



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

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

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

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.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

C07. 空间材料科学技术-01

我国空间站空间材料科学实验进展、经验与展望

钟红恩*、马萍、余建定、刘洋、李雨

中国科学院空间应用工程与技术中心

随着空间站国家太空实验室建成运行，空间应用系统规划开展了数十项舱内外前沿材料科学研究，涉及新型高性能合金、高端制造材料、功能晶体材料等国家急需重大应用背景材料，获得了大量的科学数据，进行了数百个样品，取得了多项原创性科技成果，应用于盾构机、核电等重点任务，发挥了显著效益。同时，新近下行的样品研究正在开展过程中，预计后续产生很多新的高水平成果；大量新的研究项目正在征集、培育，TZ-8 批次项目正在开展上天前准备。本文将介绍空间站材料研究所取得的主要进展，总结前期项目实施经验，对后续空间材料领域工作进行规划和展望。

C07. 空间材料科学技术-02

重型燃气轮机叶片单晶的地面和空间科学实验

余建定^{*1,2}、贺欢^{*1}、方婧红¹、倪津崎¹、潘秀红¹、刘学超¹

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

重型燃气轮机的高温叶片合金研究及其叶片制备作为国家重大专项，是发展我国国民经济的重要战略方针之一。透平叶片是重型燃气轮机的核心部件，其几何尺寸、冶金工艺、力学性能等指标要求极高。

要掌握单晶叶片的制备工艺，不仅需要弄清单晶透平叶片的凝固机理，探明叶片铸造过程中在不同温度条件下的晶粒生长及缺陷形成规律，揭示晶体取向偏离的原因，消除杂晶、断晶、横向晶界等缺陷，从而获得高质量的单晶叶片，还需要通过高温合金热物性参数对铸造工艺进行数值模拟计算。高精度浇铸时的注模尺寸调控需要依据密度和热膨胀系数进行计算，复杂形状叶片浇铸时的浇铸温度和速度调控需要依据表面张力和粘性系数进行计算。

利用无容器技术和高温实时凝固观察技术，在地面对高温叶片合金的凝固过程中的生长组织形态、凝固速度以及密度、表面张力和粘度等热物性进行了研究。同时，进一步利用空间站无容器实验柜进行了空间科学实验，对微重力环境下的凝固过程和热物性的变化进行了天地科学实验对比，获得了一系列有价值的科学实验结果。这些结果对改善地面高温叶片合金的制备工艺具有一定的指导意义。

C07. 空间材料科学技术-03

重力/微重力下功能晶体生长与界面研究进展

刘学超^{*1}、潘秀红¹、金敏²、汤美波¹、余建定¹、陈锟¹、邓伟杰¹、贺欢¹、方婧红¹、倪津崎¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

2. 上海电机学院

中国空间站梦天实验舱高温材料科学实验柜（高温材料柜）是我国自主设计研制的空间重大科学实验装置，中国科学院上海硅酸盐所负责研制了高温材料柜在轨飞行产品和地面镜像装置，为重力/微重力下开展功能晶体研究提供了重要平台支撑。本文主要介绍高温材料柜对功能晶体研究的支持能力，以及我国人工晶体研究进展，重点总结了重力/微重力下功能晶体生长和界面研究进展。

高温材料柜由高温炉、批量样品管理、电控和 X 射线透射成像四个子系统组成，并具有旋转磁场、主动冷却、微重力测量、物性原位测量等附加功能。高温炉子系统包括 I 型高温炉和 II 型高温炉两个可在轨

更换的模块, I 型高温炉最高温度 1200°C, II 型高温炉最高温度 1600°C, 通过多段加热炉组合可以提供等温、梯度、区熔温场, 温度稳定度优于 $\pm 0.25^\circ\text{C}$; 高温炉移动速度 0.5 - 200mm/h; 样品最大提拉速度 0 - 2mm/s; 磁场强度 0~5mT, 旋转频率 5~400Hz; X 射线透射成像最高分辨率 5 μm , 最大成像速度 20fps。高温材料柜支持在太空中开展空间多种功能晶体生长和界面实时观察研究, 包括半导体晶体、闪烁晶体、激光晶体、非线性光学晶体、铁电压电晶体等, 结合高温材料柜地面镜像系统和 X 射线透射成像装置, 分析总结包括前期搭载神舟飞船两工位晶体生长炉、多工位晶体炉、天宫二号综合材料实验装置等开展晶体生长实验, 重点研究了 CsI、NaI、CLYC、InSe、CdZnTe、BiFeO₃、InGaSb、Bi₁₂SiO₂₀ 等多种功能晶体生长, 系统分析总结我国在重力/微重力下功能晶体研究进展, 并为下一步发展提出建议。

C07. 空间材料科学技术-04

Al-3.5 wt.%Si 和 Al-10 wt.%Cu 合金凝固过程中重力效应的对比研究

罗兴宏*^{1,2}、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 50m 长落管开展了 Al-3.5 wt.%Si 和 Al-10 wt.%Cu 亚共晶合金重力及微重力条件下定向凝固实验。采用金相显微镜 (OM) 观察了合金凝固组织, 并用图像分析软件统计了初生相枝晶间距 (DAS)、共晶含量和晶粒尺寸。使用扫描电镜能谱 (SEM-EDS) 测量了凝固组织不同位置处溶质元素的宏观分布以及在初生相枝晶和共晶中的微观分布情况。结果显示, Al-3.5 wt.%Si 合金凝固形态主要为柱状枝晶, Al-10 wt.%Cu 合金凝固形态主要为等轴枝晶。两种合金的 DAS 和共晶含量在重力、微重力条件下沿轴向和径向均表现出不同的分布规律。相较于微重力条件, 重力条件下 Al-3.5 wt.%Si 和 Al-10 wt.%Cu 合金的平均 DAS 分别增加约 16 %和 10 %, 平均共晶含量分别增高约 13 %和 10 %; 另外, Al-10 wt.%Cu 合金的平均晶粒尺寸增大约 11 %。重力条件下, Si 元素向样品中心和上部偏聚, Cu 元素向样品中心和下部偏聚, 微观偏析程度也相应加剧; 与之相比, 微重力条件下溶质元素的分布较为均匀。结果表明, 溶质元素密度以及凝固形态的不同使得 Al-3.5 wt.%Si 和 Al-10 wt.%Cu 合金凝固过程中展现出不同的重力效应, 导致 Si 和 Cu 元素表现出不同的宏观偏析行为; 重力条件下, 溶质元素的径向向偏析主要受温度梯度驱动的热对流影响, 而轴向偏析则是温度梯度驱动的热对流、浓度梯度驱动的溶质对流和浮力运动共同作用的结果; 而 DAS 和共晶含量的变化除了与热对流和溶质对流有关之外, 还与枝晶生长方向以及凝固组织形态密切相关。

C07. 空间材料科学技术-05

铁基磁致伸缩合金材料的空间实验研究

杨森*、王宇、周超、徐鼎石
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. 空间材料科学技术-06

超润滑材料的设计与空间验证

王道爱*¹、张立强²、周峰¹、刘维民¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所
2. 烟台先进材料与绿色制造山东省实验室

超润滑是指摩擦系数为 0.001 量级或者更低的超低摩擦状态，是近些年来提出的一种能够极大突破现有材料润滑性能极限的新概念技术，理论上为零摩擦，工程实践上摩擦系数可低至 0.01 以下即 10⁻³ 量级，较常规固体润滑材料 0.1 左右的摩擦系数低 1-2 个数量级。超润滑界面的构筑在高端装备、硬盘技术、太空探测、精密制造等领域中存在巨大应用潜力，发展长效稳定的超润滑技术一直是摩擦学领域的研究重点与难点。特别是对空间运动部件而言，如果超润滑材料和技术能够获得应用，将对其运行可靠性将产生革命性的进步，有助于实现航天器 30 年的寿命要求。本报告概述了超润滑技术的发展现状与存在挑战，重点介绍几种本研究团队设计开发的可实现微观超滑和宏观超滑的润滑材料与设计方法，以及筛选的部分超润滑材料的空间舱外验证情况，在科学上揭示其真实空间环境下润滑过程中的演变和损伤机制，并为实现我国自主可控的空间超润滑与超低磨损材料体系的设计制备提供理论与技术参考。

C07. 空间材料科学技术-07

高强度、高隔热、高柔性纤维复合气凝胶材料

成艳华*

东华大学材料科学与工程学院

随着航空航天技术的发展，隔热材料应用环境更加复杂多变。如面向以火星为代表的深空探测，传统空间用多层隔热组件 MLI (多层镀铝聚酯薄膜)在火星稀薄大气环境中 (0.636 kPa; -110 °C ~ 35 °C)，由于气体传导和对流换热显著，其隔热性能将大幅降低，不能满足实际使用需求。纳米纤维复合气凝胶具有介孔结构特征，孔径尺寸小于空气分子平均自由程，消除了热对流的影响，且显著降低气体热传导，结合其高回弹高柔韧性特征，有望替代现有 MLI 隔热组件应用于火星探测航天服高效隔热层。团队基于“分子杂化制备-介观杂化组装-宏观杂化集成”多层级全链条杂化设计，开发的新一代功能纤维素纳米纤维复合气凝胶具有高绝热性、高回弹、高柔韧、低密度和超疏水等特性，有望应用于航空航天与国防军工领域。

C07. 空间材料科学技术-08

超常氧化物光功能玻璃与陶瓷的设计与无容器凝固制备

李建强*

北京科技大学

5G、移动终端、虚拟现实等战略性新兴产业的高速发展迫切需要新一代高性能信息显示玻璃和陶瓷材料。目前，大多数氧化物玻璃中都含有大量的玻璃网络形成体，如 SiO₂、B₂O₃、P₂O₅ 等，这些氧化物保证了氧化物熔体的玻璃化，但限制了玻璃力学性能和光学性能的进一步提高。无容器凝固技术能够有效地抑制容器-熔体界面的异相成核，从而实现无传统玻璃网络形成体熔体的玻璃化。本文综述了本课题组利用无容器凝固工艺制备的一系列新型氧化物玻璃的最新进展。首先实现了无网络形成体氧化物熔体的玻璃化，获得了系列超高折射率玻璃材料 (La₂O₃-Nb₂O₅、La₂O₃-TiO₂、Al₂O₃-Y₂O₃ 等)，最高折射率达到 2.35，接近氧化物折射率理论极限，在此基础上，进一步研究了稀土离子掺杂对高折射率玻璃上转换发光性能的影响。同时结合高熵材料的成分设计理念与 Makishima & Mackenzie 原理，首次制备出具有优异力学性能的多组元氧化物玻璃 R₂O₃-Y₂O₃-TiO₂-ZrO₂-Al₂O₃ (R=La, Sm, Gd)，部分力学性能 (硬度 12.58GPa、模量 177.9GPa、断裂韧性 1.52MPa·m^{0.5})，超过美国 Corning 公司的手机盖板玻璃记录，并成功入选中国载人空间站无容器科学实验样品。此外，提出了利用非晶在过冷液相区的超塑性进行中低温快速烧结制备玻璃的新策略，系统研究了烧结工艺条件和机理，成功获得了一系列大尺寸透明玻璃 (La₂O₃-TiO₂-SiO₂

等), 为无容器凝固材料产品的实用化奠定了基础。上述新型氧化物玻璃材料所表现出的优异的光学和力学性能, 有望推动技术相关材料在 VR/AR 眼镜、汽车玻璃、液晶显示器及智能设备等领域中应用的发展。

C07. 空间材料科学技术-09

空间微重力条件下初生相颗粒/第二相液滴的运动特征与迁移机理分析

解文军*

西北工业大学

空间微重力条件下多元复相合金的凝固过程中, 初生固相颗粒和第二相液滴在母液相中都有向热端迁移的趋势。本文基于热泳理论和马兰戈尼迁移理论, 并通过数值模拟, 对实验过程中初生相颗粒/第二相液滴的运动特征进行分析, 深入揭示微重力条件下影响颗粒/液滴迁移和宏观相分离的物理机制。

C07. 空间材料科学技术-10

相分离合金凝固过程及微重力的影响研究

江鸿翔^{1,2}, 赵九洲^{1,2*}, 张丽丽^{1,2}, 何杰^{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

相分离合金十分广泛, 若能采用合适的方法将其制备成特定结构的复合材料, 如第二相弥散分布在基体中的复合材料, 则其中许多相分离合金会表现出特殊的物理性能和机械性能, 具有重要的工业用途。然而, 相分离合金熔体在冷却过程中会发生液-液相变, 该过程十分复杂, 在地面重力条件下凝固时, 熔体内存在强烈的重力对流, 这不仅会导致两液相的迅速分离, 而且使各种影响因素的作用相互混淆, 使得在地面重力条件下研究相分离合金凝固组织形成机理极为困难。空间微重力条件能弱化或消除合金熔体内重力导致的对流, 非常有利于揭示相分离合金液-液相变相偏析机理和凝固行为。本文首先在地面重力条件下研究了相分离合金凝固组织演变行为; 进而, 优化设计了空间实验的合金成分及工艺, 并利用天宫二号和中国空间站开展了微重力条件相分离合金凝固实验; 建立了相分离合金凝固组织演变模型, 实验与模拟相结合, 揭示了相分离合金凝固过程及微重力的影响。

C07. 空间材料科学技术-11

镁合金低温变形行为及其强韧化机制研究

李扬欣*

上海交通大学

镁合金作为最轻的金属结构材料在实际服役中会面临较多低温应用场景, 如深空探测航天器、破冰船和极寒地区车辆等。为了避免镁合金在低温服役过程因低温脆性而造成材料断裂失效, 急需发掘低温下强塑匹配性良好的高强镁合金并研究其变形机制, 为镁合金低温环境的应用推广提供理论和实验支撑。Mg-Gd-Y 系合金是一种典型的析出强化镁合金, 但引入大量的析出相通常会降低合金的塑性, 这种强塑失配性会随温度降低而恶化。我们近期的研究发现: 峰时效态 Mg-7.37Gd-3.1Y-0.27Zr 合金在室温 (RT)、-70 °C 和 -196 °C 拉伸时, 延伸率随温度降低先增加后下降, 并在 -70 °C 时达到最大值。该合金在 -70 °C 温度下 CRSS $\langle c+a \rangle$ / CRSS basal $\langle a \rangle$ 比值最小, 可激活高密度的 $\langle c+a \rangle$ 位错协调 c 方向变形, 大量析出相在 -70 °C 下被剪切提高了位错滑移平均自由程进一步协调变形。这项工作表明, 引入高密度位错和可剪切析出相可以在低温下实现高强镁合金的强塑协同提升。

C07. 空间材料科学技术-12

无容器法制备钛硅酸盐生物玻璃及其促成骨活性研究

周艳玲、翟东、朱钰方、吴成铁*

中国科学院上海硅酸盐研究所

引言：生物活性玻璃由于具有良好的成骨活性已成为重要的临床骨修复材料之一。但目前临床上使用的生物活性玻璃 45S5 存在早期 Na 和 Ca 离子释放过快，造成局部 pH 急剧升高，抑制细胞活性进而影响骨组织修复效果。为解决 45S5 应用过程中存在的碱性过强的问题，本研究提出将具有优异的化学稳定性和热稳定性 CaTiSiO₅ 陶瓷制备成具有亚稳态非晶相的 CaTiSiO₅ 玻璃，提高其离子释放速率和体外生物活性，从而使所制备的新型 CaTiSiO₅ 玻璃能够提供适宜的离子释放速率和温和的 pH 环境，促进骨组织修复。

材料与方法：将 CaTiSiO₅ 陶瓷通过无容器气悬浮烧结，通过 XRD、TEM、SEM、FTIR、Raman、XPS 和 NMR 表征得到样品的物相结构、微观形貌、成分分布、结构单元、原子配位结构等，并系统研究其离子释放速率和降解性能，并通过体外细胞实验和体内动物实验表征其体内外相容性及促进骨组织修复效果。

结果与讨论：将 CaTiSiO₅ 陶瓷通过无容器气悬浮烧结得到样品，进行 XRD 和 TEM 物相分析表明为非晶相。相比于 45S5，CaTiSiO₅ 玻璃非桥氧键比例下降，玻璃骨架的网络结构稳定性提高，pH 值和离子释放速率大大降低；相比于 CaTiSiO₅ 陶瓷，CaTiSiO₅ 玻璃具有活性非桥氧键，溶解度提高，钙、硅活性离子释放速率加快。体外细胞实验结果表明，相比于 45S5，CaTiSiO₅ 玻璃能够促进人骨髓间充质干细胞（hBMSCs）增殖并能够促进成骨基因（BMP2、ALP 和 OPN）表达。同时，CaTiSiO₅ 玻璃能够促进破骨细胞增殖并能够显著降低破骨细胞生成相关基因的表达水平（MMP9、NFATc1、CTR 和 ACP5），从而抑制破骨细胞的破骨分化。皮下植入实验表明 45S5 玻璃具有急性炎症反应，CaTiSiO₅ 生物玻璃具有良好的体内相容性并能够促进巨噬细胞从促炎 M1 向抑炎 M2 转化。大鼠股骨髁缺损实验植入材料 8 周后，CaTiSiO₅ 生物玻璃周围大量的新骨生成，45S5 组材料间隙也有新生骨，但是由于降解过快产生了大量空隙。

C07. 空间材料科学技术-13

Fe-Mn 基阻尼合金凝固组织演变与性能调控机理

徐文成、景小虎、闫娜*

西北工业大学物理科学与技术学院

在航空、航天、航海和建筑等领域，阻尼材料具有重要的应用前景，能够有效地将外部带来的机械能如振动能等转化为内能消耗掉，从而降低振动和噪声带来的危害，实现减振降噪的效果。Fe-Mn 基合金具有较好的阻尼性能、优异的力学性能和更低的生产成本，是一类具有广泛应用前景的阻尼结构材料。已有研究表明 Fe-Mn 基合金的阻尼特性来源于合金内部四种相界面之间的运动，然而，不同界面对合金阻尼性能的贡献和不同界面的内耗作用机理尚不清楚。

本文选取了二元 Fe-17%Mn 合金、三元 Fe-17%Mn-12%Cr 和 Fe-22%Mn-12%Cr 合金，系统研究了合金成分、制备条件对凝固组织和阻尼性能的影响规律，并结合分子动力学（MD）对合金的阻尼机理进行了分析。分析表明，三种合金的常规凝固组织均由 γ -奥氏体、 ϵ -马氏体和 α' -马氏体组成。与二元 Fe-17%Mn 合金相比，三元 Fe-17%Mn-12%Cr 合金中 γ -奥氏体的含量增加， ϵ -马氏体含量减少，合金阻尼性能有所提高，而在三元 Fe-22%Mn-12%Cr 合金中， α' -马氏体含量几乎为零， γ -奥氏体含量显著增加，阻尼性能显著降低。此外，开展了二元 Fe-17%Mn 合金的快速凝固实验，研究发现冷却速率可以提高马氏体转变温度和层错几率，增加 Shockley 位错。在高冷速条件下，细化的凝固组织伴随着大量的晶体缺陷（相界、晶界、层错和位错等），有效提高了合金的阻尼性能。结合 EBSD 的深入分析，发现 α' -马氏体的形成有利于阻尼性能的提高， α'/ϵ 和 α'/γ 相界面数量的增加显著提升了合金的阻尼性能。MD 计算结果表明，合金的阻尼源主要来源于分布在缺陷区域的“快原子”，与实验结果较为一致。

C07. 空间材料科学技术-14**耐空间极端环境形状记忆聚合物及其复合材料的 4D 打印技术**

王林林、张风华、冷劲松*

哈尔滨工业大学

形状记忆聚合物是一种受光、电、磁、热等外界激励可发生形状改变的智能材料，具有质轻、大变形、变刚度、控制方式多样、可重复使用、可大尺寸成型等特点。3D 打印技术与形状记忆聚合物结合，被称为 4D 打印，可以实现复杂智能结构试件的一体化成型。聚焦热固性形状聚合物材料，引入性能稳定的苯环、杂环等官能团，进行分子结构设计，提升聚合物网络结构的交联密度，通过控制原料单体的分子量，调节聚合物分子或体系中的软段和硬段，提高网络结构的规整性与聚合物的结晶度，利用体系引入的刚性官能团或链段，形成刚性网络结构，提高聚合物的耐热性，获得了具有优异力学性能、玻璃化转变温度可调和抗辐照性能新型形状记忆聚合物材料。

C07. 空间材料科学技术-15**静电悬浮条件下 Co-Ti-Nb 合金共晶生长动力学及纳米蠕变性能研究**

孙铂涵、阮莹*、刘克伦、魏炳波

西北工业大学

Co₃₅Ti₃₅Nb₃₀ 合金是一类新型的高渗透氢合金，其特殊的复相结构使得合金可穿透大量的氢气而不会发生氢脆现象。由于对该合金凝固特性及反应机制了解的匮乏，很大程度上限制了该系材料的设计与开发。本文选取了三元 Co₃₅Ti₃₅Nb₃₀ 合金，采用静电悬浮技术实现了该合金的深过冷快速凝固。研究了从层片共晶生长到异常共晶生长的转变机制，讨论了过冷度对凝固组织和力学性能的影响。过冷度 $\Delta T < 161$ K 时合金凝固组织为 (Nb) + Co(Nb, Ti)层片共晶。当 $161 \text{ K} \leq \Delta T < 273 \text{ K}$ 时，凝固组织为层片共晶+不规则共晶，且非规则共晶体积分数随 ΔT 增大而线性增大， ΔT 超过 273 K 后，合金完全由不规则共晶组成。与近平衡凝固条件相比，静电悬浮条件下 $\Delta T=273$ K 时合金硬度提高了 36.2%。随着 ΔT 增大，共晶层片间距和晶粒尺寸减小，Hall-Petch 效应增强使合金的抗蠕变性能提高。通过计算蠕变应力指数和活化体积得出合金的纳米蠕变行为以位错运动为主，且其对加载应变率敏感。由于应变率与位错在加载过程中的形核速率呈正相关关系，合金应变率敏感性增加，活化体积减小。

C07. 空间材料科学技术-16**不锈钢合金设计与应用研究**

曾小勤*

上海交通大学

作为最轻的金属结构材料，镁在航空航天、汽车交通、电子通讯等领域具有极大的应用潜力，但是镁的易腐蚀性极大的限制了镁的应用推广。合金化是提高镁合金抗微电偶腐蚀的有效途径，但是选择合金元素的种类以及含量是设计耐腐蚀镁合金最大的困难。报告人基于采用高通量计算与实验的方法，开展了不锈钢合金成分设计与优化，从上万种备选体系种筛选出具有优异耐腐蚀性能的高耐蚀镁合金（不锈钢合金）。研究表明，基于合金元素溶度积调控，不锈钢合金在溶液中能够快速沉积具有非晶结构的腐蚀产物膜，其耐腐蚀性能较商用镁合金提高了 10 倍。基于不锈钢合金优异的腐蚀防护特性，相关材料已经在笔记本电脑、探月卫星、航天装备等领域得到了应用验证。该项研究不仅有效的解决镁合金本体的抗腐蚀性性能，突破了镁合金的应用瓶颈。

C07. 空间材料科学技术-17**快凝深过冷 Al 液体的均匀形核特征**

彭平*

湖南大学 材料科学与工程学院

基于液态金属（团簇）在快凝过程中具有的（瞬态与连续）结构遗传性，发展了一种可识别和标度晶胚与晶核的团簇分析方法，解决了凝固晶核难以识别的技术难题，并据此表征了快凝 fcc-Al 单晶晶核的几何构型、临界尺寸与界面形态，初步揭示了快速凝固的非平衡形核特征。结果表明：在过冷度为 $0.42T_m$ 时，fcc-Al 单晶晶核临界尺寸 n_c 随冷凝温度下降而减小，平均尺寸约 26 个原子，芯部几何呈非球层状构型，液固界面为 fcc/hcp/liquid 多相结构；晶胚与晶核的生长除通过单原子吸附外，还存在不同晶胚的合并与分解；初始形核出现在热力学相变温度之前，但稳态形核率在 $0.45T_m$ 时达到最大。应用于过冷液体的等温晶化分析，揭示单质 Al 存在均匀形核极限，对应的动力学调幅分解温度为 $0.51T_m$ ，略高于形核能消失时的热力学调幅分解温度 $0.45T_m$ 。晶胚孕育与形核路径的分析显示：晶核区别于晶胚的主要特征是团簇瞬态可遗传时间成为了有效生长时间，在非平衡凝固条件下，晶体形核孕育时间远大于其形核诱导时间。

C07. 空间材料科学技术-18**空间材料实验过程的原位观察技术进展**

潘秀红*、刘学超、金蔚青

中国科学院上海硅酸盐研究所

空间微重力下材料科学实验涉及的诸如熔化、凝固、扩散、对流等过程，主体发生在材料的内部，只有原位观察成像，才能开展系统深入的过程和机理研究。加强实验过程的原位观察或在线检测技术，强化空间实验综合信息的获取能力，降低空间实验研究结果对实验样品回收的依赖，是空间材料科学发展的一个重要方向。本文介绍了国内外空间材料科学原位观察技术，包括可见光观察技术、X 射线成像技术、红外光成像技术、以及基于贝塞克效应的诊断技术等，并简要总结了近些年国际空间材料原位观察取得的研究结果。最后结合我国空间材料科学发展现状，给出加强空间材料科学原位观察技术开发的建议。

C07. 空间材料科学技术-19**多尺度孔隙结构多孔铜空间环境使役行为研究**

陈斐*、王昊、李宏林、张驰、黄志锋、文聘

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。多孔铜具有高比强度、高的抗疲劳性能、高的能量吸收性能、耐辐照和高物质传输性能等优异性能。目前，多孔金属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；未来可作为空间浸润滑剂载体材料，实现空间浸润滑剂载体—缓释功能一体化，用于航天器舱外轴承等构件的持久润滑。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。研究表明，纳米多孔铜中的大密度的晶界、相间边界或自由表面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%。本研究基于“空间站工程应用系统第三批科学实验项目”，2023 年 3 月开始空间暴露试验，基于空间站舱外暴露平台开展为期 1 年的多孔金属材料空间暴露试验，综合暴露样品已于 2024 年 5 月随 SZ-17 返回舱返回进行后续研究与分析。

C07. 空间材料科学技术-20

金属材料太空制造技术研究进展

赵少凡*、刘明、周传昆、汪卫华

中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室

面向航天器中电磁功能部件应用需求,突破空间环境下低功耗、高效率金属材料太空制造技术是关键。选用非晶合金为太空制造原材料,研究其在高低温环境下的动力学行为,由此提出了原材料筛选依据。发现了块体非晶合金表面在超高真空、低温环境下具有自粘特性。结合非晶合金低温热塑性、高电阻等特性,提出开发了适用于空间环境的阻热制造工艺,可实现多种功能部件的高效制造,相关研究成果获国家认可,被列入在轨实验计划。

C07. 空间材料科学技术-21

液态 Nb_{81.7}-Si_{17.3}-Hf₁ 合金的静电悬浮凝固过程与组织调控研究

万梓焯、胡亮、魏炳波*

西北工业大学

以(Nb)+ α Nb₅Si₃共晶组织构成的 Nb-Si 基原位自复合材料具有优异的高温强度与抗蠕变性能。目前主要通过合金化的方法调控合金凝固组织,提高合金服役性能。作为重要的合金化元素,金属 Hf 元素在抑制 Nb₃Si 相生成的同时可以提高 Nb-Si 基合金的断裂韧性。然而,根据相图可知近平衡凝固下无法获得 (Nb)+ α Nb₅Si₃ 两相共晶组织,Hf 元素添加后 Nb-Si 基合金的相选择机制仍需进一步研究。

本工作通过静电悬浮技术实现了 Nb_{81.7}Si_{17.3}Hf₁ 合金在不同过冷度下的深过冷快速凝固,实验最大过冷度为 404K(0.19TL)。当过冷度小于 194K 时,凝固组织中存在大量的初生(Nb)枝晶,体积分数超过 10%,剩余液相形成了(Nb)+ α Nb₅Si₃层片共晶组织。初生相生长速度与过冷度之间呈幂函数关系,在 194K 时达到 89.35mm·s⁻¹。而层片共晶生长受到了初生相生长加热剩余熔体的影响,其生长速度随过冷度增加而缓慢线性上升,在 194K 时生长速度仅为 7.49mm·s⁻¹。此外随着过冷度的增加,层片共晶间距逐渐减小,在 194K 时层片共晶间距仅为 360nm。当过冷度大于 194K 时,(Nb)和 Nb₃Si 相在过冷熔体中独立形核并快速生长形成非规则共晶,部分液相则在后续的近平衡凝固中生成(Nb)+Nb₃Si棒状共晶。由于合金形成了(Nb)+Nb₃Si非规则共晶组织,其共晶间距显著上升。而随着过冷度的进一步上升,非规则共晶组织逐渐细化,生长速度也显著增加,在最大过冷度时达到 115.86mm·s⁻¹。

C07. 空间材料科学技术-22

Bridgman 法制备 CoNiV 中熵合金的组织结构和力学行为

邓林、张勇*

北京科技大学

CoNiV 中熵合金因其优异的宽温域力学性能、蠕变性能、腐蚀性能和抗氢脆性能而受到广泛关注,是下一代高温极端环境的重要候选材料。早先的研究采用冷拔及后续退火,获得了具有非常优异综合力学性能的 CoNiV 合金纤维,强度超过 1.9 GPa,延伸率超过 13.4%。进一步冷轧后强度提升至 2.5 GPa,延伸率超过 6%。然而,由于其固有的严重晶格畸变效应和迟滞扩散效应,使得 CoNiV 中熵合金使用常规铸造方法后得到的晶粒尺寸非常细,变形时主要依靠平面位错滑移,难以激活形变孪晶,因此其塑性提升十分有限。Bridgman 法由于可以控制凝固速率、温度梯度等凝固参数使合金能够获得有序的凝固组织而被应用于制备不同需求的高性能合金。自 2013 年本课题组使用 Bridgman 法制备出第一块 CoCrFeNiAl_{0.3}高熵合金单晶以来,高熵合金单晶优异的综合性能得到了广泛的关注。本研究中,采用 Bridgman 法制备了 CoNiV 中熵合金。结果表明,随着凝固的进行,CoNiV 中熵合金的凝固组织经历了铸态枝晶→等轴晶→柱状晶的演变。相比铸态样品,定向凝固后的样品晶粒尺寸显著增大,纵向尺寸最大超过 9mm。在宽温域(77k, 273k, 673k, 873k)下对柱状晶区样品进行单轴拉伸测试,表明 Bridgman 法制备的 CoNiV 中熵合金具有

非常优异的宽温域力学性能，可以很好的抵抗低温和高温韧脆转变。同时，对其形变机理进行分析。变形早期，CoNiV 中熵合金为典型的平面滑移，位错相互缠结形成位错网格。变形后期，大量层错激活并产生高密度的形变孪晶。鉴于上述优异的性能，Bridgman 法制备的 CoNiV 中熵合金具有出色的极端高温环境应用潜力。

C07. 空间材料科学技术-23

地外物质分析：揭秘太阳系的历史

林杨挺*

中国科学院地质与地球物理研究所

C07. 空间材料科学技术-24

中国空间站空间材料科学实验的探索与实践

马萍*¹、钟红恩¹、余建定²、张立宪¹、刘洋¹、李雨¹、殷缘¹、郭玉雪¹

1. 中国科学院空间应用工程与技术中心
2. 中国科学院上海硅酸盐研究所

中国空间站已成功建立了以无容器材料实验柜、高温材料科学实验柜、材料舱外暴露实验装置为核心的材料科学实验支持平台，具有较高的技术指标和实验支持能力，达到了国际领先水平。依托材料科学实验支持平台，中国空间站也正式开启了大规模开展微重力下材料制备过程机理研究、重要应用新材料和制备技术研究、空间应用材料使役行为和使役性能研究，以及材料科学与其他学科交叉研究的新篇章。利用中国空间站已有的材料科学实验支持平台，已成功支持了 33 个研究项目的 40 余项空间实验，获取了大批阶段性的研究成果。通过不断摸索与实践，逐步固化了从地面研究与样品制备、样品匹配试验到空间科学实验、样品返回后研究等全任务周期的实施流程，摸索了影响实验效果乃至成败的关键要素、重要环节和实验规律，总结了高效开展空间实验的成功经验，为材料科学研究等提供了强有力指导，助力研究成果的大量高效产出。

C07. 空间材料科学技术-25

微重力环境下太阳系星云物质冷凝与结晶过程研究

汤浩岚*¹、韩紫嫣²、贺欢³、张安宁¹、余建定³、惠鹤九²、秦礼萍¹

1. 中国科学技术大学
2. 南京大学
3. 中国科学院上海硅酸盐研究所

实验模拟早期太阳系星云物质和小行星的演化一直是行星科学领域的研究热点之一。依照经典的太阳系冷凝模型，约 46 亿年前太阳系形成于高温的星际尘埃和气体。随着温度下降，星云气体中开始形成高温矿物并聚合成富钙铝难熔包体 (CAI)。一般认为 CAI 的形成代表了太阳系时间的零点。大约太阳系形成后的 1-3 百万年后部分星云物质在星云冲击波、或闪电等作用被瞬间加热并冷却，星云中熔融的小液滴形成毫米尺度的颗粒，即为球粒，同时部分 CAI 被熔融并再结晶。这些球粒和 CAI 因此记录了早期太阳系各种热时间的条件，因此是我们研究太阳系形成和演化的主要研究对象，也是行星科学和天体化学领域一直以来关注的热点。前人已通过多种手段尝试重现球粒和 CAI 的特殊结构。然而这些实验均是在有重力的环境下进行，无法重现早期太阳系环境下球粒和 CAI 的形成过程，也无法验证不同的早期太阳系热事件的理论模型。

为了模拟球粒和熔融成因 CAI 的形成，重现早期太阳系环境，针对星云物质的熔融实验应当避免重力对结晶过程的干扰。我国空间站无容器实验平台则为开展行星的形成和演化实验模拟研究提供了非常理想的实验平台。应用无容器实验平台，我们开展了球粒样品和 CAI 样品的加热熔融实验，实验条件包括保温

实验, 冷却实验, 以及多次熔融实验。同时, 为了精确评估重力对结晶的影响, 相同条件下的地面比对实验也同期完成。初步观察可知, 微重力条件下玻璃样品不容易形成晶体, 同时相比冷却实验, 多次熔融实验可以更有效地形成结晶。样品已于 2024 年 4 月 30 日随神舟十七飞船返回地球。样品分析工作正在进行, 分析结果将在会议上发布。

C07. 空间材料科学技术-26

基于集成原位 SANS 表征实验和 DFT 预测的铝锂合金动力学的铝锂合金设计

王俊升*

北京理工大学

航空航天、武器装备结构件对轻质高强合金的需求是长期存在且日益迫切。降低高强合金密度、提高比强度和比模量一直是轻合金研发的重要方向。Al-Li 合金具有密度低、弹性模量高、比强度高和比刚度高等优势, 是航空航天等领域轻量化材料研究的热点。报告综述了铸造 Al-Li 合金的微合金化、微观组织/缺陷调控技术与特种铸造工艺技术, 旨在为轻合金“成分-加工-微观结构-性能”最佳调控提供参考。

C07. 空间材料科学技术-27

功能梯度材料空间制备技术及应用

张驰、陈斐*、王昊

武汉理工大学

目前国内外空间材料科学研究集中在合金等均质材料的太空制备, 缺乏针对航空发动机、核反应堆及战略武器核模拟(极端高压)等重大应用需求亟需的功能梯度材料(金属/金属、金属/陶瓷体系)的研究。目前功能梯度材料已经逐步得到应用, 但在其制备过程中仍然存在一些难题。例如材料间稀释率变化的问题。在材料制备过程中不同材料间会产生互溶稀释的现象, 元素扩散到相邻材料内, 不同的工艺参数会导致稀释率的变化, 元素扩散程度变化影响结合位置的强度或导致材料的梯度路径偏离预先的设计路径。如何解决上述问题对梯度材料的发展至关重要。空间独特的微重力环境为各类材料的烧结机理机制、物理化学性质、相变过程规律、合成制备和加工成形原理及其最终服役性能研究提供了新思路。重力在非均质功能梯度材料制备过程中起重要作用, 影响孔隙迁移和聚集行为, 液相迁移过程, 固相网络连通性, 材料致密化程度和各向异性。微重力烧结实验可以隔离重力对致密化和变形的作用, 凸显重力因素对功能梯度材料烧结行为的影响。本研究从相图设计及有限元模拟等角度遴选出组织结构与镍基及 AlN/W 功能梯度材料相近的 Cu/Al、Cu/Ag、Cu/Ni、SS316L/Ni、硼铝硅酸盐陶瓷/Ag、AlN/Mo 功能梯度材料体系, 开展空间环境下非均质功能梯度材料烧结体系组成设计, 坯体制备技术, 烧结机制及质量性能评价研究, 为未来镍基非均质功能梯度材料和陶瓷/金属体系材料的空间制备提供研究基础及技术支撑。

C07. 空间材料科学技术-28

高性能 FeSi 基软磁合金过冷非平衡凝固策略

吴琛*、陈起明、张心阳、王克冰、刘幻、严密

浙江大学

FeSi 基软磁合金主要用于交变场中的信息与能源的转换和传输, 是 5G 通讯、电子信息、能源交通等领域的关键基础材料之一。针对 FeSi 基软磁合金饱和磁化强度与矫顽力难以同时优化的瓶颈问题, 采用过冷非平衡凝固技术, 分别在晶态、非晶和纳米晶软磁合金中实现了成分与微结构的协同调控。对于晶态软磁合金, 过冷凝固可诱导晶界析出易磁化相, 并调控磁畴结构, 促使合金在保持高磁化强度的同时降低矫顽力。对于非晶和纳米晶软磁合金, 过冷非平衡凝固有利于提高非晶形成能力, 为设计具有高 Fe 含量的非晶和纳米晶软磁合金提供了可能。高铁磁性元素含量保证了合金的高饱和磁化强度, 结合过冷非平衡凝固技术能够提高非晶基体的无序度并使得纳米晶粒细化且分布更为均匀, 进而降低合金磁晶各向异性及矫

顽力。

C07. 空间材料科学技术-29

空间高温材料科学实验柜样品盒中的温度测量

于强*¹、王晴¹、罗兴宏²、刘学超³、潘秀红³

1. 中国科学院国家空间科学中心
2. 中国科学院金属研究所
3. 中国科学院上海硅酸盐研究所

温度对于晶体生长的结果起着重要作用，特别是温场的分布对于晶体的生长速率、宏观结构和生长方式都有显著影响。空间站高温材料科学实验柜的样品盒（以下简称样品盒）配备了温度测量功能，这为材料样品的实验提供了直接的温度场分布测量依据。

样品盒内部采用 99 瓷高纯增韧氧化铝加工样品坩埚组件。为了定位和固定 5 组测温热电偶，采用坩埚外套双层嵌套结构组合方式，内层外壁分别设置不同长度竖槽（根据材料实验样品要求位置可变）分别固定多组热电偶。

测温电路由三块电路板构成。三个电路板的功能分别是：信号连接板、MCU 和通讯接口板、以及 A/D 转换板。信号连接板的功能是将样品管理模块机械手中的电源和通讯信号通过机械手上的弹性插针，压在信号连接板的 3 个 3 针凹型接插件上，从而形成电源和信号通道。信号连接板将电源和通讯信号线再通过导线传递到 MCU 和通讯接口板上。MCU 和通讯接口板主要是由电源、通讯接口和 MCU 组成。其中通讯接口采用符合 RS485 标准的芯片。通讯接口与 MCU 相连，将控制模块的控制命令传输给 MCU 或者将 MCU 需要发送的数据传输给控制模块。A/D 转换板上有两片 A/D 转换器，其中一路 A/D 转换器采集 3 路 S 型热电偶的数据，另一片 A/D 转换器采集 2 路 S 型热电偶的数据和 1 路热敏电阻（用于测量热电偶冷端温度）的数据。

采用最小二乘法的最优化分段线性拟合方法校正热电偶的电压数据和热敏电阻阻值数据，从而得到热电偶电压值和热敏电阻阻值每一段的校正系数。将计算得到的校正系数注入到温度测量系统，对热电偶电压数据和热敏电阻的阻值数据进行标定。

利用标准样品盒开展了空间实验。T1 为样品盒中的 1 号偶，T2 为样品盒中的 2 号偶，T3 为样品盒中的 3 号偶，T4 为样品盒中的 4 号偶，T5 为样品盒中的 5 号偶。样品盒中 T5 距炉膛口 48mm，各热电偶间距为 30mm。在温区 2 和温区 3 分别控制在 800°C 和 1000°C 温度的时候，高温炉内部压力为 1000~1600Pa。

空间实验结果是：当温区 2 和温区 3 的控温温度为 800°C 的时候，T1 的温度为 719.36°C，T2 的温度为 738.56°C，T3 的温度为 594.92°C，T4 的温度为 478.12°C，T5 的温度为 398.22°C。当温区 2 和温区 3 的控温温度为 1000°C 的时候，T1 的温度为 879.62°C，T2 的温度为 920.57°C，T3 的温度为 729.75°C，T4 的温度为 578.82°C，T5 的温度为 479.33°C。

样品盒中的温度测量系统经实际测试验证，能够快速精准地采集材料样品在实验过程中的温度数据，具有高速度、高效率、高精度且操作方便的特点，能够有效解决样品所感受到的温度测量问题。能够达到电压信号测量精度小于 1 μ V、电阻信号测量精度小于 1m Ω 的高精度要求，这为后续分析实验样品提供了直接的依据。

C07. 空间材料科学技术-30

钛合金空心球仿空间制备技术研究

王建忠*¹、樊永霞¹、敖庆波¹、阮莹²

1. 西北有色金属研究院
2. 西北工业大学

钛合金空心球是由钛合金球壳及球内孔隙组成的一类非常重要的结构功能一体化材料，呈闭孔结构，除具有密度低、比强度高、比刚度高、耐蚀性好、耐热性高等特性外，还兼具优异的隔热、吸能、隔声、

电磁屏蔽等性能, 可用于制备航空、航天、交通运输、石油化工等领域的隔热材料、吸能材料等。孔径可控、壁厚均匀和壳体致密的单个钛合金空心球是制备任意形状和结构的大尺寸钛合金多孔材料的关键原料, 然而目前地面环境还未开发出相应的制备方法。本文从在轨实验的可行性出发, 系统研究了 Ti185、TiFe、TiSi、TiNbVZr 等多种钛合金的仿空间熔化-凝固实验, 探讨了静电悬浮技术与传统熔炼技术对钛合金的微观组织、显微硬度和压缩性能等影响规律, 揭示了钛合金单晶组织的形成机制;

开发了钛合金空心球的仿空间制备技术, 初步获得了其孔隙的形成机理。

C07. 空间材料科学技术-31

固/凝胶复合润滑材料的协同润滑机制及空间应用研究

蔡美荣、周峰*

中国科学院兰州化学物理研究所

在空间机械润滑领域, 为了提高空间润滑的可靠性与寿命, 近年来发展了固体润滑薄膜-液体润滑剂(固-液)复合润滑技术, 该技术可以提高滑动摩擦配合面耐久性, 降低设备磨损, 延长运动机构服役寿命。但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, 本研究发展了一种由超分子凝胶和二硫化钼薄膜组成的新型复合润滑体系。利用地面模拟空间环境平台研究了其真空、辐照及高、低温等条件下固/凝胶复合润滑材料的理化性能变化及摩擦学行为。实验结果表明在高真空、辐照及高、低温环境下该复合润滑体系都比 MoS₂ 薄膜具有更低的磨损率, 从而延长了使用寿命。辐照实验结果表明, 凝胶/MoS₂ 薄膜复合润滑材料在原子氧和紫外线照射下 4 小时的抗爬移性能优于润滑油复合 MoS₂ 薄膜润滑。润滑机理的分析表明由于 MoS₂ 薄膜与凝胶之间的显著协同作用, 摩擦副表面形成了连续的转移膜。MoS₂ 薄膜磨屑作为添加剂存在于凝胶中, 一旦 MoS₂ 薄膜耗尽, 凝胶能够自动补充。利用空间站材料暴露平台开展了暴露周期半年的静态实验和动态摩擦学实验, 下行数据表明凝胶作为润滑剂, 球盘摩擦试验机运转了 1.5X10⁷ 循环, 寿命是固体润滑薄膜的 7.5 倍, 满足了航天机构长寿命的润滑需求。

C07. 空间材料科学技术-32

(题目待定)

李振宇

北京空间飞行器总体设计部

C07. 空间材料科学技术-33

(题目待定)

朱刚*

西安交通大学

C07. 空间材料科学技术-34

滑动剪切金属熔体扩散测量技术及应用

张博*

松山湖材料实验室

金属熔体的原子扩散数据是理解金属凝固过程并进行凝固过程模拟和控制的关键动力学参量。然后, 因为实验测量的困难, 准确可靠的熔体扩散数据十分缺乏。近半个世纪以来, 长管测量技术, 剪切单元技术先后应用于金属熔体扩散的测量。后来中子准弹性散射技术也应用于自扩散数据的测量。最近十年, X

射线成像技术和长管技术结合首次实现了金属熔体扩散的可视化观察，可以原位观察扩散过程，进一步提高了扩散测量的准确度。我们团队在传统的长管技术和剪切单元技术的基础上，自主提出了滑动剪切扩散测量技术的思路，并在此基础上进一步开发了多层滑动剪切技术。最近，自主研发了基于多层滑动剪切技术的 X 射线原位扩散测量系统，能够实现目前更准确的金属熔体互扩散的测量。基于该技术，在 Al-Cu 金属熔体中获得了最新的金属熔体互扩散数据。该技术展现出了良好的应用前景，可广泛应用于二元及多元合金熔体的互扩散数据测量。此外，该技术也呈现出用于在空间微重力环境下进行实验的科学与应用价值。

C07. 空间材料科学技术-35

用于自适应红外隐身的新型二氧化钒/铝复合材料

夏明许*、王菁、曾龙、李建国
上海交通大学

在太空发展计划中，具有隐身功能的卫星已经成为防御性对抗的重要组成部分。通过冷却、降温、涂料、图层、遮挡和降低发射率等手段来控制 and 缩减自身可见光及红外特征信号，实现目标与背景融为一体，是可见光和红外隐身的基本思路。传统的隐身材料因其固定的热辐射属性，不能根据内、外热流变化去调节自身的热辐射特性，无法实现基于设备温度变化的自适应调控。作为一种热致相变金属氧化物，二氧化钒 (VO₂) 在 68°C 左右，发生由低温单斜半导体相到高温四方金属相的可逆转变 (MIT)，同时伴随着光学、电学、磁学等的巨大变化，满足自适应红外隐身技术领域的需求，因此具有较高的实用价值和广阔的应用前景。此外，因其热、光、电性能变化完全由温度引起，不需要额外的电流或电压刺激，特别适用于太空环境能源供应紧张或空间有限的情况。但由于 VO₂ 易受潮、易氧化、强度低、发射率高，常规的 VO₂ 薄膜材料在实际使用过程中表现不佳、寿命不长，未能得到大范围应用。本研究基于降低发射率考虑，通过设计一种同时具有轻量化和低成本的结构功能一体化红外隐身材料，将 VO₂ 粉末和 Al 通过球磨和放电等离子烧结 (SPS) 制备形成 Al-VO₂ 复合材料。系统评估了 VO₂ 含量对复合材料发射率的影响并发现当 VO₂ 含量为 50% 时，复合材料在 30°C 时的发射率为 0.54，而在 100°C 时则呈现可逆变化至 0.43，变化幅度可达 0.11。此外，还研究了工艺条件对复合材料相变性能的影响，发现低温高压的 SPS 制备工艺更有益于制备致密的 Al-VO₂ 复合材料。本文开展的基于 VO₂ 相变特性的 Al-VO₂ 红外隐身性能研究，对于探索航天器新型智能隐身技术和方法，支撑和推动智能隐身材料体系的发展，均具有重要而积极的科学意义。

C07. 空间材料科学技术-36

太阳风辐照对月壤玻璃晶化行为的影响

王军强*
宁波材料技术与工程研究所

Lunar glasses, formed from volcanic eruptions, meteorite impacts and solar wind irradiation, not only provide a rich archive of the Moon's formation and evolution, but also played an important role in lunar resource utilization. Here, we reveal the significant enhancement on the thermostability of lunar glasses resulted from solar wind irradiation. An irradiation layer with plenty of ~2-3 nm clusters in the lunar glasses is observed, which show obvious difference in the nanocrystallization mechanism compared with the interior parts in the lunar glasses. The precipitation of α -Fe at high temperature indicates the reduction reaction between the solar wind-derived H and lunar glasses. From the result, we confirm the high thermostability of lunar glasses and offer the guidance on future lunar construction with 3D printing technology using lunar regolith.

C07. 空间材料科学技术-37

InAsSb 半导体晶体空间微重力生长研究

张兴旺*、尹志岗、黄吉东、吴金良
中国科学院半导体研究所

无空间微重力环境为揭示被地面重力场掩盖的晶体生长现象与规律、探索新的晶体制备工艺提供了独一无二的平台。由于存在重力引起的浮力对流,在地面条件下利用平衡法制备掺杂半导体或半导体合金晶体时,难以实现纯扩散生长,造成材料宏观组分分布不均匀。InAsSb 材料具有载流子寿命长、吸收系数大、载流子迁移率高等优点,是一种具有广阔应用前景的红外光电材料。本项目基于我国空间站高温材料科学实验柜,在国际上首次利用垂直梯度凝固法实现了地面难以制备的高质量 InAsSb 晶体生长,直径达到 1 cm、厚度达到 1.5 mm,径向轴向组分均匀,起伏均小于~0.5%,明显小于地面样品(~2%)。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。偏振 Raman 测试结果表明,InAsSb 空间样品中存在组分有序化的特征。此外,我们还研究了微重力条件下固-液界面的溶质输运过程,得到的晶体生长机理有望拓展至其它多元半导体合金材料体系。

C07. 空间材料科学技术-38

大尺寸弛豫铁电单晶的生长及性能调控研究

宋克鑫*、侯丁伟、肖若愚、陈文杰、郭海生、李飞、徐卓

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。在生长过程中,弛豫铁电单晶的成分分凝是制约该材料性能均匀性的关键问题。通过多种方法的调控表明,弛豫铁电单晶的成分变化可以进行调控,进而实现性能的均匀化。弛豫铁电单晶超高压电性能被认为是极性纳米微区所产生的贡献,通过该理论,以稀土掺杂的方式,实现了弛豫铁电单晶的局域结构无序化,获得了 PMN-PT 单晶纵向压电性能的倍增。本文将对大尺寸弛豫铁电单晶生长、交流极化和稀土掺杂方式对弛豫铁电单晶性能调控相关研究成果进行详细介绍,并探讨微重力条件下可能对弛豫铁电单晶生长成分均匀性和性能均匀性产生的影响。

C07. 空间材料科学技术-39

空间太阳能电池阵材料搭载验证与应用研究

陆宏波*

上海空间电源研究所

太阳能电池阵是构成航天器电源系统不可或缺的重要核心,其供电能力与稳定性直接关乎航天型号任务的成败。空间环境是诱发电源系统在轨故障的主要原因,太阳能电池阵一直暴露于真空、深冷环境,并长期受到太阳辐射、宇宙射线、高能粒子、原子氧、空间碎片等各种空间因素的影响,因此,太阳能电池阵所用相关材料空间环境耐受性和可靠性制约着电池阵的发电性能和寿命。此外,随着我国航天技术发展,型号任务面临更复杂、极端的空间环境,以及更严苛的服役寿命,对太阳能电池阵及其相关工艺用材料的性能要求更高、功能要求更多样,开发下一代、新一代太阳能电池阵及相关材料,并实现材料国产化研制与验证工作迫在眉睫。因此以空间站搭载为应用背景,以下一代、新一代和国产化替代的太阳能电池阵相关材料为试验研究对象,开展太阳能电池阵相关材料如封装防护材料、粘接胶体材料、绝缘膜层材料等的空间环境服役性能的系统研究,分析这些材料的失效模式和机理,掌握其空间环境性能参数的变化规律,指导和优化新材料的空间环境可靠性地面模拟试验评估方法,为后续改进或应用提供支撑。通过在轨试验,研究其在空间环境下的工作机理与性能,持续推动新一代、国产化空间太阳能电池阵核心材料的型号应用,实现空间电源基础技术的自主可控和跨越式发展。

C07. 空间材料科学技术-40**空间固体润滑薄膜的摩擦学及环境适应性研究**

王德生*、胡明、高晓明、翁立军、孙嘉奕

中国科学院兰州化学物理研究所

固体润滑薄膜材料对降低航天器精密机械运动部件的摩擦磨损、提升苛刻环境或工况条件下服役性能，发挥着十分重要的作用，是保障相关空间运动机构可靠性和服役寿命的重要基础。过渡族金属二硫化物（MoS₂、WS₂等）薄膜具有较低的真空摩擦系数，广泛应用于空间运动机构的润滑处理。地面潮湿大气环境和空间在轨环境因素会显著影响薄膜材料的服役性能。针对二硫化物薄膜环境适应性和摩擦学性能提升，本研究主要开展了二硫化物薄膜的设计制备和地面模拟环境下摩擦学性能的研究，并在空间站舱外开展了材料的暴露和润滑轴承的摩擦学实验。工作主要通过在溅射薄膜中引入 O、C、N 非金属元素，调控二硫化物薄膜的微观结构，分析了薄膜中悬挂键的钝化、摩擦表界面的诱导调控、力学性能对薄膜材料的真空摩擦学和环境适应性的影响机制。研究结果表明，通过有效调控 O、N 元素的薄膜中悬挂键的钝化和提高薄膜的致密性，可达到润滑薄膜低摩擦磨损与耐腐蚀的统一；C、N 元素引入的非晶 W-S-C-N 润滑薄膜的较高硬度和摩擦过程中诱导形成的 WC 相增强的（002）晶面平行于摩擦表面的晶化 WS₂ 转移膜，使薄膜表现出超低真空摩擦系数和低磨损率。

C07. 空间材料科学技术-41**快速凝固对三元 Fe-Ni-Ti 合金固态相变与服役性能的影响**李星吾*^{1,2}、阮莹²、李浩然²、武博文²、魏炳波²

1. 西北有色金属研究院

2. 西北工业大学

快速凝固不仅影响液固相变过程，也对后续的固态相变起到调控作用。采用电磁悬浮和铜模吸铸技术研究了三元 Fe-Ni-Ti 合金的组织形成与服役性能。电磁悬浮条件下，三元 Ti_{42.3}Ni_{36.1}Fe_{21.6}合金的最大过冷度达到 230 K，初生 Ti(Fe, Ni)相的枝晶生长速度达到 185 mm/s。快速凝固促使初生相的溶质分布更加均匀，其后续的脱溶分解受到抑制，基体中 Ti₂Ni 和 Ni₄Ti₃ 两种析出相的含量减少，均匀且致密钝化膜的形成使合金的耐腐蚀性能显著提高。铜模吸铸条件下，三元 Fe_{66.5}Ni_{17.6}Ti_{15.9}合金中初生 δ-Fe 相中发生强烈的溶质截留，在降温过程中其转变为 α-Fe 相并析出大量层片状 Fe₂Ti 相。随着冷却速率的增大，过饱和 δ-Fe 相的增多促使更多的 Fe₂Ti 相析出，在第二相强化与细化强化作用下，合金的压缩强度达到 2640 MPa。

C07. 空间材料科学技术-42**铝基复合材料及其在航天领域的应用**

张学习*、耿林

哈尔滨工业大学

以铝基复合材料为代表的金属基复合材料，因其轻质、高强、高刚、多功能、高可靠性等优异的性能，可满足航空航天等领域的苛刻使役要求，近年来在国内外已均获得越来越多的应用。设计自由度大、性能可剪裁是金属基复合材料的特点和优势，有效契合了航天领域小批量、多品种、高性能以及结构-功能一体化的需求。作为一种仍在发展的新型材料，铝基复合材料设计-制备-成形-改性系列技术是应用的基础。报告总结了哈尔滨工业大学在该领域的研究进展。在设计方面，针对影响因素繁多，影响规律不易把控，进而导致长期以来都普遍采用个案攻关、循环试错的传统研究方法应对新产品研发，从而造成了研制周期长、成本高、适应性差、应用范围有限等问题，采用多尺度模拟辅助试验方法，对复合材料组分进行了针对性设计，指导复合材料制备。在制备技术方面，针对组织控制和缺陷控制难题，采用改进的液相制备技术，实现了大尺寸复合材料的高质量稳定制备。在成形技术方面，针对大尺寸薄壁类构件成形难题，采用热模拟结合工艺试验，实现了复合材料大尺寸型材的精确成形。针对复合材料强韧性匹配问题，通过强化

热处理与尺寸稳定化热处理，实现了复合材料“形”“性”双控。最后针对近年来航天领域对轻质复杂薄壁构件的实际需求，介绍了铝基复合材料的实际应用情况。

C07. 空间材料科学技术-43

二维结构材料物性的高压调控研究

王霖*

燕山大学

压强，是独立于维度和温度的一个重要基本物理参量。在极高压强（简称高压）条件的作用下，凝聚态物质不仅会发生体积的压缩，其晶体结构、分子结构、元素的价态、电子结构、甚至电子的自旋都可能发生变化，同时伴随着各种常压条件下所没有的新奇物理现象的出现^[1]。因此在高压实验过程中通过对压力的调控，可以驱使凝聚态物质从一种结构向另外一种结构发生转变、从绝缘体向半导体甚至金属的转变、从正常态向超导态的转变，等等，纷繁多样的物理和化学变化。二维结构材料的一个共同特点是具有很强的各向异性。在高压下其层间压缩性会比其层内压缩显著，因此在高压下的物性比较容易操控。在此次报告中将汇报我们利用原位高压对二维过渡金属卤化物等的晶体结构、光学形质、电学输运和磁性等的调控^[2-5]。

参考文献：

[1] Mao et al., Review of Modern Physics 2018, 90, 15007

[2] Rahman et al., Materials Today Physics 2022, 25, 100698

[3] Rahman et al., Materials Today Physics 2023, 34, 101091

[4] Li et al., Advanced Materials 2022 34, e2201209

[5] Zhang et al., Nature Communications 2022, 13, 6938

C07. 空间材料科学技术-44

月壤玻璃地质时间尺度的超凡老化效应

陈自强¹、赵勇¹、池祥¹、闫玉强¹、沈杰²、邹敏杰¹、赵少凡³、刘明³、姚伟³、
张博¹、柯海波¹、马秀良¹、白海洋^{1,2,3}、杨孟飞³、邹志刚^{3,4}、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

4. 南京大学现代工程与应用科学学院

物理老化是玻璃研究领域长期以来的热点问题，但由于实验时间的有限性，其长期效应尚不清晰。在这项研究中，我们从嫦娥五号任务返回的月球风化层月壤中挑选了 5 个典型的直径约为 20 至 53 微米的玻璃颗粒，通过微纳力学测试和透射电镜结构表征揭示了月壤玻璃的超凡老化效应。研究发现，地质时间尺度的老化会导致月壤玻璃样品的模量显著增大，最大升幅超过 73.5%，而其对硬度的影响则要小得多，即老化过程中其杨氏模量与硬度的演化发生了解耦。这种特殊的老化效应主要归因于漫长的老化时间和特殊月球条件下自然选择的复杂玻璃成分和结构（符合高熵和微量元素掺杂标准）。本研究可为面向辐射防护和空间应用的高性能玻璃材料的研发提供指导，也可为玻璃材料的性能调控提供帮助。

C07. 空间材料科学技术-45**医药微纳材料的空间研究展望**毛宇^{1,2}、顾宁^{*1,2}

1. 南京市血管信息与健康工程医学重点实验室，南京鼓楼医院，医学院，南京大学
2. 江苏省生物材料与器件重点实验室

我国在医药微纳材料领域具有深厚的研究基础，是全球最活跃也是最有影响力的国家之一。过去几十年医药微纳材料虽然在合成研究、应用开发、临床转化等方面取得了全面发展，但临床转化严重不足，高端的纳米药物甚至一些传统的纳米药物都处于零的阶段。一方面，是对相关医药微纳材料合成机制的研究和理解不够深入，导致产品性能难以控制；另一方面，是对于纳米药物的开发缺乏创新。医药微纳材料的空间研究，为我国攻克微纳材料合成的机理及技术难题，开发创新型纳米药物创造了优越的条件。利用空间站提供的无重力、无沉淀分层、无浮力对流的常稳态环境，在无搅拌、超声、震荡等外力干扰的条件下，研究微纳材料合成过程中物质扩散、晶核形成、晶体生长等过程的机制及关键控制因素。形成新的空间材料合成方法及理论体系，对于指导地面合成相关难题的解决具有重要意义。

C07. 空间材料科学技术-46**多元铁基合金的深过冷凝固行为研究**

王自东*

北京科技大学

采用气动悬浮和静电悬浮处理技术，研究了 Fe-Cr-Ni-C 和 Fe-Ti-Si 过冷熔体在无容器条件下的枝晶生长。Fe-Cr-Ni-C 系合金获得了 0.15Tm 的最大过冷度，随着过冷度增大，Fe-Cr-Ni 合金中的 γ 相由粗大树枝晶转变为等轴晶，晶粒得到明显细化。无容器凝固 Fe-Ti-Si 合金中存在富铁枝晶组织和共晶组织，受过冷度、表面张力各向异性参数等因素影响，树枝尖端发生分裂，树枝晶有向“海藻”生长形貌发生转化的趋势。

C07. 空间材料科学技术-47**太空生产与应用：先进制造与材料**潘明祥^{*1}、张博¹、胡金亮¹、赵勇¹、陈自强¹、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. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院

自 1969 年前苏联在太空环境下进行的第一次微重力材料科学实验之后，到 1980 之前的 10 多年时间内，苏美欧日等国家和地区的科学家们经过在飞船、天空实验室、卫星、空间站等空间飞行平台上的多次探索实验，使得人们开始憧憬着能很快在太空环境下进行先进的和高质量的材料生产。但在此后一直到本世纪初的 20 多年时间内，经过在空间站、航天飞机、卫星等空间飞行平台上进行的更大量的实验，获得的结果使得人们冷静地认为，对空间微重力环境下的材料形成过程的科学认知与进行材料生产所需的技术、过程控制能力等还存在相当大的差距。而随着在国际空间站的建造期期间与建成之后进行的越来越多的空间微重力环境下材料科学探索与规律性研究不断深入和空间实验技术与能力的发展，特别是美国宇航局推出的小企业创新研究/小企业技术转让 (SBIR/STTR) 计划，从资金、空间资源和技术等多层面刺激人们努力从已有的空间实验成果中探寻可以转化为产品和应用的机会与能力的可能性。本报告将以美、俄等空间技术先进的国家为例，介绍在过去特别是近十多年来基于为在太空生产与应用而开展的先进制造与相关材料加工方面的工作进展与展望。

C07. 空间材料科学技术-48**液态 Zr-Nb 合金的热物理性质与结构研究**

左冬冬、常健*、王庆、王海鹏

西北工业大学物理科学与技术学院

采用静电悬浮技术和分子动力学方法研究了液态 $Zr-x \text{ wt.}\% \text{ Nb}$ ($x = 1.0, 2.5, 6.0$)合金的热物理性质。值得注意的是, 实验获得的最大过冷度分别为 335 K、311 K 和 326 K。相应地, 在液相线温度(TL)时, 密度分别为 6.20、6.22 和 6.26 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。对应的温度系数分别为 2.61×10^{-4} 、 2.75×10^{-4} 和 $2.84 \times 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 。测试与模拟结果吻合较好。并且, 摩尔体积(V_m)、热膨胀系数(α)和扩散系数(D)被计算。对双体分布函数、配位数(CN)和径向分布函数的分析揭示了原子结构随温度的演化规律。

C07. 空间材料科学技术-49**静电悬浮条件下富 Zr 型 Zr-V 合金深过冷快速凝固**

郑晨辉、刘丁楠、廖晖、胡亮、王海鹏*

西北工业大学

采用静电悬浮技术对二元 $Zr_{100-x}V_x$ ($x=8.6, 16.5, 30$)合金进行了深过冷快速凝固实验, 获得最大过冷度分别达 364 K (0.18 T_L), 405 K (0.21 T_L), 375 K (0.21 T_L)。其中 $Zr_{91.4}V_{8.6}$ 和 $Zr_{83.5}V_{16.5}$ 在液固转变过程中都只出现一次再辉, 对于 $Zr_{70}V_{30}$ 合金则出现随过冷度增加由两次再辉转变成一次再辉, 临界过冷度为 300 K。对于 $Zr_{91.4}V_{8.6}$ 和 $Zr_{83.5}V_{16.5}$ 合金测量的初生(Zr)相生长速度分别在 119 K 和 201 K 处出现由溶质过冷控制转变为热过冷控制的拐点。对于 $Zr_{70}V_{30}$ 合金在两次再辉凝固路径下, 当一次过冷度在 65-244 K 范围内时, 获得的二次过冷度将会超过 253 K, 此时剩余液相将会以非规则共晶的形式生长; 而当二次过冷度小于 253 K 时, 剩余液相则以规则层片共晶的形式生长。在一次再辉凝固路径下, $Zr_{70}V_{30}$ 体中先发生(Zr)/ V_2Zr 非规则共晶的生长, 随后转变成(Zr)枝晶生长和剩余液相生成(Zr)/ V_2Zr 规则层片共晶组织。三种合金的维氏显微硬度都呈现随过冷度增大先增大后减小的二次关系。

C07. 空间材料科学技术-50**月球玻璃在空间环境下的形成与演化**

沈来权*

中国科学院物理研究所

月球等无大气天体表面会频繁遭受(微)陨石撞击、太阳风辐照等空间活动的风化改造作用, 相应会孕育产生各种类型的玻璃物质。这些可以稳定存在数亿年的月球玻璃物质记载保存了月球表面的历史演化信息。我们在前期揭示我国探月工程首批月球返回样品嫦娥五号月壤中不同形成机制的玻璃物质的基础上, 进一步对月球玻璃珠的显微结构进行了系统表征和分析, 以期破解其所记录的月表太空风化信息。我们发现, 伴随着月球撞击玻璃的形成, 会在玻璃珠内部产生粒径在几十至上百纳米量级的纳米金属铁颗粒; 在玻璃珠凝固形成后, 在漫长的空间环境改造下, 玻璃珠会发生结构演化并在表面原位析出尺寸在几个纳米大小的纳米铁颗粒。月壤中纳米金属铁的存在会显著改造月表的光谱特征, 也因此理解纳米金属铁的形成机制对理解月球的光学性质变化至关重要。我们通过对大量月球玻璃内纳米金属铁颗粒的粒径尺寸、分布规律、显微特征等分析发现(微)陨石撞击和太阳风辐照在纳米金属铁的形成过程中都发挥着关键作用, 具有不同光谱改造效应的大、小尺寸纳米铁颗粒分别由撞击和辐照作用主导。这些发现对理解空间环境对月表物质的改造具有重要意义, 也为理解和预测无大气天体在不同空间环境下的太空风化、光谱变化等提供科学指导。

C07. 空间材料科学技术-51**静电悬浮条件下液态 Ni-Ti-Al 合金快速凝固过程研究**王磊^{1,2}、胡亮²、Geun Woo Lee¹、魏炳波*²

1. 韩国标准化科学研究院
2. 西北工业大学物理科学与技术学院

Ni₂TiAl 金属间化合物具有高熔点、优异的抗氧化性以及卓越的强度和硬度。然而，与许多其他化合物一样，有限的室温延展性限制了其应用。快速凝固技术可以细化晶粒结构并减少偏析，从而改善材料性能。因此，研究 Ni₂TiAl 化合物在快速凝固过程中的凝固组织形成及其与力学性能的关系有着重要意义。

本文采用静电悬浮无容器和落管微重力技术研究了深过冷液态 Ni₆₄Al₁₉Ti₁₇ 合金中 Ni₂TiAl 金属间化合物的枝晶生长动力学和微观组织演变机制。研究发现，初生 Ni₂TiAl 枝晶的生长速度与熔体过冷度呈幂指数关系，在最大过冷度 254 K (0.16T_L) 处达到 80 mm/s。随着过冷度的增加，合金凝固路径由初生 Ni₂TiAl 枝晶生长及(Ni₃Ti+Ni₂TiAl)共晶形成转变为 Ni₂TiAl 和 Ni₃Ti 相继生长。微重力条件下的高冷速有效抑制了 Ni₂TiAl 相在辐射冷却下发生的固相转变。由于细晶强化效应，在这两种条件下形成的 Ni₂TiAl 相的纳米压痕和维氏硬度性能均显著增强。此外，尽管静电悬浮条件下 Ni₂TiAl 相的晶粒尺寸更大，但得益于固态相变强化，其显微硬度高于落管条件下凝固的 Ni₂TiAl 相。

C07. 空间材料科学技术-52**空天高端装备用异形环件轴向/径向顺序轧制成形机理**郭良刚*¹、罗雪宝¹、白文平²、戚大涛²、陈洪波²、钱进²

1. 西北工业大学
2. 江苏翔能科技发展有限公司

空天高端装备用复杂异形环件，通常采用多套异形轧辊模具的多工步多火次径向轧制，实现其异形截面轮廓的精确成形，该方法因需要多套异形轧辊模具，往往成本较高，工艺控制过程复杂，同时也没有充分发挥数控径轴向环轧设备轴向轧辊的作用。本文基于经典的数控径轴向环轧设备，提出一种先锥辊端面轧制使得矩形环坯在两端聚料，形成异形中间坯料，然后通过异形轧辊模具的的径向轧制，成形复杂异形环件的新型环轧工艺技术。采用理论解析、数值模拟、工艺试验相结合的方法，首先建立了该成形过程的智能仿真有限元模型并验证了其预测精度，阐明了该新型环轧技术的工艺原理；其次，发明了该新型环轧技术坯料设计与优化方法；最后，阐明了关键工艺参数对锥辊端轧过程稳定性、锥辊端轧聚料效果、成形精度等的影响规律。本文研究相关研究结果为异形环件轧制提供了一种新的思路和技术途径，进一步丰富和发展了环件轧制成形理论和技术。

C07. 空间材料科学技术-53**极端环境下月壤基材料的可控成型技术研究**

张弦*

1. 钱学森空间技术实验室，中国空间技术研究院

以月壤为原料的原位增材制造技术可以显著降低月球前哨站的建造成本。然而，由于月面极端环境（高真空、强辐射、高低温、低重力）和月壤基陶瓷材料的异型、多组分等特点，导致进一步提升原位成型试样的致密度和力热性能仍然存在巨大挑战。针对这一问题，我们首先深入研究了嫦娥五号月球样品的物化性质，在此基础上搭建了一套模拟聚焦光斑的月壤基材料选择性熔融成型原理样机，系统研究了月壤基材料在打印过程中关键工艺参数（光斑尺寸、聚光功率、扫描速度、扫描间距等）对试样成型的影响，并深入探讨高真空等极端环境对月壤打印成型的影响。研究表明，通过调节聚焦光斑线能量密度（27 ~ 50 J/mm）可以获得宽深比适中（~1）且形貌规则的熔道，相对密度~65%。在此基础上，调节熔道重叠率在（20%~45%）可以获得平整度高、没有明显裂缝的 3D 打印层，相对密度~ 70%。通过打印层的逐层

沉积实现月壤试样的成型 ($5 \times 5 \times 3 \text{ cm}^3$), 并通过参数优化获得高致密度, 且具有优异力热性能的月壤打印试样, 满足月面承重结构的力学要求。本项研究为优化使用月壤进行原位增材制造所涉及的参数和过程提供了关键数据, 为未来的月球基地建造提供技术支撑。

C07. 空间材料科学技术-54

航天装备超低摩擦薄膜技术与应用

高凯雄*、张斌、张俊彦

中国科学院兰州化学物理研究所

航天装备关键运动部件润滑失效已经成为制约航天飞行器寿命和可靠性的瓶颈, 发展适用于航天装备工况的高可靠性、低摩擦、长寿命的润滑材料与技术, 对发展长寿命航天装备具有十分重要的意义。本文通过材料结构与超低摩擦表界面配副设计, 开发了两类航天装备超低摩擦薄膜材料体系, 研究了氢含量、真空度、原子氧、配副对薄膜作用机制及摩擦学性能影响: (1) 氢含量和真空度是影响超低摩擦薄膜真空摩擦学性能的主要因素; (2) 原子氧辐照前后, 薄膜厚度、氢含量几乎没有变化。但薄膜中奇元环比例降低, 薄膜中的 sp^2 杂化碳变少, sp^3 杂化碳含量增多; (3) 经过原子氧暴露后, 薄膜中 C-O 键 (羟基) 降低, C=O 键 (羧基) 明显增加, 然而, 以氧化物形式存在的碳原子的总比例并没有因为原子氧暴露而明显增加 (从 11.3% 只增加到 13.0%); (4) 薄膜与二硫化钼薄膜配副在真空中表现出超低摩擦, 并将该体系应用在航天装备实际运动部件中。以上结果为超低摩擦固体润滑薄膜航天装备应用提供理论和实验基础。

C07. 空间材料科学技术-55

极端环境 X 射线原位 CT 技术在空间材料领域的应用

戴峰*

南京工业大学

空间材料的使用涉及深空、深海等极端环境。如何评价材料在空间环境下的服役行为和结构变化, 是近年来科研人员持续探索的方向。材料表征技术贯穿材料研发、工程应用、服役评价全过程, 是开展材料研究的重要方法和手段。近年来, 随着空间材料技术的不断发展, 现有表征仪器已无法满足材料前沿研究需求, 亟需开发三维、原位、可检测材料深部的表征仪器与技术。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描 (CT) 技术, 结合亚微米级精密控制转台和机械控制, 实现微米级高分辨 X 射线 CT 成像, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像; 突破了极端环境与 CT 耦合技术, 独创采用非接触式加热模式, 可实现空间材料在超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀等极端服役环境下材料三维原位表征。为三维量化研究极端环境下关键材料与部件组织与缺陷演变规律提供了有力手段。高性能原位 X 射线 CT 技术的发展, 极大提升了空间材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C07. 空间材料科学技术-56

改性硅树脂结构设计及应用研究

曹庆元、钱汉琦、姜波*、刘丽、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. 空间材料科学技术-57**形状记忆复合材料空间展开结构设计及其验证**

刘立武*

哈尔滨工业大学

形状记忆聚合物作为一种典型的智能软材料，在特定的外界激励下（如热、电、光、磁等）能够从预先设定的临时形状恢复到初始形状，在航天航空、生物医学、智能仿生、微机械工程等领域具有广泛应用前景。报告人建立了形状记忆聚合物及其复合材料的本构理论，研究了形状记忆复合材料的后屈曲行为。提出了基于形状记忆聚合物复合材料的空间可展开结构设计方法，设计了铰链、桁架、天线、豆芽杆等多种空间可展开结构和锁紧释放机构，完成了振动、冲击等力学性能，以及热真空性能、热循环性能和地面展开功能验证。设计的形状记忆折叠锁定/多段伸展结构、国旗锁紧展开机构已在天问一号火星探测器重点型号中应用。

C07. 空间材料科学技术-58**面向空间环境的非晶合金增材制造研究**刘明*¹、周传昆²、曹莹泽¹、赵少凡¹、白海洋³、汪卫华^{1,3}

1. 钱学森空间技术实验室
2. 西安交通大学
3. 中国科学院物理研究所

空间环境的高真空、微重力等条件不仅使得众多材料表现与其在地面环境下有较大的性能差异，在增材制造领域也给工艺以及装置设计等带来巨大挑战。研究在空间环境下的金属增材制造技术，对深空探测、地外原位制造等重大战略目标的实现，具有重要意义。非晶合金，不同于传统的金属材料，不仅在力、热、磁等方面，与常规的金属合金有较大的差异，在空间环境下，其也表现出特殊的性能。通过对比金属以及非晶合金在相同制造工艺参数条件下的制件，我们发现了非晶合金表现出了更强的空间增材制造适应性；利用非晶合金本身的热塑成型能力，通过脉冲电流的方式，可实现金属材料的热塑挤出成型。我们对比了不同工艺参数对热塑挤出成型工艺的影响，研究了影响热塑成型工艺的关键参数。对未来实现金属低功率、高精度地外条件下的金属增材制造提供基础。

C07. 空间材料科学技术-59**用于空间环境气体观测的 FCD 背景纹影成像技术**周传昆¹、赵少凡*^{2,3}

1. 西安交通大学未来技术学院
2. 中国空间技术研究院钱学森实验室
3. 西安交通大学机械工程学院

纹影成像是一种观察透明介质折射率变化的手段。相比于传统纹影成像，背景纹影成像更加轻便、易操作、可以获得定量的背景位移数据从而重建物理场，有助于观察制造过程中的气体或透明液体行为且便于搭载火箭进入太空服务于空间实验。在此应用背景下，将 Moire 效应引入以二维周期图案为背景的 FCD（Fast Fourier Demodulation）纹影成像技术，相比于直接应用棋盘图案提高了成像的灵敏度，实现了背景位移数据的提取和修正，并检验了求解结果的准确性。

C07. 空间材料科学技术-60**晶体生长取向与易磁化轴的位向关系对 Fe 基合金磁致伸缩效应的影响机制研究**

周超*

西安交通大学

磁致伸缩材料能够实现电磁能和机械能的转换,广泛应用于高端设备的核心部件(换能、驱动、传感)。已有研究表明,调控 Fe 基合金的晶体生长取向与易磁化轴的位向关系,可以改变其磁致伸缩效应。基于 Fe 基合金(FeGa, FeAl)晶格与磁畴的耦合关系,我们提出利用元素微量掺杂使合金沿<100>择优取向、再利用 90°磁畴翻转实现大磁致伸缩效应的研究。将利用密度泛函计算不同元素掺杂对 Fe 基合金不同晶面的表面形成能的影响及对晶体生长取向的调控作用,通过电弧熔炼、定向凝固、熔体快淬等方法制备 Fe 基合金,并阐释“掺杂元素-晶体生长取向-磁畴取向分布-磁致伸缩效应”的关联机制,在 FeGa 和 FeAl 两个材料体系中设计并制备大磁致伸缩材料。

C07. 空间材料科学技术-61**面向地外生存的月球人工光合成材料与系统研究**

姚颖方*

南京大学

地外生存作为太空探索的核心,是人类实现长期太空飞行、地外长期居住和移民的基本能力。将呼吸产生的二氧化碳转换为氧气,实现密闭空间的废弃资源再生,可大大降低载人航天器的物资供应需求。同时利用月球、火星等地外大气环境丰富的 CO₂ 和 H₂O 原位资源生产氧气和燃料,可满足人类在其它天体上长期生存和深空往返运输的物质供给,是支撑可承受、可持续的载人深空探索的重要基础¹。然而现有美国、日本发展的 Sabatier 法、Bosch 法等往往存在能耗高,效率低等问题,无法满足地外生存需求。因此,亟待发展基于地外太阳能、高效、低能耗的原位物质能量转换材料科学,阐明转换过程中的物理化学机制,指导开发新型地外原位资源利用技术,有力支撑载人航天发展²。

本研究面向月球和火星矿产和能源资源,发展高效人工光合成材料设计理论、制备方法和微结构调控技术;针对月球、火星地外特殊能量场,发展地外多元能量同步转换技术,有效提高太阳能光化学转换效率;针对地外极端环境,阐明地外人工光合成材料的热稳定性、抗光腐蚀及抗辐射腐蚀特性对光化学转换性能的影响规律;并构建高效地外人工光合成系统,研制空间实验装置,开展空间环境验证,推动在轨验证实施,为应用系统研制和优化提供设计依据。本研究发展基于模拟月壤的地外人工光合成材料及其可控制备技术,构建高效地外人工光合成材料体系,实现太阳能转换效率达到 5%以上;发展地外人工光合成系统,日产氧速率达到 0.86 kg/(m² day),为地外生存提供一条变革性的技术路线。

参考文献:

1.Y. F. Yao*, L. Wang, X. Zhu, W. Tu, Z. Zou*, etc. Extraterrestrial Photosynthesis by Chang'E-5 Lunar Soil, *Joule*, 6, 1-7 (2022).

2.L. Q. Yang, C. Zhang, X. W. Yu, Y. F. Yao*, Z. S. Li, C. P. Wu, Wei Yao*, Z. G. Zou*, Extraterrestrial artificial photosynthetic materials for in-situ resource utilization. *Nat. Sci. Rev.* 8, nwab104 (2021).

C07. 空间材料科学技术-62**质子辐照对 2:17 型钐钴永磁材料微观结构和磁性能的影响**

于永生*

哈尔滨工业大学

空间粒子辐照主要来源于地球辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线,由质子(~85%)、 α 粒子(~12%)、电子(~2%)以及少量重离子(~1%)组成,而能量范围从几 keV 到几百 MeV、占比最高的质子对航天器影响最大[3]。目前,具有低剩磁温度系数和高使用温度的 2:17 型钐钴(Sm-Co-Fe-Cu-Zr, 可简写 Sm₂Co₁₇)高性能

能稀土永磁材料已广泛应用于空间机械臂和各种空间展开机构的驱动马达。因此，深入研究空间极端环境下质子辐照 2:17 型钐钴稀土永磁材料的微观组织结构和磁性能的演化规律及机制，对于保障我国航天器安全，顺利开展空间活动具有重要意义。

近期，课题组利用哈尔滨工业大学承建和运行的国家大科学装置“空间环境地面模拟装置”开展了质子辐照 2:17 型钐钴稀土永磁材料及钕铁硼薄膜的研究工作。研究结果显示 2:17 型钐钴稀土永磁材料在受到能量为 300 MeV、剂量为 1×10^{16} 的质子辐照后矫顽力降低 0.5 kOe。钕铁硼薄膜受到能量为 300 MeV、剂量为 1×10^{16} 的质子辐照后顽力降低 2.6 kOe。以上的先期研究结果表明，稀土永磁材料在宇宙空间中受到高能粒子辐照，矫顽力等磁性能将会变化，进而影响永磁材料的磁能输出，可能会进一步影响永磁驱动电机的输出功率。

C07. 空间材料科学技术-63

卫星展开机构用热刀切割器环境失效机理分析

乔丽、陈炜、马鹏翔、王鹏*

中国科学院兰州化学物理研究所

鉴于热刀切割器解锁冲击小、无污染、可重复使用等优点，近年来在卫星展开及释放机构中获得了越来越多的应用。热刀切割器是利用图案化电阻 Pt 薄膜将电能转换为热能，加热刀片后熔断张紧绳索从而实现天线、帆板等机构的展开或释放功能。然而，地面试验研究中发现，热刀切割器大气环境下切割行为与真空存在差异且切割次数有限，这是由于图案化电阻 Pt 薄膜高温环境下结构演化导致的电学性能退化造成大气环境使用寿命下降。基于此，本文选取现有型号热刀切割器图案化电阻薄膜，制备不同厚度 Pt/Ti 膜，重点考察大气或真空不同环境下薄膜表面形貌、成分、晶体结构随温度的变化规律及其对电阻率特性以及力学性能的影响。研究发现，高温环境下 Ti 颗粒扩散到 Pt 膜中，表面 Ti 含量水平与 Ti 层厚度比例呈正相关。高温退火后，纯 Pt 薄膜的颗粒团聚和再结晶加剧，而引入钛附着层可以抑制脱湿。在真空环境下服役时，随着服役温度的升高，Ti 与 Pt 的合金化逐渐加剧，薄膜主导相由 Pt 逐渐变为 Pt₈Ti，再变为 Pt₃Ti。此外，由于 Ti 层上的 Pt 层可以通过变形来缓解部分拉伸应力，因此 Ti 层的加入可以降低薄膜的残余应力。而在大气高温环境服役时，Ti 过渡层从底层扩散至表面与 Pt 形成合金，同时部分 Ti 扩散至表面被氧化，合金化与氧化导致薄膜电阻率先升高后降低。并且充当 Pt 薄膜与基底之间“粘合剂”的 Ti 过渡层扩散耗尽，导致 Pt 薄膜与氮化硅基底结合力降低，最终导致图案化薄膜热刀大气高温环境下切割寿命下降。

C07. 空间材料科学技术-64

外太空悬浮难熔合金的凝固收缩/变形动力学与表面枝晶/共晶生长研究

廖晖、王海鹏、魏炳波*

西北工业大学

空间微重力实验获得了出现显著缩孔的 Nb-Si、Zr-V 合金球形样品。研究发现：如果来自两个独立形核点的生长晶粒相遇，那么在交界处的残余液体凝固通常会产生一个沟状的缩孔。同时，孔状缩孔常出现在来自三个或多个形核点生长晶粒的相交处。对微重力条件下耦合热场与流场的液态降温过程进行了模拟，建立了一个与空间实验加热方式相同的 3-D 模型，研究了液态合金处于不同温度时的温度场和流场。此外，建立了一个 2-D 模型进一步研究了微重力条件下耦合热场与流场的液固相变过程，发现在开始凝固后液滴内部的流场会增大 1~3 个量级。微重力状态下合金剩余液相表面枝晶的生长方向不受限制。通过对形核热力学与生长动力学的分析，解释了 Nb-Si、Zr-V 合金形核的差异及初生相微观组织的变化。同时，微重力和无容器状态还会诱导解耦效应，导致深过冷 Nb-Si 难熔合金中两个共晶相各自独立形核并长大。此外，极性非均质形核驱动的流体流动模式刺激了合金液滴在高生长速度下出现拉长形的表面宏观变形。

C07. 空间材料科学技术-65**六元 CoCrCuFeNiAlx 高熵合金的凝固过程控制与物理性质研究**

李文慧、王伟丽*

陕西省西安市西北工业大学理学院应用物理系

高熵合金因具有优异的力学性能，催化和抗腐蚀等性能而受到广泛关注。近年来，研究者们探索了各种合金体系，以确定具有改进性能组合的高熵合金系统。其中，“FCC+BCC 双相结构”高熵合金以有效协调强韧性及增强抗腐蚀性能等特点逐渐走进研究者的视野。

采用真空电弧熔炼装置制备了四种 CoCrCuFeNiAlx ($x=0.25,0.5,1,2$)高熵合金。实验表明，随着 Al 含量的增加，合金的相结构由 FCC1 相+ FCC2 相(富含 Cu)转变为 FCC 相(富含 Cu)+ BCC 相(富含 Fe,Cr)+ B2 相(富含 Al,Ni)。微观结构由粗大的树枝晶向花瓣状枝晶转变，晶粒尺寸也随之减小。此外，Al 元素的添加使得合金的显微硬度由 243.5 HV 增加到 591.6 HV，密度则由 7.947 g/cm³ 减小到 6.716 g/cm³。四种合金热膨胀系数随温度变化表现出相似的变化趋势，当温度低于某一临界值时，热扩散系数随温度的升高而增大；随后则呈现下降趋势。而四种合金的热扩散系数随温度的变化则表现出不同的变化特征。具有 FCC 相组成的 CoCrCuFeNiAlx ($x=0.25,0.5$)高熵合金的热扩散系数明显低于具有 FCC+BCC 双相结构的 CoCrCuFeNiAlx ($x=1,2$)高熵合金。这主要是由于 Al 含量的增加不仅使合金发生明显的相转变，还促进了合金元素偏析，增大了晶格畸变。因此，合金的晶体结构、相变、元素偏析、晶格畸变/聚变焓熵及晶格振动频率等因素共同影响着 CoCrCuFeNiAlx 合金的热膨胀和热扩散系数。

C07. 空间材料科学技术-66**电火花增材制造 ER5183 铝合金组织特征及其高温拉伸性能**

耿晨曦、李兴冀、耿洪滨*

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

5183 铝镁合金是一种单相铝合金，具备优良的耐蚀性、良好的可焊性和较高的比强度，目前广泛应用于航空航天、车辆船舶、压力容器以及核工业等多个领域。电火花沉积与刻蚀复合工艺是一种新型的金属增材、减材一体化制造工艺方法，它以具有高能量密度的数控脉冲电火花为热源将金属丝熔化成熔滴进行点对点式沉积，而后反转极性对沉积态样件进行电火花原位刻蚀加工以达到预定的几何尺寸要求。该金属增材复合工艺能量输入可控，制造的产品内部组织均匀致密，具有表面质量和尺寸精度高、成本低且生产效率高的优势，在高精度大尺寸筋板增强薄壁结构件如空间站舱体、火箭承力筒等的制造方面有重要应用价值。

本研究选用 ER5183 铝镁合金丝材，使用电火花沉积增材制造方法制备了具有不同熔覆沉积层高度且宏观形貌均匀的板状试样，在 293K 至 773K 区间内选取多个温度位点进行了拉伸试验，应变速率范围为 1×10^{-4} /s 至 1×10^{-1} /s，并通过 XRD、SEM、EBSD 和 TEM 对样品的显微结构进行了表征。结果表明：沉积态合金的微观结构由直径约 60 μm 的等轴颗粒组成，无明显的织构取向，且室温力学性能优于退火后的商用 5454 铝镁合金性能；随着变形温度从室温（293K）提高到 773K，沉积态合金的极限抗拉强度 UTS 从 292 MPa 下降到 57 MPa，伸长率 E 从 37%上升到 61%。此外，本研究计算了沉积态合金在不同温度区间的应变速率敏感系数 m ，结果表明：合金在中间温度区域（293K-473K）的应变速率敏感性相对较低（ m 小于 0.034），当实验条件转向高温（573K-773K）时其应变速率敏感系数提高到 0.111 ± 0.003 。结合显微结构表征和激活能的计算结果，可以分析得出关于电火花增材制造 ER5183 铝合金的高温变形机理：在中间温度（293K-473K）下，拉伸试样的微观结构显示出典型的位错缠结和动态回复特征，且位错的重排伴随着亚晶粒的形成；在较高的温度下（573K-773K），位错密度和织构强度下降到所有实验条件下的最低水平，变形机理为由热激活控制的扩散机制，其热激活能 Q 约为 162 kJ/mol。

C07. 空间材料科学技术-67**亚稳液态包晶合金中相选择诱发多种凝固模式的关联性研究**

吴宇昊*、苏静雯、段居中、王锦研

西安科技大学材料科学与工程学院

包晶合金的亚稳凝固机理研究属于凝固科学的前沿课题，非平衡状态下初生相和包晶相竞争形核诱发多种凝固模式之间的关联性和相关机理研究有待继续深入。本文选取二元 $\text{Ti}_{62}\text{Ni}_{38}$ 过包晶合金作为研究对象，借助经典形核理论和 CCD 辅助的电弧熔炼技术，理论预测和实验验证了激冷铜模表面上 $\text{Ti}_{62}\text{Ni}_{38}$ 合金液滴的相选择和组织演变规律。研究发现，当合金液滴直径大于 3.3 mm 时，合金液滴底部与激冷铜模相接触，过冷度和冷却速率非常大，亚稳包晶 Ti_2Ni 相的形核能力较强进而优先从底部直接形核和生长，而其余区域的过冷度和冷却速率相对较小，容易生成具有定向凝固特征的包晶凝固组织。一旦合金液滴直径低于 3.3 mm 时，液滴底部的深过冷和高冷速有助于包晶相的领先形核，中部区域稍微减小的过冷度和冷却速率使得组成相的形核能力相当从而促进初生相和包晶相的亚稳耦合生长，而剩余区域剧烈减小的过冷度和冷速使得包晶凝固容易发生。当逐渐远离液滴底部，过冷度和冷却速率均增大，“典型包晶凝固 → 初生相和包晶相的耦合生长 → 亚稳包晶相的直接形核”的凝固模式转变将会发生，理论预测和实验结果基本一致。

C07. 空间材料科学技术-68**大体积金属电磁悬浮凝固控制及 Zr 基非晶复材的制备**

黎舸鑫、郭昊非、王海鹏*、常健

西北工业大学

电磁悬浮无容器处理技术具有悬浮和熔炼耦合的特点，在快速凝固及先进材料制备等研究领域具有重要作用。针对当前电磁悬浮系统主要应用于毫米级颗粒金属材料的研究现状，以提高悬浮性能及探索大体积金属悬浮和凝固特性为主线，自主研发了超高真空大体积电磁悬浮制造装置，系统探索了电磁悬浮制造过程联动机制、多种优化构型电磁线圈悬浮性能、大体积固态金属的悬浮行为和材料悬浮制造过程的凝固规律，实现了大体积 Al、Cu、Ti 和 Al-Si 合金悬浮、加热、熔化和悬浮凝固，并设计了氦气换热装置，提升了悬浮熔体强制冷却效果，实现了一种含有 B2-ZrCu 高温亚稳相的 Zr 基三元合金的非晶复合材料的悬浮制备。

C07. 空间材料科学技术-69**微重力生长 InSe 半导体晶体及微观结构调控研究**

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”，在超快电子器件、光电子器件应用方面表现出巨大的发展潜力，在国际上引起广泛关注。然而，InSe 晶体力学性能非常软，在制备过程中易受复杂热应力和机械应力的作用，导致内部通常存在高达 $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 的位错密度，它们将成为散射中心降低材料的载流子迁移率，进而严重影响器件的性能甚至寿命。因此，在空间站微重力环境下开展 InSe 晶体生长以获得高质量的晶体材料显得非常重要。

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，不仅验证了地面装置生长 InSe 单晶的可靠性和支撑能力，而且在国际上率先在微重力环境下成功生长了 InSe 晶体，获得了众多自发成核长大的 InSe 单晶颗粒。通过剥离获得了片状单晶，X 射线衍射测试确认晶体具有标准的 P63/mmc 结构，晶体结晶质量良好，元素分析测试表明 In 和 Se 元素在基体中均匀分布。InSe 晶体力学性能软，在地面生长容易产生塑性变形，使得位错增生的几率显著提高。本研究发发现微重力环境下 InSe 晶体生长过程中呈现出特有的非接触效应，通过化学腐蚀法发现晶体中心部位的位错密度较大，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,位错密度因此实现大幅降低。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. 空间材料科学技术-70

液态 Ce 及 CeTi 合金的过冷能力与表面张力研究

王时宇、耿德路、魏炳波*

西北工业大学物理科学与技术学院

电磁悬浮无容器处理技术可使液态金属达到深过冷状态,并避免容器壁对液态金属产生影响,因此适合用于具有活泼化学性能的稀土元素 Ce 及其合金的热物理性质和快速凝固实验研究。本文通过电磁悬浮技术实现了过冷液态 Ce 的表面张力、粘度等热物理性质测定,并研究了 Ce₅₀Ti₅₀ 合金的快速凝固规律。结果表明,液态 Ce 的表面张力随温度呈线性变化,粘度随温度呈指数性变化。在不同过冷度条件下 Ce₅₀Ti₅₀ 合金呈现了弥散和聚集两种相分离组织形貌,耦合磁流场的相场模拟计算表明,合金液滴在凝固前的相分离持续时间是影响组织形成的重要因素。以上研究将有助于深入理解 Ce 及其合金的热力学特性和相变行为,并指导其材料设计和工业应用。

C07. 空间材料科学技术-71

应变玻璃及其多功能效应

王宇*¹、任晓兵^{1,2}

1. 西安交通大学

2. 日本国立物质材料研究机构

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. 空间材料科学技术-72

激光选区熔化 NiCoCrFeAl 共晶高熵合金的异常共晶组织形成机理

何峰*、谢按、王志军、王锦程

西北工业大学材料学院

采用选区激光熔化(SLM)制备了一种 NiCoCrFeAl 共晶高熵合金(EHEA),SLM 样品为 BCC/B2 胞和 FCC 胞界组成的胞状共晶结构。结果表明,在 SLM 极高的温度梯度和冷却速率下,强非平衡凝固产生的胞状共晶微观结构特征会受到扫描速度和激光功率的极大影响:在大过冷度下 B2 枝晶生长速度远超共晶而形成亚共晶结构,并在一定条件下演化为离异共晶。当激光扫描速度较高时,熔池的冷却速率提高,缩短了枝晶的一次臂间距,从而细化了胞状结构尺寸。而在较低的扫描速度下,激光对沉积材料循环热加载的时间延长,有利于元素的扩散和富集,促进了胞内 BCC 相的调幅分解过程。研究结果为 SLMed EHEAs

快速凝固组织的形成和演化行为提供了新的见解。

C07. 空间材料科学技术-73

静电悬浮条件下液态纯 Tb 和 Tb-Si 合金的热物理性质和快速凝固规律研究

张永健、耿德路、魏炳波*

西北工业大学物理科学与技术学院

由于高温稀土元素熔点高、化学性质活泼、易挥发和氧化等特性，很难通过传统接触式方法获得液态下的热物理性质。静电悬浮无容器处理技术可使稀土金属以及合金达到深过冷状态，是获取液态高温稀土材料的热物理性质和进行快速凝固规律研究的重要途径。本文采用静电悬浮技术，测定了过冷液态 Tb 的热物理性质，包括定压比热、密度、表面张力、粘度和固液界面自由能。其中定压比热、密度和表面张力与温度呈线性关系，而粘度与温度则随温度呈指数变化。根据热物理性质与经典形核理论计算出的固液界面自由能与毛细波动法得到的模拟结果一致。通过分子动力学考虑固液界面原子扩散运动，并结合快速枝晶生长模型，分析了枝晶生长速度与过冷度的动力学规律。研究了 $Tb_{86.6}Si_{13.4}$ 合金的快速共晶生长动力学，实验获得的最大过冷度为 281 K ($0.20T_E$)。随着过冷度的增大，合金显微组织形态由(α -Tb)和 Tb_5Si_3 规则层片共晶转变为非规则共晶，组织得到显著细化。

C07. 空间材料科学技术-74

中国空间站微重力合金液滴表面波耦合螺旋共晶生长

刘丁楠、王海鹏、魏炳波*

西北工业大学

在中国空间站的微重力环境下，对 Zr 合金进行了静电悬浮快速凝固研究。通过主动调控实现 Zr 合金 253 K 深过冷快速凝固，发现凝固后的合金表面存在放射状共晶生长耦合表面波纹结构，揭示这一现象是由深过冷快速共晶生长与微重力条件下静电场诱发的液体表面波动相互作用的结果。同时，由于微重力条件下 Marangoni 对流效应结合共晶生长动力学，实现了螺旋型共晶生长模式。最后，本研究首次在 Zr 合金中观察到 FCC-Zr 相的存在，并从晶格变形和凝固动力学上得到了解释。

C07. 空间材料科学技术-75

深度神经网络预测 Ag-Si 合金热物理性质及结构演变研究

陈惠敏、王庆、王海鹏*

西北工业大学物理与科学技术学院

本工作通过深度学习方法构建了适用于整个液态 Ag-Si 二元体系的深度神经网络势函数，该模型在能量、力、维力以及结构特性方面与第一性原理数据相关性良好，达到 DFT 精度。利用该势函数进行分子动力学模拟，获取了该合金体系在 1000 ~ 2000 K 之间的热物理性质，预测的焓、比热、混合焓以及过剩体积，以及密度、表面张力和扩散系数与经验数据一致性良好。同时利用从头计算分子动力学模拟方法探索了液态 $Ag_{89}Si_{11}$ 共晶合金在快速冷却过程中的原子结构演变和动力学特性。计算得到的 1173 K 下的双体分布函数与实验数据吻合良好。通过 Honeycutt-Andersen 指数、Voronoi 多面体以及团簇矫正分析对合金的局域结构进行了表征。结果表明随着温度降低，体系的化学短程有序性逐渐增强，过冷液体中发现了大量的五重对称性，完美和扭曲二十面体所占比例很小。此外，体系的均方位移随温度近似线性增加，扩散系数与温度之间符合 Arrhenius 关系，且与其他金属-半导体体系相比，Ag-Si 合金液体中的原子运动较慢。

C07. 空间材料科学技术-76**静电悬浮合金液滴的传热行为与过程控制**

陈彦莉、王海鹏*、张文辉

西北工业大学

构建了静电悬浮条件下合金液滴样品传热的数学模型，并围绕流动传热问题，设计了二维和三维的数值实验算例。采用 CBS 有限元算法成功求解了 Navier-Stokes 方程与热传导方程，从而获得了流场和温度场的详细信息。在真空环境中，合金熔体与外界的热交换主要通过激光加热和辐射散热进行。因此，本研究采用两种方法来实现合金熔体冷却速率的调控：一是调节激光功率，二是改变激光束的个数。进一步地，本研究还扩展到三维算例，激光模拟结果不仅展示了单束激光加热对合金传热过程的影响，而且通过构建复杂的三维流动域和多点加热条件，模拟了更接近实际工程应用的流动传热场景。

C07. 空间材料科学技术-77**中国空间站锆合金晶体生长动力学研究**

李浩哲、郑晨辉、王海鹏*、魏炳波

西北工业大学

通过中国空间站无容器实验柜对锆合金进行了静电悬浮快速凝固实验，对其热物理性质进行了测量与计算，其中过冷度为 10-120K 的合金在液固转变过程中出现了二次再辉。与地面相近过冷度样品不同的是，该合金内部由来自三个方向的晶胞组成，晶胞内宏观上表现为(Zr)相与 V2Zr 相交替排列状组织，这是由于在空间微重力环境下合金液滴的自然对流消失、马兰戈尼效应凸显导致的。晶胞内的组织微观上为(Zr)/V2Zr 非规则共晶组织，对其进行晶体学分析后发现 V2Zr 相内部出现了{111}<11-2>FCC 孪晶变体。晶胞间为(Zr)/V2Zr 规则层片共晶组织，在单独的共晶团中(Zr)相的取向随机，而 V2Zr 相则沿特定的方向生长。此外，在相邻的共晶团中 V2Zr 相还表现出了近似孪生的{111}<11-2>取向关系。通过纳米压痕测试分析了空间与地面样品的力学性能，并对比了空间样品共晶胞内部非规则共晶区与共晶胞间的层片共晶区强韧性的差异。

C07. 空间材料科学技术-78**三元难熔铌合金静电悬浮深过冷快速凝固表面组织生长动力学**

王彦博、王海鹏*

西北工业大学

对三元难熔铌合金进行了静电悬浮深过冷快速凝固实验，分别在小过冷、中过冷、大过冷不同过冷度条件下获得了凝固合金。在小过冷下，三元难熔铌合金液滴在自然凝固过程中出现两次再辉，表面产生多点形核。当在小过冷 270 K 左右条件下对其触发形核，难熔合金液滴液固界面推移速度从自然凝固下的 $0.2\sim 0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，液固界面迁移时间显著缩短。然而在跨过中过冷临界过冷度后触发形核的液固界面迁移速度明显降低，落入小过冷迁移速度范围，其对小过冷难熔合金液滴凝固的加速作用消失甚至在大过冷条件下表现出抑制界面迁移的作用。随着过冷度增大到中过冷范围，三元难熔铌合金表面多点形核数目进一步增加，表面晶胞碰撞带来的对液固界面的自由扰动增强，在晶界处产生与原始方向接近垂直的小平面/非小平面耦合共晶组织。对于大过冷条件，三元难熔铌合金液滴表面呈现单点形核、两极形核和两点形核的多种形核模式，在两点形核时，原始光滑界面与新形核点融合加速按一定角度共同完成界面迁移，凝固形成的表面组织由于 Nbss 枝晶生长更为丰茂显得更加粗糙。

墙报

C07. 空间材料科学技术-P01

无容器微重力环境下 FeSi 基软磁合金亚稳结构生长机理及磁性能研究

刘幻*

浙江大学

铁硅基软磁合金具有较低的矫顽力和损耗，在电力运输、电子器件和发动机中应用广泛。在 Fe-Si 合金中添加 12at.% Co 元素对饱和磁化强度的提升最为显著，少量 Ti 元素的掺杂有利于降低磁晶各向异性 K 和磁致伸缩系数 λ ，进而减小矫顽力。但 Ti 元素的低固溶度导致在晶界的大量析出，阻碍了畴壁运动，无法降低 K 和 λ 。为了突破 Ti 元素在 Fe-Co-Si 合金中的固溶度极限，本文采用微重力无容器悬浮熔炼技术。相较于电弧熔炼，静电悬浮熔炼的合金中 Ti 固溶度更高，矫顽力从 13.2Oe 降低到 5.3Oe。通过改变过冷度，可以实现对晶体组织的调控，优化矫顽力和饱和磁化强度。因此，空间无容器实验是调控合金微观结构的重要手段，也是性能提升的有效路径。

C07. 空间材料科学技术-P02

钨阴极的磁等离子体温度场模拟及诊断研究

吴欢、杨志懋*、孔春才

西安交通大学

钨基金属是磁等离子体动力推进器 (MPDT) 的主要阴极材料，具备熔点高、电子发射特性优良等优点。作为 MPDT 阴极，处于高热、强电磁的工作环境，长期将导致烧蚀断裂，严重降低 MPDT 性能。本文结合仿真分析和实验诊断，探究 MPDT 钨阴极烧蚀现象。仿真模拟分析基于磁流体动力学理论，建立起弧过程和稳态状态下磁等离子体钨阴极温度场仿真模型，探究包括不同工作状态、材料属性及外加磁场条件下的钨阴极温度场分布规律。实验基于光谱法测量等离子体羽流温度，探究不同条件下羽流温度变化规律。仿真与实验对比，揭示磁等离子体钨阴极的温度场分布规律与不同因素的影响机理，为改良 MPDT 钨阴极提供积极的参考和启发。

C07. 空间材料科学技术-P03

Nb-Ni 合金结构与性质的分子动力学计算研究

马德志、王海鹏*

西北工业大学

运用分子动力学计算方法研究和分析了 Nb-Ni 合金的共晶点、包晶点、共晶相等 6 个成分点不同温度的物理性质，研究发现，Nb-Ni 合金的密度随 Ni 含量的升高而增大、液态比热随 Ni 含量的升高而增大、原子的扩散能力随 Ni 含量的升高而减弱。同时，还研究了 Nb-Ni 合金的短程有序性，对双体分布函数、配位数与 WC 参数等结构参数的计算与分析表明，Nb-Ni 合金的短程有序性随 Ni 含量的升高而增强，其中 Nb₁₆Ni₈₄ 的化学短程有序度最高，Nb₂Ni 也具有非常高的化学短程有序度。此外，还对 Voronoi 多面体和 HA 键型指数进行了计算分析，得到了 Nb-Ni 合金短程结构与原子团簇随成分与温度变化的特征信息。

C07. 空间材料科学技术-P04

铜/石墨烯层状复合材料的可控制备和性能研究

白一鸣*、孔春才、杨志懋

西安交通大学

石墨烯增强铜基复合材料因其卓越的物理、化学与力学性质而近年来备受关注。石墨烯不仅具备高强

度、高导电性和高热导性等特性，而且其引入到铜基体中能显著提升复合材料的整体性能，包括力学、导电性和热传导性。本文利用旋涂法在大面积铜箔上负载 PMMA，采用高温原位催化法实现 PMMA 的原位分解和铜箔表面石墨烯的原位生长。通过火花等离子烧结（SPS）方法对铜负载石墨烯薄膜材料进行热压烧结，制备了含不同石墨烯比例的铜石墨烯层状复合材料。添加石墨烯后材料的热扩散系数较纯铜提高 15.7%，抗拉强度和杨氏模量分别提高 2.8%和 72.8%，导电性能无明显变化。这种复合材料的研究开发，对于推动材料科学的进步、满足现代高科技领域对材料性能的高要求具有重要意义，为发展高强高导铜合金新材料提供了思路。

C07. 空间材料科学技术-P05

铜钨触头材料第一性原理计算

王淮*

西安交通大学

铜钨（CuW）复合材料作为电触头材料，结合了铜和钨两种材料优异的性质，具备熔点高，导电性好的优点，作为直流电极材料，工作状态长期处在大电流环境，开断时易遭受电弧侵蚀。通过基于密度泛函理论的第一性原理计算方法建立不同组分 CuW 触头材料体系的晶体结构模型，通过晶体结构分析、电子密度、能带结构和态密度理论计算，揭示不同外加电场下材料的电子输运性质和力学性能。通过构建电极材料微观表面结构，解释材料侵蚀微观机理，探究不同微观结构耐侵蚀性能，为设计耐长时电弧烧蚀喷口材料提供启发。

C07. 空间材料科学技术-P06

铀增材修复及组织性能研究

李明星、徐庆东、苏斌*、杨磊

中国工程物理研究院材料研究所

铀以其高密度和独特的核性能，在国防、核能和精密物理实验等领域发挥着不可替代的作用。然而，铀的化学性质十分活泼，在贮存和服役过程中易遭受环境中的 H_2O 、 O_2 、 H_2 等腐蚀而产生裂纹、缺陷等问题，从而影响铀材料的性能。此外铀材料成本高且加工难度大，因此发展铀材料表面局部缺陷的高效修复技术具有重要意义。增材修复具有灵活性强、成本低、热量输入可控等优点，已发展为重要的修复技术。本团队结合机械轧制和激光热处理去应力，攻克了增材修复用铀丝材的制备难题。在此基础上，发展了铀激光同步送丝增材修复技术，通过优化工艺参数，实现了铀表面缺陷的高质量修复。

基于激光表面熔凝样品的熔池形态和金相组织，确定了用于铀修复的激光功率和作用时间。采用此优化参数对表面存在局部缺陷的铀样品进行激光同步送丝增材修复，发现修复区和基体呈良好冶金结合状态，内部无气孔、裂纹等缺陷。修复样品呈明显的特征分区：修复区、热影响区和基体区。修复区和热影响区均出现晶粒细化现象，表明修复过程中因快热急冷而产生的热应力作用下发生了再结晶细化。采用 EBSD 对不同区域进行表征，发现基体呈尺寸约 1mm 的等轴晶，且晶粒内部存在大量孪晶，而修复区晶粒尺寸仅约 20 μm 。利用有限元-元胞自动机方法模拟了铀修复过程中的温度变化和晶粒演化，模拟获得了修复区表面由快冷导致的细晶区以及底部由温度梯度引起的柱状晶。此外，对修复样品不同区域进行了力学性能测试，结果表明：修复区和热影响区的硬度、弹性模量均高于基体区。铀表面缺陷修复后的组织明显细化且力学性能得到提升，证明了铀激光增材修复技术的可行性。

C07. 空间材料科学技术-P07**烷烃聚合物涂覆对铜基材料表面烧蚀行为的影响**

张弘宇*、杨志懋、孔春才

西安交通大学

电磁轨道发射器电极间的接触滑动导电能力是获得更高的电磁推动力的关键因素，即使金属表面经过高精度加工，接触面间的非紧密接触导电也是通过局部区域点接触实现，实际接触面积远小于名义接触面积，接触点处的电流密度很高，产生较大的接触电阻。为了缓解滑动导电接触面间高导电和表面烧蚀磨损矛盾问题，本文利用在电枢和轨道之间涂覆烷烃聚合物涂层，形成扩展的导电通道，从而减轻接触面的烧蚀，提供电磁轨道使用寿命。通过真空电击穿装置对涂覆烷烃聚合物的铜基材料进行电弧烧蚀，结果表明涂覆后的铜基材料烧蚀程度减弱，电弧寿命延长，斩波电流下降。

C07. 空间材料科学技术-P08**电磁悬浮条件下 Fe 基多元复相合金的组织演化与摩擦磨损性能研究**张彭超¹、王海鹏²

1. 西安近代化学研究所
2. 西北工业大学

Fe 基复相合金、非晶合金以及非晶复材在非平衡凝固条件下的可控制备以及摩擦磨损性能提升是该材料在特种金属耐磨领域应用的关键。本研究中，采用大体积电磁悬浮结合铜模铸造技术，在宽泛的过冷和冷速区间研究了 $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{20}\text{Ni}_7\text{B}_{19}\text{Si}_5\text{Nb}_4$ 合金的非平衡组织演化与梯度结构的转变行为。基于纳米划痕和微动摩擦磨损实验研究并讨论了不同相组成的微观摩擦性能与宏观磨损机理。凝固过冷度从 49 K 提升到 176 K， $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{20}\text{Ni}_7\text{B}_{19}\text{Si}_5\text{Nb}_4$ 合金微观组织中 Fe_2B 相由完全小平面形貌转化为小平面与非小平面共存，共晶区域减小且组织明显细化。在电磁悬浮结合铜模铸造条件下，随着冷速提高，制备了块体梯度复合材料、非晶复合材料和完全非晶结构。悬浮凝固条件下，过冷 49 K 凝固组织中固溶体相的平均摩擦系数为 0.213，而金属间化合物的平均摩擦系数为 0.056。随着过冷度的提高，因细晶强化和固溶强化使固溶相的平均摩擦系数降低到 0.157，而金属间化合物相的摩擦系数基本不变，材料的宏观磨损机理为疲劳磨损和磨粒磨损。铜模压铸条件下，非晶复材的摩擦系数最小为 0.070，完全非晶结构的摩擦系数次之，为 0.095。细化共晶、非晶和非晶复材的磨损机理为犁削磨损。

C07. 空间材料科学技术-P09**电磁搅拌下真空自耗电弧重熔过程的传热传质研究**王庆*^{1,2}、夏勇¹、王阳阳¹、赵小花¹、尚金金^{1,2}

1. 西部超导材料科技股份有限公司
2. 西北工业大学

真空自耗电弧重熔 (VAR) 是钛合金的最主要工业化生产方式，熔炼过程中熔池受到周期性电磁搅拌，其温度场、流场发生周期性变化，直接影响了合金的化学成分和组织形貌。因此理解熔池传热规律，揭示熔体流动模式对偏析行为控制、缺陷形成机理具有重要的指导意义。本工作使用有限元方法，建立了二维柱对称 VAR 熔炼模型，发现熔池流场主要受浮力和洛伦兹力影响。在大小一致，且周期性换向的纵向磁场中，由温度分布产生的浮力驱动熔池右侧发生顺时针热对流，而横截面的洛伦兹力提供了水平电磁搅拌力，使熔体发生顺/逆时针电磁搅拌。水平电磁搅拌速度 V_0 随时间呈楔形周期性分布，磁场换向后，搅拌速度 V_0 逐渐减小至 0，随后反向加速，在下次磁场换向前达到最大值。常规条件下，磁场换向前洛伦兹力的水平分力不足以提供向心力，此时自感对流被抑制，熔池右侧主要表现为热对流流动模式。磁场换向后，所需向心力逐渐减小至 0，此时自感对流效果逐渐加强并达到最大，熔体表现为自感对流流动模式。随着 V_0 反向加速，熔体右侧逐渐回到热对流流动模式。

C07. 空间材料科学技术-P10**大体积金属电磁悬浮凝固制备 Zr 基非晶复材**

黎舸鑫、郭昊非、王海鹏*、常健

西北工业大学

电磁悬浮无容器处理技术具有悬浮和熔炼耦合的特点，在快速凝固及先进材料制备等研究领域具有重要作用。针对当前电磁悬浮系统主要应用于毫米级颗粒金属材料的研究现状，以提高悬浮性能及探索大体积金属悬浮和凝固特性为主线，自主研制了超高真空大体积电磁悬浮制造装置，系统探索了电磁悬浮制造过程联动机制、多种优化构型电磁线圈悬浮性能、大体积固态金属的悬浮行为和材料悬浮制造过程的凝固规律，实现了大体积 Al、Cu、Ti 和 Al-Si 合金悬浮、加热、熔化和悬浮凝固，并设计了氦气换热装置，提升了悬浮熔体强制冷却效果，实现了一种含有 B2-ZrCu 高温亚稳相的 Zr 基三元合金的非晶复合材料的悬浮制备。

C07. 空间材料科学技术-P11**富 Zr 型 Zr-V 合金的深过冷快速凝固机理**

郑晨辉、刘丁楠、廖晖、胡亮、王海鹏*

西北工业大学

富 Zr 型 Zr-V 合金由于其低中子吸收截面、良好的耐腐蚀性和优异的力学性能以及特殊结构的金属间化合物，在核工业以及储氢储能领域具有巨大的潜力。当 V 含量低于 16.5% 时，Zr-V 合金的主相为 (Zr) 固溶体。研究过冷 Zr-V 熔体中 β -Zr 相的枝晶生长对于全面了解凝固过程与应用性能之间的内在关系具有重要意义。此外，当 Zr-V 合金的 V 含量超过 16.5% 时，共晶相含量增加。亚共晶合金是一种在实际应用中常见的且具有广泛用途的材料。固溶体相和共晶相之间的竞争形核与生长，以及非规则共晶和规则共晶之间的转变将直接影响材料的性能。

C07. 空间材料科学技术-P12**液态 Zr-Nb 合金的热物理性质与液态结构研究**

左冬冬、常健*、王庆、王海鹏

西北工业大学

采用静电悬浮技术和分子动力学方法研究了液态 Zr-x wt.% Nb (x = 1.0, 2.5, 6.0) 合金的热物理性质。值得注意的是，实验获得的最大过冷度分别为 335 K、311 K 和 326 K。相应地，在液相线温度 (TL) 时，密度分别为 6.20、6.22 和 6.26 g·cm⁻³。对应的温度系数分别为 2.61×10^{-4} 、 2.75×10^{-4} 和 2.84×10^{-4} g·cm⁻³·K⁻¹。测试与模拟结果吻合较好。并且，摩尔体积 (V_m)、热膨胀系数 (α) 和扩散系数 (D) 被计算。对双体分布函数、配位数 (CN) 和径向分布函数的分析揭示了原子结构随温度的演化规律

C07. 空间材料科学技术-P13**液态 Ag-Si 合金的结构演变和深度学习分子动力学研究**

陈惠敏、王庆、王海鹏*

西北工业大学物理与科学技术学院

本工作通过深度学习方法构建了适用于整个液态 Ag-Si 二元体系的深度神经网络势函数，该模型在能量、力、维力以及结构特性方面与第一性原理数据相关性良好，达到 DFT 精度。利用该势函数进行分子动力学模拟，获取了该合金体系在 1000 ~ 2000 K 之间的热物理性质，预测的焓、比热和混合焓，以及密度、表面张力和扩散系数与经验数据一致性良好。同时利用从头计算分子动力学模拟方法探索了液态 Ag₈₉Si₁₁ 共晶合金在快速冷却过程中的原子结构演变和动力学特性。计算得到的 1173 K 下的双体分布函数与实验

数据吻合良好。通过 Honeycutt-Andersen 指数、Voronoi 多面体以及团簇矫正分析对合金的局域结构进行了表征。结果表明随着温度降低,体系的化学短程有序性逐渐增强,过冷液体中发现了大量的五重对称性,完美和扭曲二十面体所占比例很小。此外,体系的均方位移随温度近似线性增加,扩散系数与温度之间符合 Arrhenius 关系,且与其他金属-半导体体系相比,Ag-Si 合金液体中的原子运动较慢。

C07. 空间材料科学技术-P14

微重力和无容器状态下共晶的解耦效应促进枝晶的独立生长

廖晖、王海鹏、魏炳波*

西北工业大学

A series of in-orbit solidification experiments is conducted aboard the China Space Station with a long-term stable 10^{-5} g microgravity condition. Here 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. Furthermore, the confronting fluid flow pattern driven by polar heterogeneous nucleation was found to stimulate the elongated surface deformation of alloy droplet at a high dendrite growth velocity.

C07. 空间材料科学技术-P15

中国空间站微重力合金液滴表面波耦合螺旋共晶生长研究

刘丁楠、王海鹏、魏炳波*

西北工业大学

在中国空间站的微重力环境下,对 Zr 合金进行了静电悬浮快速凝固研究。通过主动调控实现 Zr 合金 253 K 深过冷快速凝固,发现凝固后的合金表面存在放射状共晶生长耦合表面波纹结构,揭示这一现象是由深过冷快速共晶生长与微重力条件下静电场诱发的液体表面波动相互作用的结果。同时,由于微重力条件下 Marangoni 对流效应结合共晶生长动力学,实现了螺旋型共晶生长模式。最后,本研究首次在 Zr 合金中观察到 FCC-Zr 相的存在,并从晶格变形和凝固动力学上得到了解释。

C07. 空间材料科学技术-P16

PFPE 超分子凝胶润滑剂在辐照/高真空条件下防爬移及摩擦学性能研究

白艳艳、周峰、蔡美荣、刘维民*

中国科学院兰州化学物理研究所

全氟聚醚润滑油(PFPE)具有优异的抗辐射、低挥发、化学稳定性等,是空天、电子等苛刻工况的可靠润滑剂。然而,PFPE 表面张力低致使其在摩擦界面极易爬行迁移,这不仅会造成资源浪费、空间部件污染,也会缩短机械设备的在轨寿命。面对空间环境需求,发展了一种具有自约束性能的全氟聚醚型超分子凝胶润滑剂,利用超分子凝胶自组装的三维网络结构解决 PFPE 润滑油易爬行迁移的问题,并进一步提高 PFPE 基础油的润滑性能。

C07. 空间材料科学技术-P17

MoS₂ 固体薄膜遇上超分子凝胶:新型复合润滑材料的空间应用

张嘉莹、蔡美荣*、周峰、刘维民

中国科学院兰州化学物理研究所

在这项研究中,我们通过物理气相沉积法制备了 MoS₂ 纳米结构的薄膜,以提高其本身的耐磨性。随后,我们设计了超分子凝胶,以加强 MACs 油的热稳定性并防止油的蠕动和泄露。最后,制备出新型的固

体润滑膜-凝胶 (MoS₂-凝胶) 润滑体系, 并将其应用于航天润滑领域。这种固体-凝胶润滑体系最突出的特点是延长了固体润滑膜 MoS₂ 的使用寿命, 降低了 MoS₂ 薄膜的磨损率, 而且与 MoS₂-油复合润滑体系相比, 在暴露于真空原子氧 (AO) 和近紫外线 (UV) 的辐照情况下, 凝胶的抗蠕变性能更好。MoS₂-凝胶复合润滑体系降低了 MoS₂ 纳米结构膜对空气中水分的敏感性, 从而避免了纳米复合膜在空气中水分影响下产生的润滑失效。本文系统地研究了 MoS₂-凝胶复合体系在航天环境下的减摩抗磨性能, 并详细地探究了该体系的润滑机理。这种新型 MoS₂-凝胶复合润滑系统在航天特种机械及大气环境下的精密运动机构都具有良好的应用前景。

仅发表论文

C07. 空间材料科学技术-PO01

用于空间环境气体观测的 FCD 背景纹影成像技术

周传昆¹、赵少凡^{*2,3}

1. 西安交通大学未来技术学院
2. 西安交通大学机械工程学院
3. 中国空间技术研究院钱学森实验室

纹影成像是一种观察透明介质折射率变化的手段。相比于传统纹影成像, 背景纹影成像更加轻便、易操作、可以获得定量的背景位移数据从而重建物理场, 有助于观察制造过程中的气体或透明液体行为且便于搭载火箭进入太空服务于空间实验。在此应用背景下, 将 Moire 效应引入以二维周期图案为背景的 FCD (Fast Fourier Demodulation) 纹影成像技术, 相比于直接应用棋盘图案提高了成像的灵敏度, 实现了背景位移数据的提取和修正, 并检验了求解结果的准确性。

C07. 空间材料科学技术-PO02

真空原子氧对低吸收低发射涂层结构和性能影响

李俊峰*、姜舟、王萌、孙理理、罗正平

航天材料及工艺研究所

本文以片状铝粉和硅树脂为原料, 喷涂制备了低吸收低发射涂层, 测试了原子氧剂量 6.5×10^{25} 个/m² 条件下该涂层的耐原子氧性能, 采用 SEM、EDS、XRD 等测试方法, 研究了低吸收低发射涂层表面结构及其太阳光谱吸收率、红外发射率变化。结果发现, 在此原子氧剂量下, 低吸收低发射涂层的宏观形貌和 SEM 微观形貌无明显变化, 其太阳光谱吸收率保持不变和发射率略有降低, 测试前后太阳光谱吸收率均为 0.13, 发射率从 0.14 降到 0.13。EDS 元素分析显示涂层表面树脂含量降低, 铝粉含量相对增加, 这是耐原子氧测试后涂层发射率降低的原因, 而太阳吸收率没有因铝粉含量增加而降低可能是由于原子氧同时使涂层表面粗糙度增加所致。

C07. 空间材料科学技术-PO03

面向空间环境的非晶合金增材制造研究

刘明^{*1}、周传昆²、曹莹泽¹、赵少凡¹、白海洋³、汪卫华^{1,3}

1. 钱学森空间技术实验室
2. 西安交通大学
3. 中国科学院物理研究所

空间环境的高真空、微重力等条件不仅使得众多材料表现与其在地面环境下有较大的性能差异, 在增

材制造领域也给工艺以及装置设计等带来巨大挑战。研究在空间环境下的金属增材制造技术，对深空探测、地外原位制造等重大战略目标的实现，具有重要意义。非晶合金，不同于传统的金属材料，不仅在力、热、磁等方面，与常规的金属合金有较大的差异，在空间环境下，其也表现出特殊的性能。通过对比金属以及非晶合金在相同制造工艺参数条件下的制件，我们发现了非晶合金表现出了更强的空间增材制造适应性；利用非晶合金本身的热塑成型能力，通过脉冲电流的方式，可实现金属材料的热塑挤出成型。我们对比了不同工艺参数对热塑挤出成型工艺的影响，研究了影响热塑成型工艺的关键参数。对未来实现金属低功率、高精度地外条件下的金属增材制造提供基础。