

Symposium C07

Space Materials Science and Technology

空间材料科学技术

2017年7月8-12日

分会主席:

王海鹏

西北工业大学

潘明祥

中科院物理所

赵九洲

中国科学院金属研究所

金蔚青

中科院硅酸盐所

学术顾问:

魏炳波

西北工业大学

联系人:

王海鹏

西北工业大学

电话: 13991303816

邮箱: hpwang@nwpu.edu.cn

C-07. 空间材料科学技术

学术顾问：魏炳波；

分会主席：王海鹏、潘明祥、赵九洲、金蔚青

C07-01

国际上空间环境下的材料科学研究现状与趋势

潘明祥

中国科学院物理研究所

自 1969 年前苏联在联盟 6 号飞船上进行了金属焊接和合金熔化、结晶实验活动起，开辟了空间技术应用—材料科学实验研究的新领域—空间环境下的材料科学研究（简称“空间材料科学”）。空间材料科学研究已经走过了近半个世纪的历程，实验研究思想和方式也已经从以试试看的探索和发现及定性实验为主到以规律性、定量化和可视化实验为主。国际上目前空间环境下的材料科学已经进入以国际空间站（ISS）为主要实验平台的时代，我国也将于 2022 年前后建立自己的空间站，俄罗斯也在准备到 2025 年之后以 ISS 的俄罗斯舱段为基础组建自己的新空间站。世界空间技术先进的国家和地区在将空间环境下的材料科学作为一个重要的研究领域的同时，也依据各自的空间资源条件和国力，在研究方向上有所侧重。本报告将从在空间环境下的基础材料科学研究、应用相关的先进材料研究和地外资源原位开发利用这三个方面对国际上的研究现状和未来发展趋势，以及如何使空间实验结果的科学与应用价值的最大化进行介绍，以期能为我国感兴趣了解或拟投身于空间材料科学研究的学者提供一个基本的了解和参考。

C07-02

“天宫二号”综合材料实验装置的研制及实验进展

艾飞，刘岩，潘秀红，汤美波，温海琴，张明辉，盖立君

中国科学院上海硅酸盐研究所

“天宫二号”综合材料实验装置是为满足空间材料科学研究需求而设计和研制的新一代实验装备，由材料实验炉、材料电控箱和材料样品工具袋组成。在材料电控箱的自动控制下，材料实验炉可按照设定的程序完成 1 批次 6 个工位的空间材料制备实验。材料样品工具袋中可安装 2 个批次 12 支样品安瓿，在材料实验炉的前一批次实验结束后，可由航天员在轨进行批次更换。

前期，项目团队攻克了低功耗高温加热、高精度温度稳定控制、精密机械传动等技术难题，完成了综合材料实验装置正样产品的设计、加工、装配和调试等研制工作。随后，综合材料实验装置在地面通过了力学环境试验、热循环、运动机构跑合试验、检漏测试、温场测量、匹配实验、除气试验等，获得了重要的实验数据，为确定飞行实验中的热控工艺等参数奠定了基础。

2016 年 9 月至 12 月，综合材料实验装置在“天宫二号”空间实验室的密封舱内圆满完成了 18 支材料样品的在轨科学实验。其中，前两个批次 12 支材料样品完成设定的空间制备实验后，由航天员存放于材料样品工具袋中并乘坐“神舟十一号”飞船携带返回了地面，交给材料科学家进行分析和表征。随后，第三批 6 支样品也完成了在轨热特性测量实验。

在“天宫二号”综合材料实验装置中完成空间制备及热特性测量的材料包括：半导体光电子材料、金属合金及亚稳材料、新型功能单晶、纳米及复合材料等。在空间微重力环境中开展的这一系列实验，有望获得一批具有原创性和重要价值的材料研究成果。

C07-03

第三组元对 Co-Cu 基合金亚稳液相分离的作用机制

闫娜，魏炳波

亚稳液相分离是过冷合金熔体凝固过程的重要现象，也是材料科学研究者关注的重要研究内容之一。液态 Co-Cu 合金的混合焓为正值，其相图中含有亚稳液态不混溶间隙。因此，在深过冷状态下，二元 Co-Cu 合金熔体将发生亚稳液相分离。如果在二元 Co-Cu 合金中引入不同的第三组元(Pb, Fe, Sn, Si, Ge, Ni 等)，形成的三元合金是否具有亚稳液相分离的热力学状态将如何判定？本文通过在二元 $\text{Co}_{50}\text{Cu}_{50}$ 合金中引入不同含量的 Sn, Pb, Ni, Si 和 Fe 等第三组元溶质元素，同时调整不同元素的添加含量，形成 $(\text{CoCu})_{100-n}\text{X}_n$ ($\text{X}=\text{Pb, Fe, Sn, Si, Ge, Ni, } n=5\sim 30$) 等多种三元合金。采用自由落体实验和熔融玻璃净化方法获得不同过冷条件下凝固组织的演变规律，系统研究第三组元对二元 Co-Cu 合金亚稳液相分离的作用机制。同时，从热力学角度出发，提出三元体系是否存在亚稳液相分离的简单判据。

研究发现，Pb 元素可以有效促进 Co-Cu 合金的亚稳液相分离。随着 Pb 元素含量的增加，合金熔体发生液相分离的临界过冷度逐渐减小。对于第三组元 Fe 来说，在 $0 < x < 100$ 的含量范围内，亚稳液相分离均可发生，但是所需的临界过冷度随 Fe 含量的增加不断增大。然而，Sn 元素的引入抑制了亚稳液相分离的发生，当 Sn 含量大于 20at% 时，实验所获得过冷度范围内没有出现亚稳液相分离现象。第三组元 Si, Ge, Ni 等元素的加入同样抑制了亚稳液相分离过程，当其含量超过某一临界值时，亚稳液相分离现象不再发生。

C07-04

空间模拟条件下液态 Ti-45%Al 合金的快速凝固规律研究

魏绍楼¹, 黄陆军¹, 常健², 杨尚京², 耿林¹

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院
2. 西北工业大学应用物理系

采用电磁悬浮和自由落体两种实验技术模拟空间环境的无容器和微重力状态，研究了液态 Ti-45%Al 合金的晶体形核机制、枝晶生长特性以及组织演变规律。在电磁悬浮无容器条件下，润湿角 $\theta_w \geq 62^\circ$ 的异质晶核仍难以被消除，实验所得合金熔体的最大过冷度为 $\Delta T = 334 \text{ K}$ ($0.19T_L$)，相应的枝晶生长速度可达 13.5 m/s 。理论计算结果表明，当过冷度 ΔT 时，溶质扩散是枝晶生长的主要控制因素；当过冷度 ΔT 介于 $37\text{--}79 \text{ K}$ 之间时，热扩散成为枝晶生长过程的主导机制；而当过冷度进一步提高至 $\Delta T > 79 \text{ K}$ 时，固-液界面的动力学效应将对枝晶生长过程产生显著影响。并且，随过冷度的增大，Ti-45%Al 合金的微观组织由粗大的树枝晶演化为细小的等轴晶。对落管中 Ti-45%Al 合金微小液滴传热特性的分析结果表明：随液滴直径的增加，其冷却速率显著减小，热输运机制由对流换热逐渐转变为辐射换热。Ti-45%Al 合金的微观组织随其液滴直径减小显著细化，且当粒径 $D \mu\text{m}$ 时，固态转变 $\text{TiAl} \rightarrow \text{TiAl}_2$ 被抑制，大量初生 TiAl 相被保留至室温。

C07-05

天宫二号空间实验室空间微重力生长碲化铋基热电半导体晶体

李小亚, 陈炎, 周燕飞, 陈立东

中国科学院上海硅酸盐研究所高性能陶瓷与超微结构国家重点实验室

碲化铋基材料是室温附近性能最好的热电半导体材料，自被发现以来，一直是热电领域的研究热点。但由于其热电转换效率较低，一直制约着其应用范围。合金化和掺杂优化是提高碲化铋基材料热电性能的有效途径，但这使得材料的化学成分越来越复杂，重力条件下区熔的固有问题——重力导致的成分对流和壁附效应使碲化铋基材料成分和性能波动较大，使材料热电性能的提高不如预期。空间微重力可以消除重力导致的成分对流和壁附效应，提高区熔生长碲化铋基材料成分均匀性和结晶完整性，从而提高其热电性能。随着我国空间技术的发展，建立了天宫二号空间实验室，这为碲化铋基热电半导体晶体空间微重力生长提供了条件。本文介绍利用天宫二号空间实验室“材料综合实验装置”空间微重力生长碲化铋基热电半导体晶体及其性能。

C07-06

涡旋场声悬浮无容器处理技术研究

洪振宇, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

因对材料的电磁学性能没有限制, 声悬浮技术已广泛应用于各种材料的无容器研究。但是, 目前声悬浮技术主要采用的是单轴式声悬浮装置及其产生的简单正弦驻波声场, 存在诸多不足之处。如, 在正弦驻波声场中, 物体受到大的轴向力和弱的侧向力, 这会导致侧向悬浮不稳定以及被悬浮液滴严重变形、雾化等。另外, 单轴式声悬浮装置的声发射端和声反射端阻碍了人们从上部和下部对被悬浮物体进行观测。

为克服传统声悬浮技术的不足, 本文采用 3-6 个换能器构成的环形阵列在空气中产生一阶声涡旋并利用它们进行物体的悬浮与控制。理论和实验研究表明:

(1) 由 3-6 个换能器产生的涡旋声场具有中心势阱和卫星势阱, 其中心势阱具有较强的悬浮能力, 可悬浮多种物体, 如泡沫球、硅油、水和梅花等;

(2) 物体在涡旋场中心势阱中受到沿涡旋轴线向外的拉力和侧面向内的压力, 呈直立状态;

(3) 液滴在涡旋场中心势阱中呈椭球状, 其长轴与涡旋轴一致, 易作沿长轴方向的形态振荡;

(4) 在涡旋场声悬浮条件下, 声轨道角动量转移可使被悬浮物体作旋转运动, 其转速可由声场强度来控制。

C07-07

表面密度波影响下的液滴结晶规律研究

吕勇军

北京理工大学物理学院

四面体液体薄膜和液滴的结晶在材料、生命以及大气科学等领域有着重要的应用。然而, 自由表面对四面体液体形核与结晶规律的影响仍然存在着许多亟待解决的问题, 特别是自由表面附近是否是优先形核区域目前尚有争议。

本研究采用分子动力学模拟方法研究了水和硅的液膜和液滴的形核、结晶过程, 揭示了自由表面环境对水和硅结晶的影响机制。我们模拟了冰在液态水膜中的形核过程, 并采用 MFPT (Mean First-Passage Time) 方法计算了冰的形核率, 结果表明冰的形核率随着液膜厚度的减小而降低。借助经典形核理论分析水膜中冰核形成的热力学, 发现自由表面及其附近区域并不是优先形核区域, 甚至显著抑制形核的发生, 而液膜中部区域呈现出较高的形核概率。

在此结论的基础上, 我们详细地研究了液态硅薄膜和液滴的形核规律。通过对大量随机形核事件的统计分析, 我们提出了适用于四面体液体薄膜和液滴结晶的新的理论模型。研究认为由于几何受限环境自由表面附近会出现密度层化现象, 并且随着系统尺寸的减小而加剧。又因为四面体液体在常压下液固平衡线斜率为负值, 在密度波动的膨胀区形核优先发生。通过求解密度波动方程, 解析结果与分子动力学模拟很好地符合, 从而证明决定优先形核位置的主要因素是密度波动而不是表面。

本研究结果对水滴表面是否是优先形核区这个物理化学领域争论已久的问题给出了明确的答案。

C07-08

超声悬浮条件下 $\text{Ni}_{54}\text{Si}_{46}$ 共晶合金的快速凝固研究

秦修培, 耿德路, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

Ni 基合金以其强度高、抗腐蚀和抗氧化能力强等优良性能在工业上有着许多潜在的应用。超声悬浮技术利用高强度声驻波场产生的声辐射力提供悬浮力来抵消重力, 从而实现物体悬浮。它可以避免液态合金与容器壁接触而引起的异质形核, 可用于液态合金的深过冷和快速凝固, 获得常规凝固无法获得的组织结

构。研究快速凝固条件下液态合金的微观组织演变规律,对高新材料的制备具有重要意义。本文选取 $\text{Ni}_{54}\text{Si}_{46}$ 共晶合金为研究对象,采用超声悬浮实现其快速凝固,合金熔体获得的最大过冷度为 104K ,冷却速率为 $325\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在声辐射压的作用下,试样变形为中心内凹的饼状。共晶合金表面出现了涟漪状的波纹,波纹的波长由中心沿着径向逐渐减小,而其内部的共晶组织由试样的中心沿着径向逐渐粗化,共晶层片间距由 $1.04\mu\text{m}$ 增大到 $2.51\mu\text{m}$ 。由于声场与试样表面的相互作用,实验过程中熔体的表面发生振荡,这可以提高合金熔体表面的形核几率,同时声流作用可有效提高熔体表面的冷却速率,导致试样的表层区域出现了非规则共晶组织。采用自由落体技术对比研究了 $\text{Ni}_{54}\text{Si}_{46}$ 共晶合金的凝固规律,合金熔体的冷却速率最高达到 $1.1\times 10^5\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着合金液滴直径的减小,熔体的冷却速率逐渐增大,共晶组织明显细化,共晶层片间距由 $2.1\mu\text{m}$ 减小到 $0.29\mu\text{m}$ 。当冷却速率增大至 $3.2\times 10^4\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,快速凝固组织中出现了非规则共晶。此外,两种实验条件下合金熔体内部均出现了不同程度的裂纹,且主要分布在共晶组织区域,而在非规则共晶区分布较少。

C07-09

悬浮环境中铁熔体氧化物夹杂及其形核能力的研究

徐明沁,王璐,胡侨丹,卢温泉,夏明许,李建国

上海交通大学材料科学与工程学院

目的:研究高纯铁中氧在悬浮环境中与不同元素形成氧化物夹杂的种类和形貌及其对形核能力影响。

方法:利用气悬浮无容器凝固技术对含有不同氧化物夹杂的铁熔体过冷度进行测量,通过 SEM 和 EDS 对夹杂物种类和形貌进行分析。并利用界面能模型对形核界面能及理论形核过冷度进行计算。

结果:随着加热熔化-结晶循环次数的增加,未添加合金元素的纯铁试样中氧化物夹杂由 FeO 转变为 Fe_3O_4 ,相应的熔体过冷度由纯铁的 $304\text{ }^\circ\text{C}$ 分别降低为 $223\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $75\text{ }^\circ\text{C}$,两种氧化物的形貌均为球形,尺寸在 $2\mu\text{m}$ 左右。添加 1% 的合金元素 (Al , Si , Ti , Ce) 后,合金元素与氧反应,形成 Al_2O_3 、 $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 Fe-Ti-O 、 Fe-Ce-O 等氧化物夹杂,对应形核过冷度分别为 $81\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $283\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $275\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $280\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过 SEM 研究表明, Al_2O_3 夹杂呈现两种形貌,分别为尺寸为几百纳米的球状和少量 $10\mu\text{m}$ 左右的块状; $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 夹杂也呈现两种形貌为 $2\mu\text{m}$ 的球状和 $3-4\mu\text{m}$ 的“花状”;其它富铁的复合夹杂均为球形。采用自由生长模型计算表明影响过冷度的主要原因不在于氧化物颗粒尺寸不同,而在于 Fe_3O_4 、 Al_2O_3 均与 $\delta\text{-Fe}$ 有相对较小的晶格错配度(7.6%和 11.1%),并且熔点大于 $\delta\text{-Fe}$ 的结晶温度。除此以外的其他氧化物熔点均低于 $\delta\text{-Fe}$ 的结晶温度,因此对 $\delta\text{-Fe}$ 的形核不起影响作用。将 Fe_3O_4 、 Al_2O_3 与 $\delta\text{-Fe}$ 的形核错配度代入纯 Al 晶格错配度的过冷度预测模型,发现该错配度模型不能解释液态 Fe 的大形核过冷度。

结论:

- 1、 Fe_3O_4 , Al_2O_3 可以促进液态 Fe 的形核,降低形核过冷度。
- 2、低熔点氧化物 $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 Fe-Ti-O 、 Fe-Ce-O 等对 $\delta\text{-Fe}$ 形核过程不产生影响。
- 3、原有的纯 Al 晶格错配度的过冷度预测模型不能解释液态 Fe 的大形核过冷度现象。

C07-10

微重力条件下液态金属传热过程研究

李明星,王海鹏

西北工业大学应用物理系

将牛顿传热模型与经典热传导方程相结合,采用隐式差分法计算了自由落体液滴下落过程的内部温度场,获得了液滴内部的温度、冷却速率及温度差异。系统地分析了液态金属和冷却气体的热物理性质及液滴尺寸对传热过程的作用,并计算了金属 Al 、 Cu 、 Ti 、 Zr 液滴分别在氩气和氦气环境下的冷却速率及温度差异。结果表明:低熔点、高比热或高密度的金属液滴具有较小的冷却速率,导热系数小的金属液滴的温度分布差异大。

C07-11

界面自由能和空间晶体生长

金蔚青

中国科学院上海硅酸盐研究所

提出空间晶体生长科学研究为地面材料应用服务的新概念：空间生长机理研究必须与地面材料制备相结合，通过对材料制备过程的分析，建立新颖空间晶体生长科学。表面张力是空间晶体生长动力学的唯一本征驱动力，结合波动理论——表面张力波传播，着重分析驻波与完整晶体生长过程的关联。生长过程中，固液界面始终保持稳定生长的单晶，定义为完整晶体。

研究指出，紧邻固液界面处，存在一个液相表面层。它是一个几何曲面，表面层内单位面积的表面自由能称为表面张力。固液界面稳定性取决于液相表面层内表面张力对抗扰动的能力。随着时间增长，扰动消失，固液界面稳定。反之，随着时间增长，扰动加强，固液界面不稳定。扰动可分为空间扰动和时态扰动，两者又有关联。

报告进一步用驻波概念分析完整晶体的生长过程，定量研究驻波与固液界面形貌稳定性的关联。扰动引发液相表面层弯曲面的曲率变化，改变表面张力波波形。数学上任何弯曲波形的变化，可通过 Fourier 级数展开成正弦波的叠加来定量计算。计算结果指出，考虑两个数值，其一是垂直于固液界面 z 方向的生长基元浓度相对于初始平坦邻位面的生长基元浓度的平均变化比值，其二是径向 x 方向的一个周期内，相对于平衡态弯曲面高度变化而引发的生长基元浓度在周期内的平均变化比值。若以上两数值相当，则是驻波形成的充分且必要条件。该结果表明，扰动对弯曲面平衡态给予一个微小变化，其状态虽偏离初始平衡态，但因偏离保持在很小的范围内，体系能量以动能和势能的形式交换储存，能量不向体系外传播，与体系外没有能量交换。该状态的表面自由能为极小的状态，称为稳定态。

稳态生长条件是垂直于固液界面 z 方向的生长速度与生长基元浓度变化比值成正比，固液界面由一个稳态进入另一个新的稳态，生长的固液界面持续保持稳态。

报告最后指出，驻波限定了地面完整晶体生长速度和晶体径向 x 方向的尺度，不同材料生长完整晶体的生长速度亦不相同。

报告不介绍复杂的定量计算过程，以图像形式描述完整晶体的生长过程。

C07-12

空间与地面环境液态金属扩散系数测量技术与展望

张博，钟浪祥，胡金亮

合肥工业大学材料科学与工程学院液态金属扩散实验室

液态金属扩散过程的研究逐渐成为了凝聚态物理领域的重要课题和金属材料研究领域的重要方向。液态金属扩散系数对人们理解液态金属的质量传输及动力学、玻璃化转变、晶体形核与生长等有重要作用。扩散行为对金属凝固过程以及成型的合金性能有直接影响，因此液态金属扩散系数也是金属材料开发设计和工业应用的重要参数。近几十年来，液态金属扩散系数的测量技术已经取得了长足的发展与进步。本文总结了地面环境中常用的扩散系数测量技术，如长管技术、剪切单元技术、X-射线成像技术和中子散射技术等，由于受到各种因素的影响，如重力效应引起的对流，地面条件下测量得到的扩散系数往往存在很大的误差。本文总结了国际上空间微重力环境下开展的一系列液态金属扩散研究工作。最近我们研究组研制了两种用于测量液态金属扩散系数的实验方法（滑动剪切技术和多层平动剪切技术）。大量实验表明这两种技术易于操作，较长管技术能够显著提高测量精度，但实验结果也受到一些干扰因素影响。本文最后提出了液态金属扩散研究需解决的科学与技术问题，并对我国空间微重力环境下扩散测量进行了展望。

C07-13

快速凝固三元 $\text{Co}_{35}\text{Cu}_{35}\text{Sn}_{30}$ 合金初生相的生长特征研究

刘金明, 翟薇, 燕鹏旭, 魏炳波
西北工业大学应用物理系

落管无容器处理技术由于其可模拟空间环境的低重力、无容器和超高真空等特点, 成为当前空间材料科学领域研究的一种重要技术。液态合金在自由落体过程中避免了因与容器壁接触而引起的异质形核, 达到深过冷状态并实现快速凝固, 其组织特征及形成机理与常规凝固显著不同。

本文采用落管无容器处理技术实现了三元 $\text{Co}_{35}\text{Cu}_{35}\text{Sn}_{30}$ 合金的快速凝固, 研究了初生 Co_3Sn_2 相的生长特征, 并且分析了合金液滴在冷却过程中的传热及其凝固组织形成机理。实验结果发现, 初生 Co_3Sn_2 相的微观组织形态主要表现为等轴枝晶。随着液滴直径的减小, 等轴枝晶的晶粒尺寸显著减小, 且其在凝固组织中所占的体积分数逐渐增大。合金粒子中还存在着长条状枝晶和粗大等轴晶形态的初生相, 长条状枝晶形态的粒子概率分布随着粒径的减小而减小, 粗大等轴晶形态的粒子则呈现出相反的变化趋势。此外, 部分合金粒子表面出现了偏析层结构, 内部组织附着在偏析层上形核后继续沿径向长大形成柱状晶区, 偏析层和柱状晶区的相对厚度均随粒径的下降而增大。

基于液滴传热模型, 计算了不同直径合金液滴的过冷度与冷却速率, 二者均随液滴直径的增大而减小, 且合金所获得的最大过冷度为 290 K ($0.22 T_L$)。液滴凝固过程的传热分析表明, 高的冷却速率和过冷度引起了等轴枝晶的细化和偏析壳粒子分布概率的增大, 而再辉现象是长条状枝晶和粗大等轴晶出现的原因。理论分析了合金液滴的内部温度分布, 得到液滴表面高的温度梯度导致了径向柱状晶区的形成。最后, 应用计盒维数法分析了初生 Co_3Sn_2 相的枝晶形貌变化规律, 发现其分形维度随粒子直径的减小而逐渐增大。说明初生 Co_3Sn_2 相具有分形特征, 其枝晶形态随着粒子直径的减小而趋于复杂, 这与其晶粒细化和体积分数增加的结果相一致。

C07-14

电磁悬浮条件下液态 Fe-Cu 合金的对流和凝固规律研究

林茂杰, 常健, 魏炳波
西北工业大学应用物理系

在电磁悬浮状态下, 液态合金内部由于电磁搅拌作用产生了显著的强制对流效应。该强制对流将显著影响热物理性质测量和凝固组织形貌。本文基于轴对称电磁悬浮模型, 以 Fe-Cu 合金为研究对象, 理论计算了电磁悬浮状态下合金熔体内部的磁感应强度和感应电流, 分析了其时均洛伦兹力分布特征, 进一步耦合 N-S 方程组计算求解了合金熔体内部流场分布规律, 分析了强制对流随悬浮电流强度、电流频率、或合金过冷度的变化关系。采用电磁悬浮技术实现了液态 Fe-Cu 合金的深过冷和快速凝固。与静态凝固实验对比, 电磁搅拌导致的强制对流使熔体中强制对流使得合金内部的相界面呈现波浪状起伏形貌。

C07-15

电磁悬浮过程大体积金属熔体 Al 形态变化研究

蔡晓, 王海鹏, 魏炳波
西北工业大学应用物理系

电磁悬浮无容器处理技术具有无接触、悬浮力大和加热效率高等优点, 应用于凝固理论、热物理性质测定及新型材料制备等领域。克量级(直径约 5 mm)悬浮样品极大地限制了材料性质的研究和该技术的应用范围, 所以大体积金属的电磁悬浮技术成为人们关注的重点。金属的属性(密度、尺寸、表面张力)和分布不均匀的洛伦兹力对悬浮液态金属形状有着十分显著的作用, 金属熔体在高频电磁场的作用下实现动态平衡。利用数值模拟方法建立了线圈和金属熔体之间的电磁场与金属内部流场的耦合作用模型, 结合 ALE 移动网格技术追踪气液界面, 系统探讨了不同尺寸金属 Al 在体积力(重力和洛伦兹力)和表面力(表面张力)共同作用下的熔体形状变化。通过激励电流调控金属熔体稳定悬浮位置, 发现周围空间的磁场分布和其形状存在相互作用。

C07-16

非连续增强钛基复合材料的设计与强韧化

耿林

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

C07-17

多液相分离及金属资源循环再利用技术探索

何杰¹, 陈斌¹, 刁瑶瑶¹, Ivan Kaban², 江鸿翔¹, 赵九洲¹

1. 中国科学院金属研究所

2. Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Germany

随着矿产资源的不断开采与利用, 全球正面临着有色金属矿物枯竭的危机。单靠从原生矿产资源中提取有色金属已很难满足发展的需求。解决这一难题, 国际公认的发展趋势是金属的回收与再利用。随着科学技术和生活水平的不断进步与提升, 报废的汽车和电子电器产品等含有金属的固体废弃物越来越多。其中, 电子废弃物已成为一类增长速度最快和处理难度最大的固体垃圾。大量的电子垃圾给人类、动植物以及生态环境带来了严重危害。同时, 电子垃圾因蕴藏着丰富的二次金属资源也有“城市矿山”之称。例如, 1吨废弃电路板中约含有1000克银、500克黄金、50克钡、129千克铜、15千克镍、29千克铅、15千克锡、55千克铁等十余种混合金属。然而, 混合多金属的富集与分离, 是电子废弃物金属资源化过程中处理难度最大的环节之一。我们针对电子废弃物金属资源化的关键科学问题, 提出了利用合金液-液相分离的特性, 调控液-液相分离过程, 开展废弃电路板混合金属资源分离与循环再利用的机理研究。对废弃电路板采取热解、超临界水以及机械物理处理, 考察了电路板中金属物质与非金属物质之间的解离。基于对混合金属化学组成的分析结果, 设计了混合金属自组装分离/分类系统。结果表明, 铬、锰、钴、等黑色金属主要富集在铁区, 金、银等贵金属主要富集在铜区, 铋、锡、镉、铟等重金属富集在铅区, 使包括一些毒性重金属在内的每种金属都得到高效富集与分离, 可有效避免“舍贱取贵”。这为提高金属循环和再利用效率以及减小二次污染提供了参考, 具有经济与环境双重意义。

C07-18

航空材料 EBSD 技术

陈忠伟

西北工业大学材料学院

铝合金是应用最广泛的航空材料, 其加工过程中微观组织结构决定着使用性能。而电子背散射衍射 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 技术是基于扫描电镜中电子束在倾斜样品表面激发的衍射菊池带的分析, 确定晶体结构、取向及相关信息的研究方法。

本研究以航空铝合金材料为研究背景, 采用 EBSD 分析表征技术, 研究高强铝锂合金加工过程中微观组织的变化规律, 探索了合金微观组织与各向异性的相关性; 研究铝合金搅拌摩擦焊接头区域的微观取向演变, 阐明了焊接区微观组织与力学性能的关系; 研究了铝合金凝固过程形核与枝晶生长行为, 提出了准晶诱发孪晶的形核机理, 揭示了合金中孪生枝晶的形成条件, 从而控制合金微观组织, 优化合金性能。

EBSD 技术是表征材料加工过程微米尺度微观取向的最有效方法。

C07-19

深过冷极宽凝固温域二元 Co-4.54%Sn 合金的性能特征分析

王伟丽, 王傲, 代富平, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

采用熔体浸浮方法实现了二元 Co-4.54%Sn 极宽结晶温度间隔合金的深过冷快速凝固, 结果发现液态

Co-4.54%Sn 合金的最大过冷度分别为 208 K($0.15 T_L$), 不同过冷度合金的相组成均为固溶体相(初生(aCo)相和少量的(eCo)相)与化合物 bCo_3Sn_2 组成。随着过冷度的增大, 微观组织发生由“粗大枝晶组织细小均匀蠕虫状组织”的结构转变。在快速凝固过程中测定的初生(aCo)相枝晶生长速度随过冷度增加发生先增大后减小特征, 当过冷度为 175K 时其枝晶生长速度为 0.95 m/s, 为实验所获得的最大枝晶生长速度。EDS 分析发现, 过冷度和枝晶生长速度越大, 初生(aCo)相枝晶中固溶 Sn 含量越大, 其溶质截留效应越明显。对不同过冷度条件下二元 Co-4.54%Sn 合金性能测试分析可知: 微观力学性能显微硬度与过冷度之间满足线性递增趋势, 当过冷度从 11 K 增加至 189 K, 显微硬度增大 1.5 倍, 合金的电阻率随过冷度的增大而增大, 由过冷度为 11K 时的 $76.4 \mu W \cdot cm$ 增大至 189 K 时的 $145.2 \mu W \cdot cm$, 其值增大约 2 倍。磁性分析结果表明: 随着过冷度的增加, 饱和磁化强度 M_s 下降, 剩余磁化强度 M_r 和矫顽力 H_c 增加, 且呈现为非线性增长趋势。

C07-20

静电悬浮无容器处理技术及液态金属物理化学性质研究

胡亮, 杨尚京, 王磊, 王海鹏, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

悬浮无容器处理是空间科学和材料科学交叉融合产生的新兴技术, 对于超常凝固和空间模拟的研究具有重要的科学意义。基于无容器状态, 可以获取常规条件下难以得到的液态金属的物理化学性质, 并对超常凝固规律进行深入研究。静电悬浮采用静电场力克服重力, 实现固体和液体材料的悬浮无容器处理。与电磁悬浮、超声悬浮和气动悬浮相比较, 静电悬浮的优点一是不论金属还是非金属材料均可进行悬浮无容器处理; 二是悬浮力与温度场可以分别独立控制; 三是避免了电磁搅拌、超声空化和气流扰动引起的悬浮液滴内部强迫对流, 能够实现准静态悬浮无容器处理。

本研究利用静电悬浮无容器处理技术, 实现了难熔金属 W、Ta、Nb 等的深过冷, 最大过冷度分别为 733K ($0.2T_m$), 734K ($0.2T_m$), 492K ($0.18T_m$)。采用高精度光学定位与红外探测, 测定了悬浮熔体在过热及过冷液态下的密度, 分析了难熔金属凝固时的体积突变规律。根据过冷度分布特征, 计算形核率, 揭示了过冷熔体的晶体形核机制, 并导出极限过冷度。基于热辐射规律测定了液态金属比热、以及辐射系数随温度的变化规律。结合熔体的悬浮稳定控制及形态振荡的主动激发, 实现了过冷熔体表面张力和粘度的无接触测定。通过高速高分辨光电探测技术, 对深过冷熔体再辉过程的液固界面迁移进行了实时观测, 由此确定了枝晶生长速度随过冷度的变化规律。同时发现再辉过程固相分数符合 Johnson-Mehl-Avrami 关系, 由此揭示了静电悬浮条件下深过冷熔体的形核与晶体生长动力学机制。

C07-21

微重力条件下溶液中介观晶体生长特异性

杨志懋

西安交通大学理学院

介观晶体具有很大的比表面积和丰富的内部微结构, 表现出优良的催化活性和稳定性等特性, 在电子信息、能源化工催化等领域中具有广阔的应用前景。介观晶体的形成受到溶液性质、对流、表面张力、重力等的影响, 即使在很高的浓度条件下形成的几率也很低, 受到多因素的影响, 而在微重力条件下, 溶液相上述性质的改变会影响晶体的生长以及纳米结构单元组装等过程, 进而表现出完全不同与常规条件下的介观转变行为。微重力研究不仅有望揭示重力因素对介观晶体生长机理的影响规律, 探索特殊晶体生长行为, 发现晶体生长中的新规律和新现象, 而且有望拓宽介观晶体形成条件, 发现新型介观晶体材料, 开拓晶体生长领域新的研究方向, 上述研究结果为介观晶体在电子信息、能源化工催化等领域的应用提供可能, 并对丰富人类对晶体生长的认识具有重要的理论意义。

C07-22

航空航天用碳/碳复合材料抗氧化抗烧蚀涂层研究

付前刚, 李贺军

西北工业大学材料学院

碳/碳(C/C)复合材料是先进空天飞行器及其动力系统不可或缺的战略材料,但其高于 400℃便开始氧化,严重制约了该材料在高温极端环境下的可靠应用。涂层技术是被国际公认的解决此难题的重要途径。但 C/C 氧化敏感性高、热膨胀系数低、表面微结构复杂,传统涂层因自身脆性,以及与 C/C 复合材料界面不相容等问题,防护性能距其超高温极端苛刻服役环境要求尚存在较大差距。

报告人所在团队近年来提出并实现了多相镶嵌复合、纳米线增韧、预氧化处理构造多相界面层、高织构热解碳与超高温陶瓷协同抗烧蚀等方法,有效解决了 C/C 复合材料表面陶瓷涂层易开裂和剥落、抗热震、抗冲刷和抗烧蚀性能不足等技术瓶颈。

报告涉及的主要内容包括:(1)提出多步包埋固渗制备硅化物多相镶嵌涂层思路,将硅化物弥散分布于 SiC 涂层基体中,形成的多相界面可诱导裂纹转向,对裂纹尖端的热应力起到有效的释放和再分配作用,避免了贯穿性裂纹的形成,解决了硅化物与 C/C 复合材料热膨胀系数不匹配问题。研制的硅化物多相镶嵌复合涂层在静态空气中 1500℃可有效防氧化 1480 小时,1600℃有效防氧化 900 小时。(2)C/C 复合材料表面原位生长纳米线增韧涂层方法,揭示了纳米线变形、界面撕裂脱粘、节点咬合的新型纳米强韧化机制。研制的纳米线增韧陶瓷涂层在 1600℃燃气风洞冲刷环境中对 C/C 复合材料喷管实验件的防护能力由研制初期不足 50 小时提升至超过 300 小时,为 C/C 复合材料成功应用于高温热结构部件奠定了基础。(3)C/C 复合材料进行预氧化处理新方法,通过在 C/C 表层构造一定深度及范围的孔隙层结构,经扩散渗透与反应烧结协同控制,使涂层材料在多孔层中的充分填充,在涂层与基体界面处形成机械镶嵌互锁结构,该方法为改善陶瓷涂层与 C/C 复合材料界面相容性提供了新途径。

开发的上述涂层已用于尖锐前缘、发动机支板、连接端框和喷管等实验件的防氧化、抗冲刷、抗烧蚀。

C07-23

空间环境气氛在材料表面吸附成膜的蒙特卡罗模拟研究

滕春禹, 任占勇

中国航空综合技术研究所

空间环境中存在气氛分子,材料表面与分子间存在范德华力而产生物理吸附,因此气氛分子在材料表面会成膜。气氛膜对材料接触表面粘附性质具有重要影响,如同类金属间缺乏气氛膜而直接接触有可能产生冷焊现象导致动作机构故障。气氛膜的连续性等参数与材料表面性质、气氛种类、气氛浓度、温度等参数相关,气氛膜状态受这些参数影响而变化是一个动态平衡过程。本研究的目的是探索气氛吸附膜的动态形成过程,探索气氛膜状态与气氛密度、材料表面温度等参数间的关系。

本研究采用动力学蒙特卡罗方法建立气体分子在材料表面吸附、脱附的动力学模型。考虑气氛分子随机撞击材料表面的过程、气氛分子在材料表面的吸附及脱附、扩散、聚集等过程,同时也考虑分子间的远程吸引作用。

利用所建立的蒙特卡罗模型,获得的主要模拟结果有随环境气氛密度增加,材料表面分子聚集岛密度增加,岛尺寸减小,气氛成膜时间缩短;随材料表面温度升高,分子在材料表面的扩散能力增强,岛密度减小,岛尺寸增加,气氛成膜时间增长。

得到的结论有气氛浓度、材料温度对表面气氛膜的形成具有重要影响。气氛浓度影响单位时间内撞击材料表面的分子数,进而影响分子吸附几率。吸附几率大则分子聚集成岛容易,导致岛密度增加。材料温度影响已吸附分子的脱附几率、扩散几率。温度升高,脱附几率大,则分子成膜困难,导致成膜时间增加。获得的结果及结论可为空间动作机构可靠性分析提供参考。

C07-24

电磁悬浮深过冷液态 $\text{Ni}_{80}\text{Zr}_{20}$ 过包晶合金两相共生生长研究

吕鹏, 王海鹏

西北工业大学应用物理系

采用电磁悬浮技术实现了液态 $\text{Ni}_{80}\text{Zr}_{20}$ 过包晶合金的深过冷与快速凝固, 实验获得样品最大过冷度为 225 K(0.13 T_L)。对不同过冷度下的枝晶生长速度进行了测定, 发现生长速度在临界过冷度 $\Delta T_{\text{crit}}=155$ K 时出现突变, 进一步研究表明, 当 $\Delta T < \Delta T_{\text{crit}}$ 时, 初生相 Ni_7Zr_2 领先生长, 随后发生包晶反应 $L+\text{Ni}_7\text{Zr}_2 \rightarrow \text{Ni}_5\text{Zr}$; 而当 $\Delta T > \Delta T_{\text{crit}}$, 发生了初生相 Ni_7Zr_2 和包晶相 Ni_5Zr 的共生长。

C07-25

自由落体条件下 Ni-Ti-Al 包共晶合金的微观组织演变规律研究

王磊, 胡亮, 杨尚京, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

地面条件下的自由落体技术可同时模拟空间的微重力和无容器环境, 对快速凝固理论的研究具有重要科学意义。Ni 基高温合金的耐疲劳、抗氧化和耐腐蚀等性能与凝固组织密切相关, 因此研究快速凝固条件下的微观组织演变对提高其应用性能具有理论指导作用。

本文采用自由落体技术实现了三元 $\text{Ni}_{74}\text{Ti}_{18}\text{Al}_8$ 和 $\text{Ni}_{64}\text{Ti}_{17}\text{Al}_{19}$ 包共晶合金的快速凝固, 并研究了微重力条件下快速凝固组织的演变规律。实验发现, $\text{Ni}_{74}\text{Ti}_{18}\text{Al}_8$ 合金的凝固组织由 Ni_3Ti 金属间化合物、(Ni)固熔体和 $(\text{Ni}_3\text{Ti}+\text{Ni}_3\text{Al})$ 共晶组织构成。其中 Ni_3Ti 相以板条状的小平面相方式生长, 当液滴直径从 1070 μm 减小到 100 μm 时, 凝固组织发生显著细化, 板条状小平面相宽度从 42 μm 降低为 10 μm 。(Ni)固溶体相以颗粒状镶嵌在 Ni_3Ti 相边缘或内部, 且其体积分数随合金液滴直径的减小而减少, 并当液滴直径小于 500 μm 时此相消失。对于 $\text{Ni}_{64}\text{Ti}_{17}\text{Al}_{19}$ 合金, 其微观组织由初生 NiAl 金属间化合物相和 $(\text{Ni}_3\text{Ti}+\text{t}_4)$ 共晶组织构成。在快速凝固条件下, NiAl 初生相以等轴晶方式生长, 随着合金液滴直径的减小, 冷却速率显著升高, 最大晶粒尺寸由 390 μm 降低到 15 μm 。分析表明, 两种包共晶合金的微观组织都以初生相为主, 包共晶转变在自由落体快速凝固条件下受到很大抑制。

C07-26

液态 Ni-Ti 合金的热物理性质及结构演变

邹鹏飞, 王海鹏, 杨尚京, 王磊, 胡亮, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

采用静电悬浮技术实现了 Ni-Ti 合金体系的深过冷, 其中约化最大过冷度达到 0.24 T_L , 实验测得了 Ni-Ti 合金体系的液态密度, 除液态 $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50}$ 合金的密度随温度呈非线性关系外, 其它合金的密度与温度均为线性变化。液态 Ni-Ti 合金表现出负的过剩体积, 除 $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50}$ 合金外, 随着温度的降低, 过剩体积增大。我们也运用分子动力学模拟了 Ni-Ti 合金的密度, 总体上与实验吻合较好。通过分子动力学方法, 我们也得到了一些结构演变信息。在 Ni-Ti 体系中, Ni 原子对局部结构的影响比 Ti 原子明显, 且在 $\text{Ni}_{10}\text{Ti}_{90}$ 合金中, Ni 原子容易聚集。

C07-27

三元共晶合金空间凝固研究

解文军, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

三元共晶生长涉及三个固相在同一液相中的竞争形核和协作生长, 是制备原位复合材料的一种重要途

径，同时也为探索自发模式形成提供了一类重要研究对象。三元共晶生长的模式和过程取决于三个固相的晶体特征、体积分数、三个固相和液相以及彼此之间的界面能、液固界面前沿的溶质原子扩散以及热量传输等因素。

在地面实验条件下，重力引起的对流会改变液固界面前沿的原子扩散和热量传输，重力引起的 Stokes 运动也会造成不同密度的新生相的沉降或浮升，从而掩盖了三元共晶凝固过程中的一些本征现象。空间微重力环境可以消除重力引起的这些影响，为研究三元共晶的凝固机理提供了理想的实验条件。

采用天宫二号空间实验室搭载的综合材料实验装置，我们设计并完成了 Ag-Cu-Ge 和 Ag-Cu-Sb 两种三元共晶合金的空间凝固实验。本文将介绍空间实验的实施过程，并通过空间与地面实验的对比，给出空间微重力条件下三元共晶生长模式、初生相生长机理和分布特征、溶质再分配规律等初步研究结果。

C07-28

电磁悬浮条件下液态 Ti-Nb 合金的热物性与微观组织演化

周凯，王海鹏，魏炳波

西北工业大学应用物理系

电磁悬浮无容器处理技术模拟空间环境是实现高温高活性合金熔体深过冷状态的有效途径之一，为开展深过冷条件下高温高活性合金熔体的热物理性质与凝固规律研究提供了可能。本文采用电磁悬浮无容器处理装置深入研究液态二元 Ti-Nb 合金的热物理性质与微观组织演化规律。首先，采用电磁悬浮无容器处理技术实现了液态 Ti-10at.%Nb、Ti-25at.%Nb 合金的深过冷，实验最大过冷度均超过 200K，获得枝晶生长速率随过冷度的变化关系。其次，在深过冷的基础上，结合悬浮液滴振荡法在宽广温度范围内实验测定深过冷液态 Ti-Nb 合金的表面张力，并计算其粘度、扩散系数和密度等相关热物理性质随温度的变化规律。再次，分析不同过冷度下的 Ti-Nb 合金的微观组织演化及显微硬度。最后，获得 Ti-Nb 合金的热扩散系数、热膨胀系数等随温度的变化关系。

C07-29

深过冷液态 Ni-Mo 合金中组织演变相关研究

赵晓蕾，王伟丽，魏炳波

西北工业大学应用物理系

深过冷的合金熔体因热力学亚稳特征从而改变常规条件下共晶合金凝固过程中晶体形核和热传质过程，实现快速液固相变并形成新颖的凝固组织。与传统凝固方法相比，自由落体实验提供了微重力、无容器和较高冷却速率等，液态合金在自由下落过程中因避免与器壁接触和表面氧化引起的异质形核，从而达到深过冷并实现快速凝固。

本文采用自由落体方法实现了二元 Ni-62.04wt% Mo 过共晶合金与 Ni-47.7wt% Mo 共晶合金在不同过冷条件下的无容器快速凝固，分别获得直径范围为 1530-136 μm 与 1100-101 μm 的球型粒子，液滴直径越来越小，其过冷度逐渐增大。由微观组织演变规律可知，Ni-62.04wt% Mo 过共晶合金在深过冷条件下形成了 NiMo 枝晶和共晶组织，且随粒径减小 NiMo 枝晶发生明显的组织细化，枝晶间距 L_g 显著减小；Ni-47.7wt% Mo 共晶合金的凝固组织形态具有方向性，随粒径减小其规则的层片共晶组织向不规则的共晶转变，且层片间距减小最终出现等轴晶。经过共晶共生区计算，当过冷度小于 54 K 时，液滴中形成层片状共晶组织，当过冷度大于 54 K 时，液滴中将形成不规则共晶。

C07-30

微重力环境下 $\text{Al}_{51.8}\text{Si}_{35.4}\text{Fe}_{12.8}$ 包晶合金的凝固组织与相组成研究

刘未，鲁晓宇，王海鹏

西北工业大学应用物理系

本文采用落管实验方法，在微重力实验条件下实现了三元 $\text{Al}_{51.8}\text{Si}_{35.4}\text{Fe}_{12.8}$ 包晶合金的快速凝固过程，所得粒子的凝固组织分布均匀，并且随着过冷度的增大， t_4 相的晶界由“锯齿状”向“平滑结构”转变，X-ray 衍射分析表明，合金的相组成为初生相(Si)、包晶相 t_4 及 $((\text{Si})+(\text{Al})+\text{Al}_2\text{Si})$ 。为对比分析，采用单辊实验技术在急冷条件下获得了 $\text{Al}_{51.8}\text{Si}_{35.4}\text{Fe}_{12.8}$ 包晶合金快速凝固条带，与微重力条件下制备的凝固组织形貌显著不同，沿着条带的横向， t_4 相的形态由“不规则的细小晶粒”转变为“均匀的柱状晶”，最终转变为“粗大的板条状枝晶”，由于单辊中的冷却速率约为落管中的 $10^2\sim 10^3$ 倍，其凝固组织的细化程度更为显著，但是，凝固组织的相组成并未发生改变。

C07-31

偏晶合金液-液相变过程及微重力的影响

赵九洲，江鸿翔

中国科学院金属研究所

偏晶合金十分广泛，其中许多具有重要的工业应用背景，但该类合金凝固时首先发生液-液相变，极易形成偏析严重乃至两相分离的凝固组织，其凝固过程研究与工业制备技术研发受到了严重限制。近年来，人们非常重视基于液-液相变合成弥散型原位复合材料，先后在空间微重力条件下开展了大量凝固实验，但迄今为止，有关微重力对偏晶合金凝固组织形成过程的影响机理尚不清楚。

本研究建立了偏晶合金液-液相变过程模型，模拟研究了重力、微重力条件下定向凝固偏晶合金液-液相变组织演变过程，分析了微重力影响偏晶合金凝固过程、组织的机理，结果表明，熔体对流一方面直接导致弥散相液滴形核率、数量密度、平均半径和体积分数沿试样径向不均匀分布，另一方面导致熔体内最大液滴尺寸增大，促进相偏析组织形成；微重力条件能消除了重力对流，熔体对流强度下降，有利于减缓相分离组织的形成。

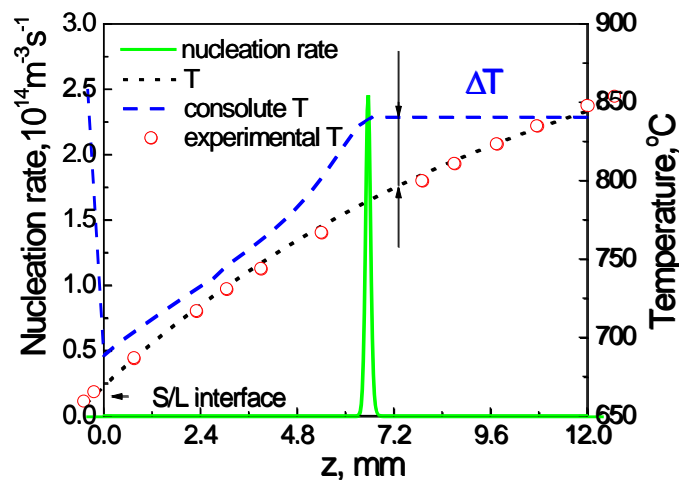


图 1 重力场内 Al-5wtPb 合金定向凝固条件下凝固界面前沿温度场、组元互溶温度和弥散相液滴形核速率。试样凝固速度为 5mm/s。

C07-32

自由落体条件下三元 Al-Fe-Ti 包晶型合金的快速凝固机制

鲁晓宇，翟薇，代富平

西北工业大学应用物理系

三元包晶型合金的深过冷与快速凝固是材料科学领域的重要研究课题之一。本文采用落管无容器处理技术实现了三元 $\text{Al}_{46.2}\text{Fe}_{36.6}\text{Ti}_{17.2}$ 、 $\text{Al}_{55.7}\text{Fe}_{32.6}\text{Ti}_{11.7}$ 和 $\text{Al}_{69.2}\text{Fe}_{22.9}\text{Ti}_{7.9}$ 包晶型合金的深过冷与快速凝固。理论计算表明，随着合金粒子直径的减小，其冷却速率和过冷度均呈指数关系增大。研究发现，三元

$\text{Al}_{46.2}\text{Fe}_{36.6}\text{Ti}_{17.2}$ 包共晶合金熔体在快速凝固过程中包共晶转变进行得不彻底, 凝固组织中包含初生 Fe_2Ti 相、包共晶相 ($t_2^* + \text{FeAl}$) 相。随着粒子直径的减小, 包共晶组织由长条状层片变为球状胞, 并且层片间距呈指数型减小; 初生 Fe_2Ti 相的形貌由粗大枝晶逐渐变为细碎枝晶, 一次枝晶轴长度与粒子直径呈线性减小关系。对于三元 $\text{Al}_{55.7}\text{Fe}_{32.6}\text{Ti}_{11.7}$ 包共晶合金, 其凝固组织由初生 FeAl 相、 t_2^* 相和 e 相组成。合金凝固组织形貌为球状包共晶胞和球状共晶胞共存, 其中包共晶胞以初生 FeAl 相为中心, ($t_2^* + e$) 二相层片包共晶胞呈辐射状生长; 共晶胞中 ($t_2^* + e$) 二相共晶也呈辐射状生长。对 $\text{Al}_{69.2}\text{Fe}_{22.9}\text{Ti}_{7.9}$ 包晶合金, 其快速凝固组织由初生 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相、 t_2^* 相与 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相组成的二相层片共晶组成, 初生 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相以板条状生长方式长大。随着粒子直径的减小, $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相板条长度变短, 初生相显著细化。在快速凝固过程中, 三种合金均呈现出显著的溶质截留效应, 凝固路径偏离常规凝固过程。

C07-33

一种空间材料实验加热装置

潘秀红, 艾飞, 刘岩

中国科学院上海硅酸盐研究所

开展空间材料科学及应用研究, 先进的空间实验装置必不可少, 其性能优劣直接关系到空间科学实验的成败。2016年4月我国实践十号返回式卫星在轨共完成了8个材料样品的空间科学实验, 所有这些材料实验均在硬件载荷“多功能材料合成炉”(简称多功能炉)中完成的。多功能炉是我国科研人员自行设计研制的一种空间材料实验加热装置, 该装置采用集成化的结构设计, 包括真空室单元、加热炉单元、样品管理单元、驱动控制盒单元四个组成部分, 采用双温区电阻加热的方式, 工作区最高温度达 950°C , 温度稳定度优于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。本文将对其结构设计、功能性能等方面进行系统介绍。

C07-34

气动悬浮方法制备缺陷态氧化钛材料

李晓禹¹, 魏呵呵², 伍辉², 李建强¹

1. 中国科学院过程工程研究所
2. 清华大学

随着对资源与环境的过分利用, 人类社会面临了越来越多的环境问题和能源问题。因此, 二氧化钛作为一种优良的既能降解多种有机物和光分解水产氢气的光催化材料受到了人们的广泛重视。近年来, 向二氧化钛中引入缺陷已经成为一种调制其禁带宽度的有效途径, 例如自掺杂和 Ti^{3+} 或氧缺陷的缺陷工程。Mao 等制备了锐钛矿结构的黑色二氧化钛, 该二氧化钛在太阳光下表现出优异的光驱分解有机物的性能和分解水产氢气速率高达。Devi 等利用溶胶凝胶法引入大量应变, 制备了缺陷二氧化钛薄膜。尽管二氧化钛的缺陷工程取得了快速发展与进步, 但是如何高效而巧妙的制备均匀而稳定的二氧化钛仍然是一个挑战。

激光气动悬浮平台是控制高速流动的气体使之通过特殊结构的扩散喷嘴产生稳定的悬浮力, 实现高熔点材料在悬浮状态下的快速熔化和深过冷凝固, 它是一种无容器科学实验平台, 能够有效模拟和研究类空间环境下材料结构和性能的演变过程, 开展材料筛选地基实验。但至今还没有将激光气动悬浮方法用于制备缺陷态氧化物。我们利用激光气动悬浮方法制备缺陷态 TiO_2 , 成功利用快速凝固将液态和高温固态 TiO_2 中的高密度氧空位保留到室温, 从而获得禁带宽度显著降低的缺陷二氧化钛纳米材料。

研究发现用气动悬浮方法制备的缺陷二氧化钛纳米材料禁带宽度从 3.03eV 降低为 2.52eV , 可见光区产氢效率高达 $8.54\text{mmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, 是商用 P25 光催化剂的 8 倍以上, 并具有优异的光降解效率和循环稳定性。

这不仅是将激光气动悬浮理论首次应用于缺陷氧化物, 还更高效制备了具有高产氢速率, 高降解速率和高稳定性的缺陷二氧化钛, 这些发现将进一步推动气动悬浮方法和缺陷氧化物光催化材料的发展应用。

C07-35

强磁场作用下 Mn-89.7%Sb 合金定向凝固行为研究

孙金妹, 刘铁, 董蒙, 王强

东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室

本文目的在于探索磁场对合金定向凝固行为及凝固组织的影响规律, 分析定向凝固过程中磁场多种作用效果的作用机制, 为进一步完善强磁场下的凝固理论及实现凝固过程的外场控制、制备高性能材料提供理论和实践基础。

选取亚共晶成分 Mn-89.7wt.%Sb 合金为研究对象, 在不同磁场强度和凝固速率下进行定向凝固实验, 结合光学显微镜、XRD、EBSD 等多种检测手段, 分析凝固速率和磁场强度对合金凝固行为的影响。

Mn-89.7wt.%Sb 合金的定向凝固过程中, 无磁场时, 各凝固速率下稳定区凝固组织始终呈定向生长, 随着凝固速率的提高, 初生 MnSb 相的一次枝晶之间的间距变小, 二次枝晶生长受到抑制, 凝固组织变得细密均匀。施加磁场后, 定向排列的枝晶形貌消失, 沿热流方向的定向排列组织被扰乱, 枝晶生长呈斑块状, 呈现等轴晶形貌。磁场的施加明显细化了稳定定向凝固区下部区域组织, 随磁场强度的增加, 初生 MnSb 相以及共晶 MnSb/Sb 基体的晶粒尺寸均明显减小, 细化区域长度随磁场强度的增加呈现先增加后减小的趋势。

强磁场作用于 Mn-89.7wt.%Sb 合金定向凝固过程中, 诱发了初生 MnSb 相由树枝晶向等轴晶的转变, 减小了初生相和共晶基体的晶粒尺寸并改变了细化区域长度。

C07-36

悬浮无容器条件下液态合金深过冷与快速凝固

王海鹏, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

采用电磁、静电等物理场可实现金属材料的悬浮非接触状态, 是模拟外层空间无容器物理环境的重要途径。作者采用电磁悬浮和静电悬浮无容器处理技术, 研究了多种高温复相合金在无容器条件下的快速凝固行为, 研究的合金有 Ni-Si、Ni-Zr、Ni-Cu-Si、Ni-Cr-Fe、Ni-Cu-Fe-Co、Ti-Ni、Ti-Al、Ti-Al-V、Co-Cu-Ni 等, 发现在悬浮无容器条件下由于消除异质形核从而使液体合金实现深过冷, 使 8 种合金的过冷度超过 $0.20T_L$, 在此基础上研究了大过冷范围内液态合金的快速凝固规律, 尤其是在包晶体系发现过冷度对领先形核生长相作用显著, 可实现初生相与包晶相共生生长、在更大过冷条件下可实现包晶相领先生长从而消除初生相; 对于多元体系, 深过冷条件下正负偏析的组元均呈现固溶度拓展乃至实现无偏析凝固; 对于共晶体系, 金属间化合物作为共晶相的凝固过程更易形成不规则共晶。为辅助实验研究, 作者采用分子动力学方法, 抽象并建立了凝固过程相选择计算模型, 用以阐明合金凝固难以直接表征的实验过程。

C07-37

钛合金及钛铝合金精密热成型及工程应用

陈玉勇

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

C07-38

液态金属 Stokes-Einstein 关系式高温异常失效现象的分子动力学模拟

韩秀君, 李建国

上海交通大学材料科学与工程学院

Stokes-Einstein (SE) 关系式描述了液体自扩散系数和粘度的关联, 对于液体本身的表征及其结晶和非晶转变过程研究具有重要意义。SE 关系式高温异常失效现象与人们的传统认知及模式耦合理论(MCT) 关于过冷液体微观动力学的预测相矛盾。

本文以多体势描述原子间相互作用,采用分子动力学模拟方法对液态 Al 及 Cu-Zr 和 Fe-Al 二元合金不同温度下自扩散系数、粘度、微观动力学及局域结构进行了研究。

关于输运性质的计算表明,在液态 Al、Cu-Zr 和 Fe-Al 中 SE 关系式均发生异常失效现象,且失效温度远远高于 MCT 预测的临界温度,甚至在熔点以上。从原子扩散和弛豫过程研究了动力学的空间不均匀性和慢化行为;从局域五次对称和配位数分析了液体微观结构。对输运性质、微观动力学和局域结构的耦合关系进行了研究,探讨了 SE 关系式的异常失效机制及失效温度的预测方法。

研究表明,原子动力学的空间不均匀性是 SE 关系式高温异常失效的动力学根源,而局域五次对称性的变化是 SE 关系式异常失效的结构根源。二元体系两组元自扩散系数的比值(D_1/D_2)以及粘度对于高温阿伦尼乌斯关系的偏离可以合理预测 SE 关系式异常失效温度。

C07-39

铁基二元合金中 α/γ 界面偏聚与迁移动力学研究

陈浩

清华大学材料学院

The austenite (γ) \rightarrow ferrite(α) and ferrite(α) \rightarrow austenite (γ) transformation in Fe-based alloys have received particular concern in the past decades due to their both theoretical and practical importance. In this work, kinetics of the $\alpha\rightarrow\gamma$ and $\gamma\rightarrow\alpha$ transformation in a series of Fe-xMn and Fe-xNi (x=1w.t.% to 12w.t.%) has been experimentally investigated. A so-called GEB model, in which chemical driving force at the migrating interfaces is assumed to be balanced by Gibbs energy dissipation due to alloying elements diffusion inside the interface and interface friction, has been applied to modeling the kinetics of the $\alpha\rightarrow\gamma$ and $\gamma\rightarrow\alpha$ transformation. A kinetic transition from partitioning to partitionless mode is predicted to occur during the $\alpha\rightarrow\gamma$ and $\gamma\rightarrow\alpha$ transformation, which is in good agreement with experimental results. Value of the intrinsic α/γ interface mobility is also derived from experiments.

C07-40

液态 Co-Mo 包晶合金的深过冷与快速凝固

沙莎, 王伟丽, 魏炳波

西北工业大学应用物理系

包晶合金具有独特的物化性能和良好的工艺性能,被广泛应用于轻质合金,稀土永磁材料和高温超导材料等方面。目前,对于包晶合金的研究尚未形成较为完整的理论体系,特别是在深过冷条件下包晶合金的快速凝固特性还有待进一步的研究。自由落体技术可同时模拟空间环境微重力和无容器的特点,为研究合金深过冷条件下的快速凝固规律提供了有力途径。本文采用自由落体技术研究了二元 Co-61.2%Mo 亚包晶和 Co-63%Mo 过包晶合金在快速凝固条件下的组织演变规律。实验发现,随着液滴直径的减小,合金熔体的过冷度和冷却速率均增大,这两种合金的微观组织均由初生 Co_2Mo_3 枝晶, Co_7Mo_6 枝晶和共晶构成。对于 Co-61.2%Mo 亚包晶合金,当液滴直径从 1354 减小到 149 μm 时,其凝固组织显著细化,包晶 Co_7Mo_6 相体积分数从 47.5%增大到 71.1%。当合金液滴直径减小至 100 μm 以下时,初生 Co_2Mo_3 相几乎完全消失,随之发生的包晶反应被抑制, Co_7Mo_6 相直接从过冷熔体中形核并快速生长。在 800-1171 μm 液滴直径范围内, Co-63%Mo 过包晶合金液滴中初生 Co_2Mo_3 枝晶以小平面相和等轴晶的形貌存在。随着液滴直径的进一步减小,伴随着初生枝晶的明显细化,等轴晶形貌消失。当液滴直径减小到 400 μm 以下时,包晶反应被完全抑制,初生 Co_2Mo_3 相和包晶 Co_7Mo_6 相均从过冷熔体中直接析出,两相协同生长呈现类层片状共晶形貌。

C07-41

蒸发驱动下的胶体颗粒组装行为

李伟斌^{1,2}, 蓝鼎¹, 王育人¹

1. 中国科学院力学研究所
2. 中国科学院大学工学院

液滴蒸发过程在自然界普遍存在。在过去的二十几年里,液滴蒸发中的微流动和颗粒沉积引起了科研人员极大的研究兴趣,这既因为蒸发过程中蕴含着丰富的物理学现象,例如常见的“咖啡环”效应,又由于其在微流控制、光子晶体制备、喷墨打印等领域展现出的广阔应用前景。然而,关于液滴蒸发中的颗粒组装动力学理论仍然不完善,这大大限制了其应用。我们通过制备一种亲疏水限位基片,开展了受限胶体液滴的蒸发实验,通过对液滴侧视轮廓和内部颗粒运动的分析,揭示了大接触角演化过程中胶体颗粒的三种动力学行为,提出了重力对咖啡环效应的弱化机制。利用微分干涉显微技术研究了“咖啡环”内部网络状图案的形成机制,建立了干区扩展模型,通过理论分析,揭示了液膜去浸润和颗粒组装的耦合作用。

仅发表论文

C07-PO01

Al-Si-Zn-O 复合型空间抗辐照热控涂层的制备与性能研究

刘刚¹, 王简², 王惠芬¹

1. 上海卫星装备研究所
2. 华北电力大学

本文针对卫星热控涂层在轨运行期间将经受空间辐射环境效应并导致光学和热控性能下降的问题,拟在一种常用热控涂层表面研究制备一层抗空间电子-质子辐照的防护膜,以提高热控涂层的抗辐照能力,从而提升卫星可靠性和延长寿命。

文章采用水热生长法和溶胶-凝胶法在薄膜二次表面镜热控涂层(Kapton/Al)表面镀制一层Al-Zn-Si-O防护膜,分别采用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对膜层进行形貌观察与成分分析。利用空间粒子综合辐照地面模拟设备开展辐照模拟试验,采用原子力显微镜(AFM)对辐照前后的微观形貌进行分析,采用分光光度计测试辐照前后的太阳吸收比与光学透光率。

研究结果显示,该法制备的膜层结构表现为非晶态连续SiO₂包覆AZO(掺铝氧化锌)颗粒的新形式,相比于单一的SiO₂具有更好的韧性,相比于单一的Al₂O₃具有更好的连续性。与未镀防护膜的热控涂层相比,辐照前的光学与热控性能基本一致。但是在辐照后太阳吸收比升高了0.04,仅是未镀防护膜热控涂层的1/4;光学透过率下降不超过10%,是未镀防护膜热控涂层的1/6。原子力显微形貌观察结果也表明,未镀防护膜的热控涂层在辐照后不仅颜色变深,而且变得粗糙,而镀制防护膜的热控涂层依然光滑、颜色鲜亮,与性能测试的结果变化一致。

综上所述,本文所制备的Al-Si-Zn-O复合型空间辐射防护膜不仅具有较好的薄膜质量,而且几乎不影响热控涂层的热控性能与光学性能,且辐照后相比于未镀防护膜的热控涂层性能几乎不退化,用于热控涂层具有较好的抗空间电子-质子辐照能力。

C07-PO02

CVD 铌与碳/碳化硅复合材料的界面研究

魏燕^{1,2,3}, 陈力^{1,2}, 郭俊梅^{1,2}, 蔡宏中^{1,2}, 郑旭^{1,2}, 张翎翔^{1,2}, 胡昌义^{1,2}

1. 昆明贵金属研究所
2. 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室
3. 昆明理工大学

碳纤维增强的碳/碳化硅复合材料是近年来发展起来的新型高温陶瓷复合材料,在航空、航天及其他高技术领域具有广泛应用。本文采用化学气相沉积(CVD)的方法在C/SiC复合材料表面沉积铌,由于铌具有较好的可焊性,进而实现C/SiC复合材料与其他金属材料的过渡连接。

通过X射线衍射、扫描电子显微镜、金相分析、剪切强度测试等对所得到的CVD Nb/(C/SiC)复合界面进行研究,分析了复合界面的扩散、界面物相的形成以及热处理前后界面物相的演变规律,同时分析了界面结合强度的影响因素。为碳/碳化硅复合材料与金属连接的设计和应用提供参考。

研究发现,沉积态Nb/(C/SiC)复合界面同时存在界面扩散及界面反应。界面反应区域属于Si原子和C原子的富集区域。沉积态CVDNb/(C/SiC)复合界面反应生成NbC、Nb₅Si₃和Nb₃Si相。热处理后,界面反应进一步进行,除了已生成的NbC、Nb₅Si₃和Nb₃Si相,还生成Nb₂C新相。

沉积态CVDNb/(C/SiC)复合材料的室温剪切强度仅为21.73 MPa。热处理后,室温剪切强度可提高到37.75 MPa。在本研究条件下,1200℃是较为理想的热处理温度。随着热处理温度的升高,热处理时间的延长,界面处铌的碳化物和硅化物含量增加,可导致复合材料界面结合处硬度升高。随着碳化物及硅化物的继续增多,会造成界面处的脆性变大,降低结合层的强度。

C07-PO03

多向双基体C/C复合材料不同试验条件下烧蚀机制

魏连锋,崔红,吴小军,肖春,张波

西安航天复合材料研究所

采用碳纤维束与碳纤维棒混合编织法进行预制体成型,经过化学气相渗透、沥青浸渍碳化复合循环致密获得多向碳纤维增强双基体碳基复合材料(多向双基体C/C复合材料),分别通过氧乙炔烧蚀,等离子体烧蚀和固体火箭发动机地面试车进行了材料的烧蚀性能测试,采用扫描电子显微镜及其能谱分析等研究了烧蚀后的微观形貌。结果表明,等离子体烧蚀后纤维呈现针尖状,较氧乙炔烧蚀后的笋尖状更为细长,而固体火箭发动机试车后碳纤维和基体破坏严重,材料表面有碳纳米线和沉积的热解碳出现。通过分析认为,氧乙炔烧蚀机制以氧的热化学烧蚀为主,等离子体烧蚀机制以高速等离子体冲刷为主,而固体火箭发动机试车以推进剂两相粒子在高速高压强条件下的机械冲刷为主。

C07-PO04

Al-Ge共晶合金的无容器非平衡凝固研究

宋瑞波,曹崇德

西北工业大学

本文采用落管微重力无容器处理技术,对液态Al-45wt%Ge、Al-51.6wt%Ge、Al-53wt%Ge和Al-55wt%Ge共晶合金进行了无容器处理,使直径为100-1000mm的合金液滴实现了快速凝固。理论计算表明,合金液滴在落管中自由下落过程中冷却速率和过冷度随液滴尺寸的减小而显著增大,Al-55wt%Ge合金达到的最大过冷度为234K。

实验分析表明,在Al-45wt%Ge、Al-51.6wt%Ge、Al-53wt%Ge三种合金的液滴中没有得到全共晶组织,而均含有初生(Al)相,随着液滴尺寸的减小,初生(Al)相发生柱状枝晶向等轴晶的形态转变。前两种合金的共晶组织均为规则层片共晶,而在直径小于600mm的Al-53wt%Ge合金液滴中发现有内部为(Ge)为主体的羽毛状共晶的球状组织。对于Al-55wt%Ge合金液滴,有的含有两种初生相,即(Al)与(Ge),有的初生相只有(Al)。随着液滴尺寸的减小初生相的含量越来越少,同时含有(Al)、(Ge)两种初生相和只含初生(Al)相的凝固液滴百分比也减小,在直径小于600mm的液滴中出现全共晶组织。随过冷度的增大,Al-55wt%Ge合金中的共晶组织发生规则层片共晶—羽毛状共晶—不规则共晶的形态转变。羽毛状共晶组织是中等过冷条件下的产物,其中(Ge)为领先相,这种组织的含量及含有该组织的液滴所占的比例随液滴尺寸减小而增加。发现初生(Ge)相始终以小面方式生长,而初生(Al)相往往在初生(Ge)相周围以枝晶方式生长,这说明初生(Ge)相是初生(Al)相的有效异质形核剂。