叶片显微组织的研究发现, 涂层与基体合金界面处存在再结晶层。该层晶粒的引入会降低叶片的承载面积进而影响服役性能, 威胁发动机服役安全。已有的研究表明, 涂层制备过程中引入的残余应力对于该再结晶层的形成有重要作用, 但对其形成及在服役过程中的演化行为仍缺乏系统性研究。本文以含涂层的 DZ125 合金为研究对象, 通过 SEM、EBSD 以及 EPMA 等表征技术系统研究涂层制备各工序对合金基体再结晶层形成的影响作用, 并进一步明确涂层/合金基体界面显微组织在 1000°C 热暴露后的演化行为。结果表明: 仅吹砂未沉积涂层时, 经扩散热处理后合金基体表面再结晶层的厚度低于带涂层合金。经过 1000°C 热暴露后两种状态合金再结晶晶粒的生长趋势相同, 涂层试样再结晶晶粒的生长速度和再结晶层深度均高于单吹砂试样。同时由于 Cr 元素的扩散作用, 涂层试样再结晶晶粒晶界处形成吉布斯自由能最小的 Cr₂₃C₆ 相, Al 元素的扩散会导致再结晶晶粒演变为 γ 单相区, 和涂层一起完全失效。因此涂层制备过程中由吹砂引入的应力以及涂覆涂层后涂层与基体合金之间的元素扩散是再结晶晶粒形成和长大的驱动力。本研究阐明了含涂层 DZ125 合金涂层与基体合金界面再结晶层的形成原因以及演化机制, 为实际服役的 DZ125 合金叶片翻修提供指导。

C04-P39

GH4738 合金累计变形道次下的组织演化研究

黄彬、钱希、张麦仓*

北京科技大学

摘要: 优质 GH4738 合金是我国用于航空发动机涡轮盘材料的高温合金, 是一种典型的 γ' 相沉淀强化型镍基高温合金, 其性能的优异关乎着我国的航空航天事业的发展。因此, 研究该合金在热变形过程中显微组织变化和再结晶情况, 可以优化变形条件从而改善合金的显微组织及性能, 对 GH4738 合金的生产和使用具有重要的理论意义和使用价值。

在 MTS 低周疲劳试验机上对 GH4738 试样进行双道次热压缩实验, 首先以 10°C/s 的升温速率加热到设定变形温度 (1040°C、1060°C), 随后保温 15min 使试样热透, 在恒变速率 (0.01s⁻¹、0.1s⁻¹) 条件下进行第一道次变形 (工程应变量为 7%、10%、15%), 卸载、停留一段时间进行保温 (时间 10、30s), 经

过保温间歇后,按相同的变形温度和应变速率进行第二道次压缩(工程变形量 7%、15%),热压缩完成后立即水淬以保留变形态组织。变形量组合一共是 7%+7%、7%+15%、10%+7%、10%+15%、15%+15%。结合 OM、EBSD、TEM 分析组织演化与再结晶情况。

对不同的热变形条件下显微组织研究发现:(1)变形量逐渐变大,晶粒尺寸逐渐减小,提高组织均匀性,内部的异常大尺寸晶粒也减少了,因为随着变形量增大,合金内部受压变大使得晶粒破碎程度加深,可再结晶晶粒增多。(2)应变速率提高,合金晶粒变得均匀细小。应变速率的提高可以促进亚动态再结晶进行并且降低再结晶晶粒尺寸的差异 (3)保温时间越长,合金内部再结晶程度越高,合金晶粒更加均匀细小,且道次间隔保温时间延长,合金组织也更加均匀,但再结晶分数并没有发生急剧的变化;(4)变形温度升高,合金组织越均匀,再结晶分数增加。这是因为在 1040 °C时钉扎晶界的 γ' 相接近回溶,降低了对晶界的钉扎作用对再结晶的阻碍作用;

设计亚固溶试验,为探究大尺寸晶粒是异常长大还是初始晶粒组织遗传。结果表明,亚固溶试验倾向于变形量增大使得内部储存能增大,更容易发生再结晶,形成大晶粒被小晶粒包围现象,且未变形大尺寸晶粒尺寸也减小。TEM 和 EBSD 表征结果显示,大尺寸晶粒再结晶机制以晶界弓弯方式形核的非连续动态再结晶机制占据绝对的主导地位,以亚晶旋转方式形核的连续动态再结晶机制仅为辅助机制。

C04-P40

锻态 GH4151 合金的组织演化及晶粒尺寸的研究

刘慧鑫、张亦弛、张麦仓*

北京科技大学

GH4151 合金由于其析出强化相含量高达 60%,具备良好的高温高强、耐腐蚀性能,在 800 °C下能持续稳定服役。因其出色的综合性能表现, GH4151 合金被视为涡轮盘用高温合金的关键备选材料之一。

本文通过热模拟压缩机对 GH4151 高温合金进行了单道次热压实验和恒温保温实验,系统研究了 GH4151 高温合金在不同工艺参数下的动态再结晶行为、静态再结晶行为和微观组织演变规律。实验结果表明:单道次热压缩试验后,随着变形温度的升高、应变量的增加以及变形速率的提高,合金的动态再结晶程度会逐渐增加。然而,应变速率的提升却会导致再结晶晶粒尺寸的减小。同时通过观察发现, γ' 相回溶温度在 1130 °C到 1150 °C之间;在高温状态时,动态再结晶对应变速率更敏感。

通过分析不同条件下保温实验样品的微观组织,发现在保温过程中,随着应变速率的减小、温度的升高以及初始晶粒尺寸的增大,平均晶界角度只发生略微减小,平均晶粒尺寸显著增大。温度对静态再结晶过程影响显著,在低温条件时,为了降低系统能量,容易产生孪晶。

通过分析 OM 图,发现在等温的实验条件下, GH4151 平均晶粒尺寸会随着保温温度升高、保温时间延长及初始晶粒尺寸的增大而增大,但是晶粒尺寸增大速度会逐渐减慢,且温度越高对晶粒尺寸增大效果影响越明显。

除此之外,统计各条件下的平均晶粒尺寸,并优化晶粒尺寸预测模型,建立起了三个初始晶粒度下晶粒尺寸预测模型

C04-P41

GH4151 合金的亚动态再结晶动力学模型

马丹蕊、张艳云、张麦仓*

北京科技大学

GH4151 合金是典型的难变形镍基高温合金,强化相 γ' 含量接近 60%,使其在 800°C及以上稳定服役,成为航空发动机涡轮盘材料的重要选项。GH4151 合金的复杂成分虽然赋予了其出色的高温性能,但也带来了一系列加工上的挑战。由于元素偏析现象显著,导致 GH4151 合金初熔点下降,热加工的温度范围受限,同时伴随着较大的热加工抗力和易于开裂的倾向。此外,该合金对热处理过程中的温度变化极为敏感,增加了热加工的难度。

对于大型锻件,常采用多道次热变形的方法进行材料加工,利用多道次热加工过程中发生的再结晶现象对微观结构进行调控,提高合金塑性变形能力及综合性能。目前,对 GH4151 合金的开坯锻造、组织均匀化控制、组织与性能的关联性研究方面已取得一定进展,但对双道次热变形行为的研究仍较少。

本文采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 GH4151 合金进行双道次热压缩实验,研究了合金在不同初始晶粒尺寸(23-244 μm)、变形温度(1110-1170 $^{\circ}\text{C}$)、应变速率(0.01-1s $^{-1}$)和道次保温时间(0.5-10s)条件下合金的亚动态再结晶动力学,利用 Avrami 方程构建了该合金的亚动态再结晶模型。结果表明:初始晶粒尺寸减小、变形温度升高、应变速率减小、道次间隔时间延长,均可降低合金的整体真实应力,促进亚动态再结晶的进行,提高再结晶体积分数;将建立的亚动态再结晶模型的计算值与实验值进行了对比分析,表明该模型具有较高精确度,能够较为准确的预测和表征该合金的亚动态再结晶行为。

C04-P42

增材制造镍钴基高温合金电子束焊接接头的微观组织及力学性能演变

周海晶^{*1,2}、谢锦丽^{1,2}、蔡世平¹、于鸿垚^{1,2}、毕中南^{1,2}

1. 钢铁研究总院

2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

新型镍钴基高温合金是在商业合金 U720Li 基础上提高 Co、Ti、Nb 等元素含量,使其具备更高的承温能力,从而成为新一代高性能航空发动机涡轮盘材料。增材制造(3D 打印)是一种新兴的快速制造技术,能够实现复杂结构件的高精度、近净成形制造。该技术大幅提高了材料利用率以及小批量产品的设计灵活性,为高端制造业的发展带来了新的机遇。然而,3D 打印最大一次性成型尺寸取决于打印空间大小,尺寸局限相对于传统制造较大,需要通过焊接等技术获得更大尺寸的结构件。熔焊是一种已实现商业化的连接技术,具有良好的应用前景,且已有报道表明电子束焊接能够应用于增材制造镍基高温合金。但是,焊接过程中极快的冷却速度及陡峭的温度梯度导致焊缝及热影响区内微观组织、内应力以及微区力学性能产生较大变化,最终导致焊接接头宏观力学性能的劣化。因此,需要系统分析焊接接头区域微观组织及力学性能的分布规律,精准定位影响接头力学性能的关键区域及薄弱环节。

本研究利用原位扫描电镜系统,结合数字图像相关法以及显微硬度等技术,定量分析了电子束焊接接头区域微观组织及力学性能的分布。研究发现,焊缝区组织为包含枝晶组织的柱状晶, γ' 相尺寸较小。在热影响区,晶粒转变为等轴晶且尺寸降低,该区域能够观察到粗大 γ' 相,且含量随与焊缝中心距离增加而提高。母材区域为等轴晶, γ' 相的尺寸及含量保持稳定。焊接接头区域微观组织分布导致焊缝至母材各微区的力学性能发生显著变化。焊缝区域细小的 γ' 相导致该区域显微硬度显著高于母材区域。与显微硬度相反,焊缝区及母材区的杨氏模量分别为 216GPa 和 251GPa;热影响区的力学性能介于两者之间。晶粒细化、强化析出以及内应力降低均能够提高微区力学性能。

本研究提供了一种新的微区力学性能分析方法,并以此分析了增材制造镍钴基高温合金电子束焊接接头区域的组织-力学性能分布,为焊后热处理工艺制定提供理论依据及数据支撑。

C04-P43

980 $^{\circ}\text{C}$ 长期时效对[011]取向 DD6 单晶高温合金 组织与拉伸性能的影响

胡立杰*、熊继春、张剑、李嘉荣

中国航发北京航空材料研究院

第二代单晶高温合金 DD6 已被选用制备商用航空发动机涡轮叶片,因此 DD6 合金在长时服役过程中组织和性能的稳定性至关重要。尽管国内外在单晶高温合金长期时效方面做了许多研究工作,但其研究主要集中在[001]取向的合金,由于单晶合金具有各向异性,[011]取向在特定性能或应用上具有特殊挑战性,[011]取向单晶高温合金长期时效研究工作的报道很少。本研究旨在弥补这一知识空白,深入探究[011]取向 DD6 合金在 980 $^{\circ}\text{C}$ 长期时效条件下组织与拉伸性能的演变规律,为优化其在极端服役条件下的可靠性和寿命评估提供理论依据。结果表明,时效过程中,时效时间从 2000h 延长至 10000h,DD6 合金 γ' 相立方方程

度逐步降低、尺寸增大，并发展为筏排结构直至部分区域出现解筏现象，同时产生针状析出相。随着长期时效时间从 2000h 增加至 10000h，[011]取向的 DD6 单晶高温合金抗拉强度和屈服强度缓慢降低，分别降低了 13.8%与 22.5%，伸长率和断面收缩率无明显变化。长期时效后 γ' 相的筏化与针状析出相的产生是合金拉伸性能降低的主要原因。本研究不仅揭示了[011]取向 DD6 合金长期时效的微观组织演变规律，而且明确了其对拉伸性能的具体影响，为设计更高性能、长寿命的单晶高温合金提供了重要参考，对提升航空发动机涡轮叶片的服役安全性和可靠性具有重要指导作用。

C04-P44

粗粉回收再循环对选区激光熔化 Ni-Co 基高温合金显微组织及力学性能的影响研究

邓涵之^{1,2}、张鹏^{1,2}、孙广宝²、刘国浩²、于鸿垚^{*1,2}、于月光³

1. 钢铁研究总院有限公司 高温合金新材料北京市重点实验室
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司
3. 中国钢研科技集团有限公司

随着航空航天领域对选区激光熔化成形大尺寸构件的需求增大，粉末用量大幅度增加。粉末回收再循环技术能够大幅缩减制粉周期，是低成本高温合金增材制造发展的重要方向之一。本文采用 Ni-Co 基高温合金棒材，通过雾化工艺制备粉末，将筛分后大于 53 μm 的粗粉，重熔为合金棒材再制粉，从粉末性能，增材成形性及力学性能等方面，研究了粗粉回收再循环及循环次数对激光选区熔化 Ni-Co 基高温合金成形显微组织及力学性能的影响。结果表明：相同成形工艺参数下，循环次数对激光选区熔化 Ni-Co 基高温合金的显微组织影响较小，试样平均晶粒度在 5-6 级，晶界析出相为 γ' ，对晶界起强化作用，且一次 γ' 相尺寸均在 30-50 μm 。室温及高温拉伸试验结果显示，粗粉再循环成形试验抗拉和屈服强度与未循环合金基本一致；高温塑性水平较未循环试样降低，800 $^{\circ}\text{C}$ 粗粉再循环成形延伸率降低了 2%左右，本研究结果为激光选区熔化高温合金用低成本粉末使用提供参考。

C04-P45

980 $^{\circ}\text{C}$ 长期时效对 DD6 单晶高温合金微观组织的影响研究

熊继春*、胡立杰、喻健、张剑、骆宇时、李嘉荣

中国航发北京航空材料研究院

在单晶高温合金高温服役过程中，良好的组织稳定性是非常重要的。长期时效作为一种典型的试验方法，能够在一定程度上模拟合金服役过程中的温度状态，分析单晶高温合金的组织性能变化。尽管国内外在单晶高温合金长期时效方面做了许多研究工作，但对于时效时间达到 15000h 的研究工作的报道很少，未检索到国内相关报道。本论文采用 DD6 单晶高温合金在 980 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行长期时效处理，研究[001]取向 DD6 单晶高温合金在 15000h 长期时效过程的组织演变规律。研究发现，随着时效时间的延长，枝晶干 γ' 相逐渐长大，发生粗化连接，进而形成层片状组织，枝晶干首先出现析出相，析出相的形态有针状、短棒状和方块状。枝晶臂 γ' 相首先出现筏排化，进而发生长大，最后出现拓扑反转。枝晶间 γ' 相时效 6000h 仍能保持立方化形态，随着时效时间延长，逐渐发生粗化，时效 15000h 后形成筏排组织。上述针状、短棒状和方块状析出相均为 M_6C 碳化物， M_6C 富含 W、Mo、Re 等难熔元素，其中，方块状析出相为初生 M_6C 碳化物，针状、短棒状析出相为次生 M_6C 碳化物。本研究揭示了 DD6 单晶高温合金长期时效过程的组织演变规律及析出相的形成机制，对于 DD6 单晶高温合金在商用航空发动机上的应用具有重要意义。

C04-P46

高 Ti/Al 新型沉淀强化 Monel 合金的高温氧化行为研究

王国伟、牛连涛、张博宁、郑磊*

北京科技大学

提高 Monel K 500 耐蚀合金的 Ti/Al 成分比可增加 γ' 相对位错运动的阻碍, 从而满足发动机关键热端部件的高强度需求。然而, Ti/Al 成分如何影响新型沉淀强化 Monel 合金的高温氧化动力学行为与氧化机制, 目前仍缺乏系统理解。本研究结合实验表征和理论分析, 研究 Monel K 500 与高 Ti/Al 新型沉淀硬化合金的高温氧化动力学行为。结果发现, 新型高 Ti/Al 合金具备良好的抗氧化性能, 在 600 °C 为完全抗氧化级别, 800 °C 为抗氧化级别, 可满足服役环境需求。两种合金表面均形成四层结构的氧化膜, 具有相似的氧化物形成机制。然而合金内部 Ti 含量更高时, 内氧化层中存在更多的疏松 TiO 氧化物, 不利于阻碍氧化过程中离子的扩散, 导致氧化速率加快。本研究为高强高耐蚀 γ' 沉淀硬化合金的研制和可靠服役提供理论依据。

C04-P47

GH4169 合金盘锻件热加工过程冶金缺陷演化行为研究

杨若男^{1,2}、谢明昭^{1,3}、谢锦丽^{1,3}、毕中南^{1,3}、高旻钦²、秦海龙^{*1,3}

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司
2. 中国石油大学(北京)
3. 钢铁研究总院 高温合金新材料北京市重点实验室

摘要: 随着航空航天技术的进步, 航空发动机涡轮盘内部冶金缺陷难检出性成为制约涡轮盘服役稳定性的重要因素。因此, 探究冶金缺陷在热加工过程中的演变规律, 为实际生产过程中控制盘锻件内部缺陷尺寸及预测缺陷转移位置提供重要指导。本研究分别在 GH4169 合金棒材不同位置预置了白斑和黑斑两种典型冶金缺陷, 结合超声波探伤和切割取样观察等表征方法, 研究了锻造过程中典型冶金缺陷的演化行为, 包括典型冶金缺陷的化学成分、几何形貌以及分布特性的变化规律。在此基础上, 提出了典型冶金缺陷几何特征参数的等效表征方法, 并探索了典型冶金缺陷对 GH4169 合金力学行为的影响。

C04-P48

合金成分和多道次小变形对 GH4738 合金再结晶行为影响的研究

王姝琚¹、孟范超^{*1}、曲敬龙²、王广磊²

1. 烟台大学精准材料高等研究院
2. 北京钢研高纳科技股份有限公司

GH4738 合金的性能与晶粒尺寸及其均匀性密切相关, 而成分对 GH4738 合金晶粒尺寸和组织均匀性具有重要影响。因此, 本文探究 GH4738 合金成分含量的不同对晶粒尺寸及组织均匀性的影响。利用 GLEEBLE 热压缩实验, 通过微观组织表征, 分析了合金成分的不同对于晶粒尺寸、碳化物、析出相及热压缩性能的影响。此外, 锻件在实际制备过程中往往历经多道次小变形过程, 因此, 有必要研究 GH4738 合金小应变量和多道次变形对再结晶晶粒的影响。研究结果表明: 1、随着 Si、Zr、Fe 等元素含量的减少, C、Mn 等元素含量的增加, 晶粒尺寸变小, 碳化物以及析出相的尺寸明显变大。2、GH4738 合金在变形温度在 900-940 °C 时, 未观察到再结晶晶粒; 在变形温度为 980 °C 时, 在应变量为 20%-30% 之间时开始发生动态再结晶; 在变形温度大于等于 1020 °C 时, 在应变量为 10%-15% 之间开始发生动态再结晶。3、两道次小变形的合金, 在温度低于 1020 °C 时, 未观察到动态再结晶; 在温度高于或等于 1020 °C 时, 在应变量 5%+5%-5%+10% 之间发生动态再结晶。4、对于两道次变形, 首道次分配的应变量越大, 所得到的晶粒组织越细小。

C04-P49

时效处理对 GH5630A 合金耐磨损性能的影响

张亚玮*、沈宇、鞠泉、胥国华、张继
北京钢研高纳科技股份有限公司

GH5630A 合金是含有约 15% (vol.) 碳化物的 CoCrW 基耐磨变形合金, 锻造/轧制后通常采用高温固溶处理以稳定组织、消除热加工残余应力, 固溶处理后合金中的碳化物部分溶解或发生晶型转变, 碳化物强化作用有所减弱, 合金的塑性和冲击韧性有所提高。一般, 高温固溶后增加时效处理, 可以使高温合金中固溶的溶质原子重新组合、二次析出细小的沉淀相, 提高硬度和强度。本文根据热力学相图, 选择有利于二次碳化物析出的温度, 对锻造+高温固溶的 GH5630A 合金进行时效处理, 之后与 GH5605 合金配副进行环块滑动磨损性能试验。结果表明, 时效处理使该合金 10^7 次相对滑动磨损的失重量减少了 70%, 提高耐磨损性能的作用显著。然而, 时效处理并未明显提高该合金的强度和初始硬度, 观察磨损试验后摩擦副表面和横截面的组织发现, 时效处理使 GH5630A 合金的磨损机制由固溶态的黏着磨损转变为少量黏着磨损+长时疲劳磨损。表征磨损表面层相组成的 EBSD 图以及 TEM 观察表明, 时效处理增加了该合金表面层基体的应变诱发马氏体相变倾向, 在摩擦磨损载荷作用下基体中产生大量 HCP 结构相是提高该钴基耐磨合金抗黏着磨损能力主要的机制。

C04-P50

Comparative Study on Deformation Behavior of Nickel-Based Superalloys Manufactured by L-PBF under Different Heat Treatment Regimes and Preheating Temperatures

Yixuan Chen, Zirong Zhai*, Yao Ou, Weihao Wang, Hai Chang, Rui Yang

ShanghaiTech University

In this work, an experiment study on the effect of different heat treatments on the microstructural evolution and mechanical properties, in two sets of IN738LC parts under 200 °C and 700 °C preheating conditions fabricated by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), has been performed. The comparisons of the morphology and size of gamma prime, GND density, crystal orientation evolution, grain size and mechanical properties were made, among three kinds of heat treatments: standard heat treatment (SHT, 1120 °C 2h air cooling, 843 °C 24h air cooling), Hot isostatic pressing(HIP) and Hot isostatic pressing + standard heat treatment (HIP+SHT). Due to the lower thermal gradient and cooling rate in 700 °C preheating building process, strong <001> texture was formed. After high-temperature and long-term heat treatment, the texture and anisotropy introduced during the (L-PBF) process are preserved in both 200 °C and 700 °C preheating specimens, which also lead to distinct mechanical properties to some extent. 700 °C HIP+SHT specimen, which was obtained along the building direction, had the most superior tensile properties, whose ultimate tensile strength could reach up to 1548 MPa and the elongation was 15.7%. This study provided an understanding of synergic strengthening effects on deformation behaviors.

C04-P52

带热障涂层定向凝固镍基高温合金热机械疲劳行为的研究

展鑫、王栋*、张健

中国科学院金属研究所

工业燃气轮机叶片表面常涂覆热障涂层 (TBC) 以降低叶片表面温度和延长叶片寿命。叶片在服役期间通常经历温度和载荷的同时变化, 即叶片实际服役工况更接近于热机械疲劳 (TMF)。区别于传统蠕变和等温疲劳导致的无涂层叶片裂纹萌生、扩展甚至断裂失效, TBC 过早开裂或剥落会加速基体合金的局部氧化甚至熔解, 增加叶片的失效风险。由于 TBC 失效的形式和机理具有多样性和复杂性, 使得目前针对 TBC 的失效机理尚存分歧, 诱导 TBC 剥落的因素尚未完全确定。本文通过带 TBC 管状试样系列 TMF 实验模拟了叶片服役工况, 研究了热-力耦合条件下的 TBC 裂纹萌生及失效机制, 为叶片稳定安全服役奠定基础。研究表明, 当 TBC/合金体系在温度范围为 300 °C-1000 °C, 机械应变范围 (Demech) 为 0.45%~0.65%条件下进行同相位 (IP) 疲劳测试时, TC 内部的裂纹萌生、扩展和合并导致了陶瓷层 (TC) 剥落, 仅有少量裂纹扩展进入粘结层 (BC); 同时增加最高测试温度和 Demech 至 1100 °C 和 0.65%后, 在 IP 测试条件下, TBC 裂纹行为发生明显改变。大量裂纹贯穿 TC 和 BC, 部分裂纹逐渐向基体内部扩展。反相位 (OP) 加载条件

明显缩短了 TBC 失效周次并加重了 TBC 的损伤程度, TC 与 BC 以及 BC 与基体之间均发生明显分离。热生长氧化物 (TGO) 与 TBC 失效行为密切相关。当 TGO 达到一定厚度时, 明显缩短了 TBC 失效周次并影响了 TBC 裂纹行为, 裂纹在 TGO 与 BC 界面扩展, 导致 TC 整体与 BC 发生分离。

C04-P53

机器学习和三目标优化算法辅助调控高温合金 γ/γ' 微观组织

刘沛^{*1,2,3,4}、黄海友^{3,4}、文成⁵、Turab Lookman^{3,6}、宿彦京^{3,4}、刘航宇^{1,2}、秦海龙^{1,2}、谢锦丽^{1,2}

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司
2. 高温合金新材料北京市重点实验室
3. 北京材料基因工程高精尖创新中心
4. 腐蚀与防护中心, 新材料技术研究院
5. 机械工程学院, 广东海洋大学
6. AiMaterials Research LLC, Santa Fe

凭借着高效的拟合和预测能力, 数据驱动的机器学习技术已经广泛用于高温合金新材料的发现与改进。在材料数据量有限的客观条件下, 算法在很大程度上决定了机器学习模型的收敛和寻优能力, 进而影响到高性能新材料发现的效率。

在多个材料数据量都很少的情况下, 多目标优化算法结合机器学习模型预测可以对高温合金的多种性能同时进行优化提升, 经过少量的实验即可发现综合性能优良的新合金。目前主流的双目标优化算法有筛选法、概率提升以及基于帕累托前沿的连续改进算法等等, 至于同时优化更多材料性能的高效算法, 目前鲜有报道。为此, 有必要发展一种寻优效率更高的通用型可拓展式多目标主动学习技术用于指导高温合金的多目标性能优化。本研究中, 多目标性能优化的焦点问题选择了单晶高温合金多个关键组织参量的调控。在学术界和工程界中, 具有较高的 γ' 相体积分数、较小的 γ' 相尺寸和较为立方的 γ' 相形貌的单晶高温合金其蠕变寿命往往较长, AM1、CMSX-4、CMSX-10 和 TMS-238 等合金都具备此类组织, 而如何对此三个关键组织参量同时进行调控是单晶高温合金问世 40 年以来一直悬而未决的问题。

基于多维高斯分布, 我们提出了一种多目标主动学习技术 (ED-MCI), 结合测试函数和机器学习模型, 与现有的两种多目标优化方法进行了寻优效率的比较, 结果表明 ED-MCI 算法迭代效率最高。进一步, 我们将其用于高温合金 γ' 相体积分数、尺寸和形貌的同时优化, 经过 4 轮实验, 合成了 3 种具有高 γ' 相体积分数 ($> 54\%$)、小 γ' 相尺寸 ($< 480 \text{ nm}$) 和 γ' 相形貌立方的多组元高温合金新材料 (已授权发明专利)。此外, 对该方法的协同优化能力、全局寻优能力和捕捉高温合金耐火元素强化机制等方面进行了有效性的论证。该方法在数学推导阶段不受材料特定问题的具体束缚, 原则上可用于其他材料领域的多目标优化问题, 为材料工作者从算法开发的角度解决材料问题提供了新的思路。

C04-P54

第二取向对 MCrAlY 涂层 高温氧化行为与组织演化的影响

于明涵^{1,2}、刘静^{1,2}、王莉^{*1}、董加胜¹、任玉平³、李洪晓³、姜肃猛¹、楼琅洪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
3. 东北大学, 材料科学与工程学院

随着航空发动机涡轮叶片服役温度的不断提升, 镍基单晶高温合金的高温氧化性能遭受挑战。当温度高于 1000°C 时, 合金氧化增重成倍增加, 因此叶片表面普遍涂覆防护涂层, MCrAlY 涂层具有优异的抗高温氧化、抗热疲劳性能等优点被广泛应用于高温防护领域。其中 NiAl 相作为 MCrAlY 涂层的主要成分, 在高温下会逐渐退化为高温合金基体相, 因此决定着涂层的有效寿命。目前, 已被证实, 单晶合金的第二取向会影响合金的拉伸性能、蠕变性能以及疲劳性能等, 然而关于 NiAl 相的退化转变与镍基单晶高温合金基体第二取向之间是否存在一定的关系尚不清楚, 第二取向对涂层扩散区的影响机理也鲜有报道。

本文以一种第三代镍基单晶高温合金 DD33 为研究对象, 在三种不同第二取向([100]、[110]、[210])基体表面涂覆 MCrAlY 涂层, 采用 XRD, SEM, EPMA, EBSD 等手段研究 1000°C 涂层氧化行为以及组织演化规律。结果表明, 在 1000°C 下, 氧化质量增益均遵循对数影响规律, 且氧化增重趋势一致: 第二取向 [110] > 第二取向 [210] > 第二取向 [100]。随着氧化时间增加, MCrAlY 涂层的损耗速度不同, [100] 取向较其余取向的涂层损耗(NiAl 相损耗)速率更快。另外氧化后形成的扩散区组织以及 TCP 相数目与生长位置也因第二取向的不同而产生差异。这主要是由于第二取向影响 MCrAlY 涂层中 Ni、Al 元素的双向扩散, 从而影响涂层高温氧化行为与涂层组织的退化。

C04-P55

Effects of Post-processing on Microstructure and Mechanical Properties of LPBF-Processed GH4099

Ning Zhang*

sichuandaxue

The GH4099 Superalloy, a nickel-based material, is widely deployed in aerospace and power industries owing to its exceptional high-temperature strength and thermal stability. However, defects inherent to laser powder bed fusion (LPBF) and resultant mechanical anisotropy significantly constrain its broader application. This study delves into the impact of subsequent heat treatment on the microstructure of GH4099 Superalloy produced via SLM, alongside defect mitigation through Hot Isostatic Pressing (HIP) treatment. It explores the origins of mechanical property anisotropy and strategies for its elimination, aiming to achieve isotropic samples. The as-deposited sample microstructure exhibits primarily equiaxed grains in the horizontal direction (perpendicular to the deposition direction) and columnar grains in the vertical direction (parallel to the deposition direction). Furthermore, defect density varies between the horizontal and vertical directions of deposition. Following HIP treatment, grain recrystallization occurs, leading to a substantial increase in twin boundaries. The morphology of grains in the vertical direction transitions from columnar to equiaxed, and the vertical direction defect density reduced from 0.1% to 0.01%, no longer exhibiting directional dependence. Isocentization of columnar crystals due to recrystallization in the HIP process and reduction of defect density and elimination of directionality in both horizontal and vertical directions. High-temperature tensile testing of the final samples at 900 °C reveals a significant suppression in mechanical property anisotropy. This research offers promising avenues for eliminating material anisotropy and enhancing the overall mechanical properties of the alloy.

C04-P56

定向能量沉积技术制备 316L-GH3230 梯度材料

王菱*

四川大学

金属功能梯度材料(Functionally graded material, FGM)的特点是成分随结构位置变化, 具有独特的机械和物理性能。GH3230 具有卓越的强度、抗冷热疲劳性能, 但其焊接性能较差; 而 316L 奥氏体不锈钢焊接性能较好。因此 316L-GH3230 梯度材料能提升以 GH3230 为主体的功能部件的焊接性。基于激光增材制造技术可以实时调控沉积材料成分的优势, 本项工作采用定向能量沉积技术(Directed energy deposition, DED)在不同打印工艺下制备了逐渐过渡的 316L-GH3230 高温合金功能梯度材料。研究了合金组织和性能随合金成分变化的规律。研究表明, 逐渐过渡的 316L-GH3230 合金元素扩散充分, 界面成分突变较小。研究了扫描速度与拉伸试验温度对力学性能的影响。研究表明, 扫描速度对力学性能影响较小, 抗拉强度变化为 19.5MPa, 屈服强度变化为 20MPa, 断后伸长率变化为 4.25%。随拉伸试验温度升高, 抗拉强度与屈服强度下降, 断后伸长率呈现增加的趋势。

C04-P57

Re 含量和凝固工艺参数对镍基高温合金凝固与固溶元素偏析的影响

崔婷婷、张军*、杨敏、郭敏、杨文超、苏海军、黄太文、刘林

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

一、研究背景

随着单晶高温合金的发展，合金化程度以及难熔/稀贵元素含量不断提高，特别是难熔元素 Re 的加入显著提高了合金的高温力学性能。然而，Re 含量升高，会加重合金微观偏析，提高热处理难度，影响组织稳定性及力学性能。通过调整定向凝固工艺参数在一定程度上可以改善合金的微观偏析。但目前就 Re 元素、凝固工艺参数综合作用下凝固组织元素偏析行为方面还缺乏深入系统的研究，定向凝固参数、组织与后续固溶成分均匀化之间的相关性研究还有待开展。

二、研究内容

本文以含 Re 高代次镍基单晶高温合金为研究对象，建立耦合 CALPHAD 的 Ni-Al-Re 三元凝固相场模型和固溶相场模型，开展 Ni-9 wt.%Al-X wt.%Re (X=3、4、5、6)合金在定向凝固过程和固溶过程中组织演化的集成模拟，分析定向凝固和固溶过程中元素分布行为，通过正交试验，模拟研究 Re 元素 (3-6 wt.%)、抽拉速率 (50-200 $\mu\text{m/s}$) 以及温度梯度 (100-200 K/cm) 等对凝固元素偏析的影响规律和机理，以及对后续固溶过程元素均匀化过程的影响规律，力图为先进镍基单晶高温合金的研发提供理论依据。

三、主要结果

(1) 采用基于 CALPHAD 模式的 Pandat 热力学软件，计算了 Ni-Al-Re 三元合金体系的液固相自由能和相平衡成分等热力学参数以及原子迁移率等动力学参数，通过多项式拟合得到了液固相平衡成分与 Al、Re 元素含量和温度的函数关系，并得到与合金成分有关的固相线温度函数。

(2) 利用凝固相场模型，对合金定向凝固过程进行模拟，研究了 Re 元素含量、抽拉速率及温度梯度对微观偏析的影响。正交试验相关性分析表明：微观偏析中 Al 元素偏析比的最大影响因素是 Re 元素含量，Re 元素偏析比的最大影响因素是抽拉速率。Re 含量增大，Al 元素的溶质分配系数降低，逐渐偏离 1，液相分配程度相对增加，而 Al 元素作为富集于枝晶间的元素，偏析程度增大。对于 Re 元素，抽拉速率的提高会抵消掉平衡分配系数的影响，使 Re 元素微观偏析程度提高。

(3) 利用固溶相场模型，研究了 Re 元素、抽拉速率以及温度梯度对固溶元素均匀化程度的影响。综合各因素进行正交试验分析发现，Al 元素残余偏析比主要受抽拉速率和 Re 含量影响，抽拉速率增大，Re 元素含量减小，Al 元素残余偏析比增大，偏析程度降低；Re 元素残余偏析比主要受抽拉速率影响，抽拉速率增大，Re 元素残余偏析比降低，偏析程度降低；温度梯度与 Al 元素残余偏析和 Re 元素残余偏析之间无显著关系。

C04-P58

二代镍基单晶高温合金高温低应力蠕变各向异性的研究

吴凯、吴小香*

苏州大学

镍基单晶高温合金是涡轮叶片的主要材料。由于叶片多采用薄壁空心结构，且服役过程中单晶叶片易受到多轴载荷应力，表现出明显的各向异性。虽然高温低应力条件下的各向异性相较于中低温高应力条件下不显著，高温蠕变条件下不同取向和不同应变对镍基高温合金组织和性能影响机制尚不清楚。基于这一背景，本文以第二代镍基单晶高温合金 DD6 为研究对象，利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、高分辨透射电镜等表征手段，研究了 [001] 和 [011] 取向合金在 1130°C/100 MPa 下不同应变区区的微观组织演变。研究表明，[001] 取向合金的蠕变寿命远高于 [011] 取向，这是由于微观结构及变形机制的差异导致的，[001] 试样在蠕变过程中形成的 N 型筏化组织以及致密的位错网对位错运动的具有明显的阻碍效果。并且 [001]

取向试样在低应变条件下存在超点阵层错切割 γ' 相，而在[011]取向试样中并未发现。同时，观察相同取向标距内和标距外不同应变区区的显微结构，发现存在着筏化组织以及位错类型演化的差异。这些工作有助于揭示镍基高温合金在高温下的变形组织演变规律和失效机理，为新型镍基高温合金的优化设计 and 应用提供理论支持。

C04-P59

DZ411 重型燃气轮机叶片取向偏离对拉伸性能的影响

杨文龙、郭敏*、杨敏、苏海军、张军、刘林

西北工业大学

重燃定向叶片采用定向凝固技术制备，消除了垂直于应力轴方向的横向晶界，极大地提高了叶片的高温蠕变性能，然而，目前实际叶片定向凝固制备过程中，由于叶片构造的复杂性，特别是大尺寸复杂结构重燃叶片，[001]晶体取向偏离缺陷几乎不可避免。本文通过对不同取向偏离角度的双晶试样进行 650 ℃ 高温拉伸实验，研究了合金的拉伸性能与取向偏离角度之间的关系。对于纵向拉伸，取向偏离角度的增大会大幅降低合金的屈服强度与抗拉强度，当晶体取向偏离[001]方向 32° 时，即使晶界与应力轴夹角较小，合金的屈服强度与也会迅速下降。当晶界与应力轴夹角逐渐增大时，合金的屈服强度与抗拉强度也会大幅下降。通过 SEM 分析断口形貌，当合金的屈服强度下降时，断口表面趋向平整光洁，断裂方式趋向于解理断裂。变形过程滑移带不能穿过晶界，随变形过程进行在晶界附近发生应力累积，引发晶界处开裂。

C04-P60

IN939 高温合金弱激冷条件下凝固组织研究

刘鼎元、张军*、郭敏、杨敏、黄太文、杨文超、苏海军

西北工业大学

高温合金复杂薄壁铸件是先进航空发动机的核心部件，结构复杂化、薄壁轻量化和尺寸精确化是其发展趋势，新型热控凝固方法具有“低温浇注、高温充型、顺序凝固”特征，有望实现复杂薄壁铸件组织均细化和缺陷的协同控制。本文将热控凝固工艺中模壳温度处于合金固液相线之间的状态称为弱激冷条件，弱激冷程度为浇注温度与模壳温度差值。本研究在 30~90℃弱激冷条件下浇注 IN939 高温合金，研究不同弱激冷程度与凝固组织的关系。结果表明，不同弱激冷条件下合金的缩松均降低至 0.1% 以下，且晶粒组织均为等轴晶。模壳温度升高使平均晶粒尺寸增大而枝晶间距减小，平均晶粒尺寸为 1920~3470 μm 且与弱激冷程度近似成线性关系。弱激冷程度的减弱减少了合金析出相的含量并改善了偏析情况。

C04-P61

单晶高温合金高温蠕变过程中 TCP 相的形成及弱化机制新发现

孙晶霞*、刘金来、李金国

中国科学院金属研究所

采用一种含 5%Re（质量分数）的镍基单晶高温合金作为研究对象，采用 SEM、TEM 和 EBSD 的表征方法研究了该合金在 1140℃/137MPa 条件下 TCP 相的析出情况。结果表明，在蠕变早期阶段，枝晶间区域固有的小角度晶界会促进 TCP 相形核；随着蠕变的进行，枝晶干区域的 TCP 相逐渐析出，大量分布于枝晶干区域。EBSD 和 TEM 的分析结果表明该合金在蠕变断裂之后产生了大量晶界，其中大部分是亚晶界；TCP 相也可以在亚晶界上形核。更重要的是，在断口颈缩区内观察到了由大尺寸 TCP 相诱发的再结晶现象，该发现给出了 TCP 相损害高温力学性能的直接证据。本文的研究结果为 TCP 相在镍基单晶高温合金中的形成和弱化机制提供了新的见解。

仅发表论文

C04-PO01

基于纳米复合的高性能镍基单晶高温合金激光外延生长机制

郭嘉琛*、丁畅、王钰登、孙勇、周俊祥、封波、王甲富

空军工程大学

虽然激光熔覆外延生长高温合金的相关力学性能和热稳定性往往不如传统加工金属,但有研究表明在其中掺入和分散纳米颗粒会一定程度增强其相关性能。但是在现阶段的激光增材制造过程中,由于技术限制这仍然很难做到。在这里,我们表明纳米颗粒增强的镍基高温合金可以通过纳米复合粉末的激光熔覆外延生长技术来进行。在相关试的所有激光外延生长的镍基高温合金中,激光沉积纳米复合材料都具有高硬度、高杨氏模量和优异的极限拉伸强度性能,其中与传统激光增材相比,显微硬度提高 10%,杨氏模量增加 32%,极限拉伸强度提高 7%。性能的提高归功于高密度且良好分散的纳米颗粒、纳米颗粒和基体之间的强界面结合、较细的晶粒尺寸和位错调节增强机制。

C04-PO02

Effect of Secondary Orientation on the Microstructures of Thin-Walled Castings of a 3rd Generation Nickel-Based Single-Crystal SuperalloyHanyuan Xu¹,Taiwen Huang¹,Chao Zhang¹,Cheng Ai²,Jun Zhang¹,Lin Liu^{*1,3}

1. Northwestern Polytechnical University

2. Engineering Research Center of Transportation Materials, School of Materials Science and Engineering,
Chang'an University

3. Suzhou HTA Materials Technology Co., Ltd.

With the increasing turbine inlet temperature of the aero-engine, the requirement of temperature capacity of turbine blades is more stringent. A variety of complex cooling structures have been designed, among which the micro cooling represented by lamilloy is the latest development. At present, the thickness of Lamilloy turbine blade is 0.5 mm or less. The reason for performance degradation caused by thin-walled structure remains controversial and the understanding of dendrite growth behavior under space constraints is insufficient. In this study, 0.9 mm wall thickness samples of a novel 3rd generation nickel-based single-crystal superalloy were cast by high-rate directional solidification. The growth and evolution of dendrites in plate-shaped specimens with different secondary deviation angles were investigated. The variation of dendrite spacing and the arrangement of dendrites at different secondary deviation angles were studied. It was found that the primary dendrite arm spacing in the thin-walled region decreased with an increase in the secondary deviation angle, but there was no significant change in the average size of γ' precipitates or element segregation.

C04-PO03

Study on the Uniformity Criterion of Homogenization for W-Mo Superalloys

Xulong Guo*

Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd

In order to establish the homogenization criteria for superalloys containing W and Mo, this paper took GH5188 (containing W), GH4141 (containing Mo), and GH3128 (containing W and Mo) alloys as examples for research and analysis. Firstly, the microstructure and elemental segregation of the alloy after heat treatment with different homogenization regimes were observed using a desktop scanning electron microscope (SEM) and a field emission electron probe microanalyser. Secondly, the theoretical and actual segregation coefficients of the alloy

elements after heat treatment with different homogenization regimes were calculated using the Jmatpro thermodynamic software and electron probe. The difference between theoretical and actual segregation coefficients was used to determine whether the elements were completely diffused, and the homogenization criteria for the alloy was obtained. Finally, the plasticity and physical properties of alloys after different homogenization treatments were measured using a Gleeble3800 thermomechanical simulator, a Qness Q30A+fully automatic high-precision microhardness tester, and an electronic high-temperature creep tester. The accuracy of the homogenization criterion was verified by comparing the numerical changes under different conditions. Results indicated that for alloys containing only W, W achieved complete diffusion when $K' \leq 5\%$; for alloys containing only Mo, Mo achieved complete diffusion when $K' \leq 10\%$; and for alloys containing both W and Mo, the elements achieved complete diffusion when $K' \leq 10\%$.

C04-PO04

Effect of remelting refining process on the microstructure and properties of K465 superalloy

Kehan Wu*, Xiuping Ma, Fengxiang Zhang, Guohong Ma, Bin Liu, Huaxia Zhang, Hua Jiang, Yu Meng, Xike Liu
BAIMTEC MATERIAL CO., LTD.

The effect of different refining temperature and time on the mechanical properties of K465 superalloy during the remelting process were studied. It was found that the high-temperature endurance performance was significantly improved with the prolongation of refining time, while the room temperature tensile properties did not show significant changes. However, there is little change in the mechanical properties within the selected refining temperature range. Moreover, the macroscopic and microscopic structures of K465 superalloy, including the size of grain, γ' precipitates and the area of dendrite, eutectic, carbide and γ' precipitates, were analyzed by optical microscope (OM) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. It was also found that the refining time affects the microstructure of alloys, which significantly impacted mechanical properties.

C04-PO05

硅基离型剂对硅基陶瓷型芯注射成型可充型性的影响研究

王玥*、牛书鑫、李鑫、周婷婷、司远、王珂、赵云松、骆宇时
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

陶瓷型芯是基于熔模铸造方法制备航空发动机空心涡轮叶片的关键部件，主流制备方法为陶瓷注射成型。然而，随着空心涡轮叶片内腔结构的复杂化，陶瓷型芯模具型腔的精细结构和狭窄通道逐渐增多，严重压力损耗和温度损失对陶瓷型芯的充型完整性提出严峻挑战。本研究通过在模具上涂覆二甲基硅油离型剂的方法，有效提高了硅基陶瓷浆料流动距离，保障了陶瓷型芯的充型完整性。借助阿基米德螺旋线陶瓷型芯模具，定量研究了离型剂涂覆量与硅基陶瓷浆料流动距离的对应关系，结果表明离型剂可使不同种类陶瓷浆料的一次注射流动距离提高约 30%。对比分析不同离型剂涂覆量对湿态陶瓷样品表面微观形貌的影响，发现足量离型剂可使陶瓷浆料与模具型腔间的混合润滑转变为液体润滑，降低摩擦力，从而减少陶瓷浆料流动的压力损耗，提高流动距离。本研究揭示了陶瓷注射成型中陶瓷浆料与型腔的界面结合机制，降低了复杂结构陶瓷型芯的制备难度，为下一代航空发动机用的研制提供了技术储备。

C04-PO06

Effect of Solution Heat Treatment on Microstructure and Properties of CoCrMo Alloy

Xinxu Li*, Ang Yu, Li Lei, He Su, Xike Liu, Yu Meng
BEIJING BAIMTEC MATERIAL CO., LTD

The as-cast microstructure of low carbon CoCrMo alloy was studied by means of optical microscope,

scanning electron microscope and tensile tester, and the microstructure and properties after heat treatment for 30min, 60min and 120min at 1150 °C, 1200 °C and 1250 °C were studied. The results show that the element segregation and M23C6 content in the alloy are decreased by solution treatment. The tensile strength and plasticity of the alloy increase first and then decrease with solution temperature and solution time. The element segregation in the alloy is serious, and with the increase of holding temperature and time, the element segregation of Mo decreases. Solid solution heat treatment at 1150 °C and 1200 °C reduces the segregation and carbides decompose and disperse uniformly into the matrix, which improves the strength and plasticity of the alloy. However, at 1250 °C/120min, the growth of grains makes the strength and plasticity of the alloy decrease.

C04-PO07

不同莫来石含量硅基陶瓷型芯的多维高温抗弯强度研究

王珂*、牛书鑫、李鑫、周婷婷、司远、王玥、赵云松、骆宇时

中国航发北京航空材料研究院

陶瓷型芯作为形成航空发动机空心涡轮叶片复杂内腔结构的关键部件,在其制备与服役过程中需经受多种温度与应力的条件,导致陶瓷型芯在后续浇注、热处理过程中存在断芯、漏芯以及再结晶等失效问题,使得叶片完全报废,因此进一步明确服役条件、探索陶瓷型芯在多维温度条件下的性能对航空发动机叶片的生产具有重大意义。本研究在陶瓷型芯浆料中分别加入 0%-12%的莫来石,使用推入式高温抗弯强度试验机,模拟实际浇注曲线,研究了不同莫来石含量的陶瓷型芯在合金浇注过程中关键温度点的强度变化,并同步进行水淬后的扫描电镜以及物相分析。发现当加入莫来石含量低于 9%时,主要作用为抑制烧结,使得型芯高温抗弯强度逐渐降低,但当莫来石含量为 12%时,型芯内部存在较多的异质形核质点,方石英的析出量显著提高,高温抗弯强度较加入 9%莫来石的型芯提高了 27.8%;对于相同莫来石含量的陶瓷型芯,随着合金浇注过程的推进,伴随着 α -方石英晶粒的生成与长大,宏观表现为型芯高温抗弯强度的增加,但增量约为 3.67%。本研究揭示了陶瓷型芯服役过程中的组织形貌以及高温抗弯强度的演变规律,为实现陶瓷型芯在整个服役链强度的调控提供部分数据支撑以及技术储备。

C04-PO08

一种高温合金涡轮盘中脏白斑的特征及其形成机制分析

田强^{1,2}、秦鹤勇^{1,2}、李相材^{*1}、于萍¹、张晓敏¹、杨曙磊³

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司

2. 钢铁研究总院有限公司

3. 北京科技大学

我国燃气轮机发动机关键部件中冶金缺陷的出现概率高,但检出概率低,已成为制约我国高温合金质量可靠性的重要瓶颈。本文介绍了一种高温合金中常见的冶金缺陷,利用超声波探伤设备、金相显微镜、扫描电镜等设备分析了缺陷区域其关键组织的超声波特征、组织形貌和成分分布,发现该根据缺陷区域且富集大量 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 等第二相,且整体呈现片状、局部呈条链状和,判断该缺陷为高温合金中的脏白斑。根据该缺陷的关键特征,结合真空自耗重熔工艺特点,借助数值仿真技术分析阐明了脏白斑形成机制,并提出了切实可行的无损检出办法。研究成果可对该类冶金缺陷在工程实践中的有效控制提供理论指导。(建议补充脏白斑的形貌特点)

研究对象和研究方法:

试验样品取自经过真空两联熔铸、反复镦拔开坯、热模锻成型、标准热处理这一铸锻工艺路线的高温合金盘锻件。该盘锻件在超声波无损探过程中发现一处单显缺陷。通过二重取样法对盘件进行解剖,在缺陷区域取样后进行机械磨抛,利用金相显微镜(OM)观察了缺陷的宏观形貌,将试样腐蚀后观察缺陷区域晶粒组织特征。为进一步分析缺陷处微观组织和第二相特征,利用场发射电子扫描电镜(SEM)和场发射电子探针(EPMA)对缺陷区域微观组织及第二相类型进行分析,明确了缺陷处元素宏观分布情况和第二相类

型。

C04-PO09

Effect of Heat Treatment on GH 4169 Microstructure and Properties of Hot Rolled Sheet

Ang Yu,Xinxu Li*,Su He,Li Lei,Xike Liu,Yu Meng

BEIJING BAIMTEC MATERIAL CO., LTD

The effects of different heat treatment schemes on grain size, microstructure evolution and properties of GH4169 alloy were studied in this paper. The changes of matrix microstructure, grain size, recrystallization ratio and orientation difference were observed by means of light microscope and EBSD. The effects of three heat treatment schemes on mechanical properties of the alloy were compared, which provided a theoretical reference for the heat treatment conditions of hot-rolled plates. The results show that different heat treatment conditions have significant effects on the microstructure and material properties. After heat treatment of scheme A (910 °C/1min, 10min, 30min, 90min), the matrix structure of GH4169 alloy hot-rolled sheet has no obvious change, and there are a lot of strips; After heat treatment in scheme B (980 °C/1min, 10min, 30min, 90min), the band structure gradually disappeared, and the grain structure became uniform; After heat treatment in Scheme C (1050 °C/1min, 10min, 30min, 90min), the matrix grain structure is more uniform and annealing twins appear. The strength of the material also decreases with the increase of heat treatment temperature, and the plasticity increases with the increase of heat treatment temperature.

C04-PO10

带冠定向柱晶涡轮叶片显微疏松研究

许剑伟*

中国航发北京航空材料研究院

带冠定向柱晶涡轮叶片（简称“叶片”）是航空发动机关键零件，然而，由于该叶片的特殊结构，铸造过程中极易产生显微疏松，显微疏松的存在极易成为裂纹疲劳源，极大降低了航空发动机服役安全性。

本研究通过优化叶片铸造工艺参数，方法为通过解剖不同的引晶方式、补缩方式及热等静压后的铸件，对比分析显微疏松含量，找到一种最佳的工艺组合，达到减少显微疏松并提高叶片的可铸性。本研究提出了一种全新的叶片引晶和补缩方式组合工艺。结果表明通过优化后的引晶和补缩方式可以大幅度减少显微疏松，并提高叶片的可铸性，叶片的显微疏松面积百分比由 2.0%以上下降到 0.6%以下，叶片的合格率得到了大幅度提升。

本研究的成果也可推广到类似结构的叶片，提高航空发动机服役的安全性。

C04-PO11

元素 V 在 K417G 合金中的作用研究

信昕*

中国科学院金属研究所

摘要：K417G 合金一种沉淀强化型 Ni-Cr-Co 基等轴铸造高温合金，合金中除了加入 Mo、Al、Ti 等强化元素外，还加入了 0.06-0.09 % 的 V 元素。元素 V 的原子半径大于元素 Ni，被认为对镍基合金具有固溶强化作用，但其在 K417G 合金中的作用机理尚不明确。本文研究了元素 V 在 0.016-1.19 %成分范围内对 K417G 合金铸态组织、性能的影响。结果表明：元素 V 主要偏聚在 MC 碳化物中，少量偏聚于枝晶干上。V 含量的变化对合金的初熔温度和铸态组织影响不明显，但随着 V 含量的增加，900°C拉伸强度、900°C/315MPa 持久寿命显著增加，通过断口剖面分析发现拉伸和持久断裂试样的裂纹都主要在枝晶间和晶界萌生和扩展。进一步研究发现，元素 V 降低了 MC 碳化物中的 Mo 的含量，提高了元素 Mo 在枝晶间

区域的含量，对枝晶间起到固溶强化的作用。

C04-PO12

固溶热处理冷却速率对一种第三代单晶高温合金及其复杂结构涡轮叶片组织与性能的影响

杨万鹏*、李嘉荣、刘世忠、赵金乾、王效光、陈巧

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组织与性能，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固溶热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 种固溶热处理充氩冷却压力，获得了 288.0°C/min、348.0°C/min 和 480.0°C/min 的 3 种固溶冷却速率，完成了合金与叶片热处理；采用光学显微镜与场发射扫描电子显微镜分析叶片叶身与榫头的 γ - γ' 共晶组织与 γ' 相，并分别依据拉伸试验规范（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 种固溶热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；随固溶热处理冷却速率增加，完全热处理态的 γ' 相平均尺寸减小，叶身与榫头 γ' 相均呈现较好的立方化形态；固溶热处理冷却速率对合金 760°C 拉伸性能无明显影响，随固溶热处理冷却速率减小，合金 1100°C/137MPa 持久寿命增加。本研究结果有助于指导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，为第三代单晶高温合金在航空发动机中的工程应用提供技术支持。

C04-PO13

GH4151 合金动态应变时效行为

崔天亮^{1,2}、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
2. 钢铁研究总院有限公司
3. 四川钢研高纳锻造有限责任公司

本文通过 650°C~800°C 高温拉伸实验研究了 GH4151 合金动态应变时效行为，并使用扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）观察分析了合金微观结构演化特点。研究表明，当应变速率为 $5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 时，拉伸曲线表现出 A+B 形锯齿状波形；当应变速率为 $5 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 时，拉伸曲线表现出 B+C 形锯齿状波形；当应变速率为 $5 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 时，随着温度升高，拉伸曲线的锯齿状波形由 A+B 形转变为 B+C 形，且在 650°C~800°C 温度区间内，随着温度升高，拉伸曲线的锯齿密度升高、应力振幅增大。低温下（650°C~750°C），合金元素扩散速率低，位错与溶质相互作用较弱，同时层错微孪晶数量少，阻碍位错运动障碍物较少，导致了低温下（650°C~750°C）合金具有较低的应力降幅。高温下（800°C），由于元素扩散速率增大，热激活位错滑移增多，位错与溶质的相互作用增强，同时层错和微孪晶的数量增多，阻碍位错运动的作用增强，导致了高温下（800°C）应力振幅和锯齿密度的增加。

C04-PO14

GH4151 合金惯性摩擦焊接头组织与力学行为

王中琳^{1,2}、谢兴飞^{*1,2,3}、杨姗洁^{1,2,3}、吕少敏^{1,2,3}、曲敬龙^{1,2,3}、杜金辉^{1,2}、于月光^{1,2}

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

GH4151 合金服役温度达到 800°C，已应用于新一代航空发动机压气机盘和涡轮盘。利用惯性摩擦焊连接技术，可以实现航空发动机有效减重，进而提高发动机功重比/推重比。本文研究了 GH4151 合金惯性摩擦焊接头组织特点和力学行为，采用光学显微镜（OM）、扫描电子显微镜（SEM）、电子背散射衍射技

术 (EBSD)、透射电子显微镜 (TEM) 等方法观察分析焊接接头显微组织, 利用显微硬度计 (HV) 测试了焊接接头的硬度梯度分布规律。研究表明, 焊接接头晶粒组织由原始晶粒、完全动态再结晶晶粒、未完全再结晶的变形晶粒及亚晶粒组成。母材的晶粒组织及析出相未受到焊接过程影响。焊接接头焊缝中心 γ' 相完全回溶, 热处理后形成尺寸细小的三次 γ' 相。焊缝中心的晶粒细化, 尺寸细小的三次 γ' 相大量析出, 因此使其硬度明显高于母材。热影响区中一次 γ' 相不受焊接影响, 二次 γ' 相发生部分回溶, 热处理后析出三次 γ' 相。在晶界强化、位错强化以及析出强化的协同作用下, 热影响区的力学性能显著提高。焊接接头的室温拉伸性能与母材相当。

C04-PO15

型壳温度对耐腐蚀单晶高温合金组织和持久性能的影响

史振学*

北京航空材料研究院

在定向凝固炉中, 分别采用 1510°C 和 1550°C 的型壳温度制备一种耐腐蚀单晶高温合金, 其它工艺参数相同。采用光学显微镜和扫描电镜分析不同型壳温度制备合金的显微组织, 在 980°C/300MPa 条件下测试了合金的持久性能, 研究了型壳温度对合金组织和持久性能的影响。研究表明, 随着型壳温度升高, 合金枝晶间距、共晶体积分数、合金元素的偏析程度降低, γ' 相的尺寸稍有减小。随着型壳温度升高, 合金热处理后显微孔洞和 γ' 相的尺寸减小, γ' 相的立方化程度稍有增加。随着型壳温度升高, 合金的持久寿命增加。

C04-PO16

熔速对大尺寸 GH4706 合金电渣冶金质量影响分析

沈中敏^{*1}、段然¹、王冲^{1,2}、赵光普¹、秦鹤勇¹、田强¹、李连鹏³

1. 北京钢研高纳科技股份有限公司

2. 东北大学

3. 抚顺特殊钢股份有限公司

大尺寸镍基高温合金 GH4706 在电渣重熔过程中容易出现黑斑和热裂, 严重影响钢材性能和生产效率。冶炼过程的数值模拟是可视化电渣重熔 (ESR) 过程中物理场变化的重要研究方法。本文建立了一个与工业试验相匹配的多物理场耦合的二维轴对称模型以研究 $\Phi 1100\text{mm}$ GH4706 钢锭在 ESR 过程中的多尺度现象。结合工业钢锭剖析实验, 分析了不同熔速下大尺寸 GH4706 钢锭的微观结构和元素分布状况, 预测了最有可能出现黑斑缺陷的位置。研究表明, 随着冶炼进行, 金属熔池由 U 形变为 V 形, 最大熔池深度为 0.59 m, 糊状区厚度为 0.32 m。局部凝固时间随熔速增加出现极小值, 对应熔速为 V kg/min, 此时铸锭成分均匀, 微观偏析最少。此外, 靠近水冷底板的底部和侧面是等效应力集中的区域, 随着熔速增加, 钢锭底部的等效应力和轴向应力增加, 熔速高于 V+3 kg/min 时, 钢锭外部可能会出现裂纹。随着熔速增加, 铸锭相同位置下的 Rayleigh 数值增大, 主要集中在铸锭熔池下方 1/2R 处。结合工业钢锭剖析实验对模拟的熔池形态和枝晶间距进行对比验证, 显示出良好的一致性, 验证了模型结果的准确性。

C04-PO17

固溶控冷对 GH4151 合金 γ' 相及拉伸性能的影响

孟新宇^{1,2,3}、吕少敏^{*1,2,3}、谢兴飞^{1,2,3}、侯为学^{2,3}、温晓灿^{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

2. 钢铁研究总院 高温材料研究所

3. 四川钢研高纳锻造有限责任公司

GH4151 镍基高温合金以其稳定的高温力学性能、良好的抗疲劳蠕变性能以及优异的抗腐蚀和抗氧化

性能, 广泛应用于航空发动机关键部件的制造。然而, 采用不同固溶控冷方式对该合金组织性能及塑性变形机制的研究还较为缺乏。本文研究了 GH4151 合金在 3 种不同固溶控冷方式下的微观组织与室温拉伸力学性能变化, 并分析了塑性变形机制。研究表明: GH4151 合金晶内二次 γ' 强化相形貌及尺寸的变化是影响室温拉伸性能的主要因素。当亚固溶冷却速度较慢 (20°C/s) 时会导致晶内二次 γ' 相定向粗化形成八重小立方体状, 尺寸保持在 183nm 左右。而冷却速度较快 (300°C/s) 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保持近球形态, 尺寸约为 $74\text{-}80\text{nm}$, 此时 GH4151 合金的抗拉强度提高到 $1624\text{-}1630\text{MPa}$, 屈服强度提高到 $1206\text{-}1229\text{MPa}$ 。通过固溶冷却速度的调控使抗拉强度提升了 $4.2\text{-}4.6\%$, 屈服强度提升了 $13\text{-}15\%$, 而伸长率均保持在 12% 以上, 实现了强塑性的协调匹配。进一步的变形机理分析表明, 室温拉伸的塑性变形机制主要以位错塞积、切割 γ' 强化相形成反相畴界 (APB) 为主。

C04-PO18

脉冲电流对一种镍基变形高温合金变形能力调控的研究

马金超、郭敬东*

中国科学院金属研究所

室温拉拔作为制备 GH4169D 高温合金焊丝的必要步骤, 对最终焊丝的成型品质具有决定性影响。高温合金作为典型的难变形材料, 组织调控 (变形前强化相的回溶、变形后加工硬化的消除) 成为提升变形能力的关键步骤, 而传统热处理通常需要较高的处理温度和较长的处理时间, 由此带来了能耗高、周期长、效率低等一系列问题。本研究提出了一种脉冲电流快速处理的方法, 该方法能够在低于传统处理温度下以更短的时间实现变形能力的提升。在变形前强化相回溶的研究中, 发现 $950^{\circ}\text{C}\text{-}1\text{h}$ 的传统热处理不仅未将 γ' 强化相溶解, 而且析出了大量对变形不利的 η 相。相比之下, 脉冲电流能够在更低的温度 (900°C) 和更短的时间内 (5min) 实现 γ' 强化相的溶解, 而且有效抑制了 η 相的析出。力学性能表明, 脉冲电流 $900^{\circ}\text{C}\text{-}5\text{min}$ 处理试样的硬度、延伸率以及平均加工硬化率分别达到了 273HV 、 60.5% 、 2267MPa 。与原始态相比, 硬度和平均加工硬化率分别降低了 30.5% 、 21.6% , 延伸率提升了 32.1% , 合金的变形能力得到了明显提升。热力学分析表明, 电自由能的引入降低了 γ' 相溶解与 η 相析出的能垒, 这是其在 900°C 下得以实现 γ' 相快速溶解和抑制 η 相析出的根本原因。在加工硬化消除的研究中, 发现经 $950^{\circ}\text{C}\text{-}1\text{h}$ 传统热处理后, 变形晶粒到再结晶晶粒的转变率仅为 55.97% 。而相同温度下, 脉冲电流仅需 5min 便达到了 95.42% 的转化率, 硬度值也由硬化态的 459HV 降低至 270HV , 基本恢复到了变形前的状态 (268HV)。再结晶动力学计算表明, 脉冲电流使再结晶激活能降低了 27.46kJ/mol , 完全再结晶时间缩短了 15 倍。

C04-PO19

一种 FGH4097 合金环形件的组织与性能研究

田甜*、刘建涛、张义文、刘明东、张明、张强、王艺星、王旻曦

北京钢研高纳科技股份有限公司

FGH4097 合金是先进航空发动机涡轮盘等关键热端部件用结构材料。直接热等静压近净成形是高性价比粉末高温合金盘件的制备工艺, 该工艺制备的盘、轴和环形件等具有组织均匀、性能一致性好的突出优势。采用传统真空熔炼+锻造变形工艺制备的 GH4079 合金环形件, 在热塑性成形过程中存在开坯困难容易开裂等问题, 热处理后的环形件力学性能尚存在 650°C 拉伸屈服强度裕度低、 750°C 复合持久容易断缺口等问题。针对某型发动机高性能盘锻件和环形件的需求, 实验采用等离子旋转电极雾化制粉+热等静压+热处理工艺制备了相同规格 FGH4097 合金环形件, 对比研究分析不同工艺制备的 FGH4097 合金与 GH4079 合金环形件的组织和综合性能, 实验结果表明, FGH4097 合金较 GH4079 合金的晶粒细且均匀, 约为 $6.0\text{-}6.5$ 级 (平均晶粒度为 $39.84\mu\text{m}$); γ' 强化相尺寸均较 GH4079 合金大, 且二次 γ' 相主要呈立方形, 平均尺寸约为 $0.48\mu\text{m}$, 而 GH4079 合金中二次 γ' 相主要呈近球形, 平均尺寸约为 $0.14\mu\text{m}$ 。对比二者性能表明, FGH4097 合金室温拉伸、高温拉伸、高温持久、室温冲击、硬度和低周疲劳等性能均较 GH4079 合金更优异, 尤其

是 FGH4097 合金的室温和 750°C 高温屈服强度分别较 GH4079 合金高 120MPa 和 226MPa, 断后延伸率分别高 8.92% 和 14.58%。对比 750°C 持久断口发现, GH4079 合金可见贯穿式沿晶裂纹和冰糖状花样, 呈脆性断裂, FGH4097 合金断口上韧窝分布较多, 且断口放射区可见小台阶平面存在滑移线, 呈塑性断裂。对比 650°C 低周疲劳断口发现, FGH4097 合金断裂源区面积较大且多呈圆形, 说明合金在裂纹萌生阶段能够有效抵抗其持续扩展, 直到更多裂纹累计才能达到裂纹快速扩展过程, 而 GH4079 合金疲劳断口的断裂源区面积较小, 且其断裂的主要原因为疏松引起的裂纹萌生。为进一步探索 FGH4097 合金室温、高温的高强度和高温塑性机制, 采用 TEM 进行微观组织表征, 在室温拉伸下, 大量基体全位错滑移至 γ/γ' 界面发生分解, 形成不全位错切割 γ' 相, 进而形成被限制在 γ' 相内的超点阵层错, 以及少量的扩展层错。在 750°C 拉伸下, 主要形成超点阵层错、微孪晶和反向畴界进行强化。相较 GH4079 合金可知, FGH4097 合金中二次 γ' 相等效粒径较大, γ 通道的宽度较宽, 位错密度较高且在 γ 通道中的运动更加活跃, 因而显著提高了 FGH4097 合金的高温塑性。

C04-PO20

Study on reducing cracking of large size Marine turbines cast with IN713LC alloy

Zichen Wang*, Yu Meng, Xike Liu, Huaxia Zhang, Hua Jiang, Dongfang Liu, Xinxu Li, Jia Liu

BAIMTEC MATERIAL CO., LTD

Ni-base superalloy IN713LC alloy is used to cast a large-scale integral turbine impeller for marine use. Due to the large cooling temperature gradient and stress concentration, cracks are prone to occur at the tip or root of the turbine blade. In this paper, the microstructure and microstructure of cracks are characterized and analyzed by OM, SEM, etc. At the same time, from the composition design of the master alloy, the target distribution ratio of each strengthening element is adjusted within the composition range of the alloy, and the cracking problem is solved. The results show that the cracking tendency of IN713LC alloy integral impeller is related to the strengthening phase forming elements and solution strengthening elements. After elements adjusted, the mechanical properties show that the tensile strength R_m and yield strength $R_{p0.2}$ are not much different, and the elongation is increased from an average of 6% to more than 10%, which reduces the risk of cracking of the master alloy when casting large-scale impellers.

C04-PO21

固溶冷却介质对一种难变形镍基高温合金微观组织及力学性能的影响

王广磊^{*1}、段然^{1,2}、黄烁^{1,2}、曲敬龙^{1,2}、杜金辉^{1,2}、赵光普^{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

研究了固溶冷却介质（水冷、油冷、空冷）对一种高 γ' 相含量（~55 wt.%）镍基变形高温合金热处理组织及力学性能的影响。合金进行亚固溶（低于 γ' 相全溶温度）热处理时，固溶冷却介质对晶粒尺寸和一次 γ' 相的影响不明显，对二次 γ' 相尺寸产生影响。合金的塑性随着固溶冷却速率的提高而逐渐降低。测试结果表明，固溶空冷有利于合金获得较好的综合力学性能。

C04-PO22

一种镍基沉淀强化高温合金的热变形行为及微观组织演变

王广磊^{*1}、曲敬龙^{1,2}、杜金辉^{1,2}、杨成斌^{1,2}、罗志强^{1,2}、张筱萌^{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

研究了 GH4738 合金在温度为 950-1150 °C、应变速率为 0.001-1/s 条件下的热变形流变应力及微观组

织。合金的流变应力受变形温度和应变速率的明显影响,随变形温度的升高和应变速率的减小而降低。基于流变应力曲线,建立的 Arrhenius 本构方程和热加工图在 $\gamma+\gamma'$ 双相区间和 γ 单相区间表现出差异,热变形激活能在 $\gamma+\gamma'$ 双相区间明显高于 γ 单相区间,在 γ 单相区间具有较高的功率耗散效率。动态再结晶分数随变形温度的增加和应变速率的减小而升高。动态再结晶形核主要以晶界“弓出”为特征的不连续动态再结晶机制为主导,持续亚晶转动诱发的连续动态再结晶机制在 $\gamma+\gamma'$ 双相区间发挥作用。

C04-PO23

GH4738 合金快锻棒材拉伸塑性差异分析

侯为学^{1,2,3}、刘志凌^{1,2,3}、吕少敏^{*1,2,3}、杨成斌^{1,2,3}、谢兴飞^{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
2. 四川钢研高纳锻造有限责任公司
3. 钢铁研究总院 高温材料研究所

GH4738 合金是一种沉淀强化型的镍基变形高温合金,通常采用快锻或快锻加径锻联合开坯,发现快锻开坯后棒材轴向与横向拉伸塑性具有显著差异。针对快锻工艺棒材轴向室温拉伸抗拉强度和屈服强度为 1366MPa 和 1026MPa,断后延伸率和断面收缩率为 24.0%和 41%;棒材横向室温拉伸抗拉强度和屈服强度分别为 1349MPa 和 1039MPa,但是断后延伸率和断面收缩率仅为 14.0%和 15%的问题,本文结合拉伸断口、晶粒组织及析出相进行了分析。结果表明:

(1) 横向试样拉伸断口韧窝平均直径和深度小于轴向试样;

(2) 棒材轴向与横向试样晶粒组织和 γ' 相分布均匀,但是棒材中碳化物呈流线分布。当拉伸应力垂直于碳化物分布流线时,容易在碳化物与基体交界产生孔洞且裂纹扩展方向垂直于拉伸方向;当拉伸应力平行于碳化物分布流线时,裂纹沿拉伸方向扩展,该分布方式有利于延伸率提高;

(3) 棒材快锻开坯需增大变形量以破碎碳化物,避免棒材形成条带影响塑性。

C04-PO24

GH4720Li 合金不同温度的组织及力学行为规律研究

温晓灿^{*1,2}、孟新宇^{1,2,3}、吕少敏^{1,2}、谢兴飞^{1,2}、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
2. 四川钢研高纳锻造有限责任公司
3. 钢铁研究总院高温材料研究所

GH4720Li 合金具有较高的高温强度,良好的抗疲劳、抗蠕变性能以及耐腐蚀和抗氧化性能,主要应用于高性能航空或航天发动机涡轮盘等热端部件。然而,目前缺乏该合金在中高温的拉伸力学性能及变形机理研究。本工作研究了 GH4720Li 合金在室温和 900°C 的拉伸力学性能及变形机制,研究结果表明:随温度由室温升高到 900°C,该合金的拉伸强度由 1500 MPa 急剧降低至 500 MPa,屈服强度由 1100 MPa 急剧降低至 300 MPa,但伸长率由 20%大幅提升为 40%。进一步断裂机制分析表明合金在室温和 900°C 的断裂机制均为韧性断裂模式。高温下强度的急剧降低主要是由于析出相和基体的强化效应同时减弱导致,900°C 时,塑性的提升可能是由于晶界迁移延缓了局部应力集中。

C04-PO25

超超临界汽轮机转子用新型镍基合金晶粒长大行为研究

张冰冰^{1,2}、白亚冠^{*1,2}、聂义宏^{1,2}、张鑫^{1,2}、寇金凤^{1,2}、李红梅^{1,2}

1. 中国第一重型机械股份公司
2. 天津重型装备工程研究有限公司

针对新型镍基合金 C650R 晶粒长大行为进行分析,并构建了合金的晶粒长大模型。利用光学显微镜、

扫描电镜及 EDS 能谱分析, 结果显示: 随着温度的升高, 合金的晶粒尺寸逐渐增加, 当温度高于 1100°C, 晶粒长大明显, 为晶粒长大拐点; 当保温时间小于 10h, 晶粒尺寸变化不明显, 保温时间为 20h, 随着温度的升高, 晶粒尺寸显著增加。通过观察合金微观组织发现, 随着温度的升高和保温时间的增加, C650R 合金晶界和晶内的碳化物数量不断减少, 晶界碳化物的钉扎作用逐渐减弱, 晶界迁移阻力减小, 晶粒开始逐渐长大。利用 Sellars 模型建立了合金的晶粒长大模型, 误差较小, 能很好的描述合金的晶粒长大过程。

C04-PO26

Hf 对一种镍基高温合金显微组织和拉伸性能的影响

李林子^{1,2}、吴云胜^{2,3}、侯介山^{2,3}、周兰章^{*2,3}

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
3. 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室

伴随着超超临界发电机组蒸汽参数的不断提升, 传统的奥氏体耐热钢已经不能满足要求, 必须采用承温能力更高的金属材料。镍基高温合金因其优异的高温力学性能而成为 700°C 超超临界发电机组的候选材料, 包括 Inconel 617、Inconel 740 和 Inconel 625。在这些高温合金中, Inconel 625 合金的主要强化相为亚稳态 γ'' 相。这些强化相在长期服役的过程中会转变成稳定的 δ 相从而影响合金的力学性能。因此, 必须要采取合适的措施来调控 δ 相的沉淀行为。在本研究中, 通过多元素共同作用的方法来控制 δ 相沉淀于晶界。研究表明, 晶界沉淀相与晶界能和晶界扩散速率有关; 另外, 晶界微量元素 (C、B 和 Hf) 的偏析会降低晶界能和晶界扩散速率从而抑制晶界相的沉淀。因此, 在高 Cr 高 Nb 的镍基合金中加入 Hf 元素来降低晶界 δ 相提升合金的力学性能。本研究的目的是研究 Hf 元素对镍基高温合金微观组织和力学性能的影响同时为合金的优化和工程应用提供数据支撑和理论支持。研究表明 Hf 元素加剧了元素偏析, 促进了富 Hf 的 MC 和蜂窝状 Ni₅Hf 沉淀的析出; 固溶合金的主要强化方式是固溶强化和沉淀强化。掺杂 0.5wt%Hf 合金的 700°C 高温屈服强度要高于无 Hf 合金。该合金在 700°C 时效后抑制了晶界 δ 相的析出从而提高了合金的 700°C 瞬时拉伸性能。本研究通过真空感应冶炼技术制备合金, 并在真空重熔时加入 Hf 元素浇铸成不同含量的 Hf 合金试样。铸态样品经过标准热处理 (1200°C, 1h, 水冷) 后, 在 700 °C 热处理炉中进行长期时效处理, 并对合金在不同时效时间的样品进行组织分析和力学性能测试。主要研究内容: (1) Hf 对合金中沉淀相的影响。(2) Hf 对固溶合金拉伸性能的影响。(3) Hf 对合金长期服役过程中 δ 相的影响。

C04-PO27

环件表层残余应力与周向宏观变形关联性研究

叶宁¹、冯彦凯²、杨艳慧^{*2}、刘逸凡²

1. 中航重机股份有限公司
2. 西北工业大学

对开机匣结构复杂, 技术含量高, 是加工难度大的大型精密薄壁件。在其成型及热处理过程中会产生并累积一定的残余应力, 最终残留在成品零件中。对开机匣需要由机匣环件沿径向切开, 生产过程中构件的残余应力会发生重新分布, 残余应力过大或分布不合理就会导致构件变形甚至报废。因此本文以研究了 GH4169 环件在不同应力状态下的周向变形行为。分别通过改变环件内外环面换热系数以预置不同的周向应力状态, 采用盲孔法对环件表面残余应力进行测试, 最后通过环件径向切开实验揭示环件表层残余应力与周向宏观变形关联性。并基于 ABAQUS 软件对环件预置应力过程进行仿真, 并与试验结果对比得到以下结论: 环件周向宏观变形趋势与环件内、外环面周向应力差有关, 若将周向应力差定义为内环面周向应力值-外环面周向应力值, 则周向应力差正值表现为闭口, 负值表现为张口。

C04-PO28

选区激光熔化 IN718 高温合金组织演变及强韧化机理研究

杨培鑫、苏海军*、郭一诺、郭敏、张卓

西北工业大学

IN718 高温合金是航空航天领域高温热结构部件应用最广的材料之一。激光选区熔化技术(SLM)能够解决传统铸造方法制备的合金组织粗大,宏观偏析等问题,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合金不匹配易引起强塑性失衡。本文探究了 SLM IN718 高温合金在热处理过程中组织演变和第二相析出规律,揭示了 CrFeNb 对 SLM IN718 高温合金的作用机制及强化行为。发现热处理改善了合金的微观偏析,提高组织均匀性。CrFeNb 的异质形核明显细化晶粒,且晶粒细化效果与 CrFeNb 含量相关,同时缓解沉积态的应力集中。热处理过程中 CrFeNb 在组织中通过扩散溶解,形成富含 Nb 元素的脆性相,最内出现大量亚晶界,提升强度和硬度。本研究为 IN718 高温合金细化组织及高性能提供实验和论依据。

C04-PO29

一种抗热腐蚀镍基铸造高温合金的长时蠕变组织和性能研究

侯介山、蔡航、郭永安、吴云胜、管现军、周兰章*

中国科学院金属研究所

燃气轮机涡轮叶片主要在稳态工作,大修周期长达 24000- 40000EOH (等效运行小时),保证叶片的长时蠕变性能是材料研发重点之一。为此,针对燃机叶片用抗热腐蚀铸造镍基高温合金 K444 进行了组织和性能的优化,开展了长达 5,000 小时的蠕变试验。相关结果为燃机合金长寿命设计、材料数据支持及发动机寿命评估提供参考。本研究首先对 K444 合金关键成分进行了控制,在保障 K444 合金具有良好的拉伸和持久性能的前提下,抑制大量有害的脆性 Topologically Close-Packed Phases (TCP)相的析出,改善了合金的热稳定性。合金在低载荷条件下长期性能得到显著提高:900°C/5000h 持久强度由 70MPa 提高到约 150MPa。其次,针对长达 5,000 小时的蠕变试验,对温度和应力等蠕变实验参数采用多种算法进行了设计及预测,并通过长时蠕变实验数据进行了验证。同时,对合金长时蠕变曲线特征进行了分析,构建了相应的蠕变本构方程。对比分析了合金在无应力/应力条件下不同时效阶段的显微组织变化规律,对长时蠕变过程中主要强化相、碳化物的变化、位错和强化相的相互作用及元素的再分布特征进行了研究,明确了长时蠕变机理。

C04-PO30

Fe 对超超临界机组汽轮机汽缸用 K325 合金组织和性能的影响

张丰之^{1,2}、吴云胜¹、侯介山¹、管现军¹、周兰章*¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

K325 合金为中国科学院金属研究所基于 IN625 合金研发的铸造镍基高温合金,具有优异的持久强度、抗氧化腐蚀性能、铸造焊接性能等,是我国 650~700°C超超临界机组汽轮机汽缸大型铸件(12~20t 级)的主要候选材料。超超临界机组汽轮机汽缸等大型铸件需要在高温、高压蒸汽条件下超长时服役,对合金材料性能及组织稳定性有着较高的要求。汽缸等铸件尺寸较大且形状复杂,需采用非真空冶炼、砂型铸造,不可避免的会导致 Fe 的引入,Fe 对 K325 合金的具体影响尚不明确,需要系统研究 Fe 对 K325 合金组织及性能的影响机制;Fe 能显著降低成本,在此研究基础上可进一步发展 K325 低成本合金,因此研究 Fe 对 K325 合金组织及性能的影响具有重要的工程意义。

通过差热分析(DTA)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、电子探针(EPMA)等系统研究不同 Fe 含量(0~20wt.%)对 K325 合金凝固组织的影响,及其对 650~700°C下长期时效至 10000h 过程中组织演

化和拉伸性能的影响。结果表明 Fe 降低合金的固液相温度，增大凝固区间，促进枝晶间 Laves 相的析出。**长期时效过程中，Fe 对合金组织稳定性具有双重影响：**一方面，Fe 能够稳定 γ'' 亚稳相，降低 γ'' 相的粗化速率，抑制晶界 δ 相的析出，从而优化合金性能；但另一方面，Fe 促进晶内 σ 相和 μ 相的析出，消耗基体溶质原子，加速细小 γ'' 相的溶解，同时增加 Mo 元素在晶界的偏聚倾向，促进时效过程中晶界 M_6C 和 μ 相的析出，损害合金性能。**Fe 对 700°C 长期时效 K325 合金的室温拉伸性能产生显著影响：**随着 Fe 含量的增加，时效过程中合金的屈服强度整体呈现先增加后降低的变化趋势。较小尺寸的 γ'' 相与小块状 TCP 相的共同作用使得 Fe 含量为 10wt.% 的合金在时效过程中能够保持较高的屈服强度；但 Fe 含量的进一步增加使得时效过程中 TCP 相析出严重，降低合金屈服强度。随着 Fe 含量的增加，长期时效后合金的塑性逐渐降低，TCP 相的析出不利于合金塑性，且显著降低基体强度，增大合金穿晶断裂倾向。综合上述研究结果，**提出 K325 合金 Fe 含量的控制要求：K325 合金中的 Fe 质量分数不应超过 10wt.%。**

C04-PO31

基于抑制滑移带发展的 K447A 等轴合金疲劳机理研究

王越、何金珊*

北京科技大学

等轴镍基高温合金因其优异的中低温力学性能、相对较低的成本和易加工性而被广泛用于制造航空发动机涡轮盘等部件。在服役过程中，由于遭受交变载荷的作用，低周疲劳是该合金主要损伤形式之一。以往研究表明，滑移带的形成和发展造成合金应变局域化，从而引起疲劳裂纹萌生并促使裂纹扩展。而细化晶粒、提高析出相含量和减小析出相尺寸等均可以改善合金的疲劳性能，但针对这些组织抑制滑移带并提高疲劳寿命的作用机理研究仍少见系统报导。

本文提出通过微晶铸造工艺制备 K447A 合金，相比于普通铸造合金，不仅使平均晶粒尺寸细化了约 2 个数量级，而且使 γ' 体积分数提高了约 20%，最终使疲劳寿命提高 150% 以上。进一步通过 ECCI、EBSD 和 TEM 等比较分析微晶铸造合金和普通铸造合金在疲劳过程的变形结构，系统研究了晶粒尺寸和析出相对疲劳的耦合作用机理。结果表明，在疲劳初期，以位错绕过一次和二次 γ' 的波状滑移为主；而由于在微晶铸造合金中更多的 γ' 存在，阻碍位错运动，促使形成规则稳定的位错网结构，进而阻碍位错剪切 γ' ，推迟了滑移带的形成。在疲劳中后期，以平面滑移为主，大量滑移带剪切 γ' ；微晶铸造合金细小的晶粒则可通过限制滑移带长度和内部应变累积，降低 PSB 裂纹萌生概率及扩展速率，进而提高疲劳寿命。本工作作为合金疲劳性能优化提供了新思路，对进一步的合金设计具有重要意义。

C04-PO32

固溶处理对一种 Ni-Cr-W-Co 合金显微组织和力学性能的影响

石照夏*、胥国华、鞠泉、颜晓峰

北京钢研高纳科技股份有限公司

本文以一种冷轧态 Ni-Cr-W-Co 合金板材为研究对象，采用光学显微镜、高分辨场发射扫描电子显微镜，结合室温硬度检验和力学性能测试，开展了不同固溶温度（1040~1160°C）、保温时间（1~8min）和冷却方式（水冷、空冷和炉冷）对合金显微组织和力学性能的影响研究。结果表明：在相同的保温时间和冷却方式条件下，随固溶温度升高，合金晶粒尺寸逐渐增大，强度和硬度降低，塑性显著提高；在相同的固溶温度和保温时间条件下，冷却方式对合金晶粒尺寸影响较小，但对析出相和力学性能具有显著影响；在相同的固溶温度和冷却方式条件下，随保温时间延长，合金强度和硬度显著降低，塑性显著提高。