

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

E07-增材制造材料
E07-Additive Manufacturing
Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

E07. 增材制造材料

分会主席：史玉生、闫春泽、杨磊

E07-01

增材制造专用材料及其成形技术的现状与展望

史玉升*

HuazhongUniversityofScienceandTechnology

增材制造技术已经渗透到我们的日常生活中，而增材制造材料的发展则是推动这项技术前进的核心动力。本文全面梳理增材制造材料的种类及发展现状，包括高分子材料、金属材料、陶瓷材料、纤维增强复合材料等，并详述其成形技术与装备。

E07-02

高强耐热型 Al 合金的增材制造---成分设计、结构与性能研究

柳林*、徐京豫、张诚

华中科技大学材料学院

高强耐热 Al 合金在航空航天领域具有重要应用前景，但常规成形技术难以实现复杂构件的制造。增材制造 (AM) 在成形 Al 合金方面比传统制造技术具有显著优势，然而，用 AM 技术成形的高强度铝合金时通常会遇到粗柱状组织，和由此引起的在 Al 合金样品或构件中微裂纹的困境，造成 Al 合金构件的力学性能恶化。在本研究中，我们发现通过在铝基合金中添加微量 Zr 元素可有效解决这一问题。我们以 Al-1Fe-0.6Cu 为基础体系，通过添加不同 Zr 含量 ($x=0.3, 0.6, 0.8, 1.3at\%$) 设计了一系列新型高强耐热型铝合金，并采用激光粉末床熔融 (LPBF) 技术制备了一系列的 Al-1Fe-0.6Cu-xZr 合金样品。研究发现：所有 LPBF Al 合金都呈现由粗晶区 (晶粒尺寸 6.20-0.95 μm) 与细晶区 (晶粒尺寸 1.28-0.45 μm) 交替分布的非均匀结构，且随着 Zr 含量增加，两个区域的晶粒尺寸不断减小。当 Zr 含量达到 0.8at% 或更高时，柱状晶完全转变为等轴晶组织，相应地，铝合金的 3D 打印成形性大大改善。微结构研究表明，无论是在粗晶区还是细晶区，晶界上均发生了严重的 Fe/Cu 共偏析，它对 LPBF Al 合金的力学性能和热稳定性产生重要影响。随后，我们以晶粒最为细小的 LPBF Al-Fe-Cu-1.3Zr 合金为例研究了在不同温度下的拉伸性能，发现 LPBF Al-Fe-Cu-1.3Zr 合金在室温和高温下都具有高强度。如屈服强度在室温下达到 500MPa，在 573K 下仍保持 163MPa，这是迄今为止文献报道的增材制造铝基合金最高强屈服度值。此外，这一合金还表现出优异的热稳定性，如在 723K (0.82T_m) 下等温 8h，无论是粗晶区和细晶区，晶粒只发生轻微长大，分别为 1.2 μm 和 0.6 μm 。分析表明，这种优异的热稳定性源于 Fe/Cu 元素在晶界上的共偏析。这一工作为设计用于增材制造的新型高强耐热型铝合金提供了一个新思路。

E07-03

增材制造碳化硅陶瓷复杂构件

闫春泽*

华中科技大学

复杂碳化硅 (SiC) 陶瓷复合材料构件广泛用于国家重大战略装备、核心支柱产业。但 SiC 陶瓷硬度和脆性大，传统方法在成形复杂构件时面临极大局限性，且大型 SiC 构件通常需通过拼接方法获得，导致 SiC 构件的废品率高，复杂结构很难甚至无法成形。因此复杂 SiC 陶瓷构件的整体成形属世界性难题。增材制造技术采用逐层制造并叠加原理，理论上可整体成形任意复杂结构，是实现复杂陶瓷构件快速成形的

有效途径。针对大型 SiC 构件整体化、轻量化、复杂化成形难的问题，本项目相继突破增材/渗硅适应性 SiC 专用粉材设计制备，及高性能复杂 SiC 构件的 3D 打印整体成形与致密化烧结等关键技术问题，最终获得 SiC 构件最大尺寸 $\geq 1.6\text{m}$ 、弯曲强度 $\geq 240\text{MPa}$ 、弹性模量 $\geq 220\text{GPa}$ ，成功实现大尺寸空间反射镜镜坯、渣浆泵叶轮、光刻机方镜等典型复杂 SiC 构件的一体化制备，对航空航天等国家安全和前沿技术的发展起到了重要的战略支撑和经济价值。

E07-04

大型航空航天钛合金构件高效高精度增材制造技术

刘鑫旺*、刘洁、闫春泽、史玉升
华中科技大学

高强韧钛合金在航空航天、军事等领域具有广阔的应用前景。钛合金增材制造技术的快速发展，使其成为航空航天等领域钛合金关键构件实现材料-结构优化设计和一体化制造的重要手段。然而，高强韧钛合金在增材制造过程中难加工、易开裂等特点使其工程化应用受到限制。尤其对于大型航空航天钛合金构件而言，高效高精度的增材成形技术需求更是十分迫切。激光增材制造(LAM)技术的发展能够满足高强韧钛合金成形和服役的要求，与其它增材制造技术相比，激光增材制造技术既能够制造出结构复杂、尺寸精度高、综合力学性能好的钛合金大型构件，又能克服传统钛合金增材制造成本高、材料利用率低和效率低的问题。

E07-05

高性能铝合金激光增材制造：材料、工艺、结构和蓝激光

王洪泽*
上海交通大学

铝在航空航天等领域具有广泛的应用，但对于红外激光吸收率低，激光增材制造存在诸多困难。面向航空、机器人等领域对于铝合金构件批量化制造的迫切需求，围绕合金粉体、增材制造工艺和结构开展了系列工作。通过开展成分设计，发明了系列原位自生 TiB₂ 颗粒增强铝合金粉体，成功地将高裂纹敏感性材料转变为可打印材料，基于原位监测和连续-离散耦合模拟实现了气雾化制粉装备和工艺的优化；通过开展增材制造过程同步辐射原位监测和多物理场耦合建模，优化了激光增材制造工艺，显著降低了激光增材制造工艺缺陷；通过开展面向增材制造的结构设计和增材制造复杂流道内表面电化学抛光工艺研究，获得了点阵填充大飞机风扇叶片、仿生机器人足等高性能复杂结构。同时，开发了 2000W 蓝激光粉末沉积增材制造、修复和焊接装备，显著提升了铝合金激光制造的效率和精度。本报告提出了铝合金构件批量化增材制造技术路线，为高性能铝合金构件增材制造技术的大规模应用提供了思路。

E07-06

纤维 / 碳化硅陶瓷复合材料增材制造及性能研究

刘凯*、李天杨
武汉理工大学材料科学与工程学院

纤维增强碳化硅陶瓷复合材料是一类兼具陶瓷高强度、纤维高韧性的耐高温复合材料，常被应用于航空航天、交通运输等高新技术领域。随着装备服役环境日趋苛刻，陶瓷构件越来越复杂，其制造面临极大挑战。增材制造技术基于逐层叠加原理，是实现陶瓷复合材料复杂构件整体制造的重要方法。本研究分别基于激光选区烧结、材料挤出增材制造工艺，建立了短切与连续纤维增强陶瓷复合材料增材制造方法，研

究了打印材料与工艺对陶瓷预制体结构及性能影响规律，探讨了增材成形体致密化烧结与强韧化机制，为陶瓷复合材料复杂构件整体制造提供了新思路。

E07-07

高强耐热镁稀土合金激光增材制造高温力学行为及性能调控研究

李坤*

重庆大学

激光增材制造技术因其极快的凝固速度与逐层制造的方式，能显著影响镁稀土合金固溶状态、析出相分布，从而影响其组织及高温力学强韧化机制。本研究针对 WE43 镁稀土合金的高温力学变形/失效行为及高温性能调控进行了系统研究。研究发现受重熔与热循环影响沉积态 WE43 镁稀土合金存在双峰晶粒结构，镁基体内存在大原位生成量 β_1 、 β' 、 β 等析出相，可显著提升镁合金的力学性能。根据 200~300°C 高温拉伸表征及分析可知，不同温度下沉积态 WE43 镁稀土合金较铸态合金抗拉强度分别提升 36%、20% 及 3.5%。随着温度的升高，沉积态 WE43 合金的软化机制从动态再结晶逐渐转变为晶界滑移，同时发现 200°C 下的断裂模式为典型的晶内/晶界裂纹及典型增材制造熔池边界裂纹，而 250°C 下的断裂模式主要由氧化物引起的空洞失效，这也是该温度下异常延伸率的原因，而 300°C 下的主要断裂模式是由细晶晶界滑移导致的晶间裂纹。该工作表明了激光增材制造对提升镁稀土合金的高温性能的巨大潜力，同时揭示了激光增材制造镁稀土合金独特的高温力学行为机制，为对其高温性能调控提供了理论与实际基础。

E07-08

激光增材制造 ECY768 钴基高温合金及其表面热敏传感器研究

魏恺文*、刘浩博、曾晓雁

华中科技大学

钴基高温合金具有优异的强度、焊接性、耐高温能力和抗腐蚀/氧化性能，是制造航空发动机和燃气轮机等先进装备热端部件的理想材料。激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 是当前应用最广的金属增材制造方法之一，在制造具有复杂几何结构的热端零件方面具有独特的优势。为保证热端部件的可靠性，通常需要在生产过程中对其表面温度进行准确测量，在部件表面制备以厚膜温度传感器为代表的热敏传感器是理想方案。以 ECY768 钴基高温合金为研究对象，较为系统地研究了 SLM 成形钴基高温合金的冶金缺陷形成机制与调控方法、沉积态组织和力学性能，以及典型热处理工艺对成形件组织性能的影响规律。在此基础上，研究了采用微笔-激光复合直写技术在 SLM 成形 ECY768 合金表面制备 Pt 热电阻温度传感器的基础工艺。

E07-09

激光粉末床熔融专用高强韧、抗开裂和均匀细晶镁稀土合金设计与制造

邓庆琛*、吴玉娟、彭立明、丁文江

上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心

采用激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 增材制造技术来研发轻质高强韧镁稀土合金和构件可进一步提高镁合金的综合力学性能并拓宽其在航空航天、国防军工装备和汽车等领域的应用。目前 LPBF 制备镁合金的研究主要针对传统的商业化铸造镁合金体系 (如 AZ91D、ZK60、WE43 等)，存在着易形成粗大柱状晶、易开裂、强塑性有待进一步提高等挑战。本研究采用离心雾化工艺首次制备了高强度 Mg-Gd 系镁稀土合金粉末，设计并通过 LPBF 工艺制备了五种 Mg-Gd(-Zn)-Zr 合金，系统研究了不同 Gd

和 Zn 含量对 LPBF 态合金的柱状晶向等轴晶转变、室温拉伸性能和开裂敏感性的影响规律，实验和模拟相结合揭示了 LPBF 成形高强度 Mg-Gd 系合金的冷裂机制，最终成功研发了一个新型高强韧、抗开裂和均匀细小等轴晶的镁稀土合金并制备了工程样件。

E07-10

为增材制造内生热处理开发的高强钢

刘志远*

深圳大学

增材制造是一种从点到面再到体的革命性制造方法，其出现大幅拓展了制造自由度。现有合金开发都是基于传统制造工艺，迫切需要开发适用于增材制造技术的新合金体系。例如激光增材制造过程循环加热不仅带来局部热胀冷缩，造成残余应力的积累，还能激发内生热处理。然而传统马氏体钢纳米强化相析出速度慢，内生热处理作用有限。通过打印过程原位合金化在 18Ni300 马氏体时效钢中引入 Ti 元素加速纳米相的析出，设置层间停留时间延长内生热处理作用时段，从而开发得到打印抗拉强度高达 1546MPa、塑性高达 8.0% 的高强钢，并解释了增材制造内生热处理机制和新开发高强钢的强韧化机理。

E07-11

激光 3D 打印制备高熵合金/钛合金复合材料的新进展

张法明*、黄宜诺、熊义峰

东南大学

选择性激光熔化（SLM）是通过高能激光束的选择性作用，将预铺的粉末层精确熔化并固化，逐层堆积形成三维实体零件的增材制造技术。这项技术熔池寿命短且冷却速度快，还可实现原位合金化，使得材料内部的成分部分均匀，实现更精细尺度的浓度调制和空间异质结构。钛合金基复合材料主要采用纳米碳、陶瓷颗粒做为增强相，最终的结果基本是强度提高而塑性下降。高熵合金材料是近几年发展起来的综合性能优异的新材料。高熵合金材料与钛合金基体相对于陶瓷增强相具有更加良好的润湿性和界面结合。本报告中将 Ti6Al4V 球形粉末和 FeCoNiCrMo 高熵合金球形粉末进行混合，并使用混合粉末进行选择激光熔化（SLM）制备。探究了不同能量密度对合金显微组织和力学性能的影响，随后研究了在最佳工艺参数下，不同高熵合金含量和粒径对合金显微组织和力学性能的影响，并讨论了该合金的强韧化机理。在此基础上，对综合力学性能最优的 Ti6Al4V-FeCoNiCrMo 合金进行了 SHPB 动态力学实验和 Abaqus 有限元模拟，进一步探讨了合金的防弹性能和抗侵彻原理，分析了做为防弹材料的应用。

E07-12

增材制造纤维增强复合材料与点阵功能结构

杨磊*¹、闫春泽²、史玉升²

1. 武汉理工大学

2. 华中科技大学

航空航天航海等交通装备的轻量化技术至关重要。连续纤维增强复合材料具有轻质、高强、耐腐蚀等优异特性，是目前轻量化设计优选材料；点阵功能结构通过拓扑设计可以实现轻量化的同时保障承载，并且可以获得减振、吸能等功能。本项目提出利用激光加热+辊轮加压相结合的方式增材制备连续纤维增强复合材料，并研发机器人激光增材制造装备；利用极小曲面点阵结构设计轻量化/承载/功能构件，应用于船舶轴系隔振系统。

E07-13**陶瓷增材制造研究进展及展望**

吴甲民*
华中科技大学

陶瓷材料因具有耐高温、耐腐蚀等特点，在航空航天、国防等诸多领域具有广阔的应用前景。然而，现有陶瓷成形方法严重依赖模具，部分复杂结构陶瓷零件甚至难以制造。近年来，陶瓷增材制造技术在制造复杂结构高性能陶瓷零件方面逐渐受到人们的重视。本文主要介绍华中科技大学史玉升教授团队多年来在陶瓷增材制造及其应用方面的研究成果，具体包括：生物陶瓷、硅基陶瓷型芯、典型非氧化物陶瓷（如碳化硅和氮化硅陶瓷）、压电陶瓷、微波介质陶瓷等各类结构和功能陶瓷，并对陶瓷增材制造技术的发展做了一些展望。

E07-14**激光增材制造锌基骨植入体工艺、结构和性能研究**

韩昌骏*

可降解金属锌兼具适中的降解速率和良好的生物相容性，有望在骨植入体领域得到广泛应用。激光粉末床熔融（LPBF）作为一种典型金属增材制造技术，有利于实现具有个性化几何形状和复杂多级微孔结构的锌及其合金植入体的制备成形。然而，锌在激光加工过程中极易发生蒸发和元素损失，对植入体的成形质量和综合性能带来了挑战。探索了激光工艺参数对锌成形质量的影响，建立了致密度超过 99% 的工艺窗口，制备出具有优异强度-延性协同作用的锌样件，发现 LPBF 成形锌在水平和垂直方向上不同的微观特征诱导了力学性能各向异性。其中，水平试样的极限抗拉强度为 123.6MPa，超过垂直试样 14.6%。而水平试样的延展性低于垂直试样，延伸率分别为 11.8% 和 14.2%。探讨了控制变形行为和多重强化机制，建立了各向异性组织与力学性能之间的关系；在此基础上，提出了一种晶格策略启发的高性能可控点阵 Voronoi 超材料（LVMs）设计方法，成形的 LVMs 表现出与天然骨高度适配的力学与传质性能，为实现缺损骨宏微结构控形控性提供了新思路；进一步还研究了锌合金支架力学与腐蚀行为，评估了锌合金支架的成骨能力，强调了 LPBF 成形的锌支架在骨缺损修复中的应用前景。

E07-15**面向激光增材制造微裂纹的液相诱导愈合后处理技术**

胡小刚*、朱强
南方科技大学

激光增材制造是解决个性化、复杂化金属构件整体成形的革命性技术，在航空航天、汽车、医疗、重大武器装备的研制、生产和使用维护等方面都有巨大的应用前景。然而，当前该技术尚未实现如其发展初期所预测的广泛应用，其中一个关键原因是现有常用工程合金中仅有数十种可以稳定实现无裂纹打印，远不能满足替代传统工艺的需求。报告人团队提出了一种液相诱导愈合后处理技术（LIH），通过控制晶界微量重熔引入晶间液膜以回填缺陷，进而实现将裂纹焊合的效果。研究团队以典型高裂纹敏感性合金 IN738LC 为试验合金论证了 LIH 技术的可行性。与当前广泛采用的热等静压方案相比，液相诱导愈合技术在缺陷消除效率、工艺便捷性与经济性等方面均展现出了明显的先进性。

E07-16

激光粉末床熔融制备耐热铝合金的微观组织与高温力学性能研究

柳金龙*

东北大学

航空航天、交通运输等领域对材料轻量化的需求日益迫切，同时许多部件/构件的服役温度逐渐跨越到 250°C-400°C 范围内，轻质、高强、耐热的铝合金应用潜力巨大。本研究主要报道了两种的激光粉末床熔融技术 (LPBF) 制备耐高温的铝合金——AlSiFeNi 合金和基于 AlMgScZr 成分体系的耐高温改性铝合金，并通过 SEM、XRD、EBSD、TEM、室温拉伸和高温拉伸实验等手段分析了合金的显微组织、力学性能和不同温度下的强化机制。AlSiFeNi 打印态样品在 400°C 时，仍保持 100MPa 以上的强度。在 250°C 时，耐高温改性的 AlMgScZr 合金屈服强度比未改性前提高了 200MPa。研究为激光增材制造耐高温 AlSiFeNi 和 AlMgScZr 铝合金的应用提供了理论依据。

E07-17

增材制造钛基复合材料

安琦*、黄陆军、耿林

哈尔滨工业大学

钛合金具有密度低、比强度较高、耐腐蚀与耐热性能较为优异的特点，在航空航天领域应用广泛，但其硬度较低，耐磨性差，并且比强度有待进一步提升，限制了钛合金在磨损或者高承载等极端环境中的应用，不利于该领域装备与构件的轻量化设计。在钛合金中引入陶瓷增强体有望提升强度、硬度与耐磨性，采用 TIG 电弧熔敷方法在钛合金表面制备了高体积分数的 TiB、TiC 增强钛基复合耐磨层。结果表明涂层顶部经溶解析出机制生成了两级尺度的 TiB 与 TiC 强化相及二者的共生结构，基底与涂层之间形成冶金结合界面。热输入的增加使得涂层中陶瓷硬质相尺寸减小、实际含量降低，导致硬度下降，最优热输入为 162.7J/mm，硬度可达 HRC62.1，明显高于基体材料的 HRC33.3。复合涂层磨损速率较基底材料降低了 89.2%，并揭示了耐磨机理。为进一步提升钛合金合金强度，以球形 TA15 粉末与 0.5~1 μ mTiB₂ 粉为原料，通过低能球磨混粉和激光选区熔化技术，成功制备出 0.85vol.% 原位自生 TiB_w 增强 TA15 复合材料。结果表明 TiB_w/TA15 复合材料中 TiB 晶须均匀弥散分布，可有效细化基体晶粒尺寸，其室温抗拉强度达到 1446MPa，与打印态 TA15 合金相比其抗拉强度提高了 217MPa，断后延伸率达到 4.1%，其强化机制主要为载荷传递强化与细晶强化。经 800°C 保温 2h 炉冷处理后，基体组织由马氏体分解为 α + β 相，晶须长度显著增长，平均长径比可达 46.2，其室温抗拉强度降至 1227MPa，延伸率显著提升至 9.4%，具有高强韧特性。

E07-18

3D 打印仿生金属人工骨

徐超*、祁晋民、张璐、刘庆萍、任露泉

吉林大学

骨的皮质-松质多孔结构由骨胶原、矿物质等杨氏模量迥然不同的材料组成，以实现其支撑身体、减震等特定功能。受自然骨结构启发，我们开发了杨氏模量可调的 Ti6Al4V 浆料，用于浆料直写 3D 打印多级孔隙人工骨支架。在 Ti6Al4V 浆料中添加 Mn 微米颗粒 (0-50vol%) 作为造孔剂，产生线条内微观孔隙 (孔隙率在 2.6% 至 63.9% 之间)，实现人工骨支架的杨氏模量在 0.08-18.08GPa 范围内的自由调节。通过双喷头浆料直写制造仿生皮质骨-松质骨植入物，外层使用 Ti6₄₈Mn₂ 浆料，结构孔隙率 10%，内核使用 Ti6₄₆Mn₄ 浆料，结构孔隙率 70%，实现了人工骨结构孔隙率和杨氏模量与自然骨的同时匹配。此外，我们还制造了受骨启发的梯度结构和受贝壳启发的砖泥结构，验证了该方法能够根据不同功能的需求赋予特定位点不同杨氏模量的能力。

E07-19**激光定向能量沉积异种合金异质微观组织形成机制及力学性能研究**徐刚¹、鲁金忠*²

1.江苏科技大学

2.江苏大学

激光定向能量沉积工艺具有高柔性的特征，可在构件成形过程中根据异种合金的性质差异，设计异种合金分布，获得非均匀分布的空间异质微观组织，使异种合金构件兼具不同的性能。在本工作中，我们制备了从上到下依次为等轴晶、不规则细晶和粗大柱状晶的空间异质微观结构。沿沉积方向，底部区域的温度梯度促进了柱状晶的外延生长；中间和顶部区域的柱状晶受到异种合金元素原位生成氧化物颗粒诱导的非均匀形核和成分过冷度提升的影响，形成了不规则细晶和等轴晶。顶部区域的等轴晶有助于提高材料强度和耐磨性，而中部和底部区域的不规则细晶和柱状晶使材料的韧性进一步提升。因此，激光定向能量沉积制备的异种合金构件同时具备高强度、高韧性和优异耐磨性能。此外，本工作揭示了异种合金沉积构件的强韧性协同提升机制和空间异质微观组织形成机制。最后，本工作还讨论了异种合金沉积构件抗热腐蚀性能分布特征和提升机理。

E07-20**激光选区熔化非晶增强 316L 不锈钢在 NaCl 溶液中的耐磨耐蚀性能研究**

王刚*

华南理工大学

316L 不锈钢作为一种奥氏体不锈钢，具有优异的塑性、耐蚀性和生物相容性，广泛应用于工业，尤其是海洋环境中。然而，其较低的屈服强度和耐磨性制约了其在更多场合的应用。本文选择一种铁基非晶合金作为增强材料，对激光选区熔化制备的 316L 不锈钢进行了增强，并详细研究了成形试样的微观结构演变、力学性能、摩擦学和腐蚀性能。316L 不锈钢和铁基非晶增强样品的相对密度值都在 99% 以上，这表明非晶增强的样品也具有出色的可成形性。在蚀刻后的显微照片中，所有样品都显示出胞状结构。非晶增强的样品具有较厚的亚晶界，并且在非晶添加量为 10wt.% 和 15wt.% 的样品中可以观察到保留的非晶相。随着非晶添加量的增加，非晶增强试样的显微硬度和抗压强度逐渐提高，分别达到 449.2HV 和 2181.9MPa。磨损形貌表明，纯 316L 不锈钢和非晶增强样品在 3.5wt.% 的 NaCl 溶液中都经历了磨料磨损和腐蚀磨损。同时，随着非晶添加量的增加，成形试样的摩擦系数和磨损率逐渐降低。根据动电位极化曲线，与纯 316L 不锈钢相比，非晶增强样品具有更低的腐蚀电流密度和更高的点蚀电位，并且在盐雾环境中表现出优异的耐腐蚀性。这项工作表明，添加铁基非晶合金可以有效提高 316L 不锈钢的力学性能和耐磨性以及耐盐雾腐蚀能力。

E07-21**h-BN 颗粒增强增材制造用 In718 合金组织与性能研究**郑洪亮*¹、张述豪^{1,2}、陈杨^{1,2}、李恩发^{1,2}、相立新^{1,2}

1.山东大学

2.材料液固结构演变与加工教育部重点实验室

Inconel718 (IN718) 是一种沉淀硬化型镍基高温合金，主要组成元素为 Ni-Cr-Fe，在 650°C 高温下仍能保持高强度，被广泛用于航空发动机、核反应堆以及液体燃料火箭中。现代工业飞速发展，愈发需要材

料、工艺以及结构的更新迭代,选区激光熔化(Selective Laser Melting,SLM)为 Inconel718 合金在新材料和新结构发展方面提供了新工艺和新思路。选区激光熔化是一种增材制造(Additive Manufacturing,AM)技术,能够以极高的设计和制造自由度一体化生产具有复杂几何形状的部件,基于这一优势,航空航天用 Inconel718 合金部件能够优化结构减轻重量;同时选区激光熔化还提供了一种更加多样化和深入定制化的制造思路,即颗粒增强激光增材制造。多项研究证明颗粒增强相能够减轻 Inconel718 重量,同时进一步提升其性能,改善合金在极端服役条件下的可靠性和使用寿命。

激光增材颗粒增强合金具有较高的可行性,为了找到最优尺寸和含量的增强颗粒,需要进行更深入的研究。本文研究了 h-BN 和 AlZr 合金两种不同种类增强颗粒(纳米颗粒强化以及微合金化颗粒增强)的强化作用和机理并设计了相应的颗粒增强合金成分,以期建立更详细或创新的理论来解释激光增材制造颗粒增强合金的强化和失效机制,尤其是在增强颗粒原位反应以及多种强化效果的协同作用方面。

六方氮化硼纳米颗粒引入后组织中析出了大量细小弥散的第二相颗粒,调整后的热处理制度保留了细小的晶粒结构和第二相颗粒,并与沉淀析出相以及高密度位错形成协同强化作用提高了颗粒增强的合金室温以及高温抗拉强度,沉积态抗拉强度达到了 1340MPa,最优热处理制度下室温抗拉强度达到了 1640MPa,在 650°C 高温下抗拉强度达到了 1367MPa,在 800°C 下抗拉强度超过 700MPa。摩擦磨损实验结果表明,h-BN 颗粒增强的 Inconel718 高温摩擦系数较纯 Inconel718 合金降低 15% 以上,650°C 磨损量降低 20%。此外,引入 h-BN 颗粒后的组织演变也使合金的热物性发生变化,热导率提高了 54%。

E07-22

挤出 3D 打印制备石墨烯/SiCp/SiC 复合材料

刘洪军*、唐润、李亚军、李亚敏

兰州理工大学

提出了一种石墨烯/SiCp/SiC 复合材料的 3D 打印制备路线:将含有石墨烯/SiCp 复合粉末的聚碳硅烷(PCS)基浆料挤出 3D 打印成生坯,然后热解转化为石墨烯/SiCp/SiC 复合材料。对复合材料的微观结构、力学性能和电学性能进行了表征,结果表明:PCS 在 800°C 转化为非晶 SiC_xO_y,随着温度升高,非晶 SiC_xO_y 逐渐转变为 β-SiC 与热解碳,在石墨烯纳米片间形成导电通道,SiCp 有效改善了热解过程中收缩和气孔导致的缺陷。3D 网格多孔结构复合材料的抗压强度在 1200°C 时达到最高的 12.3MPa,电导率在 1500°C 时达到最高的 670S·m⁻¹,而体积密度低至 1.08g/cm³。本文的研究为轻质导电 SiC 基复合材料的制备提供了新的研究思路和解决方案。

E07-23

高抗冲低收缩 3D 打印聚丙烯的制备及性能

罗发亮*、沈伟鑫

宁夏大学

熔融沉积成型(简称 FDM 技术)是一种将计算机辅助设计和通用热塑性聚合物材料相结合,通过层层叠加熔体细丝而成型的聚合物 3D 打印技术。FDM 技术不仅原理简单、成本低,而且以商业化热塑性聚合物材料为原材料,是应用最广泛的一种 3D 打印技术。然而,当前综合性能优异、价格低廉的通用塑料聚丙烯由于结晶速率较快且结晶度高,在 3D 打印中产生较大的体积收缩,引起 3D 打印件较大的翘曲变形,最终产生尺寸精度低的 3D 打印件[1,2],使得 PP 打印受到限制。本研究以柔韧性较好的热塑性聚酯弹性体为改性材料,通过物理改性方法制备了冲击性能优异、收缩率极低的聚丙烯复合 3D 打印材料;通过优化打印材料组成和打印工艺参数,制备了翘曲变形较小的聚丙烯 3D 打印件;研究了材料组成和打印工艺对聚丙烯 3D 打印件拉伸性能和冲击强度的影响规律,最终形成了制备高精度、高强度聚丙烯 3D 打印材料与制件的方法体系。

E07-24

激光粉末床熔化 Al-Zn-Mg-Cu 合金的微观组织调控与强塑性协同提升研究

肖飞*、疏达、孙宝德
上海交通大学材料学院

增材制造技术在结构件的一体化制备方面表现出巨大优势。随着航空航天、交通运输等领域的发展,对增材制造高强度铝合金提出了迫切需求。本文针对传统高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金打印易开裂与强塑性难以协同提升的瓶颈难题,提出一种利用 Al₃Nb 相细化晶粒进而抑制开裂,并通过后热处理调控多级析出相种类、形态、尺寸与数量密度的策略,发展了一种具备双峰晶粒组织的高强塑性可增材制造 Al-Zn-Mg-Cu-Nb 合金。研究表明,Al₃Nb 初生相细化合金晶粒,同时抑制激光粉末床熔化(LPBF)热裂纹,这是由于 Al₃Nb 与 Al 基体之间具有近似共格的界面与较小错配度(~0.73%),相比于 Al₃Zr、Al₃Sc、Al₃Ti 等,Al₃Nb 析出所需孕育时间短、析出临界冷速大,有利于在 LPBF 极快的冷速条件下析出高数量密度初生形核位点。Nb 的添加对合金凝固区间与热裂纹敏感性几乎没有影响,Al₃Nb 初生相引起的晶粒细化是热裂纹抑制的主要原因。揭示了低沸点元素 Zn、Mg 的烧损比例随能量密度的关系,得到了不同 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 合金 LPBF 成形工艺窗口。LPBF 特殊的凝固热历史所导致的不均匀熔池组织为固溶热处理提供了不同的再结晶驱动力,熔池底部诱发再结晶并形成粗晶(CGs),而熔池中心遗传打印态的细晶(FGs),由此形成双峰晶粒组织。通过改变固溶温度与固溶时间可实现对双峰晶粒的调控。进一步时效处理使合金析出多尺度强化相。合金屈服强度和抗拉强度分别为~648MPa 和~728MPa,同时可维持中等的断后伸长率~5.1%。CGs(软区)与 FGs(硬区)之间的变形不均匀性导致了非均匀变形诱导的强化(Heterogeneous Deformation Induced, HDI),为合金提供了额外的强化机制。

E07-25

直接墨水书写和无压浸渗制备近净形 Cr₃C₂/Cu 层状复合材料及性能表征

李帅帅、郭瑞芬、沈平*
吉林大学

在材料科学领域,层状结构因其在提升复合材料强韧性方面的独特优势而受到广泛关注。本研究采用直接墨水书写(DIW)技术结合无压浸渗工艺,成功制备了 Cr₃C₂/Cu 层状复合材料。通过精心调控打印浆料配方及其流变特性,实现了陶瓷支架的精确成型;借助 Cr₃C₂ 与 Cu 之间优异的润湿性,达成了复合材料的近净形制造。研究发现随 Cr₃C₂ 含量的增加,材料的弯曲强度和特定取向的韧性均显著增强,同时显著的各向异性特征突显了力学性能对加载方向和结构取向的依赖性。利用原位观察,有限元分析和数字图像相关技术,揭示了软硬层相间排列,互穿结构以及 Cu/Cr₃C₂ 良好的界面结合对强韧性提升的贡献以及裂纹偏转、多裂纹形成、软硬层协同变形、延性相桥接等增韧机制。这项工作不仅为高性能金属-陶瓷复合材料的设计与开发提供了新的策略,也为航空航天、汽车制造等领域的应用提供了潜在的材料制造方案。

E07-26

电子束增材制造高强钛合金及其原位热处理下的组织调控

牛京喆*
西北有色金属研究院

亚稳高强钛合金是钛合金的重要分支之一,由于其优异的强度特性,已广泛应用于航空航天等领域。近年来,随着高强钛合金复杂零件的快速近净成形需求提出,采用增材制造方法制备此类合金的工艺-组织-性能研究急需展开。然而,由于高强钛合金中常添加大量的β稳定元素,导致此类合金在增材制造等快速

冷却与热循环条件下极易生成大量等温 ω 与绝热 ω 相, 显著降低了材料性能, 导致其往往需要复杂的后处理工艺才能勉强满足设计需求。鉴于此, 本研究从电子束增材制造的特性出发, 提出通过调控电子束增材制造粉末床温度, 实现样品的增材制造原位热处理, 精准控制合金制备过程的固态相变路径。相关测试结果显示, 调控后的合金组织呈现出双级特征, 室温力学强度达到锻态水平, 展现出了优异的应用潜力。

E07-27

冷冻 3D 打印跨尺度多孔支架的制备及应用

吴斌*

华中科技大学

在再生医学和组织工程领域中, 增材制造技术的兴起引起了广泛关注, 因为通过将材料精准地逐层累加, 可控制成形三维支架的空间结构。天然组织和器官中, 生物细胞贴附于细胞外基质生长。因此, 细胞的黏附、增殖和分化等细胞活动会受到细胞外基质多性能的影响, 比如基质的硬度、拓扑结构、载药种类和浓度等。基于增材制造技术可准确地构筑细胞所需特定性质的细胞外微环境。

尽管如此, 但增材制造技术仍存在不足, 比如, 仅能构建宏观孔洞而无法构建微观孔洞。因为不同的增材制造技术有自身的尺寸限制, 比如激光光束的最小直径大概是 50 微米, 挤出喷嘴的内径大概是 150 微米, 因而难以构造微观孔洞。针对这一问题, 冷冻 3D 打印通过在挤出过程中外加低温场, 诱导浆料中的溶剂凝固结晶发生相分离; 然后通过冷冻干燥升华结晶, 从而得到微米级别的孔洞, 形成跨尺度的多孔支架, 可极大提高支架的孔隙率、比表面积和载药量, 有助于组织工程领域内的应用。

E07-28

从灰度光固化 3D 打印到功能梯度材料

费广海*

东南大学附属中大医院

功能梯度材料最早被日本科学家应用于航空航天设备, 作为一类高性能材料, 其成分/结构在空间上梯度变化以实现在不同位置具备不同性能。由于其可调控的多功能特性及对特定应用需求的高度适应性, 功能梯度材料的设计、构建和应用一直是材料科学和材料加工领域的研究热点。然而功能梯度材料在空间上的各向异性不可避免地与传统制造技术(如铸造、切削及注塑等)不兼容。虽然目前使用喷涂、电沉积和粉末冶金等制造技术能加工一维/二维梯度材料, 但是无法制造三维、复杂的梯度材料。灰度光固化 3D 打印技术, 通过使用灰度掩模调控曝光能量的梯度分布, 在空间上定义高分子材料的交联密度, 可以实现功能梯度材料的构建。这种具有微观结构梯度的功能材料在微流控、软体机器人及生物学工程等领域具有重要应用价值。

E07-29

激光增材制造 CoCrFeNi 高熵合金激光抛光工艺研究

张咪娜*、周宇航

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

激光增材制造技术可实现高熵合金零部件的快速制造, 但增材件存在表面质量差、难加工等问题。对此, 本文采用激光抛光工艺来改善 CoCrFeNi 高熵合金增材件的表面质量。首先通过筛选实验法和单因素实验法, 研究了激光功率、扫描速度、扫描间距、离焦量、扫描轨迹和扫描次数等因素对表面粗糙度的影响规律, 而后探讨了激光抛光对合金表面元素分布和微观组织的作用机制。结果表明: 激光抛光技术可以

有效降低增材件的表面粗糙度，离焦量和激光功率对表面质量的影响相对较大，表面粗糙度随着扫描速度、离焦量、扫描次数的增加呈现先减小后增大的趋势；经激光抛光后的高熵合金增材件表面 O 元素和 Cr 元素含量显著降低，Co 元素、Fe 元素及 Ni 元素含量略有提升，表面粗糙度较初始表面粗糙度降低了约 90%；连续激光对增材件表面的作用机制主要是重熔，对表层氧化物的去除机制主要是汽化。

E07-30

激光冲击强化增材制造 TiAl 合金组织演化及耐腐蚀性能研究

兰亮*

上海工程技术大学

激光熔化沉积 (LMD) 技术是一种先进的增材制造技术，具有高精度、快速制造、材料利用率高、可修复性强以及能够制造复杂形状零件的特点，适用于 TiAl 合金的制备，在航空航天、汽车、医疗等领域具有广泛的应用前景。然而，LMD 过程中由于冷却速度快、温度梯度大以及复杂的热循环导致制备的 TiAl 合金的力学性能及耐腐蚀性能大大降低。已有研究表明，激光喷丸 (LSP) 技术在提高金属零件的耐腐蚀性能方面颇为显著。然而，关于 LSP 对 LMD 成形 TiAl 合金微观组织与性能影响的研究却很少有人关注。

因此，本文以激光熔化沉积 Ti45Al8Nb 合金为研究对象，研究了 LSP 对 LMD 增材制造 Ti45Al8Nb 合金微观组织及耐腐蚀性能的影响。测试了 LSP 处理前后 LMD 成形 Ti45Al8Nb 合金试样表面相组成、维氏硬度及耐腐蚀性能。通过金相显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射和透射电子显微镜表征了激光喷丸前后 LMD 成形 Ti45Al8Nb 合金表层微观组织结构，分析了 LSP 前后 LMD 成形 Ti45Al8Nb 合金的电化学腐蚀行为，探究了 LSP 处理对耐腐蚀性能的影响机制。

E07-31

增材制造 NiTiCu 合金的宽温域超弹性研究

卢海洲^{1,2}、杨超^{*2}

1. 广东技术师范大学

2. 华南理工大学

增材制造 NiTi 基形状记忆合金 (Shape Memory Alloys, SMAs) 在某一特定温度下可以表现出良好超弹性。然而，迄今为止，增材制造 NiTi 基 SMAs 的宽温域超弹性研究少有报道。那么如何进一步扩大增材制造超弹性 NiTi 基 SMAs 的应用温度范围呢？本研究采用激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF) 增材制造工艺，基于预合金化 NiTi 粉末，通过 Cu 元素添加，调控基体奥氏体相的畸变程度，成功制备得到了具有宽温域超弹性的 NiTiCu 三元 SMAs。NiTiCu 合金在 -75°C~50°C 的温度范围内表现出 1.23%~2.40% 的压缩超弹性回复应变。微观结构分析表明畸变 Ti(Ni,Cu) 奥氏体与基体内高密度层错等的协同作用是促使 L-PBF NiTiCu 三元 SMAs 表现出宽温域超弹性的关键因素。本研究结果为增材制造工艺获得宽温域超弹性 NiTi 基 SMAs 提供了新途径。

E07-32

基于粉床图像的增材制造在线监控技术

张英杰*

华南理工大学

激光粉末床熔融 (LPBF) 作为应用最为广泛的金属增材制造方式之一，在航空航天、军工武器、生物医疗等领域具有广泛的应用潜力，但是由于成形过程伴随着复杂的物理化学变化，易于产生变形、气孔、裂

纹等缺陷, 这些缺陷的累积导致最终的构件质量无法满足一些严苛的应用需求, 在线监控技术是解决质量问题的有效手段, 本报告拟介绍激光粉末床熔融在线监控现状以及本课题组的研究内容, 主要包括 1) 开发深度学习算法识别粉床图片中的缺陷和异常现象; 2) 开发语义分割算法识别粉床缺陷的形状及尺寸; 3) 开发有效的参数调控模型实现逐层表面质量的反馈调控。

E07-33

激光粉末床熔融高强铝合金 Al-Fe-Cu-xZr 的成形性与微结构研究

徐京豫¹、张诚²、柳林*²

1.中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2.华中科技大学材料科学与工程学院、材料成形与模具技术国家重点实验室

激光粉末床熔融 (LPBF), 属于一种增材制造技术 (AM), 由于其能够实现复杂三维构件的成形, 在航空航天和汽车等领域具有广阔的应用前景。但铝合金具有高激光反射率和高导热率, 且在 LPBF 过程中易形成粗大的柱状晶, 使 LPBF 技术在成形高质量铝合金构件方面仍存在极大挑战。迄今为止, 除共晶铝硅系合金外, 多数高强铝合金体系在 LPBF 成形过程中, 易发生开裂。针对高强铝合金的 LPBF 成形难题, 本工作基于共晶合金和晶粒细化策略, 自主开发了系列高强 Al-1Fe-0.6Cu-xZr(x=0.3、0.6、0.8、1.3at%)合金体系, 并系统研究了 Zr 含量对 LPBF 铝合金成形性、微观结构和力学性能的影响。研究发现, 随 Zr 含量的增加, 铝合金的成形性显著改善, 在 LPBF 过程中飞溅和缺陷逐渐减少, 表面粗糙度降低。模拟表明, LPBF 成形性主要由熔池的稳定性决定, 而熔池稳定性与熔体速度梯度 (MVG) 和 Marangoni 力密切相关。Zr 含量增加会使 MVG 分布更加均匀, 并减小 Marangoni 对流, 有利于熔池稳定性和成形性的提升。另一方面, Zr 含量对微观结构也具有显著影响。四种 LPBF 成形的铝合金都表现出粗晶区 (CGZs) 和细晶区 (FGZs) 交替分布的异质结构, 但随 Zr 含量的增加, CGZs 中粗大的柱状晶转变为精细的等轴晶。这种由柱状晶到等轴晶的转变 (CET) 是由于随 Zr 含量增加, 固液界面的温度梯度 (G) 与凝固速率 (R) 之比 (G/R) 逐渐降低。此外, Zr 含量的增加还导致 CGZs 和 FGZs 中晶粒逐渐细化, 这是由于冷却速率 (G*R) 的增加促进了平均晶粒的细化。由于良好的成形性和精细的等轴晶结构, LPBF 制备的含 0.8 和 1.3at% Zr 的铝合金几乎全致密, 并表现出优异的性能。本工作为设计具有良好成形性和优异力学性能的新型 LPBF 铝合金提供了理论依据和技术路线。

E07-34

高 γ' 相镍基高温合金的无裂纹激光增材制造及强韧化

张文井、张嘉仑、焦也、刘伟*

清华大学

高 γ' 相镍基高温合金具有优异的中高温综合力学性能、抗高温氧化性能和耐腐蚀性能, 是高超音速飞行物和燃气轮机热端部件的关键材料。传统的铸造成形方法难以满足复杂结构热端部件的制备要求, 采用加工精度高、可一体化成形的激光增材制造技术制备复杂结构热端部件受到广泛关注和重视。高 γ' 相镍基高温合金在激光增材制造时存在裂纹这一共性难题, 如何实现该合金的可靠激光增材制造对于推动该材料及激光增材制造技术在高超音速飞行物和燃气轮机中的应用具有重要意义。本研究以 MarM247 高温合金为模型材料, 系统研究了合金成分和激光增材制造非平衡凝固特点对裂纹形成的影响机制, 创新性地开发出了基于场调控思想的激光增材制造新策略, 首次实现了激光增材制造 MarM247 高温合金的裂纹抑制, 发展了高 γ' 相镍基高温合金的无裂纹激光增材制造技术。此外, 通过调控跨尺度微结构, 显著提高了 MarM247 高温合金高承温下的服役强度, 优于已见报道的高温力学性能, 并揭示了强韧化机制。本研究可为难成形金属结构材料激光增材制造的裂纹抑制和强韧化提供理论基础和技术支撑。

E07-35**激光粉末床熔融钨-金刚石金属基复合材料的界面扩散行为与非晶化机理研究**

高学浩*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

钨 (W) + 金刚石 (D) 金属基复合材料具有钨合金和金刚石的优点, 在精密切削研磨、隧道钻头、核设施防护、航空航天热端等领域有着广泛的应用。然而, 由于钨和金刚石的高熔点、硬度、强度等特性, 以及 W+D 复合材料的非均匀性, 传统技术制备 W+D 复合材料常存在形状和尺寸限制, 并且机械加工困难。激光粉末床熔融 (L-PBF) 在制备 W+D 材料复杂构件具有明显优势。因此, 本文以钨 (W)、金刚石 (D) 和镀 Ni 金刚石 (D-Ni) 粉末为原料, 采用 L-PBF 技术制备了 W+D 和 W+ (D-Ni) 复合材料, 重点研究了 W 和 D 界面的熔体流动和元素扩散行为、微观组织演变和非晶化机制。

E07-36**低滞后高回弹磁性弹性体及其在柔性压力传感器中的应用**

项紫银, 巫远招, 尚杰, 李润伟

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

弹性体是一种兼具弹性和粘性特性的聚合物材料, 可广泛用于各种工业产品。弹性体的力学松弛是物理学和工程学中众所周知的现象, 在日常使用中受到交变的力或者应变的所产生的动态粘弹性会使其不能迅速恢复形变。为此, 我们提出设计一种拓扑磁化结构, 使其兼良好回弹性的空间结构, 又具有同性磁极相对互斥的磁化结构, 目的是获得一种动态粘弹性改善的、变形后可快速回弹的磁性弹性体, 并探索了其在柔性压力传感器中的应用潜力。我们利用光固化 3D 打印及压缩充磁技术制备了拓扑磁化结构磁弹性体, 具有高达 99% 的回复性。基于其搭建柔性磁性压力传感器, 具有极低信号迟滞, 仅为 1.18%, 1000 次压缩应变 70% (110kPa) 循环下信号漂移为 1.63%, 22000 次压缩应变 40% (20kPa) 循环下信号漂移为 0.017%。几乎无信号漂移。这种动态粘弹性改善的磁弹性体在长期动态服役条件下可满足高回复性, 在柔性电子等领域有着广泛的应用前景。

E07-37**CML-Hybrid@多激光同轴复合增材技术开发进展**

程远*

南京英尼格玛工业自动化技术有限公司

报告将探讨英尼格玛全球首创的 CML-Hybrid 多激光同轴复合增材技术, 及其最新进展。该技术通过四重复合机制, 即多波长激光复合、激光电弧复合、丝粉复合以及双路保护气复合, 为定向能量沉积 (DED) 增材制造领域开辟出了新的技术开发方向。该技术不仅适用于 DED 技术前沿研究, 如变组分梯度材料、原位合金化增材、高通量材料制备、微观组织调控等, 同时可满足 DED 技术工程化应用中对提升增材材料兼容性、增材效率、构件精度、性能及复杂程度等的需求。

E07-38**Direct Ink Writing of AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High Entropy Alloy**

Zhenfei Jiang*, Siyuan Peng, Dejiang Li

Shanghai Jiao Tong University

The AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic HEA was printed by direct ink writing and followed by sintering process with protective argon gas. The sintered bulk AlCoCrFeNi_{2.1} HEA by DIW showed a high yield strength of 535.6 MPa, high ultimate tensile strength of 1062.1 MPa and large uniform elongation of 15.8%. The good combination of strength and ductility was attributed to the ultrafine grain structures and precipitation hardening. The sintered AlCoCrFeNi_{2.1} HEA with 3D lattice structures exhibited better energy absorption capability compared to other lattice structures at ambient temperature. The superior energy absorption capability is attributed to the bending-dominant deformation mechanism and the uniform equiaxed grain structure after fully annealed, which were conducive to the working hardening of the lattice structures.

E07-39

结构功能一体化铝基中子屏蔽材料的增材制造工艺及组织性能研究

汪明亮*、杨晨、黎阳、王康宝、陈哲、钟圣怡

上海交通大学材料科学与工程学院

本文分别以 Al-6Mg-5Gd 中子屏蔽合金材料的研究对象，采用激光粉末床熔化（L-PBF）技术制备技术研究了此合金的 L-PBF 成形性，探究工艺参数对材料微观组织演化规律、及其与合金力学性能和中子屏蔽性能的影响机理，实现了高强韧中子屏蔽材料的一体化增材制造。本文的主要研究内容如下：

(1) 在 Al-6Mg-5Gd 合金的 L-PBF 成形性分析、工艺参数优化及缺陷形成机制研究中：(I) 基于 Al-6Mg-5Gd 合金凝固行为的热力学模拟分析，计算了 Al-6Mg-5Gd 合金的裂纹敏感性指数 $|dT/d(fS)^{1/2}|$ ，发现了此裂纹敏感性指数较低以在理论上论证了合金具备较好 L-PBF 成形性。(II) 在 L-PBF 实验工艺参数研究中，所有合金试样均成形良好未出现严重缺陷，且其致密度都在 95% 以上。其中，最佳工艺窗口为 88~106 J/mm³，在该区间内的成形试样致密度均在 98.8% 以上。当能量密度为 93 J/mm³，合金试样的致密度最高可达 99.1%。(III) 结合 X-CT 实验，揭示了 L-PBF 成形 Al-6Mg-5Gd 合金中各类缺陷的形成机制，明确了能量密度对缺陷形成的影响机理。

(2) L-PBF 成形 Al-6Mg-5Gd 合金的微观组织研究结果表明：(A) 成形合金由 α -Al 相和 Al₂(Mg,Gd)(τ 36) 相组成。(B) 合金的熔池宏观结构包括熔池内部、熔池边界和热影响区。其中，熔池内部为外延生长的柱状晶组织，熔池边界为粗大的等轴晶组织，热影响区为点状分布的球化组织。熔池结构随着能量密度的降低由窄而深向宽而浅演化。(C) 成形合金的包含双峰晶粒组织（柱状晶+等轴晶）：熔池内部为细长型的柱状晶组织，由网形分布的 τ 36 胞状结构组成；熔池边界区域为细小的等轴晶组织。

(3) L-PBF 成形 Al-6Mg-5Gd 合金的力学性能和中子屏蔽性能研究，包括：(I) 在最佳能量密度 (93 J/mm³) 下，成形合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 269 MPa，465 MPa 和 12.9%。材料强度主要来源于铝合金的基体强化、Mg 元素提供的固溶强化、细小晶粒提供的晶界强化、 τ 36 相提供的 Orowan 强化以及位错强化。(II) 热中子吸收实验表明成形合金的宏观中子吸收截面 Σ 约为 20 cm⁻¹，与 30% B₄C/Al 复合材料的中子屏蔽能力相仿。

在此前提下，L-PBF 成形 Al-6Mg-5Gd 合金在强度和塑性方面有了显著提升，有效解决了材料力学性能和中子屏蔽性能之间的制约关系，实现了高强韧型中子屏蔽材料的设计预期，并可以成形多种复杂结构应用于中子谱仪的屏蔽部件。本研究可为开发高性能结构功能一体化中子屏蔽结构材料提供体系设计和工艺优化的新思路。

E07-40

4D 打印技术在固体动力领域的应用展望

乐浩*、何快、张亮、黄江流、毛成立

上海航天动力技术研究所

面向未来智能动力发展所需，针对固体动力遇到的性能提升、功能拓展及效能跨越难题，如何实现高
适变、高效能和高矢量调控是固体动力跨越式发展的必由之路。本文从 4D 打印技术现状着手，围绕其变形、
变性和变功能特征，详细阐述了 4D 技术演进过程和科学内涵，当前 4D 打印技术在形状变化方面已取得
显著进展，但在材料性能调控与功能多样化方面仍有待进一步突破；可打印的材料体系主要基于形状记忆、
仿生和复合材料等，而外部激励方式则依赖于热、光、电和磁场等传统手段。同时，对固体动力行业发展
现状及未来智能动力的技术特征进行了完整刻画，认为针对智能飞行器对未来先进固体动力的需求，提升
固体发动机能量调控品质仍是亟待破解的工程难题，而如何拓展仅有的推进功能未来智能固体动力能力
生成的重要基础。

针对这些挑战，4D 打印技术展现出了巨大的应用潜力，其特有的变形、变性和变功能特征可赋能传统
固体动力领域实现颠覆式创新，实现特定结构的轻质化、功能化和自适应变形，以灵活应对不同应用场景
下更高效、更智能的调控需求，有望成为未来智能动力的重要技术基础。由此具体提出了利用 4D 技术在
推动实现固体发动机变构型、变性能和变功能方面的应用展望，并初步论述了由此带来的技术推动增益效
果。后续，为加快推动 4D 打印技术在固体动力领域的应用，需进一步建立“功能结构+智能材料”技术理念，
开展不同激励条件下智能结构设计理论与性能演化机理研究，发展异质多材料梯度打印装备并完善各类可
打印材料库，构建先进的精准评估方法，支撑变革传统固体发动机设计及应用模式，为未来智能动力的发
展注入新技术优势。同时，这也将为 4D 打印技术领域带来新的发展机遇和挑战，推动整个行业向更高水
平迈进。

E07-41

增材制造铍铝合金的显微组织与力学性能

郑梦瑶、徐庆东*、杨磊、苏斌

中国工程物理研究院材料研究所

铍铝 (Be-Al) 合金具备低密度、高比刚度、高比强度、优异的热稳定性等优点，在航空航天惯性导
航系统和光学系统上有着重要应用，但制备工艺的不足限制了 Be-Al 合金的规模化应用，而增材制造工艺
有望突破 Be-Al 合金的制备加工瓶颈。本工作通过激光定向能量沉积增材制造技术制备 Be-Al 合金，并研
究 Si 和 Mg 两种元素的添加对沉积态 Be-Al 合金组织性能的影响。结果表明，沉积态铍铝合金的组织由柱
状的 Be 相与网状的 Al 相组成，与铸态合金相比，组织得到细化且无明显的凝固缺陷存在，合金的塑性得
到大幅度的提升，但是强度相对目前商用的铸态 Be-Al 合金尚有不足。通过 Mg 和 Si 两种元素的添加，使
Al 相的晶粒得到明显细化，且在 Al 相中形成了块状的 Si 颗粒，由于两种元素起到的固溶强化、细晶强化
和第二相强化的作用，沉积态 Be-Al 合金的屈服强度和抗拉强度分别提升约 80% 和 75% 左右，使其强度和
塑性都优于商用的铸态 Be-Al 合金。本工作的开展可以为增材制造用高性能 Be-Al 合金的成分设计与组织
调控提供参考。

E07-42

High Thermal Conductivity SiC Ceramics Fabricated by Digital Light Processing

Weiwei Liu¹, Hao Li¹, Rongzhen Liu^{*1,2}

1. National Innovation Institute of Additive Manufacturing

2. Xi'an Jiaotong University

In order to improve the thermal conductivity of SiC ceramics, the effects of diamond and β -SiC on the properties of SiC were investigated. Digital light processing was adopted to fabricate SiC green bodies with complex shapes. After optimization with resin and additives, the solid content of diamond/SiC composites slurry could reach 48 vol%. Reactions sintering was performed to obtain dense parts. The results showed that the addition of diamond could effectively improve the physical, mechanical and thermal properties of composite materials. With the content of diamond increasing, coefficient of thermal expansion (CTE) of the composites decreased, the CTE was less than $2.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. The thermal conductivity (TC) of the composites increased with the diamond content increasing, the TC was higher than $240 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. The bending strength of the composites increased with the diamond content increasing, the bending strength was higher than 310 MPa, meanwhile, the volumetric density was higher than $2.9 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

E07-43

外能场辅助增材制造高性能金属结构材料

周林, 李金国, 梁静静

中国科学院金属研究所

本研究针对外能场辅助增材制造技术在金属结构材料的研究进行了深入探讨, 常见的外能场主要有预热、超声、磁场, 用于调节金属材料的凝固过程。通过对比分析证实了外能场辅助显著改善了材料的微观结构均匀性和力学性能。具体来说, 对合金钢而言, 热场辅助能有效调控热条件以缓解裂纹萌生; 超声应用则因空化和搅拌效应带来细化晶粒, 并促进了动态再结晶。这些改进最终增强了合金钢的耐磨性和拉伸性能。尽管如此, 单一能场辅助的增材制造技术仍有其局限性, 例如超声衰减、预热方式、磁场类型等引起的调控作用不足。因此, 采用多能场耦合辅助策略成为了调控增材制造结构材料的一种有效且具有前景的方法。对于航空航天领域的镍基高温合金, 外能场的应用也显示出积极效果, 这对航空发动机等关键应用极为关键。本项研究不仅揭示了外能场辅助增材制造在提升合金钢和镍基高温合金性能方面的潜力, 还为未来的工业应用提供了重要的科学依据和技术参考。未来研究将进一步探讨外能场作用方向带来的差异影响以及如何实现多能场耦合作用最大化, 并针对工业及航空航天领域关键零部件的修复再制造进行深入研究, 以扩展其在高端制造领域的应用前景。

E07-44

选区激光熔化制备 W-25%Re 合金组织和性能研究

张莹莹*

安泰科技股份有限公司

以球形 W-25Re(质量分数, %, 下同)合金粉末为原料, 采用选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术制备 W-25Re 合金试样, 研究工艺参数对 W-25Re 合金组织和性能的影响。利用分析天平、场发射扫描电镜、X 射线衍射仪和显微硬度仪等分析方法表征 SLM 制备的 W-25Re 合金试样的相对密度、显微组织、相组成和显微维氏硬度等性能。结果表明: SLM 制备 W-25Re 合金过程中无明显的球化、翘曲、变形、分层或不能成形现象, 试样表面和侧面无明显孔洞和裂纹等缺陷, 成形性良好。随着输入体能量密度逐渐增大, W-25Re 合金试样内部垂直面晶粒形态逐渐从等轴晶和柱状晶混合转变为粗大的柱状晶。W-25Re 合金试样仅含有立方晶系 W13Re7 相, 衍射峰 2 θ 角向左偏移的变化主要是由残余应力造成的。激光功率和扫描速度对 W-25Re 合金试样相对密度的影响显著。当体能量密度为 1050J/mm³, 即激光功率 210W, 扫描速度 200mm/s 时, 可获得相对密度高达 98.49% 的 W-25Re 合金试样; 此时, 试样水平面和垂直面的显微硬度分别为 525.9HV0.2 和 520.6HV0.2, 与轧制态 W-25Re 合金硬度值接近。

E07-45

光固化 3D 打印湿滑水凝胶与生物力学适配仿生软组织器官模型

刘德胜、王晓龙*、刘维民

中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室

与活体器官、动物模型及临床试验相比, 具有仿生三维结构的组织器官模型具有成本低、符合伦理道德和易于操作等优点。水凝胶因其与人体软组织相似的软湿滑等特性, 已经广泛应用于仿生润滑、仿生粘附和生物医疗器械等领域。然而, 水凝胶存在的力学性能难调控、仿生结构难构筑和功能化单一等科学技术问题限制了其实际应用。为此, 以水凝胶材料的机械与润滑性能调控为出发点, 采用微观分子组成和宏观形状结构化构筑的设计理念, 提出了共价与金属配位交联双网络和氢键网络等微观尺度分子调控策略, 发展了系列机械性能可调且与生物软组织力学特性适配的粘弹性湿滑水凝胶。同时, 结合光固化 3D 打印 (VatPhotopolymerization3DPrinting) 实现了宏观结构化水凝胶的高精度成型制造, 并构筑了多种与生物软组织器官结构形态相似且力学性能适配的湿滑水凝胶仿生软组织器官模型, 包括心脏、肝脏、肾脏、肠道、肺、脑组织以及血管网络等复杂结构模型。这些生物力学适配的仿生高精度水凝胶软组织器官模型在外科手术训练、医疗设备测试和器官芯片等领域具有潜在的应用前景。

[1]DeshengLiu,YufeiCao,PanJiang*,YixianWang,YaozhongLu,ZhongyingJi,XiaolongWang*,andWeiminLiu*,Tough,Transparent,andSlipperyPVAHydrogelLedbySyneresis,Small,2023,19,2206819.

[2]DeshengLiu,PanJiang*,YixianWang,YaozhongLu, JiayuWu,XinXu,ZhongyingJi,ChufengSun,XiaolongWang*,WeiminLiu*,EngineeringTridimensionalHydrogelTissueandOrganPhantomswithTunableSpringiness,AdvancedFunctionalMaterials,2023,33,2214885.

[3]DeshengLiu,PanJiang,YueHu,YaozhongLu,YixianWang,JiayuWu,DanliHu,TaoWu,XiaolongWang*,SlipperyHydrogelwithDesiccation-Tolerant"Skin"forHigh-PrecisionAdditiveManufacturing,InternationalJournalofExtremeManufacturing,2024,6,025501.

E07-46

新型高韧高耐磨钛合金激光熔覆涂层制备及组织性能研究

林成*、马启航、任廷臻、李飞

辽宁石油化工大学

钛合金因其优异耐腐蚀性、较高的比强度以及良好的高温服役性能, 现已经成功地应用于航空, 航空航天、石油化工等行业。但是钛合金具有摩擦系数高、耐磨性差、硬度低等缺点, 从而限制了钛合金的广泛应用。因此高韧高耐磨钛合金激光熔覆涂层的研发已经成为当今研究热点问题之一。于是本文介绍 Al-Si 基、亚稳 b 基及 Ni 基钛合金耐磨涂层的制备方法, 并探讨了上述几种钛合金耐磨涂层组织性能演变规律。研究表明, 新型高韧高耐磨钛合金激光熔覆涂层具有优良的综合性能。

E07-47

SLM 制造 Inconel718 合金原位 SEM+EBS 高温拉伸/疲劳显微组织演化研究

吕俊霞*

上海交通大学

铝在航空航天等领域具有广泛的应用, 但对于红外激光吸收率低, 激光增材制造存在诸多困难。面向航空、机器人等领域对于铝合金构件批量化制造的迫切需求, 围绕合金粉体、增材制造工艺和结构开展了系列工作。通过开展成分设计, 发明了系列原位自生 TiB₂ 颗粒增强铝合金粉体, 成功地将高裂纹敏感性材料转变为可打印材料, 基于原位监测和连续-离散耦合模拟实现了气雾化制粉装备和工艺的优化; 通过开

展增材制造过程同步辐射原位监测和多物理场耦合建模，优化了激光增材制造工艺，显著降低了激光增材制造工艺缺陷；通过开展面向增材制造的结构设计和增材制造复杂流道内表面电化学抛光工艺研究，获得了点阵填充大飞机风扇叶片、仿生机器人足等高性能复杂结构。同时，开发了 2000W 蓝激光粉末沉积增材制造、修复和焊接装备，显著提升了铝合金激光制造的效率和精度。本报告提出了铝合金构件批量化增材制造技术路线，为高性能铝合金构件增材制造技术的大规模应用提供了思路。

E07-48

复合增材制造工艺制备高强 316L 不锈钢研究

刘冠*

中南大学

激光定向能量沉积 (LDED) 作为一种先进的增材制造技术，在不锈钢部件的制造中备受关注。LDED 过程的快速熔化和凝固导致气孔和柱状枝晶的出现，从而降低了合金的强度。基于此，开发了自行研制的 LDED-UR (超声波轧制) 同步制造设备来制备 316L 不锈钢，并对其微观结构和力学性能进行了表征。结果表明，LDED-UR 工艺显著减小了气孔的大小和分数，在超声波振动和辊压的共同作用下，获得了细小的等轴晶粒。随着塑性变形的加剧，LDED-UR 样品的平均晶粒尺寸从 76.10 μm 减小到 26.23 μm (LDED 样品)，高角度晶界转变为低角度晶界。同时，与 LDED 样品相比，LDED-UR 样品中的位错密度增加。由于晶粒细化和位错强化，LDED-UR 样品的平均显微硬度、屈服强度、极限抗拉强度和伸长率分别达到 268.18 \pm 13.90HV0.2、442MPa、771.2MPa 和 49.8%，高于 LDED 样品的 214.13 \pm 13.76HV0.2、396MPa、682MPa 和 45.5%。这意味着在 LDED 工艺下采用原位超声轧制可以获得优越的力学性能。微观结构对力学性能影响的深入研究为提高 LDED 合金的力学性能开辟了一条新途径。

E07-49

多材料粉床增材制造界面裂纹生成机理研究

李绪道、徐京豫、程东旭、韦超*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

多材料激光粉末床熔融有望打印局部成分可控、几何形状复杂的金属制件，满足下一代航空航天产品“材料-结构-性能”一体化的发展需求。目前，材料结合界面的裂纹是限制多材料增材制造应用的瓶颈问题。本研究以典型难结合 Al 合金-Ni 合金体系为研究对象，开展同步 X 射线原位检测、微观结构表征、熔池动力学仿真，揭示 Al-Ni 合金界面裂纹的生成机理。研究发现，Al-Ni 元素混合不均匀形成局部富 Ni 团簇，团簇周围形成大量金属间化合物，脆性金属间化合物在热应力作用下导致开裂。研究对比了高能量密度、低能量密度两组典型参数，发现低能量密度下熔池浅，熔合区存在大量富 Ni 团簇，更容易开裂。最后，熔池动力学仿真表明高精度的元素混合模型有望预测金属间化合物分布及开裂位置，为抑制裂纹提供模拟手段。

E07-50

多材料多尺度多功能打印仿生材料、结构与机器人

郭双壮*

中山大学

通过多材料 3D 打印这一桥梁，快速发展的 AI 技术可以用来控制不同的材料直接生产最终的产品。这种技术利用可打印的功能材料，通过逐层累积的方式来构造物体，从而为复杂结构的设计和生产提供了便

利，尤其是在仿生领域，可以促使传统单一功能或结构的仿生向着多维度仿生发展。而基于多材料挤出的 3D 打印技术具备多个打印自由度，适合于制造多功能产品，目前已成功使用各种功能墨水来制造柔性电子器件，柔性仿生机器人、仿生超材料等，并且生产过程简单、环境友好，不需要传统的超净间微加工方式。本报告总结了课题组最近在多材料打印多维度仿生结构和器件方面的工作，包括多材料打印仿生神经电化学晶体管，仿生箭鱼机器人、仿生蛇型机器人以及 4D 打印磁热响应光子晶体等研究结果，展示了单个 3D 打印平台来实现多个柔性仿生器件的集成能力。这种简便快速的 3D 打印技术可以在未来多功能仿生结构、器件以及机器人制备中发挥巨大的应用潜力。

E07-51

增材制造 Ti6Al4V 合金的疲劳性能预测与抗疲劳制备

曲展、张振军、张哲峰*

辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号中科院金属研究所

增材制造 (Additive manufacturing, AM) 因其得天独厚的自由成形能力极大地满足了高端装备和构件对高集成性、轻量化、一体化的需求，被认为是制造领域的颠覆性技术。然而，与传统制造相比，AM 制备的材料在循环载荷下的疲劳性能普遍较差，严重制约了其作为结构承力件的广泛应用。因此，如何提升 AM 材料与构件的疲劳性能是国内外学术界与工程界热切关注的焦点问题。本研究通过揭示了 AM 钛合金组织-缺陷耦合机制，阐明了基体软硬程度对宏观缺陷形貌的敏感性差异及内在的疲劳损伤机制，建立了能反映基体影响、组织-缺陷耦合效应及二者共同影响的 AM 钛合金疲劳性能预测模型。进一步，发展了 AM 钛合金抗疲劳优化的组织缺陷调控策略和工艺方法，制备了具有超高疲劳抗性的 AM Ti6Al4V 合金材料，其不仅远超目前报道 AM 和锻造 Ti6Al4V 合金的拉-拉和拉-压疲劳性能，而且与其它材料相比具有最高的比拉拉疲劳强度，这不仅揭示了 AM 技术在制备抗疲劳结构件方面的巨大潜力，而且为 AM 材料和构件的抗疲劳优化设计提供了指引。

E07-52

向日葵髓启发具有机械功能放大的双梯度细胞聚氨酯结构

白常成、王晓龙*

中国科学院兰州化学物理研究所

具有各种机械功能的细胞材料越来越受到航空航天、交通运输和工业化领域的关注。然而，许多人工细胞材料尽管具有分层有序的结构，甚至具有某些独特的性能，但由于内在机械性能和复杂结构设计的限制，在放大机械功能方面仍然落后于许多天然细胞材料。在此，我们从向日葵髓的轻质和高强度中得到启发，提出了一种由孔径梯度和壁厚梯度组成的双梯度结构，利用光固化 3D 打印双交联网络聚氨酯弹性体，设计出具有理想机械性能的双梯度仿生细胞结构。与非梯度结构和单梯度结构相比，双梯度蜂窝聚氨酯结构在承重和能量吸收方面表现出更卓越的能力。此外，双梯度仿生细胞结构的比抗压强度和能量吸收能力是传统机械超材料结构（如八阶桁架晶格、陀螺晶格和多孔结构）的 4 倍。作为一种潜在的范例，我们展示了仿生机细胞结构的机械功能，可有效地保护撞击和隔离噪音，这为开发具有优异机械功能的软超材料提供了一个前景广阔的视角，可用于潜在的软机器人和工程应用。

E07-53

高保真度光固化 3D 打印水凝胶及仿生水下粘附器件

汪祎贤¹、蒋盼²、刘德胜²、王晓龙^{*1,2}

1.烟台中科先进材料与绿色化工产业技术研究院

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

在自然界长期的进化选择过程中,许多水生动物(如章鱼、鲫鱼、喉盘鱼、海星等)为提高水下移动、捕猎准确性,均已进化出具有独特吸盘结构的粘附器官。目前,生物仿生粘附系统已引起广泛关注,但在实现高精度生物仿生结构的制造以及具有良好环境相容性(尤其是水下环境)的可逆高粘附性方面仍存在根本性挑战。因此,本文设计并制备了具有高保真度结构的水凝胶基仿生吸盘。首先,通过引入水-二甲基亚砜(DMSO)二元溶剂,解决了水凝胶在光固化 3D 打印过程中的失水问题,提高了水凝胶仿生结构的打印精度。其次,通过双网络(DN)增韧策略,控制金属离子与配体的配位和交联剂的含量能够有效调节水凝胶粘附器件的机械性能和稳定性。基于此,利用 DLP 技术制备了具有不同结构特征(包括半径、倾斜度和壁厚)的仿生水凝胶吸盘。所制造的具有良好机械性能和精细结构的水凝胶吸盘可以在不同生态环境下(在空气、水、PBS 和海水)实现对硅、玻璃、S304、尼龙以及各种粗糙表面的高强度的可逆粘附。这归因于通过水凝胶内部水的溢出形成界面水密封效应,能够有效增强机械负压附着和稳定性。通过有限元分析进一步证实,结构设计对最终粘附性能的影响。优化的水凝胶吸盘可以抓取和转运不同形状和材料的物体。最后,集成了仿生吸盘结构的气动水凝胶抓取器,能够有效地抓取水下和空气中的物体,并实现自主释放。鉴于仿生水凝胶吸盘和抓取器具有良好的水下适应性的可逆粘附,其在智能粘附系统和软机器人领域具有广阔的前景。

E07-54

增材制造材料在高温环境下三维微观结构演变原位 CT 研究

杨尚京*

微旷科技(苏州)有限公司/长三角先进材料研究院

随着增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术的快速发展,各类高性能材料在航空航天、能源和国防等领域得到了广泛应用。然而,增材制造材料在原位环境下的微观结构演变仍是一个亟需深入研究的课题。本研究利用高分辨率 X 射线原位 CT 成像技术,对增材制造材料在原位环境中的三维无损表征进行了研究。通过突破原位环境与 CT 耦合技术,本研究实现了增材制造材料在高温拉伸和常温拉伸等服役条件下的三维原位表征。研究表明,高性能原位 X 射线 CT 技术能够实时监测增材制造材料内部结构和缺陷的演变,为材料在服役条件下的行为提供了重要数据支持。本研究不仅为增材制造材料的基础科学理论研究提供了新视角,还为其工程应用中的结构安全性评估提供了先进的技术手段。未来,随着高性能 X 射线 CT 设备的进一步发展和应用,将继续推动增材制造材料科学的进步,特别是在极端环境下材料的研究方面,为新材料的开发和应用提供详尽的数据支持,助力解决航空航天、能源、建筑等领域中的复杂工程问题,提高材料的使用寿命和性能,确保结构的安全性和可靠性。

E07-55

电弧定向能量沉积 Al-Mg-Mn-Sc 合金组织演变机理与强化机制研究

侯旭儒*、赵琳

钢铁研究总院有限公司

电弧定向能量沉积技术(WA-DED)由于高沉积速率和低制造成本在大型金属构件的生产中具有其他增材制造技术不可比拟的优势,尤其是铝合金。Sc 作为铝合金中强化效应最显著的元素,是研发高性能铝合金有效且可行的方法之一。但是目前,关于 Al-Mg-Sc-X(Zr/Ti)合金的 WAAM 研究报告还相对较少,尤其是对于组织演变机理和强化机制的研究还处于空白状态。基于此,本工作通过 Sc 和 X(Zr/Ti)元素的复合微合金化作用剖析了成形构件的显微组织特征和力学性能。沉积态构件均为等轴晶组织,平均晶粒尺寸约为 $10.89 \pm 5.86 \mu\text{m}$ 。经 $325^\circ\text{C}/6\text{h}$ 热处理后,构件显微组织晶粒形貌和晶粒尺寸几乎不发生改变。CMT 电源

的冷金属过渡和初生 $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{Ti}_x)$ 相的异质形核作用是形成等轴晶的主要原因。Mg 元素的固溶强化作用和细晶强化作用致使沉积态构件横向屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为 $204\pm 3.8\text{MPa}$ 、 $364\pm 8.1\text{MPa}$ 和 $18.2\pm 5.1\%$ 。同时,纵向屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为 $199\pm 0.6\text{MPa}$ 、 $353\pm 3.5\text{MPa}$ 和 $15.5\pm 1.8\%$ 。热处理后,大量尺寸在 50nm 以下的 Al_3Sc 相和 Al_{12}Mn 相的协同强化作用不仅极大提高了构件的室温拉伸强度,而且使构件具有较高的高温拉伸强度。室温最高抗拉强度达到 $432\pm 4.3\text{MPa}$ 。值得注意的是, 200°C 、 250°C 和 300°C 下,构件抗拉强度分别达到了 251MPa 、 200MPa 和 117MPa 。此外,核 $(\text{Mg}_3(\text{TiAl}_9)_2)$ -壳 (Mn) 结构在高温下不易粗化长大,也能保证成形构件具有良好的高温性能。

E07-56

激光定向能量沉积 TA15 钛合金的显微组织演变和力学性能

王清鸽*

中南大学粉末冶金研究院

增材制造是提高钛合金力学性能的有效途径,但沿打印方向还存在粗大柱状晶,使力学性能恶化,本研究利用激光定向能量沉积技术在 TA15 合金中掺入不同质量百分比的铁元素,从而控制钛合金中 β 相和 α 相的晶粒尺寸,调控位错密度和滑移类型,提高了合金的硬度和拉伸性能。随着铁含量增加,凝固温度范围和成分过冷区扩大,晶粒细化,加速柱状晶向等轴晶转变。由此产生的高强度可归因于位错强化和溶液强化。高延伸率归因于 3%Fe 的加入引起的柱面滑移和锥面滑移的激活以及滑移带和剪切带的协同变形。在 TA15 中加入铁,克服了强度和塑性间平衡,无需后续热处理就可同时提高强度和塑性。

E07-57

高致密度、高强度 AlSi10Mg 选区激光熔化增材制造工艺优化研究

李洋*

西安科技大学

由于选区激光熔化 (SLM) 增材制造工艺复杂,通过试验手段获得高致密度、高强度 AlSi10Mg 的制备工艺具有显著的挑战性。基于增材制造 AlSi10Mg 致密度与抗拉强度的强相关性,提出致密度-强度关联型和致密度-强度递进型优化策略,采用机器学习方法开展 AlSi10Mg 选区激光熔化增材制造工艺研究。结果表明,与关联型策略相比,递进型策略建立的高致密度、高强度 AlSi10Mg 选区激光熔化增材制造工艺窗口更宽,且采用较低的激光功率就可达到相同的强度性能;通过调整激光功率、扫描间距等参数来获得高致密度 ($>99\%$) 的基础上,进一步调整扫描速度可获得高强度,是优化高致密度、高强度 AlSi10Mg 增材制造工艺的一种有效手段。

E07-58

光固化 3D 打印含动态酯键热固性树脂的设计制备与回收性能研究

张彪*、崔晶晶、刘福康

西北工业大学

热固性光敏 3D 打印材料因其优秀的高温力学稳定性、耐化学性以及与高精度 3D 打印系统良好的兼容性,占据着 3D 打印材料的大部分市场。但其共价键合特性使其所得到的三维结构难以回收利用,从而导致大量的材料浪费和严重的环境影响。针对上述问题,我们通过将动态共价键引入光敏树脂体系中,基于两步聚合策略开发了一类可再处理热固性光敏 3D 打印材料,发展了绿色可持续光固化 3D 打印新方法。在制备的光敏树脂溶液中,丙烯酸酯官能团的紫外光敏性使其适用于基于紫外光固化的 3D 打印技术,从

而使得树脂可用来打印高精度复杂三维结构。而羟基和酯基官能团在高温下发生的酯交换反应赋予了打印结构可再处理性，从而使得打印出的结构具备再塑形，再修复和再回收的能力。通过小分子模型反应，系统研究了动态酯交换的动力学，探究了催化剂、 β 激活的酯基、羟基的位置、羟基与酯基的比例以及温度对动态酯交换反应的影响，开发出一系列基于无催化剂动态酯交换反应的新型光敏类玻璃高分子树脂体系。利用动态酯键的应力松弛作用，实现结构的重构和重复形状记忆行为。通过溶剂回收的类玻璃高分子通过化学改性，可直接再次应用于 DLP3D 打印，实现了闭环回收。

E07-59

原位合金化增材制造 Al-Mg-Sc-Ti 合金的显微组织及力学性能

李响、刘允中*

华南理工大学

采用原位合金化法加激光粉末床熔化 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 技术制备了 Al-Mg-Sc-Ti 合金，系统研究了 ScH₃ 和 TiH₂ 变质对 Al-Mg-Sc-Ti 合金 LPBF 成形能力、显微组织和力学性能的影响。结果表明，通过采用 Sc 与 Ti 原位合金化可制备出适合于 LPBF 成形的新型无裂纹 Al-Mg-Sc-Ti 合金。相比于传统 LPBF 成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金，Al-Mg-Sc-Ti 合金显示出细小的等轴晶和短小的柱状晶粒组织，平均晶粒尺寸仅为 1.02 μ m。这种超细的晶粒组织得益于 Al₃(Sc,Ti) 的异质形核效应，以及 Ti 溶质的晶粒生长限制能力。合金热处理前抗拉强度达 360.9 \pm 1.3MPa，断后伸长率为 10.51 \pm 0.22%。而经 300 $^{\circ}$ C/4h 热处理后，抗拉强度和断后伸长率分别增加到 468.7 \pm 6.0MPa 和 12.02% \pm 0.49%。合金力学性能的提高主要归因于在热处理过程中二次 Al₃(Sc,Ti) 沉淀相的析出，强化机制分析表明合金的主要强化机制为沉淀析出造成的 Orowan 强化。

E07-60

电弧增材制备镍铝青铜及铸态镍铝青铜在 3.5wt%NaCl 溶液中的腐蚀行为

徐程*

南京理工大学

采用电弧增材技术 (WAAM) 制备了海洋环境中常用的镍铝青铜 (NAB) 合金。用扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 对其微观结构进行了表征。对腐蚀行为进行了电化学测量、浸泡试验和 X 射线光电子能谱 (XPS)。与铸态 NAB 相比，电弧增材制备的 NAB 的微观结构更细，元素分布更均匀。此外，在电弧增材过程中， κ_1 的析出反应被抑制，并且沉积层被反复加热，连续经历共晶转变温度，使得大多数 β' 相转变为 $\alpha+\kappa_{III}$ 共析结构。相较于铸态样品 (0.0162 \pm 0.004mA \cdot cm⁻²)，电弧增材样品的微观结构更加均匀减弱了微电偶效应，显示出更低的腐蚀电流 (0.0149 \pm 0.0014mA \cdot cm⁻²)。浸泡 30 天后，由于在电弧增材制造的 NAB 表面膜层含有更多的 Al₂O₃ 和 Ni，因此，电弧增材生产的 NAB 合金的质量损失减少 35.21%。

E07-61

增材制造钛合金切削加工性能及刀具设计技术

苏永生*

安徽工程大学

本报告介绍了增材制造钛合金的应用领域及行业发展背景，阐述了高性能增材制造钛合金及其构件后处理加工的需求，分析了增材制造制造钛合金材料切削加工的难点及技术现状。通过金相组织、表面硬度、切削力、刀具黏结及表面粗糙度方面，对比分析了增材制造钛合金和传统锻造钛合金切削加工性能的差异

性,同时研究了超声振动方法对难加工材料切削性能的改善效果。针对难加工材料切削时的刀-屑界面润滑和减摩不良,导致刀具快速磨损和加工质量恶化的问题,结合超声振动和刀具织构化技术,提出一种通过超声增强织构化表面形成高承载挤压润滑状态,改善刀具润滑特性和摩擦学行为的研究思路。

E07-62

超高温氧化物共晶自生复合陶瓷激光增材制造及成形控制

刘海方*

昆明理工大学

将 Al_2O_3 与 Gd_2O_3 等稀土氧化物按共晶比例混合,经液固相变后形成的氧化铝相与稀土铝酸盐相原位自生复合并耦合生长的共晶陶瓷,表现出杰出的高温力学性能和环境性能,被视为航空航天用新型超高温结构材料的重要候选者。此外,高柔性激光增材制造技术是目前突破氧化物共晶陶瓷大尺寸、复杂结构样件制备瓶颈最具潜力的先进凝固成形技术。本文利用激光定向能量沉积增材制造技术制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GdAlO}_3/\text{ZrO}_2$ 三元共晶陶瓷,基于单道多层实验,通过系统考察工艺参数对裂纹等凝固缺陷、沉积层厚度的影响规律,获得了优化的激光加工窗口,并结合理论分析,建立了高熔点共晶陶瓷逐层熔覆沉积连续稳定成形判据,通过协同控制扫描长度与扫描速率使单层加工时间为 1.25s,实现了共晶陶瓷试样沉积高度随沉积层数的线性增加,高质量一步近净制备出了尺寸 $\Phi 4\text{mm}\times 410\text{mm}$ 、无明显宏观缺陷、相对密度 98.7% 的高长径比棒状共晶陶瓷试样。所得试样的铸态组织呈共晶胞结构,且沿沉积方向周期性的形成了带状组织粗大区。通过调控熔池的传热量可以改善组织的不均匀性;通过后续热处理可以完全消除胞状及带状结构,实现微观组织的均匀化。

E07-63

超声能场辅助激光熔化沉积 TiC/Ti6Al4V 组织及性能调控

王建东*¹、赵子昂¹、曾禹周¹、李俐群²、姜凤春¹

1.哈尔滨工程大学

2.哈尔滨工业大学

TiC/Ti6Al4V 复合材料具有比钛合金更优异的硬度和耐磨性,有望应用于航空发动机关键结构件上。本文采用激光熔化沉积方法制备 TiC/Ti6Al4V 复合材料,研究不同 TiC 体积分数时复合材料的组织演变机理和性能变化机制,并针对 TiC 分布不均匀及晶粒粗大导致复合材料性能差的问题,提出超声能场辅助激光熔化沉积实现复合材料性能提高的新方法。研究表明,TiC 粉末在激光熔化沉积过程中会发生部分溶解,使复合材料含有未溶 TiC 和原位 TiC,并且未溶 TiC 在复合材料中呈现不均匀分布的特征。当 TiC 体积分数较小时,原位 TiC 为链条状共晶,TiC 体积分数较大时,原位 TiC 为枝晶状初生 TiC。复合材料的增强机制为 TiC 承载强化和 Ti6Al4V 细晶强化。施加同步超声能场后,在超声声流和空化效应的作用下,复合材料中 TiC 分布更均匀、晶粒得到细化,从而提高了复合材料的强度、延伸率、硬度及耐磨性,证明了超声能场辅助激光熔化沉积可以有效实现对 TiC/Ti6Al4V 复合材料的组织和性能进行调控。

E07-64

粘结剂喷射 3D 打印 NiCoCr 系高熵合金

付志强*、陈凌、陈维平

华南理工大学

NiCoCr 系高熵合金不仅表现出良好的强塑性匹配,还具有优异的耐腐蚀性能,在海洋、航空航天等

领域具有广阔的应用前景。但传统的高熵合金制备方式难以实现复杂结构零部件的制备，严重限制了 NiCoCr 系高熵合金的应用。粘结剂喷射 3D 打印技术(Binderjet3Dprinting, 简称 BJ3DP)通过将粘结打印和烧结致密化相结合的方式，可以高效、低成本地制备复杂零部件，是一种具有工业化应用前景的金属增材制造技术。本文深入研究了 NiCoCr 高熵合金在 BJ3DP 成形过程中的致密化行为和组织演变规律，揭示了 BJ3DP 成形工艺与微观组织、力学性能、电化学腐蚀行为之间的内在关系。

E07-65

宽频完美吸声超材料 TPMS 结构设计与增材制造

张明康*、刘畅
广东海洋大学

针对轻质高强、宽频带、完美吸收的声学超材料设计与制造的新需求，我们基于三周期极小曲面 (Triplyperiodicminimalsurface, TPMS) 结构，提出一种宽频完美吸声（吸声系数接近 1）TPMS 结构设计理论与复合制造方法，该设计方法结合 TPMS 结构设计、阿基米德螺旋设计和复合带隙结构频带拓宽设计，利用微毫米量级 TPMS 多孔结构实现对波长为米量级的弹性波进行控制，即亚波长结构控制声波，突破传统声学理论中低频隔声需要大厚度、无间隔、高密度固体层的限制；并提出一种结合激光粉末床熔融成型技术 (Laserpowderbedfusion, LPBF) 和 TPU 发泡技术制备的金属基聚合物泡沫吸声增强复合材料，实现微米-毫米多尺度多孔结构一体化制备，同时提升超材料结构的力学性能和吸声特性。最后，基于轻质高强吸声的 TPMS 结构，提出利用形状记忆聚合物和 NiTi 形状记忆合金的 4D 打印技术设计声学带隙主动控制系统，实现吸声系数的智能调节。

E07-66

激光增材制造镍基合金各向异性及表面强化研究

欧阳佩旋*、董志超、张淑婷
北方工业大学

构建方向显著影响激光粉末床熔融 (LPBF) 增材制造合金的拉伸性能。在水平、垂直、斜向三种成型 GH4169 合金试样中，斜向试样具有最高的抗拉强度和屈服强度，抗拉强度分别比水平和垂直试样高 0.57% 和 10.61%；而垂直试样具有最高的断裂伸长率，比水平和斜向试样分别高了 24.6% 和 9.47%。通过合金屈服强度理论计算结果表明，三种构建方向成型试样的屈服强度差异主要归因于位错强化机制，其次是沉淀强化和晶界强化。此外，表面强化方式对增材制造合金的疲劳性能具有重要影响。系统对比研究了激光冲击强化 (LSP)、喷丸强化 (SP) 和 LSP+SP 复合强化三种强化方式对 LPBFedGH4169 合金表面完整性和疲劳性能的影响，揭示了 LSP+SP 复合强化对增材制造 GH4169 合金的疲劳增益机理。

E07-67

原子尺度下激光粉末床熔融工艺参数对 CuCrZr 合金成形质量的影响

李光宇*
扬州大学

CuCrZr 合金具有高导电性、高导热性、良好的耐腐蚀性以及优异的力学性能而广泛应用于航空航天、核能化工等领域。目前，传统加工工艺已逐渐无法满足应用端对于复杂结构零部件的需求，激光粉末床熔融 (LPBF) 增材制造技术在制造具有复杂几何形状、精细微观结构和优异强度的零件方面显示出巨大的优势。然而，由于 CuCrZr 合金对近红外激光的吸收率低，获得的可打印工艺窗口窄，优化工艺参数对可改善粉末对激光的吸收率，从而提高打印件质量。本研究采用分子动力学模拟与实验研究相结合的方式对 LPBF

工艺制备高致密度 CuCrZr 合金的工艺参数进行优化, 并从原子尺度上研究激光功率、扫描速度以及扫描间距对 CuCrZr 合金成形过程和最终成形质量的影响, 分析粉末颗粒在微观下的融化及凝固过程。结果表明, 过高的功率会导致粉末气化以及 Cu、Cr 和 Zr 三种元素的扩散系数增大。扫描速度对成形的结晶度影响显著, 适中的扫描速度会减少非定性相的形成。合适的扫描间距会提高表面质量。激光功率为 430W, 扫描速度为 500mm/s 以及扫描间距为 0.07mm 时, 致密度最高, 确定其为最优工艺参数组合。

E07-68

紫外钝感超活性双光子聚合光敏树脂设计及其增材制造应用研究

张帅*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

众所周知, 双光子聚合微纳增材制造技术 (TPP) 是目前成型精度最高的制造技术之一, 该技术以近红外飞秒激光为光源, 利用材料三阶非线性双光子吸收的阈值效应能够突破光的衍射极限, 得到数十纳米级的超高分辨率; 并且, 由于近红外光的穿透能力, 能够在光敏树脂内部直接成型, 是一种典型的“所见即所得”的真三维微纳尺度增材制造技术, 在微机电系统 (MEMS)、光电子集成器件 (如光子晶体、光波导)、芯片-光栅掩膜以及超精密微纳器件成型等领域表现出巨大的应用潜力。

光敏树脂作为双光子聚合增材制造的核心, 其结构性能直接决定成型部件的力学性能。目前, 常用紫外固化光敏树脂 (聚氨酯丙烯酸酯、聚酯丙烯酸酯、环氧丙烯酸酯、环氧树脂等) 开展双光子聚合增材制造研究。但是, 紫外固化光敏树脂通常具有较高的官能度, 即高浓度的烯炔、巯基、环氧等光敏活性基团; 并且, 由于紫外光引发剂的双光子吸收截面极小, 通常需要在极高的激光能量和长的曝光时间下, 才能引发聚合反应, 易于出现过度曝光和材料损毁等问题, 难以在高分辨制造精度下实现三维实体的超精密制造; 同时, 由于紫外固化光敏树脂本身对紫外光的高度敏感性, 极易在日光、灯光等环境光下发生聚合反应, 导致光敏树脂失活, 因此, 通常需要低温、避光保存, 且必须在黄光或红光下使用, 存在极大的不便性。

可以看出, 拓展双光子聚合增材制造技术的应用, 其关键在于发展具有高活性、紫外钝感的光敏树脂, 既能够提供超高的紫外光稳定性, 保证树脂在存放、使用过程中不发生预期之外的聚合反应, 又要能够在飞秒激光作用下, 发生快速的聚合固化, 实现三维结构的成型。因此, 本研究从光敏树脂体系出发, 系统分析了光敏树脂中各组分对制造效率的影响规律。以推拉电子理论为基础, 通过合理优化分子结构中的供吸电基团, 对引发剂分子进行 π 共轭骨架拓展, 引入强供/吸电子基团, 形成强推拉电子效应和大分子内电荷转移量, 能够有效增大分子的双光子吸收截面, 获得具有超高双光子聚合引发活性的双光子聚合引发剂分子。此外, 通过对不同分子结构和官能度光敏齐聚物进行优化, 获得其流变、光致聚合活性以及交联固化效率等性能, 结合光敏树脂的配方组成调控, 获得了一系列具有紫外钝感特性和超高双光子聚合活性的光敏树脂体系。制造分辨率优于 200nm, 在 15mW 激光功率下, 扫描速度可达 100mm/s。毫米级三维筒状结构零件和毫米级低密度环状结构的制造效率得到了大幅提升, 在 20mW 的低激光功率下, 制造时间缩短至 1 小时, 大幅提升了制造效率, 为进一步实现跨尺度制造奠定了材料基础。

E07-69

仿生微孔碳化硅陶瓷热防护结构制备及性能研究

曹磊*

中国科学院金属研究所

高温隔热材料的发展对于航空航天飞行器的安全性和可重复使用性至关重要。新型一体化热防护系统将防隔热与承力功能集成为一体, 结构效率高, 是热防护发展的重要方向之一。然而, 该体系隔热性能与力学性能相互制约, 限制其结构效率进一步提升。本研究从材料优选、结构优化、综合效能评估三个方面开展研究。利用聚硅氧烷前驱体材料通过冷冻铸造和光交联工艺, 制备了具有定向孔 (DP-SiOC) (平均孔径

为 88.1 μm)的多孔硅氧碳(SiOC)陶瓷。DP-SiOC 样品在室温下热导率为 0.048W/(m·K),耐热温度为 1200°C。采用数字光处理增材制造(DLP)技术制备了具有三周期极小表面(TPMS)的高强度支架,并用聚硅氧烷作为填充材料,制备了一体化防隔热结构。多孔 SiOC 陶瓷填充的 TPMS 支架(TPMS-DP-SiOC)显示出 TPMS 结构与多孔结构之间结合良好,其孔隙率约为 75%,比强度高达 9.73x10³N·m/kg。TPMS-DP-SiOC 样品在室温下的热导率为 0.255W/(m·K)。

E07-70

电弧增材制造高强铝合金层状异构组织的强韧化

周颖惠*

西安工业大学

超大规格高强韧铝合金燃料贮箱是百吨级重型运载火箭的关键器件。现有传统技术难以突破制备 10 米级铝合金贮箱的技术瓶颈。电弧增材制造技术有望解决超大尺寸构件的成形难题,但该技术成形的铝合金构件较低的综合力学性能限制了其实际应用。本文针对电弧增材制造铝合金中独特的柱状/等轴晶层状异质界面特性调控及其强韧化机制开展研究,充分利用异质结构优异的强韧性匹配能力,为实现电弧增材制造铝合金构性关系的主动控制提供新思路。通过分析热控参数对异质界面特性的影响规律,制定异质界面调控准则。综合运用多种原位同步分析手段,研究载荷方向与柱状/等轴晶异质界面特性耦合作用下的宏微观塑性变形机制,揭示异质界面特性对异构变形诱导强化和应变硬化的影响机制,阐明“成形工艺-异质界面-强韧性”三者之间的内在联系。研究成果将发展电弧增材制造铝合金异构组织的强韧化手段,并为大尺寸航天产品一体化高质高效制造提供指导。

E07-71

基于冷冻干燥脉冲微孔喷射技术的钼基复合粉末制备及 3D 打印研究

郭素霞^{*1}、周伟伟²、野村直之²

1.安徽大学

2.TohokuUniversity(东北大学)

激光粉末床熔融(LPBF)技术因其加工精度高、制造周期短、材料利用率高等优点,在制备高性能复杂金属构件方面具有广阔的应用前景。然而,如何制备多组元、元素熔点差异大的高性能复合粉末是当前面临的主要问题,如良好流动性、均匀尺寸和分布等。申请人开发了冷冻干燥脉冲微孔喷射技术(Freeze-DryPulsatedOrificeEjectionMethod),缩写为FD-POEM。该技术是将纳米或微米尺度的元素粉末分散到液体中,利用脉冲挤压装置将复合浆料从微孔中定量挤出,并在液氮中快速冷却,冷冻干燥后得到高浓度、大小可控的球状复合粉末。这种粉末具有极高的球形度、目标成分比例以及狭窄的粒度分布,且制粉方法成本低、易批量生产,尤其适合高熵合金、高温合金及金属基复合材料等粉末制备,可以实现成分的自由设计,在粉末研发领域具有巨大优势,为 3D 打印创造了更多可能性。

E07-72

激光增材制造硬质合金的缺陷控制与强韧化机理

王海滨*、邢明、赵治、吕皓、刘雪梅、宋晓艳

北京工业大学

选区激光熔化(SLM)技术是目前进行 WC-Co 硬质合金增材制造的主要工艺之一,但由于金属相和陶瓷相在物理性质上存在显著差异,如何基于 SLM 工艺打印得到无缺陷、高性能的硬质合金零件仍然面

临重要挑战。本研究通过优化球形 WC-Co 复合粉末的粒径、Co 粘结相分布状态和激光扫描工艺参数，打印获得硬质合金的孔隙率仅为 2.0%，具有粗、细 WC 晶粒交替分布的组织特征。对打印态试样在不同温度进行气氛加压热处理后，组织达到近全致密、无裂纹。热处理后，发现在粗大 WC 晶粒内形成了大量 2.5nm~2 μ m 的富 Co 相。受益于组织致密，缺碳相含量低，WC 晶粒内微米级 Co 相可有效松弛内应力、抑制裂纹扩展，而纳米 Co 颗粒与 WC 晶内层错/位错等晶体缺陷产生交互作用，本研究基于 SLM 打印和后续热处理制备的硬质合金获得了高的断裂韧性和强度。基于对粉末熔化过程的模拟和打印获得硬质合金显微组织的深入表征分析，揭示了激光打印硬质合金中显微组织缺陷的成因及强化机理。对打印制备的硬质合金刀具进行了切削性能测试，结果显示其具有良好的使用性能和可观的应用前景。

E07-73

基于中子衍射技术的选区激光熔化镍基高温合金织构特征研究

方伟*¹、姚自同¹、徐平光²、殷福星³

1.河北工业大学

2.日本原子能研究开发机构

3.广东省科学院

激光粉床熔融制备镍基合金中的织构研究对于优化工艺参数和预测材料性能具有重要意义。目前，仍然缺乏关于织构组分与熔池各区域微观组织关系的系统研究。在本研究中，我们采用了不同的扫描策略来获得 HastelloyX 超合金的几种典型熔池凝固组织。通过中子衍射、电子背散射衍射和二次电子成像技术，建立了织构与微观组织特征之间的明确联系。位于熔池中心凝固区典型的细晶组织对应于 Cube 织构，而熔池边缘柱状晶组织对于 Goss 织构组分的发展至关重要。对于层间旋转 45°的样品，与细晶区对应的{100}织构出现了大约 22.5°的倾斜，并且柱状晶的生长偏离了最大温度梯度方向，表明晶粒生长受到最大温度梯度和重熔区域晶粒取向的双重影响。由于激光轨迹的周期性较低，67°旋转角度样品{100}织构更加随机，晶粒更细小。我们的工作为了解和调控增材制造合金中的微观结构和织构提供了宝贵的见解。

E07-74

Effect of Sc and Zr addition on the microstructure of 7xxx series Al alloys prepared by selective laser melting

zhuyueyue*

Chongqing University

The preparation of commercial 7075 aluminium alloy by selective laser melting (SLM) technology remains challenging due to the wide solidification range of 7xxx series Al alloys, which are prone to the formation of solidification cracks and pores during the printing process. In this study, AlZnMg (hereinafter referred to as alloy 1) and AlZnMgCuScZr (modified by addition of Sc and Zr, hereinafter referred to as alloy 2) were prepared by gas atomization of powders and SLM. In as-built alloy 1, coarse columnar grains grow through multiple melt pools and there are many thermal cracks and pores. However, the as-built alloy 2 showed better printability and no cracks with pores. Comparing alloy 1 and alloy 2, we believe that the addition of Sc and Zr promotes the precipitation of the η' phase, which will stabilize the grain boundaries during subsequent thermal cycling. As a result, the grain size of alloy 2 is significantly reduced and a heterogeneous structure of fine equiaxed and columnar grains is formed, which contributed to eliminate cracks.

E07-75

Heat treatment process design for high-temperature creep resistance of GH4169 alloy produced by additive manufacturing.

Xinshun Yan, shuangyang, jielou, feiliu*
Guizhou University

Additively manufactured GH4169 alloy exhibits excellent high-temperature strength and resistance to high-temperature corrosion. However, defects introduced during the additive manufacturing process significantly reduce the alloy's high-temperature creep resistance compared to conventional manufactured alloys. This project aims to design heat treatment processes to regulate the microstructure of additively manufactured GH4169 and explore the effects of heat treatment on the second phase, cellular structure, and grain structure. High-temperature creep tests were conducted at its thermal exposure temperature (650°C) at 550 MPa to investigate the impact of different heat treatment processes on creep life and creep rate. It was found that the creep resistance of the alloy after heat treatment reached levels comparable to those of conventional manufactured alloys. Furthermore, we explored the high-temperature creep behavior and mechanisms of this alloy and established the intrinsic relationships among the heat treatment process, microstructure, and creep resistance. Our research provides both experimental and theoretical support for enhancing the creep resistance of high-temperature alloys produced through additive manufacturing.

E07-76

激光粉末床熔融过程中光束形状对熔池稳定性和匙孔孔隙形成的影响

唐旭¹、蒋小武¹、周岳新¹、姚志富^{2,3}、刘兴军^{1,2}、施荣沛*^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学（深圳）材料科学与工程学院

2. 哈尔滨工业大学（深圳）材料基因工程及大数据研究院

3. 哈尔滨工业大学（深圳）理学院

激光束形状（能量的空间分布）对 LPBF 加工过程中的熔池稳定性及匙孔缺陷的形成有着重要影响。本文基于多物理场高保真度数值模拟，研究了不同激光功率（P）以及扫描速度（V）组合下，激光束形状（高斯光束、平顶光束以及椭圆光束）对镍基合金激光熔融过程中熔池形貌、稳定性和匙孔形成过程的影响。研究发现，高斯光束与横向椭圆光束具有相近的无匙孔 PV 边界，纵向椭圆具有最好的孔隙稳定性与熔池尺寸稳定性。并阐明了光束形状对匙孔形成的影响机制。本研究确定了不同激光束形状下的无匙孔 PV 边界，为镍基合金 LPBF 工艺窗口的快速确定提供了理论指导和技术支持。

E07-77

SLM 成型 Inconel718 与 h-BN 改性后的摩擦磨损性能研究

陈扬、张述豪、王文浩、韩玉秀、张莹、李恩发、郑洪亮*

山东大学

镍基高温合金 Inconel718 以其优异的耐高温、抗氧化和耐腐蚀性能，在航空、航天、能源等领域中得到了广泛应用。然而，在高温、高压、高转速等极端工况下，Inconel718 合金的摩擦磨损性能成为了制约其应用的关键因素。因此，对 Inconel718 合金的摩擦磨损性能进行深入研究具有重要意义。为进一步提升其摩擦磨损性能，本研究在 Inconel718 中添加了不同质量分数的六方氮化硼（h-BN）纳米粉末，并探究了其合金摩擦磨损性能的影响。在 Inconel718 合金中添加了质量分数分别为 0.25%、0.5%、1% 的 h-BN 纳米粉末，并制备了相应的 SLM 试样。通过干滑动摩擦磨损实验，研究了不同 h-BN 添加量对合金摩擦系数、常温及高温磨损率的影响。

实验采用选择性激光熔化（SLM）技术，制备了含有 0.25%、0.5% 和 1% h-BN 纳米粉末的 Inconel718 合金试样，并进行了干滑动摩擦磨损测试。结果表明，在常温条件下，随着 h-BN 添加量的增加，合金的摩擦系数显著降低，且沉积态的摩擦系数均低于热处理态，降低幅度超过 20%。特别地，当 h-BN 添加量

达到 0.5% 和 1% 时, 沉积态试样的摩擦系数明显低于 0.25%, 表现出显著的减摩效果。

在高温条件下, Inconel718 合金的摩擦系数相比常温条件下进一步降低, 降幅均超过 20%。其中, 0.25%h-BN 添加量的合金高温摩擦系数比常温时降低了超过 57%。此外, 高温下的磨损量也显著低于常温条件, 其中 0.5%h-BN 热处理态的合金磨损量降低了 48%, 而 1%h-BN 热处理态的合金磨损量降低了高达 88%。整体上, 随着 h-BN 添加量的增加, 合金的磨损率显著降低。

本研究不仅揭示了 h-BN 纳米粉末对 Inconel718 合金摩擦磨损性能的影响机制, 而且为提升合金在极端工况下的性能提供了有效途径, 对于拓展其应用范围具有重要意义。

E07-78

增材制造抗蠕变 GH4169 的热处理工艺设计

晏鑫顺*、杨爽、姜杰

贵州大学

增材制造 (又称 3D 打印) GH4169 合金具有优异的高温强度和抗高温腐蚀性, 然而, 增材制造过程引入的打印缺陷导致该合金的高温抗蠕变性能远低于传统制造。本项目通过设计热处理工艺进而调控增材制造 GH4169 的微观组织结构, 探究了热处理工艺对第二相、胞状组织结构、晶界结构等的影响。在其热暴露温度下 (650°C) 进行了高温蠕变性能测试, 探究了不同热处理工艺对蠕变寿命、蠕变速率的影响, 发现增材制造合金热处理之后的抗蠕变性能达到与传统制造合金相当的水平。我们进一步探究了该合金的高温蠕变行为和机制, 建立了材料热处理工艺-微观组织结构-抗蠕变制造之间的内在联系。我们的研究为提升增材制造高温合金的抗蠕变性能制造提供了实验和理论支撑

E07-79

激光增材制造等轴状钴基高温合金的工艺-组织研究

杨鑫桐^{1,2}、姚志富^{1,3}、施荣沛^{1,2}、刘兴军*^{1,2,4}

1. 哈尔滨工业大学 (深圳) 材料基因与大数据研究院

2. 哈尔滨工业大学 (深圳) 材料科学与工程学院

3. 哈尔滨工业大学 (深圳) 理学院

4. 先进焊接与连接国家重点实验室

金属增材制造技术是当今世界各国争相发展的关键核心技术, 为诸多关键领域的金属构件成型开辟了新的工艺技术途径。然而, 由于激光热源和基板间存在极高的温度梯度, 构件通常在微观组织上存在明显的柱状晶组织, 粗大的柱状晶组织通常会诱发较高的裂纹敏感性以及打印件力学性能的各向异性。针对此问题, 本研究以服役条件极为苛刻的高温合金为研究对象, 开展其激光粉末床熔融增材制造技术的组织等轴化研究。

本研究以机械混粉的方式向微米级新型钴基高温合金粉末中, 定量引入微米级碳化硼颗粒以作为形核剂。基于优化后的激光粉末床熔融增材制造工艺参数进行样品制备, 并以电子背散射衍射技术作为表征手段, 发现沿构建方向的 y-z 平面的平均晶粒尺寸由 137.64 μm 降低至 55.34 μm , 平均晶粒长宽比由 4.47 降至 2.76。该结果表明, 碳化硼形核剂的引入实现了样品微观组织的柱状晶结构向等轴晶结构的转化。本研究实现了激光增材制造微观组织的显著晶粒细化与晶粒等轴化, 同时带来明显的织构变化, 极大差异的微观结构变化为进一步开展基于增材制造制备的等轴晶高温合金力学性能等研究提供了基础。

E07-80

激光增材制造 Ti2AlNb 的原位多元合金化改性研究

罗皓洁、杜宇雷*
南京理工大学

Ti₂AlNb 由于其轻质、高强能、高温等性能，被作为一种先进的工程材料广泛用于航空航天领域。激光粉末床熔化(LPBF)工艺可将 Ti₂AlNb 粉末快速成形形成复杂、高精度的零件，为其关键应用提供了机会。本文通过添加 3wt.%Zr52.5Cu17.9Ni14.6Al10Ti5 金属玻璃(MG)粉末进行 Ti₂AlNb 的原位多元合金化，在激光粉末床熔化技术的工艺参数优化下，成功制备了高致密(相对密度>99%)和无裂纹的 Ti₂AlNb/MG 复合试样。其中，屈服强度和抗拉强度有了明显提升。同时，伸长率也保持在较高水平。采用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)揭示了 Ti₂AlNb/MG 复合试样的微观结构演化和强化机理。结果表明，金属玻璃粉末的添加主要通过其纳米级析出颗粒的沉淀强化以及晶粒细化显著改善了 Ti₂AlNb 合金的力学性能。本研究可为使用激光粉末床熔化技术制备出无裂纹、高强度的改性 Ti₂AlNb 合金提供了新的见解。

E07-81

纳米硼接种对激光增材制造 Ti₂AlNb 的改性研究

范澳琦、杜宇雷*
南京理工大学机械工程学院

Ti₂AlNb 合金因其出色的高温强度、抗氧化性能以及轻质化特性，在航空航天等领域备受关注。然而在激光粉末床融化(LPBF)技术中应用仍受到微热裂纹的控制及组织结构调控等问题的制约。本研究通过优化工艺参数实现对 Ti₂AlNb 合金材料在 LPBF 过程中的精确控制和优化制备。引入纳米硼采用微合金化改性，成功制备了高致密(相对密度>99%)和无裂纹的 Ti₂AlNb/Nano-B 复合试样。获得了理想的力学性能，包括拉伸与压缩性能。通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等表征策略探究了接种纳米硼对合金性能的改性以及潜在的增强效果。结果表明，原位的纳米颗粒接种有效的抑制了合金微裂纹的产生与演变，并充当凝结核进一步约束了晶粒尺寸的生长。本研究证实了纳米硼接种的有效性，为该合金在 LPBF 应用中的进一步发展提供了可靠的实验基础和技术支撑。

E07-82

CoCrFeNi 高熵合金增材件激光抛光工艺与成形机理研究

周宇航、周述东、张咪娜*、韦超
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

激光增材制造技术能够实现高熵合金零部件的快速制造，但增材件往往存在表面质量差、加工难度大等问题。对此，本文提出采用激光抛光工艺来改善 CoCrFeNi 高熵合金增材件的表面质量，研究了激光抛光工艺参数(如激光功率、扫描速度、扫描间距等)对增材件表面粗糙度影响，并探讨了激光抛光工艺对高熵合金增材件表面成分分布及其抛光机理的影响。结果表明，激光抛光工艺参数中离焦量和激光功率是影响表面质量的关键参数，表面粗糙度随着扫描速度、离焦量的增加呈现先减小后增大的趋势，优化后的表面粗糙度比初始表面粗糙度降低了约 90%；在激光抛光快速凝固的作用下，CoCrFeNi 高熵合金增材件表面元素分布更加均匀，同时表层的 O 元素和 Cr 元素含量降低，这主要归因于连续激光抛光过程中对表层氧化物的去除。

E07-83

激光选区熔化 AlMgScZr 合金微观组织与电化学腐蚀性能研究

梅思远*、邹田春

本研究采用激光选区熔化 (Selectivelasermelting,SLM) 技术成形了 AlMgScZr 合金, 分析了不同扫描速度制备的合金微观组织及其在 3.5wt.%NaCl 溶液中的动电位极化曲线和电化学阻抗谱, 研究了 SLM 成形 AlMgScZr 合金微观组织对其电化学腐蚀性能的影响。结果表明, 在 3.5wt.%NaCl 溶液中, SLM 成形的 AlMgScZr 合金表现出明显的钝化行为。合金中的孔隙降低了表面钝化膜的稳定性, 从而降低了合金的抗电化学腐蚀性能。由于熔池边界处高数量密度的 Al₃(Sc,Zr)颗粒可以作为微阴极促进 Al 基体的溶解, 熔池边界发生了严重的腐蚀。此外, 随扫描速度增大, AlMgScZr 合金的晶粒尺寸逐渐减小、小角度晶界逐渐增多。晶粒尺寸的减小导致晶界密度和晶界处活性原子数量逐渐增多, 提高了钝化膜的生长速度, 同时, 小角度晶界的增多提高了晶界的稳定性, 从而改善了合金的抗电化学腐蚀性能。

E07-84

3D 打印 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金耐热性能优化研究

夏晓宽*^{1,2}、黄天林^{1,2}

1.重庆大学材料学院

2.轻合金材料国际合作联合实验室

3D 打印技术因其在复杂结构制造中的独特优势, 被广泛认为是第三次工业革命的推动力。然而, 激光增材制造技术所赋予的“极端非平衡凝固”在制备过饱和固溶铝合金材料方面的优势有待深入挖掘。本研究聚焦于利用选择性激光熔化 (SelectiveLaserMelting,SLM) 技术制备的 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金, 探讨了 SLM 技术在制备过程中所特有的溶质过饱和现象。通过在 300°C 或 350°C 条件下进行时效处理, 析出大量热稳定的纳米析出相 Al₃(Sc,Zr), 显著提升了材料的耐热性能。这一发现不仅丰富了对 SLM 技术的理解, 也为开发新型高性能铝合金材料提供了新的途径。

E07-85

激光粉末床熔融制备 CoNiCrAlY 涂层的微观组织及抗氧化性能研究

罗浩*

新乡学院

本文采用激光粉末床熔融 (LPBF) 技术制备了 IN718 高温合金基体及其 CoNiCrAlY 涂层。对比研究了 1100°C 下 IN718 基体表面有无 CoNiCrAlY 涂层时的微观结构及其高温氧化性能。结果表明, 采用 LPBF 制备的 CoNiCrAlY 涂层致密、均匀且无裂纹。涂层主要由 γ 相、 β 相和一些 Y₂O₃ 微粒组成。沿平行和垂直于生长方向的微观组织分别为柱状枝晶和等轴晶粒, 且具有较强的 (100) <001> 立方织构。涂层在 1100°C 等温氧化 1-100h 时, 均表现出较低的热生长氧化层生长速率和较薄的氧化层。涂层表面最初形成 Cr₂O₃ 氧化物。随着氧化时间的增加, 涂层表面形成了 α -Al₂O₃ 鳞片和 (Co,Ni)Cr₂O₄ 和 CoNiO₂ 混合氧化物。

E07-86

选区激光熔化 Ti-Nb 合金热质运输的介观尺度数值模拟

唐婉婷、任能、李军*

上海交通大学

Ti-Nb 合金具有低弹性模量 (57-116GPa)、优异的生物相容性以及耐腐蚀性, 是非常有潜力的骨骼植入物和关节置换材料, 而选区激光熔化 (SelectiveLaserMelting,SLM) 技术的发展为 Ti-Nb 合金精细加工

成形以及定制化生产提供了新的途径。制造出性能优异的成型件需要构建工艺参数-成分分布-显微组织-性能之间的关联关系，而目前的实验手段存在过程可视化困难、可重复性差、成本昂贵等问题。

鉴于此，本研究将借助数值模拟手段可视化 SLM 过程熔体流动、蚀孔演变及溶质输运等复杂过程并揭示背后的多物理场作用机理。基于离散元法建立了三维粉末床模型，采用流体体积法来追踪 SLM 过程的自由表面，并且模型中考虑了表面张力、反冲压力等控制流体动力学的诸多因素，有效预测了 Ti-Nb 合金选区激光熔化过程的传热、流动以及溶质输运。数值模拟研究了激光功率和扫描速度对熔池形貌、温度场以及成分分布的影响，道间重熔和层间重熔对成分分布的影响。同时探究了平顶光束、高斯光束及椭圆光束等不同的光束形貌对粉层吸收以及热-流多场演变过程的作用机理，进而达到调控熔池形貌以及成分分布的目的，为实验工艺窗口的制定提供有力工具。

E07-87

激光增材制造铜及铜合金的研究进展

张咪娜*、高世阳、王以坤、周宇航、周述东、韦超、李琳
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铜及铜合金具有优异的导热、导电性及耐腐蚀性等性能，在航空航天、海洋工程等领域有着广泛的应用。激光增材制造技术具有制造周期短、材料范围广以及一体化成形等独特优势，是铜合金复杂部件高效成形的有效方法之一。但是，由于铜及铜合金材料对激光具有高反射率，导致铜及铜合金增材件存在表面质量差、气孔及裂纹等问题，严重阻碍了铜及铜合金增材件的安全应用。本文综述了合金化元素、陶瓷相颗粒等合金成分改性对提高铜及铜合金材料的激光吸收率，探讨了激光波长、工艺参数及后处理等成形工艺对激光增材制造铜及铜合金微观结构、成形质量、力学性能及耐腐蚀性能的影响，最后，展望了激光增材制造铜及铜合金的应用前景及其发展趋势。

E07-88

高转速 PREP 法制备球形 K390 粉末及其组织性能研究

张煜*、宋美慧、李岩、李艳春、宫书林
黑龙江省科学院高技术研究院

采用高转速 PREP 法制备 K390 粉末。利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线衍射仪和全自动粒度粒形分析仪对粉末微观组织、粒度粒形进行测量，利用斯科特容量计和霍尔流速计测定粉末松装密度及流动性；研究制备工艺对粉末组织性能的影响。结果表明，PREP 法制备的 K390 粉末为实心球形，无卫星粉。粉末具有龟裂形表面和光滑表面两种形貌，且粉末粒径越小表面越光滑。W、Mo 和 Gr 等合金元素分布均匀，未发现明显偏析现象，也未发生合金元素损耗。粉末的凝固组织以枝晶为主，未发现共晶莱氏体组织。粉末主要由残余奥氏体、铁素体和少量 MC 型和 M₆C 型碳化物组成。电极转速越高，粉末粒径越小、球形度越高。当采用 42000r/min, 670A 制粉时，EBSM 成型用-100 目~+325 目粉末收率可达 80.39% 以上。

E07-89

多取向镍钛极小曲面结构的力学性能及其对裂纹扩展的调控作用

任云龙*、杨磊
武汉理工大学

多孔镍钛合金具有较高的比强度和优异的生物相容性等特性，广泛应用于生物医学和航空航天领域。

为了设计出更耐损伤的镍钛多孔结构, 更好的控制镍钛多孔结构失效时的裂纹扩展, 需要深入研究镍钛多孔结构的失效机理。因此, 本研究选取 Gyroid 结构作为研究对象, 结合多取向的设计思路, 研究了三种多取向结构的力学性能和失效形式。结果表明, SG (具有单取向方向的 Gyroid 结构) 和 DDG (具有双取向方向双取向区域的 Gyroid 结构) 具有相近的承载能力, 然而, 取向区域的引入使得两种结构的断裂形式出现较大差异。在单轴压力作用下, SG 沿着 45 度方向断裂, DDG 形成“V 形”断裂带, DFG (具有双取向方向四取向区域的 Gyroid 结构) 形成“W 形”断裂带且逐层溃败。随着取向区域的增加, 多取向表面被强化, 疲劳裂纹难以在多取向表面生成并扩展, 非多取向表面的疲劳裂纹扩展方向发生变化, 镍钛 Gyroid 结构在受低应力时的疲劳寿命趋于稳定。本研究为开发出损伤路径更为可控的镍钛多孔结构提供了有价值的参考。

墙报

E07-P01

TC4 表面激光熔覆 AlCoCrFeNi 高熵合金层的组织和性能

程一凡、李峰光*、廖露海、刘建永、杨伟、顿亚鹏

湖北汽车工业学院

钛合金具有低密度、高比强度、耐腐蚀等有优良特性, 因此被广泛用于航空航天、汽车工业等、石油化工等领域, 但是钛合金的硬度低、抗高温氧化性较差、耐磨性差等缺点限制了钛合金在实际应用中的使用范围。本文对在 TC4 钛合金表面激光熔覆 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层进行了组织和性能研究, 对熔覆层和基体进行了硬度、抗高温氧化性及耐磨性测试, 利用 OM、SEM、EDS 和 XRD 对试样进行观察, 分析高熵合金涂层在激光熔覆过程中的组织演变规律和对 TC4 基体性能的改善。结果表明, 在激光工艺参数为 1400W, 12mm/s 时熔覆效果最好, SEM 和 EDS 结果可以明显看出熔覆过程中的组织转变规律, 自基体向上依次为热影响区、平面晶区、柱状晶区、等轴晶区。AlCoCrFeNi 高熵合金涂层与 TC4 基体形成了良好的冶金结合, 硬度、抗高温氧化性及耐磨性能均有提升。

E07-P02

基于 3D 打印基底的粘附可控微阵列仿生表面

王竹欣、张风顺*、耿呈祯

中国工程物理研究院化工材料研究所

受壁虎启发的微阵列仿生粘附材料具有粘附力强、剥离力小、无残留、可重复使用等优良粘合性能, 在生物医疗、仿生机器人以及航空航天等领域展现出巨大的应用潜力。目前, 仿生微阵列材料面临着在复杂表面的粘附能力低的难题。对壁虎攀爬运动的研究结果表明, 壁虎不仅依靠精密的微纳米刚毛阵列结构实现粘附, 其脚底的脂肪、肌肉等更大尺度的组织也起到了分散应力、提升粘附稳定性的作用。因此, 本文以壁虎脚底的多尺度复合粘附系统为灵感, 设计了以具有良好形变能力且可设计性强的 3D 打印硅橡胶泡沫为基底, 微阵列结构为粘附单元的复合仿生干粘附材料。首先, 在硅橡胶泡沫基底上制备了一系列具有不同高度和排列密度的微阵列, 研究结果表明, 改变表面微阵列会大幅度改变粘附性能, 难以实现小范围内对粘附性能的调控。随后通过改变 3D 打印基底的堆叠层数, 研究泡沫基底厚度对微阵列表面粘附性能的影响, 实验发现在 0.9mm 到 1.5mm 的厚度变化范围内, 基底越厚在变化的压力下粘附能力越强且越稳定, 改变基底参数能更方便、准确地实现小范围内对微阵列表面粘附性能的调控。

E07-P03

颗粒内复合聚丙烯/烷基化炭黑粉末的制备及短波激光烧结特性

罗皓升、王政泽、李光宪、黄亚江*

四川大学

高分子激光粉末床熔合(PBF-LB/P)等增材制造技术的进步迫切需要发展对短波激光具有高吸收率的新型粉末材料。本研究通过 Friedel-Crafts 反应, 用聚丙烯(PP)共聚物链对炭黑(CB)纳米颗粒表面进行烷基化修饰, 制备了烷基化炭黑(aCB)及其 PP 复合材料。基于挤出熔融乳化法制备了颗粒内复合 aCB 的球形 PP 粉末, 并与外包 CB 的 PP 粉末进行了对比。结果表明, 颗粒内复合的 PP/aCB 粉末在较宽的波长范围内(200–1500nm)具有高激光吸收率和更好的流动性, 经反复振动筛分处理后粉末的激光吸收率具有更强的稳定性。与外包 CB 的 PP 粉末相比, 基于颗粒内复合 PP/aCB 粉末的烧结制件显示出更好的力学性能。所开发的 PP/aCB 粉末满足各种波长(808–10640nm)激光的加工要求, 使其成为在 PBF-LB/P 领域具有较大应用潜力的新材料。

E07-P04**Effect of Sc and Zr addition on the microstructure of 7xxx series Al alloys prepared by selective laser melting**

zhuyueyue*

Chongqing University

The preparation of commercial 7075 aluminium alloy by selective laser melting (SLM) technology remains challenging due to the wide solidification range of 7xxx series Al alloys, which are prone to the formation of solidification cracks and pores during the printing process. In this study, AlZnMg (hereinafter referred to as alloy 1) and AlZnMgCuScZr (modified by addition of Sc and Zr, hereinafter referred to as alloy 2) were prepared by gas atomization of powders and SLM. In as-built alloy 1, coarse columnar grains grow through multiple melt pools and there are many thermal cracks and pores. However, the as-built alloy 2 showed better printability and no cracks with pores. Comparing alloy 1 and alloy 2, we believe that the addition of Sc and Zr promotes the precipitation of the η' phase, which will stabilize the grain boundaries during subsequent thermal cycling. As a result, the grain size of alloy 2 is significantly reduced and a heterogeneous structure of fine equiaxed and columnar grains is formed, which contributed to eliminate cracks.

E07-P05**Heat treatment process design for high-temperature creep resistance of GH4169 alloy produced by additive manufacturing.**

Xinshun Yan, shuangyang, jielou, feiliu*

Guizhou University

Additive manufactured GH4169 alloy exhibits excellent high-temperature strength and resistance to high-temperature corrosion. However, defects introduced during the additive manufacturing process significantly reduce the alloy's high-temperature creep resistance compared to conventional manufactured alloys. This project aims to design heat treatment processes to regulate the microstructure of additively manufactured GH4169 and explore the effects of heat treatment on the second phase, cellular structure, and grain structure. High-temperature creep tests were conducted at its thermal exposure temperature (650°C) at 550 MPa to investigate the impact of different heat treatment processes on creep life and creep rate. It was found that the creep resistance of the alloy after heat treatment reached levels comparable to those of conventional manufactured alloys. Furthermore, we explored the high-temperature creep behavior and mechanisms of this alloy and established the intrinsic relationships among the heat treatment process, microstructure, and creep resistance. Our research provides both experimental and theoretical support for enhancing the creep resistance of high-temperature alloys produced through additive manufacturing.

E07-P06**激光粉末床熔融过程中光束形状对熔池稳定性和匙孔孔隙形成的影响**唐旭¹、蒋小武¹、周岳新¹、姚志富^{2,3}、刘兴军^{1,2}、施荣沛*^{1,2}

1.哈尔滨工业大学（深圳）材料科学与工程学院

2.哈尔滨工业大学（深圳）材料基因工程及大数据研究院

3.哈尔滨工业大学（深圳）理学院

激光束形状（能量的空间分布）对 LPBF 加工过程中的熔池稳定性及匙孔缺陷的形成有着重要影响。本文基于多物理场高保真度数值模拟，研究了不同激光功率（P）以及扫描速度（V）组合下，激光束形状（高斯光束、平顶光束以及椭圆光束）对镍基合金激光熔融过程中熔池形貌、稳定性和匙孔形成过程的影响。研究发现，高斯光束与横向椭圆光束具有相近的无匙孔 PV 边界，纵向椭圆具有最好的孔隙稳定性与熔池尺寸稳定性。并阐明了光束形状对匙孔形成的影响机制。本研究确定了不同激光束形状下的无匙孔 PV 边界，为镍基合金 LPBF 工艺窗口的快速确定提供了理论指导和技术支持。

E07-P07**SLM 成型 Inconel718 与 h-BN 改性后的摩擦磨损性能研究**

陈扬、张述豪、王文浩、韩玉秀、张莹、李恩发、郑洪亮*

山东大学

镍基高温合金 Inconel718 以其优异的耐高温、抗氧化和耐腐蚀性能，在航空、航天、能源等领域中得到了广泛应用。然而，在高温、高压、高转速等极端工况下，Inconel718 合金的摩擦磨损性能成为了制约其应用的关键因素。因此，对 Inconel718 合金的摩擦磨损性能进行深入研究具有重要意义。为进一步提升其摩擦磨损性能，本研究在 Inconel718 中添加了不同质量分数的六方氮化硼（h-BN）纳米粉末，并探究了其合金摩擦磨损性能的影响。在 Inconel718 合金中添加了质量分数分别为 0.25%、0.5%、1% 的 h-BN 纳米粉末，并制备了相应的 SLM 试样。通过干滑动摩擦磨损实验，研究了不同 h-BN 添加量对合金摩擦系数、常温及高温磨损率的影响。

实验采用选择性激光熔化（SLM）技术，制备了含有 0.25%、0.5% 和 1% h-BN 纳米粉末的 Inconel718 合金试样，并进行了干滑动摩擦磨损测试。结果表明，在常温条件下，随着 h-BN 添加量的增加，合金的摩擦系数显著降低，且沉积态的摩擦系数均低于热处理态，降低幅度超过 20%。特别地，当 h-BN 添加量达到 0.5% 和 1% 时，沉积态试样的摩擦系数明显低于 0.25%，表现出显著的减摩效果。

在高温条件下，Inconel718 合金的摩擦系数相比常温条件下进一步降低，降幅均超过 20%。其中，0.25% h-BN 添加量的合金高温摩擦系数比常温时降低了超过 57%。此外，高温下的磨损量也显著低于常温条件，其中 0.5% h-BN 热处理态的合金磨损量降低了 48%，而 1% h-BN 热处理态的合金磨损量降低了高达 88%。整体上，随着 h-BN 添加量的增加，合金的磨损率显著降低。

本研究不仅揭示了 h-BN 纳米粉末对 Inconel718 合金摩擦磨损性能的影响机制，而且为提升合金在极端工况下的性能提供了有效途径，对于拓展其应用范围具有重要意义。

E07-P08**增材制造抗蠕变 GH4169 的热处理工艺设计**

晏鑫顺*、杨爽、姜杰

贵州大学

增材制造（又称 3D 打印）GH4169 合金具有优异的高温强度和抗高温腐蚀性，然而，增材制造过程引入的打印缺陷导致该合金的高温抗蠕变性能远低于传统制造。本项目通过设计热处理工艺进而调控增材制造 GH4169 的微观组织结构，探究了热处理工艺对第二相、胞状组织结构、晶界结构等的影响。在其热暴露温度下（650°C）进行了高温蠕变性能测试，探究了不同热处理工艺对蠕变寿命、蠕变速率的影响，发现增材制造合金热处理之后的抗蠕变性能达到与传统制造合金相当的水平。我们进一步探究了该合金的高温蠕变行为和机制，建立了材料热处理工艺-微观组织结构-抗蠕变制造之间的内在联系。我们的研究为提升增材制造高温合金的抗蠕变性能制造提供了实验和理论支撑

E07-P09

激光增材制造等轴状钴基高温合金的工艺-组织研究

杨鑫桐^{1,2}、姚志富^{1,3}、施荣沛^{1,2}、刘兴军*^{1,2,4}

1.哈尔滨工业大学（深圳）材料基因与大数据研究院

2.哈尔滨工业大学（深圳）材料科学与工程学院

3.哈尔滨工业大学（深圳）理学院

4.先进焊接与连接国家重点实验室

金属增材制造技术是当今世界各国争相发展的关键核心技术，为诸多关键领域的金属构件成型开辟了新的工艺技术途径。然而，由于激光热源和基板间存在极高的温度梯度，构件通常在微观组织上存在明显的柱状晶组织，粗大的柱状晶组织通常会诱发较高的裂纹敏感性以及打印件力学性能的各向异性。针对此问题，本研究以服役条件极为苛刻的高温合金为研究对象，开展其激光粉末床熔融增材制造技术的组织等轴化研究。

本研究以机械混粉的方式向微米级新型钴基高温合金粉末中，定量引入微米级碳化硼颗粒以作为形核剂。基于优化后的激光粉末床熔融增材制造工艺参数进行样品制备，并以电子背散射衍射技术作为表征手段，发现沿构建方向的 y-z 平面的平均晶粒尺寸由 137.64 μm 降低至 55.34 μm ，平均晶粒长宽比由 4.47 降至 2.76。该结果表明，碳化硼形核剂的引入实现了样品微观组织的柱状晶结构向等轴晶结构的转化。本研究实现了激光增材制造微观组织的显著晶粒细化与晶粒等轴化，同时带来明显的织构变化，极大差异的微观结构变化为进一步开展基于增材制造制备的等轴晶高温合金力学性能等研究提供了基础。

E07-P10

3D 打印+熔体浸渗制备仿生异质构型多金属复合材料及其性能研究

杨立凯*、袁斌、何锦华、林巧力、石珩

兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

随着电子工业、航空航天和汽车交通等领域的快速发展，对工程材料性能的要求越来越高。同时，材料的多组分、多功能以及结构功能一体化已成为材料科学发展的趋势。未来一项重大挑战是开发高性能并可满足某些特定功能需求的新材料。多金属复合材料可集合单一组元的特性，从而实现材料的高性能多功能特性，如铜/不锈钢，可将铜的高延性、高导电与不锈钢的高强度、高硬度相结合，既可以作为耐磨、受力的结构件，又可作为导电、导热的功能材料，获得传统材料难以实现的高强韧和多功能特性，具有广阔应用前景。基于自然界中生物材料如珍珠贝、骨头等的高性能得益于其特有分级结构的认识，结合仿生学思想，在此，我们提出了（SLM 和 DIW）3D 打印和（真空浸渗）熔体浸渗相结合来制备异质结构多金属复合材料的新思路。以 Cu/316L 为演示例，成功制备了拥有平直层、折线层、布里刚层、蜂窝互连、棱柱互连结构的复合材料，系统探究了构型变化和组元含量对复合材料力学性能和导电功能的影响。结果表明，得益于结构优化（微米级异质结构）和组分选择（铜和不锈钢），上述异质结构复合材料可同时拥有优异的强韧性和良好的导电性，但不同构型之间存在较大差异。更重要的是，本文提供的方法新颖，普适性强，

为设计和制备高性能多功能复合材料提供了新途径。

E07-P11

激光增材制造 Ti2AlNb 的原位多元合金化改性研究

罗皓洁、杜宇雷*

南京理工大学

Ti2AlNb 由于其轻质、高强度、高温等性能，被作为一种先进的工程材料广泛用于航空航天领域。激光粉末床熔化(LPBF)工艺可将 Ti2AlNb 粉末快速成形形成复杂、高精度的零件，为其关键应用提供了机会。本文通过添加 3wt.%Zr52.5Cu17.9Ni14.6Al10Ti5 金属玻璃(MG)粉末进行 Ti2AlNb 的原位多元合金化，在激光粉末床熔化技术的工艺参数优化下，成功制备了高致密(相对密度>99%)和无裂纹的 Ti2AlNb/MG 复合试样。其中，屈服强度和抗拉强度有了明显提升。同时，伸长率也保持在较高水平。采用扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)揭示了 Ti2AlNb/MG 复合试样的微观结构演化和强化机理。结果表明，金属玻璃粉末的添加主要通过其纳米级析出颗粒的沉淀强化以及晶粒细化显著改善了 Ti2AlNb 合金的力学性能。本研究可为使用激光粉末床熔化技术制备出无裂纹、高强度的改性 Ti2AlNb 合金提供了新的见解。

E07-P12

纳米硼接种对激光增材制造 Ti2AlNb 的改性研究

范澳琦、杜宇雷*

南京理工大学机械工程学院

Ti2AlNb 合金因其出色的高温强度、抗氧化性能以及轻质化特性，在航空航天等领域备受关注。然而在激光粉末床融化(LPBF)技术中应用仍受到微热裂纹的控制及组织结构调控等问题的制约。本研究通过优化工艺参数实现对 Ti2AlNb 合金材料在 LPBF 过程中的精确控制和优化制备。引入纳米硼采用微合金化改性，成功制备了高致密(相对密度>99%)和无裂纹的 Ti2AlNb/Nano-B 复合试样。获得了理想的力学性能，包括拉伸与压缩性能。通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等表征策略探究了接种纳米硼对合金性能的改性以及潜在的增强效果。结果表明，原位的纳米颗粒接种有效的抑制了合金微裂纹的产生与演变，并充当凝结核进一步约束了晶粒尺寸的生长。本研究证实了纳米硼接种的有效性，为该合金在 LPBF 应用中的进一步发展提供了可靠的实验基础和技术支撑。

E07-P13

CoCrFeNi 高熵合金增材件激光抛光工艺与成形机理研究

周宇航、周述东、张咪娜*、韦超

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

激光增材制造技术能够实现高熵合金零部件的快速制造，但增材件往往存在表面质量差、加工难度大等问题。对此，本文提出采用激光抛光工艺来改善 CoCrFeNi 高熵合金增材件的表面质量，研究了激光抛光工艺参数(如激光功率、扫描速度、扫描间距等)对增材件表面粗糙度影响，并探讨了激光抛光工艺对高熵合金增材件表面成分分布及其抛光机理的影响。结果表明，激光抛光工艺参数中离焦量和激光功率是影响表面质量的关键参数，表面粗糙度随着扫描速度、离焦量的增加呈现先减小后增大的趋势，优化后的表面粗糙度比初始表面粗糙度降低了约 90%；在激光抛光快速凝固的作用下，CoCrFeNi 高熵合金增材件表面元素分布更加均匀，同时表层的 O 元素和 Cr 元素含量降低，这主要归因于连续激光抛光过程中对表层氧化物的去除。

E07-P14**激光选区熔化 AlMgScZr 合金微观组织与电化学腐蚀性能研究**

梅思远*、邹田春

中国民航大学安全科学与工程学院

本研究采用激光选区熔化 (Selectivelasermelting,SLM) 技术成形了 AlMgScZr 合金, 分析了不同扫描速度制备的合金微观组织及其在 3.5wt.%NaCl 溶液中的动电位极化曲线和电化学阻抗谱, 研究了 SLM 成形 AlMgScZr 合金微观组织对其电化学腐蚀性能的影响。结果表明, 在 3.5wt.%NaCl 溶液中, SLM 成形的 AlMgScZr 合金表现出明显的钝化行为。合金中的孔隙降低了表面钝化膜的稳定性, 从而降低了合金的抗电化学腐蚀性能。由于熔池边界处高数量密度的 Al₃(Sc,Zr) 颗粒可以作为微阴极促进 Al 基体的溶解, 熔池边界发生了严重的腐蚀。此外, 随扫描速度增大, AlMgScZr 合金的晶粒尺寸逐渐减小、小角度晶界逐渐增多。晶粒尺寸的减小导致晶界密度和晶界处活性原子数量逐渐增多, 提高了钝化膜的生长速度, 同时, 小角度晶界的增多提高了晶界的稳定性, 从而改善了合金的抗电化学腐蚀性能。

E07-P15**3D 打印 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金耐热性能优化研究**夏晓宽*^{1,2}、黄天林^{1,2}

1.重庆大学材料学院

2.轻合金材料国际合作联合实验室

3D 打印技术因其在复杂结构制造中的独特优势, 被广泛认为是第三次工业革命的推动力。然而, 激光增材制造技术所赋予的“极端非平衡凝固”在制备过饱和固溶铝合金材料方面的优势有待深入挖掘。本研究聚焦于利用选择性激光熔化 (SelectiveLaserMelting,SLM) 技术制备的 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金, 探讨了 SLM 技术在制备过程中所特有的溶质过饱和现象。通过在 300°C 或 350°C 条件下进行时效处理, 析出大量热稳定的纳米析出相 Al₃(Sc,Zr), 显著提升了材料的耐热性能。这一发现不仅丰富了对 SLM 技术的理解, 也为开发新型高性能铝合金材料提供了新的途径。

E07-P16**激光粉末床熔融制备 CoNiCrAlY 涂层的微观组织及抗氧化性能研究**

罗浩*

新乡学院

本文采用激光粉末床熔融 (LPBF) 技术制备了 IN718 高温合金基体及其 CoNiCrAlY 涂层。对比研究了 1100°C 下 IN718 基体表面有无 CoNiCrAlY 涂层时的微观结构及其高温氧化性能。结果表明, 采用 LPBF 制备的 CoNiCrAlY 涂层致密、均匀且无裂纹。涂层主要由 γ 相、 β 相和一些 Y₂O₃ 微粒组成。沿平行和垂直于生长方向的微观组织分别为柱状枝晶和等轴晶粒, 且具有较强的 (100)<001>立方织构。涂层在 1100°C 等温氧化 1-100h 时, 均表现出较低的热生长氧化层生长速率和较薄的氧化层。涂层表面最初形成 Cr₂O₃ 氧化物。随着氧化时间的增加, 涂层表面形成了 α -Al₂O₃ 鳞片和 (Co,Ni)Cr₂O₄ 和 CoNiO₂ 混合氧化物。

仅发表论文

E07-PO01**选区激光熔化 Ti-Nb 合金热质运输的介观尺度数值模拟**

唐婉婷、任能、李军*
上海交通大学

Ti-Nb 合金具有低弹性模量 (57-116GPa)、优异的生物相容性以及耐腐蚀性,是非常有潜力的骨骼植入物和关节置换材料,而选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术的发展为 Ti-Nb 合金精细加工成形以及定制化生产提供了新的途径。制造出性能优异的成型件需要构建工艺参数-成分分布-显微组织-性能之间的关联关系,而目前的实验手段存在过程可视化困难、可重复性差、成本昂贵等问题。

鉴于此,本研究将借助数值模拟手段可视化 SLM 过程熔体流动、蚀孔演变及溶质输运等复杂过程并揭示背后的多物理场作用机理。基于离散元法建立了三维粉末床模型,采用流体体积法来追踪 SLM 过程的自由表面,并且模型中考虑了表面张力、反冲压力等控制流体动力学的诸多因素,有效预测了 Ti-Nb 合金选区激光熔化过程的传热、流动以及溶质输运。数值模拟研究了激光功率和扫描速度对熔池形貌、温度场以及成分分布的影响,道间重熔和层间重熔对成分分布的影响。同时探究了平顶光束、高斯光束及椭圆光束等不同的光束形貌对粉层吸收以及热-流多场演变过程的作用机理,进而达到调控熔池形貌以及成分分布的目的,为实验工艺窗口的制定提供有力工具。

E07-PO02

激光增材制造铜及铜合金的研究进展

张咪娜*、高世阳、王以坤、周宇航、周述东、韦超、李琳
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铜及铜合金具有优异的导热、导电性及耐腐蚀性等性能,在航空航天、海洋工程等领域有着广泛的应用。激光增材制造技术具有制造周期短、材料范围广以及一体化成形等独特优势,是铜合金复杂部件高效成形的有效方法之一。但是,由于铜及铜合金材料对激光具有高反射率,导致铜及铜合金增材件存在表面质量差、气孔及裂纹等问题,严重阻碍了铜及铜合金增材件的安全应用。本文综述了合金化元素、陶瓷相颗粒等合金成分改性对提高铜及铜合金材料的激光吸收率,探讨了激光波长、工艺参数及后处理等成形工艺对激光增材制造铜及铜合金微观结构、成形质量、力学性能及耐腐蚀性能的影响,最后,展望了激光增材制造铜及铜合金的应用前景及其发展趋势。

E07-PO03

高转速 PREP 法制备球形 K390 粉末及其组织性能研究

张煜*、宋美慧、李岩、李艳春、宫书林
黑龙江省科学院高技术研究院

采用高转速 PREP 法制备 K390 粉末。利用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线衍射仪和全自动粒度粒形分析仪对粉末微观组织、粒度粒形进行测量,利用斯科特容量计和霍尔流速计测定粉末松装密度及流动性;研究制备工艺对粉末组织性能的影响。结果表明,PREP 法制备的 K390 粉末为实心球形,无卫星粉。粉末具有龟裂形表面和光滑表面两种形貌,且粉末粒径越小表面越光滑。W、Mo 和 Gr 等合金元素分布均匀,未发现明显偏析现象,也未发生合金元素损耗。粉末的凝固组织以枝晶为主,未发现共晶莱氏体组织。粉末主要由残余奥氏体、铁素体和少量 MC 型和 M6C 型碳化物组成。电极转速越高,粉末粒径越小、球形度越高。当采用 42000r/min, 670A 制粉时,EBSM 成型用-100 目~+325 目粉末收率可达 80.39% 以上。

E07-PO04

多取向镍钛极小曲面结构的力学性能及其对裂纹扩展的调控作用

任云龙*、杨磊

武汉理工大学

多孔镍钛合金具有较高的比强度和优异的生物相容性等特性，广泛应用于生物医学和航空航天领域。为了设计出更耐损伤的镍钛多孔结构，更好的控制镍钛多孔结构失效时的裂纹扩展，需要深入研究镍钛多孔结构的失效机理。因此，本研究选取 Gyroid 结构作为研究对象，结合多取向的设计思路，研究了三种多取向结构的力学性能和失效形式。结果表明，SG（具有单取向方向的 Gyroid 结构）和 DDG（具有双取向方向双取向区域的 Gyroid 结构）具有相近的承载能力，然而，取向区域的引入使得两种结构的断裂形式出现较大差异。在单轴压力作用下，SG 沿着 45 度方向断裂，DDG 形成“V 形”断裂带，DFG（具有双取向方向四取向区域的 Gyroid 结构）形成“W 形”断裂带且逐层溃败。随着取向区域的增加，多取向表面被强化，疲劳裂纹难以在多取向表面生成并扩展，非多取向表面的疲劳裂纹扩展方向发生变化，镍钛 Gyroid 结构在受低应力时的疲劳寿命趋于稳定。本研究为开发出损伤路径更为可控的镍钛多孔结构提供了有价值的参考。