

## C07.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、赵九州、金蔚青

### C07-01

#### 空间微重力条件下的材料制备研究与应用

潘明祥，汪卫华，王彬彬

中国科学院物理研究所

在空间微重力环境下开展与材料制备相关的应用活动，或者说产业化是空间技术应用及材料加工活动的主要方向之一。特别是在国际空间站建成后的美国、日本、欧洲与俄罗斯，在注重于在上面继续开展基础的材料科学研究的同时，如何开展微重力环境下的材料加工商业化活动也越来越受到人们的重视。随着我国空间技术发展，及国家对基于先进技术应用支持的逐步重视和投入，如何利用我国的空间飞行平台（例如，将于 2022 年左右建成的空间站及我国商业化返回式卫星平台），依据应用需求和未来在先进和尖端材料发展等前瞻性探索方面，走我们自己的路，这也是该考虑的时候了。为此，本报告将对国际上在空间微重力环境下已经开展的材料科学研究及加工活动如何服务于应用及对地面材料加工工艺的改进等产生的一些影响或效益等做点介绍，以期服务于我们未来在这方面可能进行的思考，尽可能拓展我国空间技术应用的效益。

关键词：空间飞行平台，微重力环境，材料科学研究，材料，产业化

### C07-02

#### Ag-Cu-Ge 三元共晶合金的空间凝固研究

解文军，魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

空间微重力环境消除了流体静压力和浮力对流，可以实现熔体由表面张力约束的状态和由扩散机制控制的传热传质过程，为研究液态金属的形核、相选择、晶体生长、凝固组织演化等提供了理想的实验条件。

三元共晶合金的凝固涉及三个固相在同一个液相中的竞争形核和协作生长，对理解自发模式形成现象和优化原位复合材料制备工艺都具有重要的科学和工程意义。

2016 年 9 月 15 日，天宫二号空间实验室成功发射并开展了多项空间材料科学实验，其中包括 Ag-Cu-Ge 三元共晶合金的空间凝固。本文对空间实验条件、初生相形成、溶质分布、小面-非小面转变、三元共晶模式等进行了分析，发现重力条件改变了三元共晶凝固过程中初生相和溶质的分布规律，空间实验条件使 Ge 相和 Cu<sub>3</sub>Ge 相之间的依附关系凸现出来。

本文由中国载人航天工程和国家自然科学基金（51371148）资助。

关键词：三元共晶，空间凝固，天宫二号

### C07-03

#### SiC 纳米线/带强韧化陶瓷涂层研究

褚衍辉

华南理工大学

高温易氧化和烧蚀是碳/碳(C/C)复合材料作为热结构材料使用的瓶颈问题，陶瓷涂层技术是解决该难题的最有效途径，但其自身固有的脆性以及与 C/C 基体之间的弱界面结合是亟需攻克的关键性科学难题。为此，我们提出 SiC 纳米线/带强韧化陶瓷涂层的新思路，并采用 CVD 法、原位合成法以及包埋浸渗法等相结合的途径成功地将不同形貌和长径比的 SiC 纳米线/带均匀地引入陶瓷涂层中，在某种程度上解决了陶瓷涂层的脆性以及与 C/C 之间弱的界面结合问题，制备出具有优异抗氧化性能的 SiC 纳米线/带增韧陶瓷涂层，实现了陶瓷涂层对 C/C 复合材料在室温→1500℃宽温域防氧化的保护，发现了 SiC 纳米线自身塑性变形和节点咬合以及界面塑性脱粘和铆钉效应等新型纳米强韧化机制。

### C07-04

#### 微重力环境对高温加热炉温场的影响

汤美波，艾飞，潘秀红

中国科学院上海硅酸盐研究所

重力环境、炉内气体压力和加热功率等因素都会影响高温加热炉的温场。由于重力影响,加热时炉内气体产生对流,从而改变炉内温场;炉内不同气体压力时,气体对流强弱也不一样,也影响炉内温场。当重力环境变化时,要使炉内温场不变,需要改变加热功率或者炉内气体压力。通过分析天宫二号综合材料高温实验装置在空间(微重力)和地面(常重力)相同样品实验(温场一致)参数,确定了在炉内气体压力相同时空间和地面加热功率的变化关系:空间和地面的功率比值约为 97.5%;以及在相同加热功率时空间和地面炉内气体压力的变化关系:地面炉内气体压力为空间炉内常压的 50%。这对设计空间高温加热装置具有重要的指导和参考意义。

关键词:微重力,温场,气体压力,加热功率

## C07-05

### 稀土 Ce 对 13Cr 钢微观组织和力学性能的作用规律

阮莹,王青青,魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

超级马氏体不锈钢是在传统马氏体不锈钢的基础上通过降低 C 含量、控制 Ni 和 Mo 含量而发展起来的钢种。超级马氏体不锈钢的强度、韧性、耐蚀性优异,被应用于造船、水轮机叶片、石油和天然气等领域。稀土元素通过与钢中其他合金元素相互作用,从而可以改善钢的综合性能,因此研究稀土元素在钢中的作用具有重要的科研价值。以 13Cr 超级马氏体不锈钢为实验材料,采用电弧熔炼技术和自由落体技术分析了稀土 Ce 对 13Cr 钢的显微组织和力学性能的影响。13Cr 钢中含有板条马氏体和羽毛状贝氏体两种组织,随着稀土 Ce 含量的增加,13Cr 钢的显微组织逐渐细化,生成的羽毛状贝氏体组织所占的体积分数也越来越大,同时由 TiN 和  $Al_2O_3$  形成的不规则夹杂物变质为球形或椭球形,甚至形成尺寸较大的稀土复合夹杂物。13Cr 钢的硬度和屈服强度随着稀土 Ce 含量的增加而发生变化。在自由落体实验中,通过 TEM 分析确定 13Cr 钢微观组织由板条马氏体和铁素体组成。钢液获得的冷却速率和过冷度随着液滴直径的减小逐渐增大,其微观组织也发生细化。无论是否添加稀土 Ce,13Cr 钢液滴在快速凝固后的硬度值都随着过冷度的增加而升高,在同一过冷度下,添加稀土 Ce 后 13Cr 钢的硬度值降低。

关键词:不锈钢,稀土元素,落管,微观组织,快速凝固

## C07-06

### 极薄 3J1 弹簧片的时效强化机理研究

罗盛宝<sup>1</sup>,佟晓静<sup>2</sup>,曾祥兵<sup>1</sup>,潘晓霞<sup>1</sup>,廖彬<sup>1</sup>

1.中国工程物理研究院总体工程研究所

2.中国工程物理研究院电子工程研究所

3J1 是为制备弹性元件而开发的一种 Fe-Ni-Cr-Ti-Al 超弹合金,被广泛地用于航空航天领域。本文研究了厚度为 0.1 mm 的 3J1 弹簧片经 610、635、650 和 680 °C 时效处理 4 小时后的组织演化特征与力学性能。时效处理后,具有  $L1_2$  结构的  $Ni_3(Al, Ti)$  相从( $\gamma$ -Fe, Ni)相基体中析出,表现为纳米纤维和弥散分布的亚微米颗粒。随着时效温度的升高,  $Ni_3(Al, Ti)$  析出相的体积分数先增大后减小,在 650°C 时效温度时达到最大值 49 vol.%。  $Ni_3(Al, Ti)$  纳米纤维的直径和间距均随时效温度的增加而逐渐增大,其最大直径和最宽间距分别为 38 和 58 nm。  $Ni_3(Al, Ti)$  相的析出极大地提升了弹簧片的力学性能。时效处理前,弹簧片的抗拉强度、屈服强度、伸长率和显微硬度分别为 1126 MPa、1121 MPa、0.6% 和 367 HV; 时效处理后,其最大值分别达到了 1471 MPa、1229 Mpa、14.0% 和 460 HV。

关键词:人工时效,组织演化,力学性能,沉淀强化

## C07-07

### 微重力下几种钛、铝合金及复合材料的凝固行为研究

罗兴宏<sup>1,2,3</sup>,王亚亚<sup>1,2,3</sup>

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学院核用材料与安全评价重点实验室

3.中国科学技术大学材料科学与工程学院

钛、铝合金及复合材料有望成为空间增材制造的备选材料,为探究微重力环境对这几类材料凝固行为的影响,采用 50m 落管半熔化法开展了 TC4、TC8、TC20 钛合金、Al-5wt%Si、Al-7wt%Si 铝合金以及 7vol%  $TiB_2/Al$  复合材料的微重力和重

力凝固实验。对比分析了重力、合金成分和实验参数对凝固组织的影响，并探讨了相关机制。结果发现：

1. 钛合金凝固组织为多晶组织，样品底部为尺寸较小等轴晶，中上部多为尺寸较大拉长形态晶粒。相比之下，微重力样品中大尺寸晶粒比例较高，晶粒数量较少。三种合金中，TC8 合金凝固速度最慢，其微重力与重力样品凝固组织之间的差异最大。此外，所有样品中合金元素沿生长方向分布均匀，未发生偏析。由于凝固速度较快，对流影响微弱，钛合金凝固过程主要由热扩散主导。

2. Al-Si 合金凝固组织由枝晶和枝晶间共晶组织组成。微重力样品中的共晶百分比和一次枝晶间距大于重力样品，随凝固速度与 Si 含量升高差异减小；此外，微重力样品的二次枝晶臂间距小于重力样品。相比之下，Al-5Si 合金重力样品中 Si 元素的偏析更严重，而 Al-7Si 合金微重力样品中 Si 元素的偏析则更严重，凝固速度增加会加剧这种差异。Al-Si 合金的凝固明显受浮力对流影响。

3. 7vol% TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料的凝固组织由 Al 枝晶及聚集分布于枝晶间的 TiB<sub>2</sub> 粒子组成。相比于重力样品，微重力样品中枝晶更为粗大。沿重熔外延生长方向，TiB<sub>2</sub> 粒子呈被排出状态，其中重力样品底部的粒子数量多于微重力样品，上部的粒子数量少于微重力样品。复合材料凝固过程受浮力对流、沉降效应的双重影响。

注：载人航天领域预先研究项目（030302）

关键词：微重力，落管，凝固，钛合金，铝合金，复合材料

## C07-08

### 液体金属回路中的螺旋流及模式螺旋磁场下凝固过程的研究

王晓东，郭晓康，成龙

中国科学院大学

螺旋流常见于大自然以及生活和生产过程中，如大气中的 Ekman 层（地转平衡下的科里奥利力和地表摩擦力共同作用引起的大气螺旋流动）、洗漱池中形成的水涡、冶金连铸工艺中中间包钢液形成的螺旋流、热核聚变反应堆中的 LiPb 流程中流动控制等。研究螺旋流现象有其基础和应用意义。本报告分为两部分，第一部分介绍在磁流体力学中常用的研究手段“液体金属回路”中实现的螺旋流，该回路装置是我们与德国 Ilmenau 科技大学合作研制的，通过多重磁场驱动的方式实现了可调控的螺旋流，可用于研究螺旋流在有磁和无磁作用下的磁流体力学行为。第二部分螺旋磁场对合金凝固过程的干涉作用。磁场分为两种类型：一个是永磁螺旋磁场，一个是线圈型螺旋磁场（空间科学先导专项资助研制），它们均具有磁场运动方向周期性调控的功能。我们研究了模式螺旋磁场的分布特点和时空变化特征。采用了超声多普勒测速技术实测了不透明金属在模式螺旋磁场作用的流场，获得了时空变化的速度场，得出了两种流动模式及其转化条件（研究结果发表在 MMTB，被评为 2016TMS 学会年度最佳论文——El-Kaddah 奖）；进一步地我们研究了该特殊磁场作用下对合金凝固组织和偏析的作用，本报告最后给出凝固偏析显著改善的多物理场、多相、多尺度的机制。该磁流体力学和材料学方面的研究有助于设计微重力材料科学装置和进行空间材料科学的探究。

## C07-09

### 直接凝固法制备大块三维超细结构材料研究

卢一平，曹志强，王同敏，李廷举

大连理工大学

超细晶材料由于具有很多优异的物理、化学和力学性能在工业上具有重要的经济价值。但是大块超细晶材料的低成本高效制备一直是其工业化应用的关键问题之一。通常超细晶材料的制备方法有：非晶晶化法、电脉冲沉积、大塑性变形法等，但是这些方法难以制备大块超细晶材料。而常用的惰性气体冷凝加上后续固态烧结的方式来制备大块超细晶材料，面临着高的成本、气孔和氧化夹杂等缺陷，不利于其大规模工业化应用。凝固法直接制备大块超细晶材料是成本最低效率最高的方法，同时也可以避免烧结法的气孔和氧化夹杂等缺陷，但是一直没有实现。

鉴于此，我们提出了通过直接凝固的方法来制备大块超细晶材料的方法，并制备了出大块三维超细晶高熵合金材料。

## C07-10

### 空间模拟环境中液态钛基合金的热物理性质

周凯，王海鹏，吕鹏，魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

空间模拟环境中合金熔体的热物理性质研究是空间材料科学和快速凝固科学的重要课题之一。本文以钛基合金为研究对象,利用电磁悬浮无容器处理技术模拟空间环境,实现钛基合金熔体的深过冷与快速凝固。首先,采用非接触测量方法定量测定稳态与亚稳态钛基合金熔体的表面张力、比热等重要热物理性质。其次,结合分子动力学方法计算宽广温度范围内合金熔体的热物理性质与液态结构。再次,揭示空间模拟环境中稳态与亚稳态合金熔体内部的热对流、热辐射等传热机理及其对非平衡结晶过程的作用规律,阐明合金熔体结晶过程与过冷度之间的耦合关系。最后,深入研究钛基合金的热扩散系数和热导率等随温度的变化关系,揭示微观组织、相组成等对金属传热的影响机制。

关键词: 深过冷, 空间模拟, 钛基合金, 热物理性质

#### C07-11

##### 空间环境对金刚石/铜复合材料性能的影响规律研究

谢忠南, 郭宏

北京有色金属研究总院

金刚石/铜复合材料具有热导率高、热膨胀系数可设计、比重小等特点,有望成为新一代航天电子器件热管理材料。本文针对金刚石/铜复合材料进行了空间环境(包括热循环、粒子辐照和综合环境试验)地面模拟试验,对试验前后复合材料的热物理性能及力学性能进行了测试。通过对比不同环境效应对复合材料性能和微观组织的影响,分析了复合材料性能与微观组织的变化规律。结果表明,复合材料在经过空间环境模拟试验后,热导率均在 600W/mK 以上,变化幅度小于 5%;抗弯强度均在 400MPa 以上,性能变化范围在 1%~10%之间。因此可认为,经空间环境试验后,金刚石/铜复合材料仍保持良好的热物理性能及力学性能,满足空间环境使用的要求。

关键词: 金刚石/铜复合材料, 空间环境, 热物理性能, 力学性能

#### C07-12

##### 电磁悬浮条件下二元 Fe-Sn 合金熔体的相分离与快速凝固研究

常健, 吴宇昊, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

电磁悬浮无容器技术在空间材料科学地面模拟研究中有着广泛的应用。由于电磁搅拌作用,处在电磁悬浮状态下的液态合金内部存在着显著的强迫液相流动,从而对深过冷合金熔体的凝固过程及组织特征产生显著影响。本文通过电磁悬浮技术实现了二元 Fe-Sn 偏晶合金的深过冷和快速凝固,分析了电磁搅拌作用下 Fe-Sn 合金熔体中相分离凝固组织随过冷度的变化特征,测定了  $\alpha$ -Fe 相枝晶生长速度随过冷度的增长规律。并基于轴对称液态合金电磁悬浮模型,计算了悬浮状态下 Fe-Sn 合金熔体中液相流动规律。利用相分离快速凝固组织形貌特征,分析了电磁搅拌引起的强制对流对相分离及其后续快速凝固过程的影响机制。

关键词: 电磁悬浮, 深过冷, 相分离, 快速凝固

#### C07-13

##### TIG 重熔对网状 TiBw/TC4 复合材料组织及性能的影响

纪明, 黄陆军, 耿林

哈尔滨工业大学

网状结构 TiBw/TC4 复合材料相对于传统钛合金而言具有优越的比模量、高温力学性能,但是其强度、硬度、高温性能等仍有待进一步提高。本课题采用 TIG 重熔技术对网状结构 TiBw/TC4 复合材料进行重熔,探究 TIG 重熔对网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织及性能的影响。通过对重熔后的复合材料进行金相显微镜、扫描电子显微镜观察, XRD 物相分析,研究了不同重熔工艺参数,材料参数对复合材料微观组织的影响规律,发现重熔后复合材料网状结构尺寸细化,且增强相含量达到 10vol.%时,细化的网状结构消失;通过对重熔后的复合材料进行硬度测试、室温弯曲测试、高温拉伸测试等,研究了不同重熔工艺参数,材料参数对复合材料力学性能的影响规律,发现重熔后, 3.4vol.%、10vol.%、15vol.%和 20vol.%TiB 复合材料的硬度分别达到了 HRC 36、HRC 40、HRC 43、HRC 50,相比于同含量的烧结态复合材料提高了约 10%;在其延伸率没有明显下降甚至有所上升的情况下,高温拉伸强度均提高了 10%~20%; 3.4vol.%TiB 复合材料的弯曲强度在重熔后达到了 1900MPa,相比烧结态复合材料提高了 7%;说明重熔后复合材料的性能得到了一定改善。

关键词: 钛基复合材料, TIG 重熔, 显微组织, 力学性能

## C07-14

### 过冷液态 Ni-Zr 亚包晶合金中初生相与包晶相的竞争形核与生长

吕鹏, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

利用电磁悬浮技术实现了液态 Ni-16 at.% Zr 亚包晶合金的深过冷和快速凝固。发现了在快速凝固过程中存在临界过冷度  $\Delta T_{\text{crit}}=106$  K: 当  $\Delta T < \Delta T_{\text{crit}}$  时, 初生相  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$  优先从过冷熔体中凝固, 凝固组织由  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$ 、 $\text{Ni}_5\text{Zr}$  和共晶组成。采用 EBSD 技术研究了  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2/\text{Ni}_5\text{Zr}$  界面的取向关系, 揭示了两相界面存在明确的取向关系  $\{111\}\text{Ni}_7\text{Zr}_2//\{111\}\text{Ni}_5\text{Zr}$ 。利用 TEM 技术揭示了  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2/\text{Ni}_5\text{Zr}$  界面处原子的匹配情况, 发现界面处的原子排列平直且比较光滑, 可以用  $(200)\text{Ni}_5\text{Zr}$  描述其界面, 说明了初生相  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$  和包晶相  $\text{Ni}_5\text{Zr}$  两相界面处双方原子匹配较好。当  $\Delta T > \Delta T_{\text{crit}}$  时, 包晶相  $\text{Ni}_5\text{Zr}$  直接从过冷熔体中生长, 初生相  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$  的形核和生长被完全抑制。采用 EBSD 技术对  $\text{Ni}_5\text{Zr}$  相的生长取向进行了表征, 结果表明  $\text{Ni}_5\text{Zr}$  相的生长取向比较单一, 生长方向近似平行于  $\langle 110 \rangle$  取向。

关键词: 包晶凝固, 过冷度, 界面取向关系, EBSD, TEM

## C07-15

### 太空制造技术研究进展及思考

王功

中科院空间应用工程与技术中心

## C07-16

### 重力和微重力环境中 Zr 基合金/SiC 润湿界面研究

李宏, 罗欣, 李正坤, 朱正旺, 王爱民, 付华萌, 张海峰

中国科学院金属研究所

复合材料是空间材料科学重要的研究内容, 空间微重力环境消除了在地面通常情况下存在的液体对流和沉浮所导致的第二相偏聚及与母相分离的现象, 空间微重力环境下第二相与液相间的润湿性及两者间的界面扩散、溶解行为有所不同, 为复合材料的制备和相关机理研究提供了有利条件。

设计实验装置, 利用综合材料实验装置, 在天宫二号空间实验室进行了在轨空间实验, 并在地面重力场环境中, 按照空间实验的热控工艺进行了地面对比实验, 研究重力和微重力环境中 Zr 基合金熔体 SiC 基片之间的润湿行为、界面扩散和溶解行为。

结果表明, 空间实验和地面对比实验中, Zr 基合金在 SiC 基片上的润湿性都很好, 说明 SiC 适合做 Zr 基合金复合材料的增强相。对润湿样品的表面和液/固界面观察发现, 空间润湿样品中在固-液-气三相线位置形成宽度约在 70~90 $\mu\text{m}$  的前驱膜, 而地面样品中没有形成前驱膜; 此外, 空间与地面润湿样品液/固界面及组织形貌也有明显差异。利用扫描电镜、二次离子质谱等对润湿样品界面元素面分布情况进行分析, 结果表明, 活性元素 Zr 向液/固界面处富集。

根据表面和界面的实验结果, 可以得出空间实验前驱膜的形成机理。在空间微重力环境中, 由于 Zr-基合金熔体中的主要活性元素 Zr 与 SiC 基片之间吸附性很强, 同时其界面反应较弱, 因此, 活性原子 Zr 向界面和液体前沿的输送速度快于界面反应速度。在吸附力的作用下, Zr 流动到三相线前沿, 与 SiC 基片表面接触并形成前驱膜。而地面重力场环境中, 虽然活性原子 Zr 向界面和液体前沿的输送速度快于界面反应速度, 但由于重力驱动对流, 扩散进来的元素和反应产物向合金内部运动的快, 因此没有多余的 Zr 形成前驱膜。

空间微重力下高温润湿样品中发现的前驱膜现象目前在国际上尚未见报道。

关键词: 微重力, Zr-基合金, SiC 基片, 润湿, 界面

## C07-17

### 快速凝固 Fe<sub>37.5</sub>Cu<sub>37.5</sub>Sn<sub>25</sub> 包晶型合金的组织演化与物理性能研究

夏瑛超<sup>1,2</sup>, 邵领会<sup>1</sup>, 薛亚慧<sup>1</sup>

1. 中国航天九院 771 所

2. 西北工业大学理学院应用物理系

快速凝固条件下包晶合金的亚稳液相分离、组织演化与物理性能研究对制备新型材料有着重要的理论意义。本文采用熔体浸浮、自由落体和单辊急冷技术, 研究了三元液态  $\text{Fe}_{37.5}\text{Cu}_{37.5}\text{Sn}_{25}$  合金的组织演化机理与物理性能特征。实验发现, 合金

在不同凝固条件下均由  $\alpha\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$  和  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  三相组成。熔体浸浮条件下,合金样品在过冷度小于 178 K 时呈现为粗大枝晶。一旦过冷度超过 178 K,合金样品发生亚稳液相分离。实验中获得的最大过冷度为 272 K(0.19  $T_L$ )。分析表明,在 8~177 K 过冷度范围内,初生  $\alpha\text{Fe}$  相生长速度和过冷度呈幂函数关系,并在 177 K 过冷度下达到  $41.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在不同过冷度下, $\alpha\text{Fe}$ 、富 Fe 和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  三相的晶粒大小影响其硬度变化。落管无容器实验中,合金液滴最大表面冷却速率达  $3.5\times 10^4 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当液滴直径达最大值 944  $\mu\text{m}$  时,合金液滴仍表现为亚稳液相分离形貌。冷却速率和温度梯度引起的 Marangoni 迁移影响合金液滴的组织演变。富 Fe 相的粗化导致了合金液滴中富 Fe 相和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  相硬度的降低。急凝固条件下,合金条带在不同表面冷却速率下均显著细化并呈现软磁特性,其矫顽力的大小主要由  $\alpha\text{Fe}$  相平均晶粒尺寸决定。

关键词:包晶合金,枝晶生长,液相分离,维氏硬度,磁性性能

## C07-18

### 粉芯丝材电弧增材制备钛基复合材料耐磨涂层性能与形成过程研究

包阳,黄陆军,安琦

哈尔滨工业大学

钛基复合材料因其具有与钛基体相容性高,轻质等特点而广泛被用作耐磨涂层,以提高空间飞行器构件中常用钛及钛合金的耐磨性,满足在摩擦磨损条件下的使用。本研究针对目前热源熔覆制备钛基复合材料涂层中所采用的预置粉末法过程繁琐和自动送粉法中粉末利用率低等问题,提出利用以含  $\text{TiB}_2$  粉芯的钛药芯焊丝作为熔覆原料,结合电弧增材制造技术制备钛基复合材料涂层的高制备效率和材料利用率的新工艺。研究发现:丝材增材所获得的多道搭接涂层相比上述两种方法具有更好的表面质量,这主要归因于逐道次搭接的方式以及无粉末飞溅现象;纯 Ti 经表面沉积  $\text{TiB}/\text{Ti}$  复合材料后,硬度和耐磨性均有不同程度的提高;另外,由于钛药芯焊丝的结构原因, $\text{TiB}_2$  粉芯倾向于沉入熔池底部,增加了底部 B 元素含量,使得凝固后获得的涂层微观组织( $\text{TiB}$  晶须)呈现出均匀的分布而非常见的梯度特征,这得到了截面硬度分布的验证。

关键词:钛基复合材料涂层,钛药芯焊丝,粉芯丝材增材制造,TIG 过程

## C07-19

### 深过冷液态难熔金属的快速枝晶生长动力学研究

胡亮,杨尚京,王磊,魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

深过冷液态金属的枝晶生长是空间材料科学和快速凝固理论研究的重要课题。枝晶生长速度和枝晶形貌随过冷度的变化规律是理解晶体生长动力学进而控制凝固过程亟待解决的关键科学问题。随过冷度的增加,自发的晶粒细化和固溶强化过程有利于提升材料的力学性能。研究者利用熔融玻璃净化和电磁悬浮等技术,对纯金属 Ni、Fe、Cu 以及 Ni/Fe 基合金在深过冷状态下的枝晶生长动力学和晶粒细化进行了系统深入的研究。由于这两种实验方法存在强烈的电磁搅拌作用,因此枝晶生长随热力学过冷度变化的本征规律难以获得。

本研究利用静电悬浮无容器处理技术,消除了容器壁带来的异质形核,结合高功率激光完成超高真空环境中静电悬浮样品的熔化,进而克服了电磁搅拌和气流扰动的产生影响。通过高速高分辨实时成像及光电探测技术,对再辉过程的液固界面迁移进行了实时观测,分析了液固界面迁移特征和形核机理,并测定枝晶生长速度随过冷度的变化规律。第一方面实现了 W、Re、Ta、Mo、Nb、Zr 等难熔纯金属的深过冷状态,最大过冷度逼近或超过由经典形核理论所预测的均质形核过冷度,枝晶生长速度随过冷度整体呈指数规律增大。第二方面选取二元 W-Ta 匀晶合金为对象,研究了静电悬浮状态下的枝晶形貌演变及晶粒细化的相关规律。第三方面在难熔纯金属中添加少量的溶质元素,研究固溶体相枝晶生长过程中溶质扩散控制—热扩散控制的转变机理,揭示溶质元素及其含量的影响规律。

关键词:枝晶生长,深过冷,晶粒细化,静电悬浮

## C07-20

### Ti-6Al-4V 合金热压缩变形行为及本构关系研究

钟江伟<sup>1</sup>,陶攀<sup>1</sup>,许庆彦<sup>1</sup>,柳百成<sup>1</sup>,纪志军<sup>2</sup>

1.清华大学材料学院

2.中国航发北京航空材料研究院

采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机对 3D 打印成型的 Ti-6Al-4V 合金在变形温度 700-900 $^{\circ}\text{C}$ ,应变速率在  $10^{-3}/\text{s}$ - $10/\text{s}$  的条件下热压缩行为及其变形组织进行了分析,采用一元线性回归等方法对实验数据进行拟合分析,得出双曲正弦函数形式的本

构方程中的相关材料参数；将材料参数对应变进行二次拟合，建立了该合金热变形过程中的流变应力与变形温度、应变速率和应变量的本构关系；结果表明：变形激活能  $Q$  和结构因子  $A$  随应变的增加而减小，应力指数  $n$  随应变的增加而呈线性增加。根据应力-应变曲线建立该合金的热加工图。

#### C07-21

##### 微重力条件下偏晶合金凝固过程研究

赵九洲，江鸿翔，黎旺

中国科学院金属研究所

偏晶合金十分广泛，若能将其制成原位复合材料，如：弥散型复合材料、壳/核结构复合材料或第二相呈现纤维状排列的复合材料等，则其中许多具有优异性能，工业应用前景广阔。但该类合金凝固时首先发生液-液相变，在常规的凝固条件下，极易形成相偏析严重乃至两相分层的凝固组织。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，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。本研究分别在空间微重力环境下和地面重力条件下开展了偏晶合金的定向凝固实验，建立了偏晶合金凝固组织演变模型，实验与模拟相结合，研究了重力、微重力条件下定向凝固偏晶合金组织演变过程，分析了微重力环境对偏晶合金凝固过程、组织的影响机理。

关键词：偏晶合金，微重力，凝固，组织演变

#### C07-22

##### 微重力条件下添加铋后锡基合金与铜基底界面特性的研究

袁章福，于湘涛，谢珊珊

北京科技大学，钢铁共性技术协同创新中心

为建立太空焊接试验基础，优化焊接工艺的最佳操作条件并开发新的合金体系，本文在空间卫星 SJ-10 上研究了微重力条件下 Sn-3.5Ag 和 Sn-17Bi-0.5Cu 合金焊料在铜基底上的界面形貌和相互作用。设计了符合太空实验条件的特殊封装和加热炉。讨论了合金中铋对金属间化合物层的生长和连接层力学性能的作用规律。结果表明在焊料本体中形成了内层为  $Cu_3Sn$ ，外层为  $Cu_6Sn_5$  的棒状晶体。金属间化合物层内部靠近铜基底侧为  $Cu_3Sn$  层，外部为  $Cu_6Sn_5$  层。由于铋主要聚集在焊料体相侧的界面层外缘，所以金属间化合物层的生长受到抑制，并且通过加入铋到锡基焊料中，可在焊接反应期间抑制金属间化合物层的过度形成。

关键词：界面特性，锡基焊料，金属间化合物，微重力，铋添加物

#### C07-23

##### 金属固态相变中的转变错配弹塑性调节效应

宋韶杰，刘峰

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

转变错配在固态相变中有着重要作用。从热力学角度，转变错配引入应变能或机械驱动力，不仅决定着相变的发生（过冷度），而且影响着相变的动力学过程。从动力学角度，转变错配源自于相界面的共格畸变或两相体积不匹配，实质上影响着相界面的本征属性，从而又直接作用于相变动力学能垒。本报告首先通过对转变过程相关的错配弹塑性调节进行理论建模，分析了转变错配弹塑性调节对纯界面控制、纯扩散控制、以及界面/扩散混合控制三类扩散型固态相变热力学与动力学的影响；其次，简要综述了转变错配弹塑性调节与贝氏铁素体/马氏体切变类相变的交互效应。

#### C07-24

##### 原位观察纯铁异质形核过程原子结构演化

徐明沁，夏明许，胡侨丹，李建国

上海交通大学

氧化过程广泛存在于钢、铝、镁、高温合金等各种金属结构及功能材料的熔炼过程，这种在熔炼过程中产生的氧化物可能成为熔体在凝固时新相的异质形核质点。但对其形核机理尚不是十分清楚。已有的报道指出  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Ce_2O_3$  等氧化物促进固相铁形核的效率取决于固相/氧化物之间的晶格错配度。但形核过程发生在液/固转变初始阶段，新晶体尚未形成，也即固相/氧化物的晶格错配界面不能代表形核起始过程的物理状况。为了探索铁熔体的形核过程及其原子结构演化

规律, 本研究利用气悬浮设备研究纯铁熔体中氧化物的形成对纯铁熔体形核过程的影响, 并利用同步辐射高能 XRD 跟踪形核过程熔体结构的演变。探索纯铁形核过程的原子尺度结构起源, 以及氧化产物对熔体结构演化的影响, 以揭示在有氧化物参与情况下, 形核过冷度差异的原子尺度结构起源。研究结果表明氧在纯铁熔体中存在两种形态,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{FeO}$ 。纯铁液溶氧后的过冷度平均值为  $304 \pm 4$  °C。氧化初始阶段, 熔体中形成  $\text{FeO}$ , 过冷度也相应降低到  $223 \pm 3$  °C。最后形成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 过冷度也稳定在  $75 \pm 6$  °C。经能谱和透射电镜分析两种氧化物的暴露面, 计算出  $\text{FeO}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与初生相的可能错配度分别为 15.4% 和 9.0%。经过铝脱氧后的铁液结晶过冷度可以降低到  $48 \pm 4$  °C, 经过辨析, 铝脱氧后的形核核心从  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  转变为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其晶格错配度也从 9.0% 进一步降低到 4.0%。HE-XRD 研究结果表明, 含有和不含有氧化物的铁熔体都具有二十面体短程有序 (ISRO) 结构, 且有序程度随着温度的降低而增大。在相同温度下, 含有  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的铁熔体的最近邻距离 ( $r_1$ ) 要低于纯熔体和含  $\text{FeO}$  颗粒铁熔体的  $r_1$ 。实验结果表明, 在不改变熔体团簇类型的情况下, 异质相通过改变  $r_1$  来调节熔体结构, 即  $r_1$  的降低能够强化异质形核。熔体的  $r_1$  随着异质相晶体  $r_1$  的减小而降低, 且越靠近固相晶体的  $r_1$ , 导致其具有较低的形核过冷度。该熔体结构分析结果进一步验证了熔体有序结构和晶体结构的差异是引起过冷度差异的原子尺度结构起源。异质基底上沉积的新相作为液态无序结构与异质基底有序结构之间的过渡层, 其与异质形核基底的错配度在一定程度上也反应了液态结构到对应新相晶体结构转变的难易程度。该研究结果有利于进一步澄清异质形核过程中熔体结构、新相以及基体原子结构对形核过程的影响机理。

关键词: 异质形核, 过冷度, 错配度, 熔体结构, ISRO, 最近邻距离

## C07-25

### 微重力条件下三元 Fe-Co-Ni 合金的凝固组织演变及其对力学性能的影响

刘未, 常健, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

落管是地面模拟空间“微重力, 无容器, 超高真空”环境最为全面的实验装置, 由于避免了传统凝固过程中熔体与器壁的接触而产生的异质形核, 因而可以实现熔体的深过冷快速凝固。超强钢是一种在航空航天领域应用较为广泛的钢材, 凝固过程中微观组织的演变将会显著影响超强钢的力学性能, 因此, 在微重力条件下, 研究合金的凝固组织演变对其力学性能的影响对于改善钢材的性能具有重要的指导意义。

采用落管技术实现了三元 Fe-Co-Ni 合金的深过冷快速凝固, 获得了直径为 60-1300  $\mu\text{m}$  的合金粒子。XRD 和 DSC 分析表明 Fe-10wt. %Co-10wt. %Ni, Fe-15.6wt. %Co-12wt. %Ni 和 Fe-10wt. %Co-20wt. %Ni 合金凝固组织的相组成均为  $\alpha(\text{Fe})$  固溶体相。随着粒子直径的减小, 合金液滴的冷却速率和过冷度增加, 凝固组织由枝晶转变为等轴晶, 晶粒显著细化。采用显微硬度计和纳米压痕技术探究了合金的微/纳米力学性能。随着晶粒尺寸的减小, 合金粒子的维氏硬度线性增加, 并且满足 Hall-Petch 曲线关系。由于溶质分布和晶粒细化的影响, 枝晶主干处纳米硬度的波动性较小, 而越靠近晶界处, 纳米硬度的波动性越大, 纳米硬度值也越大。

关键词: 深过冷, 枝晶生长, 溶质分布, 快速凝固, 落管

## C07-26

### 纵向界面缺陷对 Ti-6Al-4V 扩散焊接头高周疲劳行为的影响

邓武警<sup>1</sup>, 陈玮<sup>1</sup>, 邵杰<sup>1,2,3</sup>

1. 中国航空制造技术研究院

2. 塑性成形技术航空科技重点实验室

3. 数字化塑性成形技术与装备北京市重点实验室

采用扩散焊工艺人工预制无缺陷、含  $\Phi 2$  缺陷、 $\Phi 4$  缺陷、穿透型缺陷纵向扩散焊接头, 开展室温轴向拉压高周疲劳性能试验 ( $R=-1$ ), 定量研究纵向界面缺陷对扩散焊接头疲劳极限、疲劳分散性影响规律, 采用 OM、SEM 方法对界面缺陷微观结构及疲劳断口进行分析。结果表明: 纵向无界面缺陷、含  $\Phi 2$  缺陷扩散焊接头高周疲劳极限达到 420MPa, 含穿透型界面缺陷扩散焊接头疲劳极限下降至 310MPa, 而含  $\Phi 4$  界面缺陷扩散焊接头疲劳极限不收敛; 同时含  $\Phi 4$  缺陷扩散焊疲劳寿命分散性大于无缺陷及穿透型界面缺陷扩散焊接头; 无缺陷、穿透型界面缺陷焊接接头疲劳裂纹源均分别位于试样外表面、亚表层界面缺陷处, 而  $\Phi 4$  缺陷接头疲劳断裂模式出现较大差异, 处于高寿命区域样品裂纹源位于表面样品; 落于低寿命区域绝大部分从缺陷处起裂。

关键词: 扩散焊, 界面缺陷, Ti-6Al-4V, 高周疲劳, 疲劳极限, 疲劳分散性

## C07-27

### 轻质耐热高强韧网状结构钛基复合材料

黄陆军, 耿林

哈尔滨工业大学

基于粉末冶金法, 采用增强相分布调控技术与原位反应自生技术相结合, 成功设计并制备出了三维网状结构钛基复合材料, 增强相靶向在“晶界”处分布, 通过提高“室温晶界强化效果”、抑制“高温晶界弱化效果”、增加“网状单元协调变形能力”与增加“塑性变形区域”, 实现较传统增强相均匀分布钛基复合材料塑性提高 5 倍, 较钛合金强度提高 70%、使用温度提高近 200°C, 且保持与钛合金相近的冷加工与热成形能力。进一步结合仿生思想, 构建了两级网状结构, 室温强塑性、高温强度、高温抗蠕变与抗氧化能力进一步大幅提升, 综合力学性能达到国际领先水平, 表现出轻质、耐热、高强韧、可加工、可焊接等特性, 成为多种航空航天构件首选材料。网状结构钛基复合材料与钛合金密度相当, 比钛合金具有更高的强度与使用温度; 比 TiAl 金属间化合物具有更优异的加工性与可焊性; 替代耐热钢或镍基高温合金可实现减重 40%以上。

关键词: 钛基复合材料, 网状结构, 强韧化, 航空航天

## C07-28

### 超声悬浮条件下液滴形态振荡和运动规律研究

耿德路, 胡亮, 洪振宇, 解文军, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

超声悬浮是一种重要的无容器处理技术, 在材料科学、分析化学和流体动力学等方面吸引了研究者的广泛注意。超声悬浮利用高强声场的非线性效应产生的声辐射力来平衡物体的重力, 实现物体的悬浮, 其优点是对物体的电磁性质没有限制, 因此可以处理各种类型的材料, 尤其在液滴动力学领域具有广泛的应用。本文采用单轴式超声悬浮实验装置, 研究了水滴的动力学规律。首先, 引入超疏水反射端, 在向上调节反射端时, 疏水表面的液滴受到声辐射力而在竖直方向伸长, 当声辐射力克服重力和粘附力时, 液滴起跳至悬浮状态。从反射端脱离后, 液滴会经历竖直振动并伴随着形态振荡。采用有限元方法求解了声辐射压力, 结果表明声辐射压的分布提供了使液滴起跳的力。其次, 研究了超声悬浮液滴的竖直振动规律, 发现受扰动的液滴在平衡位置附近做简谐振动, 振动频率随液滴变形程度的增大而增大, 在竖直振动过程中, 液滴发生二阶形态振荡, 其频率是竖直振动频率的两倍。最后, 通过调制超声场, 实现了液滴的扇谐振荡, 其频率为声场调制频率的一半。

关键词: 超声悬浮, 液滴振荡, 运动规律, 声辐射力

## C07-29

### 化学气相输运沉积单晶钨涂层的动力学研究

郝玉朋, 谭成文, 于晓东, 聂志华, 王芳, 王富耻, 才鸿年

北京理工大学

单晶钨具有长效的组织稳定性、优异的抗高温蠕变性能以及良好的热、电性能, 在军工、核电源、电子工业等领域具有特殊重要的用途。化学气相输运沉积可以稳定地获得缺陷程度低的单晶钨涂层, 是目前已知的极具应用前景的单晶钨制备技术。有鉴于该项技术的重要战略价值, 相关研究公开报道极少, 关于单晶钨涂层生长的动力学研究更是鲜见。本研究采用化学气相输运沉积工艺, 利用封闭输运系统在 1320 - 1520°C 的基体温度下制备了厚度 0.14 - 1.2mm 的钨涂层。研究了钨涂层的生长动力学以及组织结构、形貌特征等的演化规律。结果表明, 较低的反应区压力下, 沉积速率随压力线性增大; 反应区压力一定时, 提高基体温度导致沉积速率先增大后减小, 基体温度 1400°C 左右时沉积速率最大; 高过饱和度是获得高质量钨涂层的必要条件。在合适的工艺条件下, 成功制备了厚度 1.2mm 的致密钨涂层, 沉积速率达到 10.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

关键词: 单晶钨, 化学气相输运, 动力学

## C07-30

### 静电悬浮条件下 Zr-Co 合金中 ZrCo 金属间化合物的枝晶生长机理研究

王磊, 胡亮, 杨尚京, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

由于具有复杂的晶体结构, 金属间化合物相的枝晶生长规律不同于纯金属和固溶体相。ZrCo 金属间化合物为典型的 B2(CsCl)结构, 研究其枝晶生长对于揭示化合物的生长机理具有重要意义。枝晶生长机制一般通过生长动力学规律和凝固组

织演变进行探索。本文采用静电悬浮技术实现了  $Zr_{50}Co_{50}$ 、 $Zr_{55}Co_{45}$  和  $Zr_{60}Co_{40}$  合金的深过冷快速凝固，所获得的最大过冷度分别为 314 K(0.19 $T_L$ )、300 K(0.19 $T_L$ )、346 K(0.23 $T_L$ )。它们的初生相都是 ZrCo 金属间化合物相，实验中系统测定了 ZrCo 相的生长速度与过冷度的关系。结果表明，三种合金中 ZrCo 相的生长速度均随过冷度的增大呈幂指数形式升高。同一过冷度下，ZrCo 相的生长速度随着 Zr 含量的增加而降低。同时对三种 Zr-Co 合金的微观组织进行了研究，发现随着过冷度的增大，三者的凝固组织都显著细化，并且初生 ZrCo 相均发生由树枝晶向等轴晶的转变，碎断现象显著。

关键词：静电悬浮，金属间化合物，枝晶生长，深过冷

## C07-31

### 深过冷液态 Co-Mo 合金中初生相和包晶相的竞争形核机理研究

沙莎，王伟丽，吴宇昊，徐山森，魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

在深过冷液态包晶合金中，初生相和包晶相的竞争形核会诱发异常复杂的凝固行为。本文采用电磁悬浮和自由落体两种实验技术对二元 Co-63%Mo 过包晶合金的快速凝固机制进行了深入研究。在电磁悬浮实验中，合金熔体所获得的最大过冷度为 213 K (0.11  $T_L$ )，其快速凝固组织均由  $Co_2Mo_3$  和  $Co_7Mo_6$  相构成。当过冷度较小时，合金熔体经历典型的包晶凝固，初生  $Co_2Mo_3$  枝晶生长速度随过冷度的增大缓慢增长。当过冷度增大到 102 K 以上时，包晶  $Co_7Mo_6$  相从过冷熔体中直接形核并生长为细小枝晶。由于凝固潜热的释放，残余液相的过冷度降低进而发生典型的包晶凝固过程。一旦过冷度进一步增大到 148 K 以上时，合金熔体中初生相与包晶相发生亚稳耦合共生现象，凝固组织呈现类层片状共晶形貌特征，并且其生长速度随过冷度的增大线性减小。作为对比，自由落体实验研究了 Co-63%Mo 微小液滴在更大过冷度条件下的快速凝固行为。当合金液滴直径较大时，合金液滴的凝固过程依次受到包晶相直接形核和典型包晶凝固机制的控制。当合金液滴直径减小到 702  $\mu m$  时，凝固组织中开始出现类共生组织形貌，其所占体积分数随液滴直径的减小不断增大。一旦液滴直径减小到 126  $\mu m$  以下时，亚稳耦合共生成为过冷 Co-63%Mo 过包晶合金的唯一凝固机制。

关键词：深过冷，快速凝固，包晶凝固，竞争形核

## C07-32

### 单分散球形金属熔滴自由下落凝固过程研究

李建强<sup>1</sup>，董伟<sup>2</sup>

1.中国科学院过程工程研究所

2.大连理工大学材料科学与工程学院

目前金属熔滴的制备方法以雾化法为主，熔滴尺寸分散性极大且不易控制，表面形状往往极不规则；而且单个微滴的飞行路径无法控制，凝固过程中微环境差别很大，热历史不同。一方面导致大量金属熔滴的凝固组织分散性严重，再加上多个凝固参数的强关联性、金属熔滴形状不规则等问题，给金属尤其是高熔点金属的凝固过程基础理论研究带来极大困难；另一方面也导致作为基础原材料的金属球形粉末制品质量不高，无法满足微电子、新能源和材料增材制造等新兴行业的重大需求。

脉冲小孔喷射法 (POEM) 利用压电陶瓷产生外加作用力，对金属熔池进行纵向扰动，使喷口出局部液体的压力发生急剧变化，打破由表面张力和液体静压力所形成的平衡，使一定量的液体脱离喷口处的液面断裂形成液滴，每次喷出的液体形成一个液滴，并在自由下落过程中由于表面张力收缩成球形，进而在无容器条件下发生凝固形成微球。该方法制备出的微球粒径高度均一，圆球度高，同时具有许多常规材料不具备的流动性好、致密度高、氧化度低等特性。由于液滴的产生可控，并且凝固过程中微环境一致，热历史相同，所以最终形成的凝固组织和材料性能均相同。

本研究采用脉冲小孔喷射法，深入研究了多种单金属和合金熔滴在自由下落过程中的凝固行为，包括 Al、Cu、Cu-Sn 和三元偏晶合金等，制备出粒径高度均一的微米级球形金属粉末。金属微球具有球形度高、粒径均一、尺寸易控制的特点，同时由于凝固环境一致，熔滴凝固热历史一致，组织结构相同，便于分析微球尺寸和冷却速率等凝固参数对凝固组织的独立影响。除了基础研究之外，金属微球产品在微电子封装、3D 打印等领域具有重要的应用价值。

关键词：凝固，微重力，金属微球，单分散，Cu-Sn，偏晶合金，相分离

## C07-33

### 液态 Ce 的拓扑结构、电子结构及动力学行为

张博<sup>1</sup>，孙晓锐<sup>1</sup>，周如龙<sup>2</sup>

1.合肥工业大学材料科学与工程学院非晶态物质科学研究所

本工作利用第一性原理分子动力学模拟研究了低密度液态 Ce 和高密度液态 Ce 的拓扑结构、电子结构及原子扩散行为。通过对原子磁矩的研究证明了在低密度液态 Ce 中存在局域程度不同的 Ce 原子，而在高密度液态 Ce 中只存在非局域的 Ce 原子。在低密度液态 Ce 中，局域程度不同的 Ce 原子在空间上的分布是不均匀的，局域程度相近的 Ce 原子互相聚集；并且非局域的 Ce 原子周围倾向于形成二十面体结构，而局域的 Ce 原子周围二十面体含量较少。局域程度不同的 Ce 原子在原子扩散行为上也存在明显差异，非局域的 Ce 原子扩散比局域的 Ce 原子慢。本文分析认为这种慢的扩散行为可能和非局域的 Ce 呈现二十面体结构特征有关。

关键词：液态 Ce，电子结构，拓扑结构，扩散行为，第一性原理

参考文献：

- [1] X. Sun, R. Zhou and B. Zhang, *Phys Chem Chem Phys*, 2017, **19**, 30498-30503.  
[2] A. Cadien, Q. Y. Hu, Y. Meng, Y. Q. Cheng, M. W. Chen, J. F. Shu, H. K. Mao and H. W. Sheng, *Physical Review Letters*, 2013, **110**, 125503.

### C07-34

#### 空间模拟条件下三元 Al-Fe-Si 包晶合金的快速生长

鲁晓宇，代富平，刘未

西北工业大学理学院应用物理系

三元包晶合金的深过冷与快速晶体生长是凝聚态物理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  $\text{Al}_{62.57}\text{Fe}_{33.51}\text{Si}_{3.92}$  包晶合金的深过冷与快速凝固，获得直径介于 1110~170  $\mu\text{m}$  的合金粒子，研究了其快速凝固组织特征、相组成以及快速凝固机制。在自由落体条件下，合金液滴的过冷度与冷却速率均随着液滴直径的减小而增大。利用牛顿冷却模型的计算表明，对应直径为 1110~170  $\mu\text{m}$  的合金液滴，其过冷度范围为 52~414K，获得的最大过冷度达  $0.29T_L$ ；其冷却速率范围介于  $1.22 \times 10^3 \text{K/s}$  和  $4.19 \times 10^4 \text{K/s}$  之间，相差了一个数量级。利用 DSC 热分析测定出其液相面温度为 1414K，其近平衡凝固过程经历三次液固相变：当合金从液相降温到 1393K 时，首先析出初生相，反应式为： $L \rightarrow e$ ；随着温度继续降低到 1379K，合金液滴发生包共晶转变： $L + e \rightarrow a\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{Al}_5$ ；当继续降温至 1357K 时，剩余液相完全凝固。结合 SEM 和 XRD 等分析方法，发现其室温凝固组织由三相构成：初生相 e ( $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ )、包共晶转变生成的  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和 a-Fe 相，并且随着粒子直径的减小，凝固组织发生显著变化：当粒子直径大于 550 $\mu\text{m}$  时，只有 a-Fe+ $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  两相存在；当粒子直径小于 550 $\mu\text{m}$  时，初生相开始出现，并且体积分数逐渐增多。这表明在小过冷条件下，包共晶转变进行得较彻底，过冷度越大，包共晶转变完全程度越低，剩余初生相越多。产生这种变化趋势与合金的过冷度及冷却速率变化有关。随着粒子直径的减小，过冷度和冷却速率均呈现增大的变化趋势。过冷度增大则形核率增加，合金中形核点增多，导致初生相增多；冷却速率的增大使得包共晶转变进行不彻底，所以随着粒子直径的减小初生相会越来越多，尺寸越来越大。

关键词：空间模拟，三元包晶，相组成，快速生长

### C07-35

#### 高强静磁场作用下 Zn-Bi 难混溶合金液液分离阶段富 Bi 液滴的细化与演变过程

郑天祥<sup>1</sup>，钟云波<sup>1</sup>，周邦飞<sup>1</sup>，任忠鸣<sup>1</sup>，Francois Debray<sup>1,2</sup>，Eric Beaugnon<sup>2</sup>

1.上海大学

2.LNCMI

本文考察了 Zn-4wt.%Bi 与 Zn-6wt.%Bi 两种不同成分难混溶合金在高强静磁场作用下的原位体凝固过程。研究表明，在 29T 条件下获得了第二相富 Bi 颗粒尺寸非常细小、分布很均匀的凝固组织。富 Bi 相颗粒的平均直径随着磁感应强度的增加而逐渐降低。当磁感应强度大于 18T 时，液液分离阶段的 Stokes 沉降运动不再出现。此时，熔体中的富 Bi 相颗粒以纯扩散的方式进行长大。当冷却速度大约为 1600 $^\circ\text{C}/\text{min}$  时，施加强静磁场可以降低液滴链之间的间距。当冷却速度约为 60 $^\circ\text{C}/\text{min}$  时，在 18T 静磁场下会形成一种由富 Bi 相外壳包围富 Zn 相基体的凝固组织。导致这种组织形成的原因是热电磁力。

关键词：难混溶合金，凝固，强静磁场，偏析，热电磁力

### C07-36

#### 大体积金属材料的超声悬浮与动力学规律研究

侯念嗣, 耿德路, 魏炳波  
西北工业大学理学院应用物理系

超声悬浮是一种重要的无容器处理技术, 其利用高声强条件下声场的声辐射压力实现物体的悬浮。近年来, 新型超声悬浮装置的研制以及大体积、高密度物体的超声悬浮受到了广泛关注。本文采用单轴双发射端超声悬浮装置, 通过同时施加反向超声波, 实现了直径 8.72mm 钢球的悬浮, 钢球直径达到声波波长的 0.51 倍。实验测定了声场中钢球所受声辐射力的分布, 钢球所受声辐射力最大可达 0.058N, 悬浮于距离下发射端 14.5mm 处。通过有限元方法数值计算了钢球所受声辐射力, 钢球中心位置处于 10~30mm 之间时, 计算与测量结果符合较好。钢球靠近发射端时, 驻波条件被破坏, 声悬浮力降低, 实验与计算结果不吻合, 且该差异随样品尺寸增大而增大。实验与计算表明, 双发射端超声悬浮装置产生的声辐射力大于单发射端超声悬浮装置, 有利于大体积物体的悬浮。

关键词: 超声悬浮, 大体积金属, 有限元方法, 动力学规律

### C07-37

#### 高偏压氩等离子预处理改善丁腈橡胶表面 Si-DLC 薄膜结合强度和摩擦学性能

强力, 白常宁, 曹忠跃, 梁爱民, 张俊彦  
中国科学院兰州化学物理研究所

丁腈橡胶 (NBR) 由于其良好的耐油性和较低的成本, 是目前油封及 O 型密封圈最常用橡胶密封材料之一, 广泛应用于汽车工业、航空航天、油田化工等领域。然而, 丁腈橡胶密封件在实际使用中极易磨损, 从而影响整个设备的安全性、可靠性和耐久性。因此, 改善其耐磨性对于提高其服役寿命具有极其重要的意义。本文以丁腈橡胶为基底, 采用非平衡磁控溅射技术在丁腈橡胶表面制备 Si-DLC 薄膜, 并在薄膜沉积前对丁腈橡胶表面进行氩等离子体预处理, 研究不同预处理偏压对薄膜表面形貌、界面结合强度和摩擦学性能的影响。研究表明, 丁腈橡胶 (软基底) 表面硬质 DLC 薄膜呈现不连续块体结构, 块体结构之间的裂纹呈凹陷性, 其微观形貌为致密“类菜花”结构, 且等离子预处理不会影响薄膜微结构和机械性能。然而, 通过高偏压 (>500 V) 氩等离子体预处理能够改善薄膜结合力和摩擦磨损性能。不幸的是, 该薄膜在高摩擦载荷下耐久性较差, 这表明通过等离子预处理来改善橡胶表面 DLC 薄膜结合力和摩擦学性能存在一定的局限性, 为实现其在高载及苛刻环境下的实际应用, 还需进行更进一步的研究和探索。

关键词: 丁腈橡胶, 类金刚石薄膜, 结合强度, 摩擦学性能

### C07-38

#### 深过冷条件下 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金的枝晶生长和维氏硬度研究

邹鹏飞, 王海鹏, 郑晨辉, 杨尚京, 王磊, 胡亮  
西北工业大学理学院应用物理系

二元 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金以其良好的耐腐蚀性和生物相容性, 被广泛应用于航空航天和生物医学领域。目前, 对于这种形状记忆合金的研究已成为材料科学领域的热门课题, 但其在在深过冷条件下的凝固组织演变规律, 热物理性质特征和微观力学性能还有待进一步的探究。本文采用静电悬浮和自由落体两种无容器处理技术实现了液态 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金的快速凝固实验。在静电悬浮实验中, 合金熔体所获得的最大过冷度为 391 K (0.23 T<sub>L</sub>), 其液态密度与温度之间呈现出独特的非线性关系。在快速凝固过程中, 初生 TiNi 相优先从过冷熔体中形核并生长为球状枝晶, 随后发生马氏体相变生成 Ti<sub>2</sub>Ni 和 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物。随着过冷度的增大, 初生枝晶生长速度单调递增。作为对比, 自由落体实验研究了液态 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金在更高过冷度条件下的快速凝固组织特征。随着液滴直径的减小, 液态合金的过冷度和冷却速率均增大。当液滴直径减小到 511 μm 时, 初生 TiNi 相开始从球状枝晶向等轴晶形貌进行转变, 马氏体相显著细化。一旦液滴直径减小到 159 μm 以下时, 快速凝固组织仅由 TiNi 等轴晶构成。除此之外, 凝固组织的微观硬度随合金液滴直径的减小单调递增。

### C07-39

#### 静电悬浮条件下 Ti-Fe 二元合金的热物理性质及快速凝固机制

杜凌远, 王磊, 胡亮, 刘金明, 翟薇, 魏炳波  
西北工业大学理学院应用物理系

Ti 合金在航空航天领域有着广泛应用, 本文系统的研究了液态 Ti 基合金的热物理性质以及快速凝固机制, 所得结果无论是对于凝固基础理论研究还是对于其合金性能的提升都具有重要意义

本文首先采用静电悬浮(ESL)法结合高速摄影技术,并结合分子动力学计算,系统获取了  $\text{Ti}_{63.64}\text{Fe}_{36.36}$  液态合金的热物理性质随温度的函数变化关系。其次,实现了其在无容器悬浮条件下的快速凝固过程,并揭示了其组织形貌随过冷度变化的转变规律及快速凝固动力学特征。最后定量的阐述了微观力学性能随过冷度的变化规律。

本文采用静电悬浮装置测量的热力学性质,包括密度、体积膨胀系数、比热与热辐射系数的比值等。用分子动力学模拟(MD)计算了焓、比热、扩散系数和表面张力关于温度的函数,并结合实验值和计算值导出了热辐射系数。

本实验实现了  $\text{Ti}_{63.64}\text{Fe}_{36.36}$  合金的深过冷与快速凝固,其最大过冷度达到 270 K(0.18 $T_L$ )。随着过冷度的增加,初生 TiFe 金属间化合物由粗大的枝晶转变为细化的球形晶粒,其体积分数也随之增大。再辉过程中发生的重熔是晶粒细化的主要机制。同时,初生相生长速度随过冷度增大呈指数增长,且最大生长速度为 0.17 m/s,与 LKT/BCT 理论模型计算结果相吻合。在小过冷度条件下,(TiFe+ $\beta$ Ti)共晶组织表现为大量 TiFe 相随机分布在  $\beta$ (Ti)基底上,部分区域有少量的层片状共晶呈现,随着过冷度的增大,共晶组织由不规则的片状共晶向离异共晶转变并最终细化为纳米级。

此外,研究了二元 TiFe 过共晶合金快速凝固组织的显微力学性能,建立了“过冷度-微观组织-硬度”之间的定量关系。发现初生 TiFe 金属间化合物的纳米压痕硬度和凝固组织的平均显微硬度均随过冷度的增加呈线性增加,并且前者与晶粒尺寸之间满足 Hall-Petch 关系式。大过冷度引起的组织细化和均匀性是力学性能提高的主要因素。

关键词: 静电悬浮, 过冷度, 热物理性质, 凝固机制, 显微力学性能

## C07-40

### 空天服役环境下陶瓷基复合材料热力性能的多尺度计算

许英杰, 张卫红, 惠新育

西北工业大学机电学院

连续纤维碳化硅陶瓷基复合材料具有优异的高温力学性能和辐照稳定性,在空天结构领域具有广泛的应用前景,掌握其服役状态下的热力性能及演化规律,对陶瓷基复合材料的应用具有重要指导意义。本文基于平纹编织陶瓷基复合材料的制备过程和组分材料分布的多尺度特性,考虑复合材料微观结构的局部近似周期性,构造了纤维丝尺度和纤维束尺度微结构模型,基于复合材料细观力学建立了陶瓷基复合材料热力性能的跨尺度计算方法,实现了服役环境下材料模量、损伤强度、热传导以及热屈曲特性的计算分析,计算结果与试验结果吻合较好,验证了多尺度计算方法的有效性。

关键词: 空天环境, 陶瓷基复合材料, 多尺度计算, 热力性能

## C07-41

### 基于图案化表面的空间液滴限制及受限液滴中的颗粒组装

王育人<sup>1,2</sup>, 李伟斌<sup>1,2</sup>, 蓝鼎<sup>1,2</sup>

1.中国科学院力学研究所

2.中国科学院大学

胶体体系是复杂流体及软物质研究领域中的重要研究对象,有关复杂流体的空间实验研究被美国 NASA 列为重要研究领域之一。胶体液滴作为典型的实验体系,被广泛用来研究蒸发过程中的流体动力学及固相聚集动力学行为。近二十年来,液滴中的“咖啡环效应”获得广泛关注,然而关于蒸发诱导的微流动和颗粒的沉积过程仍然缺乏全面系统的理解,这是因为蒸发中的胶体液滴是一个高度非平衡体系,存在复杂的传热传质和能量交换过程。我们利用实践十号(SJ-10)卫星有效载荷分系统-胶体材料箱提供的空间微重力环境,以胶体液滴为研究对象,对液滴的浸润及胶体颗粒的组装行为开展系统的天地实验研究:(1)基于亲疏水图案化技术,在空间实现了水基液滴的操纵和控制。研究表明,受限液滴在常重力和微重力下的形状分别可以通过椭球缺和球缺模型来描述,与常重力相比,微重力环境下能够实现更大体积液滴的控制。(2)揭示了咖啡环内部二维网络状结构的形成机制,提出去浸润和颗粒组装之间的相互耦合关系,即颗粒不均匀分布造成的抽吸效应,加速液膜的破裂过程,最终导致干区在颗粒分布稀疏区域首先出现;液膜的去浸润(干区扩展)控制了颗粒的聚集,液膜通过表面张力主导了颗粒的组装过程。(3)通过正置、倒置及微重力下液滴中的颗粒沉积观察,发现了重力沉降、气液界面捕获及毛细补偿作用在蒸发不同阶段相互协同和竞争,最终决定了颗粒沉积图案的形貌。上述研究在微纳功能材料制备、疾病诊断、空间制药等领域应用潜力较大,因此具有重要的科学意义和应用价值。

关键词: 胶体液滴, 蒸发, 颗粒沉积, 图案化表面, 空间微重力

## C07-42

### 二元宽结晶温度范围 Cu-Sb 合金快速凝固研究

王伟丽, 王傲, 魏炳波  
西北工业大学理学院应用物理系

在自由落体条件下研究了液态宽结晶温度范围 Cu-x%Sb (x=2,6,8.5,10.6)合金的深过冷快速凝固组织结构与显微硬度特征。研究发现: 不同成分合金均由(Cu)固溶体相和亚稳 Cu<sub>4</sub>Sb 金属间化合物等二相组成。随着液滴直径的下降, 不同成分合金初生(Cu)相的生长方式由均枝晶向等轴晶转变, 亚稳 Cu<sub>4</sub>Sb 相弥散地分布于枝晶间。计算可知, 随着液滴直径的下降, 过冷度和冷却速率显著增大, 大的过冷度和冷却速率是造成合金微观组织细化的主要因素, 并且合金的枝晶生长过程始终由溶质扩散控制。在对应同一过冷度下, 合金的凝固温度范围越宽, 其对应的枝晶生长速率越小, 枝晶尖端半径越大, 溶质分配系数越小。不同成分合金的显微硬度均随着液滴直径的下降和过冷度的增大而呈现增大趋势, 合金中 Sb 成分含量越高, 其硬度也越大。

#### C07-43

##### TC4 合金与 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 陶瓷接触反应钎焊接头的组织与性能分析

夏永红, 王颖, 杨振文, 王东坡  
天津大学

利用 Ni 在高温下与 TC4 合金中的 Ti 元素发生反应, 形成共晶液相, 实现了 TC4 合金与 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 陶瓷的连接。结果表明, Ti-Ni 共晶液相继续与 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 陶瓷反应, 在钎接头中形成了 Ti<sub>2</sub>Ni、Ti<sub>3</sub>AlC、TiC、Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>C<sub>x</sub> 和 τ<sub>3</sub> 相。随着钎焊温度的增加和保温时间的延长, Ti<sub>2</sub>Ni 的含量减少, 钎缝宽度增加。当钎焊温度升高到 1040℃时, 在靠近 TC4 合金的界面附近出现了细小的孔洞, 使得接头力学性能降低。改变 Ni 中间层厚度时, 钎角的形状和大小也发生改变。当 Ni 中间层厚度增加到 60μm 以上时, 钎角附近的 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 陶瓷中出现细小的裂纹。根据相图及组织的演变讨论了接头的形成机理。钎接头的最高抗剪强度为 126MPa, 达到母材抗剪强度的 69%, 断裂发生在陶瓷母材和钎缝处。

关键词: TC4 合金, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 陶瓷, 显微组织, 力学性能

#### C07-44

##### 超大型铝合金环件双向辗轧六抱辊柔性控制智能仿真研究

李学潮, 郭良刚, 梁磊  
西北工业大学材料学院

高性能超大型铝合金环件是重型运载火箭的核心构件, 是我国空间站建设、登月及火星探测工程等的战略需求。然而, 对于超大型铝合金环件双向辗轧成形, 径轴向变形极易不协调, 铝合金环件刚度弱且随轧制过程不断弱化, 环件超大超重惯性大, 利用经典两抱辊难以实现稳定成形, 导致成形过程极易失稳, 环件圆度质量差。

为了提高超大型铝合金环件双向辗轧成形过程稳定性和环件圆度质量, 本文提出了六抱辊柔性控制的超大型铝合金环件双向辗轧智能有限元建模仿真方法。基于 ABAQUS 平台, 建立了六抱辊超大型铝合金环件双向辗轧智能有限元模型。该模型通过弹簧与抱辊连接并建立弹簧铰点瞬时位置与环件瞬时外径的数学关联模型, 采用 VUAMP 子程序开发, 实现了六抱辊运动的智能柔性控制及超大型铝合金环件双向辗轧过程的高效模拟。

模拟结果表明: 六抱辊能够自适应环件的瞬时外径协调运动, 并通过弹簧的作用对环坯施加柔性约束和控制, 与两抱辊刚性控制方式相比, 获得了更好的成形稳定性和环件圆度。本文研究不仅为航天超大型铝合金环件双向辗轧成形工艺优化设计与稳健控制提供了先进仿真计算平台, 也为新型超大型环轧设备的创新研制提供了重要参考。

关键词: 超大型铝合金环件, 双向辗轧, 六抱辊, 柔性控制, 智能仿真

#### C07-45

##### 强磁场下金属熔体与陶瓷基底润湿行为研究

肖玉宝<sup>1,2</sup>, 刘铁<sup>1</sup>, 卢政阳<sup>1,3</sup>, 王强<sup>1</sup>

1. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室
2. 东北大学材料科学与工程学院
3. 东北大学冶金学院

液体与固体表面接触后出现的铺展现象称为润湿。润湿行为在生物、民用及工业领域中普遍存在并起到至关重要的作用。因此, 液滴与固体基底之间润湿行为的研究具有科学意义和技术价值。强磁场作为极端物理场开辟了材料科学研究的新途径,

众多具有重大科学价值的研究成果被发现。围绕室温液体或冷凝气体，强磁场条件下润湿行为已进行，结果表明强磁场可改变材料之间的接触角或表面张力，进而调控材料之间润湿性。而金属与陶瓷材料的结合，可以大大提高材料的使用性能与工艺性能，熔融金属液滴与陶瓷基底之间的润湿行为是长期以来润湿性研究与讨论的焦点，但强磁场环境下该研究工作尚未进行。本工作采用自行设计开发的可以在强磁场环境下进行润湿行为研究的设备，应用座滴法研究了熔融金属 Al 和 Sn 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基底之间的润湿性。结果表明，强磁场的施加使得材料间的接触角明显降低，Al 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的接触角随温度的升高而降低，但 Sn 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的接触角随温度的升高而增大。增加磁场强度，Al 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的接触角在不同温度下均呈现先增大后减小的变化趋势。但 300℃ 条件下，Sn 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的接触角随磁场强度的增加呈现先增大后减小的变化趋势，在 263℃ 与 278℃ 条件下，Sn 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的接触角却随磁场强度的增加而线性减小。

关键词：强磁场，润湿性，接触角，熔融金属，陶瓷基底

#### C07-46

##### 极深过冷态下的反常凝固研究

吕勇军

北京理工大学物理学院

液体在没有外界异质形核点的影响下会在其平衡熔点以下某个温度范围内以亚稳态较长时间存在，即过冷态。当过冷度进一步增大，在液体内部结构和能量起伏的驱动下最终发生均质形核，继而结晶。一般认为均质形核处的过冷度即为可获得的最大过冷度。如果均质形核所需要的内部起伏能够被抑制，那么理论上最大过冷度可达到多少？关于此问题，理论研究认为在过冷液体和对应晶体的过剩熵值相等处的过冷度是理论最大过冷度，过冷液体在此温度下必然发生结晶。研究表明在此之前的过冷区中液体表现出强烈的动力学不均匀性，在该区域发生的形核是否符合经典形核理论的描述目前仍然没有清晰的结论。我们采用分子动力学模拟方法，并结合稀有事件采样方法研究了  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{50}$  合金在极深过冷态下的形核规律。研究发现形成的晶核呈现低维分叉网络状形态，由于这种形态的晶核具有很大的表面积，导致抑制晶核生长的表面能在形核过程中占据重要的地位，甚至完全抑制临界晶核的形成，有利于最终发生非晶态转变。我们研究认为过冷熔体中动力学不均匀性导致的应力不均匀性是造成低维网络状形核的核心因素，后者促使晶核生长呈现各向异性，这与经典形核理论中临界晶核球形假设不同。在此模拟结果指导下，我们修正了经典形核理论，使之符合网络状晶核的形成过程，修正结果合理地解释了我们的模拟结果。本研究结果发展了极深过冷态下的形核理论，也为制备新型纳米晶凝固材料进行了有益的探索。

#### C07-47

##### 太空增材制造技术发展现状和未来趋势研究

程天锦

中科院空间应用工程与技术中心

太空增材制造技术对空间站的资源保障具有重要意义，为实现空间站资源的在轨补给提供了可能性。太空特殊环境对增材制造技术提出了不同于地面环境的特殊要求，NASA 已投入大量经费进行相关研究。目前太空增材制造技术主要研究材料包括高分子材料、金属、陶瓷、复合材料等，工艺包括熔融挤出（FDM）、激光烧结（SLS）、电子束自由成形（EBF3）、立体光刻（SLA）等。本文以 NASA、ESA 等国际航天机构已开展的研究项目为主要线索，对各种材料、各种工艺的太空增材制造技术的发展现状进行详细分析，梳理技术难点，评估技术成熟度，以此为基础进行太空增材制造技术未来发展趋势分析。

#### C07-48

##### 深过冷 $\text{Ni}_{40}\text{Zr}_{28.5}\text{Ti}_{16.5}\text{Al}_{10}\text{Cu}_5$ 合金熔体的快速凝固 及组织演变研究

徐山森，常健，吴宇昊，沙莎，魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

关于深过冷液态合金的快速凝固机理研究主要集中在二元和三元合金体系，目前多元复相合金在深过冷状态下的凝固动力学和组织演变规律仍需深入探索。本文采用电磁悬浮和自由落体无容器实验技术研究了深过冷五元  $\text{Ni}_{40}\text{Zr}_{28.5}\text{Ti}_{16.5}\text{Al}_{10}\text{Cu}_5$  合金熔体的相选择规律和快速凝固特征。在电磁悬浮条件下，液态合金获得的最大过冷度达 290 K ( $0.21T_l$ )。当过冷度小于 150 K 时，凝固组织由粗大初生  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  枝晶以及枝晶间细密的  $(\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{Ni}_{21}\text{Zr}_8)$  共晶构成。随着过冷度的增大， $\text{Ni}_3\text{Ti}$  相枝晶生长速度以幂函数方式增大，且凝固组织显著细化。当过冷度  $\Delta T$  增大至 290 K 时， $\text{Ni}_3\text{Ti}$  相体积分数逐渐减小至 13.37%，且共晶组织形貌由规则共晶转变为非规则共晶。在自由落体条件下， $\text{Ni}_3\text{Ti}$  相的生长完全被抑制，合金液滴凝固组织由初生

Ni<sub>10</sub>Zr<sub>7</sub>相和共晶(Ni<sub>10</sub>Zr<sub>7</sub>+Ni<sub>21</sub>Zr<sub>8</sub>)相构成。当液滴直径减小至480 μm以下时,合金液滴的冷却速率显著增大,非晶相开始出现。随着液滴直径的减小,非晶相的体积分数线性增多,当液滴直径减至275 μm时凝固组织全部转变为非晶相。

关键词:电磁悬浮,自由落体,无容器,快速凝固

#### C07-49

##### 液态金属自扩散的微观模型

王连文

兰州大学物理学院

关于物态的研究,在十九世纪和二十世纪,人们分别比较清楚的获得了气体和晶体的微观模型和基本性质;但是对于液体,一直以来未能达成共识[1,2]。另一方面,对于材料凝固过程的研究又迫切的需要理解液体的结构和性质[3]。

液体领域虽然有许多研究进展,但我们在对于液体的理解方面的进展却很有限,以至于50年前文献中的一段话[4]现在看来仍然适用:“液体的输运性质、结构、热力学性质的实验研究是液体理论的基础,而液体模型的适用性又需要根据其是否能够解释液体的上述性质来进行检验。对液态金属自扩散的研究无疑有助于理解液体结构和原子间作用势。目前只有11种液态金属单质的自扩散系数的数据,而且部分数据的精度不高。有几组比较可靠的数据应该可以用于检验液体的理论,但显然我们还需要改进实验手段、在更宽的温度范围内进行测量,以提供更为精确的数据。”

本文首先简要回顾液态金属自扩散的理论和实验的现状,然后根据近年来关于晶体熔化时液体形核的研究,提出液态金属自扩散的一种可能的微观模型。进而将该模型给出的自扩散激活能的理论值与现有实验数据进行比较分析,结果表明,所提出的液态金属自扩散的微观模型有其合理性[5]。

关键词:液态金属,自扩散,微观模型

参考文献:

[1] J.L. Finney, Bernal's road to random packing and the structure of liquids, *Philos. Mag.* 93 (2013) 3940.

[2] L.W. Wang, Estimating the energy state of liquids, *Metals* 4 (2014) 570.

[3] A. Meyer, The measurement of self-diffusion coefficients in liquid metals with quasielastic neutron scattering, *EPJ Web Conf.* 83 (2015) 01002.

[4] N.H. Nachtrieb, Self-diffusion in liquid metals, *Adv. Phys.* 16 (1967) 309.

[5] L.W. Wang, Atomistics of self-diffusion in liquid metals, *EPJ Web Conf. (LAM-16)* 151 (2017) 02004.

#### C07-50

##### 静电悬浮高温金属液滴振荡形为研究

李明星, 邹鹏飞, 蔡晓, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

静电悬浮是开展材料无容器处理的重要途径,静电场中悬浮高温液态金属液滴振荡行为与材料属性的相关性是其中重要的研究内容。本文通过静电悬浮实验结合数值模拟技术对金属液滴振荡行为进行了系统研究。

通过静电悬浮实验获取Zr液滴的二阶、三阶振荡,对液滴的振荡形态进行拟合,发现液滴瞬态偏差幅度呈正弦函数变化。建立了静电场与流场耦合作用的液滴振荡模型,对液滴的2~5阶振荡进行系统分析。归纳出悬浮液滴的振荡频率与液滴半径、表面张力和密度之间的关系,数值模拟与理论分析、实验结果十分吻合。金属液滴的悬浮稳定性是实现大体积液态金属悬浮的关键因素,根据平衡态液滴的形变量与液滴密度、表面张力之间的关系,定义与液滴密度、表面张力相关的无量纲形变因子。以此量化关系来预测不同金属液滴的悬浮稳定性,并与模拟结果相互验证。

关键词:静电悬浮,液滴振荡,振荡频率,稳态形变

#### C07-51

##### 微重力下熔体润湿性在线实时测量

于强<sup>1</sup>, 李建强<sup>2</sup>, 王小庆<sup>1</sup>, 石瑶<sup>1,3</sup>

1.中国科学院国家空间科学中心

2.中国科学院过程工程研究所

3.中国科学院大学计算机与控制学院

随着航天技术的发展,空间焊接和修复等需求日益迫切,提出了一种空间微重力下熔体润湿性高精度在线实时测量的方法。通过带观察窗口的加热炉、基板水平调节装置、水平位置传感器、真空系统、激光背景光源、高分辨率相机和控制器,构成一套可自动调节样品基板水平程度的实验装置(由于要对比地面与空间的实验结果,在地面条件下,基板的水平程度影响接触角测量的准确性)。在智能图像反馈控制软件系统的控制下,能够通过自动识别样品轮廓变化,实现自动监测熔化开始时刻,并开始摄像,不需值守,全自动记录熔化过程和接触角随温度变化情况。同时具有在线测量功能,可以实时计算接触角、表面张力和体积等物性参数。本实验装置具有数据库功能,可存储和查询存储的图片和视频以及热物性计算结果,为实验数据的分析提供支撑。

关键词:熔体润湿性,接触角测量,图像反馈控制,微重力

## C07-52

### 空天高性能环件虚拟智能轧制成形技术进展

郭良刚

西北工业大学材料学院

高温合金、钛合金、铝合金等难变形材料高性能大型/复杂环件,是航空航天等领域高端装备(航空发动机、燃气轮机、重型火箭燃料贮箱)的核心基础构件。对于这类构件的轧制成形制造,采用传统基于经验的试错方法进行工艺方案的制定,材料利用率极低、成品率不高、质量一致性差,导致成本高、周期长、难以满足多品种小批量产品快速市场响应的要求。本报告介绍一种基于目标驱动的智能有限元仿真方法,讨论智能有限元仿真的内涵及其相对于传统仿真方法的特点与优点,在此基础上提出融合材料、工艺、设计、控制的虚拟智能环轧装备的概念,并介绍所涉及的相关关键技术。通过典型环件轧制成形案例,介绍虚拟智能环轧装备在大型/复杂环件轧制工艺设计与优化方面的应用,报道空天高性能环件虚拟智能轧制成形技术的最新进展。最后,提出未来发展趋势与研究展望。

关键词:虚拟智能环轧装备,智能有限元仿真,环件轧制,工艺设计与优化,智能制造

## C07-53

### 静磁场对 Mg-Nd 合金凝固组织的影响

翟聪<sup>1</sup>, 罗群<sup>1</sup>, 李谦<sup>1,2</sup>

1.上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室

2.上海大学材料基因组工程研究院

作为一种轻质结构材料, Mg-Nd 系合金被应用于航天航空、汽车制造等领域。本研究利用静磁场控制 Mg-24wt.% Nd 合金的凝固过程。通过 XRD、金相及 SEM 等测试手段,对比研究了无磁场处理与 1T 静磁场处理,对以不同冷速冷却的凝固组织中物相及微观形貌的影响。结果表明冷速大于 14°C/min 时第二相为 Mg<sub>12</sub>Nd,而相同冷速施加磁场凝固后获得 Mg<sub>41</sub>Nd<sub>5</sub> 相。分析磁场对临界过冷度的影响,发现施加磁场使得生成亚稳相所需临界过冷度更大,宏观表现为使体系趋向于平衡态。此外还发现磁场促进  $\alpha$ -Mg 枝晶取向,具有细化晶粒及增加合金抗压强度的作用。这对开发 Mg-Nd-Zn 系高强镁合金具有借鉴意义。

关键词: Mg-Nd 合金, 磁场, 凝固, 相选择

## C07-54

### Ti1300 合金中 $\alpha$ 相的析出规律及力学性能

孙巧艳, 高婷, 肖林, 孙军

西安交通大学

Ti-1300 合金是一种高强高韧的亚稳  $\beta$  钛合金,主要应用于航空结构件、紧固件和弹簧。Ti-1300 作为一种亚稳  $\beta$  钛合金,主要依靠时效析出的  $\alpha$  相来达到强化目的。本文将研究 Ti-1300 合金时效过程中  $\alpha$  相的析出行为及时效组织特征对合金强度、塑性的影响,为合金的微观组织与性能优化设计提供实验依据。[1]通过金相组织、SEM 组织、TEM 组织、XRD 物相分析、维氏硬度、拉伸工程应力-应变曲线及断口形貌观察等实验表征手段,对经过不同热处理的材料进行显微组织及力学性能表征,取得以下研究结果。

Ti-1300 合金以 4°C·min<sup>-1</sup> 的速率升至 350°C 保温 10min 时有大量均匀分布的细小  $\omega$  相,当以 4°C·min<sup>-1</sup> 的速率升至 400°C 时,  $\omega$  相与  $\alpha$  相两相共存,并且发现  $\alpha$  相紧邻  $\omega$  相形核生长的现象,说明了在 Ti-1300 合金中  $\omega$  相的确促进  $\alpha$  相形核,并使  $\alpha$  相均匀细小。

将 Ti-1300 合金 870℃保温 40min, step-quench 后在不同温度 (530℃、580℃、630℃) 保温 15min 后, 580℃保温时  $\alpha$  相的析出密度最大, 为 819 个 $\cdot\mu\text{m}^{-2}$ , 580℃时  $\alpha$  相和  $\beta$  相的吉布斯自由能曲线交点与合金成分接近, 发生了伪调幅分解。

合金经过 850℃、820℃、790℃固溶后低速升温时效工艺, 其力学性能结果表明: 790℃固溶后, 初生  $\alpha$  含量 6.73%, 合金的抗拉强度为 1556MPa, 断后延伸率为 10%, 达到了良好好的强塑性匹配。

关键词: Ti1300 合金, 时效, 强度, 塑性

## C07-55

### Cu-Zr-Ag 三元合金的热扩散及其快速凝固研究

苏明华, 代富平, 周凯

西北工业大学理学院应用物理系

Cu-Zr 基非晶合金由于其非晶形成能力强、具有较好的机械性能和较高的热稳定性, 在基础研究和实践中均具有重要的研究价值。Cu-Zr-Ag 三元合金是 Cu-Zr 基非晶合金体系中广受关注的合金之一, 但对其快速凝固过程中显微组织的演变规律以及热物理性质研究较少。本文选择 $(\text{Cu}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})_{100-x}\text{Ag}_x(x=0-20\text{at.}\%)$ 多个成分的 Cu-Zr-Ag 三元合金为研究对象, 分别采用单辊急冷技术、落管微重力处理技术进行了研究, 并利用激光热导仪研究了其热扩散系数, 利用 X 射线衍射仪(XRD)、差示扫描量热仪(DSC)、显微硬度计以及扫描电子显微镜(SEM)对合金样品进行了分析表征。采用 40m/s 辊速下的单辊急冷技术研究了 $(\text{Cu}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})_{100-x}\text{Ag}_x(x=0-20\text{at.}\%)$ 合金的快速凝固过程, 研究发现 Cu-Zr-Ag 三元合金条带均为非晶态, 玻璃转变温度( $T_g$ )和晶化温度( $T_x$ )随着 Ag 含量的增加而增加, 其中过冷液相区范围( $\Delta T_x$ )最大为 53K。在落管微重力条件下研究了直径为 100~1000 $\mu\text{m}$  范围内 $(\text{Cu}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})_{100-x}\text{Ag}_x(x=10,15,20\text{at.}\%)$ 合金液滴的快速凝固, 研究发现, 随合金粒子直径的减小, Cu-Zr-Ag 三元合金样品的过冷度和冷却速率急剧减小, 凝固组织发生显著变化。此外, 本文利用激光热导仪测定了 $(\text{Cu}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})_{100-x}\text{Ag}_x(x=10,15,20\text{at.}\%)$ 合金随温度变化的热扩散系数, 研究发现随着温度的升高和合金中 Ag 含量的增加, 热扩散系数均呈现出不断增大的趋势。

关键词: Cu-Zr-Ag 三元合金, 快速凝固, 热扩散, 微重力

## C07-56

### 一种高强中熵合金的制备及力学性能研究

邓皓玮, 谢卓明, 张涛

中国科学院合肥物质科学研究院

本文采用真空电弧熔炼和等通道挤压 (ECAP) 制备了一种高强中熵合金材料。研究了材料的微结构、力学性能随 ECAP 道次 (1-3 道次) 及退火温度 (500-800℃) 变化的演化规律。透射电镜结果表明经过 ECAP 大塑性变形后, 材料中出现高密度位错和孪晶, 说明其变形机制主要为位错和孪晶机制。随着 ECAP 挤压道次的增加, 逐步形成多维结构的孪晶, 这些纳米孪晶对合金具有明显的强化作用: 经过 3 道次 ECAP 变形后的试样室温屈服强度高达 1.2 GPa, 是原始样品的 6 倍。500℃退火处理后, 由于热激活作用导致位于合金基体 (孪晶) 中的位错重排, 并产生一个 HCP 结构的新相。HCP 相进一步阻碍位错运动, 促使拉伸强度 (1.5 GPa) 和硬度进一步提升。更高温度 (>500℃) 退火处理后, 试样发生再结晶: 位错、孪晶密度降低, 材料强度下降, 塑性改善。

关键词: 电弧熔炼, 等通道挤压, 中熵合金, 微结构, 力学性能

## C07-57

### 空间环境金属液滴传热过程与快速凝固研究

王海鹏, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

实验条件对材料的制备和成型过程十分重要, 而空间环境以其独特的微重力、无容器和超洁净等特点为材料的制备提供了优异的条件。落管是地面模拟空间环境最为全面的技术, 熔体在自由下落过程中, 由于避免了与容器壁的接触而有效抑制了异质形核, 因此可以实现液滴的深过冷快速凝固。

该报告结合空间环境中金属液滴传热过程的理论计算, 围绕金属液滴在自由下落过程中的快速凝固问题, 阐明了空间环境中金属材料制备的优势。首先, 针对金属液滴自由下落过程中温度难以测量的不足, 采用数值方法, 将牛顿传热模型与经典热传导方程相结合, 计算了液滴自由下落过程中内部温度场的变化, 获得了液滴内部的温度、冷却速率及温度差异等液滴传热信息, 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影响。在此基础上研究了合金在自由下落条

件下的快速凝固问题,并取得了以下三点进展:一、空间环境对合金的凝固路径的主动调控作用,包晶体系可实现初生相与包晶相共生生长、而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;二、空间环境对合金凝固相含量的作用,在Ti-6Al-4V合金的快速凝固中, $\beta$ 相含量的变化受到冷速和过冷度的耦合调控;三、空间环境对合金凝固组织的细化作用,钛合金的快速凝固组织呈现为枝晶组织,随冷速和过冷度的增大,晶粒不断细化。

关键词:空间环境,液滴传热,深过冷,快速凝固

## C07-58

### 偏晶合金凝固过程研究进展

江鸿翔,赵九洲,张丽丽,何杰

中国科学院金属研究所

偏晶合金是指具有液-液相变温度区间的合金。这类合金非常广泛,如能将它们制备成弥散型复合材料、壳/核结构复合材料或第二相呈现纤维状排列的复合材料,则该类合金将具有优异的性能和重要的工业用途,比如,较软的Pb相或Bi相弥散分布于较硬的Al基体和Cu基体中的Al-Pb、Al-Bi、Cu-Sn-Pb合金等可以用作自润滑汽车轴瓦材料。然而,该类合金凝固时首先发生液-液相变,生成两个互不混溶的液相,在常规的凝固条件下,极易形成相偏析严重乃至两相分层的凝固组织。近年来,偏晶合金凝固理论及凝固组织控制研究受到了材料科学领域的高度重视,人们在空间和地面上开展了大量实验,尝试了用电场、磁场、微合金化等方法控制偏晶合金凝固组织的可行性,并结合实验开展了深入的建模与模拟研究。本文综述了近年来有关偏晶合金凝固过程研究的进展,展望了本领域今后的发展趋势。

关键词:偏晶合金,凝固,组织控制,建模与模拟

## C07-59

### 快速凝固Ni-Si/Ge合金的组织演变与力学性能研究

燕鹏旭,王伟丽,魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

采用自由落体与铜模喷铸技术实现了二元Ni<sub>95</sub>Si<sub>5</sub>和Ni<sub>95</sub>Ge<sub>5</sub>单相合金及Ni<sub>43.8</sub>Si<sub>56.2</sub>和Ni<sub>33</sub>Ge<sub>67</sub>共晶合金的快速凝固。结果发现,随着熔体冷却速率增大,合金凝固组织均显著细化,单相合金中(Ni)枝晶发生了“粗大枝晶→细化枝晶→等轴枝晶”转变。对于Ni<sub>43.8</sub>Si<sub>56.2</sub>合金,晶粒密度不断增大,层片间距逐渐减小。Ni<sub>33</sub>Ge<sub>67</sub>合金的凝固组织由不规则共晶逐渐细化并转变为含少量初生Ge相的过共晶组织。由于自由落体液滴有更高的冷却速率,合金凝固组织更加细密,其硬度明显高于喷铸合金,可见高冷速引起的组织细化可以显著提升材料硬度。对于Ni<sub>33</sub>Ge<sub>67</sub>共晶合金,结合巴氏裂纹模型可知,组织细化是材料的主要增韧机制,韧性相体积分数的增加起辅助增韧作用。另一方面,单相塑性合金与共晶脆性合金具有不同的硬度和强度关系,脆性材料由于压痕裂纹的产生会使硬度值增大,硬度与强度的比值远大于3,而塑性材料由于抵抗变形能力较弱,硬度与强度的比值略小于3。由硬度和强度的相关性可知,组织细化不仅有助于提升合金硬度,同时可以提高材料强度,由于自由落体合金的硬化现象更加显著,其强度也高于喷铸合金。

关键词:快速凝固,晶体生长,显微硬度,屈服强度

## C07-60

### 化学气相输运沉积钨涂层及其性能研究

王芳,谭成文,于晓东,聂志华,郝玉朋,姜民屈,赵修臣,王富耻,才鸿年

北京理工大学

金属钨具有优异的高温组织稳定性和极低高温蒸汽压,可用作热离子能量转换器发射极涂层。化学气相输运沉积法制备钨涂层,生长效率高、涂层缺陷少、晶体取向可控,具有广阔的应用前景。采用W-WCl<sub>x</sub>-Cl气相体系,高纯多晶钨源(纯度 $\geq 99.99\%$ ),高纯六氯化钨提供氯源,通过化学气相输运沉积法,在沉积温度1320℃~1520℃、体系压力15.77 Pa~105.86 Pa条件下制备了高纯钨涂层。对钨涂层的微观组织和物理性能进行了表征。结果表明,体系压力15.77 Pa时:沉积温度1320℃,表面呈现四棱锥结构,择优取向为 $\langle 112 \rangle$ ;沉积温度1470℃,表面呈小平面对,夹杂有四棱锥结构,择优取向为 $\langle 110 \rangle$ 。体系压力105.86 Pa,沉积温度1400℃时,获得了组织致密 $\langle 110 \rangle$ 方向择优的钨涂层,生长速率达17.42 mg·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>;密度19.11 g/cm<sup>3</sup>;显微硬度366~393HV。

关键词:钨涂层,沉积温度,体系压力,组织

## C07-61

### GH4169 复杂异形机匣环件轧制全流程智能建模与仿真研究

梁磊, 郭良刚, 李学潮

西北工业大学材料学院

GH4169 复杂异形机匣环件, 是航空发动机、燃气轮机高端装备核心基础构件。然而, 因材料难变形及截面的复杂性, 机匣环件的轧制过程金属流动异常复杂, 面临环件截面精确成形与组织性能控制等挑战, 而坯料和轧制参数的设计优化是解决问题的关键。目前对于复杂异形环件轧制理论和技术研究还不成熟, 实际生产中主要基于经验的试错法设计坯料并确定关键工艺参数, 周期长、成本高、质量一致性差。

本文针对机匣环件截面的几何特点, 考虑胎膜制坯和环轧全流程, 设计了合理的坯料和工装; 基于 ABAQUS 软件平台, 解决了材料建模、热力边界处理、网格划分等关键技术, 建立了 GH4169 合金胎膜锻制坯过程有限元模型及异形环轧过程智能有限元模型, 实现了胎膜锻制坯和异形环轧全流程数值模拟。在异形环轧智能有限元模型中, 实现了环件长大速度驱动的各轧辊自动协调匹配运动, 通过一次计算即可获得满足环件长大速度要求的关键工艺参数组合, 与传统的基于试错的有限元方法相比, 极大地提高了计算效率和可靠性。

基于所建立的有限元模型, 获得了胎膜锻制坯过程和异形环轧制过程温度场、应变场、成形载荷(轧制力、轧制力矩)等的演变规律; 探明了胎膜锻过程和异形环轧过程金属流动特点与材料变形行为; 对所设计的坯料、轧制工艺进行模拟评估表明, 胎膜锻过程获得了精确的异形环轧坯料, 基于该坯料的异形环轧过程平稳、实现了环件截面的精确成形。该研究为高温合金复杂异形机匣环件轧制工艺创新与评价提供了先进的仿真平台和技术基础。

关键词: GH4169, 复杂异形环件, 全流程模拟, 智能仿真

## C07-62

### 电磁悬浮条件下 Ti-Al 合金的快速凝固

罗志聪, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

Ti-Al 合金具有比强度高、耐高温、耐腐蚀等优异性能, 正加快应用于航空航天航海等领域。采用电磁悬浮技术分别研究了 Ti-(47,50,54) at.%Al 三个合金的快速凝固, 测定了不同过冷度下初生相的生长速率, 得到了不同过冷度下合金的微观组织和显微硬度。研究表明, 初生相的生长速率随过冷度呈双指数函数关系, 在 Ti-47 at.%Al 合金的快速凝固过程中发生了三次再辉。Ti-47 at.%Al 合金的三次再辉应该分别对应于液相转变为初生  $\beta$ -Ti 相, 初生  $\beta$ -Ti 相转变为  $\alpha$ -Ti 相,  $\alpha$ -Ti 相发生共析反应这三个相转变过程。随着过冷度的增大, Ti-50 at.%Al 合金微观组织由枝晶和枝晶间组织转变为由  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 和  $\gamma$ -Ti 组成的层片状组织, Ti-54 at.%Al 合金由枝晶和枝晶间组织转变为弥散状组织。Ti-(47,50,54) at.%Al 三个合金分别在过冷度约为 185 K、270 K、316 K 时的显微硬度最大。

关键词: 电磁悬浮, 快速凝固, 深过冷, 显微硬度

## C07-63

### 一种测量液态金属原子扩散的多层平动剪切技术

钟浪祥, 胡金亮, 张博

合肥工业大学

液态金属扩散系数是描述质量传输现象的核心参数。液态金属原子扩散行为的研究对于人们了解液态金属的原子结构和原子迁移的物理本质有重大意义。本文介绍一种自主研发的测量液态金属原子扩散的多层平动剪切技术。该技术通过精确控制液态金属样品的对接与分离, 避免了传统长管测量技术中升温 and 降温过程的影响。系统测量铝铜合金 (Al<sub>85</sub>Cu<sub>15</sub>) 在 720°C 的扩散系数, 与前人研究结果对比表明, 该技术能够显著提高测量互扩散系数的精度。多层平动剪切技术也能够应用于其他高温合金熔体扩散系数的测量, 具有广泛的研究和应用价值。

## C07-64

### 表面纳米化对 TC4 合金耐磨性的影响研究

刘印刚, 李淼泉

西北工业大学材料学院

本文采用高能喷丸法实现了块体粗晶 TC4 合金的表面纳米化, 采用扫描电镜和透射电镜表征了 TC4 合金纳米结构表层的微观组织特征, 同时对表面纳米化 TC4 合金的显微硬度和表面粗糙度进行了测定, 在此基础上采用球盘磨损试验机研究了纳米结构表层对固定载荷条件下 TC4 合金耐磨性的影响。结果表明: TC4 合金高能喷丸处理后表层发生了剧烈塑性变形; 在空气压力为 0.25 MPa 和喷丸处理时间为 30 min 时, 最表面晶粒细化至纳米晶, 平均晶粒尺寸为 71.2 nm。TC4 合金表面纳米化后的粗糙度较处理前明显增大, 同时显微硬度提高了 36%。摩擦磨损测试显示, 纳米结构表层有效改善了 TC4 合金的耐磨性, TC4 合金表面纳米化后的磨痕宽度较其供应态减小了 32%。

关键词: TC4 合金, 纳米晶, 高能喷丸, 耐磨性

## 墙展

### C07-P01

#### 冷速及钪合金化对铍铝合金组织及性能的研究

余良波, 王晶, 苏斌, 赖新春

中国工程物理研究院材料研究所

铍铝 (Be-Al) 合金结合了铍的高强度和铝的高延展性与加工性等优点, 具有低比重、高强度、高热导性及优异的光学性能, 在航空航天、武器系统和民用高技术材料领域中有着日益广泛的应用。铍、铝金属间固有的热力学差异导致铸造合金中存在难以控制的组织缺陷, 铸造铍铝合金的性能仍有很大提升空间。快速凝固 (RSP) 可显著改善合金组织, 抑制宏观偏析、提升合金强度, 结合稀土元素钪 (Sc) 对铍铝合金组织及性能的有益作用, 有望获得具有综合性能优良的铸造铍铝合金, 这也使得针对熔体冷却速率及 Sc 合金化对铍铝合金的综合作用的研究具有重要意义。本工作采用真空感应熔炼 (VIM)、真空电弧熔炼 (VAM)、吸铸 (SC)、单辊快淬 (甩带, MS) 四种铸造技术并结合 Sc 合金化制备获得冷速为  $10^0\text{K/s}$ ,  $10^2\text{K/s}$ ,  $10^3\text{K/s}$  和  $10^4\text{K/s}$  的 Be-Al 及 Be-Al-0.4Sc 合金, 结合金相 (OM)、扫描电镜 (SEM+EDS)、透射电镜 (TEM)、X 射线衍射 (XRD)、宏/微观硬度分析等手段系统研究了两种因素对 Be-Al 合金组织与力学性能的影响及机理。结果表明, 高冷速大幅度细化合金晶粒, 提升合金宏观硬度, 但未改善 Be 相枝晶结构; Sc 合金化在冷速基础上进一步细化晶粒, 并实现 Be 相枝晶-等轴晶转变 (CET), 显著改善合金微观组织并提高合金宏观硬度。含 Sc 合金中均存在  $\text{Be}_{13}\text{Sc}$  第二相, 而只有在冷速高于  $103\text{K/s}$  时合金中才生成一定量的与 (Be),  $\text{Be}_{13}\text{Sc}$  和 (Al) 平衡共存的  $\text{Al}_3\text{Sc}$  相, 原因为快冷过程中的非平衡凝固行为导致。此外, Be-Al-0.4Sc 合金中第二相颗粒的分布及合金微观组织取决于熔体过冷度, 高过冷度下初始晶粒以平界面方式生长, Sc 元素分布相对均匀, Be 晶粒细化且尺寸一致, 显微硬度提高; 反之则以胞状生长为主, Sc 元素存在较大微观偏析, 部分 Be 晶粒粗化。

关键词: 铍铝合金, 快速凝固, 晶粒细化, 第二相, 微观硬度

### C07-P02

#### 靶材刻蚀和沉积速率对 Be 薄膜微观组织、电性能的影响

罗炳池, 李文琦, 李恺, 罗江山

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

铍 (Be) 材料的某些性能, 如核性能、物理性能和烧蚀性能是其它任何金属材料不能替代的。它具有高密度 ( $1.85\text{g/cm}^3$ )、低原子序数 ( $Z=4$ )、低 X 射线不透明性、屈服强度大、烧蚀速度快和对 RT 不稳定性增长不敏感等特性, 是 ICF 物理实验首选的一种烧蚀材料。采用直流磁控溅射技术, 在不同溅射功率下制备了 Be 薄膜。基于电荷守恒和质量守恒, 理论预测了 Be 靶材的刻蚀速率  $R_m=2.5+0.20P$ , (mg/h)。它与称重法测定的靶材刻蚀速率十分吻合, 进一步证实了预测数据的有效性和可靠性。XRD 分析显示, 溅射 Be 薄膜主要由  $\alpha\text{-Be}$  相组成,  $\text{BeO}$  峰仅在溅射功率低于 100W 存在。随溅射功率增加, 沉积速率和衬底温度也逐渐增加 (溅射热效应引起), Be 涂层表面形貌由规则的柱状晶转变为花椰菜状多晶结构。此外, 在微结构中发现异质晶核生长, 可能由溅射过程掉渣引起。异质晶核横向尺寸  $d$  随沉积时间  $t$  服从幂指数关系  $d=10+46t^{0.39}$ , 与表面粗糙度  $R_q$  随厚度  $\tau$  发展趋势相似,  $R_q=4.3\tau^{1.5}$ 。四探针法测定的 Be 薄膜电阻率  $\rho_e$  反比于晶粒尺寸  $d_g$ ,  $\rho_e=3.2\times 10^{-8}+4.0\times 10^{-5}/d_g$ 。

关键词: 铍薄膜, 电阻率, 微观形貌

### C07-P03

#### S31042 奥氏体耐热钢中 sigma 相的析出行为

李彦默, 刘永长, 余黎明, 刘晨曦, 李冲, 李会军  
天津大学

在 700 °C 下对变形量为 40% 的 S31042 钢样品进行长期时效实验, 通过 XRD、OM、SEM 和 TEM 研究  $\sigma$  相在高温时效过程的析出行为。结果表明, 时效 100h 样品的晶界完全被链状 M23C6 相所占据。继续时效至 500h 时, 发现  $\sigma$  相首先在三叉晶界处的 M23C6 相上形成。而后随着时效时间的增加,  $\sigma$  相的含量逐渐增多且主要沿 M23C6 相析出。 $\sigma$  相的 (112) 晶面与 M23C6 相 (422) 晶面之间具有共格关系, 先析出的 M23C6 相为  $\sigma$  相的形成提供合适的形核位置。而后  $\sigma$  相通过消耗 M23C6 相中的 Cr 原子长大。因此,  $\sigma$  相在高温时效过程遵循 M23C6  $\rightarrow$   $\sigma$  转化机制形成。  
关键词: 奥氏体耐热钢,  $\sigma$  相, 析出物, 时效, 形核机制

#### C07-P04

##### 电磁悬浮大体积金属的熔体形态调控研究

蔡晓, 王海鹏, 魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

材料无容器处理技术在基础科学研究和新材料开发等领域有着广泛应用, 其中电磁悬浮无容器处理技术以加热效率高和悬浮能力强成为研究者关注的焦点。金属熔体在高频电磁场的作用下平衡, 其密度、尺寸、表面张力和分布不均匀的洛伦兹力与液态金属形状均有着十分紧密的联系。针对优化后单层和双层构型线圈系统, 本文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, 获取了不同尺寸的金属在重力、洛伦兹力和表面张力共同作用下的熔体形状。随着激励电流增加, 发现直径 10 mm 金属熔体截面形态变化路径为: 椭圆 $\rightarrow$ 近球形, 而直径 20mm 的金属熔体截面形态变化路径为: 长锥形 $\rightarrow$ 短锥形 $\rightarrow$ 菱形。进一步对不同电流条件下金属的质心位置、形变量进行了量化分析。同时, 针对质量 12g 的金属铝 (等效直径为 20mm) 进行上述两种线圈系统的电磁悬浮实验, 获得了典型的稳定悬浮形态, 与数值模拟的预测结果相互吻合。

关键词: 电磁悬浮, 线圈构型, 大体积金属, 熔体形态

#### C07-P05

##### 超声悬浮技术在化学领域应用的研究进展

杨杰, 徐杰, 刘向荣, 代爱萍

西安科技大学研究生院

近年来, 超声悬浮技术在化学领域的应用呈现了多元化的发展, 本文总结了学者们在化学领域应用超声悬浮技术的研究进展: (1)微量样品的理化常数如密度、粘度、绝热压缩系数等的测定。常规方法测定极少量样品时, 会出现容器壁对样品的吸附, 而超声悬浮技术实现的无容器处理, 成功解决了这一难题。目前, 利用声悬浮技术研究物质理化常数测定多集中在高压条件; (2)单颗粒矿物的研究。应用超声悬浮技术配合数字全息技术观测悬浮场中煤粉颗粒的运动和燃烧情况, 可记录煤粉颗粒在不同投影面的全息图像; (3)晶体生长过程研究。利用超声悬浮, 可以加速溶剂挥发, 促进异相成核, 影响结晶过程, 有利于得到化合物的晶体结构。对得到的晶体进行 X-射线衍射检测, 进而获得更多的结构信息; (4)晶体去结晶化研究。超声悬浮也能实现对克霉唑、卡巴咪唑等药物的去结晶化, 增大药物在使用过程中的溶解度; (5)负载型纳米催化剂的合成研究。应用超声悬浮技术, 使得合成过程快速简便, 对原料氧化物不需进行任何处理; (6)碳纳米管的合成研究。现有碳纳米管的合成方法如化学气相沉积法、电弧放电法和激光烧蚀法等, 在纳米管的质量控制上存在一些不足, 因而发展了超声悬浮合成技术, 制备出质量更佳的碳纳米管。超声悬浮技术在化学领域的应用还有较大的发展空间, 技术成熟度还有待提高, 相信在不久的将来, 超声悬浮在化学研究领域的应用定会取得更大的进展!

关键词: 超声悬浮, 化学, 应用, 进展

#### C07-P06

##### 超声悬浮与先进检测手段联用技术的开发和应用进展

廖庚晖, 石晨, 刘向荣, 杨水兰

西安科技大学

在过去的几十年来, 由于超声悬浮技术可以悬浮痕量分析物, 避免了因容器壁的不确定性吸附、记忆效应和污染而引起的分析物损失, 且可以排除容器壁的光学干扰, 因而在化学和生物等领域中得到广泛的应用和发展。本文主要介绍了超声悬

浮与一些先进检测手段联用的技术。(1)联合超声悬浮技术与共焦显微镜和透射光显微镜的成像技术,可进行超声悬浮对斑马鱼及其胚胎的生物效应研究,结果表明超声悬浮有望成为脊椎动物胚胎的无接触和无破坏性操作平台;(2)通过超声悬浮和荧光细胞成像仪的结合,可在少数细胞水平上研究脂肪细胞脂解的激素调节和脂肪细胞与胰腺 $\beta$ 细胞之间的交流;(3)拉曼光谱和声悬浮的联用系统可用于监测微量红细胞悬浮液的血红素动力学和检测疟疾感染的细胞中的疟原虫;(4)在超声悬浮系统排除表面效应、温度和湿度的影响之后,结合高时间分辨率的XRD和拉曼光谱可以实现原位跟踪检测,从而深入了解溶剂对晶化过程的影响;(5)通过将超声悬浮与实时环境串联质谱相结合,实现了利用声学悬浮微液滴(静止)内的微反应监测;(6)将处于封闭环境的超声悬浮器分别与拉曼光谱仪,红外光谱仪和二氧化碳激光器组合起来,可严格控制气体压力,温度和化学成分等环境条件,推进天体生物学、行星科学和燃烧科学等方面相关新型实验的展开;(7)此外,在超声悬浮系统中引入全息技术,可以以3D视角操纵物体,提高了声悬浮的效率和多功能性,从而开拓材料加工、微尺寸制造和生物医学领域的应用。随着超声悬浮装置的小型化,相应数据采集系统的进一步解决以及悬浮能力的提高,相信其能够在未来分析化学、生物化学和材料化学等领域大放异彩。

关键词: 超声悬浮, 联用技术, 进展

## C07-P07

### 实验测定与模拟液态亚稳 Inconel 718 合金的密度

郑晨辉, 邹鹏飞, 杨尚京, 胡亮, 魏炳波, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

Inconel 718 合金是一种典型的镍基高温合金, 由于其优异的性能如耐高温, 耐腐蚀, 耐疲劳, 耐蠕变等, 广泛应用于航空航天领域作为发动机的关键结构部件等。凝固对合金的性能产生极大地影响, 为了对亚稳态的液态 Inconel 718 合金的凝固过程有更多的认识。我们用静电悬浮方法结合分子动力学模拟研究了 Inconel 718 合金的密度及结构在亚稳的过冷液态中的变化。

在静电悬浮条件下实现了商业合金 Inconel 718 超过 100 K 的过冷; 得到了液态 Inconel 718 合金在宽温度范围下的密度与温度关系, 测得在液相线温度(1663 K)处的密度值为  $7.39\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 热膨胀系数为  $9.33\times 10^{-5}\text{K}^{-1}$ 。分子动力学模拟的结果与实验符合很好, 且获得了更大的过冷度, 所选成分中符合最佳的成分为  $\text{Ni}_{60}\text{Cr}_{21}\text{Fe}_{19}$ , 其二体分布函数反映了随着温度降低, 合金原子间的作用力在加强, 且第一近邻  $R_1$  处的峰值变化对该合金的液态结构的影响要大于第二近邻  $R_2$  和第三近邻  $R_3$ 。

关键词: 液态合金, Inconel 718, 镍基高温合金, 密度, 热物理性质, 分子动力学, 静电悬浮

## C07-P08

### 大体积金属深过冷快速凝固实验研究

赵炯飞, 闫娜, 王海鹏

西北工业大学理学院应用物理系

深过冷快速凝固作为一种新型材料制备技术, 可以显著改善合金微观组织结构和材料力学性能, 已经成为材料科学领域的一个重要研究方向。研究金属材料在深过冷快速凝固条件下的凝固组织对其力学性能的影响, 对于工业应用、开发新材料具有重要意义。本文中选取 Ni-5%Cu 单相固溶体合金作为研究对象, 制备大体积合金试样, 探究不同过冷度条件下金属材料凝固组织演化规律, 以及过冷度对力学性能的影响。主要取得了以下结果:

1: 采用自行设计的大体积金属的搭载和加热平台, 成功制备出大体积 Ni-5%Cu 合金试样( $m>10\text{g}$ ), 实验中获得的最大过冷度为  $\Delta T=380\text{K}$ 。通过分析大体积 Ni-5%Cu 合金试样凝固组织发现: 大体积合金试样在不同过冷度下凝固时均存在多点非同时形核, 这造成了凝固组织的复杂性和轴向上的不均匀性。并且, 随着过冷度的增大, 大体积合金试样凝固组织得到明显细化、轴向不均匀性减小。

2: 分别采用万能试样机和动态热机械分析仪(DMA)对不同过冷度下大体积 Ni-5%Cu 合金试样进行了力学性能测量, 结果表明: 合金试样的屈服强度、弯曲模量与过冷度均呈二次函数关系, 随着过冷度的增大, 金属的屈服强度先减小后增大, 相反弯曲模量先增大后减小, 两者极值处对应的过冷度近似相同。根据实验结果拟合的曲线公式推算, 极值点在 310 K 左右。

关键词: 深过冷, 快速凝固, 大体积合金, 凝固规律, 力学性能

仅发表论文

### C07-PO-01

#### 化学气相沉积高发射率铼涂层的研究

魏燕<sup>1,2</sup>, 胡昌义<sup>1,2</sup>, 陈力<sup>1,2</sup>, 蔡宏中<sup>1</sup>, 郑旭<sup>1</sup>, 张翔翔<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1</sup>

- 1.昆明贵金属研究所
- 2.昆明理工大学

铼因其优异的性能在高温热辐射涂层材料方面的应用日益广泛,兼具载荷及热能转换的作用。这对铼材料热辐射性能的研究提出了迫切的需求。本论文采用 CVD 技术成功地制备了沉积温度 1100°C-1300°C, 氯气流量 50-150ml/min 的铼 (Re) 涂层, 获得了 CVDR<sub>e</sub> 的沉积动力学规律: 基体温度升高, 沉积速率呈指数上升; 氯气流量增加, 沉积速率以直线方式上升。Re 涂层的生长模式符合复合生长模式 (Stranski-Krastanov 型)。Re 涂层的组织结构与沉积温度之间符合 Movchan-Demchishin 关系, 呈现柱状晶结构。沉积温度越高致密度越高, 1300°C 沉积的 Re 涂层相对密度达到 99.9%。通过研究 CVDR<sub>e</sub> 涂层的形成及生长模型, 确定了沉积参数与晶面生长之间的关系, 低温、低氯气流量有利于密排面生长, 高温、高氯气流量有利于非密排面生长, 分别获得了表面为楔形和六棱锥形貌的 CVDR<sub>e</sub> 涂层。本研究中制备的 CVD Re 涂层具有较高发射率: 沉积温度 1100°C 的 CVDR<sub>e</sub> 涂层半球发射率最高, 基本在 0.83 以上; 沉积温度 1300°C 的次之 (0.62-0.83), 1200°C 的相对较低 (0.68-0.74), 均高于 PMRe 的发射率 (0.28-0.31), 将 CVDR<sub>e</sub> 的粗糙表面抛光后, 发射率最低 (0.15-0.19), 通过氧化发射率又提高至 0.4-0.5。CVDR<sub>e</sub> 涂层具有明显的择优取向, 以 (002) 基面纤维织构为主。以谐振子模型为基础, 通过 VASP 和 Phonopy 软件包模拟计算 Re 的发射率, 结果表明在红外区域 Re 的发射率为 0.3, 与 PMRe 的发射率数较为一致。使用 Matlab 语言构造满足 Gauss 分布的随机粗糙表面, 解释了 CVDR<sub>e</sub> 涂层发射率随沉积温度变化的规律。并预测, 如果在试验研究的基础上降低沉积温度, 减小颗粒直径 (相关长度减小); 提高氯气流量, 保持表面的择优织构及尖锐的六棱锥形貌 (均方根增加), 可以获得更高发射率的材料。

通过本论文的研究, 实测了不同状态 CVDR<sub>e</sub> 涂层的发射率, 为铼在实际应用中进行热防护设计提供了重要基础数据; 分析了铼涂层的形成机制及生长模型, 实现了铼涂层材料结构可控生长; 最后结合实验结果与模拟计算分析了 CVDR<sub>e</sub> 具有高发射率的成因, 对进一步提高铼的热辐射性能进行预测, 也为探索制备具有高发射率的金属涂层提供科学依据。

关键词: 化学气相沉积, 铼, 发射率

### C07-PO-02

#### 热处理工艺对 0Cr21Mn17Mo3N0.8 高氮合金第二相析出行为及硬度的影响

杨友<sup>1</sup>, 许云秀<sup>1</sup>, 陈咨伟<sup>2</sup>, 黄岩<sup>2</sup>

- 1.长春工业大学材料科学与工程学院
- 2.吉林长春高氮合金研发中心有限公司

研究了不同热处理工艺对 0Cr21Mn17Mo3N0.8 高氮合金氮化物析出相形态、数量和尺寸以及热力学稳定性的影响。采用金相显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等对合金显微组织进行了观察和表征, 测试了不同处理工艺下高氮合金的硬度值。实验结果表明: 试验合金在 1140°C 固溶处理 8 小时后随炉冷却, 合金中析出片层状氮化物, 析出物成分为 Cr<sub>2</sub>N, 其片层尺寸在 20-100nm 之间, 析出主要发生在表层下 1-2mm 处, 可以使合金形成表面强化的复合材料, 同时, 由于表层第二相的析出合金硬度明显提高, 由固溶处理后的 29.3HRC 提升至 61.3HRC; 对固溶缓冷处理后的高氮合金进行低于完全奥氏体化温度的回溶处理, 片层状析出物在 950°C 时开始溶断; 在 1120°C 时保温 8h, 水淬, 片层状析出物完全溶断成颗粒状, 颗粒尺寸大约有 20-50nm, 回溶处理后合金硬度下降, 为 48.3HRC; 合金在 550°C-750°C 不同时间时效等温处理后, 片层状析出物的形态和尺寸并没有发生变化, 而颗粒状析出物在 700°C 以前没有长大的趋势, 在 750°C 时效有二次析出的片层状氮化物出现, 其尺寸比缓冷处理得到的析出物尺寸更加细小, 在 10-20nm 之间, 其分布更加弥散、细小, 这种第二相可作为合金的高温强化相发挥重要作用。

关键词: 高氮合金, 热处理, 氮化物析出, 硬度

### C07-PO-03

#### 铜钢双金属层状复合材料的制备与研究

董博闻

大连理工大学

通过固液复合铸造技术制备出铜铅锡/钢层状复合材料, 通过控制相关工艺参数及对样品进行后续组织形貌观察分析, 讨论了凝固过程中铜合金内部富铅相的粗化过程及其形貌尺寸变化。并通过实验探究了水冷速率对铜钢复合界面质量及铜合金组织均匀性的影响。实验结果表明, 随着冷速降低, 固液界面推进速率降低, 富铅相逐渐由规则球状转变为不规则形态。当界面推进速率过慢时, 受冷速及温度梯度影响, 铜合金层底部出现数百微米尺寸的倒三角形富铅相, 发生严重的宏观偏聚。

#### C07-PO-04

##### Mo 添加细化魏氏组织提高 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的硬度

张亚然<sup>1</sup>, 刘永长<sup>1</sup>, 蔡奇<sup>2</sup>, 李冲<sup>1</sup>, 马宗青<sup>1</sup>

1.天津大学

2.上海大学

通过等离子放电烧结制备成分为 Ti-22Al-23.9Nb-1.1Mo (原子分数, %) 的合金, 分别在 900℃, 1000℃, 1070℃ 和 1150℃ (分别对应于 O+B<sub>2</sub>, α<sub>2</sub>+B<sub>2</sub>+O, α<sub>2</sub>+B<sub>2</sub>, 和 B<sub>2</sub> 相区) 对试样进行固溶处理, 研究冷却过程中 Mo 添加对相和组织演变的影响, 并测试固溶态合金的硬度。结果表明, 与未添加 Mo 的合金相比, Mo 促进了 α<sub>2</sub> 和 O 相在固溶过程的溶解, 使合金的室温相均由 B<sub>2</sub> 相和 O 相再析出相构成, 组织为初生 O 相板条和 B<sub>2</sub>+O 魏氏组织。在 B<sub>2</sub> 单相区以下进行固溶处理时, 合金的硬度整体低于同相区未添加 Mo 合金的硬度。而当合金在 1150℃ (B<sub>2</sub> 单相区) 固溶处理时, Mo 可以细化 B<sub>2</sub>+O 魏氏组织, 并使魏氏组织的板条发生弯曲, 合金的硬度可达 488±28HV, 高于未添加 Mo 合金的硬度。

#### C07-PO-05

##### 原位还原法制备石墨烯/铜基复合材料组织形貌及性能

王宇彤, 冉旭

长春工业大学

铜作为人类使用最早的金属之一因其优良的导电导热能力被广泛应用在建筑、国防、汽车制造、电力传输等诸多领域, 虽然纯铜的导电导热性能优良, 但其自身硬度较低, 耐磨性较差, 很难满足日益增长的工业需求, 为了改善这一缺点, 科研工作者们发现向铜基体中加入合金元素可以大大的提高铜合金的强度, 但与此同时, 铜基复合材料的电导率和导热性却有所下降, 研究发现, 碳纤维以及碳纳米管增强的铜基复合材料具有较好的增强效果, 但碳纤维增强的铜基复合材料其机械性能较差, 碳纳米管增强的铜基复合材料碳纳米管与铜基体结合性较差, 且碳纳米管制备较困难。石墨烯的比表面积高达 2600m<sup>2</sup>/g, 它的强度可达 130GPa, 导热系数高达 5000W/mK, 是目前为止导热系数最高的碳材料, 同时在室温下其电子迁移率也可以达到 15000cm<sup>2</sup>/V·s 之高, 因此, 本文选取石墨烯作为增强体, 寻求合适的工艺用以制备满足现代工业需求的铜基复合材料。

本文主要采用原位还原法制备石墨烯/铜复合粉末, 将复合粉末与铜粉混合并通过放电等离子技术制备石墨烯/铜基复合材料。主要研究了石墨烯含量对其组织性能的影响, 研究发现, 在烧结温度一定的条件下, 随着石墨烯含量的提高, 复合材料的硬度、呈现先升高后降低的趋势, 致密度和电导率都逐渐下降, 复合材料的摩擦系数和磨损率则先下降后上升。当石墨烯含量为 1.2% 时, 复合材料的综合性能最好, 其显微硬度为 116HV, 是纯铜 (67HV) 硬度的 1.73 倍, 致密度与电导率分别为 98.5% 和 96.1%, 摩擦系数和磨损率较之纯铜更低。研究结果表明: 石墨烯作为增强体加入到铜基体中可以有效地阻碍位错运动, 使复合材料的硬度有所提高, 并且复合材料进行摩擦磨损实验时暴漏在复合材料表面的石墨烯可以起到一定的润滑作用, 改善复合材料和摩擦副的磨损机制, 降低其摩擦系数和磨损率, 提高复合材料综合性能。

关键词: 石墨烯/铜基复合材料, 显微硬度, 致密度, 电导率, 摩擦系数, 磨损率

#### C07-PO-06

##### 高强高导铜钒双金属纳米复合材料的组织与性能

Xu Ran

Changchun University and Technology

近年来, 随着航天工业, 微电子, 通信, 医学, 生命科学等领域的迅速发展, 对铜合金的各项技术指标和环境适应能力都提出了更高的要求: 如何同时具有高强度和高电导率。铜的强度很难提高, 并且总是以降低电导率为代价。改善铜的力学性能的最常见方法之一是添加合金元素。过渡族金属 Nb, Ta, V, Fe, W 等与铜在固态下不固溶或微溶, 因此它们对铜的导电性影响较小。钒与 Nb, Ta, W, Mo 一起被称为难熔金属并且具有相对较高的硬度和较低的密度, 使之成为优良的铜的增强体。本研究采用机械合金 (MA) 制备 Cu-1.8wt.%V 双金属纳米复合材料, 然后在不同温度下进行真空热压烧结。研究了纳米复合材料的微观结构和性能。结果显示, 随着烧结温度的升高, 复合材料的显微硬度和屈服强度先增大后减小, 导电

率呈上升趋势。900℃烧结的复合材料的屈服强度为 603.96MPa，导电率为 71%IACS，表现为在拥有高强度的同时具有很高的电导率，钒纳米颗粒均匀弥散分布在铜基体中，Cu-V 双金属纳米复合材料的强化机制有细晶强化和弥散强化。

关键词：铜-钒复合材料，双金属，高强高导，纳米，强化机制

#### C07-PO-07

##### 固溶温度对 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物组织与性能的影响

赵洪泽<sup>1,2</sup>，徐磊<sup>1</sup>，卢斌<sup>1</sup>，杨锐<sup>1</sup>

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

TAN-2 合金(名义成分为 Ti-22Al-24Nb-0.5Mo(at.%))，是一种新型的金属间化合物显微组织和力学性能的影响。采用精密管式炉对 TAN-2 合金进行不同温度的固溶处理，采用 SEM 和 EDS 对显微组织进行表征。研究发现经  $\alpha_2$ +B2 两相区和  $\alpha_2$ +O+B2 三相区固溶得到的组织，在室温时具有良好的塑性，在  $\alpha_2$ +O+B2 三相区固溶的组织因 O 相的析出，降低了 B2 相的有序性，提升了 B2 相的塑性，使合金在室温时塑性更优；对于在  $\alpha_2$ +B2 两相区固溶的样品在 650℃拉伸时，因 B2 相发生分解，析出细小的 O 相板条，使强度大幅升高，塑性严重降低；在  $\alpha_2$ +O+B2 三相区固溶的样品，因固溶时 O 相的析出能够延缓在高温拉伸过程中 B2 相的分解，因此塑性在 650℃时未出现明显的降低。对样品进行相同时效处理后，发现室温和 650℃的屈服强度均随固溶温度的升高而增加，在该研究中发现 O 相与 B2 相的界面密度是影响 Ti<sub>2</sub>AlNb 基金属强度的主要因素。

关键词：Ti<sub>2</sub>AlNb，金属间化合物，固溶处理，组织与性能调控

#### C07-PO-08

##### 具有双峰晶粒组织的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金热变形行为研究

韩英，冉旭

长春工业大学

采用热压烧结制备了具有双峰晶粒尺寸分布特征的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金。通过热压缩实验，变形温度为 750-950℃，应变率为  $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ，工程应变量为 60%。研究了不同粗细晶比率的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的热变形行为。分析了粗细晶比率和变形温度对粉末冶金 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金组织演变和力学行为的影响。结果表明：在实验条件下粉末冶金 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金在热压缩变形过程中发生了明显的应变硬化和动态软化行为。其应力随细粉比例的提高呈现先升高后降低的趋势，随变形温度的升高而降低。当纳米晶比例约 40%时，粉末冶金 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的压缩性能较好，在 750℃时压缩强度可达到 728 MPa。

#### C07-PO-09

##### Cu+Ni 镀层碳纤维增强铜基复合材料的制备及其性能研究

邹豪豪

长春工业大学

金属铜由于具有良好的导电性、导热性、耐腐蚀等特点，在电气、轻工、机械制造、建筑业、国防工业等领域有着广阔的应用前景。由于纯铜的强度、硬度、摩擦磨损和抗高温抗蠕变等性能较差，工业上通常会使用碳纤维、碳纳米管和石墨烯等碳材料作为增强体来改善其综合性能。但是，铜与碳之间润湿性较差，在固态和液态条件下都不会发生相互扩散和化学反应，所以二者之间是以机械结合为主的物理结合，这种界面结合较弱，从而限制了其更广泛的应用。

采用化学镀工艺分别在碳纤维表面施加 Cu 层、Ni 层、Cu+Ni 镀层，对碳纤维及三种镀层碳纤维进行 850℃热处理，并通过 X 射线衍射对碳纤维及热处理后的 Cu 层、Ni 层、Cu+Ni 镀层碳纤维微观结构进行分析。使用真空热压烧结方法制备镀 Cu 碳纤维、镀 Ni 碳纤维和镀 Cu+Ni 碳纤维（体积分数为 5%、15%、25%）增强铜基复合材料。通过光学显微镜、扫描电子显微镜和能谱分析仪对复合材料组织形貌和元素分布进行观察，并对不同镀层碳纤维增强铜基复合材料的密度、显微硬度、导电性、压缩强度进行了对比分析。结果表明：经过 850℃高温处理，镀 Cu 层对碳纤维结构无影响，镀 Ni 层会造成碳纤维结构向石墨结构发生转变，在碳纤维表面镀 Cu+Ni 镀层可以有效的降低这种结构转变。Cu+Ni 镀层碳纤维增强的铜基复合材料较 Cu 镀层碳纤维及 Ni 镀层碳纤维增强的铜基复合材料具有更高的显微硬度和压缩性能，导电性略低于镀 Cu 碳纤维增强的铜基复合材料。

#### C07-PO-10

##### 中频磁场作用下黄铜凝固组织和性能研究

刘承斌, 接金川, 李廷举  
大连理工大学

黄铜合金是一种性能优良的金属, 它有着良好的导热性、导电性、延展性、加工性能和机械性能, 同时还具有一定的强度, 在热加工状态下具有良好的塑性。黄铜合金在生产生活中应用十分广泛, 被用于制造管材, 线材以及各种五金件。随着国家基础工业和市场经济的发展, 对性能优良的黄铜合金的需求持续增加, 对产品质量和使用性能的需求也在提高。通过细化金属晶粒可以显著提高金属的机械性能, 减少缺陷。本实验旨在探究中频磁场和旋转磁场对黄铜合金铸态组织和性能的影响。

在中频磁场实验中设置了四组试样进行对比, 中频磁场的输出功率分别为 0 kw、3 kw、4.5 kw、6kw; 在旋转磁场实验中同样设置了四组试样, 旋转磁场的输出电压分别为 0V、60V、80V、100V, 对铸锭试样分别后进行打磨、抛光、腐蚀。对试样对其宏观组织和微观组织进行拍照, 测定硬度。对铸锭组织和性能与磁场频率的关系进行了探究。

实验结果表明: 通过在凝固过程中施加磁场可以显著细化铸态黄铜合金组织, 减少缩孔、气孔等铸造缺陷。但随着磁场频率的持续增加, 铸态黄铜的晶粒大小并非是一直减小, 反而略有增加。在磁场频率小于 4.5 kw 时, 试样的硬度随着磁场频率的增加而增加, 当频率上升到 6kw 时, 硬度反而有所减小。因为随着磁场频率的提高, 涡流效应的增强, 会产生大量的热量, 反而促进了晶粒的长大, 这时磁场的细化晶粒的作用会被抵消一部分。因此, 中频磁场的频率不是越高, 磁场对铸态组织的改善作用就越好。凝固过程中施加同旋转磁场对凝固组织也有这很好的细化效果。本次实验主要探究磁场对于黄铜组织和性能的影响, 以及对对比了不同频率磁场的影响效果。

关键词: 黄铜合金, 晶粒细化, 中频磁场, 旋转磁场

## C07-PO-11

### Al-Sn-Bi 难混溶合金组织形成与制备技术研究

郑智琳, 接金川  
大连理工大学

冷却速率对 Al-Bi-Sn 难混溶合金中少数相的形态和分布有很大影响。为了研究在不同冷却速率条件下合金的凝固组织演变规律, 将  $Al_{70}Bi_{10}Sn_{20}$  难混溶合金分别浇铸到石墨坩埚, 铜模和水中。实验结果表明, 在上述三种凝固条件下, 少数相的微观结构和宏观分布情况有所不同。 $Al_{70}Bi_{10}Sn_{20}$  难混溶合金熔体浇铸于石墨坩埚中的试样显示出具有清晰边界的双层结构, 然而浇铸于铜模中的试样呈现多层结构。另外, 当合金熔体直接在水中淬火后, 试样中的少数相比较均匀地分布在基体中。合金凝固微观组织可以通过 Stokes 运动和 Marangoni 运动之间的相互作用来确定。相应的机制在本文中予以讨论。

关键词: 组织形成, 难混溶合金, 冷却速度

## C07-PO-12

### ABS 树脂的热氧老化研究

吴广峰, 王宇超  
长春工业大学

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物 (ABS 树脂) 在加工过程中, 树脂容易被热氧条件引发老化, 使制品颜色变差, 性能下降。抗氧剂往往能够在聚合物加工过程中提高 ABS 树脂的热氧稳定性。本文通过酯化反应合成制备出抗氧剂 GM, 与 ABS 树脂按比例混合, 分别添加 3phr 抗氧剂 GM、抗氧剂 618、抗氧剂 1076 和抗氧剂 3114, 制备一系列 ABS 抗氧型树脂, 采用红外光谱、差示扫描、热失重分析测试方法对及抗氧剂在 ABS 材料中的热氧老化性能影响进行了测试。

利用注塑环境测试 ABS 树脂样片在特定的测试条件下的色差变化, 研究抗氧剂对于 ABS 材料中的热氧老化性能的影响。结果表明, 添加有抗氧剂 GM 的 ABS 试样色差由 2.30 降至 1.01, 并且在 250-350℃ 的温度范围下, 抗氧剂 GM 由于具有高效捕捉自由基的丙烯酸酯基团, 并且能利用分子内氢键实现自由基的快速转移, 使得 ABS 树脂初始质量损失温度  $T_{1\%}$  由 273.9℃ 提高到 308.0℃。在 180-210℃ 的高温环境下, 抗氧剂 618 由于特有的亚磷酸酯结构可以将 ABS 的黄色指数由 21.72 降至 20.91, 并将冲击强度由 21.06 kJ/m<sup>2</sup> 提高到 23.46 kJ/m<sup>2</sup>。

测试添加不同抗氧剂 ABS 树脂样品在长周期高温环境下性能变化。实验结果表明, 经过 8 个周期热氧老化过程, 添加 GM 的 ABS 试样羰基指数由 2.50 降低到 0.68, 色差由 9.00 降到 7.60, 均为各式样最佳, 说明抗氧剂 GM 在提高树脂耐热氧老化性能, 降低材料老化引发的颜色变化方面表现优异。添加了抗氧剂 618 的 ABS 试样在经过 8 个老化循环后黄色指数由 41.13 降低到 39.15, 而添加抗氧剂 3114 的试样拉伸强度从 46.40 MPa 提高到了 48.90 MPa, 熔融指数由 20.08 g·(10min)<sup>-1</sup>

提高到  $22.96 \text{ g} \cdot (10\text{min})^{-1}$ 。

测试添加不同抗氧剂的 ABS 粒料在反复挤出过程后的树脂性能变化。经过 5 次重复挤出作用后,添加抗氧剂 GM 的 ABS 试样初始分解温度  $T_{10\%}$  由  $381.3 \text{ }^\circ\text{C}$  提高到  $411.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 黄色指数从 35.23 降低到 32.16, 表现出优异的对 ABS 优异的热氧稳定性和色度保持性; 添加抗氧剂 618 的试样将氧化诱导温度由  $192.9 \text{ }^\circ\text{C}$  提高到了  $217.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 添加抗氧剂 3114 的 ABS 试样的熔融指数由  $21.76 \text{ g} \cdot (10\text{min})^{-1}$  提高到  $21.95 \text{ g} \cdot (10\text{min})^{-1}$ 。

关键词: ABS, 阻燃, 老化