



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

E16-先进材料智能成形与加工
E16-Intelligent Forming and
Processing of Advanced Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E16-先进材料智能成形与加工

分会主席：周华民、李宁

最终交流类型：邀请报告

激光冲击强化技术现状、面临挑战和发展趋势

鲁金忠*

江苏大学

晶粒细化和重排是提高关键金属部件拉伸和疲劳性能的有效策略。激光冲击强化（LSP）具有高压（1 GPa 至 1 TPa）、高能（>1 GW）、超快（纳秒级）和超高应变率（>10⁶ s⁻¹）四大显著特点，是极端条件下的表面严重塑性变形强化的有效方式之一，可以产生更深的残余压应力场并形成梯度纳米结构，提升金属及合金的抗疲劳和耐腐蚀性能。该技术目前广泛应用于航空航天、超载车辆、海洋工程、核电等领域。该报告总结了 LSP 技术对金属及其合金的表面完整性、微观结构演化和力学性能的影响；介绍了多能场辅助 LSP 技术及激光冲击波的创新应用；拓展了 LSP 技术的典型工业应用。系统概括了面心立方、体心立方和六方密排等三种晶体结构金属在 LSP 作用下的独特微观结构演变和晶粒细化机制；详细描述了 LSP 技术对不同金属拉伸、疲劳、腐蚀等性能的影响以及多能场辅助 LSP 技术的工作进展。最后，从工艺-结构-性能-应用四个方面对未来 10~20 年 LSP 技术面临的挑战和未来趋势进行展望。

最终交流类型：邀请报告

超薄金属板材微成形工艺理论及其应用

彭林法*

上海交通大学

针对微细薄板成形工艺过程的理论与技术问题，提出了考虑尺度效应的超薄金属板成形的材料、界面摩擦和成形性评价方法，研究了薄板微细成形工艺过程的建模方法，开展了多尺度薄板成形实验研究，发展了微细成形工艺理论；最后面向典型的燃料电池金属极板高精度微成形面临的技术难题，将微细成形工艺应用于超薄燃料电池双极板的开发。

最终交流类型：邀请报告

智能注射成形：数据驱动的产品重量预测与工艺参数优化控制

赵朋*

浙江大学

聚合物材料因其轻质、高强等特性，在国家经济支柱产业与国防军事战略领域中得到了广泛应用。注射成形作为制造聚合物产品的最重要和最有效的过程，占据了现代聚合物行业产量的 80%。实时监测注射成形过程数据、预测产品质量，以及优化工艺参数对产品质量调控至关重要。然而，现有的技术存在成本高、效率低等局限。本研究针对过程信息存在盲区、缺少高精度模型、工艺优化依赖经验三大难题，从熔体状态无损测量、成形过程实时监测、工艺参数自学习优化与精确控制几方面展开研究。具体提出了熔体密度的超声在线测量技术、熔体流动前沿的超声相控阵在线成像方法、数据驱动的过程关键特征提取与重量预测模型、面向产品重量调控的工艺参数自学习优化方法，以及成形温度的精确预测控制方法，最终形成了数据驱动的产品重量预测与工艺参数优化控制方法。本研究对注射成形过程的实时监测、产品质量预测及工艺参数优化进行了深入研究，实现了熔体信息在线无损测量，建立了产品质量的精确预测模型，最终实现了工艺参数的高效优化与精确控制，提高了注射成形的智能化水平，为聚合物产品的高质量生产提供了新思路。

最终交流类型：邀请报告

高性能复杂轻合金构件铸锻复合成形机理与关键技术

姜巨福*¹、王迎²、黄敏杰¹

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院

利用压铸、重力铸造和挤压铸造技术在液态流体充填方面的优势以及锻造技术在微观组织密实方面的优势，提出了轻合金铸锻复合成形新技术，研制了相关工艺装备及专用模具，探究了成形过程强塑性机理。借助数值模拟仿真技术分析了成形过程中速度场、压力场和缺陷特征，为铸锻复合成形模具设计提供了技术支持。利用 3 种镁合金和 2 种铝合金材料进行铸锻复合成形工艺实验研究，优化了过程参数。研究表明：借助整体加载或局部加载的铸锻复合成形技术可以明显降低铸造缺陷，提升成形件的力学性能和服役水平。由于铸锻复合成形中锻造工序的高压密实所产生的缺陷降低、微观组织密实和晶粒细化是导致成形件力学性能提升的主要原因。

最终交流类型：邀请报告

大容量锂离子电池设计与关键制造工艺装备

张云*、陈逸夫、黄天仑、熊若愚、谭鹏辉、李浩然、周华民

华中科技大学

大容量锂离子电池可大幅降低单体数量、提高能量密度，是新能源汽车、船舶等支柱产业“换道超车”的突破口。涂布等核心工艺制造“电化学反应堆”——电芯，很大程度上决定了电池的性能。针对传统电芯结构能量密度与倍率性能难以兼顾的难题，研发出“分级孔-梯度相”协同的设计方法与异构电芯结构，提出反应物质涂层孔隙与相形态厚向优化分布的协同设计方法，采用定向主孔与粒间微孔优化组合，反应颗粒相和导电/粘结剂相梯度分布的异构电芯结构，增强锂离子反应的均匀性，提升高载量电池倍率性能。提出了单层颗粒电极的动力学解耦测量技术，研发出电芯多孔多相真实微结构的显微成像三维重构技术，开发出三维电芯结构-性能仿真方法，突破了传统 P2D 模型无法考虑电芯真实微结构的局限，高倍率下电极性能预测精度提高 50%。针对宽幅均匀涂布难、长距离悬浮干燥稳定性差、长程高速制造精度低等核心工艺难题，建立了浆料黏度模型和涂布流场模拟方法，探明了涂覆不均匀和涂覆缺陷的形成机理，研发接触式涂布模头和风场分布协同的悬浮喷嘴结构等，攻克了双面涂布等工艺，研发出锂电关键制造工艺装备与产线。

最终交流类型：邀请报告

大飞机起落架锻件全流程控温控流工艺设计

赵俊飞、黄亮*、黄佳丰、英超、袁思文、刘可卓、袁蒙、李建军

华中科技大学

摘要：针对大飞机起落架大型锻件模锻时凸起部位充不满、变形载荷过大以及部分区域晶粒尺寸粗大等问题，本文采用基于 NX 软件二次开发的锻件几何模型尺寸参数分析生成方法对全流程制造过程中的大型锻件模型进行统一的自动化生成与修正，结合局部控温控流模锻工艺数值仿真，实现几何参数和成形参数深度协同优化的大型锻件全流程控温控流工艺设计。结果表明，采用飞边局部控流后得到的锻件完全充满模腔，无成形缺陷，飞边槽尺寸具有改变锻件边缘区域坯料流动的效果，一定范围内减少飞边槽桥部高度可以提升锻件边缘凸起部分的充型效果；采用差温模具成形时可以显著降低成形载荷，并改善锻件表面晶粒度的分布情况，其中，成形时最大局部载荷与总载荷由中央镶块的温度决定，通过差温模具技术调控关键区域的温度可实现整个模具载荷力的优化分布；通过对锻件几何参数和成形参数的深度协同优化，得到最优预锻件、预制坯形状和锻件成形时的最佳工艺参数。本文研究的模具飞边控流方法、差温模具控温方法、锻件几何模型尺寸参数分析生成方法解决了大飞机起落架大型锻件工艺优化设计存在的几何参数范围窄、几何参数和成形参数协调困难、工艺优化设计流程冗长等问题，为大型锻件全流程控温控流工艺设计的深度协同优化提供了重要参考。

最终交流类型：邀请报告

钛合金薄壁构件可控应变路径锻造组织性能调控研究

樊晓光*、王俐、詹梅、余嘉文

西北工业大学

钛合金药型罩是一种典型的薄壁回转体类构件，作为聚能装药结构的“心脏”，其性能将直接决定毁伤元对特定目标的侵-爆效应。该构件具有薄壁厚、宽口径的结构特性和细晶、弱织构的高性能需求，这导致传统工艺路径下成形时面临两相演变不协调、微织构突出、组织均匀性难控制和制造成本周期长等诸多挑战。为此，本研究基于钛合金变形行为和组织演变对应变路径的敏感性规律，提出了可控应变路径锻造实现TB6药型罩高性能、短流程成形的工艺思想。结合两级加载路径试验、理论分析和数值模拟等方法，围绕TB6钛合金在变路径加载时的各向异性热变形行为和组织演变开展研究，掌握了材料宏微观演化对应变路径的敏感性规律，揭示了应变路径影响的各向异性变形机制和两相交互作用机理，获得了基于应变路径匹配定向驱动两相协同演化的原理和方法。基于此，设计了多条典型成形工艺路线并开展样件试制，对比分析了不同工艺路径下的构件成形质量、微观组织特征和室温力学性能。并进一步结合动态加载、高速切削和终端靶试试验综合评价了构件在特种服役条件下的性能表现，验证了可控应变路径锻造工艺的有效性和可靠性，为该类产品高效、短流程化制造提供了切实可行的新思路。

最终交流类型：邀请报告

口腔用粉末冶金钛锆合金开发与应用

刘彬*

中南大学

我国种植牙数量年均复合增长率超过 50%，是全球增长最快的种植牙市场之一。但是由于种植体用高性能钛合金制备技术被国外垄断，高端口腔种植体存在被“卡脖子”问题。本研究通过粉末冶金控氧增强及大塑性变形增韧的创新思路，突破了高端种植体用 TiZr 合金强韧化协同调控技术。制备的粉末冶金 TiZr 合金抗拉强度超过 1000Mpa，延伸率达 20%，疲劳强度达 650Mpa，材料力学性能较进口种植体用钛合金全面提升。基于该材料开发了国内首款 TiZr 种植体产品，产品的力学性能较进口同类产品显著提升，同时生物性能、表面性能和临床服役性能与进口产品保持同一水平。该研究基本解决了高端口腔种植体及口腔植入用基材长期依赖进口的问题，促进了我国医用钛合金产业的发展和升级。

最终交流类型：邀请报告

基于喷墨打印的钛合金铸造用无模砂芯制备技术研究

刘时兵*^{1,2}、李重阳^{1,2}、赵军^{1,2}、张志勇^{1,2}

1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司

2. 高端装备铸造技术全国重点实验室

钛合金复杂构件铸造对高性能型芯提出重要需求。钛合金铸造常规型芯采用耐火材料粉料和模具压制成型，制造周期长、成本高，同时受模具制造的限制，较难实现高复杂度型芯制备。3D 打印技术在快速制备型芯方面具有周期短、无模具、可适于复杂型面制造等优势。直接采用浆料或粉料打印陶瓷型芯，在制备大尺寸型芯方面目前存在缩尺大、易变形、开裂等难题。而采用喷墨打印的硅砂型芯难以满足钛合金的高温及高活性的浇注需求。为此，本文基于结合无机砂芯喷墨打印与耐高温陶瓷材料两者优点的思路，开展了钛合金铸造用喷墨打印无模砂芯制备技术研究，通过喷墨打印、浸渗、焙烧等方法制备了无模砂芯，采用扫描电镜（SEM）、强度测试仪等分析了预处理、无机粘结剂浸渗等对型芯外形结构、尺寸精度、强度等的影响，提出了合理制备工艺。研究结果表明，采用喷墨打印制备的无模砂芯在处理前后的尺寸精度偏差均 ≤ 0.3 mm，无明显局部变形，所浇注铸件表面污染层厚度小于 20 μm ，铸件表面无明显线性缺陷存

在，质量良好。采用喷墨打印所制备无模砂芯可应用于钛合金的精密铸造成形。

最终交流类型：邀请报告

增材制造面心立方金属凝固与固态相变协同阻裂与强韧化机制

李瑞迪*

中南大学

激光增材制造在晶粒细化及构件形状复杂度方面具有不可替代的优势，其中以基于粉末床选区激光熔化（Selective Laser Melting, SLM）为代表。SLM 的非平衡冶金及快速凝固给学术界对于超细晶与亚稳组织带来了新认识。目前，SLM 存在问题：增材制造快热快冷和极端非平衡热-流-质过程，使打印易产生微裂纹等冶金缺陷，使得 SLM 件的可靠性受到质疑。造成以上的主要原因，目前 SLM 主要采用传统牌号合金，尚未针对 SLM 特点开发专用合金。事实上，裂纹的形核和扩展可以看做是与材料中热应力有关应变能消耗的一种途径。基于此，我们考虑是否可以通过引入其他途径而不是裂纹的形核和扩展来吸收应变能，从而达到抑制裂纹的目的。故本研究中，提出利用层错能效应抑制 SLM 裂纹的形成，通过调控合金层错能，使打印过程中原位形成的晶体缺陷（层错/孪晶等）消耗样品内部的残余应力，因此抑制裂纹形成。为证实本研究，分别对单相 FeCoCrNi 以及具有更低层错能的 Al_{0.1}CoCrFeNi 高熵合金体系进行 SLM 研究。并在这一研究基础上，将层错能效应抑制 SLM 合金中热裂纹的思路扩展到其他合金体系，为增材制造无裂纹合金提供新的思路。

最终交流类型：邀请报告

高强度 7055 铝合金热变形过程动态再结晶与动态析出行为

张存生*

山东大学

Al-Zn-Mg-Cu 系合金（7xxx 系）因其密度低、比强度和比刚度高以及优良的耐腐蚀性能等特性，已成为航空航天和轨道交通领域最重要的结构材料之一。热变形工艺（锻造、轧制和挤压等）是获得 7xxx 系铝合金结构件的重要手段，而该类合金复杂的元素构成会导致热变形过程中多种变形行为（动态回复、动态再结晶和动态析出）同时发生，使得材料的热变形行为极为复杂且难以控制。目前国内外关于 7xxx 系铝合金热变形行为的研究仍不完善，特别是关于多种变形行为之间耦合作用机制和物理模型等方面的研究明显薄弱，需完善和发展其热变形过程的基础物理机制和理论。

本课题选取高强 7055 铝合金为研究对象，借助 Gleeble 热/力模拟试验机开展了一系列热变形模拟实验，并结合 EBSD、TEM 和 SAXS 等先进表征手段，重点表征并分析了该合金在热/力耦合作用下的动态再结晶、动态析出行为以及二者间的相互作用机制；并基于实验结果建立了耦合粘塑性自洽晶体塑性模型（VPSC）、连续动态再结晶模型（CDRX）和动态析出模型（KWN）的统一模型，实现了对于该合金热变形过程的全面描述。主要研究结果有：（1）实验方面，随着变形温度的升高，动态析出行为被显著削弱，动态析出相的尺寸明显粗化而体积分数显著降低。伴随着动态析出行为的削弱，析出相对位错和小角度晶界运动的抑制作用也显著降低；换言之，其对动态再结晶过程的抑制作用也得到了削弱。另外，随着变形温度升高，合金内的不连续动态再结晶也逐步转化为连续动态再结晶行为。（2）将物理基 CDRX 模型和 KWN 模型耦合进 VPSC 模型框架，并在建模过程中通过定义与析出相平均间距相关的松弛因子，创新性地描述了动态析出行为对动态再结晶行为的影响机制。（3）所建立模型可以全面描述合金的热变形过程，能够准确预测不同变形温度下的应力-应变关系、再结晶体积分数、析出相尺寸/体积分数以及织构演化等。（4）通过模型对比了不同强化机理对材料流动应力的贡献度。结果表明，较低的变形温度下，强烈的动态析出行为使得析出强化成为影响材料流动应力的主导因素；而随着变形温度的升高，动态析出过程被显著削弱，使得合金元素的固溶强化效果更为突出。另外，对于所有变形温度，小角度晶界和再结晶晶界的贡献值都远小于其他强化机制。

本课题的研究成果将为我国 Al-Zn-Mg-Cu 合金生产提供理论指导，为全面提高我国铝加工产业中大规模

格高 性能铝合金产品的工艺技术水平提供相关理论基础。

最终交流类型：邀请报告

复合铸造高性能镁/铝双金属界面组织性能调控

蒋文明*

华中科技大学

镁/铝双金属材料结合了镁合金和铝合金的优点，在航空航天、汽车等领域具有广泛应用前景。将消失模固-液复合铸造技术应用于镁/铝双金属材料的制备，可以低成本直接成形复杂镁/铝双金属复合构件。本研究采用消失模铸造固-液复合工艺成形镁/铝双金属构件，实现了镁合金和铝合金良好的冶金结合。该界面层由三个反应层组成，Al₁₂Mg₁₇+ δ -Mg 共晶组织、Al₃Mg₂+Mg₂Si、Al₁₂Mg₁₇+Mg₂Si。通过合金涂层、稀土添加和振动凝固方法对镁/铝双金属的界面组织与性能进行调控，研究表明，采用合金涂层可以抑制镁/铝双金属构件界面 Mg-Al IMCs 形成，明显提高镁/铝双金属构件结合性能。稀土添加可以细化界面 Mg-Al 脆性相，界面析出大量弥散分布稀土强化相，大幅提升双金属构件性能。振动场作用可以细化镁/铝双金属构件界面 Mg-Al IMCs 晶粒尺寸，使之分布更加均匀，提高镁/铝双金属构件结合性能。

最终交流类型：邀请报告

高分子纳米复合材料智能化设计及应用

谢兰*

贵州大学

《中华人民共和国第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》发布，其中明确提出深入实施制造强国战略，并对高端新材料的发展做出明确指示：“推动功能材料等材料研发应用，聚焦新材料、绿色环保以及航空航天等战略性新兴产业，加快关键核心技术创新应用”。因此，高性能和功能型生物基高分子材料布局航天航空、半导体、电子工业等高端产品领域势在必行。其中制备导热/电磁屏蔽生物基高分子复合材料能够解决电子、电气设备及元器件热量聚集问题，同时使作业人员不受电磁干扰。然而，从导热/屏蔽一体化高分子复合材料基础研究到产业化应用有很多重要的科学与技术瓶颈问题亟需解决。比如：（1）如何设计具有功能性的异质结构填料，并实现其在高分子基体内的有序且可控分布，从而明晰生物基高分子复合材料结构与导热性能的构效关系，最终制备力学性能优异且高导热的生物基高分子复合材料。（2）如何构筑高分子复合材料的非对称结构，实现其结构功能一体化设计与制备。

研究一直围绕生物基高分子材料加工过程中高分子晶体形态调控、异质结构填料制备及功能化与其在生物基高分子基体中的分布、生物基高分子复合材料体系非对称结构设计和结构-性能关系等关键科学问题，开展了高性能生物基高分子导热复合材料和生物基高分子电磁屏蔽复合材料制备两个方面的研究工作，获得一些创新成果如下：

（1）设计了功能异质结构填料并调控其有序分布，赋予纤维素基复合材料高导热性，为功能性异质结构填料设计与其在生物基高分子基本内的有序分布提供了一种新方法。

（2）构筑了多层次非对称结构，包括预先构筑二维与三维高效电磁屏蔽结构网络，调控了生物基高分子材料多级非对称结构，制备了高效的生物基高分子电磁屏蔽复合材料，并提出了定向电磁屏蔽新概念（即材料一面实现信号屏蔽，另一面实现信号发射），为电磁屏蔽高分子复合材料结构功能一体化设计与制备提供了新思路。

最终交流类型：邀请报告

陶瓷 4D 打印：材料、工艺、功能、与装备

刘果*¹、吕坚²

1. 中国科学技术大学
2. 香港城市大学

The four-dimensional (4D) printing for ceramics was developed in 2018, which helps enhance the geometrical flexibility of ceramics (Guo Liu et al. Jian Lu*, Sci. Adv., 4, 8, eaat0641, 2018). A paradigm for a one-step shape/material transformation, high-2D/3D/4D-precision, high-efficiency, and scalable 4D additive-subtractive manufacturing of shape memory ceramics with original/reverse and global/local multimode shape memory capabilities has been proposed (Guo Liu et al. Jian Lu*, Adv. Mater., 35, 39, 2302108, 2023). Based on the development of various ceramic precursor materials and local re-ceramization technology, 4D printing of heterogeneous ceramics with controllable deformation and 3D printing of shape-keeping heterogeneous ceramics have been realized (Guo Liu¹, Xinya Lu¹, Xiaofeng Zhang¹ et al. Jian Lu*, J. Mater. Sci. Technol., 201, 210-221, 2024). Recent progress in developing new equipment for high-speed, high-resolution, and multi-material 3D/4D additive-subtractive manufacturing of large-scale and complex-shaped ceramic materials, and also the application demonstration of components, including 3C electronic intelligent components and aerospace key components, will be introduced. This talk will explore Chinese traditional ceramic craftsmanship and illustrate its potential synergy with contemporary additive, subtractive, or additive-subtractive manufacturing methods (Xinya Lu¹, Guo Liu¹, Jian Lu*, Addit. Manuf. Front., invited review; Guo Liu¹, Xiaofeng Zhang¹, Xuliang Chen¹, Yunhu He¹ et al. Jian Lu*, Mater. Sci. Eng. R Rep., 145, 100596, 2021; Guo Liu¹, Yunhu He¹, Pengchao Liu¹ et al. Jian Lu*, Engineering, 6, 11, 1232-1243, 2020).

最终交流类型：口头报告

含铜钛合金的 3D 打印成形及组织性能调控研究

李冬冬*

华中科技大学

钛合金具有良好的生物相容性、综合力学性能、机械加工性能和耐腐蚀性能，是理想的生物医用材料，被广泛用作口腔和骨科植入材料。传统的医用钛合金属于生物惰性材料，主要起支撑作用，植入人体后容易引发细菌感染，诱发炎症等反应。因此，如何控制植入物的术后感染受到广泛关注。本研究在 Ti6Al4V 中添加具有抗菌功能的 Cu 等元素，分别采用增材制造、表面改性等工艺对钛合金进行优化，设计和开发出一系列新型的抗菌钛合金，在临床应用等方面具有重要的潜力。

最终交流类型：口头报告

电子束选区熔化 TA15 钛合金过程中的马氏体相演变规律

高尚奥、杨季鑫、孙剑飞、黄永江*

哈尔滨工业大学

近年来，钛合金因其优异的性能广泛应用于航空航天领域。增材制造工艺有效解决了钛合金传统成形过程中复杂构件成形困难、材料利用率低、冷加工工艺性差等缺点。增材过程中存在较为复杂的非稳态热循环，其中马氏体相的形成及后续演变对钛合金构件的性能有直接影响。本文通过电子束选区熔化工艺 (Electron Beam Selective Melting, EBSM) 制造了近钛合金 TA15 (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) 样品；通过对不同工艺参数下制备得到的钛合金样品进行显微组织检测，揭示马氏体相形成工艺窗口。结果是低束流、高扫描速度条件下熔池内冷却速率较大，更易形成马氏体相。观察到马氏体相在晶内或晶界处形成，主要呈针状或板条状，在马氏体相内观察到位错、孪晶等亚结构。不同工艺参数下马氏体相尺寸在几微米和几十微米之间波动。马氏体相会在后续逐层堆积过程中发生循环固态相变，逐层堆积导致已凝固层经历不同次数的热循环，热循环峰值温度大于马氏体相变开始温度 (M_s) 时，已凝固层发生循环的 β 相向马氏体相的转变，峰值温度降至 M_s 以下时，马氏体相 α' 分解为 $(\alpha+\beta)$ 相。本文有望为电子束选区熔化 TA15 钛合金部件在航空航天领域的应用提供科学理论基础。

最终交流类型：口头报告

成形速度对纯铝薄壁构件高速级进拉深成形粘模磨损的影响规律

徐腾、辛东旭、邓春阳、冉家琪、龚峰*

深圳大学

为了探究导致高速拉深时纯铝表面产生粘着磨损缺陷的主要影响因素，本文开展了成形速度对纯铝电容器外壳高速级进拉深成形时表面粘模磨损的影响研究。通过开展准静态单轴拉伸及霍普金森拉杆试验，对纯铝电容器外壳拉深成形过程薄板应变率效应进行研究。开展了 SKH9-纯铝对磨副高速摩擦磨损特性试验的研究，分析了低速、高速滑动以及不同载荷下纯铝磨损系数和摩擦系数的变化规律。同时借助 ABAQUS 有限元软件建立了纯铝外壳高速级进拉深成形热力耦合有限元分析模型，分析了纯铝外壳构件在低速和高速级进拉深成形时的温度场分布、接触压力分布等导致粘模磨损的重要因素的演变情况。最后开展了纯铝外壳无润滑的低速和高速级进拉深成形实验，并对拉深件进行包括表面磨损微观形貌、面粗糙度(Sa)、硬度等方面的表征观测。

最终交流类型：口头报告

胀形实验中的标度律理论及其在胀形失稳预测中的应用

陈柯霖*

大连理工大学

胀形实验是一种表征薄壁金属材料在双轴加载下硬化和成形性能的常用方法。胀形顶端应变、曲率半径和胀形高度之间的关系对于胀形分析至关重要。常用的理论解局限于各向同性材料的圆形胀形，无法精确描述各向异性材料或椭圆胀形响应。本研究基于任意材料胀形顶点的比例加载条件，建立了顶点应变、曲率半径和胀形高度三者中任意两者的幂函数关系，该关系适用于任意材料的圆形和椭圆胀形实验。进而利用一系列胀形有限元仿真标定了标度律中的未知参数与模具半径、材料硬化和各向异性参数的显示关系。然后利用标定后的标度律建立了各向异性钣金的胀形极限压力失稳模型。最后，进一步扩展了该胀形失稳模型以考虑压延筋附近的径向滑动效应，结果表明该效应降低了胀形顶端的失稳应变。最后，利用多组各向异性钣金的胀形模拟和实验结果验证了这一失稳预测模型的准确性。本研究提出的胀形实验普适标度律有望促进更广泛薄壁材料的塑性和成形行为的精确表征。

最终交流类型：口头报告

压缩功在聚合物成形加工中的作用研究

黄照夏*、瞿金平

华南理工大学

高分子材料中的大分子量和长分子链，使其具有复杂且多变的凝聚态结构，并表现出不同的性能。因此，多尺度结构的调控成为高分子学科共同关注的基础问题。基于传统恒压工程诱导演化的认识，我们报道了一种新的高分子锻压新方法，该方法首次在模压过程中引入可控松弛段。通过对高分子锻压作用下聚乙烯 (PE)、聚乳酸 (PLA)、聚偏氟乙烯 (PVDF)、氟化乙丙烯 (FEP) 等材料的结构演变研究，发现高分子锻压可以诱导其晶体结构、分子链构象和晶型转变，并建立了压力区和松弛区对于制品结构演变行为间的关联关系。再进一步的研究中，我们发现高分子锻压过程中压缩功的高效累积是调控高分子材料结构性能的关键，并建立了相关的映射关系。以上研究可为高分子成形加工过程中材料结构性能演变机制提供新的观点。

最终交流类型：口头报告

Ti-6Al-4V 合金中 FCC-Ti 相的形成及对力学行为的影响机制

刘乐华*

华南理工大学

Ti-6Al-4V 合金，作为一种广泛应用的钛合金，主要由具有 HCP（密排六方）结构的 α -Ti 相和 BCC（体心立方）结构的 β -Ti 相组成。增强钛合金的强韧性一直是研究的重点，而引入新的相结构被视为一种有效策略。然而，常规情况下，第二相的引入往往伴随着塑性性能的牺牲。本研究创新性地发现，通过粉末冶金制备的 Ti-6Al-4V 合金在接近 α/β 相变温度的热挤压变形处理下，能够形成独特的板条异质结构。尤为引人注目的是，在 α/β 相界面处，出现了 FCC（面心立方）结构的 Ti 相。这种 FCC-Ti 相的形成，主要是由于 α 相在受限变形条件下发生的结构转变，即由原始的 HCP 结构转变为 FCC 结构。在塑性变形过程中，FCC-Ti 相在 α/β 相界面处展现出优异的位错储存能力，从而显著提升了合金的加工硬化效应。这一发现不仅实现了 Ti-6Al-4V 合金强度和塑性的同步提升，也为高性能钛合金的设计提供了新的策略与思路。

最终交流类型：口头报告

复合材料液体成型工艺仿真

周何乐子、丁浚纯、李先阳、乐午阳、周华民*

华中科技大学

Liquid composite molding (LCM) has been widely used in continuous fiber reinforced polymer composites (FRP) manufacturing in the fields of aerospace and navigation areas. The flow control is complicated, trial and error cost is high in large complex parts to avoid the dry spot defect. Here we tried numerical simulation and online sensing to help the optimization of LCM forming process.

For the simulation issue, the mainstream simulation software is monopolized by foreign countries and cannot meet the requirements of complex part, it is urgent to develop an independent LCM simulation software in China. By establishing a 3D governing equation, improving the stability of low-quality grids, predicting gas-liquid interface, solving the pressure-velocity coupled filling flow governing equation, we realized the 3D flow simulation. Then it was integrated with the functions of LCM process parameter setting and visualization of calculation results to obtain a numerical simulation software platform. A series of cases were used to verify the accuracy of the developed software.

For the online sensing issue, the existed embedded sensors may disrupt resin flow patterns or fiber deformation inside the part due to their thicker thickness or higher rigidity than the fabrics. To accurately monitor the signals within the part during the LCM process, a thin and flexible Pt-coated film capacitive sensor was designed to minimize the effect of sensor on flow behavior. The flow front, thickness variation and curing inside fabric preform in LCM can be accurately captured based on the variation of the capacitance signals and its second derivative curves obtained by the sensors.

最终交流类型：口头报告

大型复杂高强钢构件电弧增材-锻造复合成形工艺研究

温东旭*、熊逸博、李建军

华中科技大学

针对 300M 钢大型复杂构件电弧增材-锻造复合制造技术的控形控性难题，采用实验研究和理论分析相结合的方法，深入系统地研究了 300M 钢电弧增材-锻造复合制造过程中电弧增材工艺、锻造工艺和热处理工艺对材料的宏观形貌、微观组织、力学性能、热变形行为和热加工性能的影响规律及机理；并开展了 300M 钢飞机起落架构件的电弧增材-锻造复合成形工艺的试验验证，复合成形构件各项组织性能水平平均超过 300M 钢锻件要求，验证了 300M 钢飞机起落架构件电弧增材-锻造复合制造技术的可行性。

最终交流类型：口头报告

Preparation and properties of Mg-based composites reinforced by Ti particles through laser melt injection

Zhenzhen Gui*¹, Dejian Liu²

1. Guangzhou University

2. Huazhong University of Science and Technology

Magnesium (Mg) and its alloys have potential to serve as biomedical implants for their physical characteristics, while the hardness and wear resistance need to be enhanced for further application. Ti particles with appropriate size evenly distributed on magnesium matrix to form a wear-resistant barrier is expected to improve the wear resistance. The existing preparation methods have some shortcomings, such as time-consuming, limited size, particle agglomeration, and inability to prepare flexibly on the surface, etc. In this study, Ti particle reinforcing Mg-3.0Gd-2.7Zn-0.4Zr-0.1Mn matrix alloy (named as TiP/Mg-RE composites) prepared by laser melt injection is proposed to explore the feasibility of large area preparation with good properties. Real time monitoring of the molten pool flow is carried out to investigate its stability during the laser melt injection process through a high-speed camera. Investigation on microstructures, microhardness and wear resistance of the TiP/Mg-RE composites are carried out. Results show that large area of TiP/Mg-RE composites are obtained stably and repeatedly through laser melt injection with no obvious welding defects in apparent morphology and inside microstructure. Ti particles maintain initial shape in the molten pool and forms well metallurgical bonding with the Mg-RE matrix through the alloy elements, according to the analysis of SEM and EBSD. Significant improvement in microhardness and wear resistance of the TiP/Mg-RE composites compared with that of Mg-RE alloy are obtained. Microhardness of the TiP/Mg-RE composites achieves around 145HV, which is 100% higher than that of the Mg-RE matrix. The TiP/Mg-RE composites show a mechanism of abrasive wear, and have a stable friction coefficient and running-in stage. Ti particles have higher microhardness and strength than that of the Mg-RE matrix, resulting in the TiP/Mg-RE composites display better wear resistance than the Mg-RE alloy during repeating friction process.

最终交流类型：口头报告

非热处理强化铝合金富铁相的强化机理研究

赵愈亮*¹、张卫文²

1. 东莞理工学院

2. 华南理工大学

近年来，非热处理强化铝合金在航空、新能源汽车和电子通讯等领域广泛应用。非热处理强化铝合金中的 Fe 含量会形成针片状富铁相，对合金的强度和塑性产生较大影响。本报告应用同步辐射成像和中子衍射技术对比分析了 Fe 含量，重力铸造和挤压铸造对 Al-Mg-Mn-Cu-XFe 合金微观组织和力学性能的影响。研究发现：Fe 含量增加，合金中富铁相的三维形貌由汉字状向镂空棒状转变，其体积分数增加。合金的抗拉强度增加，合金的塑性降低，这主要是由于合金中的富铁相增加，阻碍了位错的滑移而形成了第二相强化。该研究为产业界提供一种新型的非热处理强化铝合金，并进行了适当的理论分析。

最终交流类型：口头报告

高分子取向的在线介电测量方法及应用

李茂源、沈关成、周华民、张云*

华中科技大学

高分子取向对其力、光、电等性能具有显著影响，如高度取向能使材料刚度、强度和韧性提高一个数量级，也会引起产品性能各向异性并呈空间分布，导致双折射、光学畸变等光学性能劣化。现有双折射、广角/小角 X 射线衍射、红外二向色性等取向测量方法受限于响应时间、探测深度、检测范围及封闭模腔

等，均无法实现高分子成形中取向的在线测量。为此，我们利用取向引起材料的介电响应特性，创新提出高分子成形中取向的在线介电测量方法，建立取向-介电响应关联模型，设计并制造出探测深度可调的叉指电极及其阵列传感器，实现了注射成形中高分子基体与碳纤维增强相的解耦测量、热致液晶聚合物膜取向的分布测量等，结果与偏振拉曼、双折射等离线测量方法及理论模型一致，并具有毫秒级响应时间、探测深度可调、检测范围大等优势。提出的介电测量方法还展现了在 高分子结晶、应力演化过程在线测量方面的巨大潜力，对高分子产品精准成形具有重要意义。

最终交流类型：口头报告

镁合金板多自由度成形强韧性协同提升机理研究

柴方*、韩星会、华林、马志远、冯建强

武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室

武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心

强韧性失配问题是限制轻质镁合金广泛应用的重要瓶颈之一。在前期组织与性能关联关系的研究基础上，围绕镁合金板多自由度成形强韧性协同提升组织性能演变行为与机理研究。通过多自由度成形制备具有异质结构的镁合金，分析异质结构演变行为和形成机理，建立异质结构与强度、塑性之间的关联关系，揭示镁合金板多自由度成形强韧性协同提升机理。

最终交流类型：口头报告

超高速激光复合制造高性能沉积层工艺及性能研究

徐祥*、鲁金忠

江苏大学

为了综合提高超高速激光沉积层的表面质量和层间内部结合强度，提出一种超高速激光沉积与高速重熔复合（EHLDED-EHLR）工艺。研究了复合工艺对沉积层组织、致密性、耐腐蚀和力学性能的影响。结果表明层间重熔能够有效地优化表面粗糙度，与超高速激光沉积层相比较，降低 60%以上。复合制造后，沉积层的孔隙率下降了 67%，形成了以超细等轴晶主导的空间异质结构的组织特征，并且层间重熔产生新的纳米碳化物颗粒和高密度的位错结构。复合制造后 316L 不锈钢沉积层屈服强度达到 549 MPa，延伸性为 49%，较原始沉积层分别提高了 25%和 29%。

最终交流类型：口头报告

增材制造医用 β 型钛合金的组织性能调控机理

罗炫*

华中科技大学

医用 β 型钛合金具有低弹性模量、无毒性元素、优异的耐蚀性和生物相容性等优点，有望取代现用的 $\alpha+\beta$ 型钛合金（Ti-6Al-4V）。然而，应力诱导相变和应力诱导孪晶导致 β -型钛合金的屈服强度相对较低，易屈服造成植入件与骨组织移位甚至撕裂。传统制造方法加工的高性能医用钛合金往往以牺牲塑性或弹性模量为代价，且无法制备出适应人体复杂应力环境下的低模量植入件。有鉴于此，本工作通过选区激光熔化（Selective laser melting, SLM）技术，基于缺陷工程理念强化 β 型钛合金，利用高功率高速扫描策略下大的热应力诱导产生高密度位错、以及两种形态的孪晶，制备出高屈服强度和大伸长率（ $\sigma_s=816\pm 26$ MPa， $\varepsilon_f=16.5\pm 1.8\%$ ）的合金，优于大部分热加工 β -型钛合金。同时，基于微区堆垛定向凝固方法实现任意<001>取向的定制化及弹性模量调控。相关研究结果为新一代医用 β 型钛合金的微观组织、力学性能、弹性模量调控提供有价值的理论和借鉴意义。

最终交流类型：口头报告

粉末冶金钛合金组织演变及强韧化调控机理

高帅¹、李宁*¹、张猛²、孙明翰¹

1. 华中科技大学
2. 暨南大学

通过“粉末冶金-塑性变形-热处理”工艺，研究粉末冶金塑性变形过程组织及孔洞演变规律，成分和组织对粉末冶金钛合金力学性能的影响。报道了一种具有细等轴结构（约 1.5 μm ）的粉末冶金钛合金的标准夏比冲击韧性（ $> 85 \text{ J}$ ）和屈服强度（ $\sim 810 \text{ MPa}$ ）的极佳组合，其中 β 基体以等轴结节和细韧带的形式存在，使 α 晶粒球状化。沿着细 β 韧带和 α 晶粒边界的多个微空洞成核减轻了局部应力集中，等轴 β 结节和 α 晶粒之间的协调变形阻碍了裂纹扩展，这两者共同协调了强度和韧性。

最终交流类型：口头报告

基于 3D-MPFEM 的不规则钛粉冷等静压致密化机理研究

王宝、李宁*

华中科技大学材料科学与工程学院

实现高的生坯致密度是提高粉末冶金工件质量的关键。然而，受制于粉末可视化和颗粒追踪方面的挑战，不规则塑性粉末的致密化过程尚不清晰。为克服这一难题，本研究创新性地构建了具有真实颗粒形貌的三维多粒子有限元（3D-MPFEM）模型，并对粉末压制过程中的颗粒流动和变形行为进行了深入研究。

结果表明，在传统的颗粒重排阶段与弹塑性变形阶段之间，还存在一个重要的运动-变形协同阶段。同时，集合中的粗粉末表现出球形化趋势，而细粉末在球形化之后发生了扁平化，二者间的协同互补效应正是通过粉末粒度搭配提高生坯密度的根本原因。因此，在成形过程中，生坯中的孔隙呈现出尺寸缩小和分布均匀化的趋势，显著提高了在烧结过程中实现完全致密化的能力。据此，本研究综合考虑了 CIP 设备的极限压力和生坯及烧结坯中孔隙的结构特征，提出了一种有效确定最佳成形压力的判别方法。本研究有助于全面理解不规则韧性粉末的致密化机制，并为制备高致密、高强度粉末压坯提供了理论指导。

终交流类型：口头报告

选择性激光熔融制备生物超材料的强度提升和模量调节

陈东旭、李冬冬*

华中科技大学

全球每年有超过 220 万例骨移植手术来重建骨科、牙科和神经外科的骨缺损。然而，全固态金属植入物的弹性模量高于人骨而造成应力屏蔽现象。由于可调的孔隙率和弹性模量，增材制造生物超材料受到广泛关注。传统方法通过增加孔隙率来降低弹性模量但超材料的强度也会同时降低。为了解决这一难题，本研究受到合金强化理论的启发，通过在负泊松比超材料框架中引入正泊松比超材料单元设计了复合超材料。结果表明复合结构的屈服强度提高了 43.23%，压缩强度提高了 44.70%，而弹性模量与初始结构相当。本研究还证明了该设计方法在其他弯曲主导型超材料中的普适性。总的来说，本研究大幅提高了生物超材料的可靠性，同时为现有的超材料设计理念提供了独特的见解。

最终交流类型：口头报告

铝合金航空构件模锻成形力快速预测数字模型及成形过程自主控制

胡昊、赵帆、张志豪、谢建新*

北京科技大学

建立模锻成形力的快速、准确预测模型，是实现构件锻造成形过程智能控制、提高构件质量的重要基础。本文以 AA2014 铝合金航空模锻件为例，提出了一种基于机器学习的锻造力快速、准确预测和精确控

制方法。首先,在不同的摩擦因子、坯料温度、模具温度和压下速度条件下进行锻造过程有限元模拟,获得了工艺参数-不同锻造行程下的锻造力数据。采用支持向量回归算法建立了误差小于 6%的锻造力预测基础模型,其中锻模完全充满锻造力 F_f 的预测误差达到 4.1%以下。然后,为提高模型对实际 F_f 的预测精度,将 F_f 目标值设置为 180 t,采用贝叶斯优化算法确定迭代锻造实验参数。经两轮锻造实验数据迭代后,实际 F_f 的预测误差由迭代前的 6.0%降低至 1.5%。最后,采用 F_f 预测模型结合遗传算法,建立了坯料温度和模具温度发生扰动时锻造各阶段压下速度的自主优化策略,可有效抑制由于扰动导致的 F_f 上升。在 F_f 控制目标为 180 t 的情况下,当模具温度或坯料温度发生-20 °C 扰动时,采用自主优化策略进行锻造实验,可将相应的 F_f 分别由 192.2 t、185.8 t 降低至 179.5 t、178.6 t;当模具温度或坯料温度发生-40 °C 扰动时,采用自主优化策略进行锻造实验,可将相应的 F_f 分别由 199.1 t、191.1 t 降低至 185.6 t、177.6 t。本文的工作可为模锻成形力预测和锻造过程自主优化控制提供有益参考。

最终交流类型: 口头报告

深冷处理对增材制造 TA15 钛合金微观组织及残余应力的影响

李好、王思佳、孙剑飞、黄永江*

哈尔滨工业大学

增材制造由于其独特的优势在成形钛合金航空航天构件方面的应用越来越多。然而,增材制造逐层沉积、热历史复杂的工艺特点,使其在成形过程中容易产生较高的温度梯度进而造成非平衡凝固组织和残余应力的产生,对零件后续投入使用产生影响;这些影响仅通过优化加工工艺难以完全消除,需通过后处理进行进一步改善。深冷处理作为一种成熟的后处理手段可有效提高钛合金的力学性能和使用寿命,具有稳定部件尺寸,不破坏工件固有形状,改善均匀性,减小变形等优点,且操作简便,无污染,成本低,具有积极的应用前景和发展空间。本文通过电子束选区熔化(Electron Beam Selective Melting, EBSM)技术制备了块状沉积 TA15 钛合金,并对打印态合金进行了深冷处理,探究了打印态样品沿沉积高度方向不同沉积层的组织性能和残余应力分布情况和深冷处理前后块状沉积样品组织结构、力学性能和残余应力的变化情况。

结果表明,打印态合金不同位置处的显微组织均表现为由 α 相和 β 相组成的网篮组织,力学性能具有各向异性,平行于沉积方向的室温拉伸性能更优,抗拉强度和延伸率为 1000MPa 和 13%左右,且均呈现韧性断裂特点;沉积态样品从上至下表现为“拉伸-压缩”的应力分布状态。

深冷处理有效提高了沉积样品的拉伸性能,且能够在样品内部引入更大的残余压应力,同时有效减缓样品表面的残余拉应力;深冷处理后晶粒形貌及物相组成并未发生明显变化,但合金内部位错密度增加,沿晶界及相界面处位错缠结,在片层相内部形成位错墙、位错环,使样品力学性能提高。

最终交流类型: 口头报告

超薄铝颗粒界面层对镁/铝板轧制复合的界面增强机理

李鹏¹、马晓宝¹、王涛*¹、任忠凯¹、陈鹏¹、计江²

1. 太原理工大学

2. 中国重型机械研究院有限公司

采用“冷喷涂超薄铝颗粒中间层+轧制复合”的新工艺制备了镁/铝复合板。首先,使用低压冷喷涂机将微米级的商用 Al 颗粒(包含一定比例 Al₂O₃ 颗粒)进行冷喷涂,在钢丝刷打磨后的铝基板或镁基板上形成超薄涂层。然后在 400 °C 下氩气氛围中保温 15 分钟,使用二辊轧机轧制复合板。开发出三种轧制复合工艺:在铝基板上冷喷涂铝粉的轧制复合工艺,在镁基板上冷喷涂铝粉的轧制复合工艺,以及在铝基板和镁基板上都冷喷铝粉的轧制复合工艺。本课题系统的研究了镁/铝复合板轧制过程中的微观结构、织构演变、金属间化合物形成、力学性能以及相关机理。结果表明,通过冷喷涂能够实现颗粒与基体之间的预结合,对镁/铝复合板轧后的结合强度有显著影响。当压下率为 37.5%时,双侧冷喷涂工艺可以将镁/铝复合板的平均剪切强度提高到 49.24 MPa,是传统轧制工艺的 2.5 倍。双侧冷喷涂工艺构建了更显著的双侧微观三维界面,

并通过双侧冷喷涂工艺促进了界面的原子扩散。同时，镁基板和铝基板上的冷喷涂铝涂层在轧制过程中发生了动态再结晶，形成了一个统一整体，最终显著提高了界面结合强度。研究表明，颗粒涂层与基板预结合对复合界面强度有重要影响，“冷喷涂超薄铝颗粒中间层+轧制复合”工艺在镁/铝复合板的界面机械啮合与冶金结合协同增强方面有很大的潜力。

最终交流类型：口头报告

E16-PO01

航空发动机高压压气机盘用 Ti60 合金锻造工艺控制数字模型研究

李鑫哲、谢建新、王志磊*

北京科技大学

由于传统锻造技术工艺实时调控难度较大，导致了产品质量稳定性差、产品合格率低等问题。基于大数据和人工智能的数字化锻造技术是解决上述问题的有效途径。面向质量稳定性控制的锻造工艺数字模型是数字化锻造技术的基础。本工作以航空发动机高压压气机盘用 Ti60 合金为研究对象，采用等温热压缩实验，在变形温度 800~1200°C 和应变速率 0.001~10s⁻¹ 范围内，研究了 Ti60 合金的热变形行为，揭示了热变形过程组织演变规律和热变形机制，建立了 Ti60 合金在 $\alpha+\beta$ 两相区与 β 单相区的热加工图。基于热加工图，确立了两组合理锻造工艺：针对室温服役性能稳定性控制需求，锻造温度 850~900°C、应变速率 0.001~0.007s⁻¹；针对高温服役性能稳定性控制需求，锻造温度 1000~1100°C、应变速率 0.1~1s⁻¹。基于实验数据，采用机器学习，建立了面向不同性能控制需求的工艺数字模型。本工作为数字化锻造技术发展提供了数字模型构建方法支撑。

最终交流类型：墙报

E16-P01

粉末冶金钛合金烧结过程结构演变规律与机制

潘科嘉、李宁*

华中科技大学

粉末冶金钛合金的力学性能和热变形能力极易受到烧结件中孔洞的影响。然而，常规方法局限于二维视角，破坏了孔隙原有结构并忽略了三维特征。为了克服这一难题，本研究引入 X 射线计算机断层扫描技术对不规则形貌混合粉末压坯的烧结过程进行了观察分析。结果表明，在冷等静压成形后的生坯中存在三种类型的孔洞：树枝状孔洞（类型I）、扁孔洞（类型II）以及近球形孔洞（类型III）。三类孔洞在烧结过程中首先在应力的作用下在分支处发生分解，随后分裂并球化。孔洞的取向分布与温度无明显关联，但连通性以及局部孔隙率却与烧结温度密切相关。此外，在部分大尺寸的合金颗粒内部观察到了孔洞的存在，这些孔洞是由合金元素与钛基体之间的 Kirkendall 效应所引起的。该研究建立了粉末冶金钛合金烧结过程致密化、合金化与温度的对应关系，为制备全致密钛合金烧结锭坯提供了有效支撑。

最终交流类型：墙报

E16-P02

氢原子占位转变引发氢化钛的脆韧转变

伍仕兴¹、于尧¹、陈一帆¹、郭瑞强²、李宁^{*1}

1. 华中科技大学材料科学与工程学院

2. 山东高等技术研究院

氢脆是限制钛作为结构材料广泛使用的一个普遍问题，而脆性氢化钛的断裂是影响氢脆的关键因素，为了深入理解钛合金的氢脆机理，研究钛氢化物的本征力学性能显得尤为重要。在本研究中，通过

实验观察到 δ -TiH₂ 在非相变条件下的 423 K 温度时发生了从脆到韧的转变, 原位高温核磁共振技术精确表征了在相应温度下的氢原子占位, 研究表明, δ -TiH₂ 中的氢原子的占位经历了从八面体间隙向四面体间隙转变的过程, 通过进一步的第一性原理计算表明, 氢原子占位改变导致 δ -TiH₂ 的广义堆垛层错能降低是导致其由脆变韧的主要原因。该研究通过氢原子占位的视角来理解氢化物断裂韧性, 为钛合金氢脆机制的研究提供了新的视角。

最终交流类型: 墙报

E16-P03

基于 Mo 空间浓度调控的原位增材制造定制 Ti-Mo-Zr 合金的杨氏模量

梁仁瑜、姜昱川、陶江月、王雨萌、雷学谦、李冬冬*

华中科技大学

钛合金在生物医疗方面有着突出的机械和生物相容性等性能, 在骨植入物方面得到了广泛的应用。然而, 应力屏蔽阻碍了患者骨头的恢复, 从而导致骨植入失败。本文将合金设计与增材制造(AM)工艺设计相结合, 使用 Ti、Mo、Zr 等单质粉末进行原位选区激光熔化(SLM), 展示了一种杨氏模量可调的新型 Ti-Mo 系合金。本研究通过 EBSD、TEM 等技术手段, 解释亚微米级 Mo 颗粒在微米枝晶中的弥散分布, 利用 SLM 使设计的新成分钛合金中的 Mo 元素空间浓度可预测和定制。通过改变能量密度可以调控 Mo 元素的扩散程度和未熔 Mo 颗粒的尺寸与分布, 引导各层组织的晶粒生长角度, 最终能够实现亚微米级的 Mo 元素浓度定制。从而获得了在 62.3~83.6GPa 之间可调的杨氏模量, 564~1045MPa 之间可调的抗拉强度, 以及最高 13.1%的伸长率的优异综合力学性能。可调控杨氏模量的骨植入物可以适应不同人体部位的骨组织, 为患者提供了个性化手术方案提供了无限可能, 在智能医疗方面的经济潜力是巨大的。

最终交流类型: 墙报

E16-P04

TiAl 合金感应熔炼用 AlN 陶瓷坩埚制备及性能研究

王如愿、李宁*

华中科技大学材料学院

熔融钛液具有极高的化学活性, 使其与几乎所有的坩埚材料均发生严重的化学腐蚀反应。因此, 制备钛合金感应熔炼用特种陶瓷坩埚对实现钛合金绿色短流程生产至关重要。本工作研制出适用于 TiAl 合金感应熔炼的氮化铝陶瓷坩埚。在该坩埚中熔化所得的 TiAl 合金具有高纯度和超低氧含量 (<0.1 wt.%)。熔炼过程中坩埚/金属相互作用较轻, AlN 坩埚呈现出优异的耐钛液腐蚀性能。具体而言, 其耐腐蚀的关键在于坩埚表面形成致密的 TiN 保护层和富 Al 液膜, 阻止了钛液对坩埚基体的进一步侵蚀。本文基于 AlN 坩埚的制备工艺和耐腐蚀机制, 为开发钛合金感应熔炼用特种陶瓷坩埚提供了新的潜在路径。

最终交流类型: 墙报

E16-P05

液态 LBE 腐蚀 T91 钢脆化机制的第一性原理研究

姜昱川¹、李冬冬*¹、龚浩然²

1. 华中科技大学

2. 中南大学

在核反应堆工作过程中, T91 钢与液态铅铋共晶合金(LBE)长期接触后会发​​生液态金属脆化现象(LME), 导致 T91 钢的力学性能急剧下降, 威胁反应堆的安全运行。然而, 关于 Pb 和 Bi 脆化 T91 钢的机制, 文献中报道的并不一致, 需要进一步的深入研究。本文采用基于密度泛函理论的第一性原理计算, 分别研究了合金元素 Cr、Mo 以及 Pb 和 Bi 对 BCC Fe 块体、表面和晶界力学性能的影响, 将得到的结果与文献中已有的数据

对比分析,提出了 Pb 和 Bi 对 Fe 基体的脆化机制,并从电子结构层面深入讨论来加深对 LME 机制的理解。获得的主要结果如下:(1)研究了 Cr、Mo、Pb、Bi 对 BCC Fe{110}<111>和{11-2}<111>滑移系的堆垛层错能、延展性的影响。研究发现,合金元素 Cr 和 Mo 对 BCC Fe 的表面能、不稳定堆垛层错能以及延展性的影响较小;而 Pb 和 Bi 则显著降低 BCC Fe 的表面能、不稳定堆垛层错能,且 Pb 和 Bi 使表面能的降低更显著,导致 BCC Fe 的韧性降低,且 Bi 对 BCC Fe 延展性的影响大于 Pb。(2)研究了合金元素 Cr、Mo、Ni、Pb 和 Bi 对 BCC Fe Σ 3(111)[1-10]倾斜对称晶界稳定性、内聚强度和断裂韧性能的影响。结果显示,这些合金元素降低了晶界的晶界能,提高了晶界的稳定性;Pb 和 Bi 相比于 Cr、Mo、Ni 具有更大的偏析能,表明 Pb 和 Bi 有向晶界偏析的趋势;Mo 提高了晶界的结合强度,而 Pb 和 Bi 减弱了晶界的结合强度;Pb 和 Bi 在晶界的偏析大大降低了晶界的断裂韧性,使晶界脆化。(3)研究了 Pb 和 Bi 对 BCC Fe 中几种常见表面和晶界的分离功和断裂韧性的影响。发现 Pb 和 Bi 原子使 BCC Fe 的表面能和晶界内聚强度都降低,但使表面能降低得更显著,同时 Pb 和 Bi 晶界偏析都使晶界的断裂韧性降低,使晶界变脆;对比不同的表面能和分离功发现,BCC 纯 Fe 更倾向于晶间断裂,而 Pb 和 Bi 的存在使 BCC Fe 更倾向于解理断裂。

最终交流类型: 墙报

E16-P06

克服电子束粉末床中 Ti6Al4V 合金强度-延性平衡和力学性能的各向异性

李佳音、李冬冬*

华中科技大学

实现优异的延展性和力学性能各向同性的结合是非常理想的传统生物医学材料,尽管这一直是一个长期存在的问题。在这里,我们提出了一种新的方法,通过电子束粉末床熔合(EB-PBF)将 Cu (3.5 wt%)原位合金化成 Ti6Al4V,通过这种方法可以解决上述问题。EB-PBF 制备的 Ti6Al4V-3.5 Cu (TAVC)合金的极限抗拉强度(UTS)和断裂伸长率(EL)分别达到 1053 MPa 和 15.3%,明显优于 PBF-EB/Ti6Al4V 合金(UTS: 902 MPa;EL: 13.5%)。然而,用火花等离子烧结制备的相同成分的合金表现出明显的脆性特征(UTS: 1051 MPa;el)。此外,TAVC 合金样品中多个微纳 Ti₂Cu 相(1-5 μ m, 50-100 nm 和 5-10 nm)的生成有助于显著增强(46.24%),有效防止了脆性层状(Ti₂Cu + α -Ti)结构引起的塑性劣化。进一步的研究表明,TVAC 合金的延展性增强可归因于 EB-PBF 制造过程中孪晶组织的产生和 α -Ti 的球化,以及 Cu 的加入和本构热处理的结果。研究结果不仅为深入了解多尺度 Ti₂Cu 析出相的形成机制提供了依据,而且为提高含 cu 生物医用钛合金的整体力学性能提供了重要的指导。

最终交流类型: 墙报

E16-P07

用于三维曲面的可变形液态金属通用柔性电子器件

蒋成杰、李田宇、黄显、国瑞*

天津大学

具有金属级别的导电性与无限变形能力的液态金属在共形电子学领域有着巨大的应用潜力。然而,大多数液态金属电子器件的加工方法都需要复杂的仪器或定制的掩模,导致加工成本高昂且制备过程复杂。本研究提出了一种简单快速的制备方法,用于制备液态金属通用可拉伸电子器件(PLUS-E)。该制备方法利用液态金属在可拉伸基底上的选择性粘附和自适应碳粉掩模,可实现快速制造(<2 秒/100 平方厘米)、出色的拉伸性(800% 应变)和高成型精度(100 微米)。得益于基底和碳粉掩膜的自适应变形,PLUS-E 可适用于任何形状的三维表面。此外,低流动性液态金属复合材料也提高了 PLUS-E 在三维表面上时的电学稳定性。此外,利用有限元模拟准确预测 PLUS-E 的变形和阻力变化,为设备设计和制造提供指导。最后,利用这种方法开发了用于检测人体运动、导管弯曲和球囊膨胀的各种传感器。所有这些传感器都获得了稳定可靠的信号测量结果,证明了 PLUS-E 在实际应用中的实用性。

普碳钢冷轧板形控制关键模型研究与优化

金树仁¹、王鹏飞²、李旭*¹

1. 东北大学
2. 燕山大学

板形闭环反馈控制技术是保证普碳钢板带轧制过程的连续进行,并获得高质量普碳钢带材产品的关键控制技术之一。板形目标曲线和调控功效属于板形闭环反馈控制技术中的基础工艺模型,也是实现板形在线实时调控的重要控制手段。其中,板形目标曲线是板形的设定目标,调控功效则体现了板形偏差的被修正效率。由于当前的板形目标曲线设定模型难以适应规格及工艺特征的变化,无法满足多品种、多规格带材频繁切换的板形控制要求,导致产品合格率降低。为提高板形目标曲线与实际板形的适配度,以基本板形目标曲线和各补偿曲线为基础,利用函数建模方法建立 8 次多项式形式的板形目标曲线广义方程。为降低各系数的设置难度且满足全种类带钢的生产要求,利用线性函数归一化算法对板形目标曲线广义方程进行归一化处理并乘以增益系数,得到归一形式的 8 次板形目标曲线模型。调控功效的精度是实现板形精准控制的前提。在精确设置板形目标的前提下,为了提高调控功效计算模型的精度和对实际轧制过程的适应性,提出一种基于仿真建模和数据驱动建模相结合的调控功效精确获取方法。首先,根据轧制工艺参数的变化区间,构建三维轧制特征空间模型。通过建立三维有限元仿真模型,以确定特征空间模型中每个节点的调控功效先验值。为了提高先验值的准确性,通过数据驱动机制建立了在线优化模型。引入排序算法和中心极限定理以过滤测量数据并计算变量权重。最后,提出了基于趋势外推法的线性输出预测模型,实现了任意工况下调控功效的精确获取。以国内某厂 1450mm 五机架六辊冷连轧机组为应用平台进行验证分析,结果表明,归一形式的板形目标曲线和基于有限元仿真与数据驱动结合的调控功效精确获取,使稳态轧制、加减速轧制阶段的板形标准差分别降低了 50%和 30%且均满足工艺标准,并可保证良好的指标稳定性。