

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

C07-空间材料科学技术
C07-Space Materials Science and Technology

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C07. 空间材料科学技术

分会主席：王海鹏，潘明祥，赵九洲，宋力昕，阮莹

C07-01

中国的空间材料科学与技术探索与发展简要回顾：1987~2017

潘明祥，张博，胡金亮，赵勇，陈自强，汪卫华

松山湖材料实验室（中国科学院东莞材料科学与技术研究所）

如果说从 1987 年在我国返回式卫星第 9 次飞行任务期间首次进行了砷化镓等空间生长和金属合金凝固试验作为我国空间材料科学与技术探索与发展的元年，到 2017 年天宫二号任务的完成走过的这 30 年间，我国的空间材料科学实验经历了从朦胧的简单试试看，逐渐到有较深度设计的探索实验研究，取得了一些有价值成果和发现。空间实验的能力也从早期的仅能对实验参数进行被动控制及粗略估计，到后来的主动控制与较为准确的测量。本报告仅对这 30 年的我国空间材料科学与技术探索发展历程做一个简单历史回顾。

C07-02

空间站材料领域实验装置的高效综合利用的探讨

余建定^{*1,2}、钟红恩¹、马萍¹、张阳¹、刘洋¹、郭玉雪¹、贺欢²、方婧红²、倪津崎²、刘学超²、成艳华³、朱美芳³、周诚⁴、周燕⁴、丁烈云⁴

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

2. 中国科学院空间应用工程与技术中心

3. 东华大学

4. 华中科技大学

中国空间站自建成以来，已配备多种高性能材料科学实验装置，如无容器材料实验柜、高温材料实验柜、舱外暴露平台、变重力实验柜等，在多个研究方向取得了显著成果。然而，现有装置功能存在一定局限，难以满足新的空间科学实验的需求，为进一步释放装置潜力，提升实验平台能力，本文提出“模块化功能拓展与跨装置协同”策略，探索空间站材料装置的高效综合利用路径。研究重点围绕以下两个方向展开：

无容器实验柜功能拓展：空间无容器拉丝实验的可行性研究。基于现有装置加热、精密位置控制与成像观察系统，改造轴心机构并引入收丝装置，实现在轨原位材料拉丝，有望用于月壤材料、光学材料等高性能光纤的空间制备，同时结合舱外暴露装置开展空间环境下的性能演化研究。

变重力实验柜能力拓展：空间高温烧结实验装置的开发。设计微型加热实验箱，引入氮化硅炉芯、层隔热系统和真空系统，在 200W 功率下实现最高 1100℃的加热烧结实验。该系统可在不同重力水平下模拟材料烧结过程，为未来月球基地建材制备和月球的起源等应用提供实验支撑。

目前两项功能拓展已完成部分原理样机的实验验证，研究表明通过合理集成与功能互补，有望显著拓展空间站在材料科学领域的实验深度和广度，推动我国空间材料研究迈向更高水平。

C07-03

自适应凝胶润滑材料的创制及空间应用验证

周峰*、蔡美荣

中国科学院兰州化学物理研究所

我国航天发射任务急剧增加，对航天器的设计寿命要求 30 年或更长，对润滑材料的空间环境可靠性和寿命提出了更高的要求（10 年以上），需要发展满足空间环境和复杂多变工况的新型润滑材料与技术。由于液体润滑剂在微重力和超高真空环境下存在挥发、爬移迁移等不稳定因素；固体润滑薄膜寿命有限，

并且长期使用后固体润滑膜会磨损,产生磨屑等不利因素。因此,亟需发展新型润滑技术以满足我国未来航天器在苛刻空间环境下长寿命高可靠的战略需求。为了解决上述问题,本研究发展了新一代“自约束”航天润滑材料—超分子凝胶润滑材料,其利用液体润滑剂内部自发的有序组装,将润滑油束缚于摩擦对副,避免了润滑剂爬移泄露等,从而突破空间液体润滑材料动态转变关键技术。地面模拟空间环境实验表明,所制备的凝胶不仅具有较好的防止润滑油在基底上的热迁移以及爬移行为,即使在真空、原子氧、紫外辐照的条件下仍然具有较好防爬移的作用。地面模拟空间环境实验结果证明超分子凝胶润滑剂能够满足航天应用的需求。在空间站工程应用系统第三批科学研究项目支持下,利用空间站舱外材料暴露平台开展了固体润滑薄膜/凝胶复合润滑材料(固/凝胶)的空间站舱外在轨服役验证。该研究是国内首次在空间站开展的在轨摩擦学实验,也是世界上首次开展的轴承摩擦学实验。获取了凝胶润滑材料的在轨综合性能数据,揭示了空间环境对材料结构、性能的影响规律和摩擦磨损机制。在轨摩擦学服役性能数据表明,凝胶润滑材料的抗粒子辐照性能和防爬移、迁移性能显著优于传统航天润滑油,固/凝胶复合润滑服役寿命高于现役空间固体润滑薄膜。该研究为新型长寿命空间润滑材料的设计和研制提供技术指导,持续满足航天技术发展对高性能润滑材料的需求,后续拟推广月球车运动机构使用。该研究入选 2024 年《中国空间站科学研究与应用进展报告》择优遴选的 34 项代表性科学研究与应用成果之一。

C07-04

中国空间站难熔合金快速凝固研究

王海鹏*、魏炳波

西北工业大学

本报告重点介绍搭载中国空间站开展的初步实验取得的阶段性成果,讨论空间特殊的物理条件对难熔合金凝固过程的作用机理。面向空间站核心舱搭载实验,将“难熔合金熔体悬浮无容器处理实验”与“第一原理、分子动力学计算”方法有机结合,以航空航天领域先进战机和大型民航客机核心部件的关键材料,深入研究了合金熔体的比热、表面张力、粘度、密度等 10 种物理化学性质,深入探索了双体分布函数、结构因子、配位数、团簇结构等 4 个短程结构特征。

C07-05

空间生长的钼酸钠晶体组织形貌研究

潘秀红*、刘学超、邓伟杰、汤美波、陈锬、贺欢、方婧红、倪津崎

中国科学院上海硅酸盐研究所

在中国空间站上通过 Bridgman 法进行了钼酸钠晶体生长研究,样品返回地面后利用 X 射线 CT 以及光学显微镜对组织形貌进行了分析,结果发现,微重力环境下熔体上自由表面结晶后的形貌具有显著的非轴向对称性,而内部由于液相凝固时体积收缩所引起的空隙也较地面情况下更不规则。空间定向凝固结晶的样品与坩埚接触的侧表面上呈现台阶状小面阵列形貌,初步判断可能是微重力下生长时熔体与坩埚内壁发生了不接触效应。空间生长的单晶颗粒比地面匹配实验得到的单晶颗粒尺寸更大,显示了微重力在制备大尺寸晶体方面的优势,这可能与空间环境下熔体-器壁不接触效应有关。

C07-06

空间站高温材料柜加热过程温度场建模与仿真验证

张阳¹, 钟红恩¹, 马萍¹, 朱谕至², 王士强², 潘秀红³

1. 中国科学院空间应用工程与技术中心

2. 北京科技大学

3. 中国科学院上海硅酸盐研究所

空间站高温材料柜是空间材料科学研究的重要实验平台,可支持开展多种类别材料的熔体生长和凝固

科学实验。温度是材料生长过程的重要控制参数，只有实现样品温度场的精确控制，才能够确保样品完全熔化和晶体生长状态良好。本研究对高温材料柜加热炉的工作原理进行机理建模，攻关热传导、热辐射与闭环温控系统耦合的动网格仿真技术，复现了实验过程中加热炉和样品的温度变化。将仿真结果与实验中热电偶的测温数据进行比对，验证了该仿真模型的准确性。仿真结果揭示了材料实验过程样品盒内部三维温度场变化，该模型可进行实验流程和实验方案的仿真验证，为样品盒设计和热控工艺曲线优化提供仿真数据支持。

C07-07

利用透明模型合金原位观察研究重力对枝晶生长的影响

罗兴宏^{*1}、张桂圆^{1,2}、李洋¹、刘实^{1,2}

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

利用自主构建的低功耗透明模型合金定向凝固装置，研究了 SCN-H₂O 透明模型合金在重力与微重力条件下的枝晶生长行为。通过可见光与热成像耦合，实现枝晶前沿局部温度梯度与枝晶生长速度演变的同步观测，并对一次、二次枝晶间距及枝晶偏转角等枝晶形态特征值进行了定量统计。结果表明，重力诱导的浮力对流显著降低枝晶生长前沿局部温度梯度，加快枝晶生长速度，并导致枝晶间距增大，而微重力条件下气泡驻留效应则导致枝晶生长方向发生较大角度偏转。研究结果直观展示了重力引发的温场变化与凝固组织演变，为深入理解重力在合金枝晶生长中的作用机制提供了实验依据与理论支撑。

C07-08

旋转磁场对锡铅合金凝固的影响研究

于强^{*1}、鲁鹏飞^{1,2}、王晓东²

1. 中国科学院国家空间科学中心
2. 中国科学院大学

在地基条件下利用磁场对合金凝固过程施加影响，可以显著提升材料性能，但不可避免地会受到重力场的影响，导致合金产生偏析和晶粒尺寸不均匀等缺陷。中国空间站的建立为开展空间材料科学实验提供了特有的微重力环境。中国空间站上配备有高温材料科学实验柜（高温柜），在微重力条件下它不仅可以提供凝固所需的高温环境，还配备有旋转磁场功能，能够在空间开展磁场对合金凝固影响的实验。这样能够有效避免重力对合金材料凝固过程的影响，并能够探究磁场本身对合金凝固影响的规律。

利用数值模拟和实验相结合的方式，研究了重力场、磁场、样品移动速度对锡铅合金凝固过程的影响。首先利用地面多模态磁场装置，在 Sn-10%Pb 合金定向凝固过程中施加不同参数的旋转磁场，探究磁场和样品移动速率对合金凝固组织演变的影响机制，特别是对柱状晶-等轴晶转变(CET)和偏析的影响，在 0.1mm/s 和 1mm/s 样品移动条件下，施加 10mT 的旋转磁场，锡铅合金会出现 CET 现象，并有效改善了重力偏析状态，提高了合金的均匀性。但随着磁场强度的进一步增加，会导致中心宏观偏析的产生。根据实验结果并利用数值模拟方式，将温场和磁场进行耦合，利用相场法定性模拟合金在外加磁场定向凝固过程中的 CET 过程。实验和仿真结果都表明，在未施加磁场时以柱状晶为主，而在施加旋转磁场后等轴晶的数量和尺寸均显著增加，柱状晶比例则明显下降。通过建立磁场凝固模型，为利用磁场改善样品微观结构奠定了基础。同时也为开展空间微重力条件下研究磁场对合金凝固过程的影响做好了准备。

C07-09

空间凝固行为研究

王刚^{*}

上海大学

空间制造可以解决天地运输成本过高等问题,是人类迈向深空的重要支撑。本研究针对空间制造中原料获取与微重力熔炼等关键问题,对金属熔体的空间凝固行为进行了研究。利用中国空间站的无容器实验装置,开展微重力环境下合金熔化与凝固行为及其熔体热物性的研究。发现合金熔体中的过热阈值现象,阈值附近出现异常粘度,冷却凝固后对应不同凝固组织。此外,相比重力凝固,发现微重力凝固组织均匀、偏析减弱、孔隙缺陷少,力学强韧性增加。在凝固机理研究基础上,发明出具备优异空间增材制造和空间碎片防护性能的 TiVZrNbMo 高熵合金。研究结果为太空全流程冶金-制造-应用提供了重要的理论依据。

C07-10

FeCoSi 软磁合金地面与空间静电悬浮熔炼研究

吴琛*、刘幻、陈起明、严密
浙江大学材料科学与工程学院

软磁合金是 5G 通讯、电子信息、能源交通等领域的关键基础材料之一。为揭示微重力环境对其凝固行为和磁性能演化的影响,设计了 FeCoSi 合金,并利用中国空间站无容器材料实验平台开展了地面与空间静电悬浮熔炼实验。研究表明,通过延长合金熔体的过热保温时间可有效提升其过冷度,且微重力环境能够抑制熔体内部对流,有助于保留更多熔化潜热,获得更大的极限过冷度。空间样品表面形貌普遍呈现台阶状,台阶密度大于地面样品且具有更大的比表面积。通过数据拟合,发现空间样品的熔化熵显著大于地面样品,高熔化熵增强了不同指数晶面生长速率差异,进而诱导出空间样品更加显著的台阶状结构。在软磁性能方面,地面样品的矫顽力波动显著,性能不稳定,而空间样品则表现出良好的重复性和一致性。其根源在于地面重力环境下熔体比重对流增强,导致元素分布不均与形核点波动;而空间条件下对流被显著抑制,促进了均匀组织的形成,从而稳定了磁性能。本研究系统揭示了 FeCoSi 合金在无容器微重力条件下凝固过冷行为、微观组织演化规律与软磁性能之间的关联,对高性能软磁材料的开发具有参考价值。

C07-11

耐空间极端环境不锈钢合金的研制与应用

李扬欣、曾小勤*
上海交通大学

装备结构轻量化是航空航天领域发展追求的永恒主题之一,轻量化可产生巨大的经济、军事和环境效益。镁合金作为目前实际工程应用中最轻的金属结构材料,通常情况下其密度在 1.8~2 g/cm³ 之间,约为铝合金的 2/3,钛合金的 2/5,钢的 1/4,具有比强度和比刚度高,阻尼减振和电磁屏蔽性能良好等优点,是航空航天领域装备结构轻量化的理想材料之一。但“绝对强度偏低”、“变形能力偏弱”和“耐蚀性能不足”的三大瓶颈问题极大地限制了传统镁合金在航空航天领域的应用范围,研制高强韧高耐蚀镁合金是推广镁合金在航空航天领域应用的关键。本工作通过传统重力铸造和挤压变形方式制备的 Mg-RE-Al 合金屈服强度达 350 MPa,延伸率达 8% 和腐蚀速率低于 0.2 mm/y,这是目前公开报道腐蚀速率最低的高强镁合金。少量 Al 元素的添加促进了 RE 元素在合金表面的快速致密沉积,形成了具有持久保护性的钝化膜,有效阻碍了合金中第二相和基体间的电偶腐蚀,极大降低了 Mg-RE-Al 合金腐蚀的组织敏感性和杂质元素敏感性,这为不同组织状态铸造和变形高强不锈钢合金在工业制备中的应用提供了一种新的设计思路。空间站首批舱外暴露镁合金返回样品初步验证项目组研发的高性能(不锈钢)镁合金材料具备耐空间极端环境(冷热循环+原子氧侵蚀等)长期暴露的能力,采用不锈钢合金制备的电控箱壳体相比传统铝合金减重 30%,有效保障了卫星电子系统的服役安全,实现了高性能镁合金在我国卫星电控系统(嫦娥六号探测器)的首次应用。

C07-12

非晶合金复合材料的液-固分相行为与力学行为

张龙*、袁旭东、颜廷毅、张海峰

中国科学院金属研究所

本报告主要汇报“空间环境中新材料制备原理与特种成形技术”重点研发计划项目中液-固分相非晶复合材料的研究进展。介绍非晶合金复合材料的凝固行为与微观结构特点，液-固分相过程的模拟结果，以及采用地面静电悬浮法测定非晶熔体热物性以及液-固分相动力学研究结果。汇报基于液-固分相动力学的非晶合金复合材料微观组织调控技术，以及不同微观组织时的变形机制和力学性能。最后对轻质高强高韧非晶合金复合材料在空间探索领域的应用提出展望。

C07-13

液-液相分离合金凝固组织演变及微重力的影响

江鸿翔*、赵九洲、张丽丽、何杰

中国科学院金属研究所

液-液相分离合金具有液态组元不混溶区，凝固过程中首先发生液-液相变，这为具有弥散型组织或壳/核结构的原位复合材料的制备提供了新的可能。然而，该类合金在常规凝固条件下极易形成偏析型组织，特别是熔体内通常存在强烈的对流，使得各种影响因素相互混淆，其凝固理论研究受到了严重限制。微重力环境能有效弱化或消除重力导致偏析组织形成和熔体对流的混淆作用，有利于揭示液-液相分离合金凝固过程及组织形成机理。本研究以 Gd-Co-Ti 液-液相分离合金为对象，首先在地面上对其开展凝固实验以及建模与模拟研究；进而，设计优化空间实验合金成分及工艺，借助于中国空间站中的无容器材料科学实验柜对选定合金开展微重力凝固实验，并结合实验开展模拟研究，探究液-液相分离合金凝固组织形成过程及微重力的影响。

C07-14

“嫦娥五号”撞击玻璃中封存的超富水包裹物

陈自强¹、赵勇¹、邹敏杰¹、张博*¹、白海洋^{1,2,3}、杨孟飞³、汪卫华^{1,2,3}

1. 松山湖材料实验室

2. 中国科学院物理研究所

3. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室

数十年来，月球始终被视作一个本质缺水的天体——这一认知范式源于阿波罗/月球样本的分析结果，其水含量普遍低于 100 ppm。尽管近期研究探测到月表羟基组分及极区水冰的存在，月球内部与非极区仍被广泛认定为无水环境。本研究利用透射电子显微镜，在嫦娥五号任务返回的撞击玻璃珠内，首次发现微米级玻璃包裹体含有异常偏高的水含量(>5.0 wt%)，且以分子水(H₂O)为主要赋存形式。结合能量色散谱、电子能量损失谱及三维断层重构技术，我们揭示这些包裹体具有冲击变质成因的水合特征，直接捕获了撞击输运至月表的水。该发现提出一项颠覆性认知：撞击玻璃可作为月球水的重要储库，对重塑月球挥发分演化模型、太阳系物质输送机制及未来月球资源利用战略具有重大科学意义。

C07-15

VO₂/Al 红外隐身材料的制备及性能调控

王菁、曾龙、夏明许*、李军、李建国

上海交通大学

作为一种典型的相变材料，二氧化钒(VO₂)在 68 ℃ 附近具有可逆的金属-绝缘体相变，同时伴随着可变的发射率特性，因此在飞行器红外隐身领域展现出巨大的应用潜力。然而，其较高的相变温度以及高发射率限制了其在红外隐身领域的实际应用。本研究首先采用碳热还原法制备了具有高相变潜热的 VO₂ 材料，其相变潜热高达 57.844 J/g，为后续研究提供了性能优异的基础材料。在此基础上，通过 W 元素掺

杂成功调控了 VO₂ 的相变温度，当掺杂量为 2 at% 时，VO₂ 的相变温度降低至接近室温，显著提升了其在飞行器隐身系统的适用性。此外，通过退火工艺优化，实现了 W 掺杂 VO₂ 良好的红外隐身性能，为红外隐身材料的设计提供了新思路。为进一步降低 VO₂ 的热发射率，本文创新性地将 VO₂ 与 Al 复合，制备了 VO₂/Al 复合材料。实验结果表明，该复合材料显著降低了 VO₂ 的热发射率，在 105 ℃ 的实际温度下，其热辐射温度仅为 46.6 ℃，展现出优异的红外隐身性能。本文的研究不仅为空间环境下 VO₂ 相变特性的调控提供了有效的方法，还通过材料设计与工艺优化，拓展了 VO₂ 在飞行器红外隐身领域的应用潜力，为高性能航天智能隐身材料的开发提供了理论依据和技术支持。

C07-16

微重力生长 InSe 半导体晶体及器件设计研究

金敏*

上海电机学院

InSe 是一种引人瞩目的新型半导体材料，被诺贝尔奖获得者 Andre Geim 认为是“硅和石墨烯的黄金分割点”。本工作依托中国空间站高温材料科学实验柜开展 InSe 半导体晶体生长，发现微重力环境下 InSe 晶体生长过程中呈现出特有的非接触效应，晶体中心部位的位错密度大，但边缘部分却出现了近乎无位错的区域，可见非接触效应显著提高了晶体完整性和质量。晶体缺陷是限制 InSe 晶体呈现良好输运性能的关键，基于在空间微重力环境下生长的 InSe 晶体具有更少的晶格缺陷优势，开发了 InSe 场效应晶体管，发现空间生长 InSe 晶体的迁移率与地面相比提高了 3-4 倍，而且 InSe 场效应晶体管也超稳定，大幅提升了材料内部载流子的输运能力，未来有望在集成电路、生物传感、存算一体化等方面进行应用。

C07-17

基于固液复合润滑策略实现超低摩擦磨损及其空间验证研究

张立强、王道爱*、周峰

中国科学院兰州化学物理研究所

针对空间液体润滑油脂的寿命服役短、摩擦磨损严重的问题，基于固体润滑涂层-液体润滑剂耦合的固液复合润滑策略，实现了 9Cr18 钢摩擦副的长寿命润滑。研究证明，基于固-液复合润滑可以实现极低的摩擦系数（小于 0.02）和极低的磨损（近零磨损），对比了液体润滑和固-液复合润滑的摩擦学性能，分析了摩擦过程中的减摩和抗磨机制。基于动态球-盘测试单元测试了润滑剂的摩擦学性能，并在空间站舱外装置上完成了摩擦稳定性测试，其服役寿命大于 30 万转，部分样品在舱外达到了近零磨损。研究表明，基于固-液复合润滑能够大幅度延长空间运动部件的服役寿命，为未来空间长寿命润滑需求提供了技术储备。

C07-18

微重力条件下 FeSeTe 超导材料的高质量晶体生长与组织优化研究

董持衡*

本工作通过严格设计的“地-空”对照实验，深入阐明了微重力环境对铁基超导材料晶体生长行为与显微组织特征的影响机制，重点展示了 FeSeTe 多晶材料在高温材料实验柜中定向凝固的制备过程，并结合多种显微表征手段，分析了微重力条件下晶体生长、元素偏析行为及缺陷分布等关键过程，并进一步建立了微观组织与超导电性之间的构效关系。

研究表明，微重力条件可显著抑制器壁效应与元素偏析行为，从而获得组织均匀、强织构、缺陷密度极低的铁基超导材料。相比于地面样品，在轨样品的器壁效应显著减弱，边缘区域几乎无杂晶生成。XRD 分析显示，其轴向截面呈现严格的 a 轴织构，径向大部分区域为 b 轴织构，表明样品内部存在强烈的准双轴熔融织构。其次，地面样品在提拉凝固过程中受重力驱动的自然对流影响显著，导致富 Se 液相在样品下端富集，从而引发严重的宏观偏析。而在轨样品的纵截面中几乎未观察到宏观偏析现象，说明微重力环

境有利于实现成分均匀的定向凝固。此外，地面样品在快速凝固过程中由于固-液界面不稳定，在约 20 nm 尺度上出现明显元素偏析，球差校正 TEM 观察到严重的原子错排及一定浓度的间隙 Fe 存在。相比之下，微重力条件下晶体主要通过纯扩散机制生长，显著降低了晶体内部的缺陷密度。在轨样品中几乎未检测到元素偏析与结构缺陷，基体中 Fe 原子浓度从地面样品的 52.1 at% 降至 49.4 at%，使得超导转变温度得到提升。这种没有过量铁及晶格缺陷的 FeSeTe 超导材料可作为量子芯片、超导量子干涉器件等超导电子器件的核心材料。该研究不仅验证了微重力条件在构筑高品质超导材料中的独特优势，也为未来制造高性能超导器件开辟了新路径。

C07-19

Ni_{43.5}Co₁₉Cr₁₀Fe₁₀Al₁₅Ti₂Mo_{0.5} 低密度共晶高熵合金快速凝固行为及组织调控

卢健麟、任华永、谢桢、王建潼、何峰*

西北工业大学

共晶高熵合金通过 FCC/BCC 双相组织的协同变形机制实现优异的力学性能，结合其低密度特性和增材制造适应性，在航天领域具有重要应用价值。然而，增材制造的快速凝固过程对其组织演化和力学性能的影响机制尚未得到充分的研究。通过铜模浇铸和选区激光熔化(SLM) 制备 Ni_{43.5}Co₁₉Cr₁₀Fe₁₀Al₁₅Ti₂Mo_{0.5} 亚共晶高熵合金，可以获得不同凝固条件下的 FCC/B2 双相组织。在冷却速率最低的铸态试样心部，FCC 领先相较多且形成等轴晶，B2 相的相分数为 16.9%。在冷却速率更大的铸态试样表层，FCC 领先相明显减少，B2 相分数增加至 23%。同时，铸态试样中各个区域 B2 相中 Al 元素浓度均为 23 at.%。然而，在冷却速率最大的 SLM 试样中，B2 相的面积分数最少，垂直打印方向统计结果为 15.8%，且 B2 相中 Al 元素浓度降低至 16.5 at.%。研究表明，SLM 过程中极高的冷却速率导致溶质原子扩散不充分，促使 FCC 相形成过饱和固溶体。这一现象减少了达到共晶成分的残余液相量，进而抑制了 B2 相的析出，最终导致 B2 相体积分数显著降低。此外，激光扫描速率较快时(>500mm/s)，由于温度梯度较大，SLM 试样普遍由柱状晶组成；当扫描速率降低至 500 mm/s 时，由于温度梯度减小，能够发生柱状晶-等轴晶转变。值得注意的是，SLM 试样的力学性能明显优于铸态试样，其平均室温抗拉强度高达 1320.5±4.5 MPa，平均断裂延伸率达到 25.8±2.2 %。

C07-20

微重力实验用 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 超导材料凝固过程中显微组织演化规律

汤明辉^{*1,2}、董持衡^{1,2}、张振国^{1,3,4}、孙乔^{1,2}、任为¹、马衍伟^{1,2,4}

1. 中国科学院电工研究所

2. 中国科学院大学

3. 济南大学材料科学与工程学院

4. 齐鲁中科电工先进电磁驱动技术研究院

Fe-Se-Te 铁基超导材料高温下相组成非常复杂，间接导致了三元高温相图缺失，严重限制材料凝固研究。本报告是中国空间站高温实验柜铁基超导材料定向凝固实验的预研工作，通过聚焦研究常见组分 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 凝固过程中显微组织演化规律，明确凝固路径特征，最终指导在轨实验设计。本工作通过设计宽温域的液氮淬火实验来展示 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 材料的高温结构特征，研究发现材料自低温到高温经历了固相分离（富 Te 四方固相和富 Se 固相）、液固分离（富 Te 液相和富 Se 固相）、液液分离（富 Te 液相和富 Se 液相）、趋近均一熔体几个阶段。另外也对比分析不同温度淬火样品退火时富 Se 六方相向四方相转变过程差异，并最终给出了超导电性变化规律。其中 950 °C 淬火样品中含有最高比例的非超导富 Se 六方相，经过低温退火后大部分转变为富 Se 四方相并析出单斜相，增强面钉扎能力。4.2 K、5 T 条件下临界电流密度 J_c 高达 1.6×10⁴ A/cm²。基于以上研究内容，我们明确了 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 液相分离的本质，并结合高温柜配置设计了在轨定向凝固工艺。

C07-21

耐高温硅树脂及其复合材料

姜波*、时向荣、钱汉琦、曹庆元、黄玉东
哈尔滨工业大学

以硅树脂为研究对象,主要介绍改性硅树脂材料以及耐高温硅树脂基涂层材料,包括不同功能的硅树脂结构设计及其材料性能研究。针对耐高温硅树脂材料方面,从耐高温硅树脂的结构类型、结构设计、改性方法等方面进行详细介绍。此外,也研究了纤维增强硅树脂复合材料的制备工艺及性能。为改性硅树脂的研究及应用提供了借鉴方法。

C07-22

聚焦纳秒脉冲激光触发形核法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷的微观结构、共晶机理与性能研究

卢宇航、钟秋、杨莉萍*
中国科学院上海硅酸盐研究所

在本次研究中,我们使用了聚焦纳秒脉冲激光触发形核技术,并在不同过冷温度条件下成功地控制了形核凝固的过程。这种制备方法在样品中产生了耦合生长区,胞状生长区与耦合生长区之间的晶界能差异导致了成分偏析现象。经过深入的推理和分析,我们了解到在脉冲条件下,材料的电离模式更倾向于雪崩电离,这导致晶格软化并引发离子的迁移,进一步加速了共晶界面的形成。 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右脉冲激光触发形核的样品,其平均裂纹值低于 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右非脉冲激光触发形核的样品。此外, $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右脉冲激光触发形核的样品显示出较小的层状耦合结构共晶间距,从而展现出最佳的韧性。这一结果表明,在脉冲激光条件下, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷的抗裂纹扩展能力得到了改善。然而,韧性的提高通常伴随着硬度的下降。通过硬度对比测试发现, $1588\text{ }^\circ\text{C}$ 脉冲激光触发形核的样品相较于 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的样品表现出更高的硬度。根据上述测试结果的分析,脉冲对性能的增强效果会受过冷温度的影响。最后,综合分析表明,聚焦纳秒脉冲激光触发形核技术在提升 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ 共晶陶瓷机械性能方面具有显著潜力。

C07-23

多尺度孔隙结构多孔铜空间服役行为研究

陈斐*、黄志锋、莫龙飞、张驰
武汉理工大学

多孔铜材料由于铜基体所具备的优良综合性能及其与孔隙结构的耦合作用,成为航空航天领域重要的结构和功能材料之一。目前,多孔金属材料已经作为能量吸收材料应用在国际空间站等航天器的缓冲构件和防护外壳,用于航天器舱外空间碎片防护。上述应用对轻质高强、空间环境下结构稳定、结构功能一体化的多孔铜研制及其舱外暴露服役行为提出了明确需求。因此,研究舱外空间环境下的原子氧侵蚀、高能射线辐射和冷-热循环等多种环境因素长时间协同作用对多孔铜结构与性能的影响、验证其在舱外空间环境下的长时间服役性能是十分必要的。通过地面对比实验和分子动力学模拟研究表明,纳米多孔 Cu 中的大密度的晶界(细化晶粒)、相间边界或自由表面(多孔结构)可以提高材料的提高抗辐射性。大错配角与小孔径使得材料的自由体积增大,提供更多原子扩散路径和空间,促进原子扩散;同时,小晶粒尺寸使得晶界大幅增加,有效阻滞晶间缺陷传输,相较微米多孔铜辐照后缺陷减少约 30%。

C07-24

电子束打印 TiAl 合金异质结构形成机制与力学性能分析

张宇*^{1,2}、喻启元^{1,2}、黄陆军^{1,2}、耿林^{1,2,3}

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江省哈尔滨市, 150001
2. 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001

3. 哈尔滨工业大学苏州研究院, 江苏省苏州市

本研究通过电子束打印技术 (EBM) 制备了具有层状微观结构的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金, 阐明了 Al 周期性分布和本征热循环对微观结构演变的作用机制。在电子束打印过程中导致 Al 元素蒸发, 并沿打印垂直方向产生了周期性的 Al 元素分布形式, 从而使合金中形成了细小的 α_2 相组织 (其含量约为 3.27 vol.%), 同时促进了部分晶粒的异常生长。贫 Al 区形成数量较多 α_2 相, 具有很强的齐纳钉扎作用, 可以抑制晶粒的生长, 使打印后的组织总仍残留细小的 γ/α_2 片层和等轴 γ 晶粒, 而富 Al 区形成的 α_2 相数量减少, 钉扎减弱, γ 晶粒发生粗化。因此导致最终 TiAl 合金中形成交替的粗晶区 (CG) 和细晶区 (FG), 粗晶区具有低硬度, 细晶区具有高硬度。研究发现电子束打印的试样表现出了各向异性: 垂直于打印方向, 材料表现出较高的延伸率, 大于 1%; 平行于打印方向, 在室温和高温 ($\leq 800^\circ\text{C}$) 下均呈现脆性断裂特征, 塑性差, 主要是由于此方向的粗晶和细晶区协同变形能力差, 容易在界面处优先形成微裂纹。本研究为 TiAl 合金电子束增材制造工艺优化和合金异质结构设计调控提供了理论和实验补充。

C07-25

基于在轨无容器实验的多元铁基合金枝晶生长研究

王自东*、朱谕至、吕硕欣、王士强、乔怡心

北京科技大学

金属材料中的树枝晶是导致材料微观组织、成分、性能不均匀的重要因素之一, 限制枝晶生长有望解决该问题。与传统有器壁凝固相比, 无容器非平衡快速凝固中的凝固机制和材料组织特征均会发现显著变化, 但在轨无容器实验在材料选择上有特殊要求, 铁基合金样品凝固实验由于材料特性问题在释放、加热和降温三阶段都面临巨大考验。本研究以 Fe-Ti-Si 合金为研究对象, 对比分析了重力和微重力环境中铁基合金的凝固行为, 尝试了多种在轨实验控制参数, 探索了该样品在轨加热凝固特性, 为提高铁基合金在轨实验成功率提供了可行方案。

C07-26

 $\text{Sr}_{0.12}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 拓扑超导体单晶的空间生长曹崇德¹、杨晓光^{*2}

1. 西北工业大学

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

本项目通过空间高温柜实验成功制备了标称化学计量比为 $\text{Sr}_{0.12}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 的成分分布均匀的大尺寸单晶体, 发现空间微重力环境能够有效促进 Sr 元素的掺入, Sr 元素掺入量达到地面环境生长样品的两倍, 而且临界超导温度达到 3.5 K, 远高于国际报道的本材料 2.5 K-3.0 K 的 Tc 值, 这表明 Sr 元素有效地掺杂到了 Bi_2Se_3 的层间位置而不是层内, 表明空间微重力环境是层间掺杂型晶体生长的非常独特有力的条件, 可显著促进元素在层间位置的掺入。

C07-27

月壤玻璃长时间稳定性问题探究

张博*

松山湖材料实验室

玻璃被认为是气、液、固之外的第四态物质, 对人类社会发展和科技进步起着至关重要的作用, 其应用关系到我们日常生活的方方面面。玻璃是热力学不平衡状态物质, 其在玻璃化转变温度以下会不可避免地朝平衡态转变, 即发生物理老化 (以下简称老化), 导致其结构和性能随着时间的推移而转变, 直接影响玻璃的稳定性。因此, 老化是玻璃研究领域长久以来的热点问题。尤其是玻璃的长期抗老化效应, 关系到

玻璃的能态下限以及相应的结构和性能极限，更是人们关注的焦点。基于嫦娥 5 号任务带回来月壤样品，我们研究发现，月壤玻璃的长期老化效应均非常显著。这些月壤玻璃颗粒老化所致杨氏模量的增量高达几十个百分点（其中最大增量高达 73.5%），在其他玻璃体系中还从未报道过如此严重的老化效应。透射电镜分析结果表明，月壤玻璃杨氏模量的大幅升高是由老化引起玻璃试样的巨大体积收缩和成份均匀化所致，其中体积收缩为主要原因。令人惊奇的是，这些经历百万年以上老化的玻璃，仍然保持玻璃的特征和特性，以及优异的力学性能。研究还发现，在这些月球玻璃颗粒中观察到不同程度的杨氏模量和硬度之间的解耦现象，即老化虽然导致杨氏模量显著增加，其硬度变化却相对较小。通过对比各种玻璃体系在不同时间尺度下的老化效应，揭示月球玻璃的超凡抗老化效应主要归因于其在特殊的月球环境下自然选择的复杂成分。这项发现也证明通过多组分混合和适当微量元素的掺入，可以有效增强玻璃抵抗老化的能力，从而增强其抗老化效应和稳定性，研究结果为面向辐射防护和空间应用的高性能玻璃材料的研发和性能调控提供指导和帮助。

C07-28

微重力下金属增材制造成形质量方法研究

孙海云，刘亦飞，王功

中科院空间应用工程与技术中心太空制造技术研究室

随着欧空局 2024 年在国际空间站实现首次金属 3D 打印技术成形，这标志着太空金属增材制造技术实现从地面验证到在轨验证的突破。过去 20 年微重力下金属增材制造技术的研究主要以工艺验证为主，若未来要实现真正的在轨应用，还需要对成形构件的缺陷与质量控制开展进一步研究。本文综述了微重力下金属增材制造技术的研究前沿与成果，基于地面金属增材制造成形构件存在的气孔、各向异性、残余拉应力、表面质量等缺陷，耦合空间微重力、真空等环境因素影响，论述如何通过工艺参数优化以及复合增材制造技术（轧制、外场辅助、热处理）等提升成形构件的质量性能，为微重力下金属增材制造技术提供指导思路。

C07-29

空间润滑材料在轨制备维修研究

吉利*

中国科学院兰州化学物理研究所

空间润滑技术是保障航天器运行可靠性和寿命不可或缺的关键技术，然而目前空间润滑技术还不可维修。本研究以固体粘结涂层和真空气相沉积薄膜两大类主要的空间服役润滑材料为研究对象，围绕“空间微重力下制造润滑涂层/薄膜结构性能演变规律及机理”和“微重力条件下电场、化学力等定向牵引涂层/薄膜制造调控方法”两个科学目标，指导发展液-固转化和气-固转化成型两类空间润滑材料的在轨制备维修技术。综合考虑空间在轨兼容性、安全性和操作便捷性，开展两类材料在轨制备装置设计；在轨制备固体粘结润滑涂层和气相沉积薄膜，对比研究地面和在轨制备涂层/薄膜的界面与体相微观结构以及摩擦学性能，分析微重力对晶体生长、相分布、交联状态以及膜基界面结合等结构特征的影响，揭示微重力下制备涂层/薄膜生长机理。形成的理论和技术成果将指导发展我国自主的空间润滑材料在轨制造维修技术，为我国空间在轨维修以及航天强国战略的全面实施提供支持。

C07-30

微重力下激光金属增材制造关键过程研究

姜恒*、徐文帅、闫廓、何秀丽、边艳华

中国科学院力学研究所

太空增材制造技术是“深空探索”领域的重要关键技术之一。微重力环境（ $\leq 10^{-3}g$ ）是太空环境的典型

特征,直接影响金属增材制造成形过程成败。受到微重力环境的影响,原有的力学平衡关系被打破,表面张力成为主导作用力,导致金属增材制造过程中的熔化凝固过程与地面截然不同,地面成熟的工艺参数和装备难以适应太空环境。针对上述问题,本研究基于北京落塔微重力实验平台,研制了微重力金属激光熔丝增材制造实验装置,实现 3.6s 微重力时间内单道熔覆实验。结果表明,微重力下金属丝材固液界面张力与熔池表面的熔滴浸润张力是造成液桥失稳断裂的主要原因。失去重力场后,金属熔体内聚力增强,导致熔覆层截面从半椭圆形向半圆形转变,浸润角增大。微重力下金属熔滴失去浮力对流后,传热效率降低,导致晶体长径比降低,微观组织趋向于等轴晶。本研究初步获得微重力下激光金属增材制造关键成形工艺参数,为太空增材制造技术提供重要数据支撑。

C07-31

质子辐照对磁控溅射沉积铝基非晶合金薄膜的微观结构与力学性能的影响

黄永江*、赵天旭、宁志良、孙剑飞

哈尔滨工业大学

低地球轨道作为目前开发利用最多的地外空间,充斥着复杂多变的空间因素,尤其是带电粒子辐照对航天器结构材料的性能衰退具有显著的影响,非晶合金因其独特的内部原子结构而展现出优异的辐照稳定性,可以作为膜材料对航天器进行有效防护。本研究系统研究了质子辐照对磁控溅射沉积铝基非晶合金薄膜的微观结构与力学性能的影响。质子辐照导致非晶合金薄膜的局域有序度增加,抑制变形过程中剪切带的形成与扩展,进而提升了铝基非晶合金的表面硬度与弹性模量。研究表明,铝基非晶合金具有优异的质子辐照稳定性,在空间工程领域展现出重要的工程应用前景。

C07-32

快速凝固条件下 Co-Mo 共晶型合金的组织演变与性能优化

沙莎¹、常健²、魏炳波*²

1. 西安理工大学

2. 西北工业大学

在共晶型合金中,初生相和共晶相的竞争形核会诱发异常复杂的凝固行为,进而影响合金的组织形貌与力学性能。本文采用电磁悬浮和自由落体二种快速凝固技术,深入探索了二元 Co-20%Mo 亚共晶合金在深过冷条件下组织演变规律和性能优化机理。结果表明:当过冷度较小时,合金凝固组织由初生 α -Co 相和枝晶间隙的(α -Co+ ϵ -Co₇Mo₆)共晶组织构成。随着合金过冷度的增大,液态合金的凝固驱动力逐渐增强,初生枝晶的生长速度显著加快。当过冷度增大到 113 K 以上时,初生相的快速生长将完全主导凝固过程的进行,共晶反应将被彻底抑制。此时,快速凝固合金仅由亚稳 α -Co 单相构成,并伴随着明显的晶粒细化和溶质截留现象。其中, α -Co 相的生长形态由粗大枝晶逐渐转变为细小的等轴晶,其 Mo 元素含量单调递增。此外,在深过冷条件下初生 α -Co 相的硬度稳步提升。经分析,该合金的力学性能优化与细晶强化和固溶强化密切相关。其中,晶粒细化在促进应力分解的同时使其具有了更多晶界;固溶含量的增大可诱发晶格畸变和钉扎效应,从而共同提升材料的微观硬度。

C07-33

铁基磁致伸缩合金的空间实验研究

杨森*

西安交通大学

借助于微重力无容器实验环境,制备结构均匀,晶粒细化的材料,有望改善磁致伸缩材料性能。本次空间实验的目标为在地面和空间环境下制备 Fe 基磁致伸缩合金,通过对比地面与空间站的实验结果,探究其磁致伸缩性能的物理机制。目前,地基研究已发现 FePd 应变玻璃合金具有纳米马氏体畴,可表现出

低场驱动的大磁致伸缩；FeCoB 合金在 Co 占比为 58%~70%时处于其两相区，也能够表现良好的磁致伸缩性能。FeCoB 合金样品已完成了在轨熔融凝固，回收了实验样品，并收集了空间实验过程中的数据。空间实验的最高加热温度为 1200°C，FeCoB 合金的过冷度为 50K。实验中发现，FeCoB 合金在空间实验中会表现出电荷反转等与地面实验不同的性质。

C07-34

应变玻璃的特征与功能特性

王宇*

西安交通大学

应变玻璃是形状记忆合金材料体系中的新玻璃化现象，其本质是短程晶格应变区域(纳米马氏体畴)的冻结态。应变玻璃合金表现出典型玻璃化转变特征，比如动态力学性质的频率弥散特性和静态力学性质的非各态遍历性。应变玻璃合金的平均结构与母相相同且不随温度改变。但在微观结构上，纳米马氏体畴是应变玻璃合金的重要特征，它们随机分布在母相基体中，并相对母相基体发生结构对称性降低。应变玻璃的纳米马氏体畴对应力场和温度有响应，并可导致许多物理效应。纳米马氏体畴可在较大的均匀应力作用下转变成宏观马氏体，即发生应变玻璃的应力诱发马氏体相变，这导致了基于新机制的形状记忆、超弹性等功能效应，且其超弹性具有宽温域的特征。在大塑性变形所产生的内应力作用下，纳米马氏体畴还能随着温度降低取向生长，从而产生了 Invar 和 Elinvar 效应。这些功能特性的发现表明应变玻璃合金有望成为新型多功能驱动传感材料。

C07-35

月壤中的玻璃物质及其在月面建造中的潜在应用

赵睿*

中科院物理所

月壤遍布月球表面，是建设月球基地和开发月球资源的首选原料。而月壤具有良好的玻璃形成能力，在工程上有望利用汇聚太阳光或微波在月表直接将月壤烧结成力学性能优异的玻璃用于月面建造。报告人前期在 CE-5 月壤中发现了由固、液、气多种转化路径形成的丰富玻璃物质，特别是发现了天然玻璃纤维，证实月壤玻璃具有优异的加工成型特性，能够通过过冷液相区的均匀流变加工成玻璃纤维或其他复杂构件。而月壤玻璃纤维不仅能够作为类似钢筋的复合相强化月球建筑，还能被编织成线缆、面料，提供隔热、防护、过滤等广泛用途。报告人还综合多种物质科学研究手段研究了玻璃纤维等各类月球玻璃在月表空间环境下受微陨石撞击和太阳风辐照等作用下的演化行为特征，有望为研究玻璃材料在太空环境的服役特性提供重要参考。

C07-36

静电悬浮 NbTiVZr 高熵合金的组织演变及力学性能研究

樊永霞、王建忠*

西北有色金属研究院

NbTiVZr 高熵合金 (HEA) 以高强度和低密度著称，在先进航空发动机等领域具有极大的应用前景。然而，目前 NbTiVZr 高熵合金的后处理工艺耗时且复杂，难以完全去除合金中的元素偏析，限制了 NbTiVZr HEA 的应用。静电悬浮 (ESL) 技术是一种依靠静电悬浮样品并进行熔化、凝固的加工技术，其无容器、高真空、微重力环境，可实现合金深过冷凝固，为消除 NbTiVZr 元素偏析提供了解决方案。本文使用 ESL 技术获得了 83 K~425 K (0.21T_m) 过冷度下凝固直径为 3.0±0.1mm NbTiVZr HEA，通过 ESL 技术测试了 1815 K~2215 K 熔体的热物理参数，包括密度、热膨胀系数以及热辐射比；分析了 NbTiVZr HEA 在 ESL 凝固过程中的晶体生长动力学，阐述了 NbTiVZr HEA 显微组织以及力学性能在不同过冷度下的

演变规律。研究发现, NbTiVZr HEA 的密度、热膨胀系数、比热与发射率之比分别为 6.22 - 6.34 g/cm³、4.52-4.58 10⁻⁵/K、124.79 - 151.32 J/mol K; NbTiVZr HEA 凝固界面随过冷度增加逐渐呈多边形形状, 其生长速度随过冷度呈指数增长, 在 425 K 过冷度时可达 15 m/s; 随着过冷度的增加, 晶体生长速度激增, 由偏析引起的枝晶组织逐渐淡化, NbTiVZr HEA 转变为单晶体, 元素偏析亦同时消失。此外, 测试了铸态以及不同过冷凝固的 NbTiVZr 合金的纳米压痕硬度以及压缩力。其中, NbTiVZr HEA 的最高抗压强度为 5.52 kN, 最高硬度为 5.59 GPa。特别的是, NbTiVZr HEA 在生长为单晶后, 其延展性极佳, 可达 50%以上。

C07-37

钛基非晶内生 β -Ti 复合材料的强韧化机理研究

颜廷毅、张龙*

中国科学院金属研究所

随着航空航天行业不断地发展, 钛合金复合材料作为一种常用的结构材料得到了快速的发展, 尤其在飞行器中的使用量不断增加。然而, 传统的钛合金复合材料面临着强韧性难以匹配的问题, 这严重制约了钛合金复合材料在航空航天领域的广泛应用。为此, 本研究选择高强韧的非晶合金为基体, 开发出了一系列的钛基非晶内生 β -Ti 的复合材料。通过对比不同相稳定性的钛基非晶复合材料, 发现相变型非晶复合材料展现出更优异的拉伸性能, 这是由于当晶体发生马氏体相变时, 非晶剪切带不再钝化, 其厚度不断随马氏体尺寸增加, 即晶体马氏体相变诱发了非晶“剪切带钝化”, 从而实现钛基非晶复合材料的强塑性同时提高。然而, 在断裂韧性测试中, 裂纹尖端的复杂应力状态会严重抑制非晶剪切带钝化变形机制。另外, 相变晶体与非晶基体之间显著的强度失配会诱发局部应力集中, 促使裂纹过早形核与扩展, 最终导致相变型非晶复合材料断裂韧性难以进一步提高。基于此, 提出了一种通过精准调控晶体相稳定性优化非晶复合材料性能的策略, 并同时实现了钛基非晶复合材料拉伸性能和断裂韧性协同提升的目标。另外, 通过调控钛基非晶复合材料的体积分数和枝晶尺寸, 发现随着亚稳 β -Ti 相体积分数增加, 复合材料的韧性呈现先增加后减少的趋势, 并且粗大的 β -Ti 枝晶相可以通过更高程度的马氏体相变克服非晶基体结构弛豫导致材料脆化现象。这些发现不仅明确了微观结构对复合材料强韧化的作用机制, 而且为设计和开发更优异综合力学性能的钛基复合材料奠定了理论基础。

C07-38

抑制共晶生长对 Ni-Fe-Cr-Si 合金压缩强度与耐蚀性协同强化的作用机制

惠鹏飞、孙崇昊、李浩然、刘克伦、阮莹*、魏炳波

西北工业大学

非金属元素 Si 的外层价电子为半充满状态, 可以调控位错滑移势垒以提升材料强度和延展性, 同时促进晶界耐蚀元素富集, 增强钝化膜稳定性, 从而提高合金的耐腐蚀性能。因此, 在 Ni-Fe-Cr 合金中适量添加 Si 可同时改善其力学性能和耐腐蚀性能。采用电磁悬浮技术研究了 Ni₅₀Fe₂₀Cr₂₀Si₁₀ 合金中初生相与共晶之间的竞争生长机制、压缩及耐蚀性能。通过抑制共晶生长实现合金压缩强度与耐蚀性的协同提升。当熔融合金温度由 1900 K 降低至 1431 K 时, 其表面张力从 1.39 N m⁻¹ 提高到 1.81 N m⁻¹, 同时球形度从 0.83 增加至 0.89。过冷度的增加显著提高了 γ 相的形核率和生长速率, 抑制了 Ni₃Si 相的形成, 在过冷度为 205 K 的条件下, 合金倾向于形成 γ 单相组织。过冷度的提高致使 γ 相的微观组织从具有弱织构的粗大树枝晶转变为随机分布的细小等轴晶, 其晶粒细化机制由电磁搅拌引起的枝晶碎断逐渐转变为应力诱导再结晶。与母合金相比, 过冷度为 205 K 的合金屈服强度提高了 13.2 %, 强化机制定量分析表明这种提升主要归因于晶界和孪晶界强化效应。此外, 过冷度为 205 K 的合金在硫酸溶液中的耐蚀性能显著增强, 其点蚀电位提升至 0.996 VSCE, 钝化电流密度降低至 8.3×10⁻⁵ A cm⁻²。

C07-39

TiNi 基合金的凝固组织与纳米压痕行为研究

邹鹏飞^{1,2}、王海鹏^{*2}、侯兆阳¹、闫荣欣¹、魏炳波²

1. 长安大学
2. 西北工业大学

TiNi 合金作为航天航空领域的重要结构和功能材料,其凝固组织与力学行为间的内在关系一直是材料科学界的研究热点之一。在无容器技术条件下, Ti₅₀Ni₅₀ 合金中初生相的生长形态随过冷度的增大逐步从枝晶转变为等轴晶。当过冷度较小时, TiNi 相的晶界处会生成少量的 Ti₂Ni 及(Ti)相, TiNi 相中出现 R 相结构;而当过冷度较大时, Ti₂Ni 相的生长受到抑制。在力学性能方面,该合金的纳米硬度与合金过冷度密切相关,呈现出先增大后减小的变化趋势。此外,运用分子动力学模拟,获得 TiNi 合金的 Hall-Petch 关系,复现了载荷过程中马氏体相变的演化过程。以 TiNi 合金为基础,研究了第三组元 V 元素对 TiNi 合金凝固机制的影响规律。在 TiNi-V 合金系中,存在着一种特殊凝固组织结构:合金由(Ti, V)固溶体及 TiNi 相构成,但在每一相的基底中包含另一相的纳米颗粒。此外,运用分子动力学方法系统研究了 TiV 颗粒尺寸与温度对 TiNi 基体在纳米压痕下力学行为和变形机制的作用机理。模拟结果表明:加入 TiV 颗粒在一定程度上提高了 TiNi 合金的力学性能。然而,随着 TiV 颗粒尺寸增大,基体的硬度和弹性性能下降,这归因于大尺寸的 TiV 颗粒抑制了马氏体相变的发生。

C07-40

中国空间站锆钒合金共晶生长动力学研究

李浩哲、王海鹏*、魏炳波

西北工业大学

通过中国空间站无容器材料实验柜对 Zr-V 合金进行了静电悬浮快速凝固实验,探究了合金的热物理性质、共晶生长动力学和显微力学性能。对 Zr-V 合金在过冷液态和高温固态下的密度进行了测量,并计算了过冷液态 Zr-V 合金的热膨胀系数和热辐比。Zr-V 合金的剖面微观组织由三个不同方向的共晶胞构成,胞内呈现出独特的波纹状结构。由于形核点周围的对流受到抑制,(Zr)和 V₂Zr 相以非规则共晶的形式从表面向中心交替排列,最终形成了波纹状结构。共晶胞外分布着层片共晶,通过 TMK 共晶生长模型对合金的共晶生长速度进行了计算。对 Zr-V 合金进行晶体学取向分析后发现在 V₂Zr 相内部出现了 FCC 孪晶变体。此外,在相邻的共晶团中 V₂Zr 相还表现出了近似孪生的取向关系。与地面具有相似过冷度的合金对比,在微重力条件下凝固的 Zr-V 合金凭借着非规则共晶和更细的层片共晶,硬度增加了 10 %以上。本研究有助于进一步了解在空间环境凝固的共晶合金中新型微观结构的形成和力学性能变化。

C07-41

液态 ZrVFe 合金的静电悬浮热物性测量及二阶振荡研究

马德志、王海鹏*

西北工业大学

本研究运用地面静电悬浮技术进行了液态 ZrVFe 合金与 Zr 金属的热物性测算与高温二阶轴对称振荡研究,取得了以下成果:(1)获得了液态密度、表面张力数据、粘性等热物理性质;(2)通过样品图像与密度数据分析,揭示了密度相机曝光度、图像边缘检测算法对密度测量的影响;(3)通过振荡形态与频率特性分析,发现了液滴的振荡频率与振幅为负相关关系,且振荡衰减阶段的振荡频率高于激励阶段;(4)结合实验数据与数值模拟研究,发现了液滴振荡实验中外场作用力、内部对流、PID 控制信号等因素对振幅和频率会产生额外影响。

C07-42

中国空间站高温合金在微重力环境下的热历史与相变过程

陈彦莉、王海鹏*

西北工业大学

在微重力环境下准确获取高温合金的温度演化过程是确定其热物理性质的关键。然而，空间站高温合金的静电悬浮实验受限于测温手段的精度和时空分辨率，难以直接获得完整的热历史。为解决这一问题，我们针对中国空间站微重力实验中的高温合金体系，开展了系统的数值模拟工作，模拟了合金从加热、熔化、过冷到再凝固的完整热历史。本研究采用有限元方法，求解考虑温度依赖物性的热传导与相变耦合模型，准确刻画了固-液相变过程。同时，模拟中引入了表面张力梯度驱动的 Marangoni 对流与密度差异导致的自然对流，揭示了流场的演化特征。进一步地，我们基于 TMK 准则确定合金的生长速度以及层片间距，并基于共晶相场模型对共晶组织的形成与演化进行了模拟。该研究为理解微重力条件下高温合金的热传导行为以及固-液相变行为提供了理论支撑，也为实验数据的分析与解释提供了关键参考。

C07-43

基于气动悬浮技术的 β -Ga₂O₃ 制备及其掺杂研究

张欣彤、刘广辉、王伟丽*

西北工业大学

随着深空探测、高速通信等领域的快速发展，现有半导体材料逐渐逼近其应用物理极限。在此背景下，作为具有唯一常压液相的第四代宽禁带半导体材料 β -Ga₂O₃ 凭借其高的击穿场强、大的 baliga 优值以及出色的热稳定性，使其在日盲紫外探测等领域展现出不可替代的优势。目前的熔体法主要包括提拉法和导模法等，然而其昂贵的铍金坩埚以及杂质的引入限制了其发展。

本文聚焦于气动悬浮技术的高纯 β -Ga₂O₃ 晶体无容器制备，并且通过负压气载粉的方式实现了在高温熔融状态下的元素掺杂。实验过程辅以高速摄像机和红外测温仪对气动悬浮过程进行实时监测调控，而气动悬浮过程中气体同时可赋予制备过程的富氧环境。此外，通过第一性原理（DFT）计算对掺杂前后的电子结构进行了预测，包括能带结构和光学性质等。结合实验结果发现，所制备的掺杂 β -Ga₂O₃ 晶体结构致密、表面平整，X 射线衍射（XRD）表明其为单相，能谱（EDS）分析证实了掺杂 β -Ga₂O₃ 的 Cu 或者 Mg 元素在晶体结构中的均匀分布，且在紫外区域具有更高的光吸收率，这种基于气动悬浮无容器制备技术和负压气载粉掺杂方式为熔体法制备 β -Ga₂O₃ 晶体提供了新思路。

C07-44

月球非晶物质在储藏水和氦-3 等战略资源中的关键作用

王军强*

宁波材料技术与工程研究所

本报告主要介绍宁波材料所团队在嫦娥五号月壤中“氦-3”和水等战略资源方面的研究进展。研究发现钛铁矿由于表层存在一层非晶物质，表现出优异的捕获并保存太阳风物质的能力。非晶层中捕获并保存了大量氦气泡，这主要归因于非晶物质极高的致密度和强度，从而可以长久保存氦气泡；由于非晶物质的脆性和气泡中的高压，我们提出一种基于机械破碎法快速开采氦-3 的新策略。而且由于钛铁矿表层致密非晶结构及内部晶体的特殊原子结构，太阳风注入的氢很难扩散逸出，大量储存于月壤矿物中。基于此，我们提出基于高温下内源氢与铁氧化物反应制备水的新策略。据估算月壤高温产水量可以高达 5.1% 以上。相关成果为未来月球科研基地建设提供了重要科学依据。

C07-45

空间微重力条件下旋转磁场对铝基轻质高熵合金凝固过程的影响研究

王晓东*

在凝固工程和材料制备领域,流动和扩散对凝固组织的形成具有至关重要的作用。通过在凝固过程中施加特定模式的磁场,可以改变熔体的流动形态,进而调控熔体内的温度梯度、晶体生长、柱状晶向等轴晶的转变,以及自然对流引起的偏析现象。金属凝固过程涉及传热、传质和动量传输的复杂相互作用,其中重力水平直接或间接地影响这些过程。在地面实验中,重力会引发热对流,进而影响磁场对金属凝固的效果。随着空间科学技术的发展及中国空间站的建设,部署在梦天实验舱内的高温材料科学实验柜为空间材料科学的凝固实验提供了优越的条件。该实验柜可在高达 1200 °C 的高温环境下进行实验,并支持等温、温度梯度以及旋转磁场等多种实验条件,为深入研究磁场对材料凝固过程的影响提供了理想的实验平台。为明确旋转磁场对 $\text{Al}_{100-4x}\text{Li}_x\text{Mg}_x\text{Zn}_x\text{Sn}_x$ 轻质高熵合金凝固机理的影响,并揭示各溶质元素的作用,我们设计了地面磁控定向凝固模块,对 Al-Li、Al-Zn、Al-Mg 和 Al-Sn 二元合金进行了不同抽拉速度和温度梯度的定向凝固实验。实验中,我们观察了不同磁场强度、磁场频率、磁场周期条件下晶粒形态的变化,探讨了每种元素在不同磁场参数下的作用规律。这些研究成果为后续在空间微重力环境下的实验提供了参数化依据,为识别和控制凝固过程中微观组织演变的流动模式奠定了理论基础。

C07-46

深度势函数驱动的 Fe-P-C 非晶合金形成机制:化学有序与拓扑约束的动态协同演化

韩秀君*

齐鲁工业大学(山东省科学院)

Fe 基非晶合金因其优异的力学、耐腐蚀和软磁性能,在高速电机、节能变压器及新能源汽车等领域具有重要应用潜力,但其工业化应用长期受限于玻璃形成能力(GFA)不足的核心问题。尽管多元素合金化被广泛用于优化成分-结构-性能关系,但 Fe-P-C 等具有金属-共价混合键合特性的三元体系因复杂的多元素相互作用,其原子尺度结构演化机制仍不清晰。

传统经验势,例如嵌入原子势(EAM)、修正 EAM(MEAM)及键序势(BOP),难以准确描述金属-共价混合键合体系的电子特性,而第一性原理分子动力学虽能提供精确的原子间作用力,却受限于计算规模与时间尺度,难以捕捉大体系统长时间的结构演化过程。近年来,机器学习原子势(MLIPs)通过结合量子力学精度与分子动力学效率,为复杂合金体系建模提供了新途径,但相关研究多集中于金属键主导的合金体系,而金属-共价混合键合体系 MLIP 的构建仍然极具挑战性。因此,开发兼具量子精度与计算效率的 MLIP,并借此揭示 Fe-P-C 非晶转变过程中的原子结构演变,成为突破现有研究瓶颈的关键。

本研究结合主动学习策略,通过迭代优化神经网络模型,利用第一性原理分子动力学和密度泛函理论数据集训练得到了适用于 Fe-P-C 体系的深度势函数(DP)。验证表明,该 DP 在晶格常数、非晶态能量-体积关系、熔体结构及局域五次对称参数等预测中表现出接近 DFT 的精度,成功克服了传统经验势对混合键合特性描述的局限性。

通过大规模机器学习分子动力学(MLMD)模拟,系统研究了 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ 合金在玻璃形成过程中的动态结构演化。研究发现,磷的化学短程有序(CSRO)与碳的拓扑短程有序(TSRO)在玻璃转变温度附近呈现显著的温度依赖性竞争:磷的配位模式从高温下的溶质-溶质(S型)主导逐渐转变为低温下的溶质-溶剂(P型)优先,而碳原子则通过形成短程约束对($\sim 1.425 \text{ \AA}$)并参与拓扑密堆,展现出独特的局域化行为。Voronoi 多面体分析表明,具有五重对称特征的 $\langle 0,1,10,x \rangle$ 和 $\langle 0,2,8,x \rangle$ 类二十面体团簇随温度降低显著增殖,而 $\langle 0,4,4,x \rangle$ 准晶团簇的丰度变化揭示了中程有序(MRO)的演化规律。空间关联分析进一步表明,高对称性团簇通过链状或三角形连接形成网络结构,其动态异质性抑制效应是提升玻璃形成能力(GFA)的关键因素。研究还发现,碳原子通过金属电子介导的键长振荡($1.417 \sim 1.471 \text{ \AA}$)稳定于铁基体间隙位,形成九配位局域环境,打破了传统溶质规避原则。这种金属键对共价相互作用的动态调控机制,为理解轻元素在玻璃形成中的拓扑约束作用提供了新视角。此外,磷驱动的化学有序与碳诱导的拓扑阻挫之间的协同竞争,揭示了多组元合金中成分-结构-性能的内关联规律。

本研究首次建立了 Fe-P-C 混合键合体系的高精度深度势函数,揭示了磷的化学有序重构与碳的拓扑约

束效应之间的动态竞争机制。研究结果深化了对 Fe-P-C 非晶形成机理的认识, 同时为通过调控化学-拓扑协同作用设计高性能 Fe 基非晶合金奠定了理论基础。

C07-47

固体润滑薄膜材料的空间环境效应研究

王德生*、高晓明、胡明、孙嘉奕、翁立军

中国科学院兰州化学物理研究所

空间润滑技术是保障航天器机械运动部件可靠和长寿命服役的关键支撑, 直接关系卫星、飞船、空间实验室等航天器的长期在轨服役可靠性。在空间极端高低温交变、微重力及超高真空等环境下, 精密机械运动部件的固体润滑技术和固体润滑薄膜材料则展现出独特的适应优势。在极端的空间因素耦合环境条件下, 特别是近地轨道原子氧侵蚀作用下, 润滑薄膜的环境效应研究具有重要的意义。主要概述了润滑薄膜材料的环境效应的研究及应用, 重点介绍了在我国空间站舱外暴露平台开展的润滑材料暴露实验的结果, 并对润滑薄膜材料的研究进行了展望。

C07-48

助熔剂法生长 PIN-PMN-PT 和 PYN-PMN-PT 晶体的结构性能初步研究

宋克鑫*、侯丁伟、李飞

西安交通大学

弛豫铁电单晶 (PMN-PT、PIN-PMN-PT 等) 由于具有超高的压电性能, 在医疗超声换能器、海洋声纳传感器和自适应光学高精度制动器等领域有广泛应用。同时弛豫铁电单晶材料在高压电性能起源、电畴调控、晶格调控上存在着极高的科学研究价值, 是压电材料中研究热点之一。本次研讨主要围绕弛豫铁电单晶材料在地基设备进行的匹配生长试验结果, 对空间站条件生长的科学目的、实验方法和预期结论进行探讨, 希望通过微重力条件采用助熔剂生长弛豫铁电单晶, 对比不同重力条件助熔剂生长弛豫铁电单晶的成分和性能结构变化, 明晰弛豫铁电单晶材料的成分分凝机制, 建立单晶性能与原子尺度分布的关系。

C07-49

中国空间站难熔悬浮钛合金表面褶皱收缩研究

刘丁楠、王海鹏、魏丙波*

西北工业大学

本研究在中国空间站进行了难熔钛合金无容器快速凝固实验, 在地面重力十万分之一的微重力环境下研究了表面褶皱收缩行为。实验中的钛合金液滴经历了超过 1800K 的极高过热度, 随后实现了 307K 的过冷度, 得到了具有表面单相结构合金层的凝固样品, 这种单相结构在传统地面实验中难以获得。此外, 通过扫描电子显微镜和三维 X 射线计算机断层扫描技术分析, 揭示了钛合金在微重力环境下丰富的表面褶皱收缩结构, 探索了材料在失重状态下的表面变形和收缩机制。并通过主动控制亚稳快速凝固, 形成了表面具有应力诱导马氏体相变能力的 B2 相结构。这一研究揭示了微重力环境下凝固过程中表面变形结构的形成机制以及极端亚稳凝固与微重力耦合对合金结构的影响等科学问题。

C07-50

星用材料空间辐照环境效应评价方法研究

刘宇明*、丁义刚

北京卫星环境工程研究所

星用材料在复杂空间环境下的性能变化对卫星的可靠运行至关重要, 建立有效的空间环境效应地面模

拟评价方法是保障星用材料在轨服役寿命的关键。然而空间环境因素复杂多样,如带电粒子辐照、高真空、冷热交变、原子氧侵蚀以及微流星和空间碎片的撞击等,特别是空间带电粒子辐照环境,带电粒子能量分布广、束流密度不均一、辐照时间长等,对准确模拟评价星用材料空间辐照环境效应提出了巨大挑战。因此,等效模拟和加速试验技术是空间辐照环境效应地面模拟评价方法的核心技术。本研究以航天器热控材料、光学材料、绝缘材料等常用星用材料为对象,深入探究星用材料空间辐照环境效应评价方法,通过开展 γ 射线、电子辐照等试验,分析不同模拟辐照源和辐照通量对试验结果的影响。从材料辐照损伤机理和性能退化两方面,探讨了 γ 射线、电子源两种辐照源的等效性以及不同电子辐照通量的等效性,从而有助于建立科学的星用材料空间环境效应评价方法,为评估卫星在轨期间星用材料的性能退化状况提供准确技术手段。

C07-51

静电悬浮条件下液态三元 $\text{Ti}_{67.6}\text{Ni}_{23.4}\text{Al}_9$ 包共晶型合金的快速凝固过程研究

王磊^{1,2}、胡亮¹、耿德路¹、魏炳波*¹

1. 西北工业大学物理科学与技术学院

2. 韩国标准化科学研究院

包共晶型 Ti-Ni-Al 合金兼具了(βTi)固溶体相的延展性和 Ti_2Ni 金属间化合物相的高硬度与耐腐蚀性,而 Al 元素的加入进一步优化了其性能。然而,深过冷条件下包共晶合金的微观组织演变机制,特别是超常凝固过程与共晶演变的关联尚不明确。

本文采用静电悬浮无容器熔凝技术,系统研究了深过冷液态 $\text{Ti}_{67.6}\text{Ni}_{23.4}\text{Al}_9$ 合金的超常凝固动力学机制。结果表明,静电悬浮条件下合金呈现单次再辉及两次再辉两种凝固路径。单次再辉模式下,随着过冷度增大, (βTi)和 Ti_2Ni 相从离异独立生长的组织形貌转变为非规则共晶。生长速度测定及凝固组织分析表明,临界转变过冷度为 190 K。两次再辉模式下,凝固组织呈现亚共晶的微观组织形貌,初生(βTi)相随过冷度发生“枝晶 $\rightarrow$ 等轴晶”的转变。高分辨透射电镜分析表明,液固转变与共析反应产生的 Ti_2Ni 相因内应力差异而具有不同的晶体结构特征。

C07-52

液-固相分离脱合金及 Fe/Mg 纳米复合组织的形成

杨鹏举、范康祺、何杰*

中国科学院金属研究所

液-固相分离脱合金,基于不混溶二元合金相图中液、固两相区组元不互溶特点和利用金属原子间吸斥相互作用,可实现固态前驱体合金中特定组元的定向溶出。本报告简要介绍了液-固相分离脱合金技术在异质金属纳米复合材料、纳米多孔材料、异质金属连接、战略金属提取回收等方面的研究进展。同时,介绍了 Fe-Ni 坡莫合金前驱体在液态金属 Mg 中的液-固相分离脱合金行为,以及 Fe/Mg 异质金属纳米复合材料组织结构的形成机制及其熔体流动等因素的影响规律。结果表明,前驱体中组元 Ni 被提取至液态 Mg 中形成 Mg-Ni 合金,而组元 Fe 等以固相形式剩余,形成三维互穿调幅分解型 Fe/Mg 双连续组织,且通过调控 Fe 固相生长,可制备 Fe/Mg 异质金属纳米复合材料。

C07-53

微重力条件下稀土镧基合金熔体特性研究

王峥*

山东大学

稀土合金凭借其在磁、光、电、热和机械性能等方面的独特优势,已成为现代工业和高技术领域不可或缺的关键材料。其中稀土镧基合金除了在冶金、能源、催化等领域有着广泛应用,其更是可形成非晶

态材料的重要合金体系。我们通过静电悬浮的手段，系统研究了具有非晶形成能力的稀土镧基二元及三元合金熔体的结构和动力学特征，并与通过抛物线飞行试验的结果进行比对。进一步结合时间分辨的同步辐射和中子衍射等手段，以及计算机模拟，对稀土镧基合金熔体的结构和动力学随温度的演化进行分析。我们的结果为深入理解稀土镧基合金玻璃形成能力以及动力学转折等问题提供了新视角，也为后续可能的空间实验提供了基础数据。

C07-54

月球玻璃的动力学定年新方法

赵勇¹、张华平¹、陈自强¹、赵睿²、张博*¹、白海洋²、汪卫华^{1,2}

1. 松山湖材料实验室
2. 中国科学院物理研究所

准确测定地质事件的年代对于理解行星历史与演化至关重要。玻璃材料中同位素含量极低，难以采用传统的放射性同位素定年方法。亚稳态玻璃因其物理老化行为可在形成后持续演化，其瞬时物理性质与年龄之间存在确定对应关系，为发展基于动力学的测年方法提供了可能。然而，传统理论模型在描述远低于玻璃转变温度 (T_g) 下的超慢、非线性老化动力学时面临显著挑战，现有平衡态模型常严重高估了弛豫时间，甚至超出宇宙年龄。本文系统提出一种“玻璃时钟效应”测年新方法，发展出一套基于材料脆性指数的经验公式，可精确预测多类玻璃（如金属玻璃、琥珀和月球玻璃）在非平衡态下的有效弛豫时间 (τ_{eff})。该方法可类比同位素测年技术，不同玻璃具有对应的“动力学衰变常数”，使得该方法可有效测定从数十年到数亿年甚至数十亿年的时间尺度。该方法不仅为地质与行星演化研究提供了新的测年工具，也可作为传统测年技术的重要补充。

C07-55

原位 TiC_x 增强钛基复合材料强韧化机制及性能优化研究

李彪^{1,2}、张龙*^{1,2}

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

航天领域对材料轻量化、高强韧性和可加工性能提出了更高要求，钛基复合材料因其优异的比强度和耐极端环境特性成为研究热点。然而，传统增强相（如 TiB、TiC）的引入往往难以权衡钛基复合材料强度与塑性，这严重制约其在航天领域中的广泛应用。针对这一挑战，本研究采用放电等离子烧结技术结合热机械处理工艺，在 Ti-6Al-4V 基体中引入石墨烯纳米片，成功制备出原位 TiC_x 增强的钛基复合材料。研究表明，利用放电等离子烧结结合热等静压技术，显著提高了钛基复合材料的致密度，并且石墨烯与钛基体反应原位生成了 TiC_x 增强相，并通过热轧工艺获得具有非晶界面的 TiC_x 纳米级颗粒。在变形过程中，这种非晶界面会显著降低界面应力集中，并提高了钛合金基体与增强相之间的载荷传递效率。在淬火过程中，TiC_x 纳米颗粒会限制基体晶粒长大，减小了淬火形成的多级 α' -Ti 马氏体板条厚度，诱发出更高密度的 α'/β -Ti 相界面，这种独特的微观结构有效地阻碍了钛合金基体中位错的滑移。同时，TiC_x 颗粒还可以激活基体中的 $\langle c+a \rangle$ 位错，促进材料发生持续的自硬化变形，从而获得优异的拉伸性能。因此，通过设计原位 TiC_x 增强钛基复合材料的微观结构，调控 TiC_x 与钛合金基体的协同变形行为，突破了钛基复合材料强度与塑性的传统制约关系，为设计高强韧的新型航天用材料提供了重要理论依据和技术途径。

C07-56

机械稳定型高熵合金深冷环境下的位错增塑机制

汤伟哲¹、郭博静¹、马月旻²、崔丁聪¹、杨中晟¹、王雷¹、王志军¹、李俊杰¹、王锦程¹、王循理²、何峰*¹

1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室 西安 710072

2. 香港城市大学 物理系和中子散射研究中心 999077

面心立方高熵合金，例如 NiCoCrFeMn、NiCoCrFe、NiCoCr、NiCoV 等，在深冷环境表面出强度和塑性同时提升的特性，扩展了其在航空等领域中的应用前景。这一性能提升现象通常归因于机械亚稳态效应的激活。然而，作为晶体塑性本征起源的位错滑移在深冷环境中的具体作用机制尚未得到充分的研究。通过调控位错运动学，Ni₂CoCrFe 高熵合金可实现力学性能的显著优化。在未发生形变孪晶与相变前提下，合金低温变形（173K）展现出优于室温的强度（~672 MPa）、延伸率（~67%）及应变硬化能力。通过原位同步辐射 X 射线衍射实验，揭示了该合金应变硬化能力提升及塑性改善源于温度相关的位错存储速率与位错组态改变的耦合作用。研究证实，温度通过热激活调控位错运动学，决定塑性变形过程位错的存储行为与组态演变。热激活通过影响位错滑移势垒延迟了动态回复的激活并减缓其动力学。此外，位错激活体积与位错结构敏感的强化因子 α ($\sigma = M\alpha\mu b\rho^{1/2}$) 之间呈现的线性关联表明，热激活决定位错构型的演化规律。低温改变位错滑移模式，促进位错平面滑移和滑移的离域化。该研究为理解深冷环境下金属材料塑性变形机制提供了新的视角。

C07-57

液-液相变与 Zr 基大块金属玻璃成玻能力之间的关系

兰司*¹、董蔚霞²、吴桢舵³、王循理²

1. 南京理工大学

2. 香港城市大学

3. 香港城市大学（东莞）

随着对空间探索需求的不断提升，空间材料对高强度、耐辐照和优异热稳定性的要求日益严苛。从高温熔体极速冷却形成的金属玻璃因其独特的长程无序结构和性能，成为空间材料领域的重要候选。地面静电悬浮装置作为无容器材料制备与原位结构探测的重要手段，能够有效避免容器污染，实现对高温金属熔体的精准操控并开展相关原位研究。然而，地面重力和静电场本身仍会对元素分布、熔体对流等产生不可忽视的影响。本研究采用原位高能同步辐射 X 射线对分布函数和静电悬浮技术，建立了两种锆基金属玻璃中液-液相变（LLPT）与玻璃形成能力（GFA）之间的关联。具有显著 LLPT 行为的玻璃体系展现出优异的玻璃形成能力，这一现象可通过静电悬浮设备再冷却过程中的完全结晶得到验证。基于实验实空间数据计算的结构熵表明，LLPT 与中程尺度上的局部原子重排之间存在正相关。此类原子重排有助于稳定无序结构，为理解具备 LLPT 的金属玻璃中 GFA 的优化提供了结构-热力学框架。本研究对于提升空间用金属玻璃材料的设计与性能具有重要的理论指导意义。

C07-58

带凹槽异形环件轧制局部加载塑变行为与缺陷形成机制

郭良刚*、梁磊

西北工业大学

带凹槽异形环件是航空航天发动机等高端装备制造广泛应用的关键构件。该类构件在异形环轧过程中，存在主动变形区的局部加载变形对被动变形区的复杂拉缩变形作用，使得成形过程中金属塑性流动行为异常复杂，经常产生轧辊型槽欠填充的成形缺陷。这对该类构件的异形环轧过程有关锻件结构、坯料形状尺寸、轧制参数等关键要素的合理设计带来极大的挑战。本文以 IN718 高温合金带凹槽异形环件为研究对象，采用理论解析和数值模拟相结合的方法，研究探索带凹槽异形环件轧制局部加载塑变行为与成形缺陷的形成机制，提出该类异形环件轧制过程的设计思路、准则与方法。首先，阐明 IN718 高温合金多道次变形过程流动应力与组织演变规律，建立带凹槽异形环轧过程宏微观耦合有限元智能仿真模型；其次，模拟揭示带凹槽异形环轧过程金属塑性流动规律、欠填充成形缺陷形成机制与缺陷约束下锻件结构、毛坯形状尺寸及轧制参数等关键要素的设计方法；最后，阐明上述关键要素对带凹槽异形环轧过程晶粒演变的影响规律，

获得实现航空航天发动机机匣用 IN718 合金带凹槽异形环件成形性的合理工艺方案与参数组合。本文相关研究结果为异形环轧过程的设计提供重要理论依据,推动异形环轧工艺从基于经验的试错设计向基于科学计算的定量设计转变,从而进一步丰富和发展异形环件轧制理论和技术。

C07-59

碳质中间相转变的空间实验设计

申克*¹、于强²、曹欣磊¹

1. 湖南大学

2. 中国科学院国家空间科学中心

碳材料因其优异的耐高温、热导率和耐辐照性能,被广泛应用于航空航天、核能及国防等重要领域。中间相沥青作为高性能碳材料的重要前驱体,其有序结构对碳材料微观结构的形成起着关键作用,并影响最终碳材料的性能。开展碳质中间相转变空间实验研究,揭示该过程本征规律,推动碳材料科学的发展。本研究首先开展了碳质中间相转变机制地面研究,揭示了重力导致的对流扰动与沉降效应的影响,系统研究了碳质中间相在不同融并阶段的显微结构,初步揭示了重力场条件下中间相的形成与结构演变规律,说明了空间实验的必要性。针对碳质中间相转变的空间实验,开展了空间实验的方案设计,分析了反应气相产物对观测可能产生的影响,并通过原料预处理降低了气相产物生成量。通过空间在轨的多工况热处理实验,将有助于进一步揭示中间相形核和生长的本征规律,为高性能碳材料的开发提供理论支持与技术路径。

C07-60

过冷液态 LaNi₅ 合金各向异性生长动力学机制研究

王时宇、耿德路、魏炳波*

西北工业大学

LaNi₅ 合金是一种典型的 AB₅ 型金属间化合物,具有良好的储氢性能与热稳定性,广泛应用于储氢装置、金属氢化物电池及热控系统中。本文采用静电悬浮无容器处理技术,测定了过冷液态 LaNi₅ 合金的密度与热辐比等物理性质,并结合高速摄像研究了其快速凝固过程。实验结果表明,液态 LaNi₅ 合金的密度和热辐比均随温度呈线性变化。快速凝固过程中,LaNi₅ 合金的再辉过程具有两类典型特征:在高过冷度条件下,部分样品的再辉前沿在不同方向上的推进速度存在显著差异,呈现明显的各向异性;在较低过冷度下则表现为各方向生长速度近似一致。通过计算再辉前沿在不同方向的推进速率,对其动力学的各向异性情况进行了分析。结果显示,随着过冷度的提升,再辉前沿在各个方向的推进速度差异逐渐增强,且无论再辉前沿呈现各向异性还是近各向同性,其生长速度随过冷度的分布均服从同一幂律关系。EBSD 取向分析表明,大过冷条件下的 LaNi₅ 合金倾向于形成单晶结构,而小过冷条件下则易生成多晶组织。

C07-61

固液密度差对柱状晶尖端生长动力学作用规律

王庆冉、李俊杰、王锦程、王雷*

西北工业大学

经典枝晶生长理论假设固液两相密度相等且溶质传输仅由扩散过程控制。实际合金凝固过程中固液两相存在密度差异,考虑密度差异后会出现两种效应。密度差不仅会引发体积收缩并驱动熔体流动,还可以修饰扩散方程影响溶质传输。密度变化引起的流动和扩散两个过程共同影响枝晶前方的浓度场进而影响枝晶生长行为,但二者相互作用规律尚不明确。本研究以 Al-Cu 合金为研究对象,采用相场耦合格子玻尔兹曼方法研究密度变化引起的两种效应之间的相互作用及其对柱状枝晶尖端动力学的影响。结果表明:由密度变化引起的溶质传输的改变与收缩诱发的流动呈现出竞争关系,扩散方程引入密度变化后通过增强溶质扩散提高枝晶尖端前沿的溶质浓度,而收缩流动则通过对流效应降低该区域溶质浓度,这两种相反的作用

共同改变了固液界面处的成分过冷状态；同时，密度变化引起的两种效应协同作用使枝晶尖端半径增大，这使得曲率过冷效应降低。

C07-62

静电悬浮条件下 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金的热物理性质与组织性能调控研究

段敬祥、耿德路、金英捷、朱光耀、魏炳波*

西北工业大学物理科学与技术学院

钛合金凭借其卓越的比强度、优异的耐腐蚀性及良好的高温性能，在高端装备制造领域占据核心地位。Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金相比传统钛合金具备更优异的综合性能，尤其在抗腐蚀性能方面表现突出，使其广泛应用于潜艇及水下兵器的受力构件、螺栓、轴系以及耐腐蚀壳体等。本文在静电悬浮条件下测定了液态 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金的热物理性质，同时探究了其快速凝固规律和组织性能关系。实验结果表明，液态合金的密度、膨胀系数、热辐比及表面张力均随温度呈线性变化，而粘度则表现出指数递减趋势。初生相枝晶生长速度与过冷度呈幂指数增大关系，实验获得的最大过冷度达到 386 K(0.2 T_L)，最大生长速度达 52.3 m/s。在快速凝固条件下，Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金凝固组织主要由 α 相及少量 β 相构成，且随着过冷度的提高， α 相形态由晶界 α 相+层片 α 相+针状 α 相转变为以针状为主。合金的背散射电子衍射结果表明，过冷度的增加使合金的位错分布由低角度集中向高角度集中转变。随着过冷度的增大，合金的组织细化， β 相含量增加，位错密度增加，致使合金的维氏硬度随过冷度增加先提升后降低。

C07-63

空间环境下炭泡沫材料的劣化机制研究与在轨暴露实验设计

张琴琴、曲俊宇、徐冬、王承冲、符飞燕*

中国人民解放军 61699 部队

炭泡沫材料凭借其轻质高强、耐高低温交变、优异的辐照屏蔽性能及化学稳定性，已成为航天器在热防护以及热管理领域的理想材料。通过调控炭泡沫晶态结构（从无定型到高度有序），可以实现炭泡沫力学/热学性能的宽域调控，满足航天器多场景应用需求。然而，空间极端环境中原子氧剥蚀、极端温变效应等多因素协同作用对炭泡沫微观结构演化和使役性能劣化的机制尚不明确，严重制约其工程应用进程。本团队前期联合中国科学院空间应用工程与技术中心，通过地面模拟揭示了原子氧对炭泡沫的剥蚀遵循“形核-孔洞扩张-致密化-表层剥蚀-再形核”的动态循环机制，发现其与碳骨架表面的相互作用存在化学吸附（形成环氧/羰基过渡态）和物理撞击（原子氧剥蚀导致碳链断裂）双路径反应。鉴于地面模拟难以复现多因素耦合空间环境效应，团队正在申报的第二批“空间站应用与发展工程空间科学与应用项目”已通过函审、会评，进入立项论证阶段，拟采用分子动力学建模、地面模拟和空间暴露实验相结合的手段，重点解决：（1）不同晶态结构炭泡沫多尺度构效关系研究及结构调控；（2）原子氧、极端温变效应等多因素协同作用下的材料劣化机制；（3）研制适用于空间暴露实验的炭泡沫实验单元，完成材料的安全可行性评估；（4）基于在轨暴露实验数据，开展炭泡沫在空间多因素协同作用下的微观结构演变及劣化机制研究。研究成果将建立空间环境-微观结构-使役性能的定量关联模型，为航天器轻质高性能炭泡沫材料的自主设计与寿命预测提供理论依据，对保障我国航天装备长寿命可靠服役具有重大战略意义。

C07-64

通过创建界面金属间化合物调控铝基复合材料弹性模量的研究

张雪、张学习*、钱明芳、耿林

哈尔滨工业大学材料学院

模量是金属和合金的固有参数，通常难以通过常规合金化方法进行调控。提高金属和合金弹性模量(E)的可行策略是引入坚硬、高模量的陶瓷。然而，这些传统的陶瓷增强剂往往与基体合金的界面结合较差且

含量和分布难以控制。采用高能球磨和放电等离子烧结的方法,在纯铝合金中添加了具有延展性的 NiTi 颗粒 (NiTip)。在 SPS 过程中, NiTip 与 Al 之间形成不同含量和类型的金属间化合物,并通过原位可控的界面反应调节了复合材料的模量。复合材料在 530°C 下烧结 10min(530°C-10min),无界面反应产物。560°C-10min 时,反应层厚度为 100~500 nm,由 Al-Ti 和 Al-Ni 化合物组成(原位界面相含量~5.2 vol.%)。在更高的烧结温度下,600°C-10min 复合材料的界面反应层厚度为 3~10 μm (原位界面相含量为 36.8 vol.%)。结果表明,600°C-10min 复合材料的 E 达到 107.21 GPa,比 530°C-10min 复合材料的(67.71 GPa)提高了 58.34%。 E 的增加主要是由于 SPS 烧结的复合材料中引入了界面 Al-Ti 和 Al-Ni 金属间化合物。界面反应还增强了 NiTip 与 Al 基体之间的界面结合强度,有利于复合材料模量的提高。

C07-65

聚合物薄膜的高注量电子辐射效应及光学性能演化研究

朱可欣^{1,2}、马佳玉¹、孙瑞^{1,2}、吴岭南¹、谷红宇¹、宋力昕¹、章俞之^{*1,2}

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所
2. 中国科学院材料与光电研究中心

针对地球同步轨道航天器表面材料面临的电子辐射威胁,本文探究了几种空间常用聚合物薄膜材料:聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚乙烯(PE)以及镀导电氧化铟锡及金属背底的两种复合薄膜(ITO/PI/Al、ITO/F46/Ag),在能量为 50 keV,最大注量为 $2 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ 的真空电子辐照下的电子辐射效应,同时在辐照后分别在原位、真空、空气环境下研究了其光反射性能的变化。SEM 表征发现,辐照后 PI 及 PET 薄膜表面有明显充放电斑点,而表面沉积导电 ITO 的两种复合薄膜呈现局部孔洞,推测可能由于导电薄膜不连续或存在缺陷导致,PE 薄膜由于厚度较大,未发生明显放电损伤;辐照前后 ATR 结果表明 PE 薄膜经辐照后 C-H 键断裂,部分 C=C 断裂并发生氧化反应生成 C=O 键,PET 薄膜经辐照后 C-O-C 键产生较强伸缩振动,其余聚合物薄膜则无明显键合变化,仅峰强有所下降;PE 薄膜辐照后置于空气中检测,410~650 nm 光反射率最高下降约 10%;ITO/PI/Al 薄膜在辐照后原位测得 550~2300 nm 光反射率下降约 4%,置于真空检测 550~750 nm 反射率回复 1%,置于空气检测该波段反射率下降约 5%,而红外波段随环境变化无明显变化;ITO/F46/Ag 薄膜在辐照后原位测得光反射率 490~1000 nm 下降约 5% 1000~2300 nm 下降约 1~2%,置于真空和空气未表现出明显变化。结果表明,在高电子注量下,除 PE 薄膜外几种聚合物薄膜均表现出较好的结构稳定性,ITO/PI/Al 薄膜的光反射性能在辐照后对环境响应较为敏感。

C07-66

Zr-Nb-W 合金的快速凝固组织及力学性能研究

杨一鸣¹、张雪华^{*1}、张雷¹、李育洛¹、李星吾²

1. 西部金属材料股份有限公司
2. 西北有色金属研究院

Zr-Nb-W 合金是活性损伤战斗部中药型罩和破片的理想候选材料之一。然而,当 W 含量较高时,合金中易出现非均匀析出的脆性 W_2Zr 相,显著降低其综合性能,进而影响后续加工工艺及服役可靠性。本研究采用真空铜模吸铸和静电悬浮两种方法对 Zr-16Nb-7W (Zr-1) 和 Zr-18.5Nb-3.5W (Zr-2) 合金进行熔炼,系统研究了快速凝固条件下两种合金的组织演化及力学性能。结果表明,在静电悬浮(深过冷)条件下,Zr-1 和 Zr-2 合金通过单点形核与快速生长机制形成了球形单晶组织;而在铜模吸铸(低过冷)条件下,合金组织转变为等轴多晶结构。随着 W 含量从 7.0wt.% 降至 3.5wt.%, α -Zr 相的体积分数由 2.7% 增至 10.1%,平均晶粒尺寸从 112.14 μm 减小至 56.9 μm ,且晶粒取向分布更加随机。值得注意的是,快速凝固过程对 W_2Zr 脆性相的析出有显著抑制作用。在快速凝固条件下,两种合金中 W_2Zr 相的体积分数显著降低,仅在晶界处存在少量细小析出颗粒。这主要归因于快速凝固过程中溶质截留效应的作用:一方面抑制了元素的偏析,促进了 W 元素在 β -(Zr,Nb)基体中的均匀分布;另一方面降低了冷却过程中 β 相脱溶分解的驱动力,从而有效抑制了 W_2Zr 相的形成。在力学性能方面,静电悬浮条件下 Zr 合金的硬度随着过冷度的增加呈现

先上升后下降的趋势，其中 Zr-1 合金的硬度最高可达 3.6 GPa。此外，在铜模吸铸条件下，两种 Zr 合金均表现出优异的压缩性能：Zr-1 合金的压缩强度超过 800 MPa，Zr-2 合金则达到了 1100 MPa，同时两者的伸长率均大于 25%。

C07-67

多峰(SiCnp+GNS)/Al 复合材料的强塑性匹配改善

张佳佳、张学习*、钱明芳、耿林

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

针对传统铝基复合材料(AMC)的强塑性倒置问题，目前引入混杂增强相以及进行非均匀结构设计这两种方式应用广泛，但混杂增强复合材料中过量的增强体仍会导致材料早期开裂，而非均匀结构中粗晶的存在提高了材料塑性，但也伴随着一定程度的强度损失。本研究将混杂增强与非均质结构相结合，通过精细结构设计获得多峰混杂增强复合材料。通过分区球磨工艺的调整实现不同增强相的特定分布以产生三类晶区：(1)基于高能球磨得到的硬质 SiCnp 富集的纳米晶区；(2)作为过渡的柔性 GNS 均匀分散的亚微米晶区；(3)纯铝粉作为主体的微米晶区。通过对晶区含量的调整，制得增强相含量一致，三种晶区比例分别为 35:35:30 和 40:40:20 的多峰构型(SiCnp+GNS)/Al 复合材料。结果表明，纳米晶区的大小和分布对复合材料的强化效果有显著影响，Com40-40-20 具有较强的晶区间结合，增强应变相容性。与均质(SiCnp+GNS)/Al 相比，Com40-40-20 表现出约 122%的塑性改善和约 12%的强度增加。更精细化的晶区设计为高性能复合材料非均质结构的优化设计提供参考。

C07-68

中国空间站 Nb-Si 合金凝固收缩动力学研究

廖晖、王海鹏*、魏炳波

西北工业大学

空间微重力环境下熔体内部浮力对流几乎消失，表面 Marangoni 对流占流动主导地位，难熔合金的快速凝固过程将产生异于重力环境下的新变化。空间无容器实验发现，难熔 Nb-Si 合金表面出现受过冷度影响的形核位点分布：小过冷下凝固的难熔 Nb-Si 合金表面为多点形核模式，凝固后的合金形状接近球形，在来自两个独立形核点的生长晶粒的交界处出现沟状缩孔，在三个及以上形核点生长晶粒的交点处出现孔状缩孔；大过冷下凝固的难熔 Nb-Si 合金表面为单点或两点形核模式，凝固后的合金偏离球形而出现拉长形宏观形状，表面微观组织出现了共晶相的解耦生长。实验和模拟研究发现，形核点数量受快速凝固热力学控制，而凝固发生后由表面主导的流动则影响了合金表面宏观形貌及微观组织。这些研究将帮助我们更深入地了解重力和微重力下难熔合金的热物理性质和快速凝固规律，有望应用于晶体生长控制和空间原位制造。

C07-69

基于纳米粘土的聚酰亚胺表面抗原子氧改性研究

王佳琪、谷红宇*、孙瑞、郑佳裕、章俞之、宋力昕

中国科学院上海硅酸盐研究所

聚酰亚胺(PI)因其优良的综合性能被广泛应用于卫星、空间站、深空探测器等航天器件。近年来，随着商业航天的发展，对 PI 表面防护的需求日益增大。近地轨道(LEO)的主要环境气体空间原子氧(AO)具有强氧化性，会造成 PI 表面严重侵蚀，使其光学、热学性能大幅降低。为开发出既适应空间环境又能满足航天器性能要求的抗原子氧涂层，本研究通过采用硅烷偶联剂(APTES)改性钙基蒙脱土(Ca-MMT)制得的改性蒙脱土及市售纳米粘土分别制得不同厚度的防护层，并对其原子氧防护性能进行了系统研究。本研究通过表面改性的方法在 PI 薄膜表面分别制备了改性蒙脱土和纳米粘土涂层。结果表明，表面改性的手段成

功保留了 PI 基材的原有结构和纳米粘土自身具有的层状结构。改性蒙脱土和纳米粘土均在改性后的 PI 表面形成了均匀的涂层。其中,以正丁醇作为有机分散液的涂层样品表面更为均匀光滑,层状结构更明显。涂层在抗冷热循环测试和弯折测试中均无明显开裂剥落,表现出良好的热稳定性和柔韧性。经过 $8.7 \times 10^{19} \text{atoms/cm}^2$ 剂量原子氧暴露试验后,涂层具备低至 0.16% 和 0.15% 的质损率,表明其原子氧防护性能优异。本研究为纳米粘土在表面改性领域的应用提供了新思路,其低廉成本也为未来大规模低轨星座部署奠定了材料技术基础。

C07-70

结构调整与应力调控协同提升非晶合金强塑性

袁旭东*、张龙、颜廷毅

中国科学院金属研究所

非晶合金的高强度、高硬度及耐辐照等性能使其展现出作为空间材料的巨大潜力。但长程无序的结构决定了非晶合金的塑性变形被限制在高度局域化的剪切带中,导致其表现出脆性缺陷,这严重限制了其作为关键空间结构材料的应用。本工作通过分子动力学模拟方法对比探究了结构调整与应力状态调控对 Cu₆₄Zr₃₆ 非晶合金力学性能的影响规律,从微观尺度探究了微观结构和应力状态对非晶合金剪切带行为的影响机理。研究表明,残余压应力的存在能抑制剪切带的迅速扩展从而提高非晶合金的拉伸屈服强度;而不均匀分布的残余应力能够在拉伸变形过程中促进多重剪切带的形成,降低应变局部化程度从而增强其塑性。本工作的研究证实,通过应力状态和微观结构的协同调控可以实现非晶合金拉伸强度与塑性的同时提高。这为提高非晶合金的综合力学性能,同时拓展其在空间结构材料领域的应用提供了新思路。

C07-71

快速凝固 Zr 基非晶-晶体复材的相组成演变与力学性能研究

黎舸鑫、常健、王海鹏*

西北工业大学

铜模吸铸和电磁悬浮无容器技术在快速凝固和制备高性能先进材料方面具有重要作用。采用铜模吸铸制备了直径 5mm 的 Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ 块体非晶合金,并通过调控成分进一步制备了 Zr₄₉Cu₄₄Al₇ 和 Zr₄₉Cu₄₆Al₅ 合金,研究了成分对非晶形成能力及冷却速率对凝固组织变化的影响。实现了 B2-ZrCu 纳米相及 B19'-ZrCu 相在非晶基相的原位析出,室温抗拉强度从 410MPa 提升至 1395MPa。同时,采用电磁悬浮无容器处理技术制备了质量为 1.5g 及 15g 的 Zr₅₀Cu₄₀Al₁₀ 非晶及其复合材料,利用 EBSD 技术探究了其凝固路径及相组成,发现了在 1.5g 样品非晶相中存在软硬两相的化学不均匀区,而在 15g 样品中首先在非晶基相中析出微米级富 Al B2-ZrCu 亚稳相,随后出现非晶相→B19'-ZrCu 相的转变,剩余液相生成共晶组织: ZrCu+Zr₂Cu。研究表明,Al 元素提高有助于提升合金非晶形成能力及促进亚稳 B2 相的稳定析出;非晶基相中弥散 B2 相及 B19' 晶相能够提升非晶合金显微硬度,有效改善非晶合金室温脆性。

C07-72

三元难熔钼合金静电悬浮深过冷快速凝固研究

王彦博、王海鹏*

西北工业大学

对三元亚共晶难熔钼合金进行了静电悬浮深过冷快速凝固实验,分别在小、中、大过冷度范围内获得了数个不同表面形核方式的凝固合金样品。降温过程以辐射散热为主,三元难熔钼合金液滴释放潜热后凝固。在小中过冷度下,合金液滴表面多点形核(形核数 $n > 2$),而在大过冷度下以单点或两点形核方式凝固。小过冷下合金样品表面出现从形核点以辐射状优先生长的(Nb)/Nb₅Si₃ 耦合共晶组织,剩余液相生长出发达的自由枝晶,在枝晶间隙发现细密的共晶组织。中过冷下合金样品表面出现受热流方向影响的平行于

表面的共晶组织。而在大过冷，初生(Nb)择优生长后伴随垂直于合金表面的 Nb_3Si 的生成，而后由于 Zr 元素的添加促使了完全共析转变 $\text{Nb}_3\text{Si} \rightarrow (\text{Nb})/\text{Nb}_5\text{Si}_3$ 的完成，使得(Nb)枝晶碎断为单臂枝晶，组织中无剩余 Nb_3Si 相。由于原本凝固的共晶组织中小平面相发生了共析反应，最终得到了凝固组织为共析组织与初生相共同形成的共晶合金。

C07-73

难熔 Nb-Si-Zr 合金静电悬浮液滴的传热过程研究

高嘉鑫、胡亮、王海鹏*

西北工业大学物理科学与技术学院

Nb 基合金其优异的物理化学性质使其成为新一代航空发动机叶片的潜在应用材料，深入理解 Nb 基合金液态物理化学性质以及凝固过程中的传热规律有助于实现微观组织的主动调控，进而指导新一代高性能 Nb 基合金的开发。本研究选取典型的 Nb-Si-Zr 三元难熔合金为研究对象，通过经典悬浮实验与多物理场耦合模拟系统揭示了液态合金的热物理性质与传热演化规律。基于静电悬浮技术实现了液态合金熔体的无容器悬浮状态，突破传统凝固方法的过冷极限获得高达 $0.20T_L$ ($\Delta T_{\max} = 445 \text{ K}$) 的过冷度，并精确测定了 Nb-Si-Zr 三元合金的液态密度、热膨胀系数、热辐比、表面张力以及黏度等热物理性质。此外，通过有限元数值模拟阐明熔体表面与内部的温度梯度分布特征，进一步研究了合金熔体传热行为的非均匀性与动态演化特征。本研究不仅为液态难熔合金凝固工艺优化提供关键热物性数据参数，同时在一定程度上揭示了静电悬浮液滴的传热过程。

C07-74

深过冷液态 Ti-Al-Nb 合金初生相的选择与快速凝固

宋立金、黎舸鑫、常健*

西北工业大学

采用电磁悬浮技术研究了液态 $\text{Ti}_{58}\text{Al}_{40}\text{Nb}_2$ 合金的过冷能力、初生相选择、凝固组织特征及其显微力学性能演变规律。结果表明：在电磁悬浮无容器环境中，通过惰性气体强制冷却该合金熔体的过冷度可达 312 K 。深过冷条件下合金凝固过程中发生了 β 相与 α 相的初生相竞争形核。在小过冷条件下 β 相领先形核生长；而当过冷度超过临界值时， α 相领先形核并作为初生相生长，且两者枝晶生长界面发生形态转变。XRD 和 TEM 分析发现合金凝固组织由 α 相和 α_2 相构成。小过冷条件下，由初生 β 相经固态相变形成的 α/α_2 两相组织保留了初生 β 相的粗大枝晶形貌；随过冷度增大，组织特征由粗大枝晶转变为等轴晶形貌。合金显微硬度分析表明， α_2 相的硬度随过冷度变化幅度较小，而 α 相显微硬度随过冷度增大呈现显著递增趋势。最大过冷条件下获得的初生 α 相显微硬度较初生 β 相转变形成的 α 相显微硬度显著提升，这表明 α 相以初生相形式直接凝固有效提升合金的力学性能。

墙报

C07-P01

中国空间站难熔钛合金快速凝固表面褶皱收缩研究

刘丁楠、王海鹏、魏炳波*

西北工业大学

本研究在中国空间站进行了难熔钛合金无容器快速凝固实验，在地面重力十万分之一的微重力环境下研究了表面褶皱收缩行为。实验中的钛合金液滴经历了超过 1800K 的极高过热度，随后实现了 307K 的过冷度，表现出强烈的热力学亚稳性。揭示了这种合金在微重力与极端亚稳凝固耦合作用下的球形表面变形结构。此外，通过对亚稳快速凝固的主动控制，微重力下的褶皱收缩动力学促进了表面单相结构以及具

有应力诱导马氏体相变的 B2 结构的形成。这些发现进一步揭示了微重力凝固过程中的表面变形行为。

C07-P02

中国空间站微重力环境下高温合金的热历史与相变模拟研究

陈彦莉、王海鹏*

西北工业大学

微重力环境为揭示高温合金的热传导与相变行为提供了独特平台，但测温精度与时空分辨率的限制使得实验热历史难以完整获取。本研究基于中国空间站静电悬浮实验，采用有限元方法建立了温度依赖物性下的热传导—相变耦合模型，系统模拟了高温合金从加热、熔化到再凝固的全过程。模型中引入 Marangoni 对流与自然对流机制，揭示了流场对热传输与相变行为的影响特征。同时，我们结合 TMK 准则和共晶相场模型，预测了合金的生长速率及组织演化规律。该研究为微重力实验数据的解释与材料组织调控提供了重要理论支持。

C07-P03

中国空间站 Zr-V 合金共晶生长动力学研究

李浩哲、王海鹏*、魏炳波

西北工业大学

通过中国空间站无容器材料实验柜对 Zr-V 合金进行了静电悬浮快速凝固实验，探究了合金的热物理性质、共晶生长动力学和显微力学性能。对 Zr-V 合金在过冷液态的热物性进行了测量。Zr-V 合金的剖面微观组织由三个不同方向的共晶胞构成，胞内呈现出独特的波纹状结构。共晶胞外分布着层片共晶，通过 TMK 共晶生长模型计算了合金的共晶生长速度。与地面具有相似过冷度的合金对比，在微重力条件下凝固的 Zr-V 合金凭借着非规则共晶和更细的层片共晶，力学性能得到提升。本研究有助于进一步了解在空间环境凝固的共晶合金中新型微观结构的形成和力学性能变化。

C07-P04

MoS₂ 固体润滑薄膜材料空间站在轨暴露实验研究进展

何军*、王德生、孙嘉奕

中国科学院兰州化学物理研究所

固体润滑材料对于航天器的高效、可靠和稳定运行至关重要。溅射二硫化钼（MoS₂）薄膜因其在空间环境下的低摩擦特性而被广泛应用于太阳能电池驱动机构、天线展开组件等关键空间运动部件。据统计，超过 63% 的在轨航天器运行于近地轨道（LEO，200-1000 km），然而，长期处于 LEO 环境的固体润滑薄膜材料面临高真空、热循环、原子氧（AO）侵蚀、质子辐照甚至微重力等因素的综合作用，这些极端条件可能导致润滑提前失效与机构功能故障。

为了探究 MoS₂ 固体润滑薄膜材料在长期 LEO 暴露下的结构与性能演变，利用中国空间站（CSS）搭载的空间环境暴露装置（SEED），对 MoS₂-Au 复合薄膜进行了为期 1 年的真实近地轨道环境暴露实验（迎风面），系统表征了暴露前后薄膜的成分、形貌、物相结构及摩擦学性能，推演了薄膜性能退化的机理。研究结果表明，在经过 1 年的暴露试之后，薄膜表面生成了约 60 nm 的 MoO₃ 氧化层（约占总膜厚的 5%），且具有一定的结晶性，但薄膜内部仍保留了原始纳米复合结构。暴露试验之后薄膜的摩擦系数增加了 2.5 倍（从 0.014 ± 0.003 增加至 0.035 ± 0.005 ）；摩擦寿命缩短了 70%（从 4.98×10^5 r 降低至 1.52×10^5 r）。利用密度泛函理论（DFT）模拟原子尺度的氧化动力学过程发现，MoS₂ 中的硫空位（结合能 - 7.73 eV）对原子氧（AO，入射能量 ~5 eV）具有强吸附作用，长时间的空间暴露驱动氧化过程从单点取代逐步过渡到多点取代。通过第一性原理分子动力学（AIMD）计算发现，AO 对于 MoS₂ 的（002）晶面所暴露的 S 原子发生先剥离后氧化的过程，引起 MoS₂ 结构的畸变和坍塌，最终转化为硬质相 MoO₃。

同时,利用飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)解析了薄膜内部的物质组成,推演出 LEO 环境中原子氧、质子和微重力对 MoS₂ 薄膜的协同侵蚀机理。研究结果有望为改进现有技术与开发新一代空间润滑薄膜材料提供关键依据。

C07-P05

微重力环境下深紫外非线性光学晶体 KBe₂BO₃F₂的生长研究

刘丽娟*、吴桐、王晓洋

中国科学院理化技术研究所

KBBF 晶体是目前唯一实用化的深紫外非线性光学晶体,在深紫外波段具有重要的应用前景。利用 KBBF-PCD 产生的毫瓦级(mW)连续波 193 nm 激光和脉冲式 177 nm 激光已成功应用于深紫外光刻机的检测光源以及超高分辨率光电子能谱仪等先进科学仪器上。然而,由于其严重的层状生长习性,KBBF 晶体生长仍面临很大挑战,目前只能通过自发成核生长,无法引入籽晶生长,原因不详。

本研究首次在中国空间站上开展高温助溶剂法 KBBF 晶体的生长研究,以揭示重力对自发成核生长的影响。KBBF 及助溶剂体系密封于黄金管中,再封装于标准样品盒中,2024 年 11 月 KBBF 样品盒随天舟 8 号载人航天货运飞船顺利上轨,2025 年 1 月航天员在空间站利用高温材料科学实验柜开展了为期 6 天的生长实验,2025 年 4 月 30 日 KBBF 样品盒随神州 19 号载人飞船返回地面。在微重力环境下,首次成功获得了毫米级 KBBF 晶体。本工作主要是对天地生长装置开展温场仿真模拟,研究重力/微重力条件下温度变化趋势,并对空间 KBBF 样品开展初步研究,粉末 XRD 表明获得了 KBBF 纯相,在显微镜下观察了结晶形貌,分析了不同坩埚位置结晶差异,并与地面样品进行对比。

C07-P06

空间微重力生长组分均匀的 InAsSb 单晶

郑怀文、黄吉东、尹志岗、吴金良、张兴旺*

中国科学院半导体研究所

多元半导体合金生长一直是空间微重力材料科学关注的重点问题之一。微重力条件下浮力对流近乎消失,有助于实现准扩散生长,为组分均匀多元半导体合金的制备提供了可能。尽管此前基于国际空间站、中国实践十号科学卫星等平台开展的微重力生长实现了组分均匀 SiGe、InGaSb 晶体的制备,但所得材料的主体均由多晶构成,未能获取大尺寸单晶。特别是对于 InGaSb、InAsSb、InGaAs 等由大失配二元化合物半导体构成的合金体系,在对应的二元化合物半导体母相衬底上进行生长时,只有合金组分偏离衬底组分幅度小于 5 mol%时,才有可能得到单晶样品[1]。

在本研究中,我们利用垂直梯度凝固法,基于中国空间站科学实验平台,首次在 InAs 籽晶上得到了 InAsSb 单晶样品[2]。而且 InAsSb 中 Sb 含量达到 6.5 mol%,打破了大失配体系合金组分小于 5 mol%的上限。InAsSb 样品直径约 1 cm,晶体与籽晶界面光滑且明锐,界面质量超过国际空间站同类样品。电子探针 X 射线微区分析表明,空间样品具有更好的组分均匀性,其径向、轴向组分起伏均小于 $\pm 0.5\%$ 。高分辨透射电镜表征证实,我们得到的 InAsSb 空间样品为(111)取向生长的单晶。同时,InAsSb 晶体与 InAs 籽晶界面尖锐且光滑,界面质量远优于地基对比样品。InAsSb 空间样品 Raman 峰半高宽约 8 cm^{-1} ,与 InAs 籽晶相当,说明空间微重力生长的 InAsSb 样品具有较高的晶体质量。我们得到的 InAsSb 样品对应的吸收边约为 4 μm ,位于中波红外区域,在红外探测器领域具有一定应用前景。空间得到的晶体生长方法与规律可拓展至其它多元半导体合金材料体系,对于开发相应材料地基制备工艺具有重要指导意义。

C07-P07

Freezing Shrinkage Dynamics and Surface Dendritic/Eutectic Growth of Floating Refractory Nb-Si Alloy in Outer Space

Hui Liao, Haipeng Wang*, Bingbo Wei
Northwestern Polytechnical University

The freezing shrinkage and dendritic/eutectic growth are of great importance for various alloys solidified from high-temperature liquids to solids since they dominate microstructure patterns and follow-up processing. However, the microgravity freezing shrinkage dynamics is scarcely explored on the ground as it is hard to suppress the strong natural convection inside liquid alloys. Here, A series of in-orbit solidification experiments is conducted aboard the China Space Station (CSS) with a long-term stable 10^{-5} g microgravity condition. The microgravity solidification process leads to freezing shrinkage cavities and distinctive surface dendritic/eutectic microstructure patterns. The combined effects of shrinkage dynamics and liquid surface flow in outer space result in the dendrites growing not only along the tangential direction but also along the normal direction to the droplet surface. A decoupling effect was induced by the microgravity and containerless states aboard space station, which led to the independent dendrite growth of two eutectic phases within extremely undercooled liquid Nb-Si refractory alloy. These findings uncover novel dendritic and eutectic growth patterns under microgravity and may be applied to in-situ space manufacturing and controlled growth of crystals.

C07-P08

三元难熔钼合金静电悬浮深过冷快速凝固研究

王彦博, 王海鹏*
西北工业大学

静电悬浮条件下的三元亚共晶难熔钼合金液滴在不同过冷度范围内的凝固方式不同、凝固的组织形貌存在差异显著。在小、中、大过冷度下难熔钼合金亚稳液滴以不同表面形核方式开始形核并进行液固相变, 统计分析了该合金液固界面迁移速率及形核模式。对不同过冷度凝固合金样品表面凝固组织形貌及相组成进行了表征分析, 总结对比了该难熔合金在不同过冷度下(Nb, Zr)及(Nb, Zr)₅Si₃相的共晶、共析组织形成的规律和现象。解释了 Zr 元素的添加对难熔钼硅合金 Nb₃Si→(Nb)/Nb₅Si₃ 共析转变的促进作用以及固溶体相和小平面相晶体生长的择优取向关系。

C07-P09

难熔 Nb-Si-Zr 合金静电悬浮液滴的热物理性质研究

高嘉鑫, 胡亮, 王海鹏*
西北工业大学

难熔 Nb 基合金优异的物化性质使其成为新一代航空发动机叶片的潜在材料, 深入探究其液态热物理性质及凝固传热规律, 对实现微观组织调控, 进而开发新一代高性能 Nb 基合金至关重要。对典型 Nb-Si-Zr 三元难熔合金进行静电悬浮实验与多物理场模拟, 系统研究了其液态热物理性质与传热规律。实验中合金熔体最大过冷度可达 445 K(0.20 T_L), 并精确测定其密度、热膨胀系数、热辐比、表面张力和黏度等液态热物理性质。同时, 通过有限元模拟, 研究了液滴在过热 100 K 至过冷 450 K 范围内纯传热与传热-流动耦合两种过程的温度场、温度梯度、冷却速率及流速分布演化。模拟发现: 降温时温度场呈同心圆分布; 单点瞬时最大冷速超 330 K/s, 平均冷速误差小; 显著冷却阶段集中于激光关闭后的 0.4 与 0.8 秒内; 耦合模型中流速呈现轴向分布趋势。

C07-P10

快速凝固 Zr 基非晶-晶体复材的相组成演变与力学性能研究

黎舸鑫 常健 王海鹏*

西北工业大学

采用铜模吸铸制备了直径 5mm 的 $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ 块体非晶合金, 并通过调控成分进一步制备了 $\text{Zr}_{49}\text{Cu}_{44}\text{Al}_7$ 和 $\text{Zr}_{49}\text{Cu}_{46}\text{Al}_5$ 合金, 研究了成分对非晶形成能力及冷却速率对凝固组织变化的影响。实现了 B2-ZrCu 纳米相及 B19'-ZrCu 相在非晶基相的原位析出, 室温抗压及抗拉强度均有大幅提升。采用电磁悬浮无容器处理技术制备了质量为 1.5g 及 15g 的 $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ 非晶及其复合材料, 探究了其凝固路径及相组成, 发现了在 1.5g 样品非晶相中存在软硬两相的化学不均匀区, 而在 15g 样品中存在三种液固相变过程: 首先在非晶基相中析出微米级富 Al B2-ZrCu 亚稳相, 随后出现非晶相 $\rightarrow$ B19'-ZrCu 相的转变, 剩余液相生成 ZrCu+Zr₂Cu 共晶组织。研究表明, 固溶 Al 元素含量提升会导致 B2 相形核率高于 B19' 相从而优先析出; 非晶基相中弥散 B2 相及 B19' 晶相能够显著对非晶合金增强增韧, 有效改善非晶合金室温脆性。

C07-P11

液态 ZrVFe 合金的静电悬浮热物性测量及二阶振荡研究

马德志、王海鹏*

西北工业大学

本研究运用地面静电悬浮技术进行了液态 ZrVFe 合金与 Zr 金属的热物性测算与高温二阶轴对称振荡研究, 获得了液态密度、表面张力数据、粘性等热物理性质, 揭示了密度相机曝光度、图像边缘检测算法对密度测量的影响, 发现了液滴的振荡频率与振幅为负相关关系, 且振荡衰减阶段的振荡频率高于激励阶段, 结合实验数据与数值模拟研究, 发现了液滴振荡实验中外场作用力、内部对流、PID 控制信号等因素对振幅和频率会产生额外影响。

仅发表论文

C07-PO01

中国空间站材料舱外暴露实验装置利用效能评估

郭玉雪、钟红恩*、马 萍、李 雨、吕宏宇

中国科学院空间应用工程与技术中心

空间站材料舱外暴露实验装置可用于开展空间应用材料(润滑、热控、膜系镀层、形状记忆、功能涂层、聚合物、复合材料等)的空间损伤和使役性能实验以及微重力和真空等环境下的空间润滑材料摩擦学实验。自 2022 年 11 月随天舟五号货运飞船发射后在轨共计开展了三批次的舱外暴露科学实验, 取得了一系列丰富的研究成果。为提高材料舱外暴露实验装置的使用效率, 高效利用中国空间站在轨实验资源, 建立了一种评估材料舱外暴露实验装置在轨利用效能的评估方法。采用使用面积和项目数量相结合的方法进行评估, 计算得到材料舱外暴露实验装置三批次在轨利用效能分别为 96.9%、70.3% 和 78.1%, 有效地支持了舱外材料暴露实验。经分析, 影响材料舱外暴露实验装置在轨利用效能的主要因素为装置进出舱约束、航天员操作约束和上下行资源约束, 针对这些影响因素提出了改进建议, 为提高材料舱外暴露实验装置的利用效能提供参考。

C07-PO02

纳米氧化铁的化学沉淀法空间合成研究

毛宇¹、刘吉梓²、顾宁^{*2}

1. 南京鼓楼医院
2. 南京大学

氧化铁纳米颗粒（IONPs）具有独特的理化特性、生物学效应及良好的生物相容性，在肿瘤诊断与治疗、磁共振造影、再生医学等生物医学领域具有广泛应用前景，已经被美国食品药品监督管理局（FDA）批准用于临床。地面利用化学沉淀法合成 IONPs，离子、中间相、颗粒产物等由于质量不同，受重力驱动的沉降速度不同，导致反应液从上至下呈现明显的化学成分浓度梯度、pH 值梯度等。不同的微环境会产生不同的反应路径，导致同一时间多种反应路径并存，IONPs 的质控受到重力严重挑战。通常，在地面采用搅拌和超声等混合手段缓解这种成分梯度的影响，但同时也改变了反应液体的流场，复杂的液体对流同样会影响 IONPs 的化学沉淀反应。

空间站的微重力环境将为 IONPs 的化学沉淀法合成质控提供新的机遇。在微重力环境中，无需引入外场即可减轻甚至消除反应体系中的宏观环境梯度，在静置状态下实现反应条件（如 pH 值、离子浓度等）的精确控制，达到沿单一路径进行反应的目的，揭示 IONPs 形成过程的关键作用力和影响因素。同时，在微重力条件下，分子间作用力、静电作用力效果得到凸显，可能形成不同于地面制备 IONPs 的新构型。