

C04.高温合金

分会主席：肖程波、冯强、张健、张军、杜金辉

口头报告

C04-01 (邀请报告)

高温合金制备的“主流工艺”与“细节控制”

董建新

北京科技大学

主要强调变形高温合金制品于现今情况下，主流工艺均可贯通，但工艺流程中若干细节控制还没有引起工业界的重视。而往往最终产品的质量稳定性更受相关细节控制的影响，如何关注细节控制，提供产品最终质量可靠性，是本次报告的主要思想。

C04-02 (邀请报告)

高温合熔炼技术的研究与发展探讨

王世普

宝钢特钢有限公司

本文围绕高温合金的纯净化、均质化的技术要求开展了真空感应、电渣重熔、真空自耗冶炼技术的研究，并对特种熔炼技术发展趋势进行了探讨。

C04-03

镍基合金 Inconel 600 晶界锯齿化：形成与力学影响

Yuanbo Tang (汤元博)¹, Angus Wilkinson¹, Roger Reed^{1,2}

1. University of Oxford, Department of Materials

2. University of Oxford, Department of Engineering Science

镍基合金 Inconel 600 中晶界锯齿化现象被着重研究。通过两种不同热处理条件，分别形成了锯齿化晶界与非锯齿化晶界，同时保持其他微观组织特性不变（如晶粒大小分布与孪晶晶界比例）。两种材料的蠕变性能在 700-900°C 条件下进行测试，通过高分辨率电子背散射衍射（HR-EBSD）与 X 射线断层照相（XCT）与 3D 重建的分析后，发现断裂模式与累计损伤的变化。研究发现，锯齿化晶界在高温低应力条件下，以孔洞引起的沿晶断裂为主要机理时起到了极为重要的角色，包括延长蠕变断裂寿命与延展性。在低温、高应力条件下，以穿晶断裂为主要机理时，锯齿化晶界对蠕变性能鲜有影响。

C04-04

一种 Al, Ti, Nb 共同强化高温合金的凝固偏析行为

谭远过, 孙文儒

中国科学院金属研究所

OK151 合金是一种由俄罗斯开发的高合金化高温合金。本文利用金相显微镜（OM），扫描电镜（SEM）及能谱（EDS），电子探针（EPMA），透射电镜（TEM），差热分析实验（DTA）和初熔实验研究该合金的铸态组织，凝固行为和元素偏析。研究表明，该合金偏析严重，枝晶间析出复杂，既析出 η -Ni₃(Ti, Nb) 和 $(\gamma + \gamma')$ 共晶，表现出高 Ti 合金的特征，又析出 Laves 相，表现出高 Nb 合金的特征。DTA 和初熔实验确定合金的凝固顺序为： γ 基体，NbC， η -Ni₃(Ti, Nb)， $(\gamma + \gamma')$ 共晶，Laves。实验结果表明：NbC 析出温度在 1250°C 以上， η -Ni₃(Ti, Nb) 析出温度在 1210-1220°C， $(\gamma + \gamma')$ 共晶和 Laves 相析出温度在 1180-1190°C； γ' 从 γ 固溶体中开始析出的温度为 1150°C。EDS 和 EPMA 原位成分分析表明，元素偏析是合金凝固过程中组织演变的主要影响因素；在凝固初始阶段，Nb, Ti 元素向枝晶间偏析严重，其中 Ti 先与 Nb, Ni 结合，形成 η -Ni₃(Ti, Nb)，再与 Al, Ni 结合形成 $(\gamma + \gamma')$ 共晶； η -Ni₃(Ti, Nb) 和 $(\gamma + \gamma')$ 共晶的形成都需要富集 Ti, Ni 元素，所以在析出过程中属于竞争关系。 η -Ni₃(Ti, Nb) 和 $(\gamma + \gamma')$ 共晶的析出，将贫化元素 Cr, Mo, Co 排挤到剩余液体中；这些元素结合枝晶间富集的 Nb 形成 Laves 相。

C04-05

800 °C长期时效对 GH4282 合金组织和力学性能的影响

石照夏,颜晓峰,段春华

钢铁研究总院

对标准热处理态的 GH4282 合金在 800 °C进行了 100 h、500 h、1000 h、3000 h 和 5000 h 的长期时效处理,采用 SEM、EPMA 和相分析等方法分析了长时期时效后合金的组织特征,研究了室温和高温拉伸等力学性能随时效时间延长的变化规律。结果表明, GH4282 合金经过标准热处理后主要析出相为 $M_{23}C_6$ 、MC 和 γ' 相;经过 800 °C长期时效后,随时效时间延长, γ' 相长大速度延缓,晶界 $M_{23}C_6$ 碳化物长大,室温强度略有降低,室温塑性显著降低;800 °C强度随时效时间延长逐渐降低,塑性逐渐增加。GH4282 合金在 800 °C长期时效过程中保持了良好的组织和力学性能稳定性。

C04-06

800°C级新型变形高温合金 GH4175 合金组织控制与力学性能

张文云,黄烁,田强,秦鹤勇,胥国华,赵光普,张北江

钢铁研究总院

随着推重比不断的提高,航空发动机涡轮盘材料既要高强,又要高耐温,但两者往往不可兼得,而且涡轮盘轮缘部位工作温度已经达到 800°C。现有高温合金材料无法满足要求, GH4175 合金正是为解决这一问题产生的,该合金源自俄制 BK175 合金, γ' 的含量超过 58% (仅次于合金化程度最高的 GH4975),采用传统的铸-锻工艺生产,通过优化冶炼工艺,解决了高合金化高温合金偏析的问题;并通过多重循环热机械处理技术解决了此类合金热加工难的问题,并获得可靠的收得率;最后通过双相细晶组织控制技术,成功的制备了该合金锻件:锻件室温屈服达到 1200MPa, 800°C屈服强度达到 950MPa, 750°C恒应力低周疲劳, 10^4 周次应力达到 1100MPa, 800°C/350MPa, 300h 蠕变 $\epsilon_p < 0.2\%$ 。该合金最高长期使用温度 800°C,兼具高强与高温特性,并很好的平衡了疲劳与蠕变的关系,该合金比 GH4065A 使用温度提高了近 50°C。

欧美系合金典型的工艺路线是细晶高强,例如 GH4169, GH4065A, GH4720Li,通过细晶获得很高的室温强度,疲劳性能,但是却有非常严格的最高使用温度;而俄制合金与美制合金路线完全不同,采用高温热处理,通过增大晶粒尺寸来获得更高的使用温度,但是材料的室温强度往往较低,典型如 GH4742, GH4975 等。GH4175 合金优化于俄制 BK175 合金,该合金是在 BK151 基础升级而来,并且在工艺路线上吸收欧美合金的特点,采用细晶路线,并且通过超高的强化相数量来提高材料的使用温度到 800°C,该合金已经广泛应用于 MC21 客机的 PD-14 发动机,俄制直升机的 BK2500M 发动机,以及小型火箭用 MD-120 发动机等型号,是俄罗斯未来主干涡轮盘材料。鉴于国内三联冶炼技术的日趋成熟,多重循环热机械处理技术的不断被认可,以及双相细晶组织的控制技术的完善,经过两年多时间的研制, GH4175 合金已经进入全尺寸涡轮盘试制阶段,有望成为下一代航空发动机的涡轮盘选材。

C04-07

纤维增强高温合金复合材料界面行为研究

江河,董建新,张麦仓

北京科技大学

航空工业的发达程度是一个国家综合实力的体现,而发动机作为飞机的“心脏”是制约航空工业发展的关键因素。涡轮盘是航空发动机具有关键特性的核心部件,高性能航空发动机需具备高推重比和高涡轮前温度。航空发动机结构向着轻量化、整体化、复合化的方向发展;材料向着高温、高强、低密度的方向发展;新工艺技术不断涌现,向优质、高效、低成本方向发展。当前主流涡轮盘材料为镍基粉末合金盘,最高服役温度为 750°C级, 800°C级尚无材可选。近年来,军机、大型民机中复合材料的比例不断增加。SiC 纤维增强铝基、铜基、钛基复合材料的应用研究取得了良好成果,但因基体材料使用温度的限制导致此类材料的使用温度不超过 650°C。镍基高温合金与钛合金相比具有更加优良的高温性能,因此从复合材料设计角度来看采用镍基高温合金作为基体,有望将其使用温度提高至 800°C,为制造高性能航空发动机提供可能。然而,在前期研究中发现高温下 SiC 纤维会与镍基高温合金发生界面反应,使两者的性能显著下降,无法实现预期中的“强强结合”。为实现增强纤维与高温合金的良好结合,获得组织稳定、性能优良的纤维增强高温合金复合材料,需从其界面反应的机理入手,进行深入研究。以此为出发点,本文对纤维增强高温合金复合材料的界面反应行为进行了组织观察、理论分析和计算模拟,以期对纤维增强高温合金复合材料的改进和制备提供理论参考。

C04-08 (邀请报告)

高温合金涡轮盘制备过程残余应力演化规律及其影响

毕中南,秦海龙,杜金辉,张继

钢铁研究总院

高温合金盘类锻件是燃气涡轮航空发动机中最重要的热端承力部件,不仅力学性能要求高,形状尺寸要求也极为苛刻。然而,盘锻件在制备过程中形成的残余应力,会对后续加工中的尺寸精度以及服役过程中的尺寸稳定性产生重要影响,是盘锻件制备过程中需要予以控制的关键因素。本文以GH4169合金为例,通过原位中子衍射等试验,研究了盘锻件锻造、固溶、时效,以及零件加工不同工序间内部残余应力的产生和演化规律和机制,由此建立了模拟计算方法及动态本构模型,以实现制备过程中残余应力及其引起加工变形的预测。

研究表明:GH4169合金盘锻件锻造或固溶热处理之后的快速冷却过程是残余应力形成的主要工艺过程,会产生约-400MPa~400MPa的残余应力,以弦向和径向应力为主,沿轮廓呈“外压内拉”式特征分布;时效热处理过程中,残余应力主要通过升温阶段的塑性变形和等温阶段的蠕变进行释放,随着强化相的析出,释放速率减慢,时效结束后,残余应力仍残留约-300MPa~300MPa;在零件加工过程中,残余应力会随材料切除部分释放并再平衡,残余应力场的变化所引起的附加力矩会使盘件在自由状态下出现不同程度的径向或轴向变形,变形的大小与方向主要取决于加工前残余应力场的分布、加工余量分配以及零件自身结构。

在整个热工艺过程中,GH4169合金中的强化相析出会与残余应力演化产生显著的交互作用:一方面相变的发生会改变材料的塑性应变和蠕变特性,并引起体积变化,从而影响残余应力的演化过程;另一方面残余应力会反之影响强化相的析出行为。使用基于该交互作用建立起的动态本构模型,可以实现全工艺过程合金锻件残余应力场的有限元计算。无论是残余应力还是后续加工变形,有限元计算结果与实测结果对比均具有较高的吻合度,证明该方法有望用于分析解决更为复杂的工程问题。

C04-09

镍基高温合金GH90材料热塑性与工业控制技术研究

文新理¹,章清泉¹,张朝磊²,蒋波²,刘雅政²

1.北京北冶功能材料有限公司

2.北京科技大学

GH90(GH4090)是Ni-Cr-Co基沉淀硬化型高温合金,其成分体系为Cr20Co20Al1.5Ti2.5,相近牌号有英国Nimonic90(简称N90)和美国UNS N07090。GH4090使用温度高达920°C,已用于制作发动机高温弹簧元件、高温紧固件、燃烧室卡圈和制动销等零部件。热加工是该材料研制的难点,主要有三方面原因:(1)含Co 15~21%,Co显著降低合金层错能,在某Ni-Cr合金中添加20%的Co将使合金层错能降低一半,增加扩展位错宽度,使之不易束集而发生交滑移或攀移,组织回复和再结晶困难,加工硬化强烈,易出现热加工裂纹;(2)含Al 1~2%、Ti 2~3%,二者均为 γ' 相形成元素, γ' 析出温度约1000°C,析出后将阻碍位错滑移、抑制回复和再结晶,降低材料热塑性;(3)含Cr 18~21%,Cr的枝晶偏析有可能导致脆性 σ 相在热加工温度区析出,对热塑性不利。本文通过平衡相图计算、Gleeble 3500热压缩和热拉伸实验、阶梯轧制实验等方法研究了GH90材料的热塑性,提出了工业控制技术并开展了工业试验。具体如下:利用JMatPro软件计算主要化学元素C、Cr、Co、Al、Ti的含量对平衡转变相图和合金层错能等的影响,从理论上分析了化学元素对GH90热塑性的影响及其含量控制,结果表明,不仅Al、Ti含量影响 γ' 析出温度,而且Cr、Co元素对 γ' 析出温度也有明显影响,这为 γ' 析出温度和热塑性的调控带来了新思路,确定了合金合理的成分配入点。利用实验室热处理炉分别研究了均匀化退火温度和时间对电渣锭组织和成分均匀化和热塑性的影响,明确了合金合理的均匀化退火制度:1100~1200°C、12~24h。利用阶梯轧制试验研究了轧制温度和压下率对试样热塑性的影响,确定了合金安全轧制的工艺窗口。基于上述研究,提出了GH90热塑性控制关键技术,并开展了工业锻造和热轧试验,结果表明,所设计的GH90合金成分配入点和热加工工艺可行。

C04-10

一种超超临界电站用低膨胀高温合金的性能特征

赵新宝¹,党莹樱²,周永莉²,杨珍²,鲁金涛²,袁勇²

1.浙江大学

2.西安热工研究院有限公司

传统的铁素体耐热钢使用温度极限较低,基本无法满足650°C及以上参数超超临界机组低膨胀部件的使用需求;普通奥

氏体钢的存在热导系数小、热膨胀系数大等缺陷,大厚壁件容易产生热疲劳等;镍基合金具有更高的持久强度和抗氧化能力,普遍存在成本较高、加工难度大、高热膨胀系数等问题。目前 650°C、700°C超超临界机组还没有合适的高强低膨胀高温合金。

本文介绍了一种高参数超超临界电站用低膨胀高温合金的组织 and 性能特征。该合金在 650°C条件下具有优良的组织稳定性,长期热暴露后 γ' 尺寸稳定,部分 γ' 相呈现立方状结构。在 650°C的抗拉强度超过 950MPa,屈服强度超过 600MPa,在 650°C具有良好的抗松弛性能,700°C/250MPa 的持久寿命均超过了 8000h。通过合金强化设计,可以在保持合金较高强度的条件下,同时获得较低的热膨胀系数。

C04-11

700°C超超临界用 617 合金无缝管的研制开发

佘启亮,王宝顺,苏诚,杨晨,王曼

浙江久立特材科技股份有限公司

当前,日益恶化的生存环境以及能源危机,促使世界各国致力于开发更高效、更环保的 700°C先进超超临界锅炉电站。由于超超临界电站的服役环境极为恶劣,常规材料已经无法满足使用。617 合金是一种固溶强化型的高温合金,由于具有优异的高温力学性能,良好的组织稳定性以及耐氧化性能,从而成为了 700°C超超临界锅炉电站过热器及换热器管的优选材料。617 合金化程度较高,含有较高的 Cr 和 Co 含量,并且 Mo 含量高达~9 wt %,从而使得合金具有的变形抗力较大,加工硬化速率快等特点。再者,基体中容易析出富 Mo 的相,会进一步加剧热变形及冷变形的难度。为此,本文开展了对 617 合金合金无缝管材的开发研制工作。

本文采用真空感应加真空自耗的方式冶炼 617 合金,钢锭开坯锻造后经玻璃粉润滑热挤压成荒管,热挤压温度为 1100-1250°C,挤压速度为 100~200mm/s,再经多道次的冷轧成型,冷轧变形量为 30-60%;利用光学显微镜以及电子扫描显微镜观察管材金相组织,并且对挤压管以及最终成品进行各项力学性能测试。

结果表明:在 1100-1250°C下,挤压管的晶粒尺寸随温度的升高而增加。挤压荒管的平均晶粒度在 6.5~8 级,并且沿壁厚方向分布均匀;在冷轧过程中,当变形量超过 60%后,加工硬化非常显著,硬度达到 44HRC 以上,轧机顶杆容易出现断裂的现象;成品管的晶粒尺寸对固溶温度尤为敏感,通过调控退火炉的温度和时间,最终成品管材的晶粒度控制在 4 级左右;成品管的屈服强度大于 340 MPa,延伸率超过 53%,各项力学性能均超过了技术条件的规定要求。

结论:617 合金在 1100-1250°C下,具有良好的可挤压性,并且挤压荒管性能的力学性能优异、组织均匀;采用玻璃粉润滑热挤压+多道次冷轧成型工艺研制出的 617 合金无缝钢管,无论是性能还是组织状态均能满足相关技术要求。

C04-12

镍基变形高温合金无缝管材的短流程热挤压制备方法

高钰璧,丁雨田

兰州理工大学

GH3625 合金由于合金化程度高、热变形抗力大、工艺塑性低、热加工温度范围窄等特点,其无缝管材制备工艺流程是将合金铸锭经锻造开坯后机加工成空心管坯,采用热挤压成形技术制备荒管,再经冷轧/冷拔及热处理工艺生产出成品管材。但由于 GH3625 合金的特性,在锻造开坯过程中很容易形成微裂纹或断裂,对后期挤压成形造成严重管材开裂等问题。本工作针对锻造开坯过程中出现的问题,对制管工艺进行创新,提供了一种新型的短流程 GH3625 合金无缝管材制备方法,即直接从空心管坯热挤压出荒管,再经冷轧/冷拔及热处理工艺加工成成品管材的工艺路线,从而避开了锻造开坯这个难以控制的环节,减少锻造开坯过程中产生的裂纹缺陷,提供优质的热挤压荒管,提供优质的热挤压坯料,提高生产效率,节约成本。因此,本文采用短流程热挤压成形及冷轧成型工艺,研制出了规格为 $\Phi 28 \times 5.5$ mm 的 GH3625 合金无缝管材,并对 GH3625 合金无缝管材微观组织和力学性能进行综合评价。结果表明,空心管坯在固定挤压速度 50 mm/s,预热温度为 1150 °C和挤压比为 7.4 的条件下,成功挤压出了规格为 $\Phi 43 \times 9.5$ mm 的 GH3625 合金荒管,其组织为少量的形变孪晶和大量的等轴晶的混晶组织,平均晶粒度约为 8.6 级左右,室温抗拉强度和断后延伸率分别为 771 MPa 和 52.33 %,具有良好的冷加工性能和力学性能;经冷轧加工及退火后的 GH3625 合金无缝管材的性能指标达到 ASTM-B163-04 国际标准。

C04-13 (邀请报告)

DD6 单晶高温合金疲劳行为

李嘉荣,谢洪吉,韩梅,刘世忠

中国航发北京航空材料研究院

第二代单晶高温合金 DD6 性能优良,已成为先进航空发动机涡轮叶片的重要材料。采用螺旋选晶法和籽晶法在真空定向凝固炉中制备 DD6 合金[001]取向单晶试棒,研究了 DD6 单晶高温合金旋转弯曲疲劳性能、轴向高周疲劳性能以及低周疲劳性能,采用扫描电子显微镜与透射电子显微镜分析了高/低周疲劳试样的显微组织和位错组态。获得了多种因素对 DD6 单晶高温合金疲劳性能的影响规律,对比了 DD6 合金与国外典型单晶高温合金旋转弯曲疲劳性能、轴向高周疲劳性能以及低周疲劳性能,揭示了碳化物在第二代单晶高温合金高周疲劳断裂中的作用机制。

C04-14 (邀请报告)

高代次镍基单晶高温合金热处理研究及工艺优化

刘林

西北工业大学

高代次单晶高温合金难熔元素含量高、存在枝晶偏析严重、均匀化速率慢等问题,导致常规固溶处理中易初熔、耗时长、残余偏析严重等问题;同时时效处理工艺较为固化,对该过程 γ' 的析出及演化研究尚不够充分。本文以第三代和第四代单晶高温合金为研究对象,采用 Dictra 数值模拟和实验研究方法,从固溶时间、固溶温度和扩散距离三方面入手,开展了固溶处理元素扩散动力学、方法优化、对比评估及机理分析的研究,建立了固溶工艺-组织-力学性能之间的定量关系,提出了判断合金初熔的方法及两种新型固溶处理工艺。研究了不同处理温度和时间对时效组织的影响,对合金固溶和时效处理制度进行了优化。结果表明:采用新型重熔固溶处理及短时固溶处理代替常规固溶处理,可使合金的固溶温度提高 20-30°C,固溶时间缩短 20%,同时枝晶析明显降低,其中 Re 的偏析比从 1.93 降低到 1.17。同时,热处理组织得到优化,时效处理后 γ' 尺寸均匀性和 γ 基体通道尺寸的均匀性均有所增加。热处理工艺优化使单晶高温合金在 1100°C/150 MPa 下蠕变寿命明显延长。

C04-15

一种单晶高温合金定向凝固过程中形成的条纹晶缺陷的研究

黄亚奇^{1,2},申健¹,谢光¹,张健¹

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

镍基单晶高温合金以其优良的高温力学性能,被广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件。随着高温合金难熔元素含量的增加以及单晶叶片形状复杂程度的提高,单晶铸件在定向凝固过程中易出现杂晶、雀斑、小角度晶界等缺陷。研究人员开展了大量的工作,深入探究缺陷的产生机理,并逐步探索出了相应的控制手段。但是,针对单晶铸件中产生的条纹晶缺陷研究较少,条纹晶缺陷的形成机理以及控制方法尚没有进行深入讨论。

本文针对第一代单晶高温合金 DD413 在定向凝固过程中出现的条纹晶缺陷,结合光学显微镜(OM)、X 射线计算机断层扫描技术(XCT)以及 EBSD 技术等对其进行了研究。观察发现,条纹晶缺陷呈条状,出现以后会沿着凝固方向延伸直至铸件顶端。条纹晶缺陷的产生是由于枝晶变形所导致并非是新品粒的形核长大。实验还发现铸件中的微孔洞可能是诱发枝晶变形的一种新机制,孔洞扰乱了枝晶生长,凝固收缩应力会拉拽新发展的二次枝晶,从而使二次枝晶更容易变形和偏转。条纹晶缺陷产生以后,在其生长过程中,条纹晶的二次枝晶绕<001>轴发生偏转,并且其<001>轴取向也在逐渐增加。这是由于受铸件形状以及凝固收缩应力的影响,枝晶会发生不同方向的偏转和变形。

C04-16

一种二代镍基单晶高温合金 DD11 在 760°C 下的低周疲劳和疲劳蠕变交互作用

郭媛媛,赵云松,杨振宇,张剑,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

通过对第二代镍基单晶高温合金 DD11 在 760°C 下的疲劳性能测试及表征,研究了应变幅和保载对断裂模式及循环应力响应行为的影响。不加保载的合金疲劳寿命均大于保载 60s 后的疲劳寿命。合金在 $\Delta\epsilon/2 \leq 0.9\%$ 时均表现为疲劳断裂特征,在 $\Delta\epsilon/2 > 0.9\%$ 时,保载 60s 后表现为解理断裂特征,蠕变起主要作用。当 $\Delta\epsilon/2 = 0.7\%$ 时,不保载和保载 60s 的合金滑移机制均包括面滑移和波状滑移,不加保载的合金表现为循环稳定,保载 60s 后合金表现为循环软化;当 $\Delta\epsilon/2 = 0.9\%$,合金不保载时, γ' 相以及通道内相互缠绕的位错组态共同作用阻碍了位错的进一步运动,表现为循环硬化,保载时,位错的分解和交滑移运

动造成了循环软化；当 $\Delta\epsilon/2 \geq 1.0\%$ 时，不保载和保载的合金均表现为循环硬化，这是由于通道中相互缠结的位错运动受阻、位错从基体中切入 γ' 相以及持续剪切 γ' 相需要较大的附加外力造成的。本研究有利于建立单晶高温合金涡轮叶片疲劳失效模式、循环应力响应行为和组织三者的关系，对涡轮叶片的设计使用具有一定的指导意义。

C04-17

几何尺寸对不同第二取向第三代镍基单晶高温合金薄壁试样持久性能的影响

王莉,李一飞,孙国栋,楼琅洪,张健

中国科学院金属研究所

随着发动机的不断发展，发动机效率不断提高，为了满足不断提高燃气进口温度的要求，叶片承温能力不断提高。提高叶片承温能力的方法主要有三种：（1）提高材料的承温能力；（2）采用复杂冷却结构；（3）采用先进涂层技术。因此，叶片使用环境更加复杂。一般而言，单晶叶片生产过程中，只控制叶片的第一取向（枝晶生长方向），并不控制第二取向（二次枝晶生长方向）。近年来的研究表明，第二取向严重影响合金的拉伸性能及热疲劳性能。因此，有必要研究温度应力共同作用下，几何尺寸对不同第二取向薄壁试样的损伤机制的影响。

采用第三代镍基单晶高温合金 DD33，熔炼母合金，定向凝固单晶试棒，选取取向偏差小于 4° 的试棒，加工不同第二取向、不同厚度的薄壁持久试样。在 $1100^\circ\text{C}/140\text{MPa}$ 进行持久实验。结果表明：样品厚度影响合金的持久性能，不同取向厚度 1.5mm 样品的持久性能相差更大，且变化趋势与较薄试样相反。为了排除氧化的影响，采用高通量实验，对比了不同第二取向试样的氧化性能。结果显示，第二取向不同，氧化层厚度不同。结合光学显微镜、扫描电子显微镜微观组织观察结果，排除氧化的影响，重新拟合后，结果仍然显示第二取向及几何尺寸影响薄壁试样的持久性能。而这正是取向、结构共同作用的结果。

C04-18

热等静压对镍基单晶高温合金 CMSX-4 组织及性能的影响

兰健,玄伟东,韩雨,李永顺,任兴孚,任忠鸣

上海大学材料科学与工程学院

对于定向及单晶高温合金而言，凝固过程枝晶间形成的缩孔和疏松，是合金持久蠕变和疲劳失效的主要裂纹来源。本文以第二代镍基单晶高温合金 CMSX-4 为研究对象，研究热等静压对合金组织及力学性能（拉伸、持久）的影响。对铸态的单晶试样先进行 $1316^\circ\text{C}/105\text{Mpa}/5\text{h}$ 的热等静压处理，随后进行标准热处理。利用 OM、SEM 等方法观察了热等静压和热处理过程不同阶段合金的显微组织，并分别测试了有无热等静压处理合金的 20°C 、 760°C 和 980°C 拉伸性能以及 $980^\circ\text{C}/250\text{Mpa}$ 条件下的持久性能，对比分析了热等静压对单晶高温合金的组织 and 力学性能的影响。结果表明：热等静压处理后合金孔隙率由 0.19% 降低到 0.02% ，虽然在后续热处理中又有升高，但相比无热等静压热处理， 80% 的缩孔被闭合，且微孔的尺寸也大大降低；在不同温度的拉伸测试中，发现热等静压对合金的强度无明显的影响，但发现合金的高温塑性得到了一定提升，其中 980°C 下延伸率由 22.5% 提升至 30.1% ；热等静压热处理后，合金的 $980^\circ\text{C}/250\text{Mpa}$ 持久寿命得到大幅度提升，由 313h 提升至 439h 。

C04-19 （邀请报告）

单晶高温合金制备及缺陷控制

孙晓峰

中国科学院金属研究所

镍基高温合金以其优异的高温综合性能成为航空、航天及舰船发动机高温结构部件的关键材料。复杂空心结构单晶叶片是高性能发动机不可或缺的关键部件，高性能合金材料及高效冷却结构是提高叶片承温能力的有效手段。然而，随着单晶高温合金中难熔元素含量的增加及叶片结构的日益复杂，单晶叶片杂晶、小角晶界和取向偏离等凝固缺陷的形成倾向性明显增加。这些缺陷不仅显著降低了单晶叶片的合格率，增加叶片制造成本，甚至严重威胁发动机长期服役的可靠性。因此，开展凝固缺陷形成机理及控制技术具有重要的科学与工程意义。报告主要从杂晶、取向偏离、小角晶界和表面共晶等缺陷形成机理及控制的角度介绍中科院金属所在单晶叶片凝固缺陷控制方面的研究进展。

（1）在单晶叶片杂晶形成机理及控制方面，利用变截面尺寸缘板试样研究了杂晶的形成机理。结果表明，缘板几何形状和温度梯度分布是影响杂晶形成的主要因素；随缘板尺寸增加，边角杂晶形核位置增多，且内侧边角更易出现杂晶，即杂晶形核具有明显的位置依赖性。通过改变缘板处温度梯度，可抑制杂晶的形成。

（2）在单晶叶片取向偏离形成机理及控制方面，研究了选晶器螺旋段和起始端结构对单晶取向偏离的影响。研究发现，合理的螺旋段结构显著提高选晶效率，但并不改变晶体的取向；而起始端则对枝晶取向偏离则起到主要控制作用，起始端通

过晶粒竞争生长优化晶体取向，但随着起始端的高度和直径的增大，取向优化作用会减弱。

(3) 在小角晶界形成机理及控制方面，借助双晶试样研究了枝晶竞争生长行为。结果表明，对于汇聚生长的枝晶，实验结果与经典 Walton-Chalmers 枝晶竞争生长模型不一致，即非择优取向的枝晶可以阻挡择优取向的枝晶，溶质场对枝晶间的竞争生长起主要作用；而对于发散生长的枝晶，实验结果与 Walton-Chalmers 模型一致。

(4) 在表面共晶形成及控制方面，研究了凝固工艺和合金元素对表面共晶的影响。结果表明，增加抽拉速率，可缩短共晶形成元素的扩散距离，从而降低表面共晶含量；添加 Re 增加了局部凝固时间和糊状区枝晶网的渗透性，促进了表面共晶的形成；而添加 C 后，合金凝固过程中所优先形成的碳化物会阻碍共晶熔体外排，从而抑制表面共晶的形成。

C04-20

微量元素 B 对含 Re 镍基单晶合金大角度晶界缺陷处胞状再结晶组织及蠕变性能的影响

赵云松¹,郭媛媛¹,杨丽霞²,张剑¹,葛炳辉²,沙刚³,骆宇时¹,唐定中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.中国科学院物理研究所

3.南京理工大学

镍基单晶高温合金叶片在制备过程中会不可避免的出现大/小角度晶界缺陷。晶界缺陷会在长时高温服役中产生胞状再结晶组织，显著降低叶片合金的强度和蠕变性能。有少量研究表明：微量元素的加入对高温合金的晶界稳定性有显著的影响，但作用机理尚不清楚。为此，本文以我国自主研制的第二代镍基单晶合金 DD11(3 wt.%)为研究对象，采用籽晶法制备不同 B 含量且分别包含约 20°晶界角度的双晶试板。本研究首次报道了微量 B 加入可显著提高抑制第二代镍基单晶高温合金大角度晶界处胞状再结晶组织的形成，显著提高 1100 °C/130 MPa 和 980 °C/250 MPa 条件下的蠕变性能。为了阐释 B 影响晶界胞状再结晶组织和蠕变的机理，本研究对高温条件下晶界组织演变进行了系统表征，并采用高分辨原位球差矫正电镜 (ACTEM) 和三维原子探针 (APT) 等实验方法对晶界结构和晶界成分进行分析。结果表明大多数处晶界由一层厚度约为 5nm 的薄层构成；不含 B 合金的大角度晶界处出现胞状再结晶组织，微量 B 加入具有明显抑制晶界胞状再结晶的作用。APT 研究发现 B 显著偏聚于晶界，而一些拓扑密排相 (TCP) 的形成元素则不同程度地偏聚在晶界。本报告将系统讨论微量 B、晶界结构、晶界成分、晶界组织稳定性和蠕变性能的关系。本文研究对认识含 Re 单晶合金长时服役过程中 B 的强化晶界机理及提高单晶叶片晶界角度的容限具有一定的指导意义。

C04-21

不同变形温度下 DD6 镍基单晶高温合金再结晶行为的实验与模拟研究

王润楠,许庆彦,柳百成

清华大学材料学院先进成形制造教育部重点实验室

镍基单晶高温合金因其良好的高温力学性能广泛应用于航空发动机和重型燃气轮机涡轮叶片制造领域。单晶叶片凝固冷却过程中由于合金与陶瓷型壳的收缩系数不同，造成零件变形，如果变形程度较大就会产生塑性变形残留在单晶基体中。在随后固溶热处理 (SSHT) 过程中，这些塑性变形就会诱发再结晶晶粒形核生长，产生新的高角晶界，破坏叶片单晶结构，严重降低力学性能和服役寿命。

为探究叶片定向凝固过程中冷却至不同温度下产生塑性变形对再结晶行为的影响，本文采用 [001] 取向 DD6 镍基单晶高温合金圆柱试样，在 Gleeble3500 试验机上于 0°C~1200°C 下压缩至 5% 塑性变形量，用以模拟单晶叶片定向凝固过程中不同温度下产生的变形，随后将变形试样在不同温度下进行等温热处理，观察再结晶临界发生温度。发现在 980°C 变形的样品具有最低的临界温度约为 1260°C，而室温 (RT) 变形样品的则约为 1310°C，相差温度达 50°C。

选取 5% 塑性变形的上述两种样品进行 SSHT(1290°C/1h, 1300°C/2h, 1315°C/4h, 空冷)。随着 SSHT 的进行，微观组织枝晶均匀性明显提升，共晶减少。对于 980°C 变形样品在 SSHT 第一阶段再结晶迅速形核生长，并主要呈枝晶状，再结晶最先在枝晶内部出现，部分进入枝晶间，但几乎不进入共晶。结合 EPMA 检测的枝晶干 (DAs)、枝晶间 (IDRs) 和共晶区域 (EUs) 的元素组分，使用热力学计算软件 Pandat 计算这三个位置 γ' 相完全溶解温度，结果显示 DAs、IDRs 和 EUs 分别为 1284°C、1330°C、1364°C，证明了 γ' 相作为第二相粒子对再结晶形核生长的阻碍作用。与 980°C 变形样品不同，RT 变形样品在热处理前两阶段 (1290°C, 1300°C) 并未出现再结晶；等到第三阶段，再结晶出现，此时由于 DAs 和 IDRs 均匀化程度很高，因此再结晶晶界快速推移直至长满整个变形区域。

采用晶体塑性有限元 (CPFEM) 结合元胞自动机 (CA) 的方法模拟了再结晶形貌和晶粒尺寸，基于 Gleeble 结果校核开启多滑移系 CPFEM 模型参数，考虑不同阶段枝晶组织不均匀性对再结晶影响，模拟的再结晶形貌与晶粒尺寸和实验吻合良好。

C04-22

Si 在 700°C 电站用 Ni-Cr-Mo 基合金中的作用研究

王常帅¹, 刘庆丰¹, 肖旋², 周兰章¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 沈阳理工大学

700°C 超超临界燃煤电站大型铸件用 Ni-Cr-Mo 基合金通过 Si 微合金化来进一步提高抗蒸汽氧化性能, 但 Si 对 Ni-Cr-Mo 基合金凝固行为、组织特征和力学性能的影响尚不明确, 明确 Si 微合金化在 Ni-Cr-Mo 基合金中的作用, 对 Ni-Cr-Mo 基合金的合金设计具有重要意义, 因此, 本文系统研究了 Si 微合金化与 Ni-Cr-Mo 基合金凝固行为、组织特征和力学性能的相关性。结果表明: Si 降低合金的液相线、固相线和碳化物析出温度且增大合金的结晶温度间隔。对枝晶偏析行为的研究表明 Si 元素偏聚于枝晶间, 增大 Nb 元素枝晶偏析程度, 却对 Cr 和 Mo 元素无明显影响。Si 降低 MC 碳化物析出倾向, 却促进 γ /Laves 共晶相的析出且共晶相特征随 Si 含量增加而变化。Laves 相富 Nb 和 Si, Si 的枝晶间偏聚和 Nb 元素枝晶间偏析程度的增大是 Si 微合金化促进 γ /Laves 共晶相析出的原因。微量 Si 元素的添加引起的 γ /Laves 共晶相的析出对合金拉伸性能影响较小, 但 Si 含量为 1.5% (质量分数) 时, 合金的强度和塑性均显著降低。

C04-23

薄壁效应对 K465 合金显微组织与持久性能的影响

郭小童¹, 袁晓飞^{1,2}, 郑为为¹, 李杰^{1,3}, 郑运荣¹, 冯强¹

1. 北京科技大学, 新金属材料国家重点实验室
2. 钢铁研究总院
3. 钢研纳克检测技术股份有限公司

随着航空发动机性能的提升, 空心涡轮叶片的型腔结构变得更加复杂, 其壁厚也随之变薄。叶身壁厚的变薄可能导致显微组织和力学性能的变化, 即存在薄壁效应。本文以铸态 K465 合金棒材和空心管材为研究对象, 通过研究两种铸件在 900°C 和 1000°C 时效过程中基体组织、晶界、碳化物和 TCP 相等显微组织演变规律以及对 975°C/225MPa 持久性能的影响作用, 揭示了合金元素在枝晶间和枝晶干区域的偏析行为差异是薄壁效应对 K465 合金显微组织与持久性能的主要影响机制。本研究的研究成果为等轴晶铸造高温合金的使用提供借鉴作用, 为航空发动机叶片的设计提供参考依据。

C04-24

高温合金洁净度评价技术

张华夏, 马国宏

中国航发北京航空材料研究院

夹杂物的数量及尺寸作为高温合金洁净度的重要特征之一, 严重影响着高温合金产品的质量, 其评价方法始终吸引着行业工作者的重要关注。作者结合多年的科研生产经验, 通过大量的文献查阅, 探讨了金相法、浮渣试验方法、电解萃取法等多种定量/定性评价方法在高温合金洁净度评价方面的优劣, 并重点介绍了国外较为成熟的电子束纽扣法, 并将该技术与传统评价技术进行了对比。在论文的结尾部分, 作者对高温合金洁净度的评价方法提出了展望。

C04-25 (邀请报告)

薄壁效应对 Ni₃Al 基单晶高温合金抗氧化性能的影响

宫声凯, 李树索, 赵海根, 裴延玲, 徐惠彬

北京航空航天大学

1. 实验准备

Ni₃Al 基合金 IC21 采取快速凝固法选晶法进行单晶试板制备, 试板的尺寸为长宽高为 42*20*160mm。对单晶铸态试板在大气条件下, 使用管式炉进行标准热处理, 对热处理完的单晶试板, 切取 4 种不同厚度的热处理态均匀组织的试样, 样品尺寸为 10*8*t, t 为样品截面厚度, 厚度变化为 0.1, 0.3, 1.0, 3.0mm。试验根据 GB/T 13303.91 《钢的抗氧化性能测定方法》和 HB5258—2000 《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》进行。合金的氧化实验温度为 900 °C 和 1100 °C, 试验总时间均为 100h。

2. 实验结果与讨论

2.1 900°C 氧化

在 900°C 低温循环氧化, 不同壁厚的氧化样品增重和失重曲线很相似, 也就是氧化皮几乎都没有剥落。在 900°C 温度下, 薄

壁样品 0.1mm 增重为 1.92mg/cm², 而 0.3-3mm 厚样品增重为 2.40mg/cm²。当壁厚大于 0.3mm 时, 在 900°C 循环氧化过程中, 并没有区别。900°C 恒温氧化过程中, 所有氧化时间不同壁厚的样品其增重曲线和失重完全一致, 且增重曲线和失重曲线几乎一致。仅仅在 100h 失重曲线, 虽然所有壁厚剥落量都非常小, 但是可以看出 0.1mm 的样品其剥落量最小。

2.2 1100°C 氧化

在 1100°C 循环氧化, 不同壁厚的增重和失重曲线差别很大。随着壁厚从 0.1mm 增大到 3mm, 合金的增重量逐渐增大。而失重曲线可以看出, 随着壁厚增大, 氧化膜剥落越来越大, 且壁厚越大, 氧化膜剥落时间明显提前。恒温氧化 0.1, 0.3, 1.0mm 厚度的样品与循环氧化相比, 其增重有所减小, 但是可以发现当壁厚大于 0.1mm 时, 0.3mm 和 1mm 厚度样品在恒温氧化其增重和失重曲线没有区别, 而薄壁 0.1mm 氧化样品相对于厚度其他其增重量有所减小, 且氧化物剥落也减小。通过对氧化膜和基体之间的应力测试, 发现随着壁厚增大, 基体和氧化膜之间的应力不断增大, 且氧化铝弹性应变能随着壁厚增大也增大, 如果弹性应变能大于其断裂韧性, 氧化铝会发生破裂从而进一步发生内氧化, 导致合金增重变大, 这也是导致壁厚增大合金增重变大的原因。

C04-26 (邀请报告)

镍基单晶高温合金 γ/γ' 相界面与界面位错交互行为的原位 TEM 研究

丁青青, 李吉学, 张泽

浙江大学

应用于航空发动机涡轮叶片的镍基单晶高温合金需在高温、高应力条件下服役。服役期间 γ' 相发生定向粗化, γ/γ' 相界面迁移, 造成筏排化。本文通过在透射电子显微镜中应用原位加热台, 对镍基单晶高温合金进行了变温加热, 观察研究了 γ/γ' 相界面在迁移过程中与相界面位错的相互作用。发现相界面迁移过程中不改变界面位错网络的位错密度, 只会改变位错网络形态。研究发现相界面位错的弹性应力场能够有效阻碍 γ' 相长大, 使界面产生向 γ' 相凹进的凹槽。

C04-27

γ' 相强化钴基单晶高温合金高温低应力蠕变行为及机理

路松, 李龙飞, 冯强

北京材料基因工程高精尖创新中心, 新金属材料国家重点实验室, 北京科技大学, 北京 100083

钴基高温合金具有良好的抗热腐蚀、抗热疲劳和焊接性能, 但高温强度显著低于镍基合金, 限制了其在高温条件下的应用。近年来, 高温稳定 γ' 相 ($\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$) 的发现使新型 γ' 相强化钴基高温合金迅速成为国际高温合金界研究的前沿。但目前国内外对该类合金蠕变行为的研究较少, 严重阻碍了其发展。本文以自主研发的新型钴基单晶高温合金 (Co-7Al-8W-Ta-4Ti) 为研究对象, 系统研究了其在 1000°C/137MPa 下的蠕变行为和蠕变不同阶段 γ/γ' 两相微观组织演变规律以及位错、层错和反相畴界等缺陷的形成与演变机制, 揭示了微观组织和亚微观组织的交互作用与蠕变行为之间的关系。本研究阐明了 γ' 相强化钴基单晶高温合金高温低应力条件下的蠕变机理, 为发展新型钴基合金的强韧化理论奠定了基础。

C04-28

Co-Al-W 基高温合金中成分偏聚的现代电子显微方法研究

陈艳辉¹, 薛飞², 汪纯慧¹, 李昂¹, 龙海波¹, 毛圣成¹, 冯强², 韩晓东¹

1. 北京工业大学

2. 北京科技大学

球差矫正电镜技术的发展为材料学的深入表征及成分设计指导提供了强有力的支持。随着不断发展的原子尺度结构, 成分及原位技术的发展, 研究人员用新技术可以得到以往在传统合金中未曾发现的新现象。 γ' 相强化 Co-Al-W 基高温合金由于具有良好的抗热腐蚀、抗热疲劳性能和焊接性因而在航空发动机中的广泛使用。极端高温下 800-1100°C 下的力学性能具有和低温环境下完全不同的性能。其中的力学行为机制也不同于低温下的材料。但由于传统电子显微技术的局限, 微观结构及成分等的表征局限于一定的尺度¹。对缺陷部位原子尺度的微结构及成分的研究对于其高温力学形变的机制的理解提供直观的证据。原子尺度的结构及成分是理解其生长机理及缺陷运动的直观证据。本文利用最新球差矫正技术对 Co-Al-W-Ti-Ta 双相高温合金中原子结构, 成分及其蠕变后结构及成分进行原子尺度的表征, 揭示成分蠕变缺陷的成分偏聚情况。另外对原位腐蚀过程中空隙的结构进行三维结构重构, 揭示钴基合金腐蚀过程中的成分偏析情况。对钴基高温合金的成分设计提供一定的理论指导意义。

C04-29

DD688 钴基单晶高温合金钎焊接头微观组织演变研究

王诗洋,孙元,侯星宇,周亦曹,李金国,孙晓峰,崔传勇

中科院金属研究所

利用 SEM/EDS、TEM 等方法对 1220°C 条件下 Ni-Cr-W-B 钎料钎焊的 DD688 钴基单晶高温合金接头的显微组织进行了研究,并分析了钎焊过程中,接头的显微组织演变规律,并深入分析了接头中各相的形成机制。试验结果表明,接头主要由非等温凝固区、等温凝固区和扩散影响区组成。非等温凝固区位于钎缝中心,主要由 γ -Ni 固溶体、骨架状 CrB 与块状 M_3B_2 型硼化物组成;等温凝固区位于扩散影响区与非等温凝固区中间,主要为 γ -Ni 固溶体,非等温凝固区由少量短棒状 M_3B_3 型硼化物,与大量具有择优生长的针状硼化物组成;随着保温时间的延长,非等温凝固区减小,等温凝固区增大,扩散影响区中针状硼化物相沿母材[001]取向择优生长并不断长大,接头的蠕变性能提高,高温断口观察表明断裂发生在钎缝处,断裂模式为混合断裂模式。

C04-30

基于 CALPHAD 方法的钴基超合金与钛铝基高温合金设计

朱军¹,张帆¹,张传¹,吕杜超¹,陈双林¹,曹伟生¹,孙东科²

1.CompuTherm LLC

2.东南大学

钴基超合金与钛铝基高温合金因其兼具优良的高温性能,目前已成为备受瞩目、潜力巨大且发展迅速的高温结构材料。以钴、铝、钨为主要元素的钴基超合金能够形成类似于典型镍基超合金的组织结构,因而具有优良的高温性能。为了深入理解钴基合金各相分布及其关系,我们采用 CALPHAD 方法构建了钴基合金的热力学数据库。该数据库包含钴、铝、钨、镍、铬、铁、钼、铌、铪、钽、钼、钛、硼和碳等十八种合金元素。通过与文献中大量实验数据对比,我们验证了该数据库的可靠性与准确性。基于该数据库与 Pandat 高通量计算引擎,开展了高通量的数值实验并获得了不同成分、不同温度条件下合金各稳定相及其分数。我们可从这些结果中快速筛选出更加合适的合金成分与热处理条件,最终实现钴基超合金的快速设计。同样,我们采用 CALPHAD 方法构建了钛铝基合金的热力学数据库。该数据库包含了钛、铝、铬、铌、钼、钒、硅和钨等十六种合金元素。使用该数据库可以准确计算出常用合金在不同温度条件下的平衡成分及相分数。通过开展高通量计算,我们可排除大量对合金性能有不利影响的成分组合,从而快速得到合金优化的方向,大幅提升合金设计效率、降低合金研制成本。

C04-31

伪三元双时效扩散多元节在高温合金研究中的应用

王子¹,朱礼龙²,熊炜¹,展鑫¹,刘锋¹,赵继成³,江亮¹

1.中南大学粉末冶金研究院

2.美国佛罗里达大学材料科学与工程系

3.美国俄亥俄州立大学材料科学与工程系

为满足高温合金部件承温能力逐年提高的需求,合金成分中添加大量难熔元素以优化高温综合性能,但也造成组织稳定性的劣化。TCP 相的析出将消耗固溶强化元素弱化基体,硬脆的特性更使其成为裂纹源,加速构件失效。界定固溶强化元素的固溶极限,明确其合理添加含量,是充分发挥合金元素潜力,优化设计成分的关键。针对新合金体系的组织稳定性,电子空位数、d 轨道能级及热力学计算等理论计算方法往往无法准确预测。而用平衡合金法测定镍基多元合金中 TCP 相的 ZPF lines (Zero Phase Fraction lines, 零相分数线),工作量巨大难以实现,这也是目前多组元体系实验相图缺失的原因。

高效制备并检测大量合金试样,是绘制 TCP 相 ZPF line 的关键。而扩散多元节方法中可形成的连续成分梯度,加之其综合利用先进微区表征手段的成功示范,为多组元镍基高温合金中 ZPF lines 的高效测定提供了思路。因此,本文在扩散多元节方法的基础上,基于 9 组元 Z1 单晶高温合金成分,设计一组伪三元合金体系(每个合金只改变一个元素含量,保持其他元素含量恒定),同时采用双时效手段(一级高温 1280°C/100h+ 二级中温 900-1000-1100°C/500h),测定合金体系中 TCP 相的 ZPF lines。双时效热处理过程中,一级时效过程使合金元素快速扩散形成长程连续成分梯度,而二级时效相当于传统方法中的中温长时热暴露实验,以观察 TCP 相析出情况。

本文以 Z1-Z4 (高 Mo)-Z5 (高 Ti) 三元节的结果为例,绘制了 NiX-Mo-Ti 的等温截面相图及 TCP 相的 ZPF lines。研究结果显示,TCP 相的析出及种类,强烈依赖于合金成分和温度的综合作用。Mo-Ti 两组元的交互作用,导致 900 °C/500h 条件下,σ+P 大量析出,而在 1100 °C/500h 条件下,仅导致富 Mo 合金中 P 相的少量析出。进一步分析表明,Mo-Ti 两组

元的交互作用影响到 γ/γ' 的元素分配, 导致 γ 相中难熔元素富集, 而 Ti 对 TCP 相析出的作用比 Mo 元素更为显著。

ZPF lines 的高效、精确绘制, 验证了此方法在镍基高温合金组织稳定性研究中的可行性。同时, 此方法可在多组元交互作用条件下, 获取 γ' 相形貌、错配度及体积分数, γ/γ' 元素分配以及 γ' 相蜕化程度等微观组织信息, 测定显微硬度、抗氧化及涂层反应等关键性能指标, 为现有及新合金的优化设计提供高效验证方法。

C04-32 (邀请报告)

三维原子探针技术的最新进展及其在高温合金的应用

沙刚

南京理工大学

三维原子探针凭借其在原子尺度上揭示定量成分和结构信息独特的能力和优势, 近年来在先进材料研究的前沿领域得到许多重要的应用。与具有在微纳尺度进行精准加工制造能力的聚焦离子束技术相结合, 可以实现对任何材料的特定感兴趣的局部区域进行样品制备和分析。两者的完美结合, 对原子探针技术在各种先进材料研究中的广泛应用产生深远的影响。近年来, 南京理工大学的原子探针研究团队对各种材料, 包括半导体器件, 重离子辐照材料的表面损伤区域及先进材料的晶界和相界面, 进行了大量的探索, 成功地实现了对掺杂元素在半导体器件分布的准确掌握, 揭示了材料中辐照缺陷的成分和结构特征, 掌握了影响双相不锈钢中温脆性的关键组织结构。在高温合金的探索, 揭示合金元素在强化相, 晶界和相界面的分布特征。本报告将介绍原子探针工作原理及其可以获得的重要成分和结构信息, 以及我们在高温合金方面的应用研究进展。

C04-33

基于数字相关法的材料高温性能表征技术

尚勇, 侯浩章, 裴延玲, 李树索, 宫声凯*, 徐惠彬*

北京航空航天大学

镍基单晶高温合金以其优异的高温使用性能被广泛应用于航空航天器的发动机中。然而, 传统的实验分析方法所采用的接触式测量技术有一定局限性, 尤其是在表征材料高温下的性能时有着成本高、精度差等问题。近年来, 数字相关技术的发展使其广泛的应用在材料性能研究中。不仅是因为它能够实时观测样品表面状态, 更重要的是通过数字相关算法可以得到材料的应变场、位移场以及量化材料各个阶段的状态数据。目前, 数字相关法主要应用在不同温度下的宏观物体(界面尺寸大于 10mm^2) 以及在室温下的高分辨物体(截面尺寸小于 1mm^2) 的性能表征中。而对于镍基单晶高温合金的研究仅限于室温或者高温下宏观的变形是远远不够的, 高温合金在 1000°C 以上的宏观、介观应变观测对于数字相关法是一个极大的挑战。北航材料学院高温合金课题组自主组建了具有较高分辨率 ($0.7\mu\text{m}$)、可以直接观察 $700\sim 1200^\circ\text{C}$ 的材料高温服役表征设备, 通过后期数字相关技术的处理可以获得材料在不同温度下的服役应变场。利用该设备对单晶合金的高温力学性能、材料宏观拉伸性能、材料宏观高温蠕变应变场以及高温高分辨下单晶合金不同的组织和缺陷影响等进行了一系列的探究。

C04-34

不同功率下脉冲激光表面处理 Inconel 718 合金的微观组织研究

柴林江¹, 袁珊珊¹, 黄伟九¹

1. 重庆理工大学

2. 重庆大学

对退火态的 Inconel 718 合金进行了三种不同功率 (100、50 和 25 W) 的脉冲激光表面处理, 并应用电子背散射衍射和电子通道称度成像技术对其表面微观组织进行了细致研究。结果显示, 激光表面处理致使收获得样品中大量存在的退火孪晶和强化析出相消失。取而代之的是, 激光重熔区中出现了许多小角度晶界, 且沿着这些晶界存在高密度的 Laves 相。随着激光功率的降低, 样品重熔区的宽度和深度均逐渐变小。取向分析显示, 激光重熔区中的柱状晶通过取向形核机制遗传了初始等轴晶的随机取向。硬度测试发现所有样品的激光重熔区均较基体软, 这主要与强化相的溶解和晶粒的粗化有关。

C04-35

选区激光熔化制备 IN718 合金的各向异性及其在热处理过程中的组织演变

陈超, 倪莽, 周科朝

中南大学粉末冶金国家重点实验室

本文利用选区激光熔化技术制备了 IN718 高温合金构件, 利用金相显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射 (EBSD) 和拉伸性能测试研究了合金的显微组织和力学性能及其各向异性。研究结果表明, 利用选区激光熔化制备的 IN718 合金晶粒细

小, 晶粒形貌为柱状晶, γ' 和 γ'' 强化相在激光成形过程中已经析出。高度弥散的 γ' 相均匀分布于晶内, 而 γ'' 相则部分出现在晶界处。在未进行热处理的情况下, 由于激光熔融快速冷却过程中快速凝固形成的细小晶粒和多层级的微结构, 沉积态的 IN718 合金具有强度与塑形的良好匹配。沿生长方向的柱状晶和 $\{100\}$ 丝织构导致了沉积态合金强度和塑性的各向异性。垂直于生长方向的拉伸样品的抗拉强度达到 1167 MPa, 高于平行于生长方向样品的强度 (1101 MPa); 而平行于生长方向样品的平均断后伸长率达到 24.5%, 高于垂直于生长方向的样品 (21.5%)。经固溶时效处理之后, 沉积态合金的各项异性消除, 同时力学性能可进一步提升。对于沉积态的 IN718 合金未经固溶而直接时效处理, 使得样品结合了增材制造多层级微结构和强化相弥散分布的特点, 获得了高达 1480 MPa 的强度。而高温固溶处理, 在消除了沉积态合金组织和性能各项异性的同时, 也消除了增材制造的多层级微结构, 使得合金的强度相比于未做固溶处理的样品略有下降。综上所述, 本文证明了选区激光熔融技术可以实现高性能 IN718 合金的 3D 打印直接成形。

C04-36

GH3039 高温合金激光熔覆成型过程中的缺陷分析

熊磊¹, 李聪聪¹, 罗岚², 饶锡新¹, 京玉海¹, 刘勇¹

1. 南昌大学机电工程学院

2. 南昌大学材料科学与工程学院

采用送粉式激光熔覆技术对 GH3039 高温合金粉末进行熔覆。通过光学显微镜、扫描电子显微镜及 X 射线衍射仪等分析测试手段, 系统地研究了不同激光工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速度)下熔覆层内部缺陷的种类、分布、及其演化规律。结果表明, 熔覆层内部存在三种类型的缺陷, 即气孔、夹渣和裂纹。其中, 气孔为主要缺陷, 夹杂主要分布在熔覆层两侧, 而裂纹很少出现。在其它工艺参数一定的条件下: 随着激光功率(1800~2600 W)的增加, 合金粉末吸收的能量上升使熔合更充分, 熔覆层内部气孔及夹杂的所占面积减小; 而扫描速度(100~300 mm/min)与送粉速度(5~15 g/min)的增加, 合金粉末因吸收能量的下降而产生熔合不良, 导致熔覆层内部气孔与夹渣所占面积上升。

C04-37 (邀请报告)

元素 C、Si 对 TiAl 金属间化合物微观组织及力学性能的影响

刘咏

中南大学粉末冶金国家重点实验室

TiAl 金属间化合物密度低, 强度高, 高温力学性能优异, 是目前航空航天领域热门的轻质高强结构材料, 但其本征脆性导致其加工变形性能较差, 严重限制了其应用。在 TiAl 金属间化合物引入较高含量的 β 相, 可显著提高材料的高温变形性能, 是近年来该领域的重要发展趋势。但 β 相的高温强度较低, 严重影响材料的高温力学性能, 尤其是高温蠕变性能。本报告介绍了变形性能优异的新型 Ti-45Al-3Fe-2Mo (at.%) 的成分设计, 探讨了间隙元素 C、Si 对材料的微观组织、高温变形行为、高温蠕变性能等的影响, 结果表明: 添加 C、Si 元素能有效调整材料的微观组织(包括相组成、晶团尺寸、层片间距等), 提高材料的高温强度, 降低材料的稳态蠕变速率和蠕变变形量; 第二相(碳化物、硅化物等)的弥散析出可强化晶界, 并细化晶团的层片间距, 从而提高材料的高温力学性能。以上研究对开发新一代低成本、高性能 TiAl 金属间化合物具有重要的指导意义。

C04-38 (邀请报告)

Hf 及 Zr 合金化对 Nb-Si 基超高温合金组织及性能的影响

郭喜平, 郑林林, 乔彦强

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

采用真空非自耗电弧熔炼法制备了六种多元 Nb-Si 基超高温合金, 名义成分为 Nb-22Ti-15Si-5Cr-3Al-xZr-yHf (at.%) (x, y 取为 0, 0; 0, 4; 4, 0; 4, 2; 4, 4; 2, 2), 并对上述合金进行 1450°C/50 h 的高温均匀化热处理, 研究 Zr 及 Hf 合金化对电弧熔炼态及热处理态合金组织的影响。对电弧熔炼态及热处理态试样进行显微硬度测量, 并对电弧熔炼态合金进行 1300°C 高温压缩性能测试, 揭示 Zr 及 Hf 合金化对合金力学性能的影响。对上述六种成分的合金进行 1250°C 的高温静态氧化实验, 氧化时间分别为 5 和 100 h, 对氧化膜厚度、单位面积氧化增重、氧化膜的结构及相组成进行分析, 研究 Zr 及 Hf 合金化对 Nb-Si 基超高温合金高温抗氧化性能的影响。

六种电弧熔炼态合金的相组成均为 Nbss 和 $(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ (X 代表 Ti、Cr、Zr 和 Hf 等元素), Zr 和 Hf 的添加会影响 $(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ 的晶型, 不添加 Zr 和 Hf 的合金硅化物为 $\alpha(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$, 当合金中添加 Zr 或 Hf 时均可以抑制 $\alpha(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ 的形成, 并促进 $\gamma(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ 的形成, 且当 (Zr + Hf) 的含量等于或大于 4 at.% 时, 合金中的 $\alpha(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ 被完全抑制, 其硅化物仅为 $\gamma(\text{Nb}, \text{X})_5\text{Si}_3$ 。

经过 1450°C/50 h 热处理后, 添加 Zr 或 Hf 的合金其组成相没有发生变化, 仍为 Nbss 和 $\gamma(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$; 不添加 Zr 和 Hf 的合金其硅化物为 $\alpha(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$ 和 $\gamma(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$, 说明高温热处理使得 $\alpha(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$ 部分转变为 $\gamma(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$, 也即 Zr 和 Hf 在高温下具有稳定 $\gamma(\text{Nb},\text{X})_5\text{Si}_3$ 的作用。热处理后, 原电弧熔炼态合金中的共晶组织基本消失, 大块初生硅化物棱角变圆润。

Zr 和 Hf 的添加对电弧熔炼态合金中 Nbss 的显微硬度无显著影响, 但是却提高了硅化物的显微硬度。此外, Zr 和 Hf 的添加对 Nb-Si 基超高温合金高温压缩性能无明显影响。

六种合金在 1250°C 下氧化 5 或 100 h 后的氧化膜均发生了脱落, 氧化膜明显分为两层, 在残余基体上部存在内氧化区。不添加 Zr 和 Hf 的合金抗氧化性能最差; 单独添加 Zr 或 Hf 可以轻微改善合金抗氧化性能; 同时添加 Zr 和 Hf 可以较大幅度改善合金抗氧化性能, 但 Hf 含量过高 (4 at.%) 降低合金的抗氧化性能。

C04-39

原位合成 MoSi₂-SiC 复合材料的低温氧化行为

张来启, 段立辉

北京科技大学新金属材料国家重点实验室

MoSi₂ 具有较高的熔点, 较低的密度, 优异的高温抗氧化能力, 与金属同水平的导热性及低的热膨胀系数, 被认为是继 Ni 基高温合金与 TiAl 基金属间化合物合金之后出现的极具竞争力的超高温结构材料。研究了不同 SiC 体积分数原位合成 MoSi₂-SiC 复合材料在 500°C、700°C 和 900°C 静止空气中 1000h 的长期氧化行为。六种材料 500°C、700°C、900°C 1000h 氧化后, 均未发生“pest”现象。复合材料的氧化抗力明显好于单一 MoSi₂, 原位合成复合材料的氧化抗力好于外加复合材料(热压商用 MoSi₂ 粉末和 SiC 粉末混合物), 原位合成 MoSi₂-30vol%SiC 抗氧化性能最好。500°C、700°C 材料的氧化过程主要是氧与 MoSi₂ 的作用, SiC 未发生氧化, 而 900°C 时 SiC 也同时发生了氧化。500°C 复合材料的氧化动力学曲线明显分为: 孕育期、快速氧化期和稳态三阶段; 700°C、900°C 的动力学曲线都没有发生明显的分歧现象, 材料的质量变化都很小, 仅相当于 500°C 孕育期阶段。500°C 氧化膜的宏观形貌大致相似, 都为浅黄色, 棱处有裂纹; 700°C、900°C 则都为黑色, 氧化膜致密, 表面和棱处都没有裂纹出现, 且无剥落现象。XRD、SEM-EDS 和 XPS 窄谱分析结果表明: 500°C 氧化膜相组成为 MoO₃、非晶 SiO₂ 和 b-SiC, 700°C 氧化膜仅为非晶 SiO₂, 而 900°C 氧化膜表层为连续致密的 α -SiO₂ (α -石英), 下层为 Mo₅Si₃。500°C 硅、钼的同时氧化导致 50h 时氧化物中有大量晶须形成, 致使连续、致密的 SiO₂ 保护膜难以形成, 因而氧化抗力不足; 700°C 由于 MoO₃ 的挥发较快, 无晶须形成, 材料表面快速形成一薄层非晶 SiO₂ 保护膜; 900°C 则发生硅的选择性氧化, 其氧化机理不同于 500°C 和 700°C 条件下的硅、钼同时氧化。正是这种自发形成的致密 SiO₂ 保护膜, 使得材料表现出优异的氧化抗力。

C04-40

铸造 Ti-22Al-25Nb 合金显微组织及拉伸性能

朱郎平^{1,2}, 黄东¹, 路新², 曲选辉², 南海¹

1. 北京航空材料研究院

2. 北京科技大学

研究了 Ti-22Al-25Nb 铸造凝固组织, 分析了其在 $\alpha_2+\beta/\text{B}2$ 两相区热等静压和 $\alpha_2+\beta/\text{B}2+\text{O}$ 三相区退火热处理过程中合金显微组织的变化, 并分析了其塑性提高的原因。该合金铸造原始凝固组织为魏氏组织, 由 $\beta/\text{B}2$ 基体及 α_2 、O 相板条、细小针状 O 相组成, 组织中存在疏松缺陷; 经过 $\alpha_2+\beta/\text{B}2$ 两相区热等静压, 组织中部分 α_2 相板条通过 $\beta/\text{B}2+\alpha_2\rightarrow\text{O}$ 包析反应形成 O/ α_2 核壳结构, 对性能的影响, 屈服及断裂强度分别为 937 和 817MPa, 延伸率 1.8%; 经过 $\alpha_2+\beta/\text{B}2+\text{O}$ 三相区退火, 晶界 α_2 及板条 O、板条相趋向球化, 形成等轴 α_2 相和等轴 O 相, 屈服及断裂强度降低 40MPa 左右, 延伸率提高到 6.2%。

C04-41

Ti-22Al-25Nb 合金在多步热处理过程中的显微组织演化及原位 EBSD 研究

许琴, 唐斌, 寇宏超, 李金山, 周廉

西北工业大学

Ti-22Al-25Nb 合金具有比强度高、密度低、高温性能优异等特点, 是一种在航空航天领域具有广泛应用前景的轻质高温金属结构材料。该合金显微组织通常由 O、B2 和 α_2 三相构成, 相变机制较复杂, 显微组织演化丰富。本文研究了固溶-退火-时效三步热处理制度下的 Ti-22Al-25Nb 合金显微组织演化规律。结果表明, 在 960°C~1060°C 固溶主要影响等轴 α_2 相数量, 随着固溶温度的升高等轴 α_2 相数量减少。在 750°C~960°C 退火及时效主要影响板条 O 相的尺寸, 粗板条 O 相与细板条 O 相的体积分数: 随着退火温度的升高, 析出 O 相的尺寸增厚, 粗板条 O 相体积分数增加, 细板条 O 相体积分数降低; 随着时效温度的升高, 板条 O 相粗化及等轴 α_2 相外沿 Rim O 相增厚速率增大。随后, 针对 B2 单相组织、O+B2 组织及 B2+ α_2 组

织三种显微组织状态,分析了原位拉伸条件下的晶粒取向变化与各相的塑性变形行为。结果表明,在初始状态,多相显微组织的平均 KAM 值大于单相显微组织,并且随着第二相的体积分数的增加,平均 KAM 值增大。三种状态的组织在拉伸后平均 KAM 值均增加,少量晶粒发生转动,在拉伸过程中三种显微组织的表面均有滑移带产生,且滑移带宽度大小顺序是: $L_{B2} > L_{B2+\alpha2} > L_{O+B2}$ 。

C04-42

Ta 对新 β 型 γ -TiAl 基合金板材组织与性能的影响

罗媛媛, 吴金平, 毛小南, 张菁丽, 杨帆, 郭荻子, 赵彬

西北有色金属研究院

本文以 Ti-42.5Al-2Cr-0.2W 与 Ti-42.5Al-2Cr-0.2W-3Ta 合金板材为研究对象,采用 OM, SEM 和 TEM 等技术,系统分析了 Ta 对两种合金的加工态与热处理态的显微组织及硬度的影响规律与内在的机制变化。结果表明:加工状态下,未含 Ta 的组织中片层粗大且原始 α 晶粒较多;含 Ta 的组织片层细小均匀,再结晶晶粒数量多,原始 α 晶粒少。热处理状态下,含 Ta 的组织中片层球化趋势增加,其中 B2 相易分解为 $\alpha2+\gamma$ 。热处理时间延长,未含 Ta 的合金组织内的晶团长大速度更快。TEM 分析发现:含 Ta 的合金板材组织中存在更多的 β 相以及少量的 ω 相,不含 Ta 的组织中 β 相少且无 ω 相。此外,硬度分析发现含有 Ta 的 γ -TiAl 合金板材硬度值低于不含 Ta 的合金板材,这与片层细小及 β 、 ω 相的数量有关。

C04-43 (邀请报告)

镍基高温合金复杂铸件的集成计算与智能化工艺设计

疏达,汪东红,康茂东,孙宝德

上海交通大学

随着航空发动机镍基高温合金铸件向大型化、薄壁化、精密化的方向发展,传统的经验模式已无法满足研发需求。因此,基于集成计算材料工程(ICME)和材料基因工程(MGI)的思想,构建从铸件数字化设计-浇冒系统设计-蜡模制造-充型凝固等关键流程的仿真模型与优化方法,开展凝固组织、缺陷与性能的预测,是缩短研发周期、实现可控成型与全流程制备的有效途径。

本研究首先通过有限元数值模拟得到铸件凝固过程中的宏观温度场与流场,提取铸件特征结构处的局部凝固条件;再通过建立合金凝固传输过程的格子玻尔兹曼(LB)模型,耦合基于元胞自动机(CA)方法的多元合金枝晶生长模型,模拟了凝固微观组织的演化过程。对高温服役条件下铸件组织、有害脆性相与缺陷的演化进行表征,测试不同组织特征与含缺陷样品的常规力学性能和疲劳性能,采用晶粒度和疏松指数等作为输入参数,以抗拉强度和伸长率作为输出参数构建了“组织-缺陷-常规力学性能”预测模型;同时,基于组织-缺陷的定量表征结果,构建了含缺陷试样疲劳以及疲劳与蠕变交互作用下的寿命预测模型。

在铸件凝固组织与缺陷集成计算的基础上,融合人工智能算法对铸件浇注系统进行了智能化设计,使工艺出品率提高20%以上,缩短了研发周期,降低了成本。

C04-44 (邀请报告)

单晶高温合金涡轮叶片定向凝固过程多尺度建模与仿真

许庆彦,杨聪,闫学伟,张航,唐宁,柳百成

清华大学

高温合金单晶涡轮叶片作为航空发动机的关键热端部件,其组织结构直接影响叶片的服役性能。采用定向凝固法生产单晶叶片的工艺窗口狭窄,易形成缺陷,产品合格率低。数值模拟技术可以计算单晶叶片定向凝固过程温度场分布,预测疏松、杂晶等缺陷的形成以及辅助工艺优化方案的制定,为定向凝固生产提供理论及技术支持。本文建立了高温合金铸件定向凝固过程宏观温度场数学模型,针对高速凝固法(high rate solidification, HRS)和液态金属冷却法(liquid metal cooling, LMC)两种定向凝固工艺,采用了不同的界面换热模型处理传热问题。在微观尺度上,使用了镍基高温合金凝固过程的晶粒形核模型,并采用了元胞自动机(cellular automaton, CA)模型和 KGT 生长模型来描述晶粒组织的生长。计算中,宏观模型与微观模型双向同步耦合,实现了温度场和晶粒组织的数值模拟。针对高温合金的枝晶组织生长研究,建立了改进的 CA 模型,同时考虑温度场和溶质场耦合控制的枝晶生长模型,实现了三维条件下高温合金定向凝固过程枝晶组织的生长模拟。研究了 DD6 单晶高温合金定向凝固中枝晶生长及形态演化过程,分析了一次、二次枝晶臂间距与溶质分布,得到的模拟结果与实验结果吻合良好。针对实际单晶涡轮叶片铸件,开展了宏微观耦合的定向凝固数值模拟。宏观上研究了不同抽拉速度对温度场、糊状区形貌及宽度的影响,微观上研究了晶粒组织的形貌和铸件不同截面处的枝晶组织形貌变化。针对模拟结果,分析了杂晶

等缺陷的成因,提出了基于模型的多级变速优化技术。采用优化拉速开展单晶叶片定向凝固生产,实现了多级变拉速的优化控制工艺,减少了杂晶等缺陷产生,叶片制造合格率明显提高。

C04-45

Thermodynamic calculations and experimental observations of the effect of Nb on grain boundary B segregation behavior in powder processed Ni-based superalloys

antonov stoichko¹,Chen wei²,Huo jiajie¹,Feng qiang¹,Isheim dieter^{3,4},Seidman david n.^{3,4},Tin sammy²

1.Beijing Advanced Innovation Center of Materials Genome Engineering, State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing

2.Illinois Institute of Technology

3.Department of Materials Science and Engineering, Northwestern University

4.Northwestern University Center for Atom Probe Tomography (NUCAPT)

Trace boron concentrations in Ni-based superalloys are considered to be beneficial to the creep properties of the alloy. Despite its importance, it is not well understood whether these improvements are associated with the presence of elemental boron or stable borides along the grain boundaries. Even though the predictive capability of CALPHAD database models for Ni-based superalloys have improved over the years, some discrepancies may still persist around compositionally heterogeneous features such as grain boundaries. Two experimental powder-processed Ni-based superalloys containing elevated levels of Nb were evaluated using APT and were found to exhibit increased solubility for B in the γ matrix when compared to similar commercial Ni-based superalloys. This resulted in an overall lower B concentration at grain boundaries that suppressed boride formation, further promoting TCP phases. DFT calculations were used to understand the effect of the elevated B concentration on the unit cell of the matrix phase. In order to optimize trace element addition to improve mechanical properties, the fundamentals behind their behavior must first be understood.

C04-46

Ni-Cr-W 合金中纳米析出相 Ni₃(Cr,W,Ti)的热稳定性及强韧化作用

胡锐,高翔宇,杨劭人,许文强

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

Ni-Cr-W 基高温合金为固溶强化合金,其显微组织主要为单相 γ 固溶体,如仅三 Ni、Cr、W 三个组元不会析出析出相,而其他微合金元素的添加可使 Ni-Cr-W 合金一些析出超点阵结构的析出相。众所周知,适当添加 Al 和 Ti 元素可以使 Ni 基合金中很容易析出大量 L12 型 γ' 相 (Ni₃Al) 和 DO₂₄ 型 Ni₃Ti 相,随 Al 和 Ti 含量增加,这些析出物可以从纳米级迅速增加到微米级起到很明显的提高高温蠕变性能的作用,然而, Ti 和 Al 两种元素的含量增加添加也会使合金的塑性性能下降。为使 Ni-Cr-W 合金保持高塑性并进一步提高性能,我们发现在 Ni-Cr-W 高温合金中加入中适量 Ti 和 Al 元素后,合金中析出了一种纳米级的完全共格超点阵相,使合金屈服强度显著提高的同时塑性不会显著降低。3DAP 分析结果表明,它是纳米级 DO₂₂ 型 Ni₃(Cr,W,Ti)完全共格超点阵相,该超点阵相不仅仅使合金的变形机制从滑移转变为孪生,并且使 Ni-Cr-W 合金的屈服强度提高近了三倍。此外, Ni₃(Cr,W,Ti)有较高热稳定性,在 700°C 热处理 1500 小时之后,依然维持纳米级尺寸,并没有出现明显的粗化。这是具有极慢扩散速率的 W 元素以及稳定共格界面控制着 Ni₃(Cr,W,Ti)的粗化速率的结果,从而使其表现出极高的热稳定性。同时, Al 元素的适当添加也使得 Ni-Cr-W 合金中也析出了纳米级完全共格且具有四方结构的超点阵相 DO₂₂ 型 Ni₃(Cr,W,Al)相,不同于传统的 L12 型 γ' 相 (Ni₃Al)。改相的析出不仅有效强化高温合金,而且提高合金抗氧化性能。

C04-47

Ni₃Al 相析出强化 CrCoNi 多主元合金凝固特性和变形机理研究

甘斌,张家晨,刘鑫鑫,张军,刘林

西北工业大学

目前,卫星技术、载人航天和月球探测等方面的空间任务很频繁,高可靠性、长寿命和轻量化是未来航天器设计与制造的焦点。作为主体骨架,航天器结构承受和传递载荷,服役环境极其恶劣,提升构件的强韧性、显微结构稳定性、耐辐照和抗冲击能力是确保航天器安全服役的关键。单主元合金设计理念以一种金属或金属间化合物为主(通常>50%),通过合金化和加工工艺的优化,获取最佳性能。多主元合金设计思想颠覆了这一经典概念,极大拓展了材料开发空间。本研究通过采用 X 射线衍射分析、差示扫描量热仪、扫描电镜、透射电镜和 Thermo-calc 等实验和模拟手段,揭示了 Ni₃Al 相沉淀强化 CrCoNi

多主元合金的凝固特性和宏微观尺度下的低温变形机理。研究表明 Al 和 Ti 的添加显著降低 CrCoNi 多主元合金固相线和液相线温度, 扩大凝固区间, Al/Ti 比对析出相的类型和析出顺序有显著的影响。拉伸实验和显微分析的结果表明, 选择合适的初始晶粒尺寸和预先扭转变形量, 可以将该材料在液氮环境下的屈服强度从 600MPa 提高到 1850MPa, 形变诱发的纳米孪晶三维结构起着增强增韧的关键性支撑作用。调控出具有纳米晶、纳米孪晶、纳米 Ni₃Al 析出相和微米晶的多层级纳米结构, 可以显著提高 CrCoNi 多主元合金的显微结构稳定性和强韧性。结合该合金优越的耐辐照和抗腐蚀性能, 以及在冲击条件下突出的吸能效率和防护效果, 极有希望能拓宽 CrCoNi 合金的应用范围, 获取显著的航天器构件应用价值。

C04-48

新型粉末冶金高温合金成分和工艺的设计

刘锋,谭黎明,刘咏,江亮

中南大学粉末冶金国家重点实验室

粉末冶金高温合金的合金化程度高, 成分设计时需要考虑的因素繁多, 同时, 加工流程复杂、加工窗口窄, 如何有效设计、优化粉末冶金高温合金的生产工艺也是一个亟待解决的难题。本工作将从成分和工艺两个方面, 介绍粉末冶金高温合金研发可以用到的一些高通量、集成式快速设计的方法。

特别地, 新型粉末冶金高温合金在成分设计的过程中, 需要考虑密度、强度、抗蠕变、组织稳定性、热加工性能等多重因素, 在选定各个元素成分范围时, 结合了国内外现有粉末冶金高温合金的成分-性能数据, 同时, 参考最近一些最新的研究结果, 如: 调控 Co、Ti、Ta 等元素含量对提高多晶高温合金的性能有有益的作用。最终, 通过正交设计、热力学计算和成分-性能模型, 从 8 万余种预选成分中, 筛选出 1~2 种有发展潜能的新型合金成分。

如何快速确定热加工、热处理工艺参数也是发展新型粉末冶金高温合金的重要一环, 采用模拟计算软件可以快速确定热加工参数对材料塑性流动、组织演变的影响, 同时, 采用双圆锥台热压缩等高通量试验方法, 可以有效验证不同应变、温度、应变速率作用下, 材料的组织响应行为, 可以快速找到合理的热加工工艺参数, 减少亚/全尺寸试验的次数, 缩短研发周期。

C04-49

高洁净粉末高温合金真空连铸制备技术

李尚平,骆合力,曹栩,王建涛,韩少丽

钢铁研究总院高温所

夹杂物是影响粉末高温合金涡轮盘稳定服役和成品率的关键因素, PREP 和 EIGA 工艺制备粉末中的夹杂物主要来源于电极棒, VIGA 工艺制备粉末的夹杂物含量也与母合金的洁净度息息相关。因此, 从电极棒源头上控制夹杂物的数量和尺寸是获得高洁净度粉末的根本途径。

国外曾经尝试采用真空感应+电渣重熔+真空自耗的三联冶炼工艺制备高洁净的粉末高温合金电极棒, 但该工艺成本昂贵, 仅限于实验室探索, 目前工业生产中仍采用传统的真空感应熔炼模铸为主, 基于顶铸、无持续钢水补缩、钢模容易变形的特点, 模铸生产的电极棒存在洁净度不高、致密性差、平直度不高等问题, 影响粉末夹杂物控制、细粉收得率和成材率提高。

本文选取当前应用最广的二代粉末高温合金 FGH96 为研究对象, 采用钢铁研究总院自主创新开发的真空水平连铸技术制备出了高洁净的 FGH96 合金电极棒, 并用大样电解对比分析了真空连铸和传统模铸工艺制备的 FGH96 合金电极棒夹杂物含量, 结果表明, 1.15kg 棒料中, 传统模铸工艺棒料中含有 32 颗夹杂物, 其中尺寸为 80~140 μ m 的夹杂物 17 颗, 80~140 μ m 夹杂物 15 颗, 主要为氧化铝、氧化硅及其复合氧化物; 真空连铸工艺棒料中只含有 1 颗夹杂物, 尺寸为 80~140 μ m, 夹杂物数量和尺寸远远低于模铸棒料, 结晶化效果非常明显。

分析认为, FGH96 合金熔体中主要包括自生成的氧化铝、氧化钛夹杂物和坩埚外来夹杂物氧化硅, 这些夹杂物因比重远低于合金熔体而浮于熔池顶部, 传统模铸工艺制备电极棒时, 熔炼好的钢液经过浇流槽, 采用顶铸的方式浇注进入钢模中, 在浇铸过程中, 不可避免地会将浮于钢液表面的夹杂物和浇流槽中的非金属材料带入铸棒, 而造成母合金的污染。而真空连铸工艺采用底铸出钢方式, 合金熔体在水冷铜模中直接连续底铸成形, 夹杂物浮于熔池顶部远离充型区, 避免了传统工艺所必须的浇流槽、过滤器、保温棉等非金属材料的二次污染, 从而可显著降低铸坯中的夹杂物数量。

研究表明, 钢铁研究总院最新开发的真空水平连铸技术是理想的高品质粉末高温合金棒料的制备技术, 制备的 FGH96 合金电极棒夹杂物含量较之传统真空熔炼模铸工艺成数量级降低。采用真空连铸工艺制备粉末高温合金电极棒, 可从材料源头上解决粉末高温合金夹杂物超标问题, 显著提升粉末高温合金涡轮盘等制品洁净度和成品率, 实现粉末高温合金高性能低成本制备。

C04-50 (邀请报告)

铂族元素 Os 在镍基高温合金中作用的探索研究

张义文,贾建,黄虎豹

钢铁研究总院

随着航空发动机的发展,对用作涡轮盘、涡轮叶片的镍基高温合金承温能力和性能水平提出了更高要求。镍基粉末高温合金涡轮盘的工作温度已由最初的 650°C 逐步提升到 750°C。镍基单晶高温合金叶片合金已从第一代的无 Re 合金发展到第二代含 3% Re、第三代含 6% Re,以及在高 Re 基础上加入 Ru、Pt、Ir 等元素的第四代和第五代合金。

Re 元素通过降低 γ' 强化相的长大速率、在基体中形成短程有序的原子团,阻碍位错运动,能获得比传统的固溶强化更明显的强化效果,从而提高镍基单晶高温合金的承温能力。Ru 元素的固溶强化效果显著,通过反分配效应减小 Re 等元素在基体中的偏聚程度,降低 TCP 相的析出倾向,提高合金的组织稳定性和高温强度。在元素周期表中,Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt 的性质很相近,统称为铂族元素。Os 和 Ru 同属于 VIII 族元素,且与 VIIIB 族的 Re 元素相毗邻,表明 Os 与 Re、Ru 的理化性质相近,由此推断 Os 在镍基高温合金中的强化效果与 Re、Ru 类似。

本文以钢铁研究总院自主设计的高 W 高 Ta 型镍基粉末高温合金(NPM02)为基础,该合金的 γ' 强化相含量约 60%、化学成分(质量分数,%,下同)为:0.03-0.10 C,0.01-0.06 B,0.01-0.06 Zr,4.0-12.0 Cr,3.0-8.0 W,1.0-5.0 Mo,10.0-20.0 Co,2.5-7.0 Al,2.5-7.0 Ti,1.0-4.0 Nb,3.0-8.0 Ta,0.10-0.80 Hf,余 Ni。在 NPM02 中添加 2% 的 Os 制备含 Os 合金,并在 NPM02 中添加 2% 的 Ru 制备含 Ru 合金,对比分析 Os 的作用。通过等离子旋转电极法制粉+热等静压+热处理工艺制备 3 种试验合金锭坯,分别为 NPM02、NPM02+2%Ru、NPM02+2%Os,将 3 种合金的热处理态试样在 750~1100°C 进行最长 3000h 的长期时效处理。

研究表明,Os 主要进入 γ 基体,增大 γ 相晶格常数,从而提高了固溶强化效果;Os 对 γ' 强化相的尺寸、形貌、数量影响不大;Os 有助于提高合金的高温组织稳定性,提高合金的室温、815°C 拉伸强度,屈服强度可提高 50~70MPa。

与含 Ru 合金对比分析表明,Os 抑制 TCP 相析出倾向的效果与 Ru 相当,但固溶强化效果高于 Ru,说明 Os 在镍基高温合金中是有益的强化元素,为更高承温能力镍基粉末高温合金、单晶高温合金的设计和开发提供一定的实验依据。

C04-51

镍基高温合金粉末的氧化行为

许文勇,李周,袁华,刘玉峰,刘娜,张国庆

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

粉末氧含量是粉末高温合金的重要指标,对粉末高温合金的微观组织和力学性能有较大的影响。高温合金粉末氧化行为与表面氧化物的研究,对于粉末表面脱气、控制粉末氧含量及后续热变形具有重要的意义。本文通过 X 射线光电子谱 XPS、俄歇电子谱 AES 等方法对镍基高温合金 FGH96 粉末进行表面成分和逐层溅射分析,然后结合扫描电镜 SEM(带 EDS 能谱)方法进行了粉末表面形貌和成分分析,较为深入研究了镍基高温合金 FGH96 粉末的氧化行为,探索了高温合金粉末的氧化机制。结果显示,由于粉末比表面积大,其表面形成了富 Ni、Cr、Ti 等元素的致密稳定的氧化物或氢氧化物,氧化层厚度约为 10nm,另外粉末表面还物理吸附了单质氧和游离水。

C04-52

PREP 法制备 DD5 高温合金球形粉末的研究

董志国¹,王庆相²,王鸣¹

1. 沈阳发动机研究所

2. 西安欧中材料科技有限公司

利用超高速等离子体旋转电极法,采用不同的制粉工艺参数制备了 DD5 高温合金球形粉末,通过 OM、XRD 和 SEM 等分析测试方法对不同粒度的粉末进行了分析表征,采用粉体综合测试仪和激光粒度分析仪等对粉体性能进行了测试;建立理论计算模型对粉末粒度分布进行了计算模拟并与制粉结果进行了对比分析。研究表明:PREP 法制备的 DD5 高温合金球形粉末球形度达到 98% 以上,空心粉比例小于 0.1%;粉末为典型的快冷组织,制粉前后成分未发生偏析,O、N 增量小于 50ppm。理论模型计算发现,制粉转速和功率是影响粉末粒度分布的主要因素,计算获得的粒度分布图与实验结果相匹配。

C04-53

超塑性锻造态 FGH96 合金组织和内部残余应力表征研究

冯业飞, 周晓明, 张哲维, 邹金文, 汪武祥

中国航发北京航空材料研究院先进结构材料重点实验室

本文对挤压态 FGH96 合金进行超塑性等温锻造制备 $\Phi 80$ 亚尺寸盘, 通过电子背散射 (EBSD)、扫描电镜 (SEM) 和透射电镜 (TEM) 对盘件不同部位的晶粒组织、析出相以及内部亚结构进行了表征分析, 并通过中子衍射对盘件不同部位内部残余应力进行表征研究。结果表明: 经过超塑性变形的亚尺寸盘晶粒组织均匀, 不同部位晶粒尺寸处于 $4\sim 5\mu\text{m}$ 范围内, 仍是等轴晶粒, 没有明显取向; 经过缓冷处理的亚尺寸盘不同部位析出相组织无明显差异; 通过 TEM 发现, 盘件内部位错含量极少, 超塑性的变形机制主要是晶界迁移; 不同部位内部残余应力普遍较低, 主要是由于超塑性变形降低了内部残余应力, 径向应力是主应力。

C04-54

热等静压技术在高温合金加工中的应用

郝传龙

匡德机械科技(上海)有限公司

20 世纪中期以来, 由于航空发动机工作温度的提高, 对叶片涡轮盘合金的热强性能提出来进一步的要求, 使高温合金合金化程度不断提高, 服役合金的强化相比比例不断增加, 于是出现了复杂合金化与加工困难的矛盾。叶片涡轮盘制备出现以铸代锻, 粉末冶金趋势。

这些成形方法会出现偏析, 缩孔, 微裂纹等缺陷。本文通过对 718 合金和 ERBO-1A 合金在 URQ 热等静压炉热等静压及热处理组合处理来展示热等静压如何改善这类缺陷, 改善微观组织, 从而改善工件性能。从而证明热等静压加上热处理组合是粉末冶金及精密铸造高温合金件很好的后续处理方式。

墙展

C04-P001

一种 850°C 级镍基变形盘材料的弯曲晶界热处理工艺研究

黄烁, 赵光普, 张北江, 张文云, 秦鹤勇, 胥国华

钢铁研究总院

GH4975 合金是一种 850°C 级镍基变形高温合金涡轮盘材料, 与俄 ЭП975 合金相近, 采用铸-锻变形工艺制备, 是一种高 γ' 相含量 (近 60%) 的等轴多晶材料。随着服役温度提升变形高温合金的晶界逐渐成为薄弱环节, 如何解决 850°C 以上晶界弱化问题是 GH4975 合金涡轮盘制备的关键技术。本文利用热力学计算与差热分析研究 GH4975 合金第二相的析出行为, 在此基础上制定合金弯曲晶界热处理工艺。利用金相、SEM、EBSD 与 EPMA 测试分析经不同热处理工艺后合金的弯曲晶界与第二相特征, 对比分析室温与 850°C 拉伸性能、850°C/410MPa 持久性能及其断口形貌。结果表明, 等温热处理过程中晶界 γ' 相的快速析出与粗化是诱发合金晶界弯曲的直接原因; 等温热处理温度过高晶界 γ' 相不析出, 过低晶界 γ' 相析出同时晶内 γ' 相也大量析出, 导致合金强度降低; 合理的弯曲晶界热处理可在小幅降低合金强度的基础上, 提高晶界的抗裂纹扩展能力, 进而改善合金 850°C 拉伸塑性与持久塑性。

C04-P002

固溶温度对 GH4151 合金组织及力学性能的影响规律

唐超, 曲敬龙, 毕中南, 杜金辉, 张继

钢铁研究总院高温材料研究所

主要研究内容:

GH4151 合金 (国外牌号 эк151) 是一种由新型难变形镍基高温合金, 该合金除含大量的 Cr、Mo、W 等固溶强化元素外, 时效强化元素 Al、Ti、Nb 之和接近 10wt.%, γ' 相含量最高达 60 wt.%, 强化相含量超过了 Udimet710、Udimet720Li 以及 эп742 、 эк79 、 эп975 等高强度难变形高温合金。该合金的较佳使用温度为 750~850°C, 在国外大量应用于高性能涡轴发动机、涡桨发动机、辅助动力装置和部分高推重比涡扇发动机中, 该合金也能作为我国新一代高性能航空发动机的涡轮盘选材。GH4151 合金优异的性能主要源于其细晶组织、高的 γ' 相含量和多种尺寸 γ' 相的合理匹配, 但该合金的显微组织和力学性能

对固溶温度极其敏感。研究材料为两联冶炼（VIM+VAR）工艺制备的 $\Phi 150\text{mm}$ 棒材，试样在箱式热处理炉中不同固溶温度（ 1100°C 、 1120°C 、 1130°C 、 1140°C 、 1150°C 、 1160°C 、 1170°C ）下保温 4h，随后油冷，最后统一进行 850°C 和 760°C 双时效处理。通过金相显微镜、EBSD、场发射扫描电镜、Photoshop 和 Image ProPlus 图像分析软件对不同固溶处理后合金的晶粒尺寸、 γ' 相形貌、尺寸及含量进行统计分析，再结合力学性能的结果综合分析其影响规律。为通过优化热处理制度稳定和提升 GH4151 合金的性能提供了理论依据。

主要研究结果及结论：

（1）合金一次 γ' 相和晶粒尺寸与固溶温度（ T_s ）的关系密切。当 $T_s < 1140^\circ\text{C}$ 时，一次 γ' 相和晶粒尺寸基本无变化；当 $T_s \geq 1140^\circ\text{C}$ 时，一次 γ' 相随着固溶温度的升高而溶解，导致一次 γ' 相尺寸减少、相间距变大，晶粒尺寸随着固溶温度的升高而变大； $T_s = 1170^\circ\text{C}$ 时，一次 γ' 相完全回溶，其对晶界的“钉扎”作用消失，晶粒尺寸最大。

（2）随着固溶温度的升高，合金室温强度先升高再降低。当 $T_s < 1140^\circ\text{C}$ 时，室温强度随固溶温度的升高而升高；当 $T_s > 1140^\circ\text{C}$ 时，室温强度随固溶温度的升高而降低。

（3）固溶温度对一次 γ' 相的影响规律是热处理调整 GH4151 合金力学性能的关键。提高固溶温度，一次 γ' 相回溶，其对晶界的“钉扎”作用减弱，会使晶粒尺寸变大，导致细晶强化效果减弱；但一次 γ' 相的回溶，也会增加冷却 γ' 相含量，提高 γ' 相析出强化效果。

C04-P003

GH4169 合金时效过程残余应力演化的原位实验表征与有限元分析

秦海龙^{1,2}, 毕中南^{1,2}, 张瑞尧³, Tung-lik Lee⁴, 卢霖¹, 郭霞⁵, 迟海⁵, 董洪标³, 杜金辉^{1,2}, 张继^{1,2}

1. 钢铁研究总院

2. 高温合金新材料北京市重点实验室

3. 莱斯特大学工程学系

4. ENGIN-X ISIS

5. 北京市理化分析测试中心

GH4169 合金在 650°C 以下具有较高的强度和塑性、良好的抗疲劳和耐腐蚀性，因而成为航空、航天、石油化工及核能等领域大量应用的关键材料。为了达到足够的强化水平，GH4169 合金工件通常需要在高温固溶处理后淬火，以确保 γ' 和 γ'' 强化相在此过程中不过分粗化。然而，淬火过程中锻件内部不同区域无法同步冷却。温差形成的热应力会造成不均匀的塑性变形，从而在冷却后的锻件中形成较大梯度的残余应力分布。而在时效过程中，伴随着 γ' 和 γ'' 的析出，高量级的淬火残余应力部分释放。时效后的残余应力状态直接影响了精加工和服役过程，因而深入探知时效过程中残余应力的演化行为与规律十分重要。

本研究利用原位中子衍射实验分别从时效升温过程、等温过程和空冷后三个阶段表征了残余应力的演化行为，深入分析了残余应力的演化规律及松弛机制，并建立了基于析出相变影响的有限元模型。该模型综合考虑了析出相变造成的体积变化、本构关系以及蠕变变形的影响。结果显示，升温过程中材料屈服强度逐渐降低，超过屈服强度的残余应力（等效应力）通过塑性变形的方式进行释放，圆盘中心处旋向/径向残余拉应力的量级从淬火后的 341 MPa 降至 228 MPa ，释放量占 33%；等温过程中，残余应力主要通过蠕变变形的方式进行释放，伴随着强化相的析出，材料强度逐渐增加，蠕变速率减慢，因此应力松弛主要发生在时效早期阶段，总释放量约占 15%。在其后的空冷过程中，残余应力几乎保持不变。

C04-P004

GH4738 合金在固态热处理过程中的静态再结晶行为

王建国¹, 刘东¹, 王海平¹, 胡阳¹, 杨艳慧¹, 秦卫东²

1. 西北工业大学

2. 陕西宏远航空锻造有限责任公司

GH4738 合金在 760°C 以下具有很高的抗拉强度和持久强度， 870°C 以下具有优良的抗氧化性，较适用于航空发动机盘件。本文通过对双锥试样近等温压缩获得的 GH4738 合金试样进行固溶处理，研究变形温度、变形量、固溶温度对其静态再结晶行为的影响，并结合实际锻件生产获得提出了合理的固溶热处理工艺。结果表明：GH4738 合金在固溶过程中能够发生静态再结晶过程，随变形温度的升高，静态再结晶晶粒尺寸增加；静态再结晶完成时，变形量对静态再结晶晶粒尺寸的影响较小。随固溶温度的增加，静态再结晶驱动力增加，晶粒长大趋势明显。通过变形温度、变形量及固溶温度的合理匹配，可以通过静态再结晶获得均匀细小的 GH4738 显微组织。

C04-P005

850°C级镍基变形高温合金 GH4975 涡轮盘组织控制及其制备技术

张文云,田强,张北江,黄烁,赵光普,秦鹤勇,胥国华

钢铁研究总院

本研究采用的材料为 GH4975 合金。GH4975 合金是一种沉淀强化型镍基变形高温合金涡轮盘材料,沉淀强化相 γ' 相的含量为 58%,长时使用温度可达 850°C、短时可达 950°C。经研究发现,通过“双真空冶炼+多重循环热机械开坯+等温锻造+过固溶热处理”,可以制备满足燃气涡轮发动机 850°C 使用的变形高温合金锻盘件。

本研究的重点之一是开坯制度。研究发现,通过在 γ' 相全溶温度上下进行反复墩拔,可以得到 $\gamma + \gamma'$ 双相细晶组织。其中, γ' 强化相包括两种:尺寸为 2 μm 左右(12%)的 γ' 主要在大角度晶界上分布;尺寸为 7 μm 左右(18%)的 γ' 相以等轴晶粒存在。测试结果表明,双相细晶组织有高塑性,表现了良好的成型性。此外,分别采用 1215°C 和 1120°C 的过固溶和亚固溶两种热处理制度,研究了热处理对 GH4975 合金组织性能的影响。研究发现:亚固溶处理晶粒度为 9-10 级,其 800°C/480MPa 持久寿命大于 50h,但是室温屈服比预想的要低;过固溶处理晶粒度为 4.5 级,其 850°C/410MPa 持久寿命大于 100h,950°C/180MPa 持久寿命大于 40h,室温屈服强度大于 1000MPa。

总之, GH4975 具有很高的热强性能,是现阶段使用温度最高的变形高温合金涡轮盘材料。采用双真空冶炼+多重循环热机械开坯+热模/等温锻造+过固溶热处理制备该合金的涡轮盘,可以控制其显微组织和力学性能,能满足燃气涡轮发动机 850°C 使用的变形高温合金锻盘的要求。

C04-P006

不同冶炼工艺对高温合金 GH4738 纯净度的影响

陈正阳¹,杨树峰¹,曲敬龙²,李京社¹,谷雨²

1.北京科技大学

2.钢铁研究总院

随着航空航天领域对高温合金的性能要求越来越高,人们发现高温合金中各种类型夹杂物的存在或有害元素的含量偏高均会导致其纯净度的降低,从而对高温合金的安全稳定服役造成巨大威胁。为避免此种现象的发生,人们应加强对高温合金纯净度的管控,而冶炼工艺对于提高高温合金的纯净度至关重要。因此,本文分别采用真空感应熔炼+真空自耗重熔双联冶炼工艺和真空感应熔炼+电渣重熔(氩气保护)+真空自耗重熔三联冶炼工艺对高温合金 GH4738 进行冶炼,利用氧氮氢分析仪、碳硫分析仪、ICP-OES、XRD、SEM-EDS 等手段分析比较了两种不同冶炼方式下高温合金铸锭中部分元素的含量、夹杂物的类型和尺寸、产生白斑缺陷的概率,系统地研究了不同冶炼工艺对高温合金纯净度的影响。结果表明,在有害元素控制方面,虽然两种不同冶炼方式所得高温合金中有害元素的含量均符合技术要求,但是三联冶炼工艺可将高温合金中有害元素的含量控制在更低的水平。其中,双联冶炼工艺可将高温合金 GH4738 中的 N、S、O 分别降低到 57ppm, 20ppm 和 12ppm;三联冶炼工艺可将高温合金 GH4738 中的 N、S、O 分别降低到 56ppm, 7ppm, 8ppm。在夹杂物管控方面,采用三联冶炼工艺所得高温合金不仅包含较少的夹杂物种类,而且形成夹杂物的尺寸更小。其中,采用双联冶炼工艺所得高温合金 GH4738 主要包含 4 种夹杂物类型: Ti(C,N)-MoS 复合夹杂物、Ti(C,N)复合夹杂物、Ce-MoS 夹杂物及 SiC 夹杂物;采用三联冶炼工艺所得高温合金 GH4738 主要包含 2 种夹杂物类型: Ti(C,N)-MoS 复合夹杂物和 Ti(C,N)复合夹杂物。在产生白斑缺陷方面,三联冶炼工艺可将高温合金中形成白斑缺陷的概率降为最低。由此可见,采用三联冶炼工艺制备的高温合金具有更高的洁净度与稳定性。

C04-P007

GH4720Li 合金在定向凝固过程中的微观偏析研究

曲敬龙¹,郝卫星^{1,2},杨树峰²,杜金辉¹

1.钢铁研究总院高温材料研究所

2.北京科技大学冶金与生态工程学院

GH4720Li 合金具有较高的使用温度和高温强度,因而成为 650-750°C 高性能航空发动机变形涡轮盘的首选材料。然而, GH4720Li 合金 Al、Ti 元素之和高达 7.5wt.%,高合金化易加剧工业铸锭的微观偏析程度。在铸锭凝固过程中,凝固速率是影响微观偏析产生的最重要原因之一,不同的凝固速率对微观偏析产生不同的影响,因此需对凝固速率和微观偏析的两者间的规律进行深入探究。

本文通过区域熔炼液态金属冷却定向凝固方法,在 3 $\mu\text{m/s}$ -60 $\mu\text{m/s}$ 的凝固速率范围内对 GH4720Li 合金进行定向凝固试

验,利用光学显微镜(OM)、场发射扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)等实验室手段,研究不同凝固速率下的枝晶形貌分布,偏析相的组织特征,深入分析了偏析元素在枝晶干和枝晶间区域的变化规律,建立凝固速率与微观偏析的关系。结果显示,一次和二次枝晶间距随着凝固速率的增加均减小,枝晶结构细化。随着凝固速率的增加,偏析共晶相($\gamma+\gamma'$)的尺寸减小,数量增加且分布更为弥散,偏析相的形貌由葵花状转变为扇形。在定向凝固过程中,Co、Cr、W偏析于枝晶干,为正偏析元素;Mo、Ti、Al偏析于枝晶间,为负偏析元素。随着凝固速率的增加,Ti等主要偏析元素的偏析程度有逐渐增加的趋势。

C04-P008

冷变形对GH4169合金蠕变行为的影响

张宏军,李冲,刘永长,郭倩颖,黄远,李会军

天津大学材料科学与工程学院水利安全与仿真国家重点实验室

变形镍基高温合金GH4169由于其650℃以下优异的抗疲劳和蠕变性能,是广泛使用的发动机涡轮盘材料。GH4169合金具备出色的可加工性,根据所需组织形态及力学性能,可通过锻造、热轧、冷轧等方式成型。用于制造涡轮盘时,通常采用锻造成型。而冷变形的GH4169合金,可作为发动机中的紧固件材料。冷变形改变了GH4169合金的基体组织结构(如引入位错、特殊晶界等),加速第二相的析出动力学,并影响其析出形貌,对力学性能产生影响。此外,冷变形会提高基体的强度,产生的位错与析出相产生交互作用,将会对高温蠕变过程产生影响。因此,本工作研究了冷变形对GH4169合金高温蠕变行为的影响。将不同冷变形的GH4169合金进行直接双时效处理,在650℃,650/700MPa条件下进行蠕变试验。结果表明:冷变形改变了强化相 γ'' 的析出形貌,进而导致了蠕变性能的变化。冷变形改变了 γ'' 的析出形貌,沿[001]方向, γ'' 相由交叉析出变为单一取向析出,形貌由长棒状变为椭球状,平均尺寸降低。蠕变过程中, γ'' 沿形态与尺寸变化很小,发现了 γ'' 相被位错切割形貌。适量的冷变形大大提高了抗蠕变性能,蠕变寿命由1219h增加到2541h。而过大的冷变形(70%)加速了有害相的析出,恶化了组织稳定性,蠕变寿命降低至233h,且使得蠕变断裂机制由穿晶+沿晶混合型断裂变为纯剪切断裂。

C04-P009

固溶处理对优质GH738合金组织及力学性能的影响

曲敬龙,荣义,唐超,毕中南,杨成斌,杜金辉

钢铁研究总院

目前,国内GH738合金大多用于民用烟汽轮机的热端部件,主要考核合金的高温持久性能。近年来,基于日益发展的国防战略需求,在原有GH738合金良好性能的基础上,发展出了满足航空发动机涡轮盘高压、高温、高转速等苛刻服役条件下应用的优质GH738合金。作为典型的 γ' 相沉淀强化型合金,优质GH738合金的强度源于两种尺寸 γ' 相与晶界强化的良好匹配,而调节固溶处理制度正是改良这种匹配从而优化合金性能的关键所在。本文系统地研究了固溶温度、原始晶粒尺寸及化学成分变化对优质GH738合金组织及力学性能的影响,旨在为调整和优化优质GH738合金的热处理制度提供参考。本研究利用系列固溶试验、结合光学金相显微镜、场发射扫描电子显微镜、EBSD、JmatPro模拟计算和基本力学性能测试等手段,系统地研究了固溶制度对航空发动机涡轮盘锻件用优质GH738合金组织及力学性能的影响。最终发现,优质GH738合金的组织及力学性能对固溶温度最敏感,其最终的力学性能是两种尺寸 γ' 相分布、静态再结晶软化以及晶粒尺寸细化和长大共同作用的结果:临界静态再结晶温度即为其 γ' 相全溶温度;原始锻态细晶的形变储存能及界面能高,合金再结晶和晶粒尺寸长大更快,但略高于再结晶温度时,混晶严重,性能略差;高(Al+Ti)含量使得优质GH738合金具有更高的再结晶温度,同时增加了基体中强化相 γ' 相的含量,最终不论何种原始晶粒尺寸,其强度都高于普通GH738合金。适当提高亚固溶温度或延长保温时间,可以更大限度提高合金双时效过程中二次 γ' 相含量,从而提高合金强度。

C04-P010

不同初始状态GH984G合金的热变形行为及动态再结晶机理

吴云胜^{1,2},刘状^{1,3},王常帅¹,秦学智¹,郭永安¹,范闵宁¹,周兰章¹

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学材料科学与工程学院

3.昆明理工大学材料科学与工程学院

应用Gleeble-1500热模拟试验机对铸态及热轧态GH984G合金进行热压缩实验,变形温度为900-1200℃,应变速率为0.01-10 s⁻¹,工程应变为50%。根据动态材料模型建立不同初始状态合金的热加工图,采用光学显微镜(OM)、电子背散射衍射(EBSD)及透射电镜(TEM)研究合金热变形过程中的动态再结晶行为。结果表明,变形温度及应变速率影响铸态合

金热变形过程中的再结晶机理, 未经变形的铸态合金极大的初始晶粒尺寸导致其变形协调性较差, 因此随着变形温度的降低及应变速率的升高, 动态再结晶机理由非连续动态再结晶(原始晶界凸起形核)向连续动态再结晶(亚晶旋转合并长大形核)部分转变, 即当 Zener-Hollomon 参数值较低(高温低应变速率)时, 晶界迁移能力强, 易发生弓弯现象, 铸态合金主要的再结晶机理为非连续动态再结晶; 而当 Zener-Hollomon 参数值较高(低温高应变速率)时, 位错运动受阻, 大量塞积于原始晶界并阻碍晶界运动, 限制了非连续动态再结晶的发生, 此时铸态合金的主要再结晶机理为以亚晶旋转合并长大形核为主要特点连续动态再结晶。铸态合金最佳变形温度区间为 1100-1200 °C, 最佳应变速率区间为 0.01-0.2 s⁻¹, 此时铸态合金发生完全动态再结晶, 晶粒大小均匀, 平均晶粒尺寸约为 20μm。热轧态合金存在较多变形位错, 且晶粒细小, 变形协调性好, 在各个变形条件下均以非连续动态再结晶为主。热轧态合金最佳变形温度区间为 1000-1200 °C, 最佳应变速率区间为 1-10 s⁻¹。模拟合金热变形过程中应充分考虑合金初始状态对动态再结晶机理及热变形最优参数的显著影响。

C04-P011

先进变形高温合金的固体颗粒冲蚀磨损的实验分析与数值模拟

曹夕¹, 文波¹, 曲敬龙^{2,3}, 新巴雅尔¹

1. 内蒙古工业大学
2. 钢铁研究总院高温材料研究所
3. 高温合金新材料北京市重点实验室

变形高温合金在发动机涡轮盘等领域应用广泛, 目前涡轮盘受到低通量、小粒径砂粒的高速冲蚀产生的磨损现象引起人们的大量关注。本研究采用真空感应炉+真空电弧重熔工艺制备两种变形高温合金材料 GH720Li 和 GH738。采用平均直径 700μm, 硬度为 1050HV 的不规则形状的 SiO₂ 颗粒作为冲蚀粒子, 通过改变冲击角度及冲蚀速度, 研究实验材料的固体颗粒冲蚀磨损特性。冲击角度分别为: 30°、60°、90°, 冲蚀速度分别为: 25m/s、32 m/s、40 m/s、55 m/s。同时, 在本文中, 通过 ANSYS LS-DYNA 有限元模拟软件建立冲蚀磨损动态模型, 研究在非线性材料模型中, 单颗粒冲击靶材表面时, 冲击角度、冲蚀速度对靶材表面的弹塑性行为的影响, 从而分析不同角度不同速度下冲蚀磨损机制。实验结果与冲蚀 FEM 模型的综合分析表明: 变形高温合金在遭受冲蚀磨损过程中, 其冲蚀损伤量和磨损表面变形的行为, 都与冲蚀速度和冲击角度的依赖关系明显, 从而得出在冲击角度和冲蚀速度的配合下的“切削磨损”和“变形磨损”机制与材料表面变形行为有内在关系。这为涡轮盘材料与结构设计提供基础数据。

C04-P012

涡轮盘用 GH4742 合金在室温和 700°C 下的低周疲劳特性

孔维文^{1,2}, 袁超¹, 张宝宁¹, 秦鹤勇³, 赵光普³

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
3. 钢铁研究总院高温材料研究所

研究了 GH4742 合金在室温和 700 °C 下的低周疲劳行为, 通过分析两种温度下的应变-疲劳寿命数据和循环应力应变响应数据, 给出了 GH4742 合金的应变疲劳参数。结果表明, 疲劳寿命随着总应变幅的增加明显降低, 应变幅和疲劳寿命之间的关系可以用 Coffin-Manson 关系来描述, 基于塑性应变能理论的 Morrow 模型可以很好的预测 GH4742 合金的低周疲劳寿命。从循环应力应变响应曲线可以看出, 合金在室温高应变幅下先发生循环硬化, 随后发生循环软化, 而在 700 °C 下合金主要表现为循环硬化, 这归因于循环变形过程中位错与 γ' 相的作用方式不同。TEM 表明, 在室温下位错与 γ' 相的作用方式主要为切割机制, 在 700 °C 下位错与 γ' 相的作用方式主要为 Orowan 绕越和切割混合机制。SEM 表明, 疲劳裂纹起始于样品表面, 室温下合金的断裂方式为穿晶断裂, 700 °C 下合金的断裂方式为穿晶和沿晶混合断裂。

C04-P013

温度对镍基高温合金 Haynes 282 拉伸行为的影响

张鹏^{1,2}, 袁勇¹, 巩秀芳³, 尹鸿飞¹, 杨明³, 谷月峰¹, 王锦程²

1. 西安热工研究院有限公司
2. 西北工业大学
3. 东方汽轮机有限公司

通过拉伸试验机研究了温度对镍基高温合金 Haynes 282 拉伸性能的影响, 采用 SEM 和 TEM 对合金的断口形貌和变形后位错组态进行了观察和分析。结果表明, 600 °C 以下, 合金的屈服强度和断口伸长率基本相同; 随着温度进一步升高, 合

金的强度显著的降低，而拉伸塑性显著提高。室温到 600℃，合金断裂方式为沿晶断裂和穿晶解理断裂，主要的变形方式为位错对切割 γ' 颗粒；随着温度升高，合金断裂方式由沿晶断裂和穿晶解理断裂逐渐转变为穿晶韧窝断裂，主要的变形方式为由位错对切割 γ' 颗粒转变为位错绕过颗粒。基于这些试验结果，讨论了合金拉伸性能与强韧化机理之间的关系。

C04-P014

一种 800℃以上使用 Ni-Co-Cr-W 镍基高温合金铸态组织及开坯开裂研究

向雪梅,董建新

北京科技大学

涡轮盘是发动机的重要热端部件，随着航空发动机逐步向高性能、高可靠性、大型化的方向发展，对高温合金涡轮盘的承温能力和力学性能的要求不断提高。一种 Ni-Co-Cr-W 镍基高温合金因其具有较高的合金化程度，使其在 800℃保持了较高的力学性能水平。其中，Co、Cr、W 元素对合金进行综合固溶强化；高 Al、Ti 含量可以提高的 γ' 相质量分数及稳定性；Nb 含量的添加可以减缓 γ' 相的聚集过程，同时提高 γ' 相和固溶体的热稳定性。

本研究通过光学显微镜 (OM)、场发射扫描电镜 (FESEM)、X 射线衍射 (XRD)、DSC 热分析法、相萃取分析、热模拟压缩等研究方法，给出了该 Ni-Co-Cr-W 合金铸态组织、元素偏析、合金的熔点以及主要析出相的回溶温度，并对热压缩以及实际开坯过程的开裂原因进行了详细的研究分析。研究发现铸态组织中的析出相为 γ' 相、富 Nb 和 Ti 的一次碳化物。 γ' 相的回溶温度约为 1220℃，一次碳化物的回溶温度约为 1360℃比合金的熔点高约 50℃。纳米硬度分析表明一次碳化物的硬度约为基体的 2 倍，在开坯过程中易引起开裂；另外，由于 C 元素主要存在于大块的一次碳化物中使晶界上贫乏析出相，导致晶界结合力较低从而使裂纹主要沿原始晶界和再结晶晶界扩展。本研究对发展使用温度 800℃以上高性能涡轮盘有重要意义，可以为热加工窗口较小的合金提供加工依据。

C04-P015

GH3044 合金激光焊接接头的组织和力学性能研究

王晓光,刘奋成,周宝升,吕飞阅,陈悦

南昌航空大学

对航空发动机火焰筒、燃烧室所采用的 GH3044 高温合金进行了光纤激光自熔焊对接实验，研究了不同热输入下的焊缝形貌、组织特征、力学性能，分析了焊缝金属凝固过程中的相变及元素偏析。结果表明：随着热输入的增加，焊缝横截面的面积逐渐增大，截面形貌呈典型的“P”形；焊缝金属由柱状晶组成，其中上部、下部焊缝为较为粗大柱状晶，焊缝中部的柱状晶尺寸较小，熔合线附近区域为细小树枝晶，热输入较小时，焊缝中心位置有等轴晶生成；焊缝组织主要为 γ 相、共晶(γ +M₆C) 相以及 W (Cr) 体心立方相，EDS 分析表明合金元素的微观偏析较弱；热影响区组织变化较小，但焊缝、热影响区的硬度均高于母材，接头的断裂位置为焊缝，主要原因为焊缝变形的不协调性；随着热输入的减小，焊接接头的硬度、抗拉强度逐渐增大，抗拉强度最大为 865MPa，伸长率为 42%。

C04-P016

不同热处理制度对新型变形镍基高温合金微观组织与拉伸性能的影响

吕少敏^{2,1},贾崇林¹,何新波²,张丰麟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.北京科技大学新材料技术研究院

摘要 随着航空发动机、燃气轮机等工作温度越来越高，对其热端材料提出了更高的要求，研发承温能力更高的压气机、涡轮盘用新型镍基高温合金有着非常重要的意义。本文对一种新型变形镍基高温合金分别采用两种不同的热处理制度并进行了室温、高温拉伸试验。采用光学显微镜、扫描电子显微镜进行微观组织和断口形貌观察，研究了不同热处理工艺对合金拉伸行为及断裂特征的影响。结果表明：相比固溶+时效热处理工艺，预退火+固溶+时效的工艺，能够明显提高合金在室温和 750℃条件下的拉伸性能；不同热处理制度下，分别对预退火、固溶态、时效态的微观组织进行观察，发现预退火+固溶+时效的工艺能够明显细化晶粒，起到细晶强化的作用；经预退火处理后，锻态缓冷后聚集长大的二次 γ' 相迅速细化，并在随后的固溶时效处理后，呈现大量近立方+近球形的混杂形貌特征搭配，起到更优强化作用。

C04-P017

新一代镍基高温合金涡轮盘智能控冷装置研究

张文云,田强,张晓敏,刘军建,张北江

钢铁研究总院

服役温度 700°C 以上的高性能、难变形镍基高温合金涡轮盘材料已成为今日国内外的研发重点,例如美国已大量商业应用新一代镍基 Rene65 (国内 GH4065A) 合金,热处理是其最关键的工艺环节之一。只有在高精度热处理工艺和先进锻压技术的配合下,才能保证涡轮盘的服役可靠性、盘件组织的均匀性、高的使用性能和最小的性能分散性,进而在批量生产的条件下实现盘件质量的稳定性和经济性。

高性能高温合金的强化相含量超过 35%, γ 基体中 γ' 相形成元素的过饱和度,在固溶后的冷却过程中极易析出 γ' 相。固溶后冷速对析出 γ' 相的尺寸、数量、形貌会产生显著影响,直接影响组织性能,因而如何控制固溶后冷速是难变形高温合金热处理研究的重点。

目前,国内高温合金涡轮盘的固溶后冷却工艺只有常规的空冷、油冷、盐浴等,采用常规冷却涡轮盘不同部位会存在较大的冷速差异。固溶后冷速差异大,则易引起盘锻件中组织性能波动,同时易产生较大内应力不利于盘锻件的精密机加工,严重时甚至导致盘锻件直接开裂报废。针对此问题,美国研制出高性能高温合金涡轮盘专用的控冷设备用于固溶后冷速的控制,有效解决了盘锻件组织性能波动大、内应力大等问题。

鉴于此,为了解决我院最新开发的 GH4065A、GH4975 等难变形高温合金涡轮盘材料热处理后组织性能波动问题,研发基于数值模拟与智能控冷热处理设备。

采用数值模拟与智能流量控制相结合的方式,实现了涡轮盘固溶冷却速度的定量控制,解决了困扰 GH4065A、GH4175 等高 γ' 相含量 (大于 35%) 合金快速固溶冷却过程中内应力大、以及各部位性能分散性大的问题,而且相较于传统冷却工艺,此工艺过程简单、工艺稳定高,为批量稳定生产高性能涡轮盘奠定了基础。

C04-P018

激光功率对激光熔覆 GH3039 镍基高温合金的宏观质量以及微观组织的影响

吴云鹏^{1,2},刘勇^{1,2},京玉海^{1,2},饶锡新^{1,2},罗兰^{1,2},李聪聪²

1.南昌大学前湖校区机电工程学院

2.江西省轻质高强结构材料重点实验室

为了研究激光功率对激光熔覆 GH3039 镍基高温合金的组织的影响规律,利用送粉式激光熔覆技术制备 GH3039 镍基高温合金熔覆层。采用金相显微镜分析熔覆层的宏观尺寸及其微观结构。结果表明:熔覆层的宏观质量——熔高、熔宽、熔深,随着激光功率的升高,分别呈下降、基本不变、变深的趋势,进而得知熔覆层的接触角与稀释率均呈先下降后上升的趋势,因此当激光功率为 2000W~2200W 时,熔覆层的质量符合要求。而由于熔覆层的温度梯度分布不均,其微观组织的形态分布也不同,从熔覆层的底部至顶部分别出现平面晶、胞状晶、柱状晶以及等轴晶,并随着激光功率增大,组织逐渐粗化。这是由于激光功率增加,熔池内能量密度提高,从而凝固时间加长,微观组织更加粗大。综合上述分析,本研究建立了激光功率与宏观质量之间的数学模型,并揭示了熔覆层微观组织的形成机制。

C04-P019

镍基难变形高温合金 GH4720Li 热变形过程动态软化机制研究

万志鹏¹,王涛¹,孙宇²,李钊¹,李佩桓¹,胡连喜²

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.哈尔滨工业大学

GH4720Li 合金作为一种沉淀强化型镍基高温合金,其主要用于制备燃气涡轮发动机中涡轮盘、涡轮叶片等关键转动部件。合金中添加了大量的高熔点固溶强化元素 (如: Mo、W、Co 等) 和 γ' 强化相形成元素 (Al、Ti),从而满足了近些年来航空发动机关键热端部件对材料耐高温与高强度的要求。该合金通常采用热加工方式成形不同形状的锻件,其在热加工过程中常常伴随着微观组织的转变过程。大量研究表明,对于具有低层错能的金属材料 (如: 镍、铜、奥氏体钢及其合金),其主要动态软化机制为非连续动态再结晶,即再结晶晶粒以原始晶界弓弯的方式形核并通过晶界迁移过程逐渐长大,该过程能够有效的消除变形晶粒内的位错亚结构。而对第二相颗粒强化型材料,合金中强化相能够通过钉扎作用阻碍晶界的弓弯与晶界的迁移,从而抑制 DDRX 行为的发生。本工作中,GH4720Li 中存在大量的沉淀强化相颗粒,主要强化相 γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 为 Cu_3Au 型 L1_2 面心立方有序结构) 含量超过 40%,且 γ' 相质量分数随着温度的升高逐渐降低,因此不同热变形温度下强化相

具有不同的分布规律,强化相对材料热变形过程中动态软化行为的影响也不尽相同。本文以锻态 GH4720Li 镍基沉淀强化型高温合金为研究对象,对合金进行了不同工艺参数下热压缩试验。采用 OM、SEM 和 EBSD 研究了合金在不同热变形工艺参数下的动态软化机制,分析了热压缩过程中再结晶晶粒的形成和晶粒内亚结构的演变规律。研究表明,合金在本工作中所有热变形工艺参数下均发生了非连续动态再结晶行为。变形组织分析表明高温低应变速率能够抑制非连续动态再结晶行为的发生,而提高应变速率能促进非连续动态再结晶行为,且能够获得等轴状尺寸均匀的晶粒组织。未完全溶解细小 γ' 强化相的钉扎作用能够使变形晶粒内形成了高密度位错亚结构和亚晶界,亚晶界角度通过连续的吸收位错而不断的升高,进而以“沉淀相诱发连续动态再结晶”方式生成形成细小的再结晶晶粒组织。不同热变形工艺下孪晶界的演变规律分析得到,热变形温度与应变速率通过影响合金的动态再结晶行为来改变孪晶界的数量。

C04-P020

钒元素对一种沉淀强化型铁镍基变形高温合金组织性能的影响

段然^{1,2},贺玉伟^{1,2},胥国华¹,黄烁¹,王磊²,赵光普¹

1.北京钢铁研究总院高温材料研究所

2.东北大学材料科学与工程学院

难熔金属元素钒(V)是钢中最常用的强化元素之一,主要通过 V(C,N)析出影响材料的组织和性能。一般认为,高温合金中添加 0.1-1.0wt% 的 V 元素可以通过固溶强化和 V(C,N)析出改善性能,如 A286、IN100、 ЭK151 、 ЭK79 等合金。此外,C276、Hastelloy B 等镍基耐热合金添加 0.10-0.35wt% 的 V 元素可提升合金在酸或熔盐中的钝化能力。然而,国内外高温合金仅少数牌号添加了 V 元素,V 元素对变形高温合金组织性能影响的研究很少报道。

GH4061 合金是一种新型的含 V 元素(0.1-1.0wt%)沉淀强化型铁镍基变形高温合金,主成分与 IN718 合金类似,在 253°C~750°C 温度范围内具有优异的力学性能和抗烧蚀性能。本文以 GH4061 合金为研究对象,研究 V 元素含量(0%、0.2%、0.4%、0.8%)对合金显微组织和性能的影响。利用热力学计算、电化学萃取相分析、扫描和透射电镜观察等方法研究了 V 元素对合金晶粒度、碳化物和 γ' 和 γ'' 强化相等显微组织的影响,测试了不同 V 含量试样的室温、650°C、750°C 拉伸性能和 750°C/460MPa 持久性能,探讨了 V 元素对合金显微组织和力学性能的影响机制。结果表明,GH4061 合金中添加 V 元素促进 MC 型碳化物析出,增大 γ 基体的晶格常数,提高强化相含量和尺寸;V 元素添加可细化晶粒改善拉伸和持久性能,尤其有利于 750°C 抗拉强度。

C04-P021

均匀化态 GH3625 热加工图及管材热挤压

陈建军,丁雨田

兰州理工大学

采用 Gleeble 3800 热模拟试验机对经过两段式均匀化处理后的 GH3625 合金电渣锭进行热变形行为研究。从而得到铸锭 GH3625 合金真应力-应变曲线,建立铸态 GH3625 合金的热加工图,确定了安全的可加工区域。通过对铸态 GH3625 合金热变形过程中的组织演变进行研究,得到 GH3625 合金的完全再结晶所对应的应变速率及温度。通过热加工图及组织演变分析,在 1150°C 下进行 GH3625 合金管材热挤压试制。研究结果表明:在同一应变速率下,随着温度的升高,峰值应力逐渐降低,在同一温度下,随着应变速率的增加,峰值应力反而升高;GH3625 合金安全的可加工区域中基本上存在再结晶晶粒,再结晶晶粒首先开始于变形量大的呈锯齿状和弓形的晶界以及晶粒内部,随后以项链状的形态出现,最后随着变形温度的升高发生完全的再结晶显微组织。成品管材的平均晶粒尺寸为 20.18 μm ,抗拉强度为 755MPa,延伸率为 52.88%,性能指标达到 ASTM-B163-04 国际标准。

C04-P022

GH4720Li 镍基高温合金成分设计的热力学与第一性原理分析

谢兴飞^{1,2},邢辉³,曲敬龙^{1,2},杜金辉^{1,2}

1.钢铁研究总院高温材料研究所

2.高温合金新材料北京市重点实验室

3.上海交通大学材料科学与工程学院

本研究首先利用相图计算(Calculation of Phase Diagram, CALPHAD)方法来分析多组元合金的平衡态相图,计算 GH4720Li 镍基高温合金的热力学性能。借助热力学软件 JMatPro,从合金设计要求、微观组织稳定性以及合金工艺性能出发,微调对合金强化析出行为影响较大的合金元素含量(Mo、Al 和 Ti),从中筛选出了最优的合金成分,计算了合金的初

熔温度、密度、 γ' 相体积分数、 γ/γ' 相错配度、TCP 相含量、热加工窗口以及糊状区区间等。本研究还利用第一性原理计算分析了 GH4720Li 镍基高温合金中 Cr、Co、W、Mo、Ti、Al 等主要合金元素对镍基固溶体的广义层错能的影响。计算结果表明，合金元素与镍的价电子数差值以及原子半径差值同时影响镍基合金的层错能和不稳定层错能，W 和 Mo 是 GH4720Li 镍基高温合金中最有效的固溶强化元素。

C04-P023

难焊接高温合金 IN-738LC 选区激光熔化成形及其性能研究

张旭^{1,2},汪浩¹,严明²

- 1.深圳大学
- 2.南方科技大学

难焊接高温合金 IN-738LC 被广泛应用于航空发动机和燃气轮机热端部件。制备出其全致密、无裂纹、高性能的 3D 打印件具有重要工程及科学意义。本研究采用旋转电极气雾化方法所制备的球形 IN-738LC 粉末，粉未经多次筛粉、烘粉后，利用激光金属 3D 打印机进行打印（选区激光熔化，SLM）。利用电子密度计、Micro-CT、金相显微镜、扫描电子显微镜研究试块的致密度、内部缺陷和微观形貌，通过拉伸实验测试试块的室温拉伸性能。系统研究发现：(a)基板预热、激光功率、扫描速度、扫描间距等工艺参数均对所成形试样的致密度有重要影响；(b)该合金的选区激光熔化成型工艺窗口小，扫描速度区间在 ± 30 mm/s 以内；(c)在最佳工艺参数下，试块致密度达到 100%。经室温拉伸性能测试，试块的抗拉强度达到了 1010MPa。

C04-P024

高温合金 IN718 高温低周疲劳行为的研究

徐晴昊¹²³, 吴程鑫¹²³, 邓文凯¹²³, 黄再旺^{123*}, 江亮¹²³

- 1.中南大学粉末冶金国家重点实验室
- 2.中南大学粉末冶金研究院
- 3.中南大学高温合金研究所

镍基高温合金 IN718 具有优异的高温力学性能，是目前应用最为广泛的航空发动机高压涡轮盘材料之一。在发动机长期周期性的起飞、降落工作条件下，涡轮盘材料高温低周疲劳性能至关重要。高温合金 IN718 主要强化相为热力学上不稳定的 γ'' 相，然而在超温或者长期服役条件下，这类强化相会转变为热力学上稳定的 δ 相。本文以锻造 IN718 高温合金为研究对象，通过热处理制度设计，分别得到以 γ'' 相和以 δ 相为主要第二相的两种组织，并研究其 350 °C 和 650 °C 应变控制下的低周疲劳下的疲劳行为，断裂特征和位错与析出相的交互作用，并探讨了 IN718 高温合金低周疲劳相关机理，得到以下重要结论：

1.锻造 IN718 合金锻态组织晶粒不规则，经标准热处理后晶粒再结晶充分，晶粒尺寸减小；经 δ 相处理后得到主要为针状 δ 相为主要第二相组成的 IN718 合金。

2.研究 IN718 合金显微组织对拉伸和高温低周疲劳行为的影响，发现以 γ'' 相为主要第二相的 IN718 合金强度较 δ 相处理合金更高，但是延伸率更低。在高温低周疲劳过程中标准热处理合金表现为循环软化，而 δ 相处理合金表现为循环硬化。IN718 合金在高温低周疲劳中疲劳寿命长短与塑性应变大小表现一致，符合塑性应变主导的 Coffin-Manson 关系和能量主导的滞回能关系。

3.研究 IN718 高温合金高温低周疲劳断裂特征，发现疲劳裂纹从表面萌生，疲劳断口在 350 °C 下表现为穿晶裂纹，650 °C 下为沿晶裂纹。 δ 相界面与碳化物界面为裂纹扩展择优路径。通过背散射电子衍射实验证实 δ 相附近具有较大的塑性应变，导致 δ 相处理的合金疲劳裂纹过早萌生。

4.疲劳后亚结构分析表明，经标准热处理合金中 γ'' 相被位错切割，导致该条件合金在高温低周疲劳过程中循环软化。而经 δ 相处理的 IN718 合金中非共格 δ 相阻碍位错运动，位错在 δ 相附近缠结增殖，位错密度不断增加导致 δ 相处理的合金在高温低周疲劳过程中循环硬化。

C04-P025

激光辅助增材制造法制备单晶高温合金的工艺探索、组织结构表征及力学性能测试

雷前,李云平,江亮

中南大学

本文利用固体激光器，利用同轴送粉法在单晶基板上制备出了单晶高温合金块体，通过对单道次和多道次的喷粉成型工艺的深入探索，目前已经制备出具有一定高度的单晶高温合金，结合 EBSD 分析结果确立了单晶组织结构，并结合试验装置

分析了凝固过程中热流的传递方向,通过对基体和增材制造的组织结构进行表征和分析发现,激光增材制造的组织更加均匀细小,同时增材制造的组织力学性能也较基体的有所提高。

C04-P026

一种镍基单晶高温合金长期时效后 γ' 相的粗化动力学

崔仁杰,黄朝晖,管凯,秦健朝,张毅鹏

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

本文研究了第二代镍基单晶高温合金 DD5 长期时效后 γ' 相的粗化动力学,时效温度为 870°C~980°C,时效时间为 150~2000h。研究发现长期时效后 DD5 合金 γ' 相的形貌和尺寸取决于时效温度 (T) 和时效时间 (t),可用形状因子 (F_s) 来表征, γ' 相的粗化尺寸 (r) 可表征为时效温度 (T) 和时效时间 (t) 的函数,通过微观组织观察和形状因子计算表明,在 870°C 和 920°C,2000 小时长期时效中, γ' 相保持较好的立方化结构,具有良好的稳定性,在 980°C、1000 小时长期时效下, γ' 相依然保持立方化结构,1500 小时之后,开始筏化,形状因子从 0.93 下降到 0.36,2000 小时长期时效后形状因子进一步下降到 0.2。根据 Lifshitz-Slyozov-Wagner (LSW, r^3 vs. t) 和界面扩散控制 (TIDC, r^2 vs. t) 动力学模型,讨论了 γ' 相粗化尺寸 (r) 试验结果与理论模型的对比分析, γ' 相的粗化实验数据符合 LSW 和 TIDC 粗化模型,粗化激活能的计算值分别为 261.89 和 224.48 kJ/mol。

C04-P027

铪、硼对一种含铼单晶高温合金的微观组织及偏析行为影响

张剑,赵云松,骆宇时,唐定中

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

本文以一种含铼 (Re) 单晶高温合金为基础,通过添加不同含量的铪 (Hf)、硼 (B) 元素制备了四种研究用合金。四种合金的微量元素添加量分别为 (wt%): 合金 A: Hf 0% B 0%; 合金 B: Hf 0.4% B 0%; 合金 C: Hf 0% B 0.015%; 合金 D: Hf 0.4% B 0.015%。本文采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜和电子探针等方法,对四种合金的微观组织和元素偏析行为等进行了分析,结果表明:添加 0.4% 的 Hf 元素造成铸态合金中 ($\gamma+\gamma'$) 共晶及 MC 碳化物含量增多,并加剧了合金中 Re 和 W 元素的偏析程度;添加 0.015% 的 B 元素造成了铸态合金中 ($\gamma+\gamma'$) 共晶含量增多和骨架状 M_3B_2 硼化物的形成。随着 B 元素的加入,合金中 Re 和 W 元素的偏析程度有所降低;单独或同时加入 Hf、B 元素都会降低合金的液相线温度及初熔温度; M_3B_2 硼化物的形成消耗了合金中的 Re、W、Cr、Mo 等主要强化元素,从而可能导致合金力学性能降低。

C04-P028

Ta 对一种含 Re 抗热腐蚀单晶高温合金铸态组织的影响

马诗华^{1,2},王栋¹,张健¹

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

燃气轮机是实现我国清洁能源战略的关键装备。与航空发动机相比,燃气轮机工况环境更为复杂,燃料中含有易对涡轮部件造成热腐蚀损伤的 V、S 等元素,因此要求燃气轮机叶片材料必须兼有优异的高温力学性能和抗热腐蚀性能。Re 和 Ta 既能提高合金强度,又不恶化、甚至能强化抗热腐蚀性能。但是,考虑到燃机叶片尺寸大,Re 元素贵且不利于合金组织稳定性,发展低 Re 高 Ta 合金可能是提高抗热腐蚀合金承温能力行之有效的方法。为了发展含 Ta (或高 Ta) 抗热腐蚀合金,首先弄清 Ta 对高 Cr 抗热腐蚀合金微观组织的影响显得至关重要。

采用扫描电子显微镜 (SEM)、差示扫描量热仪 (DSC)、电子探针 (EPMA) 等手段对不同 Ta 含量 (2、5、8wt.%) 的一种含 Re 抗热腐蚀单晶高温合金的凝固行为和铸态组织进行了系统的研究,对比分析了 Ta 对含 Re 抗热腐蚀单晶高温合金凝固行为和微观偏析的影响。研究发现:(1) 随 Ta 含量提高,固液相线温度降低,但是凝固区间增大,同时 γ' 的析出温度升高;(2) Ta 的添加增加了一次枝晶间距,改变了 γ' 相的形貌,枝晶间与枝晶干 γ' 相尺寸呈相反的变化趋势;(3) 此外,Ta 的添加改变了合金元素的偏析,降低了负偏析元素 Re、W 的偏析。并围绕 Ta 对铸态组织变化影响进行了深入分析。

C04-P029

热处理对镍基单晶高温合金 CMSX-4 微观组织和持久性能的影响

王欢,宁礼奎,郑志,刘恩泽,谭政,佟健

中国科学院金属研究所

研究了两种热处理工艺对第二代镍基单晶高温合金 CMSX-4 的组织、元素偏析和持久性能的影响。结果表明：铸态下 CMSX-4 合金为树枝晶组织，由 γ 和不规则 γ' 相组成。合金经 1280 °C, 1 h+1290 °C, 2 h+1300 °C, 6 h AC+1140 °C, 4 h AC+870 °C, 16 h AC 多级固溶热处理（工艺 1）后，元素偏析得到明显改善，可以看出强化相 γ' 形状近似立方状，分布趋于均匀，尺寸范围为 300~500 nm。在 980 °C/250 MPa 和 1070 °C/140 MPa 持久条件下的持久寿命分别为 207.50h 和 280.84h。工艺 1 的固溶过程中形成较多固溶微孔，铸态微孔尺寸增大，这些显微孔洞在持久实验中成为合金的裂纹源，使合金发生微孔聚集型断裂。合金经 1321 °C, 3 h AC+1140 °C, 2 h AC+871 °C, 20 h AC 超高温热处理（工艺 2）后，减弱合金元素偏析情况不如工艺 1，可以看出形状近似立方状，分布趋于均枝晶干更整齐，尺寸范围 300~400 nm，在 980 °C/250 MPa 和 1070 °C/140 MPa 持久条件下的持久寿命分别为 293.08 h 和 300.10 h。通过观察合持久断裂的宏观断口特征和微观组织结构特征，发现镍基单晶高温合金的持久断裂过程与微孔含量与 γ' 相尺寸密切相关。

C04-P030

单晶高温合金 DD6 再结晶组织转变过程的 X 射线研究

熊继春,李嘉荣,喻健

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

由于单晶高温合金具有优异的综合性能，已广泛地应用于航空发动机和燃气轮机涡轮叶片材料。DD6 合金是我国研制的具有自主知识产权的低成本第二代单晶高温合金，其力学性能达到或超过国外应用的第二代单晶高温合金性能。由于单晶高温合金不含或少含晶界强化元素，再结晶的出现对单晶高温合金力学性能带来不利影响。因此，近年来，单晶高温合金再结晶研究较多，然而未见关于采用 X 射线研究单晶高温合金再结晶过程的组织转变规律的研究报道。

本文采用组织观察和 X 射线衍射的方法研究了 DD6 合金再结晶过程的组织转变过程，结果表明，没有经过吹砂处理的 DD6 合金的 X 射线极密度分布极不均匀，出现四个较强的衍射斑点，经过吹砂处理的 DD6 合金 X 射线极密度分布与没有经过吹砂处理的 DD6 合金相似，不同之处在于其衍射斑点面积较大。经过吹砂处理后，胞状再结晶在 1100°C 形成，由于存在大量的小的胞状再结晶，其 X 射线极密度分布非常均匀；等轴再结晶在 1300°C 形成，由于再结晶晶粒长大，数量减少，X 射线极密度分布不均匀；二者混合型再结晶在 1200°C 形成，由于还存在较多胞状再结晶，X 射线极密度分布比较均匀。

C04-P031

镍基单晶高温合金蠕变中的位错反应和组态

齐东卿^{2,1},杜奎¹,王栋³,王莉³,祁阳²,张健³,叶恒强¹

1.中国科学院金属研究所沈阳材料国家研究中心

2.东北大学材料科学与工程学院

3.中国科学院金属研究所高温合金研究部

镍基单晶高温合金由于具有较高的承温能力、优异的抗蠕变性能而被广泛应用于制造先进航空发动机和燃气轮机的涡轮叶片。在实际服役过程中，离心应力导致的蠕变损伤是涡轮叶片的主要失效机制之一，因此，蠕变性能是单晶高温合金的一项重要性能指标。

在实际使用中，镍基单晶合金作为涡轮叶片的主要使用材料，在叶片的大部分区域承受着中温高应力的蠕变变形。在镍基高温合金的蠕变变形中， γ' 相的强化作用大大提高了合金的蠕变性能，因此，对 γ' 相变形方式的深入研究。本文主要通过透射电子显微方法（包括像差校正的扫描透射成像技术）研究了单晶高温合金在中温高应力等条件下蠕变时 γ' 相中位错组态的演变。研究发现，合金在 760°C/850MPa 条件下的蠕变初期， γ' 相中就形成大量相互交割的层错，在随后的变形中，层错密度进一步增大。通过双束明暗场成像技术对层错的形成机制进行研究发现，这些层错由两种机制形成，即单位错分解机制（由 $a/2\langle 101 \rangle$ 在界面处分解为 $a/3\langle 112 \rangle$ 和 $a/6\langle 112 \rangle$ 不全位错）和双位错反应机制（由 $a/2\langle 101 \rangle$ 和 $a/2\langle 011 \rangle$ 位错在界面处反应形成 $a/3\langle 112 \rangle$ 和 $a/6\langle 112 \rangle$ 不全位错）。在 760°C/600MPa 条件下的蠕变初期， γ' 相中只含有少量的层错，在与高应力变形相同的应变时， γ' 相中的层错密度远低于高应力条件下的层错密度。统计发现，这些层错主要由双位错反应机制形成，但随着外加应力的升高，由单位错分解机制形成的层错的比例显著增大，这说明，高应力更有利于单位错分解形成层错。当单晶高温合金在更高温度下蠕变变形时， γ' 相中的位错主要由超位错组成，位错核心有致密型和非致密型两种。其中，致密型位错核心的形成，使得位错难以运动，有助于降低合金的蠕变速率，从而提高合金的蠕变性能。

C04-P032

镍基单晶高温合金对接平台内小角度晶界的形成机理及影响因素

霍苗,刘林,杨文超,黄太文,张军,傅恒志

西北工业大学

导向叶片及引晶杆技术的典型结构就是“对接”，而在对接结构中经常出现小角度晶界等铸造缺陷。本研究采用定向凝固技术制备了具有对接结构的单晶试样，通过金相和 EBSD 等测试方法研究了对接平台内小角度晶界的形成机理及影响因素，并结合 ProCAST 的温度场及应力场模拟结果对平台内出现的小角度晶界进行分析。结果表明，不同凝固条件下平台内会产生不同类型的小角度晶界：当抽拉速率较小时，两侧枝晶原始取向的改变是导致平台内小角度晶界的主因；当抽拉速率较大时，严重的侧向散热导致平台内二次枝出现严重的侧向生长，而平台内温度梯度、固-液界面形状及凝固速率的不断波动导致侧生的二次枝在生长过程中产生了取向变化，当再次汇聚的时候就会产生小角度晶界；另一类则是由条纹晶引入的小角度晶界，应力集中区的枝晶变形可能是这一类缺陷形成的主要原因。另外，平台长度和高度的不同会引起平台内温度场的变化，进而影响枝晶的生长和演化路径，最终导致平台内小角度晶界类型的改变。

C04-P033

不同取向第三代单晶高温合金高温低应力蠕变过程中位错组态研究

李一飞^{1,2},王莉¹,楼琅洪¹,张健¹

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

单晶高温合金由于其具有优异的蠕变与疲劳抗力、良好的抗氧化和抗腐蚀性能而被广泛用作航空发动机及燃气轮机叶片材料。随着对高温性能要求的不断提升，发展出了第三代单晶高温合金，其承温能力比第二代高温合金高约 30°C。在高温低应力蠕变条件下，单晶高温合金表现出各向异性。不同取向筏化组织不同，对位错的阻碍作用也有差异；此外，不同取向切入 γ' 超位错类型也不甚明了。因此本文对[001]、[011]、[111]取向第三代单晶高温合金 DD33 进行高温持久性能测试，研究了不同取向基体位错及超位错组态。分别采用选晶法和籽晶法制备[001]、[011]和[111]取向 DD33 单晶棒，对其进行标准热处理并加工持久试样，在 1100°C/150MPa 条件下进行持久实验。采用 OM、SEM、TEM (JEOM-2100) 对上述试样进行微观组织及位错组态观察分析。发现：[001]取向 γ/γ' 相界面形成致密位错网，可有效阻碍位错切入 γ' 。[011]取向界面位错网粗糙，在 γ' 中发现不同于[001]取向的超位错。[111]取向在 γ' 中观察到了超位错及超位错列。[001]取向形成 N-型筏化组织；[011]取向形成 45°筏化；[111]取向形筏方向不均匀，且 γ' 中超位错发生复杂反应。

C04-P034

第四代镍基单晶高温合金时效处理研究及工艺优化

何闯,刘林

西北工业大学

本文针对两种第四代镍基单晶高温合金，研究了不同处理温度和时间对时效组织的影响，对合金时效处理制度进行了优化。实验结果表明，两种合金经 1180°C/4h+870°C/24h 两步时效后， γ' 相平均尺寸约 350~400nm，基体通道中均有明显的细小立方状 γ' 相析出，尺寸约 40~60nm，枝晶间区域 γ' 相界面经常会形成界面凹槽，两种合金的时效组织均匀性均比较差。时效温度降低，经 1160°C/4h 一步时效后， γ' 相平均尺寸略有减小，约 330~360nm，基体相中没有细小的 γ' 相析出， γ' 相界面凹槽形成也有所减少， γ' 相立方度欠佳。时效温度继续降低，经 1140°C/4h+870°C/24h 两步时效后， γ' 相平均尺寸约 320~350nm，基体相中依然没有细小的 γ' 相析出， γ' 相界面凹槽形成较少， γ' 相立方度良好，二次时效对 γ' 相尺寸影响非常有限。一次时效温度对 1#号合金 γ' 相平均尺寸的影响小于 2#号合金。从时效组织均匀性角度看，1140~1160°C 的时效组织均匀性明显好于 1180°C 的时效处理组织。两种合金最佳时效处理制度分别为：1#号合金 1140°C/4h+870°C/24h；2#号合金 1160°C/4h+870°C/24h。

C04-P035

未熔籽晶辅助选晶的方法制备镍基单晶高温合金

胡松松,刘林,杨文超,孙德建,霍苗,黄太文,张军,傅恒志

西北工业大学

镍基单晶高温合金的力学性能具有各向异性，精确控制其晶体取向可以提高单晶叶片的服役寿命。传统的选晶方法制备单晶高温合金时只能控制轴向的一次取向，垂直轴向的二次取向则随机分布。本文提出一种腐蚀后暴露微观组织的短籽晶放入起晶段底部辅助选晶的方法制备具有籽晶取向的单晶铸件。结果表明短籽晶在单晶制备过程中没有明显的熔化现象。只有

少量晶粒在未熔籽晶上形核，与籽晶取向一致的晶粒在横截面上所占面积可以达到 40%以上。经螺旋选晶器选晶后，最终获得的单晶取向与籽晶基本一致。未熔籽晶上端部分被一层厚度小于 10 μm 的 Al_2O_3 和 SiO_2 （模壳材料）覆盖，去除模壳后籽晶与铸件自然分离，未熔籽晶上端经抛光腐蚀后可以重复使用。本方法在不显著提高选晶法制备单晶铸件成本的基础上实现了晶体取向的精确控制。

C04-P036

新型单晶高温合金固溶热处理制度研究

岳晓岱,韩梅,李嘉荣

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

为设计新型单晶高温合金固溶热处理制度，研究了不同固溶热处理对一种高难熔元素含量单晶高温合金组织和成分的影响。使用差示扫描量热法和金相法分析合金相变规律，使用场发射扫描电子显微镜观察合金显微组织，使用电子探针测试合金微区成分，结合热力学方法分析试验结果。研究表明：合金初熔温度随均匀化程度提高而明显升高；相比于延长固溶时间，提高固溶温度可获得更好的均匀化效果。根据上述研究结果设计合金固溶热处理制度，第一级保温温度为 1330 $^{\circ}\text{C}$ ，明显高于现有典型单晶高温合金；最高一级保温温度为 1350 $^{\circ}\text{C}$ ，比铸态合金初熔温度高约 12 $^{\circ}\text{C}$ ；自开始升温至保温结束共约 590min，固溶热处理周期较短。使用上述方法固溶热处理后，该单晶高温合金获得了均匀的合金组织，且未发生初熔。

C04-P037

一种单晶高温合金薄壁圆筒在拉-扭交互载荷下的安定性研究

张镇,张健,楼琅洪

中国科学院金属研究所

工程结构体常在多轴、循环载荷的条件下服役。弹塑性材料的结构体在循环载荷下会出现不同的反应，即纯弹性、弹性安定性、棘轮效应、塑性安定性和塑性失效。其中，弹性安定性、棘轮效应和塑性安定性为三种在循环载荷下结构体介于弹性极限和塑性失效之间的弹-塑性反应。如果一个弹塑性材料的结构体在初始的循环周期内出现塑性变形，并且在随后的循环周期中都能以弹性的方式反应，则结构体安定。

单晶高温合金以其优异的性能，常在多轴、循环载荷以及多种形式载荷的交互作用下服役。关于单晶高温合金疲劳、蠕变等领域的工作已有很多研究，而基于弹塑性理论的安定性行为的研究尚未开展深入的研究工作。将安定性行为引入到单晶高温合金结构体的研究工作，可以实现对单晶高温合金结构体在循环载荷以及多种形式载荷交互作用下的寿命预测和失效分析，也可以利用有限元的模拟对结构进行优化、减重。

本文的研究工作采用基于 ABAQUS 软件的有限元模拟和 Python 脚本语句，编译了适用于模拟求解单晶高温合金薄壁圆筒试样在拉-扭交互载荷作用下安定性极限的程序代码，采用模拟和实验相结合的方法对一种二代镍基单晶高温合金（DD425）薄壁圆筒试样在恒定扭矩和循环拉力交互作用下的安定性行为进行研究。通过实验获得了单晶高温合金各重要取向的在室温下的拉伸性能参数、剪切性能参数，并以此搭建了求解适用于具有各向异性的单晶高温合金薄壁圆筒在拉-扭交互载荷下安定性极限的模拟模型，模拟结果与初步实验验证结果有较好的拟合，其最大安定性极限的值约为其对应拉伸载荷弹性极限的 1.2 倍。

C04-P038

不同取向差对高温时效下 PWA1484 界面稳定性的影响

王钦佳^{1,2},宋尽霞¹,王定刚¹,惠希东²,肖程波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.北京科技大学

先进航空发动机的镍基单晶高温合金叶片在定向凝固过程中，温度场、温度梯度场等不稳定会不可避免地形成晶界缺陷，从而降低单晶高温合金的力学性能。本文采用综合性能优异的二代镍基单晶高温合金 PWA1484，设计具有不同倾转角度的双晶，在 1070 $^{\circ}\text{C}$ 下作保温热处理，分析不同取向差形成的晶界组织在高温时效下的演变。结果显示：标准热处理条件下，低取向差形成的小角度晶界组织与基体组织差异不明显，但晶界内存在较少数量的碳化物，而高取向差形成的高角度晶界呈现典型的胞状组织；随着在 1070 $^{\circ}\text{C}$ 下热处理时间的不断延长，小角度晶界仅发现常见的 γ' 组织粗化和碳化物的明显长大，大角度晶界胞状组织厚度逐渐增加，TCP 相的分布也逐渐呈连续链状。上述研究为单晶高温合金叶片定义小角度晶界容限提供了物理依据，也为丰富和发展晶界强韧化奠定了基础。

C04-P039

以 Mo 代 W 对含 Re 镍基单晶高温合金凝固特性的影响研究

艾诚¹,刘林²,张军²,郭敏²,李卓然²,黄太文²,周健³,李树索³,宫声凯³,刘刚⁴

- 1.长安大学
- 2.西北工业大学
- 3.北京航空航天大学
- 4.西安理工大学

基于热力学计算和实验方法研究了以 Mo 代 W 对含 Re 镍基单晶高温合金凝固特性的影响规律。高 W 强化 Ni 基单晶高温合金 (Alloy W) 和高 Mo 强化 Ni 基单晶高温合金 (Alloy Mo) 均为典型的枝晶组织, 但 Alloy W 的枝晶间析出物为初生 γ' 相+ γ/γ' 共晶组织, 而 Alloy Mo 的枝晶间析出物为初生 γ' 相+NiMo 相。在凝固时, 一方面, Alloy W 中的 W 元素显著偏析于枝晶干区域, 而 Alloy Mo 中的 Mo 元素显著偏析于枝晶间区域。另一方面, 以 Mo 代 W 显著降低了 Re 和 Al 元素的显微偏析程度, 进而降低了单晶高温合金定向凝固时雀斑的形成倾向。同时, 热力学计算结果和 DSC 实验结果均表明, 以 Mo 代 W 降低了单晶高温合金的液相线温度和固相线温度, 但对结晶温度区间的影响较小。

C04-P040

燃机用第二代镍基单晶高温合金的成分设计

霍芊羽¹,陈金宾^{1,2},陈晶阳²

- 1.北京科技大学新金属材料国家重点实验室
- 2.中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室

镍基单晶高温合金由于其优异的高温综合性能而广泛应用在重型燃气轮机的涡轮叶片上, 但其十几种元素的复杂交互作用也给成分设计和优化带来不小的挑战, 传统“试错法”成本高、周期长, 因此需要结合材料基因组的思想提出新的设计思路和方法。

本文在航材院设计的第二代长寿命镍基单晶高温合金的基础上进行研究, 通过 Thermo-Calc 软件计算结合实验验证, 得到 γ 、 γ' 相含量等因素与合金高温持久性能之间的关系, 给出合金的成分设计准则, 加速燃气轮机用第二代长寿命镍基单晶高温合金的成分设计过程。

结果表明: Thermo-Calc 软件计算能够较为准确的预测实验结果, 计算与实验结合可以给出合理的成分设计准则。此外, 本文将镍基单晶高温合金的设计思路从传统的由成分到性能调整为根据性能要求快速筛选所需合金成分, 较大的降低了合金的研制成本、缩短了研制周期。

C04-P041

合金成分对镍基单晶高温合金两相错配度及热暴露中 γ' 相的影响

李卓然

西北工业大学

高代次镍基单晶高温合金中难熔元素种类多含量高, 本文研究了 W、Re、Ta、Nb 等难熔元素对第三代镍基单相变温度、两相错配度的影响以及热暴露过程中 γ' 相的尺寸和形貌变化。

改变 W、Re、Ta、Nb 等难熔元素含量, 制备了多组不同成分单晶试样, 用差示扫描分析研究合金相转变温度。采用高分辨 XRD 对试样进行晶格常数的测定。标准热处理后的试样, 进行 1000°C 热暴露实验, 分别于 50h、100h、200h、500h、1000h 取样, 筛选 10 组无 TCP 相生成的合金试样进行组织分析。

结果表明: 在一定范围内, Re、W 含量增加, 固相线温度变化不明显; 保持 Al、Ta、Nb 总原子百分含量不变, 增加 Nb 比例, 固相线温度显著降低; Re 含量增加, 错配度为负, 其绝对值增加, W、Ta 含量增加, 错配度绝对值减小。Re 含量增加, 显著降低时效组织 γ' 相尺寸, W 含量增加以及改变 Ta(+Nb)/Al 的比值, 对 γ' 相尺寸无明显影响; Re 含量增加显著降低 γ' 相粗化速率, W 次之, 改变 Ta(+Nb)/Al 比值, 对 γ' 相粗化速率影响较小; Re 含量降低, γ' 相正方度显著降低, γ' 相连接粗化, W 含量降低、Ta(+Nb)/Al 的比值提高, γ' 相正方度略微降低。

γ' 相形成元素大量偏析于枝晶间, 增大了共晶体积分数, 导致合金初熔温度降低。 γ' 相在热暴露过程中粗化长大主要受扩散过程控制, 符合 LSW 粗化规律。合金成分影响两相晶格常数, 导致错配度变化, 错配度趋于 0, 热暴露过程中 γ' 相的正方度偏小。

C04-P042

2000h 高温时效对 DD6 合金组织、析出相及拉伸性能的影响

吴庆辉

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

为研究国产第二代单晶合金 DD6 在典型温度下长期时效后组织与性能的变化规律,为合金的可靠使用提供依据。本工作在非真空状态下通过对合金进行 980°C 长期时效处理,模拟了合金实际服役过程中的温度状态,并通过扫描电镜、XRD 和高温拉伸等手段,研究了第二代单晶高温合金 DD6 在 980°C 无载荷时效 2000h 处理后的显微组织、析出相和拉伸性能的变化。试验结果表明:时效时间在 1000h 以内时, γ' 相呈立方形态分布,平均尺寸长大到 1.0 μm 左右。时效时间从 1000h 增加到 2000h 过程中,枝晶干与枝晶间显微组织变化出现差异,枝晶干处 γ' 相明显粗化,但仍基本保持立方状;枝晶间 γ' 相连接、合并,时效 2000h 时基本形成筏状组织。2000h 时效后仅发现少量 TCP 相析出,析出相为 M6C 型碳化物和 μ 相,随时效时间增加,析出物数量增多。760°C 和 850°C 的抗拉强度和屈服强度均随时效时间延长呈下降趋势,延伸率及断面收缩率呈上升趋势。这说明 DD6 合金 980°C 时效后组织和拉伸性能基本稳定,能够满足先进航空发动机对涡轮叶片材料组织和拉伸性能方面的需求。

C04-P043

Ni-Al-Cr-Os 四元合金相平衡研究及镍基单晶高温合金中 Os 替代 Re 的可能性分析

林彦,魏明,易旺,张利军,李国栋

中南大学,粉末冶金研究院,粉末冶金国家重点实验室

镍基单晶高温合金因其良好的室温和高温强度、良好的塑性和断裂韧性、优异的蠕变与疲劳抗力、良好的高温组织稳定性、抗氧化抗腐蚀性等而广泛应用于航空、航天领域。大量合金元素的添加使得镍基单晶高温合金具有更高的耐高温能力。尤其是 Re 的添加大幅度提高了合金的高温蠕变性能。但 Re 的添加使得合金在服役过程中容易诱导 TCP 相的析出,削弱了合金力学性能。因此探索新的添加元素,进一步提高合金高温组织稳定性及力学性能是当前研究的重点。本课题组在前期研究中发现 Os 具有比 Re 更低的扩散系数。为了探究 Os 能否成为 Re 的替代元素,对含 Os 镍基合金体系的相平衡研究尤为重要。

本论文以 Ni-Al-Cr-Os 体系为研究目标,基于合金法结合 XRD, EPMA, DSC 等检测分析技术,测定了 Cr-Os、Ni-Al-Os、Ni-Cr-Os 和 Ni-Al-Cr-Os 等体系的等温截面和液相面投影图,为含 Os 的镍基高温合金设计提供重要的理论指导。此外,结合强化程度、抗蠕变性及 TCP 相析出可能性等因素,进一步讨论了 Os 替代 Re 的可能性,发现在镍基单晶高温合金中 Os 是可以替代或部分替代 Re。

C04-P044

再结晶对 DD6 单晶高温合金高周疲劳行为的影响

谢洪吉,李嘉荣,韩梅

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

研究了胞状再结晶和等轴再结晶对 DD6 单晶高温合金高周疲劳行为的影响规律。分别测试了无/含再结晶的 DD6 合金 1070°C、应力比 $R=-1$ 条件下的轴向高周疲劳寿命,采用扫描电子显微镜观察分析了疲劳断口形貌和显微组织。结果表明:胞状再结晶和等轴再结晶降低 DD6 合金的轴向高周疲劳性能,胞状再结晶作用小于等轴再结晶。再结晶不改变 DD6 合金的轴向高周疲劳断裂机制,即无/含再结晶的 DD6 合金的轴向高周疲劳断裂机制均为韧窝断裂和类解理断裂共存的混合断裂。高温条件下,再结晶和氧化损伤相互作用,显著促进了疲劳裂纹的萌生和扩展,减少了疲劳裂纹萌生和扩展时间,降低了合金的高周疲劳寿命。

C04-P045

基于 Thermo-Calc 计算的燃机用新型第二代镍基单晶合金设计

陈金宾^{2,1},霍芊羽²,陈晶阳¹,惠希东²,李青¹,肖程波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.北京科技大学新金属材料国家重点实验室

先进的重型燃气轮机是国家能源领域的重要装备,目前我国地面燃机用单晶高温合金材料的研究还处于起步阶段,研发承温能力更高的燃机用新型镍基单晶高温合金具有重要的战略意义。本文以新型燃机用第二代长寿命单晶高温合金为研究对象,在热力学相图计算得到的主要合金元素对 γ' 相体积分、组织稳定性、凝固特征温度等重要材料参数影响规律的基础

上,在成分优化空间内正交设计了合金成分,并对合金的显微组织、力学性能、组织稳定性等多种材料参数开展了表征。综合分析计算和试验结果,阐明了主要合金元素对新型燃机用第二代长寿单晶合金组织和性能的影响规律,初步建立了燃机用长寿镍基单晶高温合金成分设计和优化的准则,给出了主要合金元素含量、 γ' 相体积分数、 γ' 相溶解温度、热处理窗口、电子空位数等重要参数的优化范围。研究表明,材料基因工程技术在燃机用长寿单晶合金的组合设计中具有可行性。

C04-P046

ppm 级 S 对镍基单晶高温合金恒温氧化行为的影响

张宗鹏^{1,2},王栋¹,张健¹

1.中国科学院金属研究所 高温合金研究部

2.沈阳工业大学 材料科学与工程学院

镍基单晶高温合金由于其具有高的室温和高温强度、良好的塑性和断裂韧性、优异的蠕变与疲劳抗力、良好的高温组织稳定性和使用可靠性、良好的抗氧化和抗热腐蚀性能等而被广泛应用于航空发动机和燃气轮机。随着燃气轮机热效率的逐年提升,燃气涡轮进口温度也逐渐升高,不断提升的涡轮进口温度对燃气轮机涡轮叶片材料的抗热腐蚀性能和抗高温氧化性能都提出了更高的要求。为了提高合金的抗热腐蚀和抗氧化性能,国外对燃气轮机用单晶合金中 S 元素的控制十分严格。国内由于金属原材料成分不稳定、熔炼工艺水平较低以及装备落后,一般吨级母合金中 S 含量只能控制在 10ppm 左右。但是 10ppm 的 S 是否明显影响合金的抗氧化性能,含硫 10ppm 和 3ppm 的单晶合金氧化行为区别何在、如此微量的 S 元素变化对氧化机制有何影响我们还都不清楚。

本文采用不连续增重法研究了不同温度下 ppm 级 S 对镍基单晶高温合金氧化行为的影响。并通过扫描电镜(SEM)、XRD 和 EDS 等手段深入分析了氧化样品的微观组织。结果表明,ppm 级 S 对合金 900°C 氧化性能没有明显影响;在 1000°C 和 1100°C 时,随着 S 含量的不断增加,合金氧化增重趋势越明显,而且,温度越高,S 对合金氧化行为影响越明显。虽然不同 S 含量合金生成的氧化膜成分相似,但 S 含量越高,Al₂O₃ 层越不完整且氮化物数量越多。S 可能抑制了合金氧化膜内部连续 Al₂O₃ 层的形成,促进合金内部氮化物的生成,降低长期氧化下氧化膜的稳定性。

C04-P047

镍基单晶高温合金晶界析出相研究

杨丽霞¹,葛炳辉¹,赵云松²,骆宇时²

1.中国科学院物理研究所

2.北京航空材料研究院

镍基单晶高温合金是先进航空发动机涡轮叶片的关键材料。但由于涡轮叶片结构复杂,且在单晶叶片定向凝固过程中温度场、溶质场、温度梯度场不稳定,因此不可避免地形成小角度晶界。晶界的存在会导致晶界区域的元素偏析、化合物析出、高温下强度降低,使得飞机叶片的合格率大大降低。因此很有必要从微观尺度研究晶界的性质,以期解释宏观上镍基单晶高温合金力学性能的变化。

本文主要利用透射电子显微镜技术研究了第二代镍基单晶高温合金 DD11 晶界角度为 22.5°的晶界析出相。实验发现,晶界上主要存在两种析出相,一种析出相尺寸较大,约 4-10 μm,并在其上分布了大量位错,通过 EDS mapping 发现该析出相富含 Hf, Ta, Mo, W, Re, Zr, 结合电子衍射花样,鉴定该析出相为 MC 型碳化物;另一种析出相尺寸较小,约 0.4-1 μm,析出相上没有位错,通过 EDS mapping 发现该析出相富含 Ta, Mo, W, Re, Zr, Cr, 结合电子衍射花样,鉴定该析出相为 M₆C 型碳化物。

C04-P048

Hf 含量对第二代高温合金小角度晶界持久性能的影响

张毅鹏,秦健朝,黄朝晖,崔仁杰,管凯,宗鑫,陈升平

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

用籽晶法制备 DD5 合金双晶试样,研究了不同 Hf 含量对第二代高温合金 DD5 小角度晶界持久性能的影响。结果表明:在 980°C/250MPa 持久试验中,Hf 含量为 0.15%时,试样的持久时间无明显变化,伸长率、断面收缩率随晶界角度增加而下降;Hf 含量≥0.3%时,试样的持久寿命、伸长率以及断面收缩率均在 10°以上时出现快速下降。

C04-P049

二次取向对单晶高温合金 DD6 持久性能的影响

赵金乾,李嘉荣,史振学,刘世忠

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

采用螺旋选晶方式定向凝固制备弧形单晶试板,在同一块单晶试板上切取不同二次取向试样。分别在 850°C 和 980°C 的温度条件下,进行了拉伸持久试验。试验结果表明,二次取向对单晶高温合金 DD6 持久性能影响具有明显的规律性。试样断口观察显示,不同二次取向试样中的方形蠕变空洞相对于试样的几何外形具有不同的位向,不同二次取向合金的持久力学变形行为存在差异。二次取向对单晶高温合金持久性能的影响源于单晶各向异性以及构件相对较低的几何对称性。

C04-P050

β -NiAl 对镍基单晶高温合金力学性能的影响

柳一川,宁礼奎,谭政,郑志

中国科学院金属研究所

制备了两种不同 Ru 元素含量的镍基单晶高温合金,其 Ru 元素含量分别为 1%、5% (质量分数) 合金代号分别为 A1、A2。单晶样品尺寸为 $\phi 16\text{mm} \times 210\text{mm}$ 。通过线切割切取厚 4mm 半圆片样品,经打磨、抛光、腐蚀(电解)后通过光学显微镜(OM)及扫描电子显微镜(TEM)观察其铸态组织,并统计铸态组织中一次枝晶间距、二次枝晶间距、 β -NiAl 相含量以及共晶组织含量。根据消除共晶以及 β -NiAl 组织、尽量不出现初熔组织、使合金元素均匀化、得到尺寸合适正方度良好的 γ' 相等原则制定合金的热处理制度,并在 1070°C/140MPa 条件下进行持久实验,对比其持久寿命、断口形貌。经热处理后 A1 合金中 β -NiAl 相及共晶组织已完全消除,而 A2 合金中仍存在一定量的 β -NiAl 相残余。A2 合金中残余的 β -NiAl 相破坏了合金基体的连续性,并且由于 β -NiAl 相为硬脆相,因此会阻碍变形过程中的位错运动,造成位错塞积进而产生裂纹。因此导致 A2 合金持久性能远低于 A1 合金。

C04-P051

Mo 与 W 替换对一种单晶高温合金组织和持久性能的影响

张龙飞^{1,2},江亮^{1,2},黄再旺²

1.中南大学轻合金研究院

2.中南大学粉末冶金国家重点实验室

在一种含 0.5 at.% Re 的镍基单晶高温合金中,逐步使用 Mo 替换等原子分数的 W,形成了 3 种合金,分别为 1.0Mo2.1W, 1.75Mo1.35W 和 2.5Mo0.6W,以研究 Mo 和 W 在低 Re 条件下的高温强化机理。组织观察表明,Mo 含量增加导致合金共晶相分数显著减小,一次枝晶间距则不受影响;电子探针分析表明,Mo 含量增加会导致枝晶干中 W 和 Re 的偏析系数逐渐减小。合金经热处理后,分别在 982°C/248MPa 和 1040°C/145MPa 下进行持久测试,结果表明,随 Mo 含量的增加,982°C 下持久寿命依次降低,分别为 146, 124 和 109h,而 1040°C 下持久寿命依次增加,分别为 345, 361 和 433h,均接近了第二代单晶高温合金的性能水平。萃取试验及原子探针结果显示,Mo 含量增加导致 γ' 相的体积分数降低,但偏析在 γ 基体中 Re 的含量增加;分析认为,前者是导致 982°C 下持久寿命降低的主要原因,后者是 1040°C 更高温下持久寿命增加的主要原因。

C04-P052

基于高梯度定向凝固技术的固溶处理优化

张琰斌,刘林,黄太文,张军,傅恒志

西北工业大学

高代次镍基单晶高温合金中含有大量的难熔元素,导致其经过长时间常规固溶处理后仍存在严重的残余偏析。近期研究表明增加固溶温度能一定程度上降低残余偏析,但降低程度有限。本文以一种第三代镍基单晶高温合金为研究对象,采用高梯度定向凝固技术对铸态合金进行优化,并优化相应的固溶处理工艺,获得拥有良好力学性能的热处理组织,并阐明了凝固参数对热处理后合金组织和性能的影响机制。结果表明:高梯度定向凝固能细化枝晶组织从而缩短枝晶之间的扩散距离,且能降低铸态偏析;制定相应的优化固溶处理,将固溶温度上限从 1330°C 提高到 1340°C,固溶时间从 35h 缩短到 25h;经过优化固溶处理合金的残余偏析明显降低,其中 Re 的偏析比从 1.93 降低到 1.17,热处理组织得到优化,时效处理后 γ' 尺寸均匀性和 γ 基体通道尺寸的均匀性均增加,持久寿命延长,在 1100°C/150 MPa 下从 105.5h 延长到 133.2h。

C04-P053

一种含 4%Re 的镍基单晶高温合金高温蠕变性能的研究

岳全召,刘林,杨文超,黄太文,张军,傅恒志

西北工业大学

本文对一种含 4wt. %Re 的镍基单晶高温合金在高温 (1100 °C) 和较大的应力范围 (120-174 MPa) 下的蠕变性能进行了研究。研究表明, 本合金的高温蠕变行为呈现出强烈的应力依赖性, 随着应力从 174 MPa 降低到 150 MPa, 蠕变寿命提高到原来的 1.4 倍, 而应力从 137 MPa 降低到 120 MPa, 蠕变寿命提高到原来的 4.4 倍。位错网组织也呈现出一定的应力依赖性, 平均位错网间距随着应力的提高而不断增大, 且其分布呈现出了分化现象: 分为致密与非致密位错网两部分。而且分化现象随着应力的提高, 变得更加明显。通过对 1100 °C 下的 γ/γ' 错配度的测定发现, 致密位错网的间距应该是由 γ/γ' 界面错配度决定的, 非致密位错网间距可能是由较高应力下局部区域较大的应变流造成的。由分析第三蠕变阶段的 γ' 内的位错发现, 当施加应力低至 120 MPa 时, 大量的 $a\langle 010 \rangle$ 出现在 γ' 内, 其在 γ' 内的低运动性使得它只能以两种不同的方式运动: 以纯攀移或以分解为不同 $\{111\}$ 面上的两个超位错分量的形式。而当施加应力较高时 (174 MPa), 大量的高运动性的 $a\langle 101 \rangle$ 位错切入 γ' 内。经过对蠕变机制的分析发现, 当施加应力为 120 MPa 时, 整个蠕变阶段都是位错攀移机制; 而当应力为 137-174 MPa 时, 蠕变机制从第三蠕变阶段前的位错攀移机制转变为第三蠕变阶段的 Orowan 绕过或位错剪切机制, 这与 TEM 下的组织观察一致。

C04-P054

一种镍基单晶高温合金在不同温度微观变形组织及其与拉伸行为的联系

王广磊^{1,2},刘金来¹,刘纪德¹,张海峰¹

1.中国科学院金属研究所

2.东北大学

本文研究了一种[001]取向镍基含 3wt.%Re 单晶高温合金在不同温度的拉伸行为, 并用透射电镜(TEM)观察相应断裂后的微观变形组织特征。结果表明: 这种含 Re 合金表现出明显的依赖于温度的拉伸行为和变形组织。由基体相和析出相间晶格错配和模量差值造成的共格应力场及位错运动和高温时元素扩散释放共格应力场是影响微观变形过程的一个关键影响因素。此外, 详细讨论了合金微观变形特征和对应宏观拉伸曲线的对应联系。在峰值温度(800°C)以下, 合金微观变形特征为位错(或层错)切割强化相, 这说明不断增强的加工硬化与强化相切割具有密切相关; 在峰值温度以上, 合金主要微观变形特征为基体位错沉积在两相界面和界面位错绕越强化相, 这说明界面位错网的形成使合金表现出一定的加工硬化。合金在 750°C 时中温塑性低谷与大量层错切割析出相及他们的相互反应有强烈联系。

C04-P055

镍基单晶高温合金 γ/γ' 相界面位错网铈偏聚的研究

丁青青,余倩,李吉学,张泽

浙江大学

添加少量铈元素能够大幅提高镍基高温合金的蠕变性能, 这个现象被称为“铈效应”。自 20 世纪 70 年代发现铈效应以来, 科学家们对铈在镍基高温合金中的分布进行了大量研究并提出可能的强化机理, 但仍未达成共识。本文结合使用高分辨透射电子显微镜和 X 射线能量色散谱, 发现高温下镍基单晶高温合金 γ/γ' 相界面位错网核心存在铈元素偏聚, 且热处理可调控位错网核心铈元素浓度。透射和扫描电子显微镜中进行的常温和高温原位拉伸试验均发现位错网铈含量高的相界面更难以被 γ 相中运动位错剪切, 位错运动局限于 γ 相, 裂纹呈锯齿状, 而位错网铈含量低的相界面易被位错剪切, 裂纹呈直线状。这一现象说明相界面位错网核心铈元素的偏聚能够有效强化相界面。理论计算表明铈偏聚于相界面位错核心不影响位错结构, 但能复杂化位错周围应力场并能大幅降低位错能量。位错网核心偏聚的铈元素稳定界面位错网, 强化相界面, 可能是铈效应的来源。本文结论不仅有助于解释镍基高温合金中的铈效应, 且为无铈合金的设计提供了新的视角。

C04-P056

应力诱导下的镍基单晶高温合金再结晶行为研究

兰健,玄伟东,韩雨,李永顺,任兴孚,任忠鸣

上海大学材料科学与工程学院

本文以第二代镍基单晶高温合金 DD6 为研究对象, 对试样进行标准热处理, 随后在试样的 (001) 面利用布氏硬度计施加不同载荷的压痕变形并在不同温度下保温 4h。利用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、背散射电子衍射 (EBSD) 等测试

研究方法，对再结晶组织结构进行了系统的观察分析，探究应力诱导下的再结晶行为。结果表明：在接近 γ' 相溶解温度时，压痕附近出现再结晶层，且施加的载荷越大，形成的表面再结晶层越厚；再结晶晶粒内呈现全部的非常细小的 γ' 相，而附近的原始晶粒组织仍保持有较大的粗化的 γ' 相和少部分重新析出的细小的 γ' 相；此外，还发现在再结晶晶界附近析出大量的针状 TCP 相。

C04-P057

镍基单晶高温合金的内应力测定

段浩东, 裴延玲, 李树索, 宫声凯

北京航空航天大学

本文探究了一种通过 X 射线衍射测定镍基单晶高温合金内应力的方法，并对某种[110]取向的单晶高温合金固溶炉冷和固溶水冷后样品的表面应变/应力状态进行了测定。平行于样品表面[001]方向以及[1 $\bar{1}$ 0]方向的正应力 σ_{11}^s 和 σ_{22}^s 被测定，同时，米塞斯应力由 σ_{11}^s 和 σ_{22}^s 推导出来。结果表明，对于 γ 相，固溶炉冷的米塞斯应力较大，而对于 γ' 相，两试样米塞斯应力大致相同。这说明固溶冷却模式影响着 γ 相的米塞斯应力，这是由于炉冷后 γ 通道中的二次 γ' 的析出以及位错网的沉积增加了 γ 通道的晶格畸变。

C04-P058

热应力对定向凝固高温合金再结晶的影响

谢光¹, 尹斌^{1,2}, 王莉¹, 李辉¹, 楼琅洪¹, 张健¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

本文研究了热应力对一种定向凝固柱晶和单晶高温合金再结晶的影响。定向柱晶高温合金采用高速凝固法制备，单晶高温合金采用液态金属冷却法制备。对两种合金的铸态样品于高温（超出固溶温度约 20~40°C）热处理后淬火，以模拟定向凝固过程中可能产生的热应力。接下来，对上述样品进行标准热处理，对比其再结晶情况。结果表明，经过高温和淬火处理后，定向合金中产生了大量的亚晶组织。当定向合金从 1250°C 或者 1260°C 淬火并经过标准热处理后，再结晶主要产生在原始的定向柱晶晶界，而 1240°C 淬火并经过标准热处理后，却没有发现再结晶。在原始定向柱晶晶界中，一些曲率较大的弯曲晶界部位更容易产生再结晶。电子背散射衍射（EBSD）测试结果表明，对于高温淬火样品，在原始定向柱晶晶界，特别是曲率较大的位置，存在较大的局部应变，这些应变最终诱发晶界迁移，产生再结晶。而在单晶高温合金中，高温淬火及标准热处理没有产生再结晶。EBSD 测试结果表明，在单晶合金的亚晶位置，存在较大的局部应变，但该应变比定向合金原始晶界处要小，还不足以诱发再结晶。经过 1000°C/10h 处理后，可降低单晶合金的部分应变，有利于抑制再结晶的产生。

C04-P059

高温退火对一种 Ni3Al 基合金组织和蠕变行为的影响

吴静¹, 刘永长¹, 李冲¹, 夏兴川¹, 吴宇婷¹, 李会军¹, 王海鹏²

1. 天津大学

2. 西北工业大学

对一种 Ni3Al 基合金合金分别在 1160~1280°C 不同温度下进行高温退火处理，然后对未处理态合金及不同温度退火态合金分别在 800°C/200 MPa 条件下进行中温蠕变性能测试，并对不同状态蠕变后试样进行微观形貌观察和断口组织分析，以研究不同温度高温退火对实验 Ni3Al 基高温合金组织和蠕变行为的影响。研究表明：高温退火处理，可使实验合金，稳态蠕变速率显著降低，蠕变寿命显著提升。其中，1200°C 退火态合金 800°C/200 MPa 蠕变寿命由退火前的 194 h 提升到了 643 h，稳态蠕变速率由退火前的 0.2047% 降低至了 0.0647%；合金蠕变过程中，裂纹首先萌生于碳化物边界处，并优先延横向晶界发生萌生与扩展，进而撕裂晶界及共晶组织；而孔洞则首先产生于共晶组织内部，并随蠕变进行不断扩大形成宏观大裂纹导致断裂；高温退火态试样稳态蠕变速率的显著降低，主要是因为高温退火提高了合金两相组织中 γ' 尺寸的尺寸，降低了 γ'/γ 两相错配度；而高温退火态试样蠕变寿命显著提升，则主要是因为高温退火促使了合金共晶组织中 γ' 相的充分析出，从而导致蠕变过程中 γ' 相的重新回溶于 γ 相中，从而提升了 γ 相的固溶强化程度；高温退火可使合金中，共晶尺寸显著增加，共晶数量明显减少，但共晶总体积分数基本恒定不变，在共晶总体积分数恒定基础上，退火态试样中共晶数量越少、尺寸越大，合金蠕变寿命轻微降低。

C04-P060

DZ417G 合金中痕量元素含量控制研究

安宁,李振瑞,牛永吉,田建军,张新平

北京北冶功能材料有限公司

有害痕量元素 (Pb、Bi、Sn、As、Sb、Tl、Te、Ag、Se 等) 的控制水平是反映高温合金纯净度的一个重要指标。严格控制有害痕量元素的含量是当前高温合金发展的重要趋势,也是提高合金强韧化性能的一种有效手段。本文采用真空感应熔炼炉,对 DZ417G 合金中痕量元素含量控制技术进行了研究。研究了不同精炼温度 (1510°C、1560°C 和 1600°C)、精炼时间 (20min、30min 和 40min) 以及不同纯净度 Ni、Cr 原材料对 DZ417G 合金中痕量元素含量和烧损率的影响。研究表明:精炼温度和精炼时间变化对 DZ417G 试验合金中 Pb、Bi、Sn、Ag、In 元素的变化水平影响有限。但是, DZ417G 试验合金中 Pb、Tl、Te、Ag、In 元素烧损效果显著。其中, Pb 的烧损率平均在 94%, Tl 的烧损率平均在 86%, Te 的烧损率平均在 40%, Ag 的烧损率平均在 72%, In 的烧损率平均在 50%; 另外, 原材料 Ni、Cr 中痕量元素含量显著影响 DZ417G 合金中痕量元素的水平。为了控制合金中痕量元素含量, 必须严格控制原材料中的带入。

C04-P061

DZ466 合金及表面热障涂层的热腐蚀行为研究

任维鹏,李相辉,黄强,陈通

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

随着地面燃机涡轮前进气口温度的提高,对涡轮叶片材料提出了严峻的考验。一方面要求材料具备良好的力学性能,另一方面,恶劣的使用环境要求合金及其防护涂层需具备更好的抗高温氧化及耐热腐蚀性能。因此,模拟地面燃机使用工况,研究合金及其防护涂层的抗热腐蚀能力显得极为必要。本文以 DZ466 合金为基体,采用 EB-PVD 法在合金表面制备热障涂层,其粘结层为 CoCrAlY,将适当浓度的 75%Na₂SO₄+25%NaCl (质量百分比) 水溶液均匀地沉积在试样表面,控制盐的沉积量约为 1mg/cm²,研究 DZ466 合金及其表面热障涂层涂盐热腐蚀行为,结果表明:涂盐条件下 950°C 热腐蚀 100h 后, DZ466 合金表面形成层状疏松多孔的腐蚀产物,其腐蚀产物层大致可分为五层,包括 Co, Cr, Ni, Ti 及 Al 等的氧化物。热障涂层试样陶瓷层与粘结层界面处在较大范围内结合良好,热生长氧化物 (TGO) 外层主要为 Cr₂O₃, CoO 混合氧化物,靠近粘结层侧 TGO 成分主要为单一的 Al₂O₃。与相同条件下 DZ466 合金的热腐蚀情况相比,热障涂层中粘结层表面氧化物或腐蚀产物层的厚度有很大程度的减小。950°C 热腐蚀动力学曲线表明, DZ466 合金于热腐蚀 40h 后出现增重量快速减小现象,热障涂层试样热腐蚀 100h 时未出现因剥落导致的增重量显著减小现象,表明表面施加热障涂层后,在很大程度上改善了合金抗 950°C 熔盐热腐蚀能力。

C04-P062

晶体取向对 Ni₃Al 基单晶高温合金 IC21 力学性能的影响

胡斌,裴延玲,李树索,宫声凯*

北京航空航天大学

Ni₃Al 基单晶高温合金 IC21 具有高承温能力、低密度的特点。采用籽晶法制备了 [001],[011]和 [111]取向的 Ni₃Al 基单晶高温合金 IC21。研究了 IC21 合金不同取向的拉伸与持久性能。结果表明: IC21 单晶高温合金存在拉伸各向异性。在 760°C 以上,合金 [001]取向的抗拉强度与屈服强度均高于 [011]与 [111]取向。同时合金在中温和高温均表现出了较为明显的持久各向异性。合金的持久寿命在 760°C 和 850°C 由大到小顺序为 [111]>[001]>[011],在 980°C 以上为 [111]>[011]>[001]。且合金 [111]取向在 1100°C/137Mpa 持久寿命大于 900h。

C04-P063

[001]取向偏离对 Ni₃Al 基单晶合金中温蠕变性能的影响

侯皓章,裴延玲,李树索,宫声凯*

北京航空航天大学

Ni₃Al 基单晶高温合金因为具有高 γ' 体积分数而拥有优异的高温性能,但这样的合金设计使得 Ni₃Al 基单晶高温合金在中温有不同于传统单晶高温合金的蠕变行为。为研究传统镍基单晶高温合金中温蠕变近 [001]取向偏移敏感现象在 Ni₃Al 基单晶高温合金中是否存在,本文对取向偏离 [001]15° 以内的单晶样品进行了 760°C 的蠕变实验。实验结果显示实验使用的 Ni₃Al 基单晶高温合金不存在传统单晶高温合金的第一蠕变周期特征行为,但仍然表现出了角度偏移敏感。正轴 [001] 样品表现出了较好的蠕变抗性,而偏轴样品蠕变性能有较大下降,取向接近 [001]-[111] 对称边的样品性能下降尤为显著,断后样品

椭圆化严重。晶体取向变化和位错分析显示,这种角度偏移的敏感除了受不同滑移系分切应力大小影响,更与滑移系开动的对称性有关。由此可见未来为进一步发挥合金性能潜力,有必要进行更为精确的籽晶取向控制。

C04-P064

IC21 合金化元素在 NiPtAl 渗层中的扩散行为研究

苏鸿志,刘熠,宫声凯,李树索,裴延玲

北京航空航天大学

针对高压涡轮导向器叶片服役性能需求特点,以发展具有低成本、低密度、高承温能力和良好铸造工艺性能的单晶高温合金为目标,研发了一种承温能力达到 1100 °C,密度不大于 8.0 g/cm³ 的高压涡轮导向叶片用单晶高温合金材料 IC21。由于 IC21 钼含量较高,导致其高温抗氧化性能下降。本文在 IC21 合金上利用电镀 Pt 后进行高温低活度气相渗铝的方法在 IC21 上分别制备了 NiPtAl 和 NiAl 涂层,并在 1100°C 进行了循环氧化实验。与 NiAl 涂层相比, NiPtAl 涂层在氧化初期能更快形成致密的 Al₂O₃ 层。采用扫描电镜和能谱分析,在氧化过程中, NiPtAl 涂层中 Pt 的存在显著抑制了 IC21 中高钼相向外析出,从而抑制了 Mo 元素向涂层表面扩散,提高了合金高温抗氧化性能。

C04-P065

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

中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料国防科技重点实验室

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铸造性能、显微组织和力学性能的影响。通过调整 Al、Ti 元素含量可以改变合金的凝固特性,使合金固、液相线之间的温度范围和合金失去枝晶间的温度与固相线之间的温度范围和合金失去枝晶间的温度范围缩小,减小合金的热裂倾向,改善合金的铸造性能。在合金成分范围内,适量调整 W、Mo、Al、Ti 含量,可明显改变合金的组织形貌,铸态合金组织中晶相的数量增多,晶相的形态改变明显,晶相 γ , 相由“菊花”状变为“向日葵”状,热处理后枝晶干 γ , 的形貌得到明显改善,热处理后析出的 γ , 相相界面由圆弧形改变为规则的立方状。随着合金成份的调整,980°C/235Mpa、1040°C/137Mpa 高温持久寿命增长显著,高温强度的提高主要是由于 γ , 相粒子尺寸和形状的改变。成份调整对室温拉伸性能影响不明显。本文研究工作是在合金满足定向薄壁空心叶片可铸性要求的基础上,研究调整部分合金化元素含量,改善合金组织形貌,提高合金高温持久性能,满足了发动机使用性能要求。

C04-P066

热等静压对 K465 高温合金显微组织和力学性能的影响

黄强,宋尽霞,任维鹏,李相辉,陈通,张丽辉

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

K465 合金是一种高强度等轴晶铸造镍基高温合金,被广泛用于航空发动机涡轮工作叶片和导向叶片。叶片在铸造过程中不可避免存在不同程度的疏松,内部疏松会降低零件综合性能,为消除叶片内部疏松提高叶片可靠性,热等静压工艺被广泛应用于高温合金叶片。本文以 K465 合金为基材,研究了不同热等静压工艺(温度、压力、时间)对 K465 合金显微组织和力学性能的影响。试验结果表明,当热等静压温度低于 1180°C、压力低于 160MPa、时间少于 2h 时, K465 合金涡轮叶片内部疏松闭合效果不明显,当保温时间大于 4h 时, K465 合金基体中析出针状相。叶片经过 1190°C~1210°C/160MPa~180MPa/2~3h 热等静压后,内部疏松基本消除。热等静压叶片经固溶热处理后,枝晶杆 γ' 呈立方化形态,平均尺寸约为 0.4 μ m,显微组织与标准热处理叶片相当。力学性能测试结果表明,叶片经热等静压后,室温抗拉强度和室温延伸率分别提高约 7%、20%,975°C/225MPa 高温持久寿命提高 30%以上。综上,1190°C~1210°C/160MPa~180MPa /2~3h 是一种能够有效改善 K465 高温合金铸件力学性能的热等静压制度。

C04-P067

细晶和柱晶 K417G 高温合金的蠕变行为研究

李相伟^{1,2},董加胜¹,王莉¹,刘心刚¹,楼琅洪¹,张健¹

1.中国科学院金属研究所,高温合金研究部,沈阳,110016

2.中国科学与技术大学,材料科学与工程学院,合肥,230026

研究发现：通过去除横向晶界，大幅提高合金的蠕变寿命，但是晶界对稳态蠕变速率的影响却不是很清楚。而稳态蠕变速率是高温合金蠕变过程中最重要的参数之一。

实验选择 K417G 为母合金，分别制备细晶和定向柱晶组织试棒。随后经过相同的热等静压和热处理，消除合金中疏松和 γ' 相对合金蠕变性能的影响。对比研究两种组织合金的 600°C/961MPa、760°C/645MPa 和 950°C/235MPa 蠕变性能。采用 SEM 观察蠕变断口形貌。

在不同蠕变条件下，细晶组织合金的最小蠕变速率都小于柱晶合金，尤其是 600°C/961MPa 低温条件下细晶合金的最小蠕变速率 (10^{-9}s^{-1}) 低于柱晶合金一个数量级 (10^{-8}s^{-1})。但是细晶和柱晶组织合金的蠕变寿命在不同蠕变条件下各不相同。柱晶合金的 760°C/645MPa 蠕变寿命 (356h) 显著高于细晶组织合金 (69h)，但柱晶合金的 600°C/961MPa 蠕变寿命 (282h) 却远低于于柱晶组织 (195h)，950°C/235MPa 蠕变寿命 (26h) 也略低于细晶合金 (35h)。另外，在不同蠕变条件下，柱晶合金的初始应变和断裂应变 (塑性) 明显优于细晶合金。断口观察发现：低温蠕变条件下，细晶合金为穿晶断裂，随着温度的升高，逐渐变为沿晶断裂。

高温合金的蠕变寿命与最小蠕变速率和断裂应变 (塑性) 有关。在不同温度条件下，晶界都能阻碍位错运动，从而降低最小蠕变速率，提高合金的蠕变寿命。但是随着温度的升高，晶界滑移的作用变大，而且晶界氧化加剧，晶界强化作用减弱。另外，细晶合金在中温条件下，由于中温脆性和晶界氧化的原因，导致合金的塑性差，也会影响合金的蠕变寿命。

(1) 在不同温度条件下，晶界强化作用为主，降低最小蠕变速率，尤其是 600°C 低温条件；(2) 高温条件下，晶界滑移和晶界氧化作用加剧，削弱晶界强化作用。(3) 柱晶合金塑性高，抑制沿晶裂纹，大幅提高中温蠕变寿命，但最小蠕变速率大，导致高温蠕变寿命低于细晶合金。(4) 晶界强化和晶界氧化作用共同影响高温合金的蠕变寿命。

C04-P068

热处理对 JG4246A 合金($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$)界面 γ' 相析出及 长大行为研究

姜珊¹, 丁俭¹, 彭远祎¹, 何鑫¹, 陈学广¹, 夏兴川¹, 刘永长²

1. 河北工业大学

2. 天津大学

JG4246A 合金由于具有优异的高温强度和耐腐蚀性能，使其作为高温结构材料在航空航天等领域得到广泛的关注。合金由 80% 双相区 ($\gamma+\gamma'$) 和 20% 共晶区 ($\gamma-\gamma'$) 组成，($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区代表了合金的典型结构。在高温服役过程中，合金 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区强化相的析出与长大行为对合金的服役行为有决定性影响。本文基于固态相变理论，将铸态 JG4246A 合金在 1200°C 下保温 8h (固溶处理)，然后分别将铸态和固溶处理后的试样在 1100°C 下进行短期 (15h，每 3h 取出，空冷) 和长期 (40h 和 80h，每 8h 取出，空冷) 的循环时效处理。利用 SEM 分析了不同条件下合金 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区 γ' 相的形貌、尺寸和分布的演变行为。结果表明：铸态合金经过短期循环时效处理后，($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区均匀析出尺寸较大的蘑菇状 γ' 相；固溶处理后的合金经过长期 (40h) 循环时效处理后，界面区析出少量细小的块状 γ' 相，且随着时效时间的延长 (80h)，块状 γ' 相的数量逐渐增多，但尺寸无明显变化。TEM 观察表明：铸态合金循环时效后 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区存在空位、小角度晶界及位错，为 γ' 相的析出提供了形核质点，共晶区 ($\gamma-\gamma'$) 与双相区 ($\gamma+\gamma'$) 的浓度梯度促进了蘑菇状 γ' 相的长大；合金固溶处理后的快速冷却过程导致界面区不稳定，在高能 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面附近产生了大量的过饱和空位，使得空位相互聚集形成位错，位错周围的晶格畸变和内应力增加了系统的内能，这促进了 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区位错周围的块状 γ' 相的形核；固溶处理后共晶区 ($\gamma-\gamma'$) 与双相区 ($\gamma+\gamma'$) 之间铝原子的浓度梯度降低，抑制了纳米级 γ' 相的生长，使得多次循环时效处理后 γ' 相的尺寸变化不明显；循环时效时间增长导致 ($\gamma-\gamma'$)/($\gamma+\gamma'$) 界面区位错和 γ' 相数量的增多。

C04-P069

K4169 合金凝固组织和凝固缺陷的磁-热协同控制

李应举, 张奎良, 杨院生

中国科学院金属研究所

采用自制的磁-热协同控制凝固装置研究了正温度梯度下脉冲磁场参数和热控工艺参数对 K4169 合金凝固组织和凝固缺陷的影响。实验结果表明，脉冲磁场作用对于柱状晶的生长产生显著的扰动作用，改变了晶体生长方式，发生柱状晶-等轴晶 (CET) 转变，凝固组织得到细化。此工艺实现了铸件的顺序凝固，使试棒内显微疏松缺陷含量呈数量级降低，达到铸件致密度和晶粒度的协同控制。基于凝固理论和电磁流体理论推导出脉冲磁场作用于磁-热协同控制凝固的 CET 判据的表明，脉冲磁场作用下凝固时，在晶体生长前沿将附加由于电磁作用产生的电磁过冷，使界面前沿的过冷程度增加，在电磁扰动作用下，枝晶的稳定生长受到破坏促使 CET 现象发生，凝固组织由此得到细化。

C04-P070

碳化物增强镍基复合材料的组织性能研究

王伟,王瑞,祝国梁,疏达,孙宝德

上海交通大学

本文制备了一种 MC 颗粒增强的镍基复合材料 (NMC), 其组织与基体用材 K4169 合金相比, 有害相 δ 相和 Lavse 相大幅减少, 亚稳相 γ'' -Ni₃Nb 消失, MC 颗粒均匀分布于基体中。NMC 室温拉伸屈服强度与 704°C 高温屈服强度分别比 K4169 合金提高 35% 和 15%; NMC 在高温恒定应力条件下, 其稳态蠕变速率和蠕变寿命远优于 K4169 合金, 尤其是在 704°C/620MPa 测试条件下的稳态蠕变速率降低一个数量级, 蠕变寿命提高一个数量级; 704°C 条件下 NMC 材料的低周疲劳性能亦优于 K4169 合金。NMC 材料的性能提升受益于有害相减少、析出沉淀强化相调控以及 MC 颗粒的应力承载效应和裂纹偏折效应。

C04-P071

K447A 合金长期热处理对显微组织和力学性能的影响

李相辉,盖其东,任维鹏,黄强,陈通,张丽辉

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

长期热处理组织演变及其对力学性能影响研究是高温合金材料研究的重要方向之一。K447A 合金具有良好的铸造性能和抗高温氧化及耐腐蚀性能, 已广泛用于制作航空发动机涡轮导向叶片、导向器等关键热端部件, 但其长期热处理组织及性能演变规律还少有报道。本文研究了 K447A 合金在 980°C/50h~10000h 下的组织演变和典型力学性能。结果表明, 随着时效时间的延长, γ' 相发生长大, 至相互连接、聚合, 显示出“筏排”趋势, 同时碳化物出现转化, 以及在枝晶干处析出细小的颗粒状碳化物; 至 2000h 时, 合金在枝晶干析出针状 TCP 相, 且随着时效时间的延长, TCP 相的尺寸和数量进一步增大。力学性能测试表明, 拉伸强度随时效时间的延长逐渐降低, 至 2000h 时, 室温抗拉强度下降 10%, 至 10000h 时, 抗拉强度则不再有明显下降; 1000°C 高温拉伸性能与之存有相同规律; 760°C/724Mpa 下的持久寿命和塑性也未见明显下降趋势。

C04-P072

K4169 高温合金磁-热协同控制凝固电磁场-流场数值模拟

张奎良^{1,2},李应举^{1,2},杨院生^{1,2}

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

采用有限元方法建立了 K4169 高温合金磁-热协同控制凝固模型, 计算模拟了脉冲磁场作用下, 弧状固/液界面附近的磁场、电磁力和流场的时空分布和演变行为。计算模拟结果表明, 磁场在固/液界面处分布与液相中磁场分布相比无明显变化, 而电磁力和流场在固/液界面前沿的分布发生显著变化。熔体中电磁力和脉冲励磁电流同步呈周期性脉冲变化, 且在固/液界面前沿存在最大值, 使得固/液界面前沿电磁振荡亦最剧烈。脉冲磁场作用下固/液界面前沿约 10mm 范围内熔体内产生明显的环流式流动, 随距固/液界面距离增加, 流速数值呈现先增加后减小趋势, 在固/液界面前沿存在最大值。在这个范围之外, 熔体流速数值减小为环流区的十分之一, 且各处流速数值无明显差别。

C04-P073

超温对 K465 合金蠕变性能的影响

郭小童¹,安文瑞¹,郑为为¹,袁晓飞^{1,2},郑运荣¹,冯强¹

1.北京科技大学, 新金属材料国家重点实验室

2.钢铁研究总院

航空发动机涡轮叶片在非正常工况下服役时会发生超温而导致叶片严重损伤。目前, 国内关于超温对高温合金显微组织与力学性能的影响的公开报道还非常有限。本研究以 K465 等轴晶铸造高温合金为研究对象, 通过开展变温蠕变实验来模拟叶片超温服役工况。变温蠕变是在恒温蠕变 900°C/70MPa 的基础上, 每隔 30min 将温度升高至 1100°C 保持 3min 后降回 900°C, 温度循环变化直至达到指定应变或断裂。通过系统研究变温蠕变行为和蠕变过程中基体组织、晶界和碳化物等组织演变规律, 建立了显微组织退化与变温蠕变性能之间的关系, 揭示了超温对 K465 合金蠕变性能的影响机制。本研究的研究成果为等轴晶铸造高温合金超温服役损伤的研究起到借鉴作用。

C04-P074

K418 高温合金热型连铸凝固组织和微观偏析的研究

杨帆,周正华,赵文聘,余建波,邓康,任忠鸣

上海大学

以 K418 高温合金为实验材料,研究了在垂直热型连铸机上制得的 $\Phi 10$ mm 连铸坯的凝固组织和微观偏析。研究表明:当浇注温度 1540°C ,采用“拉-停-拉”的拉坯工艺,平均拉速 9 mm/min 时,凝固界面前沿温度梯度 G 为 35 K/cm 。连铸坯横截面的显微组织是由沿 $[001]$ 方向生长的“十字”状 γ 枝晶与分布于枝晶间的 MC 碳化物和 γ/γ' 共晶化合物组成,一次枝晶间距 λ_1 为 $178.44\text{ }\mu\text{m}$;纵截面 γ 柱状晶的生长方向平行于轴线,固液界面形状为平界面。另外,易偏析元素 Ti、Mo、Nb 和不易偏析元素 Ni、Cr、Al 的平衡分配系数分别是 0.85 、 0.83 、 0.21 和 1.01 、 0.98 、 0.99 。通过该工艺制备得到了成分均匀、组织定向,表面质量优异的连铸坯,有效改善了模铸条件下铸坯中心偏析、疏松、缩孔等缺陷,提高了材料收得率。

C04-P075

单晶、多晶 γ/γ' 共晶强化 Co-Al-W 合金的拉伸性能研究

陶茁林,沙江波

北京航空航天大学

利用真空电弧熔炼和螺旋选晶法,分别制备 Co-xAl-yW-2Ta-0.02B 系列多晶和单晶合金,并通过 1350°C , 10 h 固溶和 850°C , 50 h 时效处理,得到具有 γ/γ' 共晶强化的 Co 基合金。对得到的单晶和多晶合金,在室温、 600°C 、 700°C 、 800°C 、 900°C 下的拉伸性能和断口形貌进行分析,发现相同成分的单晶和多晶 Co-Al-W 合金在各个温度下 $\sigma_{0.2}$ 强度相近,并且在高温下都发生了拉伸反常屈服现象,反常屈服温度出现在 800°C 左右。对相同成分的单晶、多晶合金,室温下,单晶和多晶合金延伸率相近,高温下,沿单晶取向方向单晶具有更好的延伸率 and 高温塑性;对不同成分的合金, γ' 相体积分数越高,合金越有脆性断裂趋势;对不同拉伸温度的合金,从室温到高温,合金从穿晶切窝模式失效逐渐变成穿晶切窝-沿晶解离混合模式失效。

C04-P076

Ni 元素对时效强化钴基高温合金热力学平衡相及组织演化规律的影响

于鸿垚^{1,2},曲敬龙^{1,2},毕中南^{1,2},谷雨¹,唐超¹,杜金辉¹

1.钢铁研究总院

2.高温合金新材料北京市重点实验室

钴基高温合金具有优异的抗热腐蚀和抗热疲劳等性能,适用于航空航天、石油化工等领域的关键热端部件。传统钴基高温合金由于缺少在高温条件下稳定存在的 γ' 强化相,其高温强度显著低于镍基合金,阻碍了其在高温条件下的使用。近年来,高温稳定的 γ' 相($\text{Co}_3(\text{Al,W})$)的发现,使得发展综合性能优异的时效强化钴基高温合金成为可能。但以 Co-Al-W 为体系的钴基高温合金, $\gamma+\gamma'$ 两相区较窄。为了扩大 $\gamma+\gamma'$ 两相区,本文采用 PandatTM 热力学计算软件及钴基数据库,计算研究了 $500\text{--}1500^{\circ}\text{C}$ 温度范围 Ni 含量的变化对新型钴基高温合金热力学平衡相图及第二相的影响,采用扫描电镜观察了不含 Ni 元素以及含有适量 Ni 元素中新型钴基高温合金的组织演化规律。根据热力学计算结果可知,Ni 元素的添加可有效扩大 $\gamma+\gamma'$ 两相区, γ' 相的固溶温度有所升高。实验研究表明:不添加 Ni 元素的钴基高温合金经 $750^{\circ}\text{C}\times 100\text{ h}$ 时效后,析出细小、方形、大量的 γ' 强化相;添加适量 Ni 元素的钴基高温合金经相同时效处理后,也会析出细小、大量的 γ' 强化相,但 γ' 相形貌由未添加 Ni 元素的立方状过渡到球形。由此,在发展 γ' 强化新型钴基高温合金过程中,可以通过控制 Ni 元素的添加含量,来调整优化 γ' 强化相的形貌,以改善时效强化钴基高温合金的高温力学性能。

C04-P077

基于相图计算的多组元 γ' 相强化钴基合金成分设计

李文道,李龙飞,冯强

北京材料基因工程高精尖创新中心,新金属材料国家重点实验室,北京科技大学

新型 γ' 相强化钴基合金具有良好的抗热腐蚀性能和抗热疲劳性能,并且其高温力学性能显著优于传统钴基合金,因此具有在航空发动机热端部件应用的潜在价值。然而,和商用镍基高温合金相比,该系列合金的工程应用仍然被一些问题所限制,即较窄的 γ/γ' 两相区、较低的 γ' 相溶解温度、较高的合金密度以及较差的高温抗氧化性能。本研究采用相图计算与实验相结合的方法,研究 Ni 元素和 Al/W 比对 Co-Al-W-Ta-Ti-Ni 合金体系的影响规律,并得到了具有较高 γ' 相溶解温度(大于 1200°C)、优异 γ/γ' 两相高温组织稳定性、较低合金密度的 Co-Al-W-Ta-Ti-Ni 六元合金。本研究的研究成果有助于开发

具有更高 γ' 相溶解温度和更好高温组织稳定性的面向工程应用的多组元新型 γ' 相强化钴基合金。

C04-P078

γ' 相强化的 Co-V-Ti 基高温合金的组织控制及力学性能研究

陈悦超¹,潘云炜¹,阮晶晶¹,张锦彬¹,卢勇¹,韩佳甲¹,刘兴军^{1,2},王翠萍^{1,2}

1.厦门大学材料学院及福建省材料基因工程重点实验室

2.哈尔滨工业大学(深圳)材料科学与工程学院

高温合金在航空航天和石油化工等工业领域有着广泛的应用。其中,镍基高温合金由于存在 γ' -Ni₃Al 析出相而具有优异的高温强度、优良的抗疲劳和抗蠕变性能,成为航空发动机和地面燃气轮机高温叶片的首选材料^[1]。传统钴基高温合金具有较高的初熔温度、更好的抗热腐蚀及耐磨损性能。然而,传统钴基高温合金依靠固溶强化及碳化物弥散强化,缺乏类似镍基高温合金中 γ' 相的共格强化机制,导致其高温力学性能不及镍基高温合金,使得其在高温领域的应用受限。

2006年,日本东北大学的Ishida教授等人在Co-Al-W体系中发现了具有L1₂结构的 γ' -Co₃(Al, W)相,该Co-Al-W系合金的熔点比镍基高温合金高出近50~100°C且高温力学性能与商用镍基高温合金Waspaloy相当^[2]。因此,依靠 γ' 相强化的新型Co基高温合金具有很大的发展潜力。

C04-P079

热处理对一种钴基合金带材组织性能影响研究

牛永吉^{1,2},董逸群¹,张志伟²,安宁²,高杨²,田建军²

1.北京科技大学

2.北京北冶功能材料有限公司

热处理对某变形Co-Cr-Ni-W合金带材组织性能的影响进行了研究。从试验结果可见,随退火温度的升高,抗拉强度降低,延伸率提高。冷轧态合金经过不同温度退火,退火温度达到800°C以上后,硬度随着退火温度的升高而下降,退火温度对合金硬度的影响曲线中存在两个拐点,一个约在800°C,一个约在1050°C。在800°C~900°C范围,说明在该温度区间,合金开始回复再结晶,随退火温度升高,回复再结晶软化效果越明显。从900°C到1000°C,由于原有碳化物难以回溶,加之又析出了大量碳化物,大量碳化物的存在,抑制了晶粒的长大,也使合金保持了较高的强度,因此硬度下降趋缓,温度达到1000°C以上到1100°C,由于碳化物的较多溶解,合金晶粒度有所长大,硬度曲线中又出现快速下降段,1100°C以上,碳化物大幅度的溶解,使合金强度有了较大幅度下降,硬度趋于稳定。850°C及以下温度退火,金相组织保持变形组织特征,850°C退火态合金在晶界处已可见微小再结晶晶粒;900~1000°C组织显示为原始的变形晶粒与新生成的再结晶晶粒混合存在;1050°C退火态合金组织已近完全再结晶组织,较难辨认原始变形晶界,晶粒度较细小;1150°C以上,合金晶粒长大明显,同时也显示出较多的退火孪晶。

C04-P080

新型 γ' 相强化Co-Ni基定向高温合金组织及性能

屈莎莎,李应举,杨院生

中国科学院金属研究所

本文利用定向凝固技术制备了具有定向凝固组织结构的新Co-Ni基高温合金,研究了合金的组织演变规律及合金高温压缩性能。结果表明,本合金具有较低的密度(9.03g/cm³)和稳定的 γ/γ' 两相组织,无有害TCP相析出, γ' 相溶解温度为1166°C,远高于Co-9Al-9W的990°C。在时效温度900°C~1100°C范围内,随时效温度升高, γ' 相尺寸增加,体积分数略有降低,1100°C时效24h后, γ' 相的体积分数依然接近70%,表现出较高的热稳定性。高温压缩过程中,合金表现出反常屈服现象,温度由600°C升高至850°C时,屈服强度反常升高至607MPa,温度继续升高,屈服强度降低。合金具有良好的高温压缩性能,在1000°C时仍具有330MPa的屈服强度,优于Co-9Al-11W单晶合金,与Co-9Al-10W-2Ta多晶合金相当。合金中较高Ni含量(30at.%)扩大了基体的固溶能力,形成了高含量稳定 γ' 相是其高温性能优良的主要原因。

C04-P081

标准热处理对粉末冶金IN718高温合金组织和性能的影响研究

刘娜,李周,张国庆

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

本文通过将雾化IN718高温合金粉末在1200°C/120MPa/3h下实现热等静压成形,并对制备出的粉末冶金IN718高温

合金进行固溶+双级时效的标准热处理：980°C×1h，空冷，720°C×1h，50°C/h 炉冷至 620°C×8h，空冷，从而研究标准热处理对粉末冶金 IN718 高温合金组织和性能的影响。结果表明，热等静压后的合金组织细小均匀，无孔洞，晶内有明显孪晶，粉末中低的氧含量有利于减少合金中粉末颗粒边界（PPB）。热处理后，合金基体中析出细小均匀的 γ' 和 γ' 强化相，合金中第二相还包括 δ 相、MC 碳化物和氧化物。热处理态合金的室温屈服强度和抗拉强度较热等静压态合金强度大幅提高，塑性略有降低，而热处理态合金的 650°C 高温屈服强度较热等静压态合金显著提高，抗拉强度小幅增加，塑性变化不明显。经标准热处理后，所制备的粉末冶金 IN718 合金室温和高温拉伸性能，尤其是室温拉伸性能明显优于常规锻造态 IN718 合金。合金的室温断口形貌表现为伴有大量细小韧窝的沿晶断裂特征，其 650 °C 高温断口形貌则表现为沿晶和穿晶混合断裂模式。

C04-P082

一种改善粉末冶金高温合金热加工性能的热等静压工艺

谭黎明,刘锋,江亮

中南大学粉末冶金国家重点实验室

制备粉末冶金高温合金通常需要经历制粉、热固结、热挤压、热锻造等生产工艺，其中，热挤压工艺能够有效细化合金的晶粒，同时能够大大改善粉末冶金高温合金中原始粉末颗粒边界，破碎非金属夹杂物。然而，对于生产大尺寸合金坯料而言，实现一定挤压比的热挤压对设备要求高、成本消耗大。本报告将从粉末冶金高温合金的热等静压工艺的模拟与设计等方面展开，介绍一种改进后的热等静压工艺，使得粉末冶金高温合金具有更好的热加工性能，进一步降低对热挤压设备的吨位要求，可以实现更高挤压比的热挤压。

为了保证合金在低高温的强度，粉末冶金高温合金通常含有 35~65% 体积分数的 γ' 相，这使得合金在高温下还具有相对较高的变形抗力，而增加 γ' 相的尺寸和相间距可以有效降低合金的变形抗力，同时，细化合金晶粒也可以改善合金的高温塑性。本工作中，通过改变热等静压工艺，可以在保证合金在完全致密的情况下，使 γ' 相充分长大，并获得平均晶粒尺寸低于 10 μm 的晶粒组织，最终通过挤压比 6:1 的热挤压，生产出直径~100 mm 的粉末冶金高温合金坯料。

C04-P083

不同 Ta 含量对 FGH4098 合金 γ' 相和 TCP 相析出行为的影响

邢鹏宇^{1,2},贾建^{1,2},张义文^{1,2}

1.钢铁研究总院高温材料研究所

2.钢铁研究总院高温合金新材料北京市重点实验室

随着航空航天领域的发展，高温合金材料得到了快速的发展。粉末高温合金已成为制备航空发动机核心热端部件的关键材料。其中，第三代粉末高温合金一个普遍的特点就是在第二代粉末高温合金的基础上，都加入了一定量的 Ta，使得合金的蠕变强度和疲劳裂纹扩展抗力有了明显的提高。目前，有关 Ta 在铸造和变形高温合金中的作用已经开展了大量的研究，但由于 Ta 在铸造高温合金中存在严重偏析，而粉末高温合金在制粉过程中，粉末颗粒是由微量液体快速凝固形成的，成分偏析被限制在粉末颗粒内，消除了常规铸造中的宏观偏析，有利于 Ta 在合金中更加均匀的分布，这使得 Ta 在各相中的含量以及相的组成、含量和形貌与铸造高温合金中有所不同，从而导致 Ta 对粉末高温合金性能的影响与铸造高温合金存在差异。

FGH4098 是我国所研发的第三代高强度高损伤容限型粉末高温合金，使用温度可达 750°C，Ta 含量在 2.4% 左右。本文利用 OM、SEM、FE-SEM、EDS、EPMA、TEM、XRD 等方法，研究了 Ta 含量分别为 0、1.2%、2.4%、3.5% 和 4.7% (质量分数) 的 FGH4098 合金的显微组织差异，主要研究了 Ta 含量对 FGH4098 合金在热处理态和长期时效过程中 γ' 相和 TCP 相析出行为的影响，对了解 Ta 在第三代粉末高温合金中的作用具有重要的意义。

研究表明：Ta 主要分布在 γ' 相中，增加 γ' 相的含量，增大二次 γ' 相尺寸，使 γ' 相组成主要由 $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti,Nb})$ 转变为 $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti,Ta,Nb})$ ，加剧了二次 γ' 相由椭球状向方形转化的倾向；Ta 能够增加 γ/γ' 晶格错配度，加快长期时效过程中二次 γ' 相的长大和分裂；在 650°C~800°C 长期时效过程中，Ta 含量较高的合金中会析出 σ 相，合金中加 Ta 会增大高温下 σ 相的析出倾向。

C04-P084

等温锻造和固溶冷却工艺对 FGH96 合金显微组织和蠕变性能的影响

周磊,汪煜,宋晓俊,王超渊,邹金文

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

采用光学显微镜 (OM) 和场发射扫描电镜 (FESEM) 研究了不同等温锻造坯料加热温度 (1070°C, 1080°C, 1090°C, 1100°C) 以及固溶冷却工艺 (风冷+油淬, 空冷+油淬, 炉冷+油淬) 条件下 FGH96 合金的显微组织和蠕变性能。结果显示：随着等温

锻造坯料加热温度的提高,经相同热处理工艺后的 FGH96 合金晶粒度逐渐降低,蠕变性能逐渐提高;而在相同晶粒尺寸条件下,不同的固溶冷却工艺则会影响 FGH96 合金中二次 γ' 相和三次 γ' 相的形态、尺寸以及体积分数,从而显著影响 FGH96 合金的蠕变性能。坯料加热温度为 1090°C 并采用空冷+油淬固溶冷却工艺的 FGH96 合金具有优良的蠕变性能。

C04-P085

固溶温度对一种高 W 镍基高温合金组织的影响

侯桂臣,谢君,王振江,仇凤江,荀淑玲,谭明晖,于金江,孙晓峰,周亦胄

中国科学院金属研究所

借助光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)对一种高 W 镍基高温合金进行不同温度固溶处理后的组织形貌观察,研究了固溶温度对高 W 镍基高温合金中枝晶、共晶、 r' 相及碳化物数量、尺寸及形态的影响。结果表明:通过金相观察,该合金在 1240°C 下固溶时,在合金枝晶间区域发现了初熔组织,故合金的固溶温度不应超过 1240°C。随着固溶温度的升高,在合金元素的扩散作用下,合金中的二次枝晶尺寸略有增大,使枝晶间的共晶含量逐渐减少,促使合金组织致密化;同时,合金枝晶间和枝晶干的 r' 相发生溶解,使铸态 r' 相由不规则形态向颗粒状发生转变,且 r' 相的尺寸逐渐减小;在随后的冷却过程中,在合金基体中析出纳米级的细小 r' 颗粒;在高温固溶处理期间,枝晶间和晶界区域的初生条状 MC 相与 r 基体发生反应,分解形成粒状 M_6C 碳化物,其反应方程如下: $MC_{初生} + r \rightarrow M_6C_{次生} + r'$,且条状 MC 碳化物的分解程度随着固溶温度的提高而增加,分解后的碳化物尺寸略有增大,并保持原有的骨架状形态;相比之下,共晶处的大尺寸块状 M_6C 相形态与数量无明显变化。经高温固溶处理后,高 W 镍基高温合金中各元素的偏析程度均有不同程度降低,其中,枝晶间的偏聚元素 Nb、Ti、Hf 等向枝晶干扩散,而偏聚于枝晶干的元素 W 向枝晶间扩散,使合金元素的偏析程度大幅降低。

C04-P086

Al 元素对一种新型镍基高温合金组织和性能的影响

吴保平,吴剑涛,袁晓飞,尹三强,燕平,李俊涛

钢研研究总院

研究了 7.6%-8.27%Al 元素对一种新型镍基高温合金组织和性能的影响。结果表明,合金主要析出相为 γ' 相、 γ 相、MC,其中碳化物主要有两种,一种为富 Mo 和 Ti 的 MC_1 ,一种为富 Hf 和 Ti 的 MC_n 型碳化物,形貌主要为块状和少量的条状。随着 Al 元素含量的增加,初生 γ' 含量和尺寸显著增加,其中当 Al 含量在 7.6%-8.06% 变化时,初生 γ' 含量由 0.3% 增加至 1.35%,初生 γ' 尺寸由 10 μ m 增加至 20 μ m; 进一步增加 Al 含量至 8.27% 时,初生 γ' 含量显著增加至 2.29%,初生 γ' 尺寸增加至 30 μ m。Al 元素含量的增加能够显著提高合金 1050°C/100MPa 的持久性能,但当 Al 含量增加至 8.27% 时,合金中的初生 γ' 含量和尺寸显著增加,持久过程中其易成为裂纹源,降低合金的持久性能。

C04-P087

纯镍高温氧化过程的定量动力学模拟

邢方舟,塔娜,钟静,张利军

中南大学

本论文首先严格评估了文献中各种实测体扩散和短路扩散系数数据,并基于建立在 CALPHAD 框架下的 DICTRA 软件优化了 Ni 和 O 在 NiO 中的原子移动性参数。由于 Ni 的氧化机制较复杂,NiO 氧化层的生长不仅仅是由阳离子的扩散控制的。因此,本工作使用“平均扩散系数”的概念代替 Ni 的扩散系数。此外,通过化合物的界面移动速率方程推导了与温度相关的抛物线速率常数的数学表达式,并模拟了在 723K-1473K 温度下 Ni 氧化层的生长过程。通过对比模拟和实验结果发现:本工作模拟结果比由 Wagner 经验公式计算得到的氧化层生长情况更接近实验值。同时,模拟结果还表明:在较低温度时 Ni 的短程扩散起主导作用,在高温下氧化层生长主要由氧的体扩散控制,而在中间的温度范围中,Ni 的体扩散和氧的有效扩散系数则控制着氧化物的生长过程。

C04-P088

Cr-Nb 二元系第三代热力学数据库的建立

江昱洵,张利军

中南大学粉末冶金国家重点实验室,长沙 410083

Cr 和 Nb 是众多商用合金的重要添加元素。二者形成的 Laves 金属间化合物 Cr_2Nb 具有优异的高温抗氧化性能和抗蠕

变能力,对高温结构材料的发展有着重要意义。Cr-Nb 二元系精准的相图及热力学信息是进行高温合金设计的基础。本文针对前人关于 Cr-Nb 二元系热力学计算中存在的问题,采用最新报道的从 0 K 到 6000 K 的纯组元热力学描述,并考虑最新报道的生成焓及前人未采用的 Laves_C15 Cr₂Nb 相低温热容数据,基于 CALPHAD 方法获得了 Cr-Nb 二元系从 0K 到 6000 K 精准的热力学描述。所计算的相平衡及热化学数据与实验值的吻合程度比前人报道结果均更好。此外,本文还讨论了第三代热力学数据库与第一原理计算相结合的优势。

C04-P089

位错对 Ni-Al 模型单晶高温合金 1000 °C 热暴露过程中组织演变的影响

刘程鹏¹, 张晓娜^{1*}, 葛麟¹, 王崇愚^{2,3}, 于涛³, 张泽⁴

1. 北京工业大学固体微结构与性能研究所, 北京 100124;
2. 清华大学物理系, 北京 100084;
3. 钢铁研究总院, 北京 100081;
4. 硅材料国家重点实验室, 浙江大学材料科学与工程系, 浙江杭州 310027

镍基单晶高温合金由于具有卓越的高温综合性能,被广泛应用于先进航空发动机的涡轮叶片上[1]。其服役环境十分苛刻,需要同时承受高温和复杂的应力环境,显微结构演变过程亦十分复杂。研究镍基单晶高温合金显微结构演变过程对于理解结构和性能之间的关系很有帮助。本文研究了预应力对镍基单晶高温合金在热暴露过程中组织演变影响。

我们首先对 Ni-Al 模型单晶高温合金在扫描电子显微镜中进行室温原位拉伸实验[3],发现塑性变形受两套滑移系的控制,在试样断口处变形剧烈,而在远离断口处发生轻微的塑性变形。通过透射电镜分析发现靠近断口处有大量的位错,并且发生缠结,而远离断口处位错较少。

然后对拉伸断裂样品在 1000 °C 下分别进行热暴露 50h, 100h, 200h 实验,并进行系统的显微结构研究。结果表明,在断口附近,缠结的位错形成位错墙,通过高温下的位错运动形成再结晶亚晶界,使得样品发生了胞状再结晶;而在远离断口处位错密度较小,不利于再结晶晶核的形成,初始 γ' 相发生了粗化。随着热暴露时间的延长,再结晶宽度持续增加,其晶界沿着滑移线的方向迁移。未发生再结晶的区域,滑移带内 γ' 相粗化沿着滑移线方向,而滑移带外 γ' 相粗化沿着各向同性的 $\langle 001 \rangle$ 方向。

C04-P090

利用 SPS 技术制备 Mo-Si-B 涂层及抗氧化性能研究

温斯涵,沙江波

北京航空航天大学

利用放电等离子烧结技术在新型 Nb-Si 基合金上制备 Mo-Si-(5, 10, 15)B 三元涂层。Mo-Si-B 涂层由 MoSi₂/MoB/SiO₂/Mo₂B₅ (Mo₅Si₃) 组成的外层和一个互扩散层组成,其中互扩散层包括 SiO₂+(Nb, Ti, Mo)₅Si₃ 中间层和(Nb, Ti, Mo)₅Si₃ 内层。不同 B 含量的涂层在 1250 °C 条件下氧化的氧化动力学曲线均符合抛物线规律,氧化 100 小时后 Mo-62Si-5B 合金的氧化增重小于 Mo-57Si-10B 和 Mo-52Si-15B 涂层,大约为 0.41 mg/cm² 远低于未经涂层保护的 Nb-Si 基体(198.2 mg/cm²)。互扩散层在氧化过程中的生长遵循抛物线规律,生长速率很低为 2.05×10⁻¹⁵ m²/s。涂层上形成均匀致密具有保护性的硼硅酸盐层,因此涂层在高温条件下表现出优良的抗氧化性能。同时氧化层与涂层外层一直保持良好的结合,这是涂层中的 SiO₂ 在氧化过程中的钉扎机制导致的。

C04-P091

粉末冶金制备 NbSS/Nb₅Si₃ 两相合金的显微组织与力学性能研究

张莎莎,沙江波

北京航空航天大学

与传统的凝固技术相比,粉末冶金技术能更好的控制合金中相尺度、比例、形态和分布等,有望实现组织控制,获得优化组织,提高合金综合性能。本文应用粉末冶金技术制备超高温结构材料 Nb-Si 基合金,研究了粉末粒度对 Nb-Si 基合金组织和性能的影响规律和机理。

本文以不同粉末粒度的 Nb 粉和 Nb₅Si₃ 粉 (Nb: 36.5, 23.9, 4.5 μm; Nb₅Si₃: 73.7, 39.5, 2.9 μm) 为原料,经放电等离子烧结 (SPS) 工艺制备出 Nb-12Si 合金 (Nb 和 Nb₅Si₃ 体积比为 7:3),研究不同粉末粒度搭配对合金显微组织及断裂行为影响,并与采用真空自耗电弧熔炼技术制备并经 1500 °C/100h 热处理的 Nb-12Si 合金进行对比。后研究发现当 Nb₅Si₃ 相粉末尺寸 (Nb₅Si₃: 2.9 μm) 较小时, Nb₅Si₃ 相倾向于连续网络状分布,裂纹主要沿该相扩展,合金的断裂韧性较低,仅 7.2~8.2

MPa·m^{1/2}；当 Nb₅Si₃ 粉末尺寸较大 (Nb₅Si₃: 73.7 或 39.5 μm) 时, Nb₅Si₃ 相岛状分布在 Nb 相基体中, 此时合金的断裂韧性较好。以最小的尺寸的 Nb 粉末 (Nb: 4.5 μm) 和最大尺寸的 Nb₅Si₃ 粉末 (Nb₅Si₃: 73.7 μm) 为原料制备得到的 Nb-12Si 合金中 Nb 相由大晶粒时的准解理断裂方式转变为解理、撕裂、韧窝混合断裂方式, 其断裂韧性值 (14.5 MPa·m^{1/2}) 最高; 而真空自耗电弧熔炼技术制备的 Nb-12Si 合金断裂韧性为 9.5 MPa·m^{1/2}。

C04-P092

Nb-Si 合金表面 SiBCN 抗氧化涂层的微观结构与氧化行为

曹雪,康永旺,刘伟,郭丰伟,谭僖,曹腊梅

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

本文利用旋涂法将聚硼硅氮烷前驱体溶液均匀涂敷在 Nb-Si 合金表面, 通过前驱体转化法, 在合金表面形成致密均匀的 SiBCN 涂层。分析了前驱体溶液浓度与涂敷次数两个主要参数对涂层质量与厚度的影响, 研究发现前驱体浓度≤30%时, 均可在 Nb-Si 合金表面形成平整致密的 SiBCN 涂层, 初始涂层厚度随涂敷次数的增加逐渐增加, 厚度变化趋于平缓。经过 1250°C×10h 氧化测试, 涂层的氧化失重率为 0.29%, 增重速率为-0.87mg/cm², 涂层表面形成了连续致密的 SiO₂ 保护层。

C04-P093

不同 Al 含量对 Nb-Si 基超高温结构材料相组成及高温氧化行为的研究

郭丰伟,康永旺

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

本文研究了不同 Al 含量的多元合金化铌硅基超高温结构材料的相组成, 及其在 1250°C 下空气中的静态高温氧化行为。结果表明: Al 在 Nb-Si 合金两相中均能固溶, 在 Nb 固溶体相中固溶度大于硅化物相, 当 Al 含量大于 6 at% 时, 高温热处理后合金析出 Nb₃Al 相。Nb-Si 合金在高温氧化过程中发生严重的内氧化现象, 内氧化大多发生在 Nb_{ss} 固溶体相中, 主要析出 Ti 氧化物; 当固溶体相中的合金元素都氧化析出后, 合金开始发生外氧化, 外氧化过程中氧化物发生两次固相反应, 每次固相反应生成均带来氧化皮结构和缺陷的明显变化, 最终在材料表面形成多层的疏松氧化层; 氧化皮主要成分为 TiNb₂O₇、Ti₂Nb₁₀O₂₉、SiO₂ 和 TiO₂, 氧化增重曲线较好地符合直线规律, 说明材料的氧化皮并未产生良好的保护效果, 但含有 Nb₃Al 相的合金氧化增重速率低于不含 Nb₃Al 相的合金。

C04-P094

面向铌硅基高温合金的反应力场开发

唐宇超², 杜婉¹, 肖斌², 刘馥², 陈建辉¹, 李一航², 刘轶^{1,2}

1 上海大学材料基因组工程研究院

2 上海大学物理系量子与分子结构国际中心

反应力场 (ReaxFF) 是基于键序的经典力场, 已成功用于碳氢有机小分子、高分子、含能材料、金属氧化物及过渡金属催化剂体系的反应动力学模拟研究。本研究介绍了开发面向 Nb-Si 基高温合金的 ReaxFF 反应力场的初步工作。具体内容: (1) 基于 QM 训练集 (包括晶体结构、形成能、电荷、表面能和状态方程等) 的 Nb-Si 基高温合金 ReaxFF 反应力场参数优化及力场拟合; (2) 通过研究材料体相的拉伸和压缩等行为, 对 Nb-Si 合金的 ReaxFF 反应力场进行初步验证。

C04-P095

V-Si 金属间化合物电子束制备工艺研究

陈道明¹,刘侠和²,曲凤盛¹,阳家文¹,苏斌¹

1.中国工程物理研究院材料研究所

2.东北大学冶金学院

V-Si 基金属间化合物是潜在高温环境用结构和功能材料, 但由于种类较多、熔点较高, 导致该类合金材料制备困难, 阻碍了 V-Si 合金的发展和应。本文针对钒硅金属间化合物的制备难点, 采用电子束熔炼方法, 阐明制备工艺对合金组织性能的影响规律。结果表明: 采用保温温度 2150°C-2250°C、保温时间 20min、钒硅配比 3:1 可获得较好效果, 利用电子束的搅动作用实现熔体的组分均匀化, 所得合金组织和成分均匀性较好, 合金硬度值可达 848MPa。

C04-P096

快速凝固 Ni-Si/Ge 合金的组织演变与力学性能研究

燕鹏旭,王伟丽,魏炳波

陕西省西安市西北工业大学

采用自由落体与铜模喷铸技术实现了二元 $\text{Ni}_{95}\text{Si}_5$ 和 $\text{Ni}_{95}\text{Ge}_5$ 单相合金及 $\text{Ni}_{43.8}\text{Si}_{56.2}$ 和 $\text{Ni}_{33}\text{Ge}_{67}$ 共晶合金的快速凝固。结果发现,随着熔体冷却速率增大,合金凝固组织均显著细化,单相合金中(Ni)枝晶发生了“粗大枝晶→细化枝晶→等轴枝晶”转变。对于 $\text{Ni}_{43.8}\text{Si}_{56.2}$ 合金,晶粒密度不断增大,层片间距逐渐减小。 $\text{Ni}_{33}\text{Ge}_{67}$ 合金的凝固组织由不规则共晶逐渐细化并转变为含少量初生 Ge 相的过共晶组织。由于自由落体液滴有更高的冷却速率,合金凝固组织更加细密,其硬度明显高于喷铸合金,可见高冷速引起的组织细化可以显著提升材料硬度。对于 $\text{Ni}_{33}\text{Ge}_{67}$ 共晶合金,结合巴氏裂纹模型可知,组织细化是材料的主要增韧机制,韧性相体积分数的增加起辅助增韧作用。另一方面,单相塑性合金与共晶脆性合金具有不同的硬度和强度关系,脆性材料由于压痕裂纹的产生会使硬度值增大,硬度与强度的比值远大于 3,而塑性材料由于抵抗变形能力较弱,硬度与强度的比值略小于 3。由硬度和强度的相关性可知,组织细化不仅有助于提升合金硬度,同时可以提高材料强度,由于自由落体合金的硬化现象更加显著,其强度也高于喷铸合金。

C04-P097

CeO₂ 颗粒影响 Ni₂Al₃ 涂层氧化机制的根本原因研究

王小兰¹,谭晓晓¹,彭晓²

1.中国科学院金属研究所

2.南昌航空大学

铝化物涂层是广泛应用的一种 Al_2O_3 膜热生长型高温防护涂层,其中加入稀土氧化物使 Al_2O_3 膜生长速率进一步降低,即产生了所谓的 REE。此原因常用“动态偏聚模型”来解释,即在氧势的作用下,稀土氧化物首先在金属中部分分解而产生稀土原子,它先向氧化膜/金属界面迁移而后进入氧化膜并在其晶界偏聚,偏聚的金属原子由界面向表面扩散并在其过程中抑制供 Al_2O_3 膜生长的 Al^{3+} 和 O^{2-} 的扩散。但这一模型不能解释为什么既然稀土氧化物比常见的热生长氧化物(如 NiO , Cr_2O_3 和 Al_2O_3)等都要稳定,那么它们如何在金属基体中产生稀土原子而向氧化膜/金属的界面迁移呢?针对这一问题,通过对 CeO_2 弥散的 Ni_2Al_3 涂层在 1100°C 的初生氧化膜进行微区成分分析和结构表征,有以下发现:(1) Al_2O_3 膜由向内生长的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜和向外生长的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜组成;(2)内层 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜晶界上有 Ce 离子明显偏聚;(3)外层的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜有沿着孪晶界析出的新的 Ce_2O_3 颗粒;以及(4)基体金属中没有发现单质 Ce 存在。据此,提出了 CeO_2 产生 REE 的模型:在氧化过程中,首先生长 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层,然后在其底下 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 形核并向内生长,导致 Ni_2Al_3 中弥散的 CeO_2 颗粒嵌入其中,然后 CeO_2 部分溶解释放出 Ce 离子并在 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的晶界上偏聚,Ce 离子在氧势的作用下沿着晶界向外扩散,最终在外侧的氧化膜与氧结合形成 Ce_2O_3 重新析出。

C04-P098

TNM 合金热变形过程中的组织特征及动态再结晶行为

向林,薛祥义,唐斌,寇宏超,李金山

西北工业大学

TNM 合金是一种典型的 $\beta\text{-}\gamma$ 凝固 TiAl 合金,其具有良好的热加工能力,目前,国外已通过锻造的方法,生产了 TNM 合金低压涡轮叶片,并在空客 A320 上成功应用。因此,研究 TNM 合金热变形过程中的组织演变及变形机理,对大型 TNM 合金锻坯的制备具有指导意义。本文通过热模拟压缩实验的方法,研究了 $\text{Ti-42.99Al-4.01Nb-0.99Mo-0.19B}$ 合金热变形过程中的组织演变及其动态再结晶行为。研究表明,TNM 合金组织对温度和应变速率非常敏感。随着应变速率的降低,残余片层尺寸逐渐减小,动态再结晶程度增大;而温度对组织的影响较为复杂,存在一个临界值,当变形温度低于临界值时,动态再结晶程度随温度的升高而增大,继续升高变形温度,即变形温度高于临界值时,温度对动态再结晶影响较小。另外,当变形温度高于 1100°C ,应变速率低于 0.01s^{-1} 时,组织中的 β 相发生完全动态再结晶。动态再结晶的发生,首先出现在片层团界面,随后动态再结晶在不断地进行。同时,孪生形核机制有助于动态再结晶的发生。并且,TNM 合金在热变形的过程中,会发生应力诱发 $\alpha_2\rightarrow\beta$ 相转变,这些由转变而来的 β 相首先在 α_2/γ 板条界面形核,随后向 α_2 板条长大,直至 α_2 板条被隔断。

C04-P099

TiAl/Ti₂AlNb 双合金环形结构件扩散连接有限元模拟

张晓强,唐斌,寇宏超,李金山,周廉

西北工业大学

Ti-Al 系金属间化合物具有低密度、高比强以及高温抗蠕变、耐腐蚀、抗氧化等一系列优点,是航空航天领域最具应用前景的轻质高温金属结构材料。实现 Ti-Al 系金属间化合物与自身或异种合金的连接是获得满足航天使用要求的双性能结构件的前提。本文针对 TiAl/Ti₂AlNb 双合金环形结构件的扩散连接技术开展研究,提出一种在环形连接界面上获得适宜且可调控连接压力的扩散连接方法。本方法将连接界面设计成倾斜界面,该种结构使得 TiAl 环缘在加热膨胀过程中可以逐渐下落以保持界面始终接触。通过建立环形结构件扩散连接的有限元模型,分析下落距离以及界面倾斜角对连接压力的影响规律,并获得最优参数。研究表明:连接压力在 TiAl 环缘下落过程中产生并逐渐增大,在保温过程中达到稳定。过大的界面倾斜角会造成连接压力沿连接界面分布不均,考虑到加工精度的因素,最佳的界面倾斜角度范围为 3°~5°。最佳下落距离大约是 Ti₂AlNb 环芯半径的 3%,该距离下既可以获得充足的连接压力又不会在界面处产生较大的应力集中。

C04-P100

高温 TiAl 合金中 TiB 原位反应机理及性能

衣凤¹,梁永锋¹,郭世斌²,林均品¹

1.北京科技大学

2.中国科学院理化技术研究所

高 Nb-TiAl 合金作为一种新型的轻质高温结构材料,在当代航空航天工业、民用工业等应用领域得到广泛关注。高 Nb-TiAl 较普通 TiAl 合金使用温度提高了 100~150°C,为了进一步提高其使用温度,借鉴钛合金中添加 TiB₂ 原位反应生成 TiB,形成硬相包围软相结构的方法,本文在高 Nb-TiAl 合金粉中添加 TiB₂,使 TiB₂ 与基体粉发生原位反应生成高温稳定性强的硼化物,形成销钉结构钉扎在基体粉周围,达到硬相包围基体相的组织结构,在高温下起到晶界强化的作用。本研究选取平均尺寸为 200μm 的高 Nb-TiAl 合金粉与纳米级的 TiB₂ 粉,通过放电等离子烧结的方式制备得到粉末边界原位生成针状硼化物,基体组织为片层组织的结构。生成针状硼化物的尺寸约 5μm,均匀分布在粉末颗粒的边界,粉末基体内的片层团平均尺寸约为 100μm,片层间距约为 0.5μm。室温抗弯强度为 970Mpa,与铸态相当,高温抗弯强度比铸态组织得到较大提高。通过后续热等静压处理可以促进未完全反应的 TiB₂ 继续与基体粉发生原位反应,减少结合缺陷,进一步提高性能。

C04-P101

热机械加工对 γ-TiAl 合金晶界特征分布的影响

轩辕耀冬,吕成成,颜银标,黄鸣,冯文,杨森

南京理工大学

γ-TiAl 基合金是一种极具潜力的轻质高温结构材料,具有耐高温、抗氧化和比强度高特点,但合金的室温脆性导致 γ-TiAl 基合金加工困难,严重阻碍了其广泛应用。本文针对单相 γ-TiAl 合金室温脆性问题,提出利用形变热处理工艺在细化晶粒的同时改善合金的晶界特征分布以提高单相 γ-TiAl 合金的室温塑性。研究中采用 Gleeble-3500 热模拟试验机进行多向等温锻造,同时结合高温短时退火处理,实现了单相 γ-TiAl 合金的晶界特征分布优化,改善了合金的室温塑性。发现大变形量组织可以通过再结晶细化晶粒,而小变形退火则可以显著提高合金中的特殊晶界比例。在 800°C,0.67 总真应变的一道次多向等温锻造和 1300°C 高温短时退火处理后,单相 γ-TiAl 合金的晶粒尺寸由 166μm 降低至 10~30μm。再经过 10% 的小变形退火,特殊晶界比例相对于母材增长了 10%,极限压缩率提高了 6.8%。

C04-P102

高铌 γ-TiAl 合金的热包套挤压和显微组织调控

高太秀,牛红志*,张德良

东北大学,材料科学与工程学院,陶瓷与粉末冶金研究所

γ-TiAl 合金的热挤压棒材,是航空航天发动机叶片模锻所需的关键母材。本研究通过设计先进的热复合包套挤压技术,制备出高品质的 Ti-44Al-6Nb (at %) 高铌 γ-TiAl 合金热挤压棒材。对 VAR 熔炼的高铌 γ-TiAl 合金铸锭进行 α + γ 双相区的 1260 °C/8h/AC 组织预处理,消除了凝固偏析,得到了均匀的全片层结构组织。利用单一 α 相区预热和优化设计的热包套挤压工艺,制备出高品质的 Ti-44Al-6Nb 合金热挤压棒材。挤压态组织中,残余的 α₂/γ 片层组织沿挤压方向拉长,在层片晶团内部,特别是晶团的晶界区域发生了 α₂/γ 片层的分解和 γ 和 α₂ 相的动态再结晶。通过 α + γ 双相区进行 1240°C 退火处理,

使残余片层组织进一步回复和相变分解, γ 和 α_2 晶粒充分地静态再结晶。挤压态和退火态 Ti-44Al-6Nb 合金经过单一 α 相区 1380/45min/FC 的热处理, 均得到了等轴细小的全片层服役组织。

C04-P103

NiCrFe-Al-hBN 封严涂层与 Ti₂AlNb 叶片在高温高速对磨刮削条件下的磨耗行为研究

程旭莹^{1,2},刘通²,刘建明^{1,2},章德铭²,于月光^{1,2}

1.东北大学

2.北京矿冶科技集团有限公司

随着航空发动机向更高推重比发展, 其高压压气机部位大量采用了 Ti₂AlNb 这种理想的轻质高温结构材料。本研究主要通过一种高温高速摩擦试验装置, 对 Ti₂AlNb 叶片与 NiCrFe-Al-hBN 封严涂层的初始状态和 750°C 保温 200h 后的状态, 在测试温度为 750°C、叶尖线速度为 300m/s、进给速率为 5、50、480 μ m/s 的条件下进行了刮削实验。采用扫描电子显微镜、x 射线衍射、电子探针显微分析和显微硬度分析的方法对刮削试验后的叶片和涂层磨痕处进行了观察和研究。结果显示, 进给速率对叶片磨损率有较大的影响, 高速摩擦时产生的叶片氧化和高进给速率下涂层磨痕处高硬度区的形成导致了叶片磨损的发生。750°C 保温 200h 后涂层中氧化物硬质相的生成会加重对叶片叶尖的磨损。

C04-P104

一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-W-Si 短时高温钛合金的微观组织和力学性能

刁雨薇,宋晓云,张文婧,赵铭钰,叶文君,惠松骁

有研工程技术研究院有限公司

随着航天工业的不断发展, 传统的长时高温钛合金已经无法满足高速飞行器对工作温度及使用性能的要求, 因此, 综合力学性能、成形工艺等各方面考虑, 650°C 及以上温度使用的短时高温钛合金的研制工作得到了极大的重视。本课题组在传统 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 合金体系的基础上, 添加 Nb 和 W 元素提高合金高温强度并改善成形工艺, 设计了新型 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Nb-W-0.2Si 系 $\alpha+\beta$ 两相钛合金, 该合金可短时应用于 700°C 环境, 且具有优异的加工性能。

本文以 Ti-6.5Al-2Sn-4Zr-1Mo-3Nb-0.5W-0.2Si 合金为研究对象, 分别采用 ($T_{\beta}-20^{\circ}\text{C}$)/2h/AC 单级退火以及 ($T_{\beta}+20^{\circ}\text{C}$)/1h/AC+600°C/2h/AC 双级退火两种热处理工艺, 利用金相、SEM、EBSD、拉伸及持久等方法系统研究了热处理对合金的显微组织及力学性能的影响。结果表明: 合金经单级退火后获得由初生 α 相(α_p)与 β 转变组织(β_t)组成的双态组织, 其中 α_p 含量约为 40%, 片层状 β_t 组织上分布着尺寸约为 300nm 的次生 α 相(α_s)。单级退火后合金具有良好的室温和 700°C 高温性能匹配, 室温下抗拉强度达 1140MPa, 屈服强度达 1050MPa, 延伸率达 16%。随着温度的升高, 合金强度下降, 700°C 下抗拉强度达到 470MPa, 屈服强度 310MPa, 延伸率达 52.5%, 700°C/250MPa 下的持久时间可达 2.5h。双级退火后, 合金组织转变为粗大片状的魏氏组织, 室温塑性急剧下降, 延伸率仅为 4%, 但是高温强度提高, 700°C 时抗拉强度达到 510MPa, 屈服强度则达到 350MPa。

C04-P105

计算模拟研究孪晶界诱导的 β 钛相变问题

陈秋捷^{1,2},王绍青^{1,2}

1.中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室

2.中国科学技术大学材料科学与工程学院

在 β 钛合金相变过程中, 沉淀析出相通常会优先在 β 母相的晶界处形核长大, 晶界与相变之间存在着密不可分的联系。但到目前为止对于晶界在相变中所起的作用却仍然不太清晰。为了深入研究晶界对相变过程的影响, 首先需要研究不同晶界结构诱导相变的机理。本工作利用第一原理计算方法对孪晶界诱导 β 钛相变的机理进行了研究。在 0K 下体心立方 β 钛属于亚稳相, 含有孪晶界的构型将更不稳定, 因此在结构弛豫过程中孪晶界可以自发地诱导 β 钛相变。本研究主要选取了 β 钛的三种常见孪晶界: (111)[(11)over-bar2]、(112)[(11(1)over-bar)]和(332)[(11(3)over-bar)]。它们诱导 β 钛相变所得的稳定结构分别为: 六方 ω 相、密排六方 α 相双晶以及完全 α 相。形成六方 ω 相的原子运动路径为: (111)[(11)over-bar2]孪晶界在(11(2)over-bar)面的原子堆垛顺序为"...ABCA..."。弛豫过程中 B 和 C 层的原子从孪晶界面处开始沿<111>方向依次移动 $\sqrt{3}/12\alpha_{\beta}$ (α_{β} 为 β -Ti 晶格常数)的距离, 使其最终形成六方 ω 结构。 α 钛双晶结构则是由(112)[(11(1)over-bar)]孪晶界诱导形成的, 其相变机理为: 以紧邻(112)孪晶界面的第一层原子作为相变形核的起始原子层, 它与第二层原子分别沿着[(11(1)over-bar)]及其反方向, 原子的相对移动距离为 $\sqrt{3}/6\alpha_{\beta}$, 按照这种运动方式依次向晶体内部传递。当所有原子在[(11(1)over-bar)]及其反方向移动到相应位置后, 它们将沿[112]方向做微小的移动使整个超胞的结构达到最稳定的状态(即密排六方 α 双晶结构)。(332)[(11(3)over-bar)]

孪晶界诱导 β 钛相变的前期形核机理与前两种相变机理类似, 均是 $\{112\}$ 面上的原子沿着 $\langle 111 \rangle$ 方向运动。当晶界处 α 相形核完成后, 已形成的近似密排六方结构的原子会跟随晶界面上的原子沿 $[11(\bar{3})]$ 方向移动, 最终形成密排六方的超晶胞结构。通过对以上三种孪晶界诱导相变的研究发现, 相变产物与孪晶界的界面结构有着紧密的联系。与此同时, 三种孪晶界的相变机理又有一些共同点, 即相变最先开动的原子总是在 $\{112\}$ 滑移面上且沿 $\langle 111 \rangle$ 着滑移方向运动。与以往的研究结果相比, 本工作采用了一种简单易行的计算方式来研究孪晶界诱导相变问题, 为相变的研究提供了一种全新的思路。

C04-P106

TC17 钛合金大规格棒材性能研究

郭萍,毛小南,辛社伟,王凯旋,侯红苗,张思远,潘浩

西北有色金属研究院

钛合金由于具有一系列优异的性能被作为航空结构材料广泛应用于航空领域。近年来, 随着航空工业的不断发展, 航空发动机对材料性能提出了更高的要求。TC17 钛合金是一种富 β 型的两相钛合金, 属于一种中温高强钛合金, 是航空发动机压气机的重要选用材料之一。钛合金工艺、组织与性能关系错综复杂。深入研究不同热处理对材料性能的影响至关重要。本文主要针对 TC17 钛合金大规格棒材进行了不同热处理工艺的研究, 研究热处理工艺参数对合金组织性能的影响, 旨在为合金在不同应用领域的选材提供理论依据。

C04-P107

高温合金精密铸造型壳的制备及其性能研究

谭科杰,张炫,王新广,林泉洪,侯桂臣,李金国,周亦曹,孙晓峰

中国科学院金属研究所 高温合金部

型壳的性能是影响铸件质量的重要因素之一, 其中型壳的强度、尺寸等性能与背层所用耐火材料密切相关。本文主要研究了型壳的强度、挠度和透气性与背层耐火材料的关系, 以期针对对不同合金的浇注要求选择适当的耐火材料。

主要使用 FSIII 快干型硅溶胶和 GS30 普通硅溶胶两种粘结剂以及 EC95 粉、煤系和非煤系高岭土三种耐火材料制备型壳试样。利用 XRD、DTA 分析了高岭土的物相组成; 利用三点弯曲法和高温自重变形法测定了型壳的抗折强度和挠度; 通过 XRD 和 SEM 等方法研究了型壳的物相组成和显微结构; 利用高温透气性设备对型壳在不同温度下的透气性进行了分析。

实验结果表明: 两种高岭土原料中均出现了方石英、莫来石、石英相和石英玻璃相, 但它们的含量不尽相同, 导致两种型壳的抗折强度有所差异。FSIII 和 GS30 两种硅溶胶对型壳抗折强度的影响不大; 在 1500°C 及以上的温度时, 高岭土型壳蠕变变形量急剧增加, 而 EC95 型壳在 $1000\text{-}1600^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内变形量上升较为平缓; 在 $1000\text{-}1400^{\circ}\text{C}$ 时, 高岭土型壳和 EC95 型壳透气性的变化速率相近, 高温透气性随温度升高而稳定上升; 在 1400°C 以上的温度时, 高岭土型壳发生破裂导致其的透气性急剧升高, EC95 型壳透气性上升速率有所下降。

得到如下结论:

1、高温下, 型壳出现了石英玻璃的晶化转变、方石英转变以及莫来石化反应。不同型壳体系的相变规律不同, 导致不同高岭土型壳的强度有所差异。石英玻璃促进莫来石的形成, 进而提高型壳的高温强度而减小溃散度。

2、高岭土型壳背层与面层耐火材料的热膨胀系数不同, 因此烧结后高岭土型壳会向背层方向而非沿重力方向弯曲, 且面层中石英玻璃含量越多则其膨胀量越大。EC95 型壳面层与背层使用同种耐火材料, 其试样变形则主要是因为型壳中石英玻璃的粘性流动。

3、加入有机物可以提高高岭土型壳的蠕变变形量, 但对 EC95 型壳的影响不明显。

4、透气性试验中, 高岭土型壳在 1400°C 以上时产生较多玻璃相导致强度急剧下降发生破裂, EC95 型壳则表现良好。

C04-P108

Y2O3 型壳与 DD6 单晶合金的界面反应

姚建省,王丽丽,董龙沛,沈滨,郭飞鹏,许亮

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

在航空发动机涡轮叶片制备过程中, 陶瓷型壳材料在 1500°C 以上的高温下浸泡在合金熔体中, 时间长达数十分钟甚至一小时以上, 尤其是单晶高温合金叶片, 陶瓷型壳所处的工作环境更加恶劣, 铸造工艺对型壳材料也提出了越来越高的要求。

Y_2O_3 熔点高, 化学稳定性好, 是钛合金铸造的首选面层材料, 但其与单晶高温合金的界面反应情况未见报道。为了验证 Y_2O_3 型壳对 DD6 单晶合金的工艺适用性, 本文采用 SEM、EDS、XRD 等手段研究了 DD6 单晶合金与 Y_2O_3 陶瓷型壳的界面反应。结果表明, 以 Y_2O_3 粉为面层材料的型壳与 DD6 合金发生剧烈反应, 合金表面粘砂严重, 反应表面呈现不同程度的反应

坑；反应产物主要有 HfO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 、类 Nb/Ta 氧化物。反应层与合金粘结紧密，厚度一般大于 $20\mu\text{m}$ ；根据形貌、成分不同，反应层可分为内外两层，接近合金的内层主要由 Al_2O_3 和 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 颗粒组成；远离合金的外层由 SiO_2 、 Al_2O_3 和 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 颗粒组成。

C04-P109

Al₂O₃-Y₂O₃,Al₂O₃ 涂层对 SiO₂ 基型芯与 DD6 高温合金界面反应的影响

李鑫

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

硅基陶瓷型芯用于形成空心叶片的复杂内腔结构，其尺寸直接决定了空心叶片的内腔形状和大小。虽然硅基陶瓷型芯可以满足现有的叶片浇注使用要求，但是硅基陶瓷型芯的高温化学稳定性差，容易在高温下与高温合金中的活泼金属元素发生界面反应。本文针对以上问题研究了 Al_2O_3 - Y_2O_3 复合涂层和 Al_2O_3 涂层对氧化硅基陶瓷型芯与 DD6 高温合金界面反应的抑制作用。研究表明， Al_2O_3 - Y_2O_3 复合涂层中的 Y 元素与 SiO_2 、 Al_2O_3 在低于 1500°C 下发生反应，生成了低熔点液相，加剧了界面反应中的置换反应阶段的反应，使 Al_2O_3 - Y_2O_3 复合涂层失去作用。 Al_2O_3 涂层阻碍了型芯中的 O、Si、Ca 元素和合金中的 Al 元素的扩散，即 Al_2O_3 涂层阻碍界面反应中扩散阶段的发生，进而抑制了界面反应的发生。该涂层可以改善叶片内腔表面表面质量，表面粗糙度 Ra 值为 $2.58\mu\text{m}$ 。

C04-P110

电熔莫来石矿化剂对陶瓷型壳性能的影响

董龙沛,姚建省,沈滨,郭飞鹏,李小玉,唐定中

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

为保证高温合金精密铸造用陶瓷型壳具有良好的高温强度，往往向陶瓷型壳浆料中加入煅烧莫来石作为矿化剂，但煅烧制备的莫来石粉工艺稳定性较差，对陶瓷型壳的性能会产生较大影响。为改善陶瓷型壳的性能，使用电熔莫来石替换煅烧莫来石作为陶瓷型壳浆料的矿化剂。研究了不同电熔莫来石加入量（3~15wt%）对陶瓷型壳浆料的悬浮性、固含量与涂挂性的影响，以及对应条件下制得型壳湿态抗弯强度、室温抗弯强度、高温抗弯强度、高温自重变形、型壳致密度与热膨胀系数的影响。结果表明：随着电熔莫来石加入量从 3wt% 增加到 15wt%，陶瓷型壳的高温抗弯强度也随之增大，高温自重变形随之减小。同时制备了 9wt% 煅烧莫来石作为矿化剂的陶瓷型壳，与 9wt% 电熔莫来石陶瓷型壳进行了性能对比并利用 SEM 对型壳的显微形貌进行了分析，利用 XRD 对陶瓷型壳的物相组成进行了分析。结果表明：9wt% 矿化剂加入量时，电熔莫来石陶瓷型壳的高温抗弯强度为 9.33MPa ，较煅烧莫来石陶瓷型壳提高了 89.6%；电熔莫来石陶瓷型壳的高温自重变形为 0.25%，较煅烧莫来石陶瓷型壳降低了 90.5%。通过 SEM 形貌分析与 XRD 物相分析，电熔莫来石陶瓷型壳的高温抗弯强度增大与高温自重变形减小主要得益于陶瓷型壳中的莫来石相含量增大，相比于煅烧莫来石，电熔莫来石对陶瓷型壳在高温下二次莫来石相的生成有更大的促进作用。

C04-P111

预添加方石英粒度分布对硅基陶瓷型芯性能影响

牛书鑫,李鑫,姚建省,王丽丽,杨小薇,许亮,王增利,石振梅

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

本研究以方石英为辅助矿化剂制备空心叶片用氧化硅基陶瓷型芯，研究了所添加方石英的粒度分布对氧化硅基陶瓷型芯物理与化学性能的影响。并结合 X 射线衍射（XRD）、扫描电子显微镜（SEM）对陶瓷型芯的物相组成及显微结构进行了表征。结果表明，随着方石英粒度分布由粗变细，陶瓷型芯的收缩率、体积密度和溶失性能呈现先降低后增高的趋势，陶瓷型芯力学性能变化相对缓慢。当方石英粒度 $D(50)$ 为 $5\mu\text{m}$ 时，陶瓷型芯收缩率为 0.35%，室温强度为 23.5MPa ，挠度为 0.12mm ，析出的方石英含量为 35%，陶瓷型芯的综合性能可有效满足单晶、定向叶片浇注使用。

C04-P112

烧结温度对氧化硅基陶瓷型壳显微组织及力学行为的影响

魏倩,许自霖,许庆彦,柳百成

清华大学

摘要：陶瓷型壳的性能直接影响高温合金叶片的成品合格率。传统熔模铸造制壳工艺周期长、成本高，且型壳质量不稳定。选择性激光烧结（SLS）作为增材制造的重要分支，已成功应用在航空航天、通讯、生物医学等领域，SLS 的快速发展

为实现陶瓷型壳的快速生产提供了技术支撑。本文采用 SLS 快速制备高温合金叶片用氧化硅基陶瓷型壳初坯,并结合高温烧结 (High-temperature sintering) 进一步提高陶瓷型壳的力学性能。研究不同烧结温度 (1450 °C~1600 °C) 对氧化硅基陶瓷型壳的抗弯强度的影响, 并采用 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 分析型壳的物相组成、断口微观形貌。结果表明: 采用选择性激光烧结+高温烧结技术可快速高效地制备力学性能满足要求的陶瓷型壳, 随着烧结温度从 1450 °C 升高到 1600 °C, 型壳的室温平均抗弯强度增大, 并在 1600 °C 时达到 38.03 MPa; 型壳的主要强化相为柱状莫来石相, 且随烧结温度升高, 型壳中莫来石相含量增加, 石英相含量降低, 方石英相含量先增加后有所降低; 裂纹扩展形式从缓慢扩展转变为迅速扩展并引发瞬断, 断口由撕裂状演变为平齐小断面, 断裂方式由主要的沿晶断裂向穿晶断裂转变, 裂纹倾向于向晶内莫来石扩展。

C04-P113

冷喷涂+热氧化法制备难熔金属型芯涂层及其抗氧化、抗溶蚀性能研究

郑力玮^{1,2},刘恩泽¹,郑志¹,宁礼奎¹,谭政¹,佟健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

在涡轮叶片铸造工艺过程中, 采用具有更好的高温力学性能的难熔金属型芯取代传统的陶瓷型芯, 可以在涡轮叶片中获得更加复杂、精细的气冷通道, 从而极大地提高涡轮叶片的冷却效率。然而难熔金属在高温下不仅会发生灾难性的氧化, 而且会与高温合金溶液发生反应, 因此需要在其表面制备具有抗氧化、抗溶蚀作用的保护膜。本文采用冷喷涂技术在纯铝基体的表面制备了平均厚度约为 90 μm 的纯铝膜层, 采用不同的热氧化工艺将纯铝膜层氧化为氧化物膜层, 研究了不同热氧化工艺下氧化物膜层的形貌与相组成。采用 DZ4125L 高温合金对热氧化后的型芯试样进行浇注实验, 观察浇注后试样截面形貌, 以评价膜层的抗溶蚀能力。结果表明: 在 1000 °C 以上进行热氧化, 得到的氧化物膜层主要由 α -Al₂O₃ 和 Al₂(MoO₃)₄ 组成, 氧化膜疏松多孔; 在 700 °C 进行热氧化, 得到的氧化物膜层主要由 Al₂(MoO₃)₄ 组成, 氧化膜由较为疏松的外层和较为致密的内层组成; 在 700 °C 进行热氧化, 得到的疏松的外层氧化膜是由纯铝氧化形成的, 而较为致密的内层氧化膜是由铝钼间金属化合物氧化形成的; 在 1000 °C 以上进行热氧化, 得到的膜层不具备抗溶蚀能力; 在 700 °C 进行热氧化, 得到的膜层具备抗溶蚀能力, 且随氧化时间的延长, 膜层的抗溶蚀能力增强。

C04-P114

液态金属冷却定向凝固工艺中低熔点冷却介质 Sn 的污染

申健,徐正国,卢玉章,郑伟,张健

中国科学院金属研究所

随着先进航空发动机与燃气轮机的发展, 涡轮前进口温度不断提高, 定向/单晶叶片结构越来越复杂, 尺寸越来越大。液态金属冷却 (LMC) 定向凝固技术由于具有高的温度梯度和冷却速率, 更加适合制造大尺寸结构复杂的定向/单晶叶片。LMC 定向凝固技术中通常采用低熔点液态金属 Sn 作为冷却介质。但是, 在定向凝固过程中型壳开裂可能造成金属 Sn 与高温合金铸件表面发生反应, 导致铸件报废。

本文通过研究不同温度和时间条件下液态金属 Sn 与高温合金样品的反应产物和厚度发现, 液态金属 Sn 与高温合金在 500°C 左右开始发生反应, 并且随着温度的升高, 反应层厚度增加, 反应产物越来越复杂。当温度高于 850°C 时, 在短时间内会发生严重反应。对比分析实际大尺寸定向结晶叶片铸件表面的反应产物, 借助计算机模拟得到的叶片定向凝固过程中不同部位的冷却曲线, 可以推测出液态金属 Sn 与叶片表面发生反应的过程, 为避免液态金属 Sn 的污染提供指导。通过计算分析发现, 当叶片尺寸小于本文所用大尺寸叶片体积的 30% 时, 即使发生型壳开裂, 液态金属 Sn 与叶片表面也不会发生反应。

C04-P115

活性元素 Y 对单晶高温合金熔体与陶瓷型壳界面反应的影响

訾贇,孟杰,周亦胄,候桂臣,孙晓峰

中国科学院金属研究所

Y 是强活性元素, 易与熔炼合金的坩埚和浇注合金的型壳反应, 生成非金属夹杂物, 成为结晶核心, 破坏单晶生长。目前, 有关活性元素 Y 对高温合金熔体与陶瓷型壳界面反应的影响研究较少, 因此有必要对该项工作进行研究。

本文采用座滴法, 以单晶高温合金 DD5 为基础合金, 通过改变合金中活性元素 Y 的含量, 研究了活性元素 Y 对高温合金熔体与陶瓷型壳界面反应的影响。采用几何方法测量了合金熔体与陶瓷型壳的润湿角; 利用配有能谱仪的扫描电镜研究了

合金与陶瓷型壳的界面组织微观形貌，并对反应区内的元素进行了定性分析；利用 XRD 研究了界面反应的产物。

实验结果表明，随着 Y 含量的增加，润湿角呈先增大后减小的趋势，这是由于不同含量的 Y 生成的界面反应产物不同所致。0Y 时，Al 与 SiO₂ 发生置换反应生成 Al₂O₃，润湿角为 119.26°；0.02Y 时，Al、Y 都参加了界面反应，生成了化合物 Y₃Al₂(AlO₄)₃，润湿角为 124.18°；0.1Y、0.5Y、1.0Y 时，Y 主要参加界面反应，生成 Y₂O₃，润湿角分别为 119.35°、117.35°、116.22°。

C04-P116

DZ417G 高温合金定向叶片粘砂缺陷形成机制与抑制措施

李飞^{1,2},赵彦杰¹,韩国明¹,孙宝德^{1,2}

1.上海交通大学材料科学与工程学院

2.上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室

采用座滴法研究了 DZ417G 高温合金熔体与电熔刚玉及其改性陶瓷型壳面层的润湿性，并利用 SEM、EDS 和 XRD 分析了 DZ417G 高温合金定向叶片与型壳面层的界面反应。结果表明：随着电熔刚玉型壳面层中界面反应抑制剂 JD-95 含量的增加，合金熔体与型壳面层的润湿角逐渐增大。当界面抑制剂的含量为电熔刚玉的 3wt.% 时，因合金中 Cr 元素与 Al₂O₃ 界面反应而引起的 DZ417G 高温合金定向叶片化学粘砂缺陷得到了显著的抑制，叶片表面呈现出明显的金属光泽；但当界面反应抑制剂的含量达到 5wt.% 以上，电熔刚玉型壳面层结构变得疏松，孔隙增大，浇注的叶片表面形成了较为严重的热机械渗透粘砂缺陷，同时浅表面的非金属夹杂缺陷也明显增多。

C04-P117

真空感应炉内流槽结构优化的模拟研究

谷雨,曲敬龙,杜金辉

北京钢研高纳科技股份有限公司

为解决高温合金生产过程中流槽死区大和夹杂物去除困难等问题，通过水模拟实验和数值模拟的方法，研究了不同方案对流槽的流动特性的影响及 RTD 曲线，计算了死区、活塞区和全混区的体积分数，并采用 DPM 模型模拟夹杂物在流槽内的流动轨迹。结果表明：采用优化后的方案 B 后死区的体积分数减少了 13.5%，且滞止时间延长 7.6s，峰值时间增加 26.3s，流槽内的流动特性得到明显的改善，且流动方向向上，有利于夹杂物的去除。

C04-P118

镍基高温合金 DZ22 与硅基陶瓷型芯界面反应的研究

杜路发,玄伟东,刘利俊,兰健,任兴孚,任忠鸣

上海大学

DZ22 合金是我国自行研制的定向凝固高温合金，具有良好的中、高温综合性能和优异的热疲劳性能，是制备空心叶片的优选材料。在熔模铸造制备空心叶片的过程中，硅基陶瓷型芯是常用的陶瓷型芯材料，其具有易脱芯、抗热震性好等优良性能。然而在浇注过程中 DZ22 高温合金与硅基陶瓷型芯会发生一定的界面反应对铸件性能产生一定影响。本文采用直接触法对镍基高温合金 DZ22 与硅基陶瓷型芯界面反应进行了研究并研究了不同加热温度对该界面反应的影响。采用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 等测试手段，对界面显微组织结构、成分类型和相组成进行了系统的研究。结果表明 DZ22 合金与硅基陶瓷型芯发生了界面反应，合金中的 Hf 和 Al 元素与陶瓷型芯中的 SiO₂ 发生反应分别生成了 HfO₂ 与 Al₂O₃，因此界面反应区域包括 2 个反应层 (HfO₂ 层与 Al₂O₃ 层)。并且随着温度的升高，DZ22 合金与硅基陶瓷型芯界面反应层厚度也随之增加，但反应层类型并未改变。

C04-P119

Si₃N₄ 陶瓷与 DZ483 高温合金部分瞬间液相扩散力学性能和微观结构的研究

刘利俊,玄伟东,杜路发,兰健,任兴孚,任忠鸣

上海大学材料科学与工程学院

本文采用 Ti/Cu/Ni 中间层对 Si₃N₄ 陶瓷与 DZ483 高温合金进行了 PTLP 连接，研究了 Si₃N₄/DZ483 高温合金接头的显微组织结构及力学性能。采用扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM) 和万能试验机等测试研究方法，对 Si₃N₄/DZ483 高温合金接头界面显微组织结构、相组成、力学性能以及断口形貌等进行了研究，根据 TEM 分析发现于 Si₃N₄ 与填充合金界面处形成 TiN 反应层。TiN 反应层由两个区域组成：一个靠近 Si₃N₄ 陶瓷，厚度约 0.4μm，另一个区域的晶粒约 0.8μm。

Si₃N₄与Cu夹层之间接触处的显微组织可以描述为：具有细晶粒的TiN层、具有粗晶粒的TiN层和Ti₂Ni层。在Cu夹层与DZ483高温合金之间的界面处产生Ni₃Ti和CuTi₂相。接头的温度平均强度为147MPa,接头在1073K下测试时达到96MPa。随着连接温度的升高和保温时间的延长，原子之间充分扩散，反应层变厚。在连接温度1323 K保温60 min的条件下，获得的Si₃N₄/DZ483接头室温下的三点弯曲强度达到最大值170 MPa。

C04-P120

镍基高温合金复杂铸件物理模拟与变形预测研究

汪东红¹,疏达^{1,2},孙宝德^{1,2},董安平^{1,2},祝国梁^{1,2}

- 1.上海交通大学材料科学与工程学院
- 2.上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室

熔模精密铸造具有生产尺寸精度高、几何形状复杂铸件的优势，特别适合铸造昂贵金属和难加工金属构件，是生产高温合金复杂结构件的主要方法。随着铸件向大型化、复杂化、轻量化、近无余量与零缺陷发展，提高高温合金复杂薄壁铸件尺寸精度与稳定性已成为熔模铸造的难点。传统的“经验+试验”的熔模铸造技术无法预测铸件变形部位和变形程度，基于数值模拟的熔模铸造技术可以帮助设计人员快速、有效地预测铸件变形与并在此基础上优化铸造收缩补偿方案，而准确的高温合金铸件凝固过程中力学性能参数的缺失是铸件位移场仿真首先要解决的问题。

本研究基于高温合金熔模铸造的物理模拟熔化凝固实验，采用Gleeble3800热模拟试验机，进行了凝固法和加热法两种不同加热历程的拉伸试验，获得了K4169高温合金在高温固相区和固液两相区热塑性曲线，零强度温度及应力-应变曲线等高温力学性能参数。将此概念应用于镍基高温合金环套环铸件的熔模铸造，将物理模拟得到弹塑性数据用于预测铸件在凝固与冷却过程中的变形，并探讨了型壳接触条件对铸件应力场与位移场的影响规律。在对熔模铸造全过程尺寸变形数值仿真的基础上，提出了一种基于位移场仿真与关键尺寸误差提取的精铸模具型面逆向补偿设计方法，最终特征铸件的尺寸公差达到CT4级。本研究提出了基于物理模拟获得高温合金凝固过程中的塑性模量等高温性能数据和基于位移场仿真的尺寸逆向补偿方法，具有重要的理论意义和实际应用价值。

C04-P121

镍基高温合金真空熔模铸造工艺数值模拟

尚勇,周汝豪,裴延玲,李树索,宫声凯,徐惠彬

北京航空航天大学

有限元法(FEM)广泛应用于生产过程中的力场、温度场、电场、磁场、凝固场的模拟。镍基高温合金产品铸造过程中存在着如：疏松、缩孔、杂晶、热裂等铸造缺陷，可以采用有限元法数值模拟对其成因进行分析。为获得更真实的铸造边界条件以及铸造过程中的温度分布，北航材料学院自主研发了无线测温系统来实时监测铸造过程中模壳的温度。通过实验测定、反算方法对铸造边界条件和材料物理性能(室温~1500℃)进行数据库的建立。ProCAST铸造模拟软件分析获得的高速凝固法(HRS)进行的选晶和籽晶法单晶定向生长结果都与实验结果吻合，这说明模拟的边界条件与材料性能参数与实际生产基本一致。此外，采用该软件对高温合金产品生产过程中的流场、凝固过程、温度场、应力场和晶体生长进行了模拟计算，进而对目前高温合金产品生产遇到的问题进行了初步的分析与预测，并提出了一系列有效的解决方案。铸造数值模拟技术可以预测、分析、解决生产中遇到的铸造中的问题及缺陷。铸造模拟技术结合真实的边界条件数据是有效提高复杂高温合金产品质量、降低生产成本，缩短研制周期的关键。

C04-P122

D1a型纳米析出相对Ni-45W合金力学性能的影响

刘志超¹,谭成文¹,于晓东¹,聂志华¹,王春旭²,刘少尊²

- 1.北京理工大学材料学院
- 2.中国钢研科技集团有限公司特种钢研究所

长久以来，更低密度更高强度的材料一直是科研工作者追求的目标，然而在一些特殊领域，材料具有高强度的同时也需要较高的密度。本文采用中国钢研科技集团公司特种钢研究所研制的一种钨含量45% (wt)的镍基高密度合金，合金密度达11.91g/cm³, XRD结果表明合金在固溶态相组成为Ni₁₇W₃ (FCC)及a-W(BCC)。经时效处理后有D1a型Ni₄-W纳米相析出，准静态屈服强度从497MPa提高至947MPa，断裂应变由0.491降至0.266，固溶态断口有大量韧窝呈韧性断裂，时效态断口则有大量解理面，呈脆性断裂。

C04-P123

落管中三元 Fe-Cr-Ni 合金的快速凝固研究

李路远,阮莹,魏炳波

西北工业大学

不锈钢是应用广泛的结构材料,具有极高的硬度与优异的耐腐蚀性。三元 Fe-Cr-Ni 合金是镍铬不锈钢的基体,对其凝固规律的研究能够为镍铬不锈钢的制备与性能优化提供重要的参考依据。采用落管法实现了液态三元 Fe-Cr-Ni 合金的深过冷与快速凝固,自由落体条件下合金液滴的冷却速率和过冷度均随液滴直径的减小而迅速增大。三元 $Fe_{81.4}Cr_{13.9}Ni_{4.7}$ 与 $Fe_{81.4}Cr_{4.7}Ni_{13.9}$ 合金近平衡凝固组织为粗大板条状 α 相,三元 $Fe_{10}Cr_{49.5}Ni_{40.5}$ 合金近平衡凝固组织为 α (Cr, Fe)+ γ (Fe, Ni)层片共晶。在快速凝固过程中,不同直径 $Fe_{81.4}Cr_{13.9}Ni_{4.7}$ 合金液滴凝固组织均为板条状 α 相,其固态相变特征很明显,随着过冷度增大,初生 δ 相由具有发达主干的粗大枝晶转变为等轴晶。 $Fe_{81.4}Cr_{4.7}Ni_{13.9}$ 合金液滴凝固组织由 α 相晶粒组成,随着过冷度增大,初生 γ 相由具有发达主干的粗大枝晶转变为等轴晶,其枝晶主干长度和二次分枝间距均显著下降。采用改进的 LKT/BCT 模型理论计算了两种成分 Fe 基合金初生相的枝晶生长速度。理论计算表明,与 γ 相相比, δ 相枝晶生长速度更大。在中小过冷度情况下,两种合金枝晶生长过程均由热扩散控制。随着过冷度增大, $Fe_{10}Cr_{49.5}Ni_{40.5}$ 合金液滴凝固组织由规则层片共晶转变为不规则共晶。

C04-P124

含铝奥氏体不锈钢蠕变过程中晶界偏聚及析出的演化过程

温宏远^{1,2} 陈则^{1,2} 赵冰冰^{1,2,3} 董显平^{1,2,3} 王静⁴ 周佳时⁴ 张澜庭^{1,2,3}

1. 上海交通大学 材料科学与工程学院
2. 上海市先进高温材料及其精密成型重点实验室
3. 上海交通大学 材料基因组联合研究中心
4. 中芯国际集成电路制造有限公司

含铝奥氏体高温合金(AFA)表面在高温下形成致密的氧化铝保护层而具有优异的高温抗氧化能力,近年来得到了广泛的关注。本文通过聚焦离子束切割(FIB)定点制样技术,研究了700°C/150MPa条件下蠕变不同时间(0h, 50h, 3000h)的样品,讨论了在不同蠕变时间下B2相、M23C6相、Laves相、L12相及MC相等各种第二相析出在晶内、孪晶晶界和普通晶界上析出的演化过程。实验结果表明,相比于晶粒内部,晶界上最先有第二相析出。而且普通晶界上第二相的析出及其长大要快于孪晶晶界,但经3000h蠕变后两种晶界上的析出都无明显差别。同时,晶界上的第二相析出及粗化也是导致蠕变沿晶断裂的重要原因。这为日后AFA合金设计及工业应用提供了重要的参考信息。

C04-P125

氢等离子弧熔炼去除镍中的锰

郭西良¹,余建波¹,张裕嘉¹,刘亮¹,Hanlin Liao^{1,2},任忠鸣¹

1. 上海大学
2. UTBM

本文研究了Ar、Ar+10%H₂、Ar+10%Ar和Ar+10%Ar四种等离子气,压力为0.01-0.02,0.04-0.05和0.09-0.1MPa三种条件下氢等离子弧熔炼Ni去除Mn的规律。结果发现氩等离子弧熔炼(PAM)时,Mn的去除速率较慢。然而,当等离子气中添加H₂时,Ni中的Mn的浓度随着熔炼进行降低速率明显加快,且Mn的去除速率随着氢气比例的增加而增大。此外,氢等离子弧熔炼(HPAM)过程中,随着熔炼压力的降低,Mn的去除速率加快。经过动力学分析,HPAM过程中,Mn的去除过程满足一阶速率方程。通过热力学分析,高导热性和强活性的氢原子可以提高熔池的温度,加快Mn的去除速率。另外,负压的熔炼环境加快了Mn的挥发。实验研究和理论分析表明,HPAM是熔炼Ni去除Mn的有效方法。

仅发表论文

C04-PO-01

新型变形高温合金GH4066本构关系与微观组织模型研究

王彦菊,贾崇林,李兴无

中国航发北京航空材料研究院

由于新一代航空发动机用涡轮盘的工作温度已超过700°C,目前使用最广泛的铁镍基变形高温合金GH4169(美国牌号

IN718) 涡轮盘(工作温度小于 650°C)不能满足其使用需求,而性能更为优异的镍基粉末高温涡轮盘(工作温度大于 750°C)成本过高。因此,新型镍基变形高温合金材料 GH4066 应运而生,可采用变形高温合金的铸-锻工艺,制备出 700°C 以上使用的力学性能与粉末涡轮盘相当的低成本涡轮盘,是近年来国际变形高温合金领域的研究热点。GH4066 合金的合金化水平与粉末高温合金相当,强化相 γ' 相的体积分数达到 43.0%,突破了变形工艺生产高温合金涡轮盘锻件的瓶颈。GH4066 合金与美国 Rene65 合金相近,是在 Rene88DT 合金成分的基础上优化而来,采用“真空感应+真空自耗”双真空冶炼工艺制备出自耗锭,经多段均匀化处理,再利用快锻机开坯制备出细晶棒材,最终利用热模锻造技术制备盘形锻件。

本文针对 GH4066 材料进行本构关系与微观组织模型研究,通过高温流变应力测试获取了该新型材料在不同温度与变形速率情况下的应力应变关系,并基于 Arrhenius 方程建立了材料的本构关系模型,并针对不同变形温度、应变速率情况下的动态再结晶及晶粒度进行微观组织观察,从而获得不同变形条件下的动态再结晶体积分数及平均晶粒尺寸,在试验结果基础上建立了材料的微观组织演化模型,包括动态再结晶模型,峰值应力与峰值应变模型,动态再结晶动力学方程以及动态再结晶晶粒尺寸模型。本文针对新型变形高温合金材料 GH4066 材料的本构关系模型以及微观组织模型的创建为今后进一步研究该材料在制备发动机涡轮盘件变形工艺中微观组织的模拟研究奠定基础,为其进一步研发以及推广应用提供基础的数据与模型参考。

C04-PO-02

Inconel625 合金在 Na₂SO₄-K₂SO₄ 中的热腐蚀行为

马元俊^{1,2},丁雨田¹,刘建军¹,张东²,孟斌¹

1.兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

2.金川集团股份有限公司 镍钴资源综合利用国家重点实验室

采用 XRD、SEM、EDS 和 FACTSAGE 热力学分析软件等方法,研究了 Inconel625 合金在 800~1000 °C 下 75wt%Na₂SO₄-25wt%K₂SO₄ 熔融盐中腐蚀不同时间后的腐蚀行为。结果表明: Inconel 625 合金在热腐蚀时发生的主要是碱性熔融腐蚀,合金表面的 Cr₂O₃ 以 Na₂CrO₄ 的形式溶解在熔盐中,导致合金表面失去保护性氧化层。随着合金表面 Cr₂O₃ 的分解剥落,导致合金基体/腐蚀层界面出现贫 Cr 区,阻碍了 Cr₂O₃ 氧化层的生长,无法形成连续的氧化层,使得 O 和 S 得以侵入,腐蚀合金基体。合金在 800°C、900°C 和 1000°C 下腐蚀 120h 后,其腐蚀速度分别约为 3mg/cm²、6 mg/cm² 和 8 mg/cm²。合金经 800°C 热腐蚀后,生成少量熔融盐,腐蚀层较完整,主要由片状 Cr₂O₃ 和尖晶石状 NiCr₂O₄ 构成。当合金经 900°C 和 1000°C 热腐蚀后,腐蚀层出现明显的脱落和断层,主要分为外层、中间层和内层:外层由 NiCr₂O₄ 和 NiO 氧化层构成;中间层为致密的 Cr₂O₃ 氧化层;内层由硫化物(Cr₂S₃ 和 Ni₃S₂)、氧化物(Cr₂O₃ 和 NiO)和铌化物(NbC)等构成。随着温度的升高,合金表层腐蚀层分层更加明显,且在合金基体中出现明显的晶间腐蚀。经热力学计算分析发现,在高温环境下熔融盐分解出的 SO₂ 会对合金造成严重腐蚀,主要腐蚀产物为 Cr₂O₃、Cr₂S₃、NiO 和 Ni₃S₂。

C04-PO-03

冷拔变形量对 GH4169 合金组织和性能的影响

温博,史松宜,吕旭东,杜金辉

北京市高温合金新材料重点实验室,钢铁研究总院

GH4169 合金具有优异的综合性能,广泛用于航空发动机的涡轮盘、甩油盘、传动轴等热端部件。同时,由于该合金还具有高的抗拉和剪切强度、抗疲劳、抗应力松弛等性能,也是高强度紧固件的选材。本文采用光学显微镜(OM),电子背散射衍射(EBSD)以及拉伸实验等方法研究了固溶态 Φ 15mmGH4169 合金棒材在不同冷拔变形量下的组织演化和力学性能。结果表明: GH4169 合金冷拔棒材晶粒随冷拔变形量的增加而逐渐细化。当冷拔变形量在 10% 以下时,固溶处理后棒材心部仍存在未静态再结晶的组织;当冷拔变形量超过 14% 时,固溶处理后棒材心部静态再结晶充分完成。采用 EBSD 技术对不同变形量的冷拔棒材显微组织演化进行表征。结果显示:随着变形量的增大,棒材的小角度晶界与孪晶界不断增加,位错数量增多,加工硬化程度提高,棒材的强度也随之不断增加。

C04-PO-04

GH4169 高温合金疲劳裂纹萌生与扩展性能研究

孔祥伟,金志博,陈思达

东北大学机械工程与自动化学院

本文针对复合载荷谱下 GH4169 关键结构件的疲劳断裂机理展开研究,通过开展材料室温下的裂纹扩展试验,获得不同切口半径和应力比条件下的疲劳裂纹萌生扩展试验数据,并根据试验数据进行非线性回归分析。分析结果表明,室温下

GH4169 在裂纹萌生阶段, 裂纹扩展速率受到切口大小的影响较大, 而在达到裂纹稳定扩展阶段时, 呈现出比较明显的应力比效应。考虑疲劳裂纹扩展门槛值, 得到修正的 Paris 公式, 该式对于描述 GH4169 低应力强度因子范围条件下的疲劳裂纹扩展规律具有较好的精度。

C04-PO-05

电子束焊接工艺参数对 GH4738 组织性能的影响

李鑫旭^{1,2}, 张勇¹, 李佩环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. 东北大学 冶金学院

GH4738 由于具有优良的强度和韧性匹配稳定性以及低裂纹扩展率, 被广泛应用于航空航天和军工领域。在组装过程中焊接是必不可少的一个环节。而电子束焊接满足了现代高焊接速度和低变形的需求, 作为一种有用的方法被引入到连接件工程领域中。目前的研究中, 关于 GH4738 电子束焊接的研究几乎没有报导。本文采用固溶处理的 GH4738 轧制板材作为焊接工艺研究的试验材料, 对其电子束焊接工艺开展研究。在加速电压与聚焦电流恒定的前提下, 分别采用了 3 组不同的焊接速度, 每组焊接速度下又含有 3 组不同的电子束流, 一共 9 组对比试验。讨论不同焊接工艺参数对焊缝深度及焊接接头组织性能的影响。此外, 还对电子束焊接后的材料进行热处理并对其进行性能检测。板材焊后热处理制度为: 845°C×4h, AC+769°C×16h, AC。结果显示在焊接速度为 20mm/s 时, 焊缝无孔洞缺陷的存在, 焊缝较窄, 且具有更优的力学性能。焊接速度过快, 焊缝中有明显裂纹存在。热处理对焊缝强度有很大的提升作用, 热处理后焊缝的抗拉强度优异。此研究为不同焊接条件下的焊接参数的选择提供参考。

C04-PO-06

晶粒尺寸对 718Plus 合金疲劳裂纹扩展速率的影响 规律及机理

王民庆^{1,2,3}, 杜金辉^{1,2}, 邓群^{1,2}, 田志凌¹, 朱静³

1. 钢铁研究总院, 高温材料研究所

2. 高温合金新材料北京市重点实验室

3. 清华大学, 材料学院

优化晶粒尺寸是提高高温合金抗疲劳裂纹扩展性能的重要手段。对于 718Plus 合金, 由于晶界析出相 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 与晶界的协同作用, 使得晶粒尺寸对 718Plus 合金疲劳裂纹扩展速率的影响规律和机理更加复杂。过去人们发现高温下细晶 718Plus 合金表现出更低的疲劳裂纹扩展速率, 该现象无法通过高温晶界氧化机理去解释。基于此, 本文系统研究了晶粒尺寸对 718Plus 合金带承载疲劳裂纹扩展速率的影响规律, 并进一步通过组织和裂纹扩展路径分析以及裂纹尖端塑性的计算, 揭示了细晶 718Plus 合金对抗疲劳裂纹扩展速率性能的有利作用主要与细晶条件下 η -Ni₃Al_{0.5}Nb_{0.5} 相在晶界析出量增多以及合金屈服强度升高, 进而引起裂纹尖端塑性区尺寸减小、阻碍氧的沿晶界扩散以及二次裂纹增多有关, 以上研究结果将为 718Plus 合金高损伤容限设计提供方向及理论基础。

C04-PO-07

批量生产中热处理制度对 GH3536 带材性能的影响

高杨, 牛永吉, 田建军, 安宁, 张志伟

北京北冶功能材料有限公司

本文通过大生产中不同热处理制度对 GH3536 高温合金冷带晶粒度、力学性能的影响试验, 找出了 GH3536 合金热处理温度、速度等参数对组织、力学性能的影响规律。随着热处理温度的升高, 晶粒度变大, 室温强度下降, 塑性提高, 高温强度和高温塑性均提高。升高到 1170°C 后性能开始下降。走带速度越慢合金带材的塑性越好, 高温强度提高, 当速度为 3 米/分时, 综合性能达到最佳。因此, 生产中通过调整热处理温度和走带速度可以使 GH3536 高温合金冷带达到最佳的综合性能。此研究成果可做为生产不同规格的 GH3536 合金冷带选择热处理工艺提供技术依据。

C04-PO-08

纯镍及 Inconel 625 合金热变形流变行为及热加工图研究

刘德学^{1,2}, 薛洪迪¹, 贾智¹, 李庆林¹, 刘建军¹

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院

2. 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

利用 Gleeble-3500 热模拟试验机对铸态纯镍及 Inconel 625 合金在变形温度 900-1200 °C、应变速率 0.1-10 s⁻¹ 和应变量 60% 条件下进行热压缩实验, 研究分析纯镍以及 Inconel 625 合金的热塑性变形规律, 并构建本构方程。同时绘制不同变形参数下的热加工图, 分析了热加工图稳定与失稳区所对应的组织特征, 发现纯镍在热压缩变形时, 失稳区组织出现晶粒层级分化现象。通过对热加工图分析研究, 确定纯镍最优热变形温度为 1050 °C, 最优应变速率为 0.1 s⁻¹; Inconel 625 合金最优变形温度为 1170 °C, 最优应变速率为 0.1 s⁻¹。

C04-PO-09

Mo 含量对一种单晶高温合金组织稳定性和高温持久性能的影响

史振学, 刘世忠, 王效光, 李嘉荣

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

在高温梯度真空定向凝固炉中, 采用螺旋选晶法制备了含 1%Mo 和含 3%Mo 的两种单晶高温合金, 研究了 Mo 含量对单晶高温合金组织稳定性和 1100°C/140MPa 条件下持久性能的影响。研究表明随着 Mo 含量增加, γ' 相尺寸稍有减小, 立方化程度稍有增加。在 1100°C 长期时效 1000h 后, 两种合金都发生了 γ' 相复排化和 TCP 相析出。随着 Mo 含量增加, TCP 相析出量增加。合金 1100°C/140MPa 条件下持久性能随着 Mo 含量增加而降低。分析表明随着 Mo 含量增加, 合金组织稳定性降低是其持久性能降低的主要原因。

C04-PO-10

调整微量 Al 含量对含 Re 镍基单晶高温合金组织和性能的影响

杨振宇, 张剑, 赵云松, 郑帅, 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

航空发动机和燃气轮机热端部件的主要材料是具有优异高温综合性能的镍基单晶高温合金, 其中合金优异的高温力学性能主要取决于与基体 γ 相共格析出的 γ' 相。Al 元素是 γ' 相主要形成元素, 该元素的含量会影响 γ' 相形貌、体积分数、尺寸和分布进而影响合金的显微组织和持久性能。本文研究了 Al 含量对一种含 Re 的镍基单晶高温合金铸态组织和热处理组织的影响, 测试了合金在三种不同条件下的高温力学性能, 并利用 SEM、TEM 等技术手段研究了持久断裂试样的微观组织形貌。结果表明, 随着 Al 含量的增加, 合金铸态试样的共晶含量从 3% 增加到约 6%, 枝晶干和枝晶间的 γ' 相尺寸略微增大, 共晶完全溶解温度升高, 初熔温度降低, 热处理窗口变窄。较高的 Al 含量有利于增加 γ' 相的立方度, 增大 γ/γ' 两相的错配度, 进而提高合金在 850°C/650MPa 条件下的持久性能; Al 含量的改变对 γ' 相的筏形化过程无明显影响, 因此合金在 1010°C/248MPa 和 1050°C/190MPa 条件下的持久性能无显著差异。

C04-PO-11

带热障涂层的 DD6 单晶高温合金 900 °C 高周疲劳性能研究

董建民¹, 李嘉荣¹, 牟仁德², 田贺²

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. 中国航发北京航空材料研究院航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室

为研究热障涂层对 DD6 单晶高温合金的影响, 深化热障涂层对 DD6 单晶高温合金影响的认识。采用 EB-PVD 方法在 [001] 取向的 DD6 单晶高温合金疲劳试样上制备热障涂层, 将带热障涂层试样置于 1150°C 热暴露 1h, 然后将带热障涂层试样和不带涂层试样同时置于 900°C 大气条件下进行旋转弯曲高周疲劳测试。结果表明: 随着循环应力幅的增加, 疲劳寿命降低; 带热障涂层试样的疲劳强度略高于不带涂层的基体试样。SEM 和 TEM 观察发现, 带热障涂层试样疲劳断裂后, 在黏结层中存在很多孔洞和微裂纹。疲劳强度的增加主要是由于涂层承担了一部分应力以及残余压缩应力的存在。黏结层中的一些孔洞和裂纹最终会发展成疲劳裂纹, 随着测试的进行, 裂纹会不断向基体扩展。

C04-PO-12

[111]取向 DD6 单晶高温合金薄壁持久性能研究

刘维维, 李影, 刘世忠, 李嘉荣

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

采用薄壁试样研究了 760°C, 980°C, 1070°C 条件下 [111] 取向第二代单晶高温合金 DD6 的持久性能。结果表明: 与标准试样 (直径 5mm) 相比, 760°C 与 980°C 条件下的薄壁试样持久寿命略高, 1070°C 条件下薄壁试样持久寿命先高后低。总体而言持久寿命与标准试样相当。对合金在中、高温持久试验后的薄壁试样组织分析发现: 760°C/590MPa 条件下合金 γ_c 相基本

保持立方晶形，合金的断裂机制为解理断裂，蠕变过程的主要变形机制是层错切入 $g\epsilon$ 相；980°C/270MPa 条件下合金中的 $g\epsilon$ 相形貌变化不明显，合金的断裂机制仍为解理断裂，蠕变期间的主要变形机制是位错以弓入的方式切入 $g\epsilon$ 相，在 $g\epsilon$ 相中形成位错对；1070°C/270MPa 条件下 DD6 合金 $g\epsilon$ 相发生了定向粗化，并形成筏排。合金的断裂机制为微孔聚集型断裂，蠕变期间的变形机制是 $\langle 110 \rangle$ {111} 滑移系发生滑移，位错沿 {111} 面进行交滑移，在 $g/g\epsilon$ 相界面形成错网。

C04-PO-13

抽拉速率对 DD6 单晶高温合金微观组织及拉伸性能的影响研究

于军伟,康茂东,刘雅辉,吴赞,高海燕,王俊

上海交通大学

在抽拉速率分别是 1.8mm/min, 4.8mm/min, 9mm/min 条件下, 采用 HRS 法制备第二代单晶高温合金 DD6 试棒, 研究了抽拉速率对其微观组织及拉伸性能的影响。实验结果表明, 随着抽拉速率的增加, 枝晶间距减小, 组织细化; 取向偏离与缩松指数先减小后增加; γ - γ' 共晶含量与元素偏析系数增加; 枝晶干及枝晶间的 γ' 相尺寸减小且含量降低。SEM 及 EPMA 分析显示缩松周围富铌硅和钼硅化物, 表明硅元素能够促进缩松的形成。单晶试棒经过 1310°C 固溶处理后, 产生较多固溶微孔, 定量金相统计显示其微孔含量比铸态缩松高一个数量级, 且固溶微孔圆整度较高, 尺寸约为 10 μ m。DD6 单晶高温合金室温拉伸断裂方式呈脆性断裂, 断口呈现河流状花样, 微孔往往作为裂纹源促进断裂。4.8mm/min 抽拉速率下的拉伸性能最优, 抗拉强度分别比 1.8mm/min, 9mm/min 提高 16.2%, 13.4%, 但塑性相差不大。

C04-PO-14

一种第一代单晶高温合金 DD416 合金蠕变强度的研究

郑帅,张剑,杨振宇,吴庆辉,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

DD416 合金是一种第一代单晶高温合金, 其合金特点是 Al、Ti 含量较高, 具有较低的密度 (7.98g/cm³)、较高的比强度、抗腐蚀性能和铸造性能。蠕变性能是单晶高温合金重要的性能指标, 本研究开展了对 DD416 合金蠕变性能的研究。研究表明, DD416 合金在 760°C、850°C 和 1000°C 时, 其 $\sigma_{0.2/100}$ 分别为 538MPa、297MPa 和 102MPa, 对 $\sigma_{0.1/100}$ 、 $\sigma_{0.5/100}$ 、 $\sigma_{0.5/100}$ 的研究正在进行。性能数据表明, DD416 合金蠕变性能与 AM3、DD3 等第一代单晶高温合金蠕变性能相当。

C04-PO-15

恢复热处理温度对 DD11 单晶合金 γ/γ' 相组织及高温持久性能的影响

刘晨光,张剑,赵云松,杨振宇,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

先进航空发动机单晶涡轮叶片在长期服役过程中, γ/γ' 相组织的粗化是造成涡轮叶片力学性能退化的主要因素, 组织的恢复热处理是涡轮叶片研究的重要技术领域。本文研究了恢复热处理工艺中固溶温度对 DD11 单晶合金组织和持久性能的影响, 首先对完全热处理态的合金进行了 1070°C/3000h 的长期时效处理, 然后对长期时效态组织分别进行了固溶温度为 1250°C、1270°C、1290°C 和 1310°C 的恢复热处理, 通过扫描电镜对组织进行了观察和分析, 并进行了 1070°C/140MPa 持久性能测试。实验结果表明: 完全热处理态的合金经长期时效处理后, 均匀的 γ/γ' 相组织完全粗化, 持久寿命下降到完全热处理态的 36%; 经恢复热处理, 随固溶温度的提高, 粗大的 γ/γ' 相组织体积含量逐步降低, 固溶温度为 1310°C 时, 粗大的 γ/γ' 相组织完全消除, 组织恢复到完全热处理态; 且随固溶温度的提高, 持久寿命则分别恢复到完全热处理态的 54%、74%、83% 和 1.09%。结果表明: 恢复热处理工艺可以有效的消除服役后生成的粗大 γ/γ' 相组织, 使组织恢复到完全热处理状态, 恢复合金的力学性能, 从而延长单晶涡轮叶片的服役寿命及提高服役的可靠性, 有效降低航空发动机的运行成本。

C04-PO-16

微量杂质元素对定向凝固高温合金 DZ125 组织和性能的影响

宋尽霞¹,康永旺¹,马秀萍²,任维鹏¹,余力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.中国航发北京航空材料研究院熔铸中心

DZ125 合金是北京航空材料研究院在上世纪九十年代研制成功的第一代镍基定向凝固高温合金, 该合金具有良好的中、

高温综合性能以及优异的抗疲劳性能，目前已用作某航空发动机高压涡轮工作叶片。为了进一步提高 DZ125 合金的性能，本文研究了 Si、P、S、Zr 等微量杂质元素对 DZ125 合金组织和主要力学性能的影响。研究表明，在本文所研究的成分范围内，随着 Si、S、P、Zr 等杂质元素含量的升高，DZ125 合金中没有析出异常相， γ' 相的形态和尺寸略有变化，但不明显；随 Si、P、S、Zr 含量升高，DZ125 合金的中温持久性能明显降低，高温持久性能和室温拉伸强度也有所下降，但下降幅度较小；当 Si、P、S、Zr 的含量在较低含量水平变化时，对合金的高、低周疲劳性能没有明显影响，但当 Si、P、S、Zr 含量达到较高水平，合金的高、低周疲劳性能明显下降。因此，为了保证 DZ125 合金具有良好的综合性能，Si、P、S、Zr 含量等杂质元素含量应控制在较低水平。

C04-PO-17

长期时效对第三代定向高温合金 DZ12 组织及性能的影响

王定刚,宋尽霞,肖程波,唐定中,关心光

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

研究了第三代定向高温合金 DZ12 在 1100°C 无载荷时效处理 200h、500h、1000h 后的微观组织及力学性能变化。研究表明，DZ12 合金组织稳定，经 1100°C/1000h 时效处理后无有害的 TCP 相出现；随时效时间的延长，晶界析出链状 $M_{23}C_6$ 型碳化物的量逐渐增多，并趋向网格化；DZ12 合金经 200h 时效后 γ' 相明显长大、粗化，但仍有部分立方化的 γ' 相存在，时效 500h、1000h 后 γ' 基本全部转化为板条状的并不断长大。DZ12 合金室温抗拉强度随时效时间的延长无明显变化，室温屈服强度和延伸率略有下降，1100°C/130MPa 持久寿命下降明显。

C04-PO-18

用 3D 打印技术制备某种镍基高温合金的组织及性能研究

吴彬^{1,2},梁静静¹,周亦曹¹,杨彦红¹,侯桂臣¹,孙晓峰¹

1.中国科学院金属研究所高温合金部

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

利用 3D 打印技术，制备了某镍基高温合金，利用 OM、SEM 和 TEM 等方法对试样进行了观察，得到了在不同工艺参数和热处理条件下的该合金的微观组织形貌。然后对组织成因进行了阐述及分析。并进行了相应的室温和高温拉伸试验。结果表明：适当的工艺参数可以减少和避免合金制备中的裂纹萌生及扩展；在不同的生长条件下的合金微观形貌有较大的差别。这种差别表现在：在微米尺度范围表现为枝状晶、胞状晶和等轴晶等形态的相互转换；而在更小的纳米尺度范围内，则对 γ 相、 γ' 析出相的形貌、大小及分布产生影响。拉伸试验结果显示了由于上述差异导致的强度和塑性的变化。沉积态的合金有较好的强度。经 1080°C，4h 时效处理，以及在 1080°C，4h+870°C，16h 的双级时效处理两种热处理方法得到的力学性能，不如沉积态合金的力学性能。而 870°C，16h 时效处理过的合金，则表现出了良好的力学性能。

C04-PO-19

Mg 含量对 K002 合金组织和持久性能的影响

马秀萍,周同金,张华霞,孟宇

中国航发北京航空材料研究院

本文研究了不同 Mg 含量对 K002 合金组织和持久性能的影响。结果表明：随着 Mg 含量从 4ppm 增加到 200ppm， γ' 和 γ - γ' 共晶相的形貌和数量无明显变化，碳化物从粗大的草书状逐渐转变为球状，尺寸从 25 μ m 减小的到 6 μ m 左右。1040°C 的持久寿命随着 Mg 含量升高呈下降趋势，Mg 含量从 4ppm 增加到 200ppm 时持久寿命降低了 67%。760°C 持久寿命随 Mg 含量增加呈先增后降趋势，Mg 含量从 4ppm 增加到 90ppm 时寿命增加了 30%，Mg 含量持续增加时持久寿命又呈降低趋势。

C04-PO-20

稀土元素 Y、Ce 添加方式对 K4648 合金洁净度和室温冲击韧性的影响

刘东方,马秀萍,马国宏,万旭杰,张华霞,孟宇

中国航发北京航空材料研究院

分别通过纯金属和中间合金两种方式添加稀土元素 Y 和 Ce，熔炼了 K4648 母合金锭，并重熔浇注了室温冲击韧性试棒，对比研究了稀土元素 Y、Ce 添加方式对 K4648 合金洁净度及室温冲击韧性的影响。结果表明：不管是以纯单质形式还是以中间合金形式添加稀土元素 Y 和 Ce，都可以显著降低 K4648 合金锭中气体 O 元素含量，起到净化合金的作用；相同工艺条件下，以中间合金形式添加 0.04% 的 Y 和 0.03% Ce 时，稀土元素的收得率明显高于纯金属直接添加方式；以中间合金

形式添加时，稀土元素对合金锭中 O 元素的净化效果优于直接添加方式，从而使合金获得更好的室温冲击韧性。

C04-PO-21

电子束熔炼对镍基高温合金元素分布的影响

牛少强

大连理工大学

本文利用电子束对 K417 高温合金进行了熔炼，以研究电子束对镍基高温合金成分的影响。我们用 9kW 电子束对 K417 合金进行了 5min, 15min, 35min 的熔炼，并通过 EPMA, XRD 等手段对电子束熔炼的合金的上中下层进行了成分的检测，结果显示，当熔炼时间较短（5min）时，合金上层的 Cr 含量远远高于下层，但是随着时间的增加，上部合金的 Cr 含量降低，而底部的 Cr 含量升高，最高时超过合金未熔炼时的 Cr 含量。这表明 Cr 在电子束熔炼合金时，先在上部偏聚，后在底部偏聚。根据分析，Cr 元素的这种行为是由两种因素造成的，一是电子束的轰击使得合金上下层产生了化学势差，从而使 Cr 元素易于向温度高的地方扩散；二是熔体表面的温度差导致马兰戈尼效应，马兰戈尼流使得元素重新分布。这种元素重新分布的行为同样出现在 Ti, Mo 等含量少的元素上，但是由于这些元素原子尺寸大，扩散速率慢，导致这种现象不太明显。此研究对电子束熔炼含有 Cr 的合金有着指导作用。

C04-PO-22

Ni-Al-Y 三元合金微观组织特征及析出相演变研究

吴贇,康茂东,王俊

上海交通大学材料科学与工程学院

目前，高温结构材料的发展趋势要求材料具有更高的使用温度、更好的高温可靠性和更小的密度。本文选用具有良好高温力学性能和抗氧化性能的 Ni-Al 系合金，研究添加不同含量稀土 Y(0~21.8wt.%)对 Ni-Al-Y 三元合金微观组织的影响。通过真空电弧熔炼得到实验母合金，对几种不同 Y 含量实验合金进行了 1050°C×24h 的均匀化处理，随后进行了硬度、拉伸、弯曲等力学性能实验和微观组织观察。实验结果表明，Y 的加入能显著改变原有 Ni-Al 合金枝晶间的析出相形貌，不规则的弯曲层片共晶在枝晶间广泛存在。随 Y 含量的增加，共晶含量逐渐增多，合金的硬度逐渐提高，室温脆性逐渐增大。拉伸和弯曲断口显示合金的断裂主裂纹源自熔炼过程形成的显微疏松，并且沿着共晶片层形成二次裂纹。

C04-PO-23

采用同步辐射 X 射线微米 CT 对铸造高温合金显微疏松进行三维表征与微观结构分析

刘雅辉,于军伟,王朦朦,吴贇,鞠江,李敏,陈迪,康茂东,高海燕,王俊,孙宝德

上海交通大学

具有复杂空间结构的显微疏松是影响铸造高温合金断裂韧性的主要缺陷之一，这引起了航空发动机行业的长期关注。传统的金相只能进行截面观测，而高分辨的同步辐射源可以提供高密度高温合金显微疏松的高清立体信息。本研究主要采用同步辐射 X 射线微米 CT 和图像重建技术，对铸造镍基高温合金显微疏松进行三维表征和空间结构分析。首先介绍了层析成像和三维重构的技术细节，继而考虑了目标尺寸和光束强度等因素的影响，最后讨论了本技术在其他高温合金研究中推广应用的可行性。研究表明，高温合金铸件中的显微疏松具有各种各样的空间结构特征，需要用以下参数表征，包括孔洞大小、球形度、表面曲率、连通性和孔洞间距。所有这些参数都会影响微孔的空间复杂性及其对合金机械性能的弱化程度。另外，通过扫描电子显微镜（SEM）进行了金相实验观察，以了解熔体凝固期间铸造显微疏松的形成原因和集聚行为。同时，SEM 观察揭示了不同热处理过程中微观孔隙表面析出相的相变，这可以显著改变微孔的表面强度。采用三维重构模型进行数值模拟，获得了显微疏松在拉/压载荷下应力和应变分布等信息，这为研究显微疏松几何特征与材料力学性能之间的关系提供了可靠数据。

C04-PO-24

选区激光熔化 Nb-Ti-Si 合金的显微组织和韧性

康永旺,郭丰伟,李明

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

Nb-Si 基超高温结构材料具有高熔点、低密度和良好的高温强度，承温能力可达 1200°C 以上，是最具潜力替代现有镍基高温合金的新型高温结构材料之一。但是，Nb-Si 基超高温结构材料的铸态显微组织控制难度大，其硅化物组成相往往非常粗大和不均匀，使得合金的力学性能难以有很明显的提升。增材制造是一种利用粉末态原材料来进行材料成型的新方法，成

型过程中的粉末熔融-凝固过程时间非常短，且属于局部熔融-凝固过程，合金元素扩散距离短，使得合金中的相尺寸得到很好的控制，从而可获得具有细晶组织的材料。本文利用选区激光熔化的方法和电弧熔炼方法分别制备了具有同等成分的 Nb-Ti-Si 三元合金，研究了两种不同方法获得合金的组成相、微观组织形貌，发现两种合金的组成相没有明显区别，但采用选区激光熔化法制备的合金显微组织更加均匀、细小。同时，采用三点弯曲试验法测试了两种合金的室温断裂韧性，发现选区激光熔化法所制备合金的室温断裂韧性较电弧熔化法所得合金提升了 20% 左右。

C04-PO-25

Ti₂AlNb 合金铸锭开坯过程的数值模拟

马雄,张建伟,梁晓波,骆晨,石志峰

钢铁研究总院

合金铸锭内部往往存在着晶粒粗大等缺陷，为了细化晶粒，改善热加工性，同时有效选择开坯锻造时工艺参数并进行控制，因此，对开坯工艺的研究具有重要的意义。本文基于三维有限元方法对难变形金属间化合物合金铸锭开坯过程进行变形-传热耦合分析，定量计算了铸锭在整个工艺过程中热力参数（应变、应变速率和温度）的分布及演化情况；分析了铸锭的锻透性；获得了开坯后坯料内部应变和温度的分布规律，并与实际生产中的金相观察结果进行了对比。结果表明，模拟结果与试验结果一致，可以为后续制备 Ti₂AlNb 合金铸锭的开坯工艺提供理论依据。

C04-PO-26

定向凝固钴基高温合金 DZ40M 与陶瓷铸型的界面反应

王丽丽,姚建省,顾国红,李鑫,牛书鑫,许亮

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

采用扫描电子显微镜和能谱等分析手段研究了钴基定向凝固高温合金 DZ40M 与 SiO₂ 基陶瓷型芯和 Al₂O₃ 基陶瓷型壳的界面反应。实验结果表明，DZ40M 与 SiO₂-ZrSiO₄ 陶瓷型芯会发生较严重的界面反应，反应在 DZ40M 合金内表面形成深度约 100μm 且不均匀分布的缺陷坑和大量富 Ca、Cr 的类球形颗粒；DZ40M 与 Al₂O₃ 基陶瓷型壳发生高温化学反应，导致合金外表面形成~50μm 的粉红色粘砂层。热力学分析表明，DZ40M 合金与陶瓷型芯、型壳发生的高温化学反应类似，均为合金中 Zr、Al、Ti 和 Cr 等元素的氧化及氧化产物与陶瓷材料中 CaO、SiO₂ 或 Al₂O₃ 的固溶反应；由于型壳材料以 Al₂O₃ 为主，其 SiO₂ 含量明显小于型芯的，故合金/型壳与合金/型芯的界面反应产物和形貌明显不同。另外，型芯、型壳原材料中引入的 Fe、Ca 等杂质对上述反应起到局部加强作用，这是 DZ40M 合金表面界面反应缺陷分布不均匀的重要原因。

C04-PO-27

流钢槽氧化铝含量对高温合金非金属夹杂的影响

万旭杰,孟宇,田国利,张华霞,赵乐

中国航发北京航空材料研究院

使用真空感应脱气浇铸炉（Vacuum Induction Degassing and Pouring Furnace, VIDP 炉）进行高温合金熔炼浇铸过程，需要通过流钢槽实现浇铸。本文通过运用不同 Al₂O₃ 含量（选取 65%~99% 之间三种 Al₂O₃ 含量）流钢槽进行高温合金浇铸过程，对三种不同含量 Al₂O₃ 流钢槽进行相同使用炉次的非金属夹杂以及流钢槽表面破损情况进行对比。实验结论说明，当使用次数小于 5 次时，提高 Al₂O₃ 含量有助于降低高温合金非金属夹杂含量，随着流钢槽使用次数的增加，高 Al₂O₃ 基流钢槽带入非金属夹杂增加，通过施工过程工艺改进，有助于降低此种趋势。

C04-PO-28

FGH91-K418B 双合金热等静压扩散连接研究

马国君,罗学军,王旭青,武丹

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

采用热等静压工艺实现了 FGH91 高温合金粉末和 K418B 铸造合金之间的扩散连接。研究了热等静压复合连接工艺对 FGH91-K418B 复合界面的成分扩散和界面组织的影响。结果表明，FGH91 与 K418B 合金具有较好的物理、化学性能相容性，适于直接扩散连接；扩散连接接头紧密完整、无夹杂物和连续的第二相析出物，扩散区宽度约 100μm；合金元素的扩散常数不同，导致 Co、Ni、Ti、Nb、Al、Cr、Mo 的扩散效果逐渐减弱。

C04-PO-29

热挤压后镍基粉末高温合金与不锈钢包覆层间的界面研究

刘光旭,邹金文,王晓峰,许哲欣,杨杰

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

本文通过金相、扫描、电子探针及显微硬度等技术对经热挤压后的镍基粉末高温合金与不锈钢包覆层间的界面进行了研究。结果表明,两种金属界面结合良好,无缝隙或空洞。在界面结合区出现一簇由尺寸为~500nm的TiC颗粒相组成的流线,TiC颗粒相的形成与两种金属间Ti和C元素的扩散及反应密切相关。Ti元素的扩散导致界面处贫 γ' 相区域的出现以及沿界面至粉末高温合金方向上 γ' 相尺寸的梯度变化,而C元素的扩散使得不锈钢毗邻界面处晶粒内部“针状相”消失。另外,经测定,两种金属界面扩散层宽度为~450 μm 。

C04-PO-30

中等规格石墨烯增强粉末高温合金挤压棒的组织与性能

许哲欣¹,王晓峰¹,杨杰¹,邹金文¹,高宇曦²

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.北京航空航天大学

采用挤压比6:1制备石墨烯增强FGH96合金直径110mm的中等规格挤压棒材,分析不同固溶温度、时效制度对组织与性能的影响,研究适合的热处理制度,为全尺寸涡轮盘的制备奠定基础。结果表明,中等规格挤压棒材组织均匀,石墨烯纳米片在热挤压的变形、再结晶中保持原始形貌。与传统挤压比6:1的FGH96合金相比,中等规格挤压的石墨烯增强FGH96合金的晶粒更细,在过固溶组织中尤为明显;力学性能,包括拉伸强度、塑性和屈服强度都得到了提升,这是由于石墨烯纳米片的晶粒细化作用、晶界影响作用和石墨烯纳米盘的应力承载作用的影响。

C04-PO-31

变形工艺对挤压态镍基粉末高温合金晶粒组织的影响

陈阳,田高峰,马国君,杨杰,王悦,邹金文

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

通过对某挤压态新型镍基粉末高温合金双锥体试样进行压缩变形试验,并对压缩过程进行数值模拟计算,研究了变形温度、应变速率及应变状态对晶粒组织的影响规律,并获得了变形温度1060 $^{\circ}\text{C}$ ~1120 $^{\circ}\text{C}$,应变速率0.003 s^{-1} ~0.3 s^{-1} 范围内,变形温度、应变速率与晶粒组织的对应关系。结果表明,变形温度1080 $^{\circ}\text{C}$,应变速率0.003 s^{-1} 时,可获得该合金更好的变形组织。

C04-PO-32

热处理温度对变形态FGH95合金的组织性能影响研究

彭子超,王旭青,罗学军,张扬,范晓烁

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

采用氩气雾化法制备出FGH95合金粉末,合金粉末经粉末处理、热等静压、热挤压和等温锻造后获得变形状态的FGH95合金,然后将变形态的FGH95合金在不同温度下进行热处理,再采用相同的冷却速率进行冷却。利用OM、SEM和EBSD等对合金的显微组织进行分析,分析结果显示,随着热处理温度的提高,FGH95合金的晶粒度逐渐增大,尤其是当处理温度接近或超过固溶线时,晶粒长大尤为明显。同时,变形态FGH95合金经过热处理后,会形成大量的60 $^{\circ}$ 孪晶,孪晶方向为 $\langle 101 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向,只有当热处理温度超过固溶线后,孪晶的数量才会显著增加。对不同热处理温度的FGH95合金进行时效处理,并进行力学性能测试,结果显示随着加热温度的提高,合金的650 $^{\circ}\text{C}$ 拉伸强度水平相当,而持久寿命逐渐增长。

C04-PO-33

镍基高温合金微尺度压缩变形行为及微观机制研究

田高峰¹,陈阳¹,甘斌^{1,2},王悦¹,马国君¹,彭子超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

采用微柱压缩试验研究了一种镍基高温合金具有不同 r' 相组织的变形行为及微观机制,同时对微柱尺寸效应进行了研究。结果显示 r' 相对合金的微柱变形行为有显著影响,占 r' 相主要分数的二次 r' 相尺寸越小,临界切变应力(CRSS)越大,纳米硬度越高;随着微柱尺寸减小,CRSS增大,主要归因于合金中缺陷“贫乏”;采用SEM和TEM观察了微柱变形前后的组织形貌,得到微柱沿 $[110]$ 位向压缩变形主要是位错滑移主导塑性变形,在不同的滑移面上变形,发生交滑移,表现为波纹状滑移线,且产生层错,贯穿 r/r' 相组织中;合金中 r' 相和碳化物对位错运动的阻碍作用抑制了压缩变形时位错滑出微柱表

面导致的应变突跳现象，实现了微柱塑性变形阶段的持续应变硬化。

C04-PO-34

原始组织对 FGH96 合金热压缩变形行为和组织的影响

王超渊,宋晓俊,邹金文,王晓峰,周晓明

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

采用 Gleeble 热力模拟机分别对平均晶粒直径 $25\mu\text{m}$ 的热等静压态、 $15\mu\text{m}$ 的挤压态（细晶态）和 $5\mu\text{m}$ 的挤压态（超细晶态）FGH96 合金进行等温压缩试验，变形温度范围为 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，应变速率范围为 $0.001\text{s}^{-1}\sim 0.1\text{s}^{-1}$ 。结果表明，在相同变形温度和应变速率条件下，挤压态的热变形抗力远小于热等静压态，随着原始组织平均晶粒直径减小，FGH96 合金的热变形抗力减小；应变速率为 0.001s^{-1} 时，热等静压态组织在 1100°C 呈现稳定流变特征，变形抗力不随应变的增大而增大，而挤压态组织在 1050°C 和 1100°C 均呈现稳态流变特征；挤压超细晶态组织 1050°C 变形抗力低于 1100°C ，且热压缩后的晶粒组织较 1100°C 更为细小均匀。

C04-PO-35

铸态 N6 冷变形行为及力学性能

贾智,高泽玺

兰州理工大学

纯镍作为一种有色金属在地壳中含量仅为 0.018% ，具有优良的导电、导热性能，更能在各种酸碱腐蚀环境下服役，在化工、核电、船舶和航天等领域得到了广泛的应用。但目前国内外对纯镍室温下变形行为及力学性能的研究都比较少，本文通过对铸态纯镍 N6 在室温下的压缩、拉伸和冲击载荷试验，利用 OM、SEM、TEM 和 EBSD 对断口表面形貌及内部微观组织进行了研究，研究了其在室温下的变形行为及力学性能。研究发现，随着应变速率增加，加工硬化指数逐渐增大，强度系数呈上升趋势，基本上遵循抛物线型硬化规律，得到了其通过应变速率修正后的本构方程。通过 SEM 对 N6 拉伸断口微观形貌的观察发现其断口断裂方式为韧性断裂，冲击断口断裂方式既有韧性断裂也有脆性断裂。本研究将为纯镍的冷变形过程奠定一定的条件。