



# 中国材料大会 2025

## 暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025  
福建 厦门

**E16-先进材料智能成形与加工**

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



## E16. 先进材料智能成形与加工

分会主席：周华民、李宁

### E16-01

最终交流类型：主题报告

#### 连续碳纤维热塑性复材蜂窝夹层构件板/芯/板一体化精准成形技术

王福吉

大连理工大学

面向我国新一代大型飞机、在轨卫星等高端装备制造对更轻质、更高性能蜂窝夹层构件的迫切需求，针对现有蜂窝夹层传统材料及分体式制造工艺导致其成形精度低、性能差等问题，提出了连续碳纤维热塑性复材蜂窝夹层构件板/芯/板一体化成形方法。发明了轱辘双向施压的连续纤维预浸丝材制备方法，提出了丝材制备温压速同步优化策略；提出了“邻边交错互约束”的蜂窝芯子路径规划方法，开发出“路径交错-参数时变”的芯子高质高效成形策略；发现了线性短链聚合物可促进高分子量聚合物的扩散行为，提出了共混聚合物层间增强的复材成形方法。在此基础上，研发出连续纤维预浸丝材制备装置、以及系列连续纤维复材蜂窝一体化成形装置，开发出连续纤维专用的路径规划软件，形成了涵盖“丝材制备-路径规划-熔融沉积”全流程工艺链和设备链，实现了多层蜂窝夹层结构、异形桁架等连续纤维热塑性复材典型结构的高质量成形，助力航空航天领域新型高端装备的性能跃升。

### E16-02

最终交流类型：邀请报告

#### 基于光纤-压电传感的复合材料液体成型过程监测

王奕首

厦门大学

### E16-03

最终交流类型：口头报告

#### 用于无人机飞行控制的应变/压力双模触觉传感器智能手套

尹晓红<sup>1</sup>，杨梓凯<sup>1</sup>，张启浩<sup>1</sup>，刘晓华<sup>2,\*</sup>

1. 城市交通与物流学院
2. 机械与自动化工程系

针对传统无人机（UAV）控制系统在复杂环境中操作复杂、响应迟缓与灵活性不足等问题，本研究提出了一种基于手指按压操作的无线感应手套系统，实现了对无人机飞行的精准实时控制。该手套集成了自研的超灵敏双模态电子皮肤（TMES），具备对压力与应变的同时感知能力，且信号间无交叉干扰。所构建的 TMES 基于聚氨酯（TPU）/多壁碳纳米管（MWCNT）复合材料，采用仿生微锥结构的柔性聚二甲基硅氧烷（PDMS）与微裂纹导电网络的互锁构型，展现出优异的力学响应性能，包括应变诱导的正电阻响应与压力诱导的负电阻响应（灵敏度为 $-0.14004 \text{ kPa}^{-1}$ ，压力范围  $0-2.5 \text{ kPa}$ ），并在超过 10,000 次循环加载中表现出卓越的稳定性和重复性。系统验证表明，该电子皮肤可高精度识别脉搏、心跳、呼吸等生理信号及关节动作，并在多种动态条件下保持一致性能。基于该电子皮肤构建的无线感应手套已成功应用于灾害救援与高层递送等复杂场景中的无人机飞行任务，展现出在未来人机交互与智能感知领域的广泛应用潜力。

**E16-04**

最终交流类型：口头报告

**天然高分子材料表面溶解增塑的界面融合机理与连接性能解析**

乔海玉

苏州大学

以纤维素为代表的天然高分子材料具有可生物降解、力学性能优异等优点，被认为是解决石化塑料污染最有前景的材料之一。然而，天然高分子材料由于氢键作用导致熔融温度与分解温度接近，塑性成形困难。为此，本研究提出了表面溶解增塑的成型方法。以纤维素和竹材为研究对象，系统探讨了基于溶剂诱导的表面溶解增塑机制及其对界面连接性能的影响规律。通过设计梯度溶解实验，揭示了离子液体对纤维素溶胀溶解特性，以及竹材微/纳纤维的原位塑化重组过程。实验表明，全纤维素复合材料的拉伸强度达到 90MPa，全竹复合材料的剪切强度是树脂胶黏界面剪切强度的 2 倍。本研究建立的基于表面溶解增塑的宏观三维界面连接模型，为天然高分子材料的多尺度界面工程提供了理论依据，在生物基复合材料制造领域具有重要应用价值。

**E16-05**

最终交流类型：口头报告

**电刺激 PVC 凝胶驱动器变形响应微观结构演变原位表征及性能调控**

李茂源 1\*, 黄建建 2, 晋刚 2

1. 厦门大学航空航天学院

2. 华南理工大学机械与汽车工程学院

PVC 凝胶电刺激驱动器以其快速响应、大变形和易控性等优势，在人机交互、康复医疗与机器人等领域展现出巨大潜力。然而，其高驱动电压 (>1 kV) 存在安全隐患，且电刺激过程中凝胶机电特性的动态演变规律尚不明确，制约了其应用拓展。为此，本研究构建了拉曼光谱、阻抗谱、电流变等原位表征平台，系统探究了 PVC 凝胶在电刺激下力学与电学性质的动态变化。研究表明：增塑剂迁移达动态平衡后，在凝胶近阳极区域形成稳定的“电荷-增塑剂富集层”，促进增塑剂迁移与电荷转移可有效降低驱动电压。基于此，引入阴阳离子体积差异显著的离子液体三己基十四烷基氯化磷（大阳离子/小阴离子），促进增塑剂迁移、降低富集层模量，将驱动电压显著降至 200 V。此外，发现离子液体可以实现静电力粘附与电化学协同粘附机制，赋予离子型 PVC 凝胶稳定可逆的电粘附性能。研究成果为开发低电压、高性能柔性驱动器提供了新策略。

**E16-06**

最终交流类型：口头报告

**液体成形工艺中机织物预成形形变仿真研究**

陆兴, 周何乐子, 周华民

华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室

液体成形工艺作为复合材料制造领域的关键技术，其工艺过程可分为预成形，树脂浸润，和固化制品脱模三个核心阶段。机织物在预成形发生变形甚至产生褶皱等缺陷，对后续的树脂浸润和制品性能有显著的影响。因此，精确预测和控制预成形阶段的形变行为是实现高性能复合材料构件制造的关键环节。

本文对机织物预成形的变形机制开展深入研究，建立了描述其变形行为的本构模型，并基于本构模型模拟了机织物预成形的变形和褶皱。基于自主设计的实验夹具，全面测试了机织物的拉伸、剪切、弯曲和压缩力学行为。对于不同厚度尺寸的机织物预成形，提出了两种数值解决方法：对于薄机织物，建立了一

种考虑膜和弯曲行为的超弹性模型，可有效捕捉薄机织物预成形的褶皱；针对厚机织物，建立了全面考虑膜、弯曲和压缩行为的数值方法，可有效模拟褶皱形态。研究结果可为液体成形工艺中预成形缺陷的预测与控制提供技术支撑。

### E16-07

最终交流类型：邀请报告

#### 增材制造高性能铝合金材料研发及应用

李瑞迪\*

中南大学

### E16-08

最终交流类型：邀请报告

#### 高塑性镁合金织构调控及加工技术

王利飞\*

太原理工大学

针对镁合金塑性差，难以在 150° C 以下相对低温条件成形大变形 构件，高温成形组织粗化降低服役性能问题，提出了预置初始拉 伸孪晶切割组织细化晶粒，进一步保留孪晶结构，引入可控剪切 变形对镁合金初始孪晶取向二次优化，最大程度促进基面滑移开 动，改善其塑性的剪切应变调控初始孪晶取向增塑理念。研究了 剪切应变诱导初始孪晶取向二次调控机制，获得初始孪晶取向精 确控制关键工艺参数及准则，澄清了细晶镁合金初始孪晶取向调控可能开动的晶界滑移、位错滑移及交互作用对微观结构及取向 演变影响机理，阐明了晶粒尺寸效应，揭示初始取向调控的镁合 金增塑本质并构建本构关系模型，进一步指导了相对低温成形镁 合金薄壁管。本研究为镁合金织构控制工程提供新思路，为镁合金构件相对低温成形提供理论及实践依据。

### E16-09

最终交流类型：口头报告

#### 冷喷涂增材制造镁/铝双金属热变形工艺路径智能规划方法

龙锦川<sup>1</sup>，何道广<sup>1</sup>，蔺永诚<sup>1</sup>，王新云<sup>2</sup>，夏琴香<sup>3</sup>

1. 中南大学机电工程学院
2. 华中科技大学材料科学与工程学院
3. 华南理工大学机械与汽车工程学院

在航空航天、交通运输等领域，高端装备关键零件的设计制造日益倾向于采用兼具轻量化、高比强度及良好耐腐蚀性的镁/铝双金属，以适应高温高压、强腐蚀等极端服役环境的需求。传统的轧制工艺虽然可以实现双金属材料的高效制备，但轧制过程结合界面处的氧化现象难以避免，且形成的硬脆金属间化合物十分不利于后续的加工变形。目前，热变形被视为难变形金属零件制造的重要技术手段。但因镁、铝存在力学及物理性能差异，热变形过程极易出现变形不均，界面开裂失效等缺陷，并受到变形温度、应变速率和应变等多重因素的影响。针对上述挑战，本研究先通过冷喷涂增材制造方法实现镁/铝的无氧化机械连接，再围绕该新型双金属的热变形行为及热加工性能开展研究。提出深度强化学习驱动的热变形工艺路径规划方法，基于深度确定性策略梯度算法构建智能体模型，通过与世界模型环境进行交互学习以最大化累计奖励策略，克服传统基于热加工图仅能获得离散应变工艺窗口的局限性，实现其热变形全过程最优工艺路径的自主规划与决策，这对于镁/铝双金属零件的精准成形制造具有重要的理论价值。

**E16-10**

最终交流类型：口头报告

**高强高塑镁合金微观结构构筑及性能调控机理**

柴方, 冯建强, 韩星会, 胡轩, 华林

武汉理工大学

镁合金作为最轻的金属结构材料, 其强度与塑性协同提升是其当前研究的关键挑战之一。本文针对高强高塑镁合金微观结构设计与性能调控机理展开系统研究, 通过多尺度结构构筑与变形机制优化, 突破传统镁合金强塑失配瓶颈。采用多自由度加载成形技术, 引入径-周向耦合的大剪切变形, 构建了由粗晶和细晶组成的双峰组织, 激活了非基面滑移, 实现了镁合金强度与塑性协同提升。高强度的原因主要在于双峰组织导致的异质变形硬化、加工硬化以及细晶强化, 高塑性的原因主要在于双峰组织协调变形与基面织构显著弱化。本研究为高强高塑镁合金的微观设计提供理论依据与技术指导, 推动其在轻量化等领域的应用。

**E16-11**

最终交流类型：口头报告

**基于高熵合金改性的多中间层复合连接策略实现高温合金接头的卓越强塑性协同**

袁琳, 杨涛

香港城市大学

**E16-12**

最终交流类型：邀请报告

**自生多元颗粒强化钛基复合材料超塑性变形与应用**

韩远飞\*

上海交通大学

**E16-13**

最终交流类型：口头报告

**超高强韧异质纳米孪晶马氏体钛合金**

刘乐华, 敖子翔

华南理工大学

马氏体和纳米孪晶因其显著的强化能力而被广泛关注, 但通常以牺牲韧性为代价。在本研究中, 我们以 Ti-6Al-4V 合金为模型材料, 构建了一种具有成分异质性的纳米孪晶马氏体结构; 特别地, 该结构包含富 V 的纳米孪晶马氏体区域。研究发现, 这种结构化的成分异质性不仅可以实现对钛合金的强化, 还可以通过富 V 纳米孪晶马氏体区及孪晶界处的  $\langle c+a \rangle$  位错激活, 改善了变形协调性。借助纳米孪晶所引发的强化效应与富 V 纳米孪晶马氏体所提供的应变协调能力的协同作用, 所制备的 Ti-6Al-4V 钛合金的屈服强度高达 1.2 GPa, 同时兼具 17.5% 的拉伸延伸率, 打破了强度-塑性权衡关系, 其强塑积 (20.4 GPa %) 约为商用锻造 Ti-6Al-4V 合金的两倍。该成分异质性纳米孪晶马氏体策略为开发兼具高强度与高韧性的钛合金及其它合金体系材料提供了一种新思路。

**E16-14**

最终交流类型：口头报告

**超声时效强韧化铝合金及其机理研究**

李足

广州大学

为了克服铝合金在传统时效处理后，其强塑性难以协同这一问题，本研究采用了一种新型超声波辅助时效处理方法，通过施加不同时间下的超声振动加载，发现 2024 铝合金的微观结构随着超声时间的增加而逐渐演变。研究表明，经过 15min 超声辅助加载后，2024 铝合金的屈服强度和极限抗拉强度分别提升至 425.18 MPa 和 534.87 MPa，相比于原始态，分别提升了 58% 和 25%，同时其延伸率也得到逐步提升。进一步分析表明，超声诱导的 S 相 (Al<sub>2</sub>CuMg) 沉淀物是强度提升的主要因素。此外，小角度晶界 (LAGBs)、位错与 S 相的协同作用同步提高了合金的塑性。该研究提供了一种新型且高效的能够协同提升铝合金强塑性的时效方法。

### E16-15

最终交流类型：口头报告

#### 多尺度增强钛基复合材料设计与强韧化

王帅，黄陆军，耿林

哈尔滨工业大学

通过多尺度增强相的设计可以有效地实现钛基复合材料强度与塑韧性的协同提升。本研究首先设计了具有微米-纳米双尺度 TiB 增强相的 TiB/TC4 复合材料。结果表明，具有双尺度增强相的复合材料表现出比单一微米或纳米 TiB 增强复合材料更优异的强度-塑性综合性能。分析认为，这与纳米 TiB 高效强化基体、微米 TiB 强化晶界以及双尺度 TiB 细化基体组织有关。在此基础上，进一步通过热等静压方式设计制备了纳米 TiB+纳米硅化物增强 TA15 复合材料。该材料表现出远超 TA15 基体的强塑性和高温强度，而断裂韧性则优于传统微米 TiB 增强复合材料。分析认为这与纳米 TiB 促进 c+a 位错的开动有关。进一步地，设计了包含纳米 TiB 和固溶氧(O)原子强化的 TA15 复合材料，其粉末冶金态材料表现出超过 1200MPa 的拉伸强度，延伸率近 10%，在 700°C 强度超过 430MPa。

### E16-16

最终交流类型：口头报告

#### 超声振动复合压荷对 Tip/AZ31 复合涂层界面特征及性能影响机制

桂珍珍<sup>1</sup>，朱科颖<sup>1</sup>，刘鹏禧<sup>1</sup>，张涛<sup>1</sup>，刘德健<sup>2</sup>

1. 广州大学

2. 华中科技大学

在镁基复合材料(MMCs)领域，同时提高硬度和强度而不牺牲塑性是一项重大挑战。采用强度塑性均高于镁基体的 Ti 颗粒增强镁基复合材料，在塑性变形过程中有利于 Ti 颗粒与镁基体协调变形。本研究在激光熔注法制备 Tip/AZ31 复合涂层上施加超声振动复合压荷处理，通过超声压荷作用，促进了涂层中 Ti 与 Mg 之间微界面处物相演变，构建良好的冶金界面结合，其中 Mg/TiAl<sub>2</sub> 在界面处形成了半共格取向关系。结果表明，在压荷为 1.5KN、时间为 10min 的超声压荷条件下，Tip/AZ31-UC 复合涂层的 YS 和 UTS 分别达到 239.1MPa 和 284.7MPa，相较 Tip/AZ31 复合涂层分别提升了 46.2% 和 32.9%，而与 AZ31 基体相比分别提高了 281.3% 和 98.9%，同时保持了较高的 EL(9.1%)，表现出优异的综合力学性能。同时，显微硬度相较于 AZ31 基体(~ 45 HV)和 Tip/AZ31 复合材料(88.4HV)分别提高了 123.3% 和 13.7%。优异的综合性能归因于超声振动复合压荷处理后晶粒细化以及纳米级界面析出相的强化效果。

### E16-17

最终交流类型：主题报告

#### 新能源乘用车大型复杂薄壁构件一体化压铸成型研究

姜巨福

哈尔滨工业大学

针对新能源乘用车领域大型复杂薄壁铝合金构件成形制造需求，采用有限元仿真、正交实验和响应曲面优化方法以及一体化压铸成型工艺实验对大型复杂薄壁铝合金后地板和前机舱构件一体化压铸成型工艺进行了系统研究，成型了 1.8 米级后地板构件以及 1.5 米级前机舱构件。后地板工艺参数对缩孔缩松体积的影响顺序为：浇注温度>模具温度>快压射速度>慢压射速度。最佳工艺参数：浇注温度 693.5 °C，模具温度 186.7 °C，快压射速度 5.0 m/s，慢压射速度 0.40 m/s。局部挤压实现强制补缩，提升成形质量。后地板构件五个区域抗拉强度分别为：265.3 MPa、238.8 MPa、190.1 MPa、207.0 MPa 和 232.6 MPa，平均延伸率分别为：8.6%、9.2%、4.6%、4.6%和 13.0%。前机舱工艺参数对缩孔缩松体积的影响顺序：模具温度>浇注温度>慢压射速度>快压射速度。最佳工艺参数为：浇注温度 690 °C，模具温度 160 °C，快压射速度 2.0 m/s，慢压射速度 0.4 m/s。前机舱前各个区域的平均抗拉强度为：194.4 MPa, 228.1 MPa 和 220.0MPa，平均延伸率分别为：3.3%，4.8 %和 8.0%。

### E16-18

最终交流类型：邀请报告

#### 基于低成本锆酸钙面层的陶瓷型壳与钛合金熔体界面反应研究

刘时兵

中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司

### E16-19

最终交流类型：口头报告

#### 管型材弯曲回弹在线监测与智能补偿控制

马俊<sup>1</sup>，Torgeir Welø<sup>2</sup>，李恒<sup>1</sup>

1. 西北工业大学材料学院
2. 挪威科技大学机械与工业工程系

管型材构件是飞行器、轨道交通及新能源汽车等领域的关键高性能轻量化构件。回弹是管型材弯曲成形中的难以避免的缺陷，严重影响构件精度、产品一致性及成形智能化集成，是管型材构件智能成形制造亟待解决的核心问题。本文首先综述了管型材成形过程原位感知、在线监测与过程智能控制技术的最新进展。进而，针对管材数控绕弯与型材柔性拉弯两个典型工艺过程，建立了弯曲过程成形力实时在线监测方法，提出了实时成形力-回弹关联模型，发展了基于成形力在线监测的回弹智能补偿方法，试验验证了该方法的可行性与回弹控制精度。

### E16-20

最终交流类型：口头报告

#### 通过简化工艺调节纳米析出行为实现 Cu-Ni-Si 合金的高强度和导电性

薛文丽，解国良，刘雄军，刘新华

北京科技大学

### E16-21

最终交流类型：口头报告

#### 通过粉末热挤压技术制备出高强韧含 Cu 的高熵合金

谢舜福<sup>1,2</sup>，柯于斌<sup>2,3,\*</sup>，张卫文<sup>1</sup>

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院
2. 散裂中子源科学中心
3. 中国科学院高能物理所

高熵合金由于独特的“四大效应”而具有优异的力学性能、耐磨性能以及良好的腐蚀性能等，在很多领域有着广泛的应用前景。强度-塑性矛盾问题是结构材料研究者致力解决问题，最近研究表明异质结构、多重纳米结构和短程有序导致的浓度起伏均能显著提高高熵合金的强塑性。本工作采用粉末热挤压工艺，拟得到不均匀的再结晶以及非再结晶组织，随后进一步优化热处理，得到多重纳米结构和调幅结构。实验样品通过(FeCoCrNi)<sub>85</sub>(AlCu)<sub>15</sub>球形粉末，填充到直径为 30 mm 的 45#包套中，随后冷等静压将其压实，再进行热挤压，得到直径为 10 mm 的棒材。样品通过不同温度的热处理，采用了 EBSD、XRD、SANS、TEM 等表征手段，最后进行了室温拉伸和显微硬度的力学性能测试。结果表明，采用粉末热挤压和热处理制备了一种简单立方 FCC 结构(FeCoCrNi)<sub>85</sub>(AlCu)<sub>15</sub>高熵合金，该合金由非再结晶晶粒和再结晶晶粒组成，基体均匀分布着密集有序的 L12 纳米析出相和调幅结构。此外，还观察到 FCC1、FCC2 等纳米析出相。该合金具有优异的拉伸性能，其屈服强度和抗拉强度分别为 1.1GPa 和 1.3GPa，均匀延伸率为 11 %。

### E16-22

最终交流类型：邀请报告

#### 高强韧抗冲击结构材料的跨尺度仿生制造

黄威\*

华中科技大学

### E16-23

最终交流类型：口头报告

#### Inconel 718 镍基高温合金在增减复合制造过程中微观结构与残余应力的演变

刘昌煜，宁志良，孙剑飞，黄永江\*

哈尔滨工业大学

### E16-24

最终交流类型：口头报告

#### 原位调控 LPBF NiTi 的形状记忆特性

马博文，李冬冬\*

华中科技大学

近年来，通过激光粉末床熔融技术(LPBF)制备高性能 NiTi 引起了人们的广泛关注。但是，LPBF NiTi 通常由于其特殊的热历史而表现出表现较差的形状记忆效应。本研究通过舱口间距 (hs) 调控 LPBF NiTi 内部相含量，并结合两种成熟的制备参数（低功率低速度和高功率高速度）全面且系统地研究其形状记忆效应。在高激光功率和扫描速度下，最大形状记忆率达到 93.5%。此外，讨论了形状记忆前后的马氏体孪晶密度和取向的显著差异，分析其对形状记忆效应的影响机制，认为高密度的{111}I 型马氏体孪晶对形状记忆效应具有促进作用。同时，通过原位调控手段对 Ti<sub>4</sub>Ni<sub>2</sub>O<sub>x</sub> 的形貌和织构，获得了更为优异的形状记忆效应和首次形状回复率。这项工作对 LPBF NiTi 的微观结构和宏观性能调控提供了重要见解，为制造高性能 LPBF NiTi 提供了有力的参考。

## 闪报

## E16-01

**Ti60 合金锻件微观组织全场预测与性能一致性评估数字模型**

李鑫哲, 王志磊, 谢建新

北京科技大学

传统锻造工艺实时调控难度大, 导致产品质量稳定性差、合格率低。基于大数据与人工智能的数字化锻造技术是提升锻造工艺智能化水平的有效途径, 而工艺数字模型是实现性能预测的关键。本研究以航空发动机高压压气机盘用 Ti60 合金为对象, 选取常规锻造温度范围内的四种典型工艺参数组合, 开展缩比锻造实验, 并分析 1/4 截面六个典型位置的微观组织演化。结合等温热压缩实验 (变形温度 800~1200 oC 和应变速率 0.001~10 s<sup>-1</sup>), 探究了 Ti60 合金的热变形行为, 构建了 60%应变下的热加工图及峰值应力条件下的本构方程, 分析了热压缩样品中心区域的微观组织。基于所建立的本构方程, 采用 Deform 软件对不同工艺参数组合进行数值模拟, 提取了 EBSD 检测点的等效应力、等效应变及温度数据。进一步结合支持向量回归 (SVR) 模型, 构建多物理场-组织形貌特征-性能关系模型, 并基于实验数据开发硬度场预测模型, 为 Ti60 合金锻造工艺优化提供精准预测能力。本研究为 Ti60 合金锻造工艺优化及数字化锻造技术的发展提供了理论支持与实践指导。

## E16-02

**热变形实验与 DAMASK 协同驱动的微观组织演变研究与性能预测策略**

孙威, 王志磊, 谢建新

北京科技大学

**墙报****E16-P01****纤维复合材料液体成形工艺仿真技术**

周荣善, 周何乐子, 周华民\*

华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室

本研究聚焦纤维复合材料液体成形工艺过程仿真技术, 采用多孔介质流动模型及可压缩液体体积两相流方法, 能够有效预测树脂浸润纤维过程中流动前沿发展、压力分布情况及气泡反包位置等信息, 从而辅助优化模具设计及工艺参数。展示了仿真技术在提高生产效率和降低工艺成本方面的优势。

**E16-P02****纤维复合材料-金属连接结构服役分析及失效仿真**

刘梓楠, 周何乐子, 周华民\*

华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室

根据现有纤维复合材料构件在各领域的运用情况, 复合材料与金属材料的连接结构往往成为决定整体结构性能的关键区域。不同于现有研究多集中于复合材料本身, 本研究聚焦于复合材料连接结构的整体性能, 关注不同连接工艺对连接结构性能的影响, 同时针对性建立仿真失效预测方法, 实现复合材料连接结构性能的精准预测。

**E16-P03****纤维增强树脂基复合材料液体成形工艺的固化变形仿真研究**

聂志伟, 周何乐子, 周华民\*

华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室

纤维增强树脂基复合材料成形过程中残余应力的产生加剧了构件的固化变形, 限制了其推广应用。与同为常见成形工艺的热压罐工艺相比, 液体成形工艺存在树脂流动浸润纤维的过程, 多物理场耦合现象显著, 其温度场、固化度场分布将更加不均匀, 复合材料与模具界面的相互作用规律也无法直接套用, 固化变形机理尚不明晰。本研究通过建立流场-温度场-固化度场耦合模型研究流动对后续固化变形的影响, 并自主搭建测试平台研究成形过程中复合材料与模具间的相互作用规律, 实现固化变形的准确预测。

**E16-P04****高强韧钛合金的高通量优选**

王子熙, 高帅, 张猛, 李宁\*

华中科技大学

新一代高端装备对超高性能钛合金需求迫切, 但现有钛合金高强韧的力学性能不足、过高的成本等问题是高强韧钛合金的研发过程中面临的难题。传统的金属材料研发方法存在工艺研究周期长、成本高等问题, 难以满足高端关键金属材料高效、低成本的设计要求。结合多靶磁控溅射共沉积技术、纳米压痕技术高通量制备与表征合金成分库, 建立高强韧成分筛选模型并辅以机器学习快速筛选高强韧钛合金成分区间的方法。通过磁控溅射制备具有成分梯度的钛合金薄膜, 通过薄膜的力学性能优选成分进行块体验证。再结合薄膜和块体的力学性能和成分表征数据以及物化参数作为机器学习的输入值, 建立不同算法回归模型, 预测最优成分进行块体验证。由此得出, 各成分性能的横向差异来源于元素成分本身。相对性能可预测, 该类合金力学性能对组织不敏感。建立成分筛选模型, 快速筛选高强韧钛合金成分区间, 建立合金成分-强度-韧性之间的映射关系。“材料集成制备-快速表征”的开发模式, 探索了高通量设计钛合金的可行

性。基于纳米压痕技术建立合金成分-强度-塑性功关系的创新思路，为高通量快速筛选高强韧合金成分提供新途径。

### E16-P05

最终交流类型：墙报

#### 突破高氧含量粉末冶金钛合金强度与塑性的权衡

龙金宝<sup>1</sup>，刘小涛<sup>1\*</sup>，顾及<sup>2</sup>，罗炫<sup>1</sup>，潘科嘉<sup>1</sup>，潘杰<sup>1</sup>，李宁<sup>1\*</sup>

1. 华中科技大学材料科学与工程学院
2. 中南大学粉末冶金研究院

氧元素可提升粉末冶金钛合金 (P/M Ti) 的强度，但一旦含量超过 3300 ppm 会显著损害其塑性。本研究系统探究了氧含量 (0.22-1.40 wt.%) 对粉末冶金 TC4 合金力学性能与变形机制的影响。通过精确控制制备工艺，该氧含量范围内的合金获得了 985-1222 MPa 抗拉强度和 23%-6% 延伸率，突破了强度与塑性此消彼长的长期矛盾。综合表征结果表明：当氧含量为 0.22 wt.% 时，高密度位错（尤其是波浪状位错）与微孪晶协同作用，通过调节 HCP 晶体结构中 c 轴方向的应变实现优异力学性能；当氧含量升至 0.42 wt.% 时，部分波浪状位错向平面位错转变，同时形成纳米级  $\alpha$ - $\beta$ - $\alpha$  层状结构，延缓裂纹扩展而保持良好塑性；氧含量达 0.61 wt.% 时，尽管位错密度降低，但层状  $\alpha$ - $\beta$ - $\alpha$  结构与层错共同维持约 18% 的塑性；当氧含量增至 0.77 wt.%，位错密度从  $8.87 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  显著下降至  $3.54 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ ，导致塑性降至 6%。研究表明，随着氧含量从 0.22 wt.% 增至 0.77 wt.%，固溶强化贡献率从 43.3% 提升至 66.9%，位错强化占比从 25.6% 降至 12.4%，而晶粒尺寸与晶格摩擦应力主导的强化机制基本保持稳定。

### E16-P06

#### 激光粉末床熔融技术制备的 Ti-Ta-Nb-Mo-Zr 耐火材料高熵合金的高温蠕变机理

凤军毅，李宁\*

华中科技大学材料科学与工程学院

实验研究了激光粉末床熔融 (LPBF) 技术制备的 Ti-Ta-Nb-Mo-Zr RHEA 的高温蠕变机理。LPBF 的高冷却速率抑制了大部分元素偏析，但仍存在连续沉淀物 (CP)。与其他传统合金和高熵合金相比，LPBF 制造的 Ti1.5Ta0.5NbZrMo0.5 的最小蠕变速率大大降低，表明高温性能得到显著改善。界面处的位错缠结是在蠕变过程中形成的，并且在位错缠结区域产生新的富含 Zr 的 CP 相。界面位错缠结是位错和两相失配应力相互作用的结果。位错缠结可防止位错进一步切割基体相，这对高温蠕变性能非常有利。同时，这种位错缠结的形成大大加速了新 CP 相的成核过程和生长速度。这项作为设计具有改进的高温抗蠕变性的新型高熵合金提供了一条途径。

### E16-P07

#### 通过用 TaH<sub>2</sub> 替代 Ta 来提高增材制造生物医用 Ti-Ta 合金的微观结构均匀性

吴炼，李冬冬\*

华中科技大学材料科学与工程学院

由于 Ti 和 Ta 两者熔点和密度较大差异 (Ti: 熔点 1668°C, 密度 4.51 g/cm<sup>3</sup>), Ta: 熔点 2996°C, 密度 16.60 g/cm<sup>3</sup>), 在制备 Ti-Ta 合金的过程中, Ta 的难熔性和元素易偏析问题一直是难以解决, 其严重制约了 Ti-Ta 合金的发展。在这项工作中, 我们用氢化钽 (TaH<sub>2</sub> 晶体结构相对不稳定) 取代纯钽 (Ta 晶体结构稳定), 并采用激光增材制造技术制备了组织更均匀的 Ti-Ta 合金。这种方法不仅减少了难熔颗粒, 而且提高了 Ta 元素在 Ti 中的扩散能力。通过优化微观结构均匀性, 这些合金的抗拉强度提高了约 25%, 磨损体积减小,

耐磨性得到改善，并且具有较好的耐腐蚀性能( $0.032 \mu\text{A}/\text{cm}^3$ )。与纯 Ta 相比，添加 TaH2 具有更好的综合性能和实用性，为解决 Ti-Ta 合金均匀化问题提供了新的思路。

### E16-P08

#### 钛铝合金中振动诱导的超位错运动及热加工性能增强

陈真伟，孙明翰\*，李宁\*

华中科技大学材料科学与工程学院

TiAl 合金的热加工性能有限，严重制约了其工程应用的推广。本研究提出了一种经济高效的振动辅助成形方法，以提升其热成形能力。在施加 1.5 Hz 低频振动的热拉伸试验中，铸态 TiAl 合金的伸长率由 39% 显著提高至 82%，表明其热加工性能得到了大幅提升。组织分析表明，振动通过促进大量孪晶形成以及激发  $1/2\langle 112 \rangle$  超位错的运动，显著改变了合金的变形行为，进而促进了动态再结晶的形核和位错的迁移，显著增强了  $\gamma$  相的塑性变形能力。此外，在振动条件下观察到  $1/2\langle 112 \rangle$  超位错直接穿越  $\alpha_2/\gamma$  相界面的现象，表明振动提升了  $\alpha_2$  与  $\gamma$  片层之间的协同变形能力。因此，振动最终提高了 TiAl 合金的热加工性能，并获得了高比例的均匀等轴晶粒。本研究揭示了 TiAl 合金在振动条件下的全新变形机制，为解决其热塑性成形难题提供了一种新途径。

### E16-P09

#### 氢辅助双阶段烧结：实现 TiNb 合金的同时致密化和阻尼增强

姜昱川，李冬冬\*

华中科技大学材料科学与工程学院

Ti35Nb 合金作为一种高性能的  $\beta$ -钛基材料，在航空航天部件、精密仪器减振、汽车阻尼器和生物医学领域具有重要的应用前景。然而，其传统制备工艺面临着能耗高、成分不均匀、密度不足等挑战。为了解决 Ti35Nb 合金粉末冶金过程中 Nb 颗粒不溶、孔隙率高、烧结效率低的问题，开发了一种新的烧结体积双阶段烧结工艺 (Dual-Stage sintering process)。通过氢辅助烧结实验和第一性原理计算的结合，揭示了氢对 Ti-Nb 元素扩散的促进作用，并建立了扩散动力学模型，阐明了氢对 Nb 扩散系数的影响及其机理。在此基础上，对 Ti35Nb 粉末进行预烧结，通过加氢破碎对粉末进行精炼，然后通过压制烧结进行致密化。实验结果表明，优化的 DSS 工艺显著提高了合金密度至 99.32%，消除了未溶解的 Nb 颗粒，提高了机械和阻尼性能。本研究为突破传统熔炼工艺的局限性，实现低能耗、高效率、高均匀性的 TiNb 合金制备提供了一条创新的技术途径。

### E16-P10

#### 钛合金复合表面结构的设计制备及其在防污涂层中耐久性的研究

张雨琪，李宁\*，张诚\*

华中科技大学

针对海洋工程中钛合金因生物相容性引发的严重生物污损及传统防污涂层机械耐久性不足的问题，本文受鲨鱼皮抗污纹理与贝壳体抗冲蚀结构的启发，通过皮秒激光在 TC4 表面构建了跨尺度复合防护结构 H-MPMG。该结构集成仿鲨鱼皮微沟壑 Micro-G 与仿贝壳体四边形凹坑阵列 Macro-P，形成复合协同体系。通过静态抗菌防污实验与动态冲刷磨损测试，系统揭示了该复合结构的多阶段协同防污机制：初始阶段，H-MPMG 上层的 Micro-G 微沟壑结构减缓涂层损耗，随着冲刷和磨损加剧，下层 Macro-P 凹坑结构继续减缓涂层损耗，当对照样品的涂层完全失效时，H-MPMG 仍能通过通过上层 Micro-G 的结构抗菌和下层 Macro-P 凹坑内的化学抗菌协同抑制生物膜形成。研究结果表明，H-MPMG 结构通过多阶段协同机制，显著提升了防污体系的长效耐久性，为海洋工程金属基材料的生物防护提供了“结构 - 功能”一体化的创

**E16-P11**

**基于光学高速成像的激光近净成形熔池行为研究**

倪辰旖, 王天翔, 王传洋, 乔海玉

苏州大学机电工程学院

**E16-P12**

**面向多目标优化的材料加工工艺智能化设计用户界面开发**

邓菁玉

西安建筑科技大学

**E16-P13**

**Terahertz birefringence and anisotropic absorption characteristic of ordered polymer structures for simultaneous orientation measurement in crystalline and amorphous region**

萧浩坤

华南理工大学