

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

E01-材料先进制备加工技术
E01-Advanced Processing
Technology of Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

E01-材料先进制备加工技术

学术顾问：谢建新

分会主席：刘雪峰、刘永长、刘峰、袁国、管仁国

E01-01

金属结构材料设计中的热-动力学思考

刘峰¹

1. 西北工业大学

本工作面向国家重大需求，聚焦基础理论前沿，提出材料设计的热-动力学研究框架，集成热动力学相关性、广义稳定性、热-动力学配分理论。利用热动力学相关性规律描述过程，利用广义稳定性概念设计性能，利用热动力学配分参量解释机理。这些为定量描述成分工艺组织性能间理论关键奠定了坚实的基础。

E01-02

铸轧短流程技术自主创新与应用进展

袁国¹

1. 东北大学

高质化、绿色化已成为钢铁行业发展的必然趋势。在轧钢领域，钢铁材料生产过程中组织性能的高效精准调控、形状尺寸的高精度控制，以及面向环境友好、节能减排的铸-轧一体化特殊钢短流程轧制技术，对于支撑实现产业的高质量转型发展具有重要意义。铸-轧界面高效高质化技术、轧制过程高效均质化技术、铸轧短流程高质化以及轧制加工数字化技术等，是轧制领域重要的发展方向。

E01-03

金属层状复合材料固—固复合新技术与应用

刘雪峰¹

1. 北京科技大学

金属层状复合材料是由两种或以上金属材料以层状方式组合而成的新金属材料，其各层金属材料仍保持原有特性，但由于协同作用的结果，其物理、化学或力学性能通常均优于单一金属材料。固-固复合是实现金属材料之间层状结合的典型方式，是制备金属层状复合材料的一类常用技术。金属层状复合材料传统的固-固复合技术主要包括爆炸复合法、轧制复合法和拉拔复合法等，具有各自的优势，在金属层状复合材料的制备中发挥了重要作用；但也存在各自的不足，因此研究人员一直在努力开发金属层状复合材料的固-固复合新技术。作者等人经过多年的基础理论研究，突破了多项关键技术，创新性地开发了冷-热塑性成形固-固复合新技术，成功地用于高性能金属层状复合材料的制备，并部分转让企业实施产业化，为金属层

状复合材料的研制开发和推广应用提供了新思路和新技术，具有重要的理论意义和应用价值。

E01-04

Al-Si-Fe-Mg-Cu 合金挤压铸造件的成分优化与组织性能调控

管仁国¹

1. 大连交通大学

针对大型复杂铝合金部件形性难兼顾的制造瓶颈，本研究通过 Sr、Mn 合金化对合金中粗大第二相相形貌进行调控，优化其添加量并阐明其变质/改性机理。采用挤压铸造+局部锻造技术有效消除了部件大壁厚位置的凝固缺陷，分析了缺陷消除机制。基于优化的整体加载比压，获得了细小的晶粒组织，并通过热处理进一步提高部件的力学性能，揭示了热处理过程中组织与性能演变规律。通过上述工作，制备出轮廓尺寸 651×543×134 mm，抗拉强度 318 MPa，屈服强度 262 MPa，伸长率 6.4% 的大型复杂铝合金部件，力学性能优于同类合金。此外，研究团队在高强高导铝合金及短流程加工技术方面取得了大量基础与应用成果。采用机器学习方法研制了新型高强高导铝合金；开展了在 5G 站滤波器箱体上的生产试制，产品加工难度与性能处于领先水平；开辟了铝合金晶粒细化剂连续流变挤压新方法，与中信戴卡等 10 余家企业进行了产业化推广合作。

E01-05

论文题目

王学文¹，张清杰¹

1. 武汉理工大学，材料科学与工程国际化示范学院

以飞秒激光为代表的超快激光具有超短脉冲、超强功率及超精确聚焦能力等普通激光不具备的优势，在与材料作用时，通过瞬时的强光场激发，可将材料激发至远离平衡状态，从而引发很多新的机理与新效应。利用这些新机制与新效应，在材料的合成、改性及加工过程中具有比传统材料制备方法无法比拟的优势，如可驱动某些在常温常压条件无法进行的化学反应或无法合成的材料，或可替代通常需要长时间高温退火才能完成的晶化过程，以及可定点定域的实现材料的合成与生长，以及通过数字化可编程实现材料的可控生长与诱导相变等。这些独特的优势，将成为材料制备技术领域非常重要与前沿的手段，本报告将向各位专家和同行介绍团队近期在先进材料飞秒激光制备方面的一些工作进展，尤其是在新能源材料领域的应用。

E01-06

镍基高温合金中有序相转变及其力学性能研究

马庆爽¹，孙林林^{1,2}，刘恩宇^{1,2}，高秋志^{1,2}

1. 东北大学秦皇岛分校

2. 东北大学

镍基高温合金具有优异的高温强度、良好的抗蠕变和疲劳性能，以及在高温条件下的抗氧化能力，目前，镍基高温合金在涡轮盘材料中处于主导地位。本工作主要对两种镍基高温合金进行研究，通过对其进行不同的热处理，研究其热处理过程中的有序相变及其对合金性能的影响。（1）以锻造态的 Inconel 718 合金棒材为研究对象，研究了不同两步固溶处理对 Inconel 718 合金组织、 δ 相析出及性能的影响，阐述了 γ'' 亚稳相向 δ 相的转变机理。研究发现两步固溶处理可以有效地抑制长期时效过程中 δ 相析出，通过维氏硬度与拉伸试验研究了长期时效后合金组织演化对性能的影响。（2）研究了一种新型镍基粉末高温合金在长期时效中的相变行为，及不同尺寸、形貌及分布的 γ' 相对合金的力学性能、高温蠕变行为的影响。研究表明二次 γ' 相在时效后期 300~600 h 时粗化，呈立方状，且二次 γ' 相间有细小的球状三次 γ' 相的析出， γ' 相的粒径分布呈多模分布，有利于提高合金的室温及高温力学性能。进一步利用相图计算及机器学习相结合的方法对镍基高温合金进行了多尺度设计及成分优化。

E01-7

超高强度 Cu-Ni-Sn 合金的热稳定性及其退火行为

降昊雯¹，彭丽军¹

1. 北京有色金属研究总院

Cu-Ni-Sn 合金在时效过程中可产生多种析出相。峰时效状态下，合金以 DO22 有序相为强化相，过时效状态下，析出相则完全转变为不连续析出相（DP）。本研究对两种时效状态的合金进行大塑性变形，得到峰时效强化（S1）和过时效强化（S2）两种 Cu-9Ni-6Sn 合金线材。S1 具有更高的强度，可达 1385 MPa，导电率为 11.3 %IACS。S2 则拥有更高的导电率，约 25.0 %IACS，同时强度可达 1178 MPa。位错密度的下降以及 γ 析出相的长大造成了两种线材的退火软化。与 S1 相比，S2 线材中的纳米纤维状 DP 强化相，可延缓析出相的球化以及晶粒的再结晶，阻碍软化的发生，表现出优于 S1 的抗软化性。

E01-08

高铝钛含量镍基高温合金的激光增材制备

郭乾应¹，聂振华¹，柴俊¹，陈子韬¹，刘永长¹

1. 天津大学

2. 清华大学

3. 中国科学院物理研究所

镍基高温合金具有优异的高温稳定性、热强性以及良好的抗氧化性等特点，是航空发动机中最为关键的结构材料。相比于传统制备方法所需的复杂工艺与长周期，近年来迅速发展的非平衡态冶金工艺-增材制造可以实现镍基高温合金高精度复杂结构零件与构件的整体快速成型，现已成为航空发动机制造中应用前景最为广阔的工艺。高铝钛含量镍基高温合金中的 γ' 强化相的析出速度决定了合金的可焊接性与增材适用

性,大量研究表明缓慢析出的强化相可有效抑制焊接与增材过程固态裂纹的产生。通过对激光选区熔化镍基高温合金 GH4099 合金 γ' 强化相缓慢析出过程元素波动与结构形成过程的纳米尺度分析表征,总结出强化相在该类合金中的析出过程及背后机制,为后续难焊接高温合金成分设计及新合金体系的研发提供理论基础。

E01-09

周期性表面纳米化预处理提升 Ti/Al 层状复合材料界面结合性能的机理

张伟亮¹

1. 北京科技大学

Ti/Al 层状复合材料具有轻质、高强度、优异耐腐蚀性和耐高温等性能,但其界面结合强度相对较低,制约了其在航空航天、轨道交通、海洋工程等领域的应用。本文提出一种基于表面纳米化预处理的 Ti/Al 层状复合材料轧制成形新技术,即通过将超声滚压表面纳米化预处理与轧制复合相结合,提高 Ti/Al 层状复合材料的界面结合性能,实现高性能 Ti/Al 层状复合材料的短流程制备。结果表明,相比于传统表面预处理,超声滚压表面纳米化预处理能够提高 Ti/Al 层状复合材料的界面结合性能,大大降低 Ti/Al 复合所需的临界轧制压下率。进一步分析发现,超声滚压表面预处理在 Ti 表面产生周期性纹理以及硬脆的纳米晶硬化层,有效地促进 Ti 硬化层的开裂,增加轧制复合过程中 Ti、Al 新鲜金属的接触面积。同时,超声滚压表面预处理在 Ti 的表层形成梯度分布的纳米晶和高密度缺陷,促进了剧烈塑性变形条件下 Ti 和 Al 原子的迁移、交换和重排,最终在 Ti/Al 界面过渡层形成非晶态结构。本研究为高性能 Ti/Al 层状复合材料的制备提供了新方法,对推动其在航空航天等高端制造领域的应用具有重要意义。

E01-10

基于 XCT 技术构建铝合金缺陷与力学性能构效关系

苗以升¹, 侯清怀¹, 吴雪龙³, 李钟尧³, 王诗豪³, 陈远路³, 郎玉玲², 孔德才², 乔海波², 马小英²,
王俊升^{1,4}

1. 北京理工大学材料学院

2. 中信戴卡股份有限公司

3. 北京理工大学机械与车辆学院

4. 北京理工大学前沿交叉科学研究院

铸造铝合金由于轻质、低成本等优点,在汽车领域得到广泛应用。然而,铸造过程中不可避免的缩孔、气孔等铸造缺陷,严重影响铸件的性能。因此,定量提取铸件内部缺陷的分布,对预测铸件力学性能尤为重要。本研究采用 X 射线计算机断层扫描技术(XCT),量化表征了铸件内部微孔尺寸分布,定量地统计了孔洞当量直径、孔洞最大长度、孔隙率以及孔洞数量密度。通过力学拉伸和疲劳试验,建立了缺陷与抗拉强度、延伸率以及疲劳寿命的数据库。采用机器学习算法,多元回归分析,揭示了缺陷与力学性能之间的相关性,发现孔洞数量密度与抗拉强度、延伸率存在显著相关性,而孔洞最大长度与疲劳寿命呈现强相关

性。同时，构建了孔洞参数与抗拉强度、延伸率、疲劳寿命本构模型，应用于 Abaqus 有限元仿真模型，从而加速工艺优化、铸件整体性能提升。

E01-11

基于毛细现象的甲酸气氛下焊料/泡沫铜复合焊点制备

何思亮¹，熊苾富¹

1. 桂林电子科技大学

有效去除钎焊金属氧化物是实现钎焊界面紧密接触，确保界面良好润湿、扩散生成金属间化合物(IMCs)的前提，调控钎焊界面生成 IMCs 的分布是提升焊点性能的有效手段。在本研究中，采用了具有三维扩散体系的多孔结构微米泡沫铜(Micro-P-Cu)对 Sn-58Bi 焊点进行调控，利用甲酸气氛(FA)原位还原保护钎焊。Micro-P-Cu 的三维多孔结构可以构建多维扩散体系，其高表面积有助于焊料的有效扩散，快速形成分布较均匀的 IMCs。我们研究了不同的键合温度、时间、压力以及 Pt 催化剂的存在对 TLPB 的 Cu/SB/P-Cu/SB/Cu 复合结构焊点键合强度的影响。研究表明，随着键合温度的降低与键合时间减少，焊点的剪切强度逐渐降低。施加适当的压力可以减少孔隙，提高焊点强度。在甲酸气氛中，Pt 催化剂的使用可实现快速还原金属氧化物，并提升还原效果，提高键合效率和焊点强度。

E01-12

烧结双相不锈钢的超塑性变形行为

李晶琨¹，盛文晴¹，付彬国¹，董天顺¹，李国禄¹

1. 河北工业大学

利用放电等离子烧结(SPS)成形双相不锈钢块体，研究烧结工艺和 SiC 颗粒对烧结双相不锈钢组织和性能的影响；对烧结双相不锈钢进行高温压缩试验，研究其超变形行为。结果表明，添加纳米 SiC 和微米 SiC 的烧结试样基体组织中存在大比例的细小等轴晶，满足实现超塑性变形的组织条件。添加纳米 SiC 和微米 SiC 的烧结试样在压入率达到 80%时仍可均匀变形，具有超塑性变形能力。在相同应变速率下，添加纳米 SiC 的烧结试样在 850、900、950 °C 时对应的峰值应力均低于添加微米 SiC 的烧结试样，且在 850 °C 时二者相差最大，分别为 80 MPa 和 105 MPa。SiC 颗粒的加入可以有效抑制相界面处有害析出相的析出，促进超塑性变形过程的持续进行。

E01-13

基于液-固复合的金属层状复合材料制备及组织性能调控

杨耀华¹

1. 北京科技大学

金属层状复合材料兼具多种组元金属的优异特征，在满足金属材料结构功能需求的同时可实现轻量化、

低成本和高强韧等特点，成为金属复合材料的重要发展方向。然而，传统固-固复合制备方法由于组元变形不协调、扩散驱动力不足等易导致板形不良、界面结合差等问题。液-固复合方法利用高温液态金属与固态基板的润湿、熔合、扩散等方式实现冶金结合，具有界面结合强度高、板形良好且成本低、效率高等优势。基于液-固复合原理，本研究利用自主开发的金属层状复合材料双向凝固液-固复合水平连铸技术开展了易互溶不锈钢/碳钢层状复合材料和难互溶铜/钢层状复合材料的制备及组织性能调控的研究。液-固复合过程中，复合界面处的剧烈传热会使固态基板表面氧化层开裂并脱离进入液态金属，随后液态金属与固态基板新鲜表面接触润湿发生高温下的原子扩散，最终实现界面的强冶金结合。针对液态金属凝固层及固态基板近界面组织粗大降低复合板性能的问题，进一步对液-固复合材料进行后续热加工处理，实现了凝固层及固态基板近界面组织的调控，显著提升了液-固复合材料的综合性能。本研究为利用液-固复合方法和后续热加工处理制备高性能金属层状复合材料提供了理论依据和实验指导。

E01-14

基于 CTGAN 数据增强与改进随机森林算法的高强度高导铝合金成分设计

王长峰¹

1. 大连交通大学

采用随机森林算法对现有高强度高导铝合金成分和工艺数据集进行校验，剔除异常数据。然后，利用条件表格对抗神经网络（CTGAN）对校验后的数据集进行增广，解决成分工艺数据集样本量不足的问题。基于增广后的数据集，应用多目标优化算法，优化流变挤压和热处理工艺条件下的高强度高导铝合金成分。研究表明，采用数据校验和增广算法可以使测试集的预测结果提升 10% 以上，并通过实验验证了该算法的有效性。通过 SHAP 值分析，发现对现有数据集中的合金强度和导电性影响较大的元素是 Si、Mg、Cu 和 Fe。

E01-15

反重力铸造非线性加压工艺设计

邱子傲¹，孙剑飞¹，曹福洋¹，赵信毅²，宋和谦³，张朝君¹

1. 哈尔滨工业大学

2. 江苏大学

3. 中北大学

反重力铸造工艺下，为了保证铸件充型的完整性并提高铸件的冶金质量，需要在避免气体卷入的同时缩短充型时间。针对这一矛盾，本研究中提出了一种新型非线性加压工艺方法。通过系统分析充型入口速度和临界稳定高度之间的关系，建立了非线性加压速度与充型高度之间的经验表达式。根据经验公式，可按照铸件结构和初始加压速度设计非线性加压曲线。并通过数值模拟和水模拟验证了上述非线性加压曲线的设计方法。结果表明，非线性加压工艺可以缩短充型时间，同时避免的气体卷入，为反重力铸造提供了新的工艺设计方法。

E01-16

Ni-Si 析出强化锡磷青铜开发及组织性能研究

李国梁¹, 接金川², 李廷举³

1. 大连理工大学

锡磷青铜是一种常用的弹性铜合金材料, 在接插件、连接器等领域应用广泛。随着 5G 通信技术和新能源汽车等行业的发展, 接插件材料的性能要求逐步提高。然而锡磷青铜通常不能热处理强化。为提高锡磷青铜的性能, 本工作基于相图计算、计划通过添加合金元素在基体中形成纳米析出相, 进而提高锡磷青铜的综合性能。通过初步分析确定了 Ni、Si 作为合金元素, 在此基础上制备了 Cu-8Sn-0.1P、Cu-8Sn-0.1P-0.5Ni-0.12Si、Cu-8Sn-0.1P-1Ni-0.24Si 和 Cu-8Sn-0.1P-2Ni-0.48Si 四种合金。实验结果表明, 添加 Ni 和 Si 后, 基体中形成了 $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ 、 Ni_2Si 和 Ni_5P_4 相。同时, 添加 Ni、Si 的锡磷青铜铸态微观结构中 $\alpha\text{-Cu}$ 和 $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ 的共析组织尺寸减小, 二次枝晶臂间距减小, 偏析也有所改善。经过时效处理后, Ni-Si 锡磷青铜中析出了纳米级胞状 Ni_2Si 相和少量 Ni_5P_4 相。随着纳米析出相的形成, Ni-Si 锡磷青铜在时效处理后表现出优异的析出强化效果, 并且 Cu-8Sn-0.1P-0.5Ni-0.12Si 和 Cu-8Sn-0.1P-1Ni-0.24Si 合金的电导率较 Cu-8Sn-0.1P 合金有所提升。该研究为强化锡磷青铜提供了一种新的解决方案, 有望使锡磷青铜满足更高的性能要求和更广泛的应用前景。

E01-17

增材制造马氏体时效钢的析出行为与强化机制

刘庆冬¹, 张孟超², 刘明洋¹, 刘晓晖¹, 李慧², 王泽民³, 赵波⁴, 顾剑锋¹

1. 上海交通大学

2. 上海大学

3. 上海应用技术大学

4. 上海毅速激光科技有限公司

为了提升中国增材制造模具的品质和国际竞争力, 加速世界向增材制造的转变, 从汽车一体化压铸技术对可替换增材制造镶块材料的需求出发, 在 18Ni300 马氏体时效钢的基础上, 通过降低 Ni 含量、调整 Co 成分、保持 Al 含量并添加适量 Cu 的成分设计策略, 开发了一种易于增材制造新型合金钢。利用扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM) 和原子探针层析技术 (APT) 等微纳结构表征手段, 研究了打印态马氏体时效钢在回火过程中第二相的析出过程和强化机制。结果表明: 不同温度回火时, 马氏体时效钢表现出明显的析出强化效应, 在 560 °C 时达到硬度峰值 (~54 HRC), 460 °C 和 600 °C 时的硬度均为 ~50 HRC, 二者抗拉强度相近, 但后者屈服强度较低, 同时延伸率、断面收缩率和室温冲击韧性均大幅度提高, 断口表现出明显的塑性断裂。低温 (460 °C) 回火时, 出现明显的 Ni、Cu 等元素的团簇, 为富 Cu 的 $\beta\text{-NiAl}$ 相形核早期的存在形式, 同时还因调幅分解而出现 Cr 的成分起伏, 并出现纳米薄膜状的奥氏体 (γ) 相; 高温 (600 °C) 回火时, 形成纳米 $\beta\text{-NiAl}$ 相和细小的富 Mo、W、Cr 的 Laves 相, 且二者与 $\alpha\text{-Fe}$ 基体分别存在 $[011]_{\beta}/[011]_{\alpha}$ 和 $[Laves]/[011]_{\alpha}$ 的位向关系, 同时形成有利于塑韧性改善的 $\alpha+\gamma$ 的双相组织。低温 (460 °C)

回火时形成的富 Ni 团簇和富 Cr 团簇，可能是高温（600 °C）回火时 β -NiAl 相和 Laves 相的前驱体，两种形态均是析出强化的主要贡献者。

E01-18

强剪切挤出工艺调控合金组织结构和性能

宋淼¹，时誉航¹，杨婉仪¹，陈家轩¹，李丹¹，周科朝¹

1. 中南大学

采用严重塑性变形工艺调控合金的组织结构、优化材料的综合性能已得到广泛关注，但仍有诸多问题有待深入研究，如：严重塑性变形制备的微纳米晶界、相界、缺陷等材料性能的影响，难互溶元素的机械混合机理，变形工艺对材料成型性的影响及调控机制以及微纳米材料严重塑性变形模型和理论的构建等。基于上述研究现状，本报告的主要内容如下：1) 通过优化强剪切挤出工艺，制备了 Al-Ti、铸态 7075 铝合金、Cu/石墨烯等多种合金材料，探讨了 Al-Ti 变形组织的界面结构及其热稳定性，分析了 7075 铝合金在强剪切大变形过程的微观组织演化规律及调控机理，阐明了 Cu/石墨烯复合材料优良电性能的影响因素；2) 采用先进的电子显微学术，研究了 Cu-Nb、Cu-Cr 两种二元合金在严重塑性变形过程中的微纳结构演化规律，提出了 Cu-Nb 纳米片层结构的晶内/晶界塑性测量方法，揭示了难互溶 Cu-Cr 二元合金的机械混合机理。

E01-19

Hastelloy C-276 板材热轧微观组织与再结晶演变机制研究

张晓宇¹，钟军¹

1. 北华航天工业学院

Hastelloy C-276 合金板材经 900 °C 不同变形量热轧处理后，采用 EBSD 技术分析了合金晶粒微观组织、晶界面分布演变规律，阐明了晶粒再结晶形成机制。结果表明，变形位错组织从晶界到晶内呈梯度分布，并随着变形量的增加，位错密度增加，并形成了高密度位错滑移带。再结晶机制从晶界弓出形核不连续再结晶转变为小角度晶界转变为大角度晶界的连续形核机制。大变形条件下，晶界和晶内再结晶形核机制主要是小角度晶界连续再结晶。从晶粒反极图中可以看出，随着变形量增加，晶粒从 $\langle 001 \rangle // N$ 转动为 $\langle 110 \rangle // N$ 。小变形时孪晶晶界辅助再结晶形核，当变形量较大时，位错组织导致孪晶 $\Sigma 3$ 晶界出现扭转，失去了晶界特征。 $\Sigma 9$ 晶界面偏差在小变形条件下，由于 $\Sigma 3$ - $\Sigma 3$ - $\Sigma 9$ 三叉晶界几何约束，使得 $\Sigma 9$ 晶界面偏差与 $\Sigma 3$ 晶界面偏差一致；但随着变形量的增加， $\Sigma 9$ 晶界面偏差主要由变形位错来主导。研究结果将进一步阐明热轧过程中再结晶机制和位错组织与特殊晶界相互作用机制。

E01-20

基于脉冲电磁力驱动的薄板铝合金孔件疲劳性能强化研究

徐肖飞¹，李亮²，欧阳晓平³

1. 湖北汽车工业学院
2. 国家脉冲强磁场科学中心
3. 湘潭大学

应力集中问题使带孔零部件易在循环载荷下发生疲劳失效,在孔口附近产生残余压应力场是提升孔件疲劳寿命的有效手段。开缝衬套挤压法等传统方法存在巨大轴向力导致孔口翘曲、残余压应力沿厚度分布不均匀以及容易对孔壁造成接触损伤等问题,使广泛应用于飞机蒙皮等部位的薄板孔件强化成为了一项挑战。本研究采用脉冲电磁力加载的方式驱动 1.5 mm 厚 2A12-T4 铝合金孔件发生弹/塑性变形并提升其疲劳寿命。研究表明,当 $S_{\max}=120$ MPa 时($R=0.1$),孔件经电磁强化后疲劳寿命可提升约 6 倍,数值计算表明电磁强化后孔件内残余压应力沿厚度方向分布均匀,使得疲劳测试中裂纹源不会在孔壁上聚集。

E01-21

高 Mg 含量 Al-Mg 合金连续流变成形及组织性能调控

高民强¹

1. 大连交通大学

高 Mg 含量 Al-Mg(-Mn-Fe)合金中常含有粗大枝晶与第二相,导致其脆性大,深加工困难,因此提出采用连续流变挤压技术解决上述问题。利用连续流变挤压成形过程中摩擦剪切与冷却的耦合作用,改善熔体形核与长大行为,并使组织发生剪切破碎与再结晶细化,促进合金内形成细小等轴晶和纳米尺寸第二相。进一步对合金进行累积连续流变挤压与拉拔变形,系统研究了合金在变形过程中的组织演化行为及其对合金力学性能的影响,揭示了变形工艺与合金组织性能的内禀关系。本研究为高 Mg 含量 Al-Mg 合金中粗大枝晶和第二相的调控提供了新途径,充分发挥了纳米尺寸第二相的强化作用,制备出了综合性能优良的 Al-Mg(-Mn-Fe)合金。

E01-22

面向非晶合金反重力铸造的 ISM 熔炼技术

张朝君¹, 张伦勇¹, 曹福洋¹, 靳志帅¹, 沈红先¹, 孙剑飞¹

1. 哈尔滨工业大学

感应凝壳熔炼技术在制备大尺寸、高质量复杂块体非晶合金的反重力铸造成形过程中发挥关键作用。然而,在熔炼过程中,非晶母合金的熔化过程、坩埚和电感器结构对物料能量利用率的影响以及熔体过热影响机制亟待了解。基于此,建立了包含熔化过程的全物理场耦合仿真模型,以系统阐释熔体内多物理场分布规律,包括电磁场、热场、相场及流场。同时,深入研究了坩埚和电感器结构对熔体能量利用率的影响,并通过调整结构,将物料能量利用率由 27.1%提升至 45.9%。此外,也详细阐述了感应凝壳熔炼技术熔体过热影响机制,并提出了相应的提高熔体过热策略。基于所研究内容,成功将该技术应用于反重力铸造中,并制备了直径 70 mm 和直径 130 mm 的非晶合金反射镜构件。

E01-23

连续固-液复合制备锡青铜/1010 钢双金属复层材料及其力学性能研究

彭博¹, 接金川¹, 王明飞¹, 董博闻², 王贤龙³, 李廷举¹

1. 大连理工大学
2. 湖北理工学院
3. 临沂大学

通过连续固液复合法制备了锡青铜/1010 钢双金属复层材料。使用光学显微镜、电子探针显微分析及电子背散射衍射表征了制备的双金属复层材料的微观组织及其铜/铁元素间的相互扩散。使用单向拉伸试验和弯曲试验研究了复层材料的力学性能。此外, 为了研究复层材料的变形行为, 使用轧制试验研究了其包覆率和力学性能。结果表明, 锡青铜/1010 钢复层材料具有良好的冶金结合界面, 并且形成了较为均匀的微观组织。复层材料的抗拉强度 (512.3 MPa) 介于锡青铜 (376.2 MPa) 和 1010 钢 (536.3 MPa) 之间, 但在异质界面协同强化的作用下, 其比按混合准则计算的值高约 56 MPa。根据锡青铜和 1010 钢的应变硬化指数和加工硬化系数及长波长准则计算了复层材料的塑性失稳应变, 由于界面传递的切应力影响, 计算值略低于实际值。弯曲试验的结果表明, 裂纹扩展位于锡青铜侧, 并且界面始终紧密结合, 界面强度大于锡青铜。

E01-24

基于力-热-电协同作用对 Cu-15Sn-0.3Ti 合金组织和力学性能调控的研究

王宇轩¹, 邹军涛¹

1. 西安理工大学

Cu-15Sn-0.3Ti 合金与 Nb 的力学性能匹配是 Nb₃Sn 超导线形成的关键。然而, 用均匀退火(HA)处理的 Cu-15Sn-0.3Ti 合金仍然不能满足与 Nb 协同变形的要求。在这项工作中, 提出了一种力-热-电协同处理技术。实验结果表明, 旋转型锻 (RS) 和电脉冲处理 (EPT) 相结合的方法可以诱导变形组织的再结晶, 成功地制备了具有退火孪晶 (AT) 的等轴晶粒, 使 HA 态样品的平均晶粒尺寸从 $\geq 500\mu\text{m}$ 细化到 $9.3\mu\text{m}$, 极限抗拉强度(UTS)和屈服强度(YS)分别提高 34%和 28%。值得注意的是, 这一过程仅用了 90s 就完成了。本工作阐明了 Cu-15Sn-0.3Ti 合金力学性能的变化与 EPT 过程中微观组织演变之间的关系。揭示了层错(SF)在 AT 形成和再结晶中的作用。通过计算比较了 EPT 和退火处理的再结晶效率。

E01-25

不同铸造工艺对 A380 压铸铝合金显微组织, 力学性能和热学性能的影响

张露^{1,2}, 廖恒成¹, 李江², 唐良朝²

1. 东南大学

2. 南京泉峰汽车精密技术股份有限公司

本文采用 A380 压铸铝合金,研究了普通高压压铸 (HPDC) 和超低速压铸 (SSS HPDC) 工艺技术下合金的组织特征、力学性能和热膨胀性能。通过数值模拟的冷却曲线预测,在 700 °C 的浇注温度下,铝液充型结束时,SSS HPDC 的铸件心部已经出现一定数量的富 Fe 相等。而普通 HPDC 起始凝固时铸件心部仍为液相。普通 HPDC 和 SSS HPDC 显微组织主要为玫瑰花瓣 α -Al 相,纤维状共晶硅 Si 和金属间化合物,只是 SSS HPDC 工艺下铸件富 Fe 相过早析出导致组织更粗大。室温下普通 HPDC 样品的极限拉伸强度和延伸率相对于 SSS HPDC 样品分别增加了 30.9% 和 162.5%。180 °C 环境下高温拉伸,两种状态下抗拉强度都有所下降,但普通 HPDC 样品的延伸率提高到 8.2%,与此对比下,SSS HPDC 样品的延伸率仅维持在 1.8%。此外,比较了两者的 30~300 °C 范围内热膨胀性能,发现 SSS HPDC 铸件的平均热膨胀系数明显低于 HPDC 铸件,且在 30~240 °C 范围内热膨胀系数差值最大为 1.43×10^{-6} 。可以预测,提高浇注温度减少 SSS HPDC 工艺下富 Fe 相的过早析出,有利于提高 SSS HPDC 工艺技术下合金力学性能,扩展 SSS HPDC 工艺的应用范围。

E01-26

B10-xAl 合金微观组织调控及耐海水腐蚀性能研究

袁怡¹

1. 有研工程技术研究院有限公司

铜镍合金具有良好的耐腐蚀性能,被广泛应用于海洋工程中。关于铜镍合金耐腐蚀性能的研究大多都是在静态浸泡条件下进行的,然而在实际的海洋服役环境中,铜镍合金最主要的腐蚀形式是力学冲击和介质腐蚀共同作用的动态过程。Al 能够提高铜镍合金的耐腐蚀性能,但其具体机理及规律还有待深入探究。采用电化学和人工海水腐蚀试验研究了 Al 对 Cu-10Ni-1.8Fe-0.8Mn 合金腐蚀性的影响,对腐蚀产物膜进行了详细的表征分析。结果表明,Al 提高了合金表面钝化膜的阻抗,降低了腐蚀电流密度,减少了膜中的阳离子空位,显著改善了耐冲刷腐蚀性能。Cu-10Ni-1.8Fe-0.8Mn-3Al 合金的腐蚀产物膜由外部松散的 CuO 膜、中间致密的含有 Al₂O₃ 的 Cu₂O 膜和内部含有 Ni²⁺ 的 Cu₂O 膜组成,有效抑制了人工海水对合金基体的进一步腐蚀。

E01-27

Microstructure Evolution Simulation of Al-Cu-Mg-Ag alloy in Solidification Process Based on Phase Field Method

Shiqing Zhu¹, Hong Zhang¹, Xianyi Kuang¹, Linghao Chen¹

1. University of Science and Technology Beijing

Al-Cu-Mg-Ag alloys are widely used in aerospace field due to their excellent heat resistance, high specific strength and good machinability. In order to obtain excellent performance, the control of its solidification structure

is very important, so it is necessary to numerically simulate its solidification structure and then control its structure. In this paper, the solidification phase field model was established by phase field method to study the microstructure evolution during solidification. The solidification process of Al-Cu-Mg-Ag-Si alloy is simulated and verified by experiments. The results show that the grains grow in cell shape and the second phase forms at the grain boundary of α phase. The faster the cooling rate, the smaller the grain size and the lower the content of the second phase. The samples were observed by metallography and scanning electron microscopy, and the phase composition of the as-cast samples was characterized by EDS and XRD. It is verified that the second phase in simulation and experiment is mainly θ phase, and the grain morphology accords with the simulation results.

E01-28

高阻尼锰铜合金组织性能及弛豫机理研究

董俐言¹, 王强松¹

1. 北京有色金属研究总院

随着高阻尼锰铜合金在工业中的广泛应用,除了阻尼性能,对其力学性能提出了更高的要求。研究了热处理工艺对 Mn-Cu 合金的微观结构、阻尼性能和力学性能的影响。经过时效处理后, Mn-Cu 合金发生了调幅分解和马氏体相变,产生了富锰区和晶格畸变,阻止了位错运动,改善了力学性能。同时,马氏体相变促进了高密度孪晶的形成,提高了阻尼能力。最后,制备的合金屈服强度、抗拉强度和 SDC 分别为 336MPa、620MPa 和 44%,满足实际应用的综合性能要求。

E01-29

异种钛铝系金属间化合物扩散连接接头强化方法及机理研究

朱雷¹, 唐斌², 李金山², 邹军涛¹, 梁淑华¹

1. 西安理工大学

2. 西北工业大学

脆性金属间化合物和残余应力易在异种材料连接界面处形成,不利于扩散连接接头力学性能的提升。本研究首次通过焊后高温小变形(施加力方向与连接界面平行)消除了界面脆性金属间化合物并促进析出相生成,大幅度提升了 TiAl/Ti₂AlNb 扩散连接接头抗拉强度。研究表明,焊后短时热处理和焊后高温小变形均可以消除 TiAl/Ti₂AlNb 扩散连接界面处 AlNb₂ 脆性金属间化合物。同时,当扩散连接接头经过高温小热变形后,界面反应层从 $O + (AlNb_2 + \alpha_2) + (\alpha_2 + \beta/B_2 + \gamma)$ 三层反应层逐渐转变为 $(\alpha_2 + \beta/B_2 + O + Ti_3NbAl_2) + (\alpha_2 + \beta/B_2 + \gamma)$ 两层反应层。其中, Ti_3NbAl_2 相是首次在 TiAl/Ti₂AlNb 扩散连接接头中发现,其可以阻碍位错运动,造成位错塞积,提升连接接头性能。对不同工艺下的连接接头进行室温拉伸,结果发现,连接接头经过高温小变形后,抗拉强度提升了 272.54 MPa,相对 TiAl 合金基体的抗拉强度提升了 39.2%,可达 597.89 MPa,达到了 TiAl 合金母材的 85.99%。这项工作可为航空发动机双合金整体叶盘焊接界面强化技术的发展提供重要技术支撑,促进轻质 TiAl 脆性金属间化合物材料的进一步应用。

E01-30**铜铝复合板带箔材连铸-轧制短流程工艺及形性控制技术研究**王珺¹, 赵帆^{2,3}, 刘新华^{2,3}

1. 金属凝固控制技术实验室, 材料科学与工程学院, 辽宁工业大学, 锦州, 121000, 中国
2. 材料先进制备技术教育部重点实验室, 新材料技术研究院, 北京科技大学, 北京 100083, 中国
3. 现代交通金属材料与加工技术北京实验室, 新材料技术研究院, 北京科技大学, 北京 100083, 中国

铜铝复合板带箔材兼备铜的高导热、高导电和铝的轻质廉价特性, 用于代替同规格的纯铜板带箔材, 可在保证良好性能的同时, 使产品重量和原材料成本减少约 50%。铜铝复合板带材在导电材料、散热基板和装饰建材领域有着广泛应用, 铜铝复合箔材在电磁屏蔽和雷击防护领域具有广阔的应用前景。然后, 传统的制备技术存在工艺流程长。制备高性能产品难度大的问题, 亟待开发相关产品生产新技术。

本研究开发了铜铝复合板带连铸-轧制短流程工艺, 即先采用连铸复合成形制备高质量板坯, 再通过轧制加工获得高性能的板材和箔材。首先通过数值模拟和连铸实验相结合的方法, 研究了连铸复合过程结晶器结构和工艺参数对铜铝复合板坯凝固行为和界面层厚度的影响规律, 实现了界面层厚度的调控, 制备的板坯界面层厚度约在 25 ~ 400 μm 之间。然后针对传统模拟方法中无法模拟界面开裂的问题, 提出了采用内聚力单元代替符合界面的新模型, 在此基础上采用数值模拟和轧制实验研究了复合板材的轧制变形行为和界面开裂机理, 确定了铜铝复合板材合理的轧制工艺。最后研究了复合板坯界面层厚度对铜铝复合带材性能的影响规律, 实现了表面质量较高、总厚度约为 50 μm 的铜铝复合箔材加工成形, 建立了铜铝复合板带和箔材短流程生产技术原型。

E01-31**高强高弹耐磨耐蚀铜镍铝合金强化机制研究**任晋春¹, 王强松¹

1. 北京有色金属研究总院

以 Cu-Ni-Al 合金为研究对象, 研究热处理工艺和调幅分解强化对合金组织、力学性能和摩擦性能的影响规律及其机理, 主要研究内容: (1)不同热处理组合工艺制度对 Cu-Ni-Al 合金时效过程中显微组织和力学性能的影响规律, 建立热处理工艺-显微组织-合金性能之间的内在关系。(2)调幅分解对 Cu-Ni-Al 合金时效过程中显微组织和力学性能以及摩擦磨损性能的影响规律。合金各项性能: 抗拉强度 $R_m > 800 \text{ MPa}$ 、硬度大于 200 HB、杨氏模量 $> 120 \text{ GPa}$ 、在 3.5% 的 NaCl 人造海水中腐蚀速率小于 0.025 mm/年, 低温性能(-180°C)优良的高强高弹耐磨耐蚀 Cu-Ni-Al 合金。

E01-32**新型制备工艺显著提升高强 Cu-15Ni-8Sn 合金的塑性**

陈明营¹, 刘新华¹, 赵帆¹, 肖星宇¹, 谢建新¹

1. 北京科技大学

Cu-15Ni-8Sn 合金 (UNS C72900) 是精密仪表零部件制造的关键材料, 采用传统的“固溶+大变形冷加工+等温时效”制备工艺, 抗拉强度可达 1200MPa 以上, 但延伸率仅 2.0%左右。为了提升材料的可靠性和使用寿命, 本文提出了“固溶+大变形冷加工+再结晶热处理+小变形冷加工+升温时效”新型制备工艺, 获得晶粒细小、位错分布均匀、析出相弥散细小的组织, 使合金在保持高强度的同时, 塑性显著提升。与传统制备工艺相比, 新型制备工艺处理的试样其断后伸长率由 2.0%提高至 11.7%, 而抗拉强度仅由 1214 MPa 降低至 1191 MPa, 几乎保持不变。本文的研究结果可为调幅分解强化型铜合金的综合力学性能调控提供新的思路。

E01-33

新型 Ti-43Al-6Nb-1Mo-1Cr 合金在等温变形过程中的动态再结晶、相变及变形机理

高宇¹, 李明鹭¹

1. 重庆理工大学材料科学与工程学院

本文研究了 Ti-43Al-6Nb-1Mo-1Cr (at%) 高镍 TiAl 合金等温变形过程中的动态再结晶(DRX)、显微组织演变和织构。在 1150°C/0.005 s⁻¹ 条件下, 以 L10 组织的再结晶 γ 晶粒为主。同时, TiAl 合金发生变形诱导的 $\gamma/\alpha_2 \rightarrow \alpha$ 相变。除了以结晶取向积累为特征的连续动态再结晶(CDRX)外, 在 γ 相中还观察到许多与不连续动态再结晶(DDRDX)相关的特定取向角为 $89 \pm 3^\circ$ 的晶粒。特定的取向角可能是由晶粒旋转引起的, 这与 γ 相 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 滑移系统的激活有关。织构方面, α_2 相的织构在变形过程中主要保持横向织构。 γ 相在低应变下表现出典型的热轧织构。当应变增加到 40%时, 由于许多动态再结晶晶粒的形核, 出现了分散的织构。织构的变化主要是由不同应变下不同的 DRX 行为引起的。在 1200°C/0.005 s⁻¹ 条件下, α_2 -Ti3Al 相 (D019) 出现了以取向积累为特征的连续动态再结晶(CDRX); 同时, β -Ti 相(A2)在动态再结晶前发生变形, 以支持合金的变形。此外, 显微组织表征证实了 TiAl 合金在加载过程中发生了应力诱导的 $\gamma \rightarrow \alpha_2$ 相变, 主要表现为 γ -TiAl 相(L10)内 $1/6 \langle 11-2 \rangle \{111\}$ 部分位错滑移。在应变 60%时, 由于应力诱导的 $\gamma \rightarrow \alpha_2$ 相变和再结晶 α_2 晶粒的形核, α_2/γ 片层被再结晶 α_2 晶粒取代。

E01-34

基于多层异构设计的高性能工程结构用钢

王健¹

1. 中国矿业大学

研究制备了多层连续异构碳梯度工程结构用钢。采用热压扩散和大变形热轧成型板材的方式, 实现了多层低/高碳交替复合的连续异构碳梯度结构。厚度方向上, 显微硬度分布呈多层波动梯度分布。抗拉强度可达到 1880 MPa, 延伸率达到 7.2%。相比传统低碳钢, 抗拉强度和均匀延伸率可同时得到提高。层间碳梯度分布能够促使多层工程结构钢的冲击韧性增加, 有效避免本征高碳区的提前断裂失效, 碳梯度分布越

平缓，对应冲击韧性越大。

E01-35

外场辅助高性能镁合金电弧增材制造形性调控机制

尹思奇¹

1. 大连交通大学

作为最具潜力的轻质金属结构材料，镁合金具有低密度、高比强度和优异的减震性等优点，在航空航天、汽车、轨道交通等领域具有广阔的应用前景。与铸造技术相比，增材制造镁合金零件的形状不受限制，且因其较快的冷却速度，镁合金晶粒明显细化、固溶强化与析出强化机制得到增强，使得电弧增材制造的镁合金材料性能明显高于铸造产品。针对镁合金电弧增材制造过程中的成形性、微观组织与性能等问题，本实验探究了外场辅助作用下焊接电流、送丝速度、焊接速度和层间温度等工艺参数对 CMT-WAAM 镁合金微观组织与力学性能的影响规律。结果表明，镁合金薄壁件成形性能良好，表面粗糙度较低。在较大焊接电流和送丝速度下，晶粒组织形貌为等轴晶，晶粒尺寸从顶部 ($38.3 \pm 3.2 \mu\text{m}$) 到底部 ($111.6 \pm 7.2 \mu\text{m}$) 显著增加，第二相颗粒尺寸明显小于铸造金属；行进方向和构建方向力学性能各向异性较小，二者的抗拉强度分别为 235 MPa 和 230 MPa，伸长率分别为 12% 和 12.5%。WAAM 制造的镁合金薄壁构件表现出与锻造 AZ31 镁合金相当的抗拉强度，并且其各向异性更弱。

E01-36

超声喷丸处理对钛/铝复合板冷轧复合界面复合行为的影响

王雁鹏¹，刘雪峰¹，张伟亮¹

1. 北京科技大学

金属层状复合板兼具两种或多种组元金属的优势，应用前景广阔。金属待复合表面硬化层的状态直接关系到组元金属之间的界面复合质量，是制备高性能金属层状复合板的关键之一。采用传统的机械打磨工艺在金属待复合表面引起的塑性变形程度较低，致使金属层状复合板的复合界面结合强度难以进一步提升，严重影响了高性能金属层状复合板的研制开发和推广应用。本文以钛/铝复合板的制备为研究对象，分别采用超声喷丸和磨轮打磨两种方式对 TA1 钛板坯的待复合表面进行处理，然后与待复合表面采用磨轮打磨进行处理的 6061 铝板坯进行冷轧复合；利用激光共聚焦显微镜、显微硬度计、EBSD 和 TEM 对待复合表面处理前后的 TA1 钛板坯的微观组织和硬化层厚度进行表征，并评价钛/铝复合板的界面形貌、界面微观组织以及界面结合强度；研究了不同 TA1 钛板坯待复合表面状态对钛/铝复合板界面复合行为的影响。结果表明，TA1 钛板坯的待复合表面经过超声喷丸处理后形成了大量的裂纹，并沿深度方向形成了非晶、纳米晶和超细晶呈梯度分布的微观组织，表面硬化层的硬度为 317 HV、厚度 $>80 \mu\text{m}$ ；经过磨轮打磨处理后形成了具有大量孪晶的硬化层，晶粒未出现明显的细化，表面硬化层的硬度为 307 HV、厚度 $>40 \mu\text{m}$ 。超声喷丸处理的 TA1 钛板坯与 6061 铝板坯冷轧复合制备的钛/铝复合板的复合界面呈齿状形貌且形成了宽度不均匀分布的非晶结构，相较于磨轮打磨处理的情况，其复合界面的结合强度提高了 41.2 MPa。这是因为 TA1 钛板坯经过超声喷丸处理后，一方面在待复合表面形成了高密度的裂纹和低延展性的非晶、纳米晶和超细

晶共存的硬化层，促进了 TA1 钛板坯待复合表面的裂纹在冷轧过程中沿深度和宽度方向扩展，使得 6061 铝合金流入其中的数量更多，新鲜金属的界面结合面积增加；另一方面使待复合表面处于高密度缺陷和高界面能的非稳定状态，为界面原子的迁移、交换和重排提供有利条件，降低了轧制过程中 Ti、Al 原子发生扩散的能垒，最终界面形成了结合更加牢固的非晶结构，提升了界面的结合强度。因此，采用超声喷丸对 TA1 钛板坯待复合表面进行超声喷丸处理有助于提高钛/铝复合板的界面结合强度。

E01-37

基于毛细现象的复杂微纳结构组装新方法

曾诚¹

1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

在通信领域，工业界常采用具有复杂编织结构的线束，以显著降低导体在高频下的阻抗。在 5G 通信等场景所使用的更高频率下，新一代导线必须采用直径 10 微米以下的线材进行编织，才能降低趋肤效应，保持较低阻抗。然而此类微纳尺度下线材的编织仍存在重大挑战：传统机械方法施加的力过大，会导致线材断裂；自组装方法可应用于此类线材，然而部分高度复杂且有序的拓扑结构（例如“麻花辫”结构）仍难以组装。我们提出了一种新的基于毛细现象的自组装机理，可突破上述难点，实现复杂结构的微纳组装。我们利用 3d 打印的方法构筑宏观孔道。通过向亲水孔道内注水，并在液面上漂浮一个疏水的浮子。利用毛细力产生的排斥作用，即可对浮子产生限域，并进一步控制其位置和运动。通过将纤维与浮子相连，我们进一步实现了对纤维的控制。基于此原理，我们将展示一系列复杂的器件，用于对纤维进行加捻、以及“麻花辫”结构的编织。我们也进一步将该方法直接用于控制单个微观粒子和聚集体。该方法的装置简单、成本低、迭代快，未来有望广泛应用于微纳材料的先进加工。

E01-38

丝-粉-弧增材制造：实现多材料梯度结构的灵活制备

孙建新^{1,2}，李文芳¹，金硕勋¹，曾德长²

1. 东莞理工学院 材料科学与工程学院

2. 华南理工大学 材料科学与工程学院

增材制造是一种能够将材料设计、结构建造和性能调控融合于同一过程的先进技术，尤其在多材料梯度结构的一体化制造方面具有独特优势。本文利用一种丝-粉-弧增材制造（WPAAM）新方法，通过耦合粉末注射和丝材熔融同步沉积工艺，制备了 TiC 和 B₄C 颗粒交替梯度增强的铝基复合材料（AMC）结构，实现了双相陶瓷粉体和铝合金丝材的实时灵活复合。在该 AMC 结构中：TiC 颗粒含量自下而上逐层增加，达到峰值（约 12 vol.%）又逐层减少，与此同时 B₄C 颗粒含量逐渐增加（最高含量约 6 vol.%）；相应地，Al 基体的晶粒尺寸也随着陶瓷颗粒的变化而变化，Al 晶粒平均等效直径从最初的 65 μm 减小到 TiC 峰值含量时的 18μm，然后随着 TiC 含量降低和 B₄C 含量增加，Al 晶粒平均直径逐渐增大至约 30μm，从而形成了成分-组织双梯度变化趋势。这种 AMC 结构融合了 TiC/Al 体系良好的强度-韧性匹配和 B₄C/Al 体系优异的抗磨、减振性能，表现出下层强韧性好，中部高温抗力强，上层抗磨、阻尼性能出色，实现了多性能

平衡。

E01-39

电子束辅助的激光诱导应变微制造

瞿钰松¹

1. 国家纳米科学中心

连绵的山丘、干瘪的果皮、开裂的油漆墙面以及布满皱纹的肌肤……这些“褶皱”现象在日常生活中随处可见。褶皱通常杂乱无章，不可控制，如何实现其无序形貌的有序化引起了大家的广泛兴趣。近年来，激光诱导的褶皱加工技术因其易实现、低成本、高效率等诸多优越性而成为一种颇具前景的微纳加工手段。然而，由于褶皱应变的传递性和周期性，孤立的褶皱结构一直未能实现。我们开创性地提出了电子束辅助的激光诱导应变策略，成功实现了孤立褶皱结构，使“激光路径诱导”有望发展成为一种通用的微纳加工技术。同时，利用上述应变结构的特殊性，我们在双层 WSe₂ 材料中观测到了迄今为止最大增幅的光致发光效果，并可以通过改变应变结构的表面粗糙度来实现对其光致发光能力的调控。

E01-40

多尺度孪晶和相干纳米析出相对镍基合金性能的影响

班宜杰¹，黄亮¹

1. 华中科技大学

对于传统的结构金属，高强度的获得通常使得延展性的降低，这是因为高强度的材料在塑性变形过程中位错没有足够空间进行运动。本工作通过液氮温度下的快速多向锻造和后续热处理工艺，将多尺度分层孪晶和高密度低错配相结合在了 Ni 基合金中。结果表明：多尺度的孪晶结构极大的提高了材料强度，同时又没有造成显著延展性的降低。此外，在拉伸变形过程中，多种变形机制，如高密度的微小层错、Lmer-Cottrell 锁和短孪晶在远离孪晶的区域被激活，有效地避免了边界应力集中引起的过早破坏。这些微观组织的产生有助于保持延展性，提高强度和加工硬化能力。该研究为定制材料的纳米尺度结构以及缓解材料强度和延展性之间的权衡提供了新的见解。

E01-41

基于射频等离子体的中熵、高熵合金快速高通量制备

朱博¹

1. 吉林大学

中熵和高熵合金（MEA 和 HEA）在众多结构和功能应用中具有巨大潜力，但从巨大的成分空间中合成此类合金是一项艰巨的任务。本次汇报的主题是介绍一种快速、高通量制备 MEA 和 HEA 的射频感应耦合等离子体（RF-ICP）方法，该方法可以大幅提高 MEA 和 HEA 的制造效率和产量。基于 RF-ICP 方

法，我们可以通过添加水蒸气来获得甚至更高的工作温度。

E01-42

时效工艺参数对水封挤压铜铬锆铌合金组织性能的影响

王勇梁^{1,2}, 肖璇¹, 甘春雷², 苗钰鹏², Lozikov Igor³

1. 南昌航空大学航空制造工程学院

2. 广东省科学院新材料研究所

3. Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Belarus

采用真空熔铸-水封挤压-冷拉拔技术制备了 Cu-Cr-Zr-Nb 合金棒材，利用透射电镜、扫描电镜、X 射线衍射仪和拉伸试验机等测试手段，研究了时效工艺参数（时效温度 400-525℃及时效时间 0.5-6h）对合金棒材导电率、力学性能及微观组织的影响规律。结果表明，随着时效温度的升高和时间的增加，Cu-Cr-Zr-Nb 合金的导电率逐渐增大，硬度、抗拉强度和屈服强度呈现先增加后减小的变化趋势。相比于其他时效工艺，经 500℃时效 4h 的冷拉拔 Cu-Cr-Zr-Nb 合金的综合性能达到最佳，电导率为 80.2%IACS、硬度为 81.2HRB，同时获得较高的抗拉强度和延伸率分别为 544MPa 和 21%。由 TEM 和 EBSD 等表征证实析出强化和位错强化是 Cu-Cr-Zr-Nb 合金的主要强化机制。500℃时效温度下，当时效时间超过 4h 时，合金的 Cr 析出相由其他时效参数下的 FCC 结构转变为 BCC 结构，并且析出相与基体的共格关系转变为半共格关系。

E01-43

快速、高活性绿光体积生物打印方法研究

谢茂彬¹

1. 广州医科大学

体积增材制造（Volumetric Additive Manufacturing, VAM）通过投影整个三维体的动态变化光图案，以实现快速光聚合。然而，缺乏适用于 VAM 的生物墨水是限制其应用的关键问题。本报告研究了未经改性的丝蛋白基（丝胶（SS）和丝素蛋白（SF））和脱细胞基质生物墨水用于 VAM，以快速形成复杂的三维活性结构，并探索其在类器官和组织工程领域的应用。

E01-44

基于机器学习的耐蚀铜镍合金成分优化设计研究

楚昊¹

1. 有研工程技术研究院有限公司

铜镍合金因其良好的机械性能和耐蚀性能而在海洋工程中具有广泛的应用前景。本文利用已有的腐蚀

数据,利用机器学习的方法,在 Cu-10Ni-1.8Fe-0.8Mn 合金的基础上,制备了 Cu-10Ni-1.8Fe-0.8Mn-0.3Cr 合金,研究了 Cr 对铜镍合金冲刷腐蚀行为的影响。结果表明,添加了 Cr 元素的合金具有更好的耐冲刷腐蚀性能。Cr 的加入使铜镍合金的腐蚀速率由 0.287mm/a 降低到 0.028mm/a。合金较好的耐腐蚀性能主要是由于在腐蚀早期形成的具有良好保护性的 Cr_2O_3 , Cr^{3+} 也能进一步填充 Cu_2O 膜的阳离子空位。

E01-45

GH4169 合金线性摩擦焊接头微观组织及力学性能调控

孟廷曦¹, 杨夏炜¹, 苏宇¹, 郭震国¹, 马铁军¹, 李文亚¹

1. 西北工业大学

镍基高温合金具有优异的高温力学性能,成为航空发动机涡轮叶片、叶盘等部件的首选结构材料。以涡轮叶片为例,在服役过程中承受高速旋转产生的离心载荷以及高温、高压燃气流冲刷作用导致的蠕变损伤时发动机涡轮叶片的主要失效机制。线性摩擦焊接技术因其成形性能优良、材料利用率高等优点,被广泛地应用在了航空发动机整体叶盘的连接与修复中。本文采用数值模拟与试验研究相结合的方法,以 GH4169 高温合金为研究对象,获得不同焊接参数下接头的微观组织、温度场及应力场分布,并对接头缺陷进行了表征,分析了接头的常温与高温力学性能。焊后接头的强度达到了母材的 70%,断后延伸率有所下降;接头缺陷处为氧元素富集区,存在 Ti、Al 等氧化物和 Nb、Mo 的碳化物颗粒,拉伸试验中接头首先在这些颗粒位置处发生开裂,裂纹逐渐生长、合并最终导致接头失效。此外,在相同焊接参数下,焊接界面长宽比越大,接头的缩短量越大。

E01-46

选择性激光熔化制备 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金空心砖骨架的组织性能研究

马欢¹

1. 大连交通大学

本研究利用共晶高熵合金良好的铸造性和选择性激光熔化的高冷却速率特性将空心砖墙结构引入到 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金的制备中。本文研究了选择性激光熔化工艺参数对 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金骨架组织演变和力学性能的影响。研究发现,随着体积能量密度的增加,沿构建方向的微观组织由胞状结构演变为胞状和片层状并存结构。采用选择性激光熔化制备的 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金骨架由 BCC/B2 和 FCC 相构成。当体积能量密度为 137.25 J/mm³ 时,AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金骨架的压缩强度为 241.2±4.2 MPa。在拉伸状态下,其屈服强度和抗拉强度分别可达 1349.4±12.4 MPa 和 1529.5±12.8 MPa。采用选择性激光熔化法制备的 AlCoCrFeNi_{2.1} 骨架的较高强度是由细晶强化、位错强化以及 FCC 和 BCC/B2 的异质结构贡献的。本研究可为共晶高熵合金的微观结构设计和性能改进提供参考,有望为先进高强轻质结构合金和吸能合金的开发提供新的思路。

E01-47

激光功率对 TC4 - SiC p/6092Al 复合材料激光焊接组织演变及力学性能的影响

胡承宇¹, 曹洪洋¹, 李洪亮¹

1. 江苏大学

本研究采用激光焊接工艺实现了 Ti6Al4V 合金 (TC4) 和 SiC 粒子增强铝基复合材料 (AMC) 的搭接焊。研究了激光功率对 TC4/AMC 接头微观结构演变、金属间化合物形成和机械性能的影响。强化相 SiC 的存在使熔池中的冶金反应复杂化, 导致金属间化合物的形成, 如 Al_4C_3 、TiC、TiAl 和 TiAl_3 。与对焊接宽度的影响相比, 激光功率对焊接熔深的影响更为明显。随着激光功率的增加, TC4/AMC 界面上的 Ti-Al 金属间化合物的厚度也随之增加。由于铝基体和 TiAl_3 相的热机械性能不同, TiAl_3 相周围存在大量位错。通过减小 TiAl_3 相的厚度, 可以大大提高 TC4/AMC 接头的拉伸剪切力。当 TiAl_3 层的厚度达到最低值 $7.1\text{ }\mu\text{m}$ 时, 在 1500 W 激光功率下 TC4/AMC 接头的最大拉伸剪切力为 1675.6 N 。研究结果有望改进 TC4/AMC 混合结构的激光焊接技术, 并为今后 TC4/AMC 焊接接头的设计提供宝贵的指导。

E01-48

低密度中锰钢的变形行为和应变分配的原位研究

蒋家乐¹, 李云杰¹, 袁国¹

1. 东北大学

这项研究采用简单的热轧工艺和直接临界区退火制备了一种新型含铝中锰低密度钢。添加 $4.5\text{ wt.}\%$ 的铝可使钢的整体密度降低 7.2% , 但增加了层错能, 导致变形机制复杂, 这些细节此前尚未被探讨。研究了临界区退火 (IA) 时间对奥氏体特性和锰分布行为的影响。通过原位拉伸试验, 结合 EBSD 分析和微尺度数字图像相关技术, 揭示了变形机制。结果表明, 在 700°C 临界区退火 30 分钟时, 强度和延展性的最佳组合得以实现。特别是块状奥氏体在低应变和高应变之间起到过渡作用, 有效提高了拉伸性能。这一发现挑战了先前认为大奥氏体不稳定, 易发生快速 TRIP 效应且对性能有害的观点。在退火 30 分钟时, 纳米片状奥氏体的锰含量范围为 10 到 $13\text{ wt.}\%$, 导致其高层错能为 $47\text{--}50\text{ mJ}/(\text{m}^2)$ 。主要的变形机制是位错滑移, 伴随少量的 TRIP 效应。相比之下, 块状奥氏体的锰含量较低 (7 到 $8\text{ wt.}\%$), 已完全转变为马氏体。此外, 原位实验证据表明, 低密度中锰钢的应变最初集中在铁素体区域, 而块状奥氏体 ($>700\text{ nm}$) 在低应变到高应变的拉伸强度过渡中起到了成功的过渡作用, 最终的应变集中发生在纳米级 ($<300\text{ nm}$) 条状奥氏体区域。此外, 纳米片状奥氏体的区域应变最高, 并持续增长, 表现出最快的应变感知能力。然而, 并不是所有的条状奥氏体都经历应变集中, 那些主要滑移方向和滑移面平行于片状或块状边界的奥氏体, 可以承受显著的应变。

E01-49

复杂薄壁构件热循环加载整体成形方法研究

王文静¹

1. 北京科技大学

针对复杂大型薄壁铝合金构件高精度、短流程、高效率整体成形难度大的问题, 提出了热循环加载方

法实现 2219 铝合金唇口件整体成形的创新思路。开展了 2219 铝合金热力耦合循环加载下的力学特性及演化规律、微观组织演变规律和动态再结晶行为等基础理论研究, 分析了 2219 铝合金热循环加载下的力学响应特性, 为高质量高精度发动机唇口件的整体成形提供理论支撑和技术支持。

E01-50

基于机器学习的新型钴基高温合金优化设计

孙林林¹, 马庆爽¹, 熊杰², 高秋志¹, 裴成蒿¹

1. 东北大学

2. 上海大学

新型钴基高温合金在设计过程中, 需要同时兼顾组织稳定性、高温强度以及高温抗氧化腐蚀等多个性能。由于多组元间复杂的非线性交互作用, 钴基高温合金在实现性能、组织稳定性与组织调控之间平衡点一直存在挑战。钴基高温合金的成分优化设计一直面临大空间、多维度参数的问题。机器学习在解决大空间成分筛选和多维度参数优化问题时具有优势。为此, 我们考虑 γ' 相溶解温度、合金密度和粗化长大, 采用逐层筛选的多目标优化策略, 同时优化多组元新型钴基高温合金的三个目标。为了验证策略的合理性, 我们从几十万种候选合金成分中选择了四种合金, 并进行了实验验证。结果表明, 多目标优化策略可以快速发现高 γ' 相溶解温度、低合金密度和耐粗化的新型钴基高温合金。

E01-51

球形 L12 析出相单独强化非等原子比 NiCoCrAlTi 高熵合金

黄丽冉¹, 付志强¹

1. 华南理工大学

面心立方结构等原子比 CoCrNi 中熵合金具有超过绝大多数高熵合金的冲击韧性, 但其室温屈服强度较低, 这极大地限制了其应用与发展。在 CoCrNi 中熵合金中引入 L12 析出相是一种十分有效的强化手段, 传统获得 L12 析出相的手段通常是热机械加工, 而在加工过程中通常会在晶界处同时引入其他不利于塑性的胞状析出相。本研究设计并通过电弧熔炼制备了一种非等原子比 NiCoCrAlTi 高熵合金, 通过简化的短程热处理后得到仅在晶内析出的球形 L12 纳米析出相。时效态合金中析出相的平均尺寸和体积分数分别约为 10.9 nm 和 41.9 vol.%, 析出强化的作用下合金表现出明显的性能提高, 屈服强度和抗拉强度分别高达 916 MPa 和 1220 MPa, 同时保持着 21.5% 的延伸率。此外, 通过多种表征手段对时效态合金的断裂行为和变形机制进行了深入的研究, 多平面滑移、位错切过析出相、层错网、L-C 锁等多种机制协同作用使得合金表现出优异的强度-塑性匹配。

E01-52

超声脉冲激励 TIG 焊 Inconel 718 中间层对 Inconel 690 接头微观结构和机械性能的影响

张星越¹, 韩柯¹, 陈浩¹, 雷玉成¹

1. 江苏大学材料学院

在超声脉冲激励氩弧焊（UFP-TIG）试验中通过添加 Inconel 718 合金（IN718）作为中间层来连接 Inconel 690 合金（IN690）。试验研究了中间层厚度对 IN690 接头微观结构、机械性能和高温失塑裂纹（DDC）敏感性的影响。结果表明，在焊缝区（WZ）形成了多种析出物，包括 MC 型碳化物和 Laves 相，这些析出物均匀地分散在枝晶间区和晶界（GB）中。增加 IN718 层的厚度有利于 Laves 相和 MC 碳化物的析出和生长。然而在 WZ 中形成的 Laves 相与基体的结合力较低，会降低 IN690 接头的抗拉强度。使用 1.0 毫米中间层的 IN690 接头 WZ 中的 Laves 相含量适中，达到最大抗拉强度（627 MPa），约为基体金属（BM）的 96.5%。同时，含有 1.0 毫米中间层的接头达到了最高的延伸率（35.4%）。此外应变裂纹试验（STF）测试表明，在 3.8% 的应变下，添加了 IN718 层的接头裂缝总长度减少了 66.49%。因此，添加 IN718 中间层可显著改善 IN690 接头的机械性能和抗 DDC 性能。

E01-53

异质铝合金激光熔化沉积制备研究

李禄禄¹，郭乾应¹，刘永长¹

1. 天津大学

应对航空航天、船舶、汽车等领域的快速发展对轻质高强件的迫切需求，开展对两种金属特性的新型双金属复合材料的工艺研究愈发重要。铝/钛复合材料结合铝合金和钛合金两种金属材料的优异性能，具有高强度、塑性和高比强度的特点。针对两种金属材料性能差异明显的难题，采用高能量密度的激光熔化沉积（Laser Melting Deposition, LMD）技术制备高 Ti 含量颗粒增强铝基复合材料，得到硬质增强相/软质基体相的异质组织结构。研究表明，通过有效干燥预混复合粉末并结合后续工艺参数优化，可显著降低 LMD 成形铝/钛异质材料的氢气孔率。由于元素扩散，沉积过程中在 Al、Ti 界面处易形成过渡层。通过进一步调控高 Ti 含量颗粒在铝基体中的分布和尺寸大小，实现铝/钛复合材料的成分设计与组织优化，该 Ti 颗粒增强铝基复合材料的力学性能也得到相应改善。此工艺适合大规模工业生产，成本低，可推广应用于其他金属体系。

E01-54

铜箔表面巯丙基三甲氧基硅烷膜的电解制备及耐腐蚀性能研究

李清伟¹，刘雪峰¹，王文静¹

1. 北京科技大学

巯丙基三甲氧基硅烷（MPTS）膜具有较好的耐腐蚀性能，在铜材的腐蚀防护领域具有广泛的应用前景。然而，采用浸泡法制备 MPTS 膜时存在硅烷水解与缩合的矛盾，导致制备的 MPTS 膜不均匀；采用阴极电沉积工艺时阴极电位会抑制有利于界面结合的 S-Cu 键的形成，且阴极析氢反应会降低 MPTS 膜的致密度。总之，采用现有工艺在铜材表面制备的 MPTS 膜存在不均匀、不致密以及与铜材表面结合较差等问题，限制了其在实际中的应用。在电解过程中施加阳极电位可以促进巯基（-SH）与亚铜离子形成 S-Cu 键。有鉴于此，本文以 T2 铜箔为研究对象，提出采用电解工艺在铜箔表面制备了 MPTS 膜，利用 SEM、EDS

和 FTIR 表征了铜箔表面 MPTS 膜的形貌和成分,利用 XPS 分析了 MPTS 膜中化学键的种类及数量,同时通过电化学测试、盐水浸泡实验和中性盐雾实验评价了 MPTS 膜对铜箔的腐蚀防护效果,在此基础上研究了阳极电位对 MPTS 膜形貌和耐腐蚀性能的影响规律。结果表明,采用电解工艺在铜箔表面制备的 MPTS 膜平整致密, Si 和 S 元素含量及 S-Cu 键的数量明显增加。在电解过程中随着阳极电位增加,铜箔的阻抗值呈现先增大后减小的趋势。当电压为 1.5 V 时,阻抗值最大为 $1.07 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在 3.5 wt.% NaCl 溶液中浸泡 15 d 后 MPTS 膜的微观形貌基本没有变化,且经过 72 h 中性盐雾测试后试样表面也未出现腐蚀现象。在电解过程中,氧化生成的亚铜离子易与巯基配位形成 S-Cu 键。当电压较低时,氧化生成的亚铜离子较少;当电压较高时,铜原子被氧化为铜离子,溶解过程强于 MPTS 分子的吸附。当电压为 1.5 V 时, MPTS 分子通过 -SH 与 Cu(I)配位化学吸附在铜箔表面,不仅提升了膜层与基体的结合力,同时为 MPTS 分子提供了更多的吸附位点,因此制备的 MPTS 膜均匀致密,对铜箔的腐蚀防护效果良好。

E01-55

基于离子层外延生长法制备超薄二维中熵/高熵纳米电催化材料

闫光远¹

1. 华南理工大学

开发高活性、高稳定性且低成本的析氧反应(OER)电催化剂是电解水制氢技术瓶颈的关键。中熵/高熵材料作为电催化剂表现出丰富的催化位点结构与电子学自由度、突出的结构稳定性等独特优势,但比表面积较小、控制合成难、生长机制以及性能机理仍不明晰等问题限制了其应用。本研究基于构建高熵材料与二维形貌化相结合的设计思想,开发出高性能且非贵金属基的新型超薄二维中熵氧化物(MnFeCoNi)O 与高熵合金 FeCoNiMo 纳米电催化材料,采用一种低温简单的离子层外延生长法实现对其制备与电催化性能的优化。超薄二维中熵氧化物(MnFeCoNi)O 在电流密度 10 mA cm^{-2} 时表现出极低的过电位 117 mV,其高质量活性(5584.3 A g^{-1})比商业贵金属 RuO₂ (3.4 A g^{-1})高 3 个数量级;超薄二维高熵合金 FeCoNiMo 在碱性条件下显示出极其优异的电化学稳定性,在经历 1 个月的持续 OER 电催化测试后依然保持初始电流的 98.6%。以上研究结果充分显示出超薄二维高熵材料作为电催化材料的巨大优势,为高性能低成本电催化材料材料的开发提供理论指导和技术支撑。

E01-56

铝合金熔体中多元微量元素对 Mg₂Si 相的协同/竞争变质机制

李超¹

1. 国网河南省电力公司电力科学研究院

轻质铝合金密度低、比强度高,在轻量化上具有难以替代的显著优势。且铝合金成型性优良,可以采用整体铸造成型的方式用以制备大型复杂承力结构,是航空、航天、通讯、交通等领域轻量化的关键材料。铝合金在飞机发动机、导弹舱壳体等关键部件的应用使得新型耐高温轻质铝合金的开发成为我国新型军事装备发展的基础技术难题之一。开发高端轻质耐高温铝合金符合我国国情及国家科技创新规划。金属间化合物 Mg₂Si 相具有优异的物理化学性能,有潜力作为强化相提升铝合金高温性能。然而,

由于常规凝固条件下初生 Mg_2Si 相呈现为粗大的树枝晶形貌，极易割裂基体，产生应力集中，严重损害了合金的力学性能，限制了其应用。因此，对 Mg_2Si 相进行形貌变质和尺寸细化处理是获得高性能 Mg_2Si 强化铝合金材料的关键。本论文在前期研究的基础上，通过多元微量元素复合变质，从晶粒生长、异质形核、界面调控、过冷控制等多个方向协同调控 Mg_2Si 晶体的尺寸和形貌，揭示多元微量元素在不同冷速条件下的协同/竞争变质机制；通过观察变质微量元素参与下 Mg_2Si 相异质形核的界面结构与形貌特征，揭示高效异质核心形成机制；将热力学上原子吸附、置换、形核等的能垒作用与动力学上溶质扩散、成分过冷区构建等对 Mg_2Si 的作用机制相结合，制备尺寸理想、形貌可控的 Mg_2Si 增强相，为发现高性能耐高温铝合金奠定理论基础。

E01-57

热处理对烧结态贫 Nb Cu-Cr-Nb 合金富 Cr 强化相的作用及室温力学性能

潘钰坤¹，郭乾应¹，丁然¹，刘晨曦¹，马宗青¹，刘永长¹

1. 天津大学

贫 Nb Cu-Cr-Nb 合金在室温下具有优异的机械性能和导电性，作为结构导电材料在电气工业中被广泛应用。本文研究了快速烧结和后续热处理温度对 Cu-3Cr-0.5Nb (wt.%) 合金析出相和室温力学性能的影响。在快速烧结的非平衡过程中，烧结温度的升高将提高合金的致密度和力学性能，而不会出现明显的晶粒粗化，且采用适当的后续热处理工艺可有效控制富 Cr 强化相的形成和粗化过程。在对合金烧结态和后续热处理组织的表征发现，第二相的尺寸和分布与合金的室温拉伸性能密切相关。较低的后处理温度可在保持原有析出相尺寸的前提下，诱导新的 Cr_2Nb 相形核析出，从而阻碍位错运动并增强 Orowan 强化机制，促使合金具有最高的抗拉强度和伸长率；较高的后续热处理温度将导致原有富 Cr 相以及 Cr_2Nb 相的显著粗化，从而恶化合金性能。

E01-58

铝合金最强连接技术

戴庆伟¹

1. 重庆科技大学

为了实现铝合金的可靠连接，开发了一种剪切连接装置。剪切连接实验结果表明，接头都表现出高度协同的机械性能。剪切连接后连接系数达到 95.6%，热处理后接头系数超过 100%，优于传统的铝合金连接方法。连接系数高主要来源于连接效果良好和梯度晶粒结构。梯度晶粒结构有利于激活更多的滑移系统来协调塑性变形。尽管在热处理后牺牲了细晶结构，但由于较高的加工硬化，获得了较高的强度和接头系数。这种新开发的方法在铝合金板材的无头轧制中有很大的应用潜力，也可用于汽车、航空航天、轨道交通等领域的铝合金连接。

E01-59

基于热力学数据驱动的交通通用铝合金材料优化设计

张光宗¹

1. 大连交通大学

面向“碳中和与碳达峰”国家重大战略，轻量化装备及其绿色制造成为推动双碳目标、发展新质生产力的重中之重。针对轨道交通、汽车等领域对铝合金轻质材料组织与性能提出的更高要求，本文突破传统的“经验+试错”低效研发模式，基于热力学数据驱动，对高性能铝合金构件本体与细化改性驱体进行优化设计。一、开发了新型高效铝合金晶粒细化剂，使高铁焊丝、再生铝汽车轮毂、连接盘的力学/疲劳性能显著提升，为获得高性能铝合金材料提供技术支撑。二、开发了高强高导 Al-Si-Mg-Cu 合金，获得了第二相的析出行为，建立了合金化原子固溶存赋形态的数学描述，为满足重卡飞轮壳等大型复杂半固态铸锻一体化构件制备需求提供理论依据。

E01-60

薄壁直通微孔金属网粉末冶金制备新工艺开发

马欣¹，刘雪峰¹，杨耀华¹

1. 北京科技大学

薄壁直通微孔金属网具有高的比表面积和通孔率以及良好的可塑性，在换热、催化剂载体和过滤等领域应用广阔。通常采用丝网编织、冲孔成形和激光加工等方法制备薄壁直通微孔金属网，但存在着工艺流程长、设备要求高、操作复杂、制品尺寸受限或生产成本低以及难以满足不同部位不同厚度和性能要求等问题。有鉴于此，本文提出了一种低成本、高效率的薄壁直通微孔金属网粉末冶金制备新工艺，不仅可以减少设备投入、简化操作、降低成本，同时还可以在不同部位使用不同粉末作为原材料，实现薄壁直通微孔金属网的孔径形式、孔径大小、孔分布密度、孔壁尺寸以及不同部位所需性能和厚度的精确调控。本文以薄壁直通微孔铜网的制备为例，通过将模板法和失蜡法相结合，以薄壁直通微孔不锈钢网为模板制备了石蜡微柱模具，将最优比例的聚乙烯醇粘结剂与铜粉混合的铜浆料倒入石蜡微柱模具后整平，接着进行失蜡和干燥处理，随后在氩气保护下烧结获得高质量的薄壁直通微孔铜网。分析了烧结温度、保温时间和升温速率对薄壁直通微孔铜网成形质量的影响规律，对比研究了用作模板的薄壁直通微孔不锈钢网与制备的薄壁直通微孔铜网的孔径大小和孔壁尺寸等的遗传关系。

E01-61

激光微织构对 CFRP 胶接界面强度影响研究

陈红呈¹

1. 中国民航大学

激光处理以其易加工、可集成、高损伤阈值等优势，在碳纤维增强树脂基（CFRP）复合材料表界面改性领域展现出了巨大的应用潜力。本文采用超短脉冲激光对 CFRP 表面物理化学性能进行调控，以改善胶接性能。研究了不同脉冲参数（离焦量、扫描速度、扫描次数）对 CFRP 表面形貌、接触角、表面能和表面化学成分的演变规律。采用最佳脉冲参数在基材表面加工微纳结构（包括纵向沟槽、横向沟槽、圆形凹

槽), 通过拉伸剪切试验以及双悬臂梁试验, 研究了不同表面微纳结构对 CFRP 复合材料胶接接头强度和韧性的影响机制。结果表明, 碳纤维残余树脂裸露率直接影响粘接强度, 激光离焦量为 4 mm、8 mm 和 12 mm 时, 处理后的 CFRP 复合材料粘接强度与未处理 CFRP 复合材料相比分别提高了 110.5%、113.16%和 103.28%; 随着扫描次数的增加, 胶结强度先增大后减小。由于胶粘剂在微结构处发生塑性变形引发裂纹向胶粘剂-基材界面扩展, 三种加工图案均能提高接头韧性, 其中纵向沟槽最有利于提高抗剪强度, 圆形凹槽由于部分重叠易产生空隙导致抗剪强度降低。

墙报

E01-P01

表面塑性变形式后处理通过改变表面粗糙度实现对靶材润湿特性的调控

赵迪¹, 姚远¹, 卢国鑫¹

1. 山东大学千佛山校区

工程材料润湿性直接影响其清洁、防冻等性能, 在航空航天领域应用广泛。采用表面塑性变形式调控方法改变材料润湿性的同时, 还可引入一定程度强化效果, 应用潜力显著。面向具有苛刻应用环境的航空钛合金, 利用喷丸 (WcLSP 和 SP) 的效果改变金属材料表面粗糙度来控制其润湿特性。结合表面能、宏观和纳米形貌等表面特性进行分析, 探讨了不同喷丸冲击方式以及不同激光能量对润湿特性的影响; 通过静态接触角测量进行量化, 然后测定表面自由能等其他性能, 通过改变后处理工艺, 调控表面粗糙度, 实现润湿特性的按需获取。本研究展示了塑性变形式表面工艺调控材料润湿性和引入强化效果的积极效用, 揭示了取样范围合理确定对材料润湿性准确表征的具体影响。

E01-P02

热卷浸没式冷却工艺对带钢组织性能和氧化铁皮的影响

张亮亮¹

1. 首钢集团有限公司

热卷浸没式冷却技术通过将卷取后的热轧钢卷整体浸没至冷却水中, 在减少冷却时间、提高冷却均匀性的同时, 还可以通过整体温度场的改变对表面质量及组织性能进行调控。本文开展了自然冷却和浸没式冷却模式下热卷冷却过程温度场的仿真模拟研究和工业生产试验研究, 系统分析了浸没式冷却工艺对 IF、LCAK 和高强 DP 钢三类钢种氧化铁皮和组织性能的影响。模拟结果表明, 自然冷却条件下, 钢卷芯部冷速小于 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 冷却过程等效为缓慢自回火过程; 浸没式冷却模式下, 芯部冷速提升 7 倍, 回火软化效应减弱。工业实验结果表明, 各钢种冷轧成品长度方向的性能均匀性都有所提升, 性能波动幅度降低了 30-50%; LCAK 钢碳化物体积分数减少 20-30%, 屈服平台长度由 2.6%提高至 3.4%; 浸没式冷却工艺不会影响 DP590 热卷表层及芯部的相变状态, 但是可以明显抑制带状组织的形成, 且通卷屈服强度均值提高约 30MPa。各钢种氧化铁皮厚度下降 30-40%, 铁皮中 FeO 含量增加 10-20%, 铁皮与基体界面 Si、P 元素富集量也明显下降。本文开展了大量工业生产试制, 明确了不同钢种的最佳冷却开始温度, 为热卷浸没式冷却技术在板材组织性能控制中的应用提供了借鉴。

E01-P03

球磨工艺对双相不锈钢粉末结构演变及烧结性能的影响

盛文晴¹, 李晶琨¹, 付彬国¹, 董天顺¹, 李国禄¹

1. 河北工业大学

本文以等质量 316L 和 430 不锈钢粉末为原材料,采用球磨的方法制备出双相不锈钢粉末,研究在 200 r/min 和 800 r/min 下进行 0~20 h 球磨后双相不锈钢粉末结构演变。结果表明,球磨过程未导致粉末发生相变,随球磨时间延长,粉末粒径逐渐减小并且其晶体结构的应变出现不均匀变化,在 800 r/min 球磨 15 h 后得到两相均匀、粒径最小的双相不锈钢粉末,球磨 20 h 后由于持续碰撞作用导致粉末出现冷焊。烧结后,组织致密、铁素体和奥氏体相分布均匀,经 800 r/min、15 h 球磨后的烧结体硬度提高 17.23%。

E01-P04

液相激光辐照下表面等离子体介导的合金化制备单分散 Au-Ag 合金纳米粒子

和宁宁¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院

具有广泛可调光学特性和催化活性表面的等离子体贵金属纳米粒子为光化学提供了一个独特的机会。贵金属纳米粒子 (Ag、Au 等) 与电磁辐射有很强的相互作用,从而激发局部表面等离子体共振 (LSPR)。表面等离子体共振的光学激发可产生高能热载流子,从而参与光化学反应。高能热载流子附着在纳米结构表面吸附的反应物上可诱导光化学转化,如 CO₂ 还原、H₂ 解离、和水裂解。虽然表面等离子体驱动的分 子催化反应已被广泛研究,但表面等离子体介导的双金属纳米材料合成却鲜有报道。受这些研究的启发,我们提出了一种通过表面等离子体介导的光还原反应制备单分散 Au-Ag 合金纳米粒子的新策略,即用纳秒激光器 532 纳米波长脉冲激光辐照 Au 胶体和 Ag⁺ 前驱体的混合物。Au 胶体是通过激光烧蚀去离子水中的 Au 靶来制备的,其中生成的 Au 纳米粒子在没有配体保护的情况下会聚集成链状甚至网状结构,平均线宽为 11.69 nm。在脉冲激光辐照 Au 胶体与 AgNO₃ 溶液混合物,30 min 后得到平均粒径为 3 nm 元素均匀分布的单分散 Au-Ag 合金纳米粒子。详细的实验表征捕捉到了单分散 Au-Ag 合金纳米颗粒从最初的 Au 纳米链与 AgNO₃ 溶液的混合物中形成的过程。研究得出结论,源自 Ag⁺ 离子的 Ag 原子成核是由金表面等离子体热电子引发的,这为 Au 原子和 Ag 原子之间的合金化铺平了道路。此外,不含任何表面活性剂或配体的 Au-Ag 合金纳米粒子表现出卓越的稳定性,这一点已被实验和基于 DLVO 的理论模拟所证实,这可能归因于过剩的热空穴使粒子表面带正电。总之,我们的研究全面描述了表面等离子体介导的合金化,并为通过前驱体的等离子体光还原合成双金属纳米粒子提供了新的见解。

E01-P05

Composition Distribution Simulation of Al-Cu-Mg-Ag Alloy based on Phase-Field Method during Solidification

Linghao Chen¹, Hong Zhang¹, Shiqing Zhu¹

1. University of Science and Technology Beijing

Al-Cu-Mg-Ag alloys are widely used in aerospace due to their excellent heat resistance, high specific strength, and good machinability. In solidification, the compositional distribution and segregation of the alloy play an important role in its properties. Therefore, in this paper, the solidification phase field model was established by using the phase field method to simulate the compositional distribution of the alloy after solidification. The

experiments show that the solutes are expelled during the advancement of the interface to the liquid phase, and that the content of each element is higher in the intergranular than in the intragranular, with the most severe enrichment of Cu, which exists in the form of θ -phase, and a lesser enrichment of Si, with respect to the Mg and Ag elements. The experimental results are in full agreement with the pattern predicted by simulations.

E01-P06

无涂层激光冲击强化和机械喷丸诱导 Ti60 合金微观机械性能和微观组织在深度场的不同变化趋势

姚远¹, 赵迪¹, 卢国鑫¹

1. 山东大学

激光冲击强化 (LSP) 能够提升材料的抗疲劳、抗磨损等表面性能, 但其应用受到保护性涂层的限制。因此, 越来越多的研究聚焦于无涂层激光冲击强化 (LSPwC), 但对钛合金表面强化处理的经济性和实际应用角度的研究仍然不足。本文针对近 α 相 Ti60 合金进行了机械喷丸 (SP) 和 LSPwC 处理后的微观机械性能以及显微组织演变规律等方面进行了研究。结果显示: SP 工艺引入的最大残余压应力为 -549MPa, 高于 LSPwC 工艺的 -392MPa。然而, SP 工艺形成的残余压应力层厚度为 280 μm , 低于 LSPwC 工艺的 370 μm 。通过衍射峰半高宽 (FWHM) 分析发现, SP 工艺在 50 μm 深度处的弹塑性变形程度最大, 而 LSPwC 工艺在表层最外表面的弹塑性变形程度较大, 但仍低于 SP 工艺, 这与 SP 诱导残余应力场“非单调性”分布特征显著的相对应。两种工艺均导致试样表层晶粒细化, 其中 SP 处理后的试样亚表层晶粒细化程度比表层高, 但都属于纳米级晶粒, 显微组织演变中仅有少量孪晶出现; 而 LSPwC 处理后的试样表层存在大量孪晶, 晶粒细化程度相对略低。综合来讲, 在样品强化层以下约 150 μm 深度范围内, SP 工艺的表面强化效果优于 LSPwC, 即使但采用较低激光能量的 LSPwC 仍能引入更深的残余压应力层更深。

E01-P07

Interface enhancement mechanism of rolled Mg/Al clad plate with particle interface control

Xiaobao Ma¹, Peng Li¹, Tao Wang¹, Zhongkai Ren¹, Peng Chen¹, Jiang Ji²

1. Taiyuan University of Technology

2. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd

In this study, the cold-spraying process was utilized to deposit Al particles onto an Al slab, an Mg slab, and both Al and Mg slabs to form an ultra-thin interlayer, and then the clad slabs were rolled at 400°C, developing three roll-bonding processes: the roll-bonding process with cold-sprayed Al powder on the Al slab (CS-Al), the roll-bonding process with cold-sprayed Al powder on the Mg slab (CS-Mg), and the roll-bonding process with cold-sprayed Al powder on both the Al slab and the Mg slab (CS-Both). The effects of three different cold-sprayed Al particle interlayer processes on the mechanical properties of rolled Mg/Al clad plates were investigated to improve the mechanical properties. The microstructure, texture evolution, intermetallic compound formation, mechanical properties, and mechanisms involved in the Mg/Al clad plate rolling were systematically investigated. The results showed that the pre-bonding between the particles and the substrates through cold-spraying had a significant impact

on the bonding strength of the Mg/Al clad plates, and the CS-Both process can increase the average shear strength of the Mg/Al clad plates to 49.24 MPa at a medium reduction rate of 37.5%, 2.5 times that of the conventional rolling process. The CS-Both process constructed more evident dual microscopic three-dimensional interfaces and promoted more thorough atomic diffusion at the interface through the double-sided cold-spraying process. Meanwhile, the dual cold-sprayed Al coatings on both the Mg slab and Al slab underwent dynamic recrystallization during rolling to form a homogeneous unit with no additional coating interfaces. Fine grain strengthening and dislocation strengthening were judged to be important mechanisms for improving the mechanical performance of the interfacial layer.

E01-P08

Allvac 718Plus 合金在长期时效过程中的第二相演变行为及其对拉伸行为的影响

唐丽婷¹, 郭倩颖¹, 李冲¹, 刘永长¹

1. 天津大学

Allvac 718Plus 合金是一种新型 γ' 沉淀型镍基高温合金, 在 704 °C 以下具有优秀的热稳定性和机械性能。本工作研究了在经 704 °C 和 760 °C 长期时效后, 合金中的第二相演变行为 (如 γ' 相的粗化和 σ 相的析出) 及其对室温和高温拉伸性能的影响。结果表明: 更高的时效温度和更长的时效时间可明显促进 γ' 相的粗化和 σ 相的析出, 长期时效后抗拉强度的降低主要是由于 γ' 相的粗化, 且 σ 相作为裂纹的优先成核位点同样对合金性能有害。此外, 室温和高温拉伸试验的变形机理存在明显差异。在室温拉伸时 γ 基体的变形机制以平面滑移为主, 在高温拉伸时以层错和孪晶的形成为主。而沉淀强化机制与时效处理和拉伸温度有关, 经 704 °C/100 h 时效试样在室温和高温拉伸时均以位错切过机制为主, 而经 760 °C/1000 h 时效试样在室温拉伸时表现出 Orowan 绕过和超晶格层错剪切的混合沉淀强化机制, 在高温拉伸时表现出位错切过和超晶格层错剪切的混合机制。

仅发表论文

E01-PO01

Effect of particle size on preparation of Zr-based amorphous alloys by SPS sinteringXiaohong Su¹, Wei Liu¹

1. Naval University of Engineering

Three kinds of Zr55Cu30Al10Ni5 amorphous alloy powders with different particle sizes were sintered by plasma hot pressing (SPS) method, and bulk amorphous alloys were prepared. The densification mechanism of amorphous alloy powders in SPS sintering was analyzed by punch displacement, density test of sintered bulk and morphology observation. The results were obtained that in the early stage of sintering, the powder was densified mainly by mechanical movement and particle rearrangement, and the densification effect of small particle size powder was better. With increasing sintering temperature, the densification of powders with small particle size was mainly through Joule heating effect, while the densification of powders with large particle size was mainly through plastic deformation in the supercooled liquid region. Under the same sintering conditions, the sintered density of amorphous powder decreased with the increase of particle size. For powders with larger particle size of 106~250 μm , the hardness of the bulk sample increased due to the precipitation of nanocrystalline.

E01-PO02

火箭发动机喷管制造技术发展浅析张印¹, 张伟刚²

1. 中国科学院大学

2. 中国科学院过程工程研究所

研究了火箭发动机喷管的主要结构和材质, 归纳总结现有制备技术方式及材质演变过程。并对当前已有增材制造技术应用实践进行简要分析, 与传统制备方式进行横向对比, 得出以后应给予关注的发展方向, 指导未来关于该方面的进一步研究。

E01-PO03

Composition Distribution Simulation of Al-Cu-Mg-Ag Alloy during Solidification based on Phase-Field MethodLinghao Chen¹, Hong Zhang¹, Shiqing Zhu¹

1. University of Science and Technology Beijing

Al-Cu-Mg-Ag alloys are widely used in aerospace due to their excellent heat resistance, high specific strength, and good machinability. In solidification, the compositional distribution and segregation of the alloy play an

important role in its properties. Therefore, in this paper, the solidification phase field model was established by using the phase field method to simulate the compositional distribution of the alloy after solidification. The experiments show that the solutes are expelled during the advancement of the interface to the liquid phase, and that the content of each element is higher in the intergranular than in the intragranular, with the most severe enrichment of Cu, which exists in the form of θ -phase, and a lesser enrichment of Si, with respect to the Mg and Ag elements. The experimental results are in full agreement with the pattern predicted by simulations.

E01-PO04

粘结剂喷射打印钛合金的组织性能研究

黄树东¹, 李飞¹

1. 上海交通大学

粘合剂喷射打印是当今工业中使用的一种增材制造技术, 它使用粘合剂将粉末选择性地粘合在粉床上。对于粘合剂喷射打印部件来说, 打印参数和后处理工艺对于提高材料的关键性能(例如密度、机械性能)是必要的, 但打印参数和后处理的最佳匹配和机理尚不清楚。本研究旨在加深对打印参数、粉料配比以及烧结过程如何影响 Ti-6Al-4 V 粘合剂喷射打印零件的致密度和机械性能演变理解。结果表明, 烧结温度和保温时间对零件的密度和机械性能影响较大, 而打印参数和粉料配比的影响较小, 这可能是零件由于烧结过程产生的致密化过程变化所致。当前关于粘结剂喷射成型的双峰粉末使用我们提出了简单快捷的配粉优化方式, 极大的提升了工艺优化效率。烧结温度和时间与零件的最终性能通过正交实验得出了最近的烧结方案, 获得了较宽的工艺窗口, 为指导粘结剂喷射打印钛合金产业化生产提供了重要参考。

E01-PO05

粘结剂喷射打印成型 TiAl 合金的微观组织演变与性能研究

张耀中¹

1. 上海交通大学

发展轻质、高强韧、耐高温的高承温热端零部件是航空航天领域的重要战略目标, TiAl 合金材料具备良好的高温比强度、耐腐蚀和抗蠕变性能, 但室温塑性与热变形能力不高。传统工艺在材料的结构设计、研发周期与制造成本方面已无法满足更高的要求, 并且激光/电子束增材制造在成型过程中极易出现开裂、孔隙、组织不均匀等问题。粘结剂喷射打印具有成型速度快、无复杂的熔化与凝固过程等特点, 成为极具发展潜力的 TiAl 合金增材制造方法。本研究探究了 TiAl 合金体系中粉末粒度与流动行为的关系, 利用化学方法进行表面处理改善了其流动行为, 探究了打印过程中粉末床堆积密度、打印层厚、粘结剂喷射量等工艺参数对素坯的性能影响规律。研究表明, 在粉末床堆积阶段对粉末进行表面处理可以有效提高素坯强度, 灵活的调控打印层厚和粘结剂喷射量结合烧结工艺可以实现强度与塑性的良好匹配, 最终获得了组织均匀、性能良好的 TiAl 合金, 实现了轻质高性能的 TiAl 合金构件的制造。

E01-PO06

Simulation Study on the Diameter Expansion of Spinning Cylindrical Parts

Haibao Wu¹, Degui Liu¹, Jianfei Wang¹, Jun Tian¹

1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China

Spin forming is a highly effective process for shaping cylindrical parts, yet there are few reports on the simulation of the relationship between spin forming process parameters and the quality of the cylindrical parts. To further explore the impact of various coupled spin forming parameters on the quality of cylindrical parts. The material studied in this paper is 5A06 aluminum alloy, and this study utilized Python to develop a secondary plugin for Abaqus, establishing a spin forming simulation Abaqus plugin. Using the orthogonal method in Isight for experimental design, the influence of major spin forming parameters on the target variable, Diameter expansion ratio, was determined. Finally, Isight was used to drive Abaqus to optimize the feed ratio process parameter. The results indicate that feed ratio, pass reduction rate, forming angle of the spinning wheel, and spinning wheel fillet radius significantly affect the expansion ratio. Additionally, to ensure the subsequent pass spin forming of the cylindrical parts, a certain expansion ratio must be controlled. The simulation results of this study show that when the feed ratio is between 1 and 1.5, the expansion ratio can be controlled between 18.6% and 6.9%, providing valuable result for precision spin forming of cylindrical parts.

E01-PO07

挤压铸造中压力对 Al-12Si 合金组织偏析及力学性能影响

李龙飞^{1,2}, 刘相廷^{2,3}, 张洋^{1,2}, 左玲立^{1,2}, 赵薛生^{1,2}, 陈林^{1,2}, 梁君宁⁴

1. 先进成形技术与装备全国重点实验室, 北京
2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083
3. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024
4. 河北丰维机械制造有限公司, 邢台 154500

在挤压铸造工艺中, 压力对于铸件成形性、内部组织及力学性能至关重要。合适的铸造压力既可以保证铝合金液充填完整, 铸件内部组织致密, 又能延长模具使用寿命, 减轻压铸机负荷。本文以 Al12Si 合金为实验材料, 选取自设计的挤压铸造试棒模具, 研究铸造压力对合金微观组织、偏析缺陷及力学性能的影响规律, 在研究中使用模流分析软件对金属液在模具中充填及凝固过程进行模拟, 以进一步分析说明铸件缺陷形成原因。研究结果显示: 铸造压力的提高可以显著改善合金液内部的流动情况, 消除铸件表面流痕、分层等铸造缺陷; 在间接挤压铸造工艺中, 铸造压力的提高对铸件内部 α -Al 枝晶尺寸及形貌无明显改善, 铸造压力的增加可以明显改善铸件料饼的补缩能力, 进一步减少并消除铸件内浇口附近缩松、缩孔缺陷; 然而, 当铸造压力超过 110 MPa 时, 合金微观组织中出现明显的共晶带偏析, 随铸造压力进一步提高, 组织偏析倾向更加严重, 致使铸件不同位置力学性能具有显著的差异性。

