

增材制造赋能航空制造绿色转型 技术前沿与突破

顾冬冬

南京航空航天大学

江苏省高性能金属构件激光增材制造工程研究中心

2026年6月27日

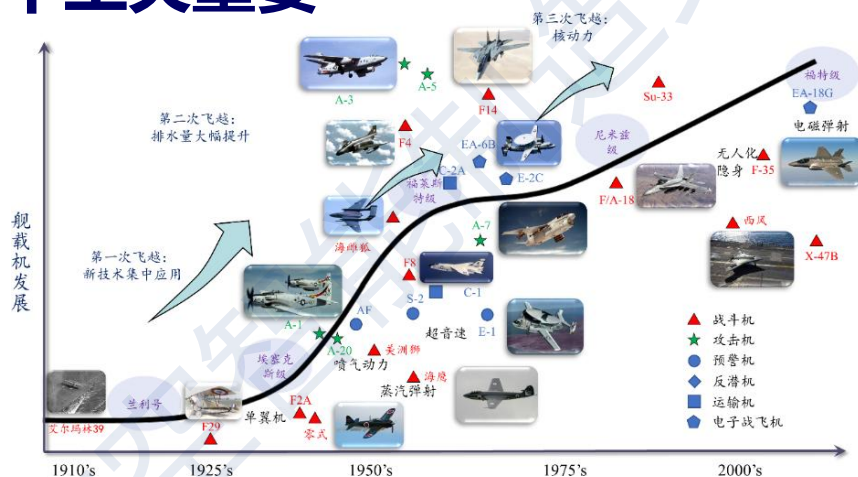
- 1、背景及意义**
- 2、难点挑战及解决思路**
- 3、技术攻关及研究进展**
- 4、总结及展望**

- 3 -

-



-



1、背景及意义：研究背景

- 4 -

- **近海部署/远洋战机零部件服役性能需求严苛：**特殊的服役环境对远洋战机各类复杂零部件综合性能提出了严峻挑战

性能需求：轻质、高强、耐蚀



薄壁框类

异形管类

整体格栅类

严苛条件

超强机动



海洋环境



作战半径

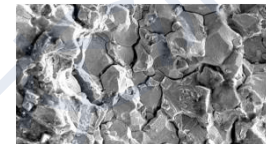


复杂需求

高承载



强耐蚀



轻量化



框类、管类、格栅类等复杂关键构件具有轻量、耐蚀、高强及一体化成形需求

严苛服役环境下航空零部件绿色低碳低成本智能制造面临新挑战

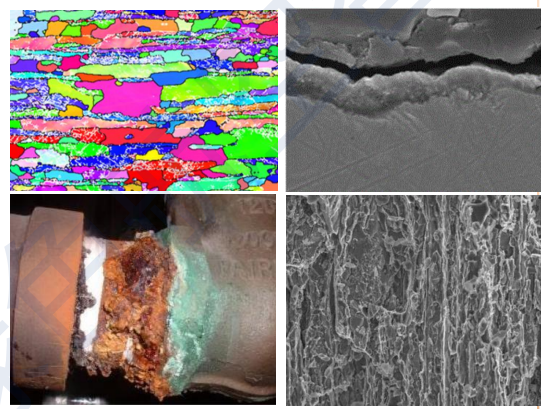
1、研究背景及意义

- 5 -

➤ 战机传统铝合金复杂构件面临挑战

铝构件在航空制造中占有重要地位，现有技术绿色发展遇瓶颈难题

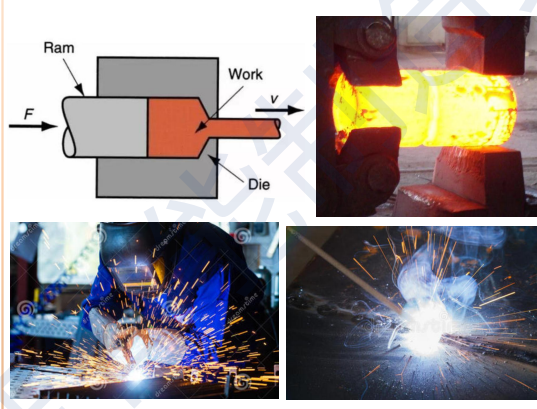
材料



问题1:

盐雾环境腐蚀倾向高，美军每年用于近海战机耐蚀防护10亿美元

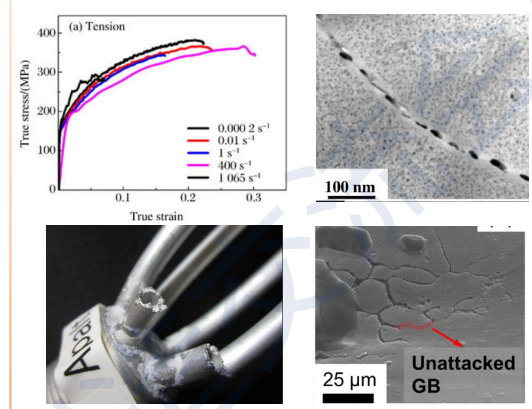
工艺



问题2:

加工周期长，废品率高，材料利用率低，复杂构件成形难

性能



问题3:

轻量化设计受限，力学性能/耐蚀协同困难，构件易失效

亟待开发新型轻质、高强、耐腐蚀铝合金及其一体化成形技术

1、研究背景及意义

- 6 -

➤ 激光增材制造为复杂构件成形提供新途径



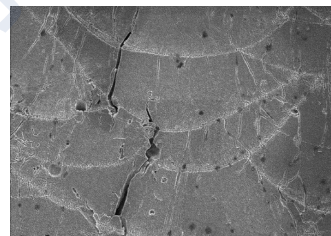
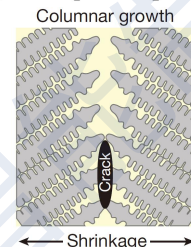
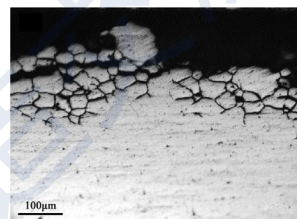
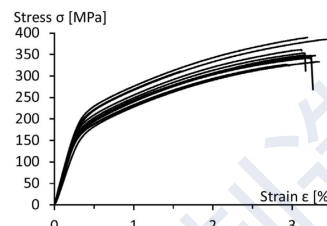
逐层铺粉/激光固化的选区激光熔化SLM技术

复杂零部件一体化高效成形

➤ 激光增材制造铝合金构件的瓶颈问题

➡ 目前大量使用的Al-Si系铸造铝合金强度有限，**低于350MPa**，耐蚀性差

➡ 2xxx/7xxx系Al合金激光增材制造凝固区间宽，**热裂倾向大**，成形困难



激光增材制造高强韧耐腐蚀铝合金复杂构件需求显著

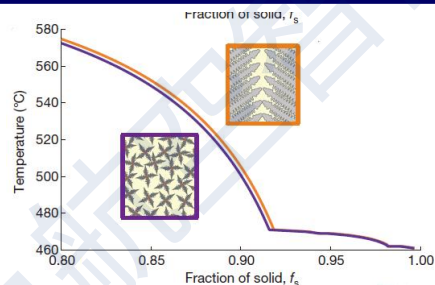
1、研究背景及意义

- 7 -

➤ 面向激光增材制造的超500MPa耐蚀铝合金

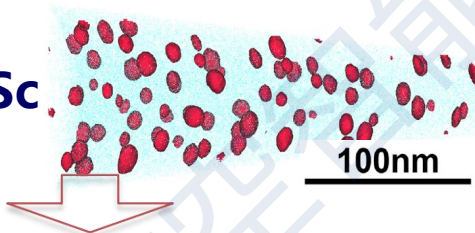
稀土Sc改性Al-Mg合金可细化晶粒抑制裂纹，实现高性能铝合金激光增材制造

原位析出改善增材成形与基体强化



原位颗粒作为形核质点显著细化晶粒，提升综合性能与成形性

高密度纳米 Al_3Sc 共格析出相

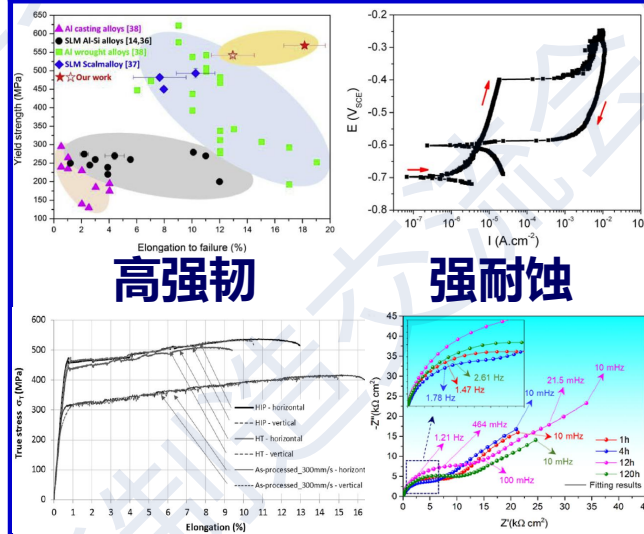


屈服强度
抗拉强度
比强度
延伸率

	AISi10Mg	Sc微合金化Al-Mg
屈服强度	230	470
抗拉强度	350	520
比强度	131	195
延伸率	6	13

赋予材料独特的综合性能

稀土改性Al-Mg合金 高强度韧性与耐蚀性



实现力学性能与耐腐蚀性
协同提升

稀土改性铝合金的比强度、耐蚀性有望达到钛的水平

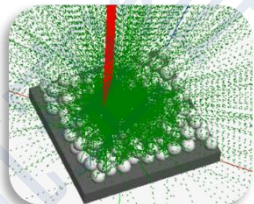
2、难点挑战及解决思路

- 8 -

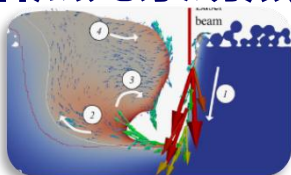
➤ 激光增材制造稀土改性高强铝合金的技术挑战

激光反射率高
元素易烧损

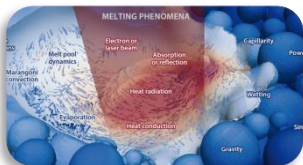
激光吸收率仅为9%



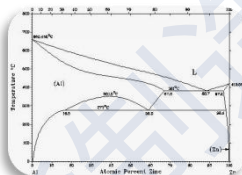
低熔点元素易蒸发



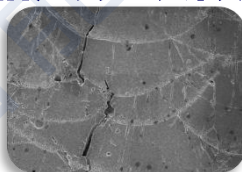
稀土元素易烧损



裂纹敏感性强
致密化困难



沿晶热裂纹倾向

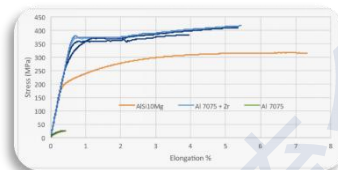


宏观应力/变形/开裂

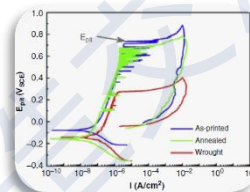


强韧化/腐蚀机理复杂
协同调控难

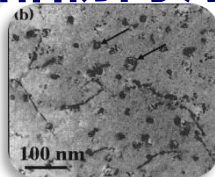
常温静载力学性能



常温耐腐蚀性能



析出相协同调控



增材制造轻质高强耐蚀铝合金的材料-工艺-性能一体化调控

2、难点挑战及解决思路

- 9 -

需求牵引：航空航天装备轻质高强耐蚀铝合金构件绿色制造

难点问题1：
材料设计

稀土如何改性？

内容1：激光增材高强铝合金专用装备集成及粉体设计技术

难点问题2：
工艺优化

构件如何成形？

内容2：激光增材高强铝冶金缺陷及成形质量工艺调控技术

难点问题3：
性能评估

性能如何提高？

内容3：激光增材制造稀土改性高强铝力学/耐蚀性能协同控制

内容4：复杂整体构件内应力调控及一体化成形技术

试验验证及工程应用

技术目标：轻质高强耐蚀铝合金复杂构件控形控性绿色制造

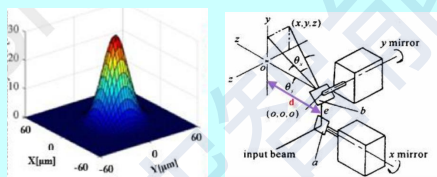
3、技术攻关方向①：元素成分控得准



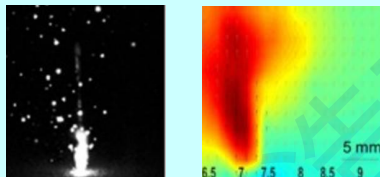
- 10 -

□激光增材高强铝合金专用装备集成及粉体设计技术

激光增材高强铝合金专用装备模块设计优化方法



高能激光束能量分布
优化及振镜调节

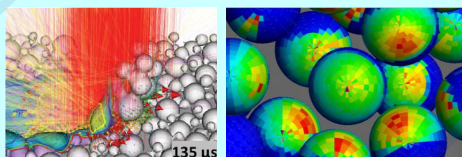


柔性铺粉技术及腔内
气体循环路径优化

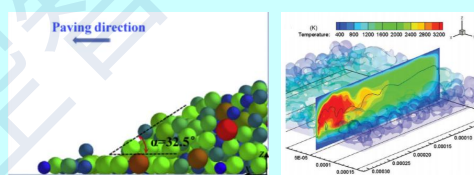


专用激光增材装备
一体化集成方法

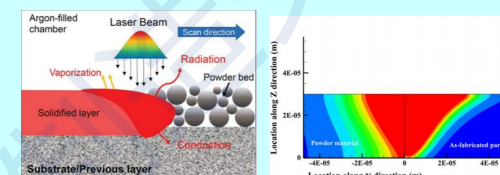
稀土改性高强铝合金粉体成分和物性设计方法



高能激光高强铝合金
粉体能量吸收行为



高强铝合金粉体铺展
及熔化凝固行为



高速动态熔池内部
传热传质行为

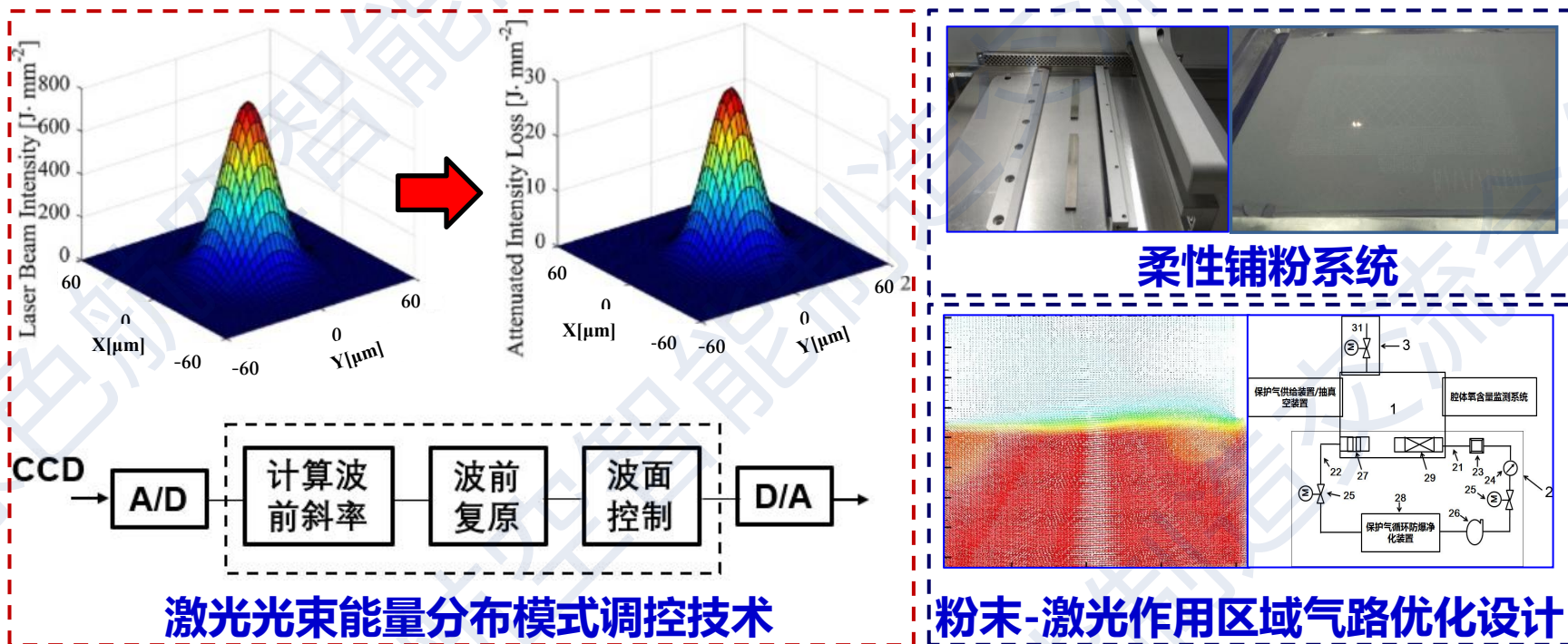
建立激光增材Sc改性Al-Mg合金专用装备集成及粉末设计方法

➤ 专用装备研制-模块化系统布局

- 11 -

■ 面向高强铝合金成形的激光增材制造装备集成技术

基于铺粉方式的选区激光熔化SLM成形高强铝合金专用设备优化设计



- 优化**激光能量分布**，抑制局部过热导致的稀土烧损行为
- 改进**柔性铺粉系统**，提高供粉稳定性，局部微凸/凹陷概率降低65%
- 设计**腔内气路循环**，烟尘回收效率提升30%并降低局部热量积累效应

➤ 粉体优化设计制备-激光吸收/粉体铺展熔化

- 12 -

■ 高强铝合金粉体激光吸收、粉体铺展及熔化行为

激光
吸收

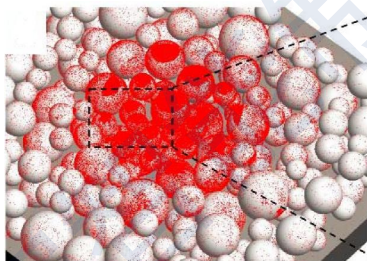
耦合

粉体
铺展

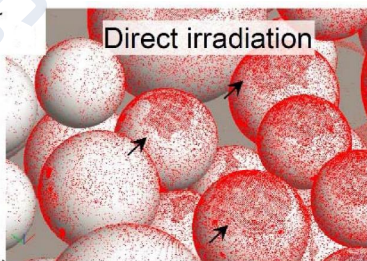
耦合

颗粒
熔化

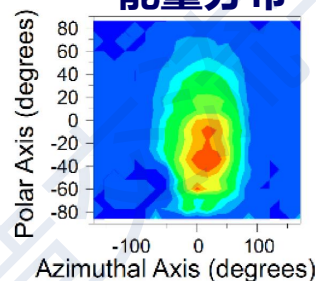
线迹追踪算法



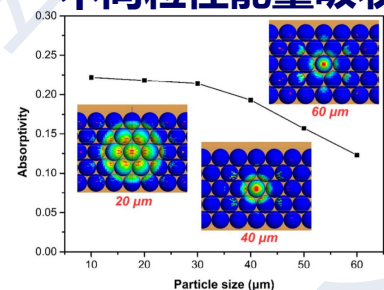
Direct irradiation



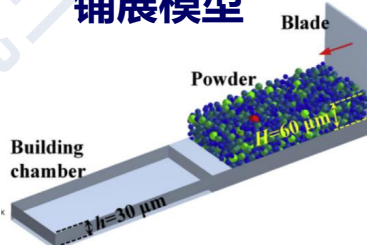
能量分布



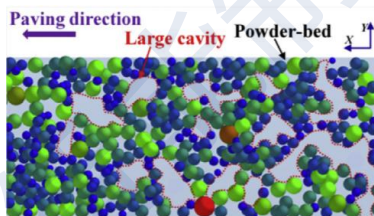
不同粒径能量吸收



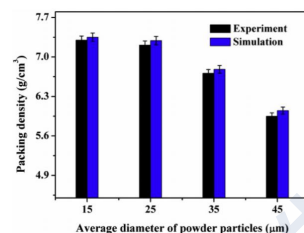
铺展模型



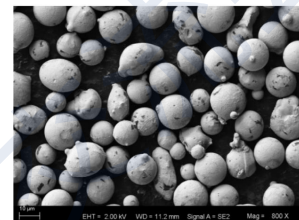
粉体铺展效果



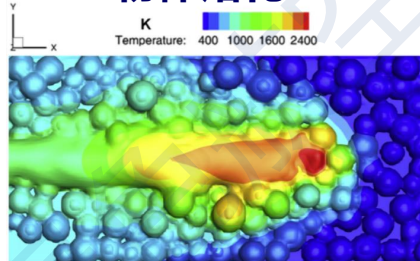
不同粒径铺展密度



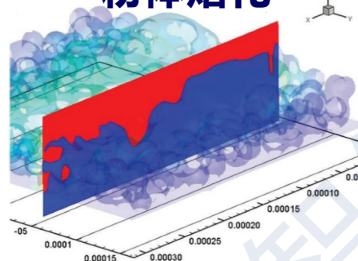
粉体铺展效果



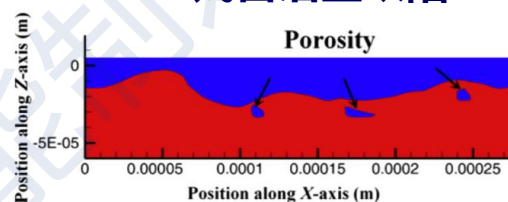
粉体熔化



粉体熔化



残留冶金缺陷

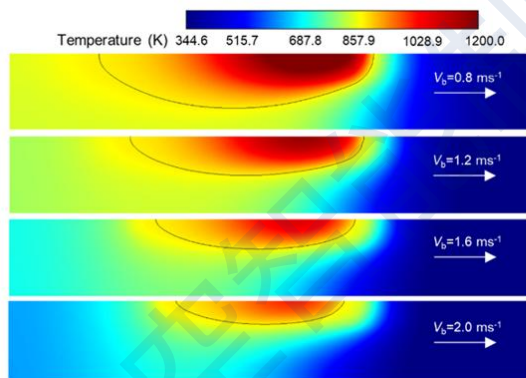


➤ 粉体粒径20-40 μm 为宜, 层厚30 μm , 并适当提高激光能量密度

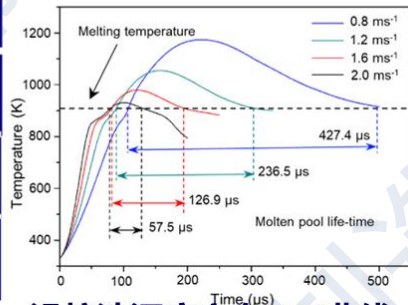
➤ Comput.Mater. Sci, 2020, 177: 109598.

➤ Int J Mach Tool Manu, 2019, 137: 67-78.

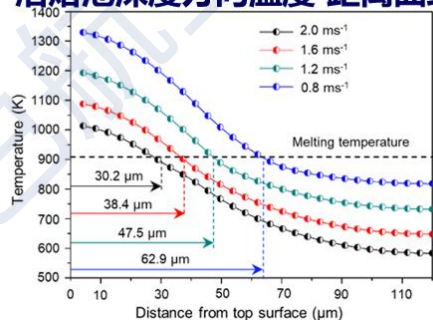
■ 熔池传热传质与冷却凝固行为



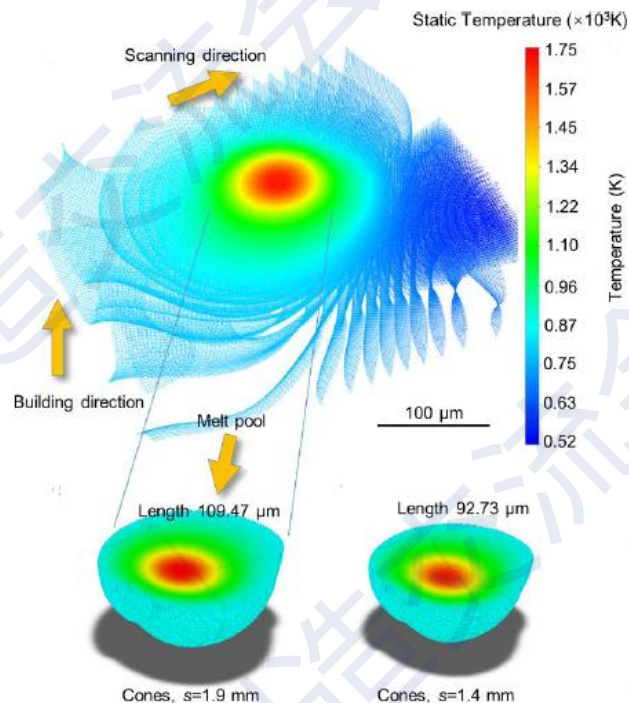
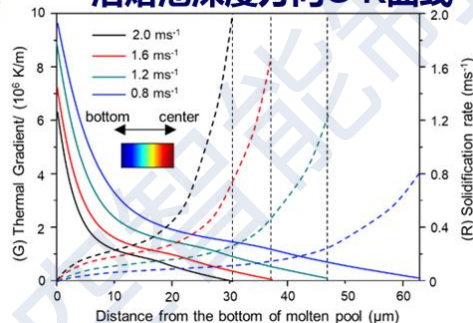
熔池内温度-时间曲线



沿熔池深度方向温度-距离曲线



沿熔池深度方向G-R曲线



➤ 基于数值模拟，对高强铝合金开展数值模拟探究并摸索适宜工艺区间

➤ 过高功率下低熔点元素Mg易蒸发

➤ 高扫描速度下熔体运动过快易飞溅，同时

液相存在时间过短易残留孔隙

➤ Addit. Manuf. Vol. 23, pp. 1-12, 2018

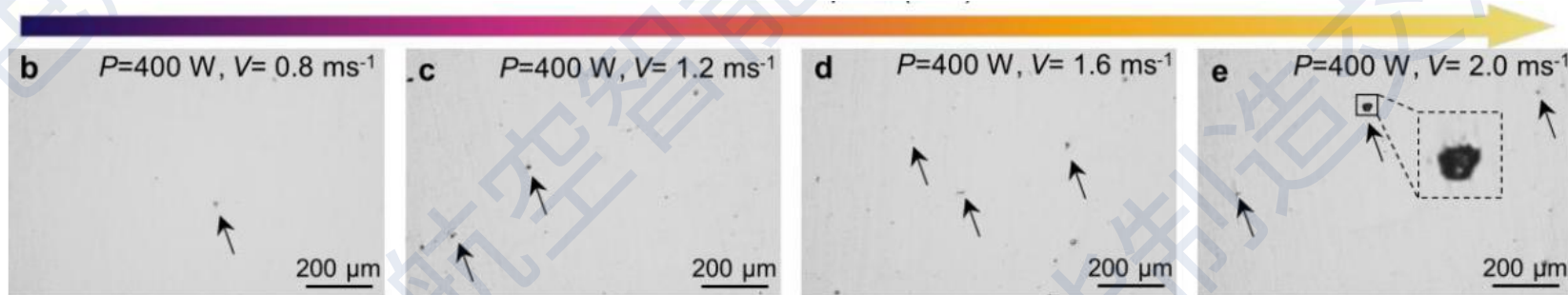
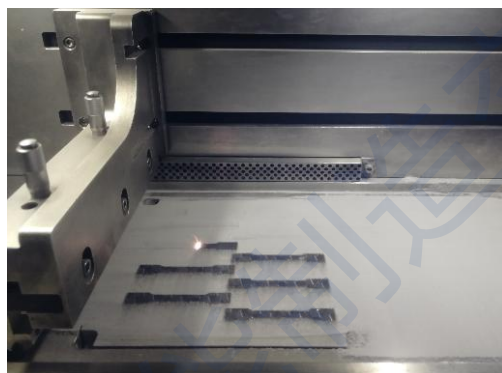
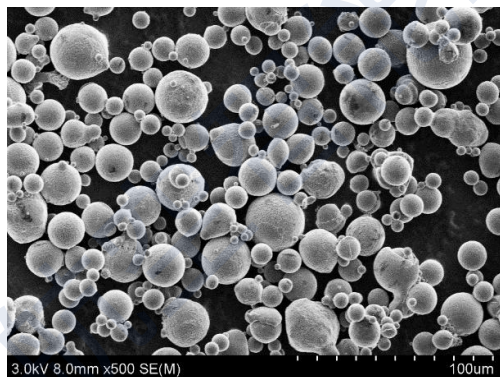
相较传统Al-Si系合金
应采用适中激光功率
+ 低扫描速度

➤ 粉体优化设计制备-粉体致密化

- 14 -

■ 新型高强铝合金Al-Mg-Sc-Zr激光增材制造工艺摸索

Element	Al	Mg	Sc	Zr	Cr	Cu	Fe	Mn	Ti
Content	Bal.	4.2	0.4	0.2	0.01	0.005	0.1	0.18	0.001



- 最优工艺区间为**激光功率350-400W**，**扫描速度600-1000mm/s**
- **试件一次成形致密度达99.5%**，**无明显孔隙及裂纹产生**
- Addit. Manuf. Vol. 23, pp. 1-12, 2018

3、技术攻关方向②：工艺窗口把得稳



- 15 -

□激光增材制造高强铝冶金缺陷及成形质量工艺调控技术

激光扫描策略：
冶金缺陷、表面光洁度、熔池搭接等

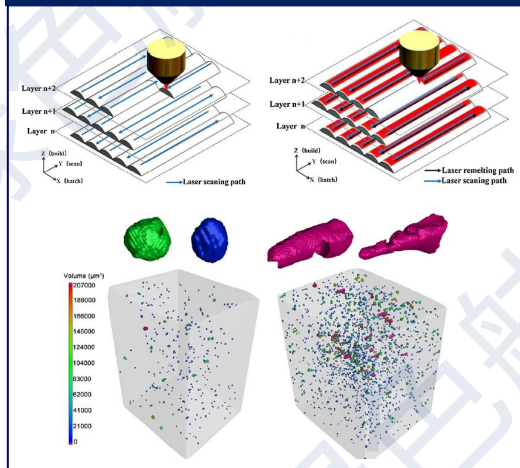


路径参量优化：
内应力、晶粒分布、宏观力学性能

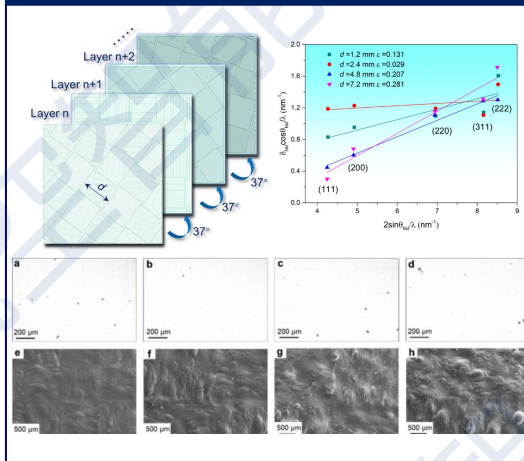


协同调控机制：
高质量、高精度、高性能协同调控

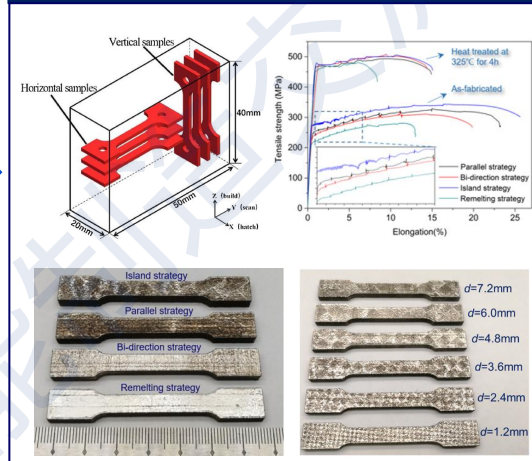
①熔池搭接方式与试件成形质量关系



②路径关键参量与试件成形质量关系



③冶金缺陷及成形质量协同调控

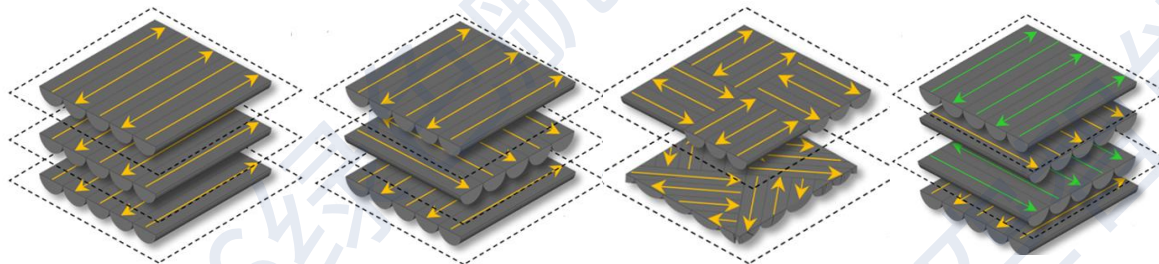
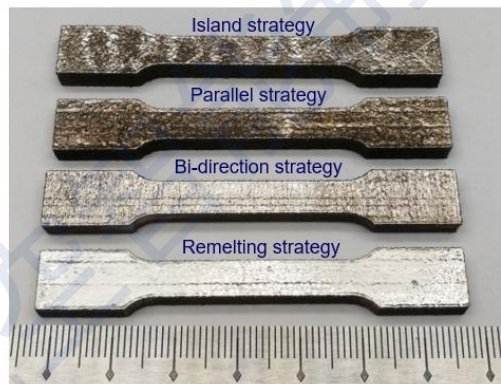
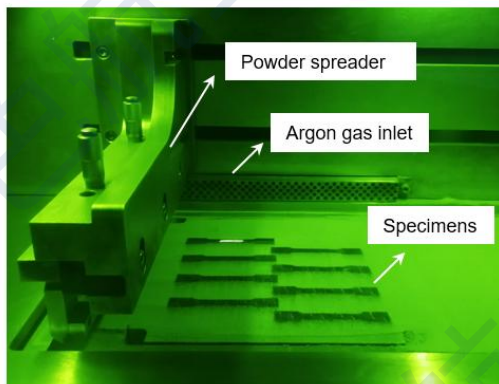
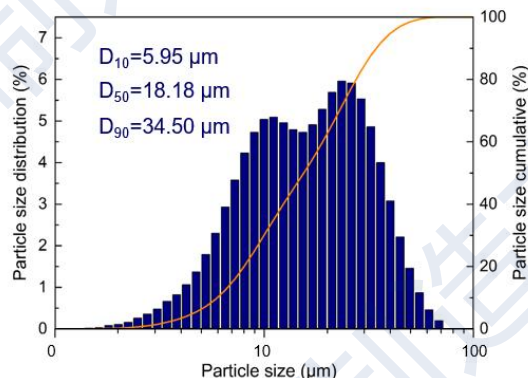
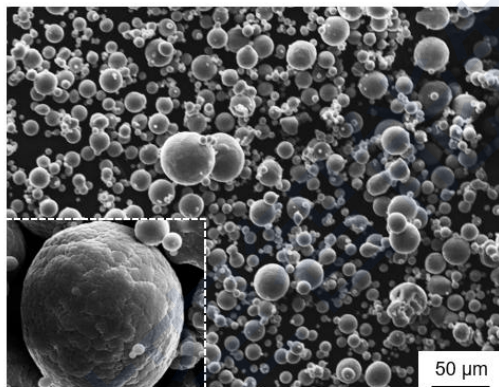


建立激光增材制造高强铝合金的冶金缺陷控制及工艺参数优化方法

SLM成形高强铝-激光扫描策略

- 16 -

■ 激光增材制造成形高强铝合金激光扫描策略选择



➤ 基于前期激光工艺参数摸索

➤ 四种激光扫描策略：
单向、正交、分区、重熔

功率400 W

光斑直径70 μm

层厚 30 μm

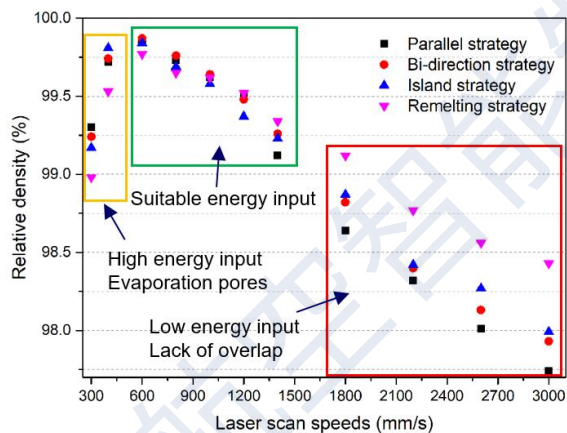
速度 400-3000mm/s

Virtual and Physical Prototyping (2022)

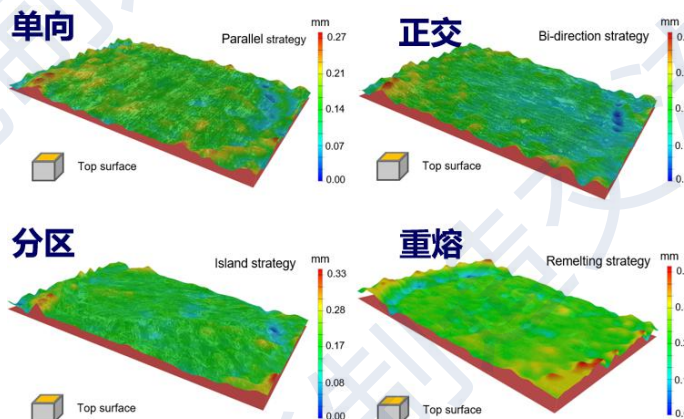
SLM成形高强铝-激光扫描策略

- 17 -

激光增材制造成形高强铝合金激光扫描策略选择



孔隙率

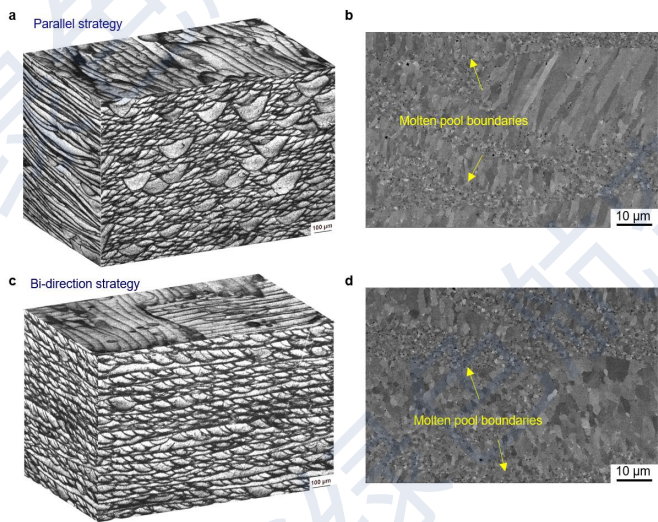


表面质量

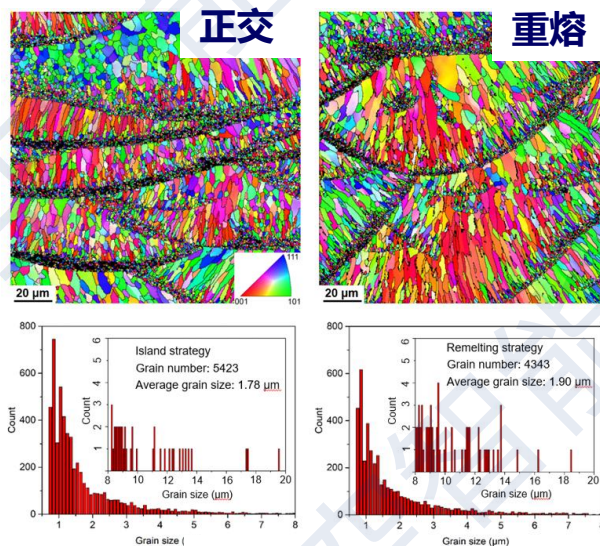
➤ **孔隙率：不同激光路径**
下均可获得高致密试件
> 99.5%

➤ **表面粗糙度：**
分区 > 单向 > 正交 > 重熔
重熔粗糙度最低：10.2μm

➤ **熔池搭接：分区、正交下**
熔池排布稳定，重熔会加
深熔池深度并粗化颗粒



熔池搭接



晶粒分布

- **重熔获得较优表面光洁度**
- **分区正交熔池搭接更均匀**

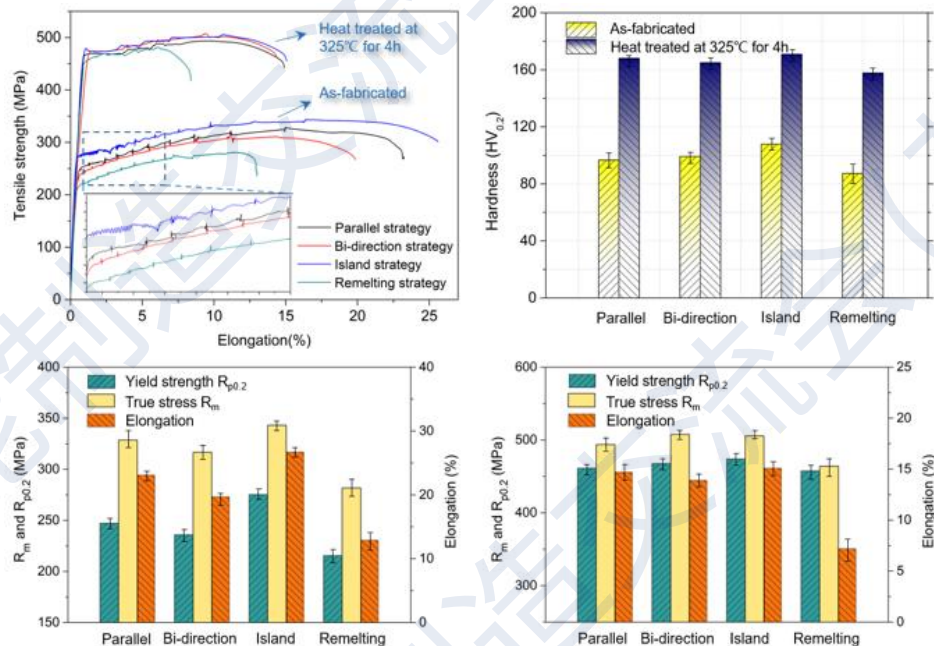
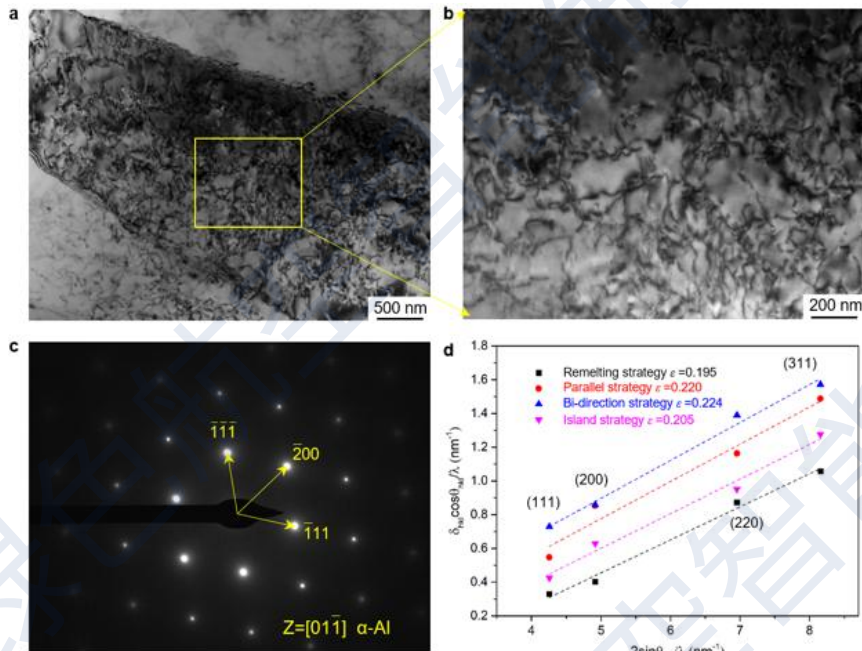
SLM成形高强铝-激光扫描策略

- 18 -

激光增材制造成形高强铝合金激光扫描策略选择

内应力水平表征

力学性能表征



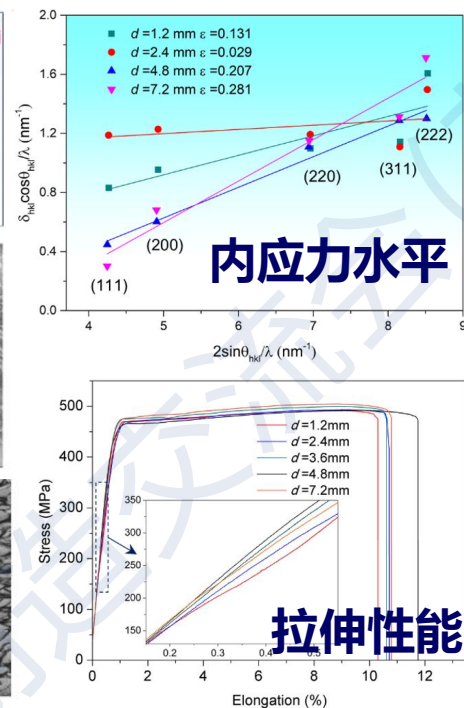
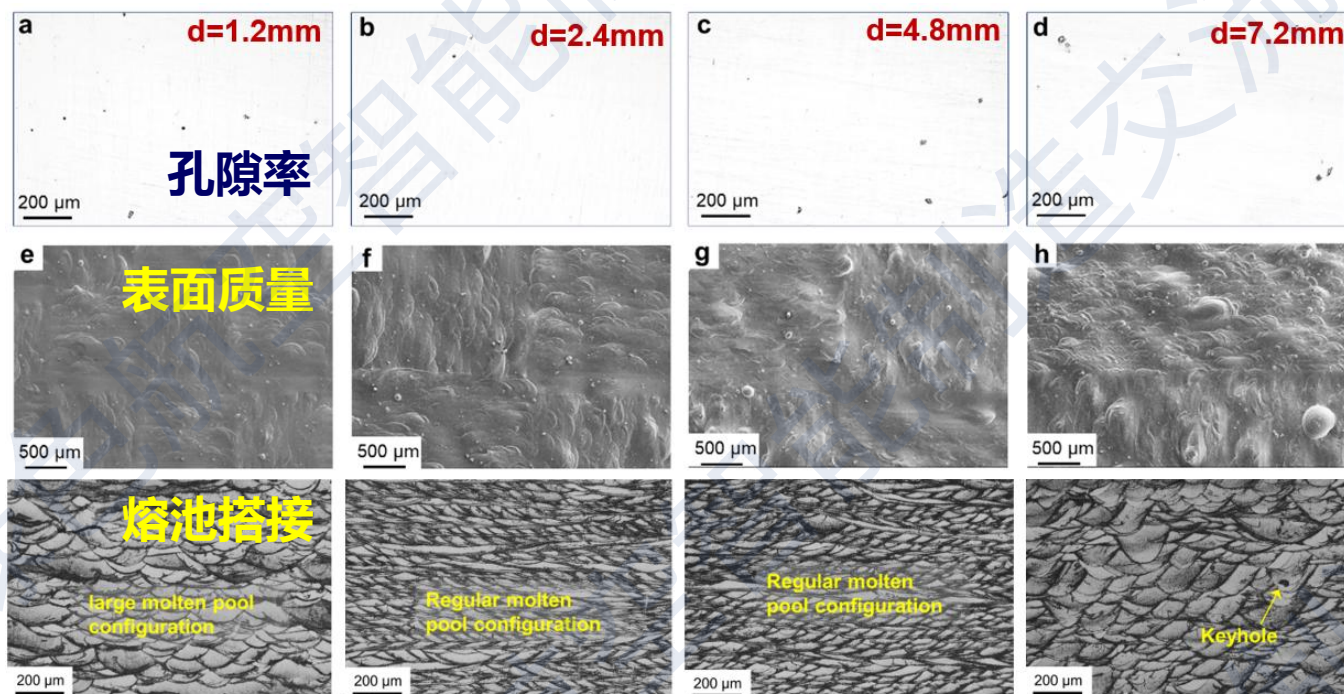
- 重熔策略下试件内应力/微应变水平最低 $\epsilon=0.195$ ➡ 温度梯度降低
- 分区内应力水平略高于重熔 $\epsilon=0.205$ ➡ 激光扫描矢量长度减少
- 分区、单向、正交时效后拉伸强度均 $> 500\text{MPa}$, 延伸率 $\approx 15\%$
- 重熔试件延伸率显著降低, 约7%

激光扫描路径优化-路径参量优化

- 19 -

激光增材制造成形稀土改性Al-Mg合金试样不同分区尺寸成形质量

针对分区策略，开展工艺试验优化其分区尺寸 ($d=1.2-7.2\text{mm}$)



成形试样表面质量随分区尺寸减小而提升

分区尺寸过小或过大时内应力较大，尺寸适中 $d=2.4\text{mm}$ 时内应力最小

抗拉强度均在500MPa左右，延伸率在10-15% ➡ 尺寸2.4-4.8mm为宜

Materials Science & Engineering A 788 (2020) 139593

3、技术攻关方向③：材料性能提得高

- 20 -

□激光增材制造稀土改性高强铝力学/耐蚀性能协同控制

纳米尺度：纳米析出相形态、尺度、分布特征

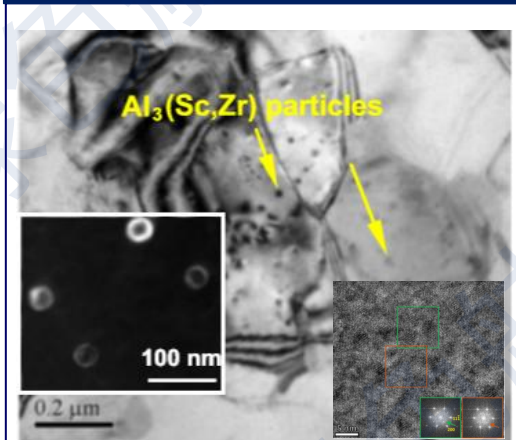


微观尺度：基体晶粒变化及显微组织演变规律

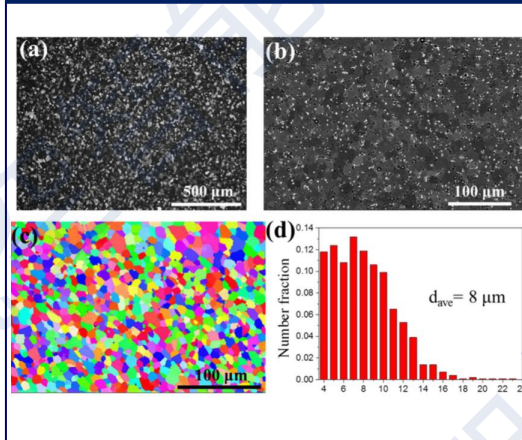


宏观尺度：高强铝合金力学/耐蚀性能协同调控

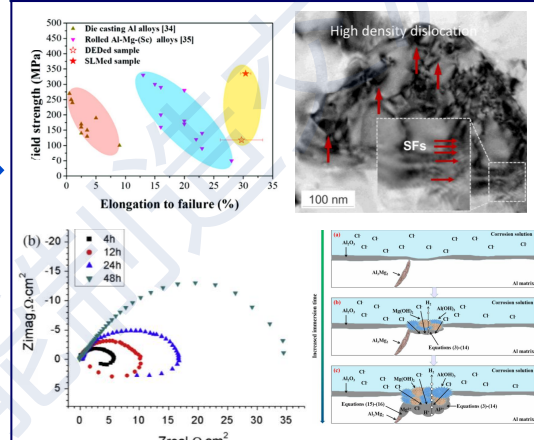
①纳米析出相与增材、时效工艺作用关系



②显微组织演变与激光工艺参数调控关系



③力学/耐蚀性能协同调控及提升机制

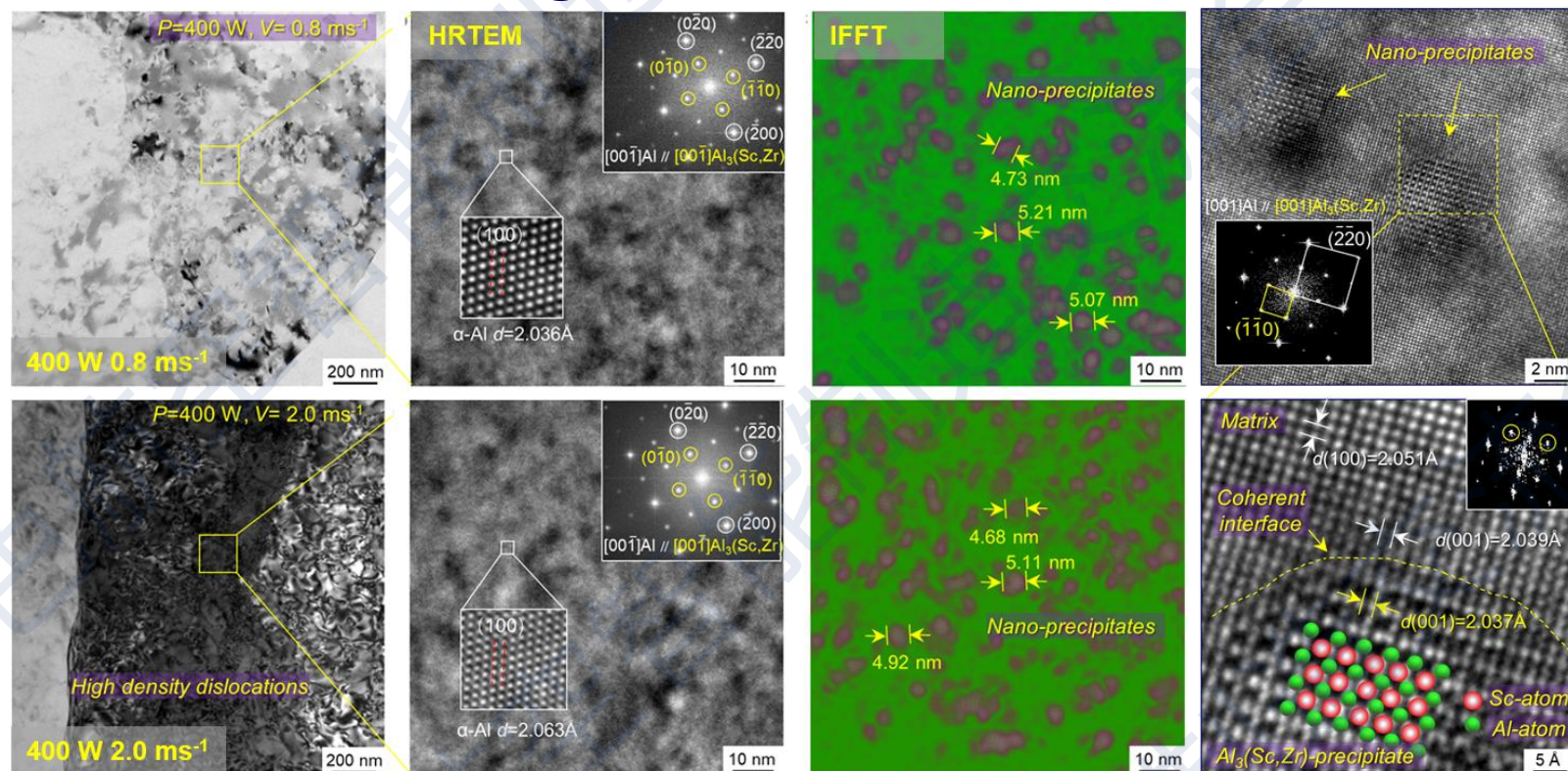


揭示激光增材工艺/时效工艺双重作用下性能提升机制

激光工艺参数优化-激光成形参数

- 21 -

激光增材制造Al-Mg-Sc-Zr合金不同扫描速度显微结构分析



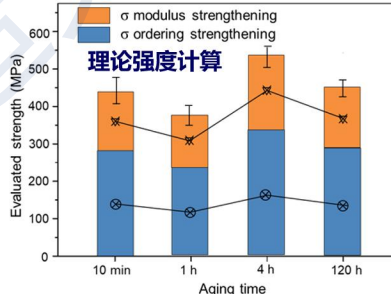
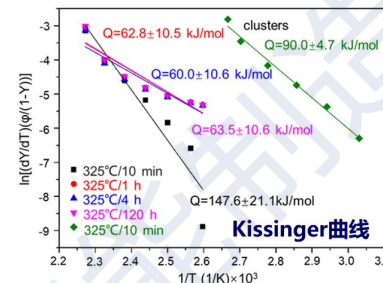
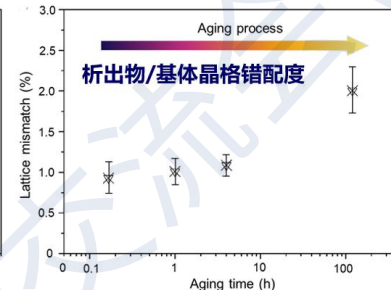
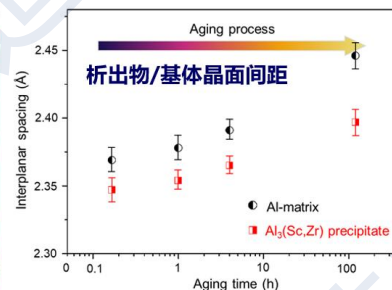
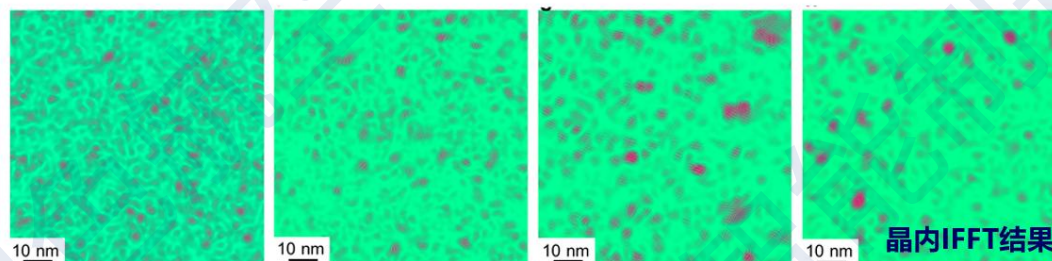
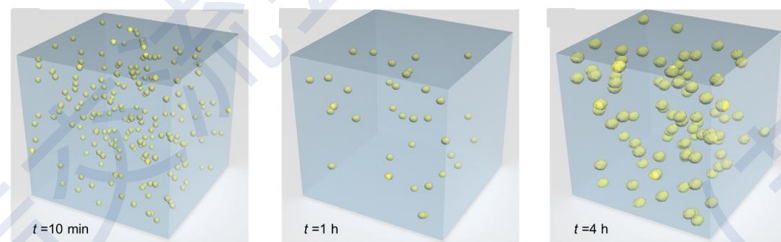
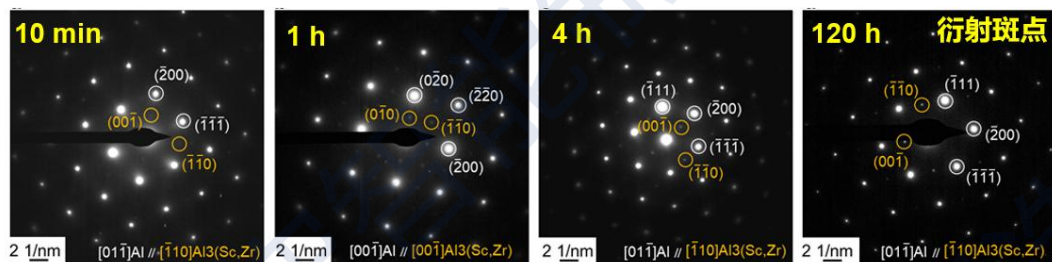
纳米析出结构

- 不同扫描速度成形试件基体内均形成大量尺寸在3~5 nm左右纳米Al₃(Sc,Zr)析出物
- 在低扫描速度0.8 ms⁻¹下，纳米析出物密度为 $1.21 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ，当扫描速度增至2.0 ms⁻¹，析出物密度增至 $1.42 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ，析出物密度增大。

时效工艺参量优化-热处理时间

- 22 -

激光增材制造成形稀土改性Al-Mg合金试样不同时效时间组织



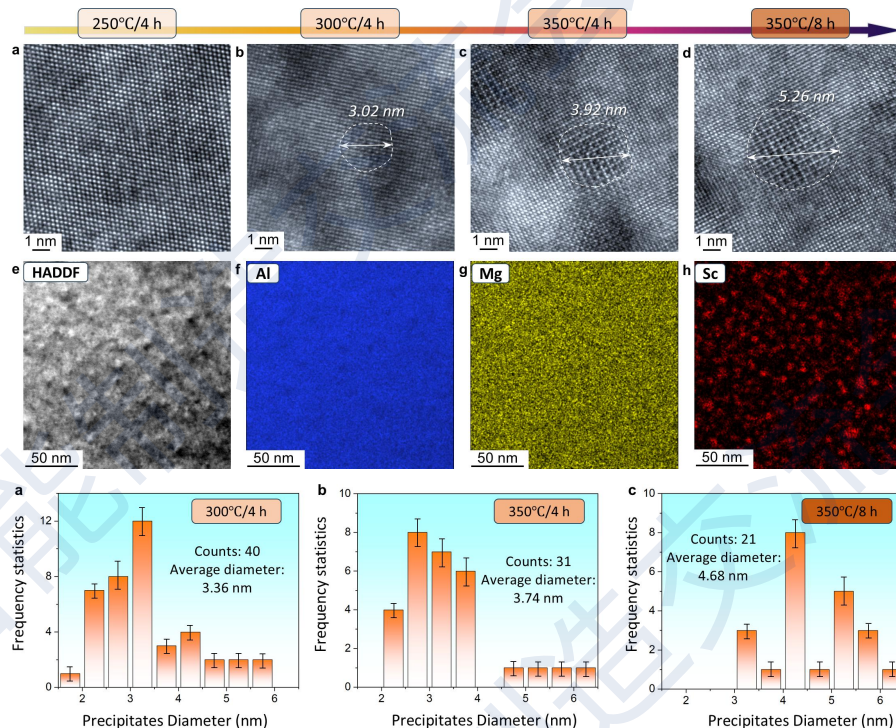
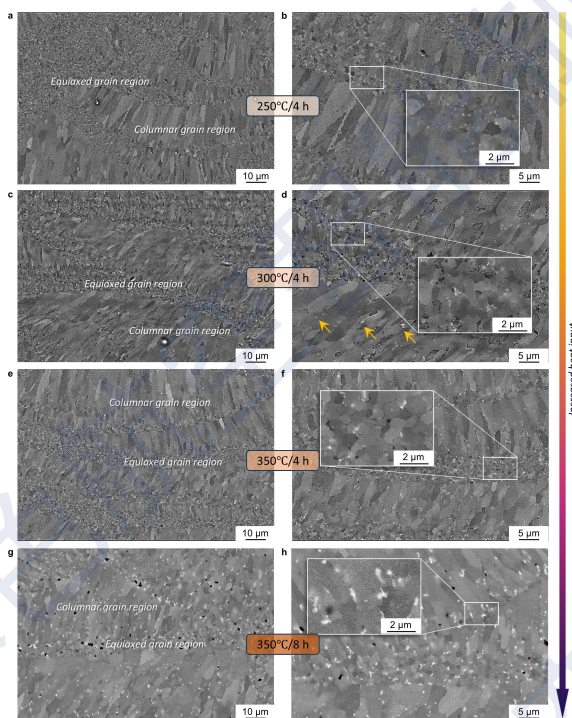
- 时效早期在热驱动和高密度空位的双重作用下**极高密度纳米析出** (10 min)
- 长时间充分热驱动下形成具有规则长程有序 $L1_2$ 结构的稳定 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ (4 h)



时效热处理工艺优化-热处理温度

- 23 -

■ 激光增材制造高强铝合金不同热处理温度下跨尺度显微组织演变

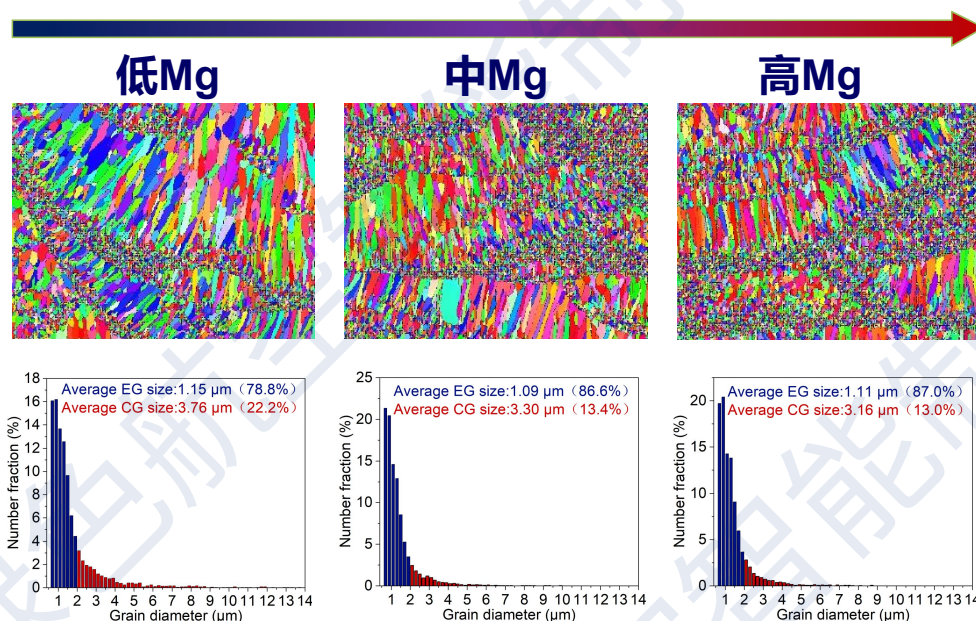


- 在微米层级，随时效温度从250°C增至350°C，成形件晶粒结构无显著变化，晶界处一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 析出相尺寸和数量呈增加趋势。
- 在纳米层级，随热输入增大，析出物尺寸呈逐渐增大趋势，密度呈先增加后降低的趋势， $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 析出物与 $\alpha\text{-Al}$ 基体保持共格结构。

合金成分优化迭代-Mn/Mg协同元素调控

- 24 -

Mg含量对激光增材制造稀土改性铝合金微观组织及性能影响



含量	拉伸强度	延伸率	断裂韧性
低Mg	~470 MPa	~10%	>40 MPa·m ^{1/2}
中Mg	~490 MPa	~12%	~35 MPa·m ^{1/2}
高Mg	>500MPa	~14%	~25 MPa·m ^{1/2}

Mg含量对增材铝合金强韧性能的影响

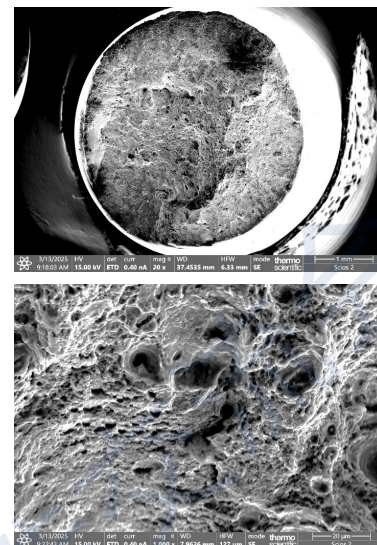
- **晶粒尺寸：**随高强铝合金中Mg元素含量增加，整体仍呈现典型的双峰分布特征，但晶粒结构逐渐细化，最大晶粒尺寸减小且等轴晶粒占比增大。
- **晶粒取向：**不同Mg含量下，晶粒取向从较为随机逐渐向择优取向演变，归因于晶粒尺寸减小且等轴晶比例增多。

合金成分优化迭代-Mn/Mg协同元素调控

- 25 -

■ 激光增材制造Mn/Mg协同含量下稀土改性铝合金强韧性能

状态	方向	σ_b /MPa	$\sigma_{P0.2}$ /MPa	δ_5 /%	K_{IC} /MPa·m ^{1/2}
300℃, 2h, AC	XY	506.5	504.9	13.7	34.9
	Z	500.1	493.6	12.9	33.1
300℃, 3h, AC	XY	507.3	506.4	12.0	30.5
	Z	499.8	496.2	11.3	29.8
300℃, 4h, AC	XY	513.8	513.2	15.2	24.9
	Z	504.8	499.7	14.4	26.3
300℃, 6h, AC	XY	530.3	518.7	13.0	23.4
	Z	519.7	502.0	12.8	23.1
300℃, 8h, AC	XY	532.5	522.0	12.5	22.2
	Z	522.0	506.5	13.8	22.7

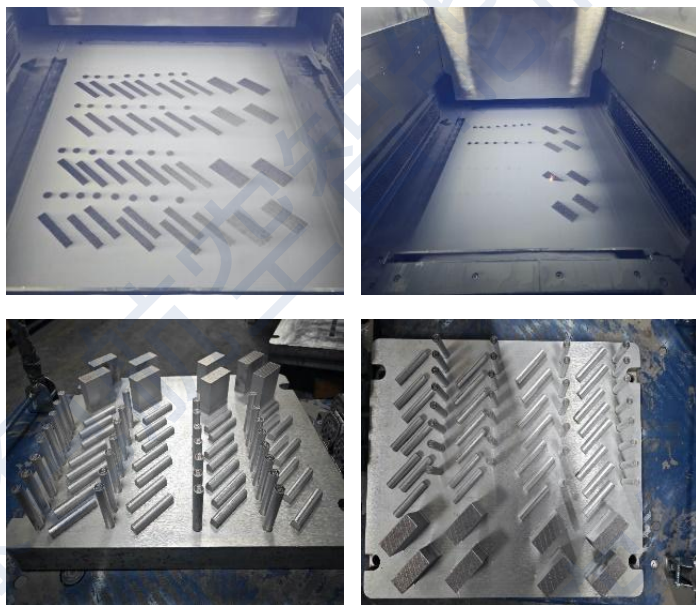


- 结合前述合金成分优化结果，进一步调控了Mn/Mg元素比例，获得Mn/Mg协同含量下稀土改性铝合金。
- 优化热处理制度下成形试件可获得**高强**（~500MPa）、**高延展性**（> 10%）、**高韧**（ $K_{IC} > 33 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ）综合效果。

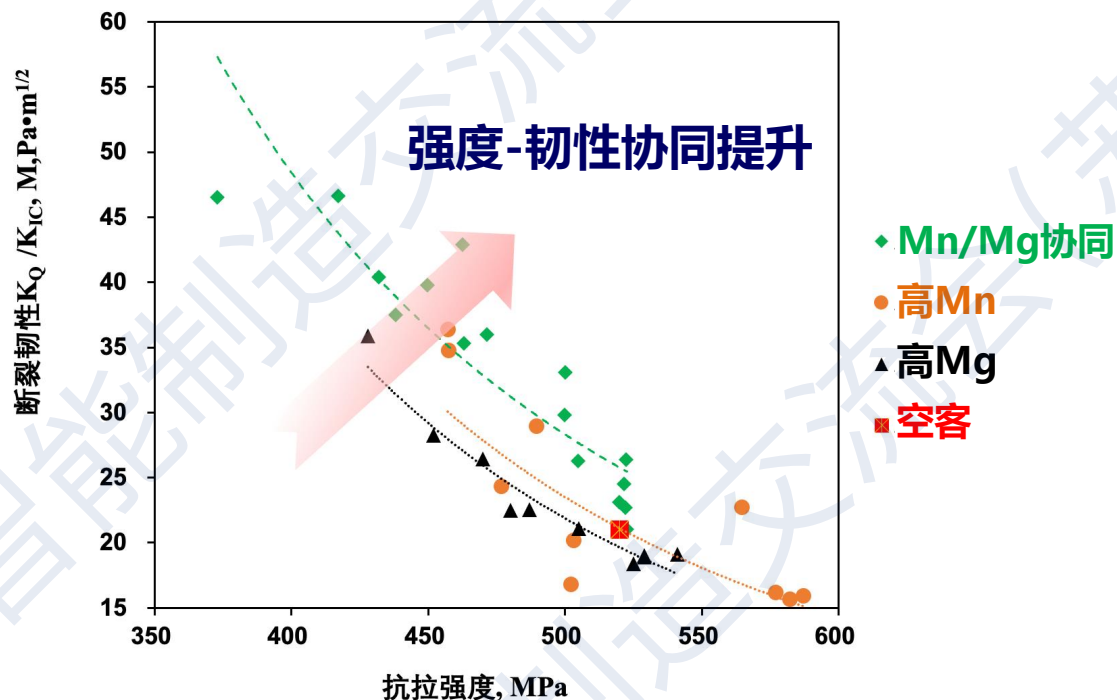
合金成分优化迭代-强韧协同提升内在机制

- 26 -

激光增材制造稀土改性铝合金合金成分与强韧性关联



批量测试迭代及稳定性验证



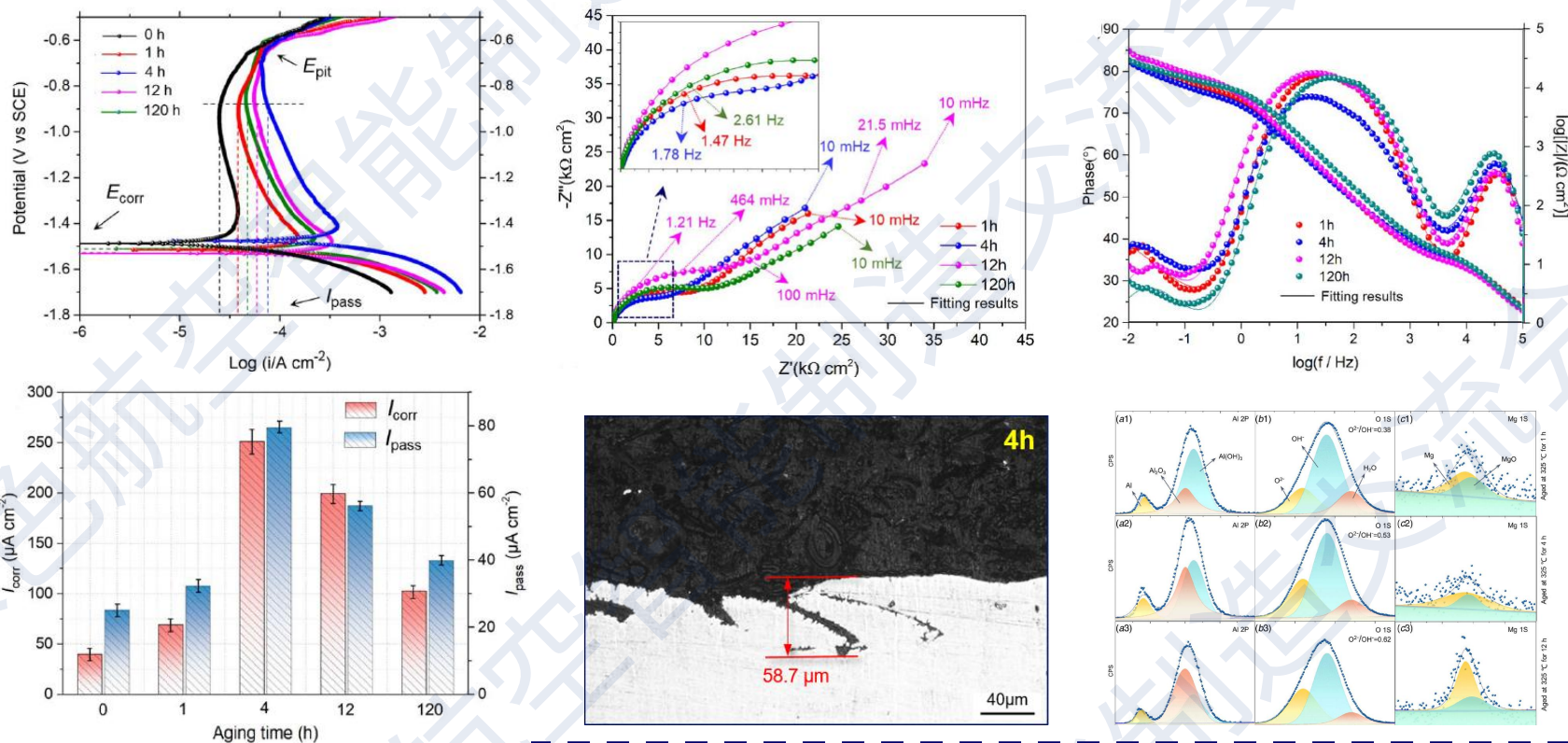
Mn/Mg协同高强韧铝合金强度-韧性迭代曲线

- ✓ 降低Mg含量减少冶金缺陷、提升裂纹尖端塑性变形能力，抑制 Mg_2Si 相的产生
- ✓ 利用Mg和Mn含量调控层错能、平衡局部应变化效应和塑性变形能力

耐蚀性评价及性能优化-耐蚀性优化

- 27 -

■ 针对耐蚀性能的时效工艺优化（时效时间）



➤ 试验时效时间1-120h, 4h下获得最大腐蚀深度 58.7μm, 耐蚀性最差

➤ 适当延长时效时间, 析出物粗化阻断耐蚀通路, 提升构件耐蚀性

➡ 经优化后, 力学性能下降 < 5%前提下, 耐蚀性能提升40%, 较传统成形同类合金耐蚀性提升20%, 较激光增材制造Al-Si耐蚀性提升25%

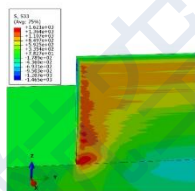
3、技术攻关方向④：复杂构件造得好

- 28 -

□复杂整体构件内应力调控及一体化成形技术

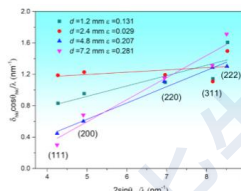
复杂铝合金构件内应力及成形精度工艺控制方法

构建复杂构件热力耦合数值模型



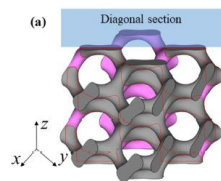
数值仿真

工艺参数对构件变形影响机制



过程控制

支撑结构及排布设计对变形影响



工业检测

仿生结构高性能复杂构件激光增材一体化成形



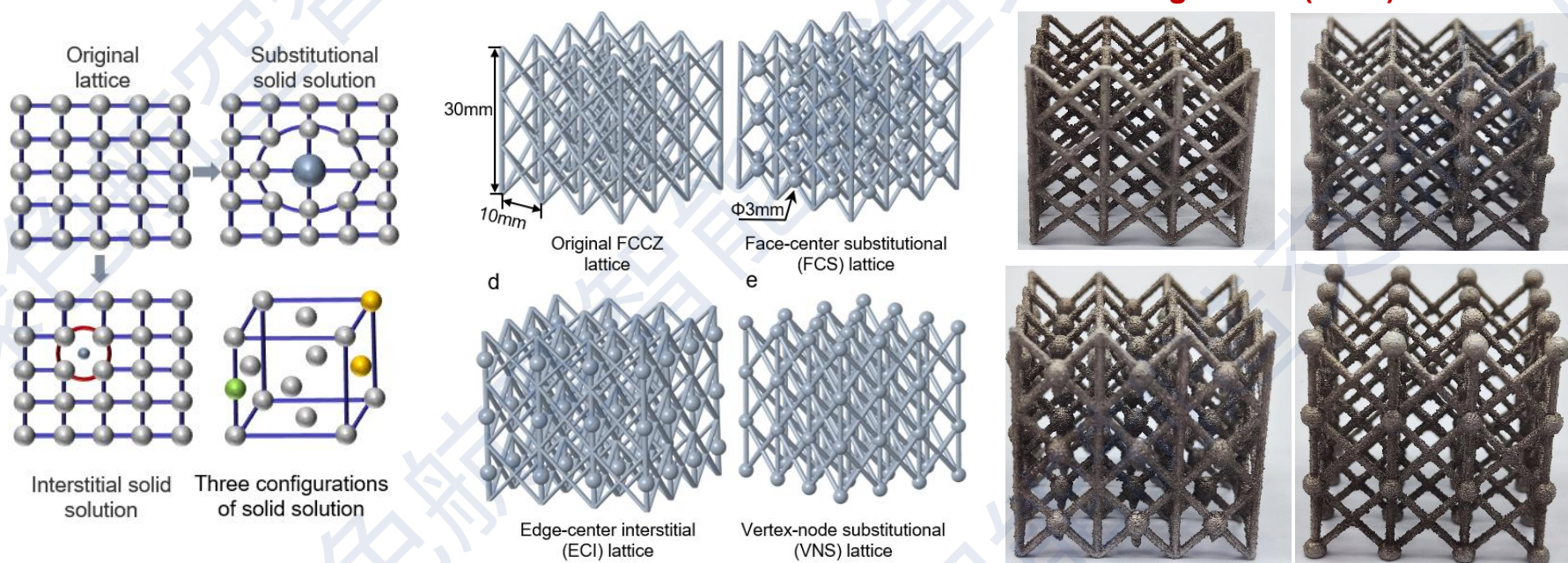
轻质高强耐蚀铝合金复杂构件增材制造材料-结构-性能一体化

➤ 晶体学仿生混杂结构增材制造

□ 高强铝合金晶体学仿生混杂结构设计

受**晶体学固溶强化机制**启发，通过模拟**异类溶质原子**对**基体晶格**产生的**点阵畸变**，基于**置换固溶体**和**间隙固溶体**的三种不同固溶体形式，分别将**球形节点**引入杆状点阵结构中的**面心**、**棱心**和**顶点**位置，设计了三种**混杂点阵结构**。

Mat. Sci. Eng. A 858 (2022) 144048



固溶强化机制

混杂点阵结构

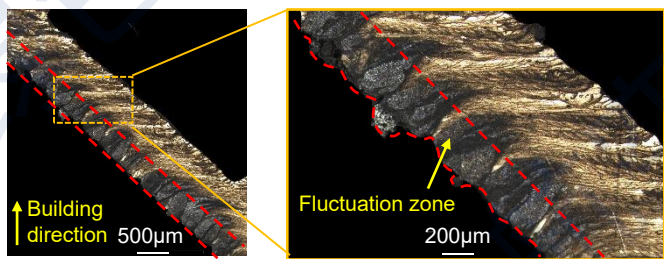
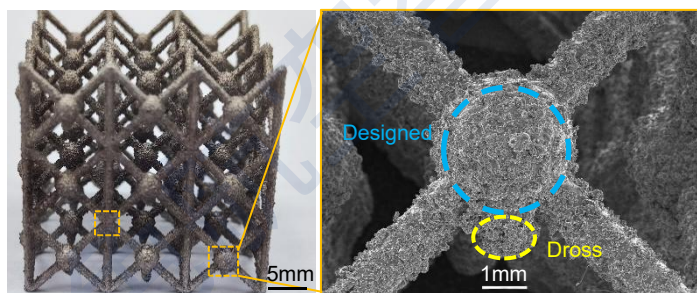
LPBF成形实物

建立了微观置换固溶体和间隙固溶体结构与宏观混杂点阵结构的联系

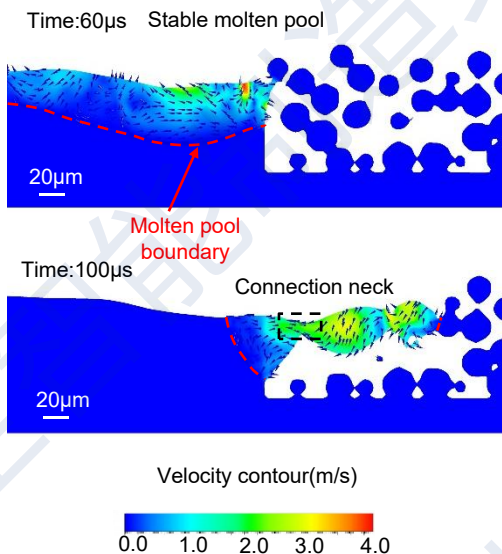
➤ 晶体学仿生混杂结构增材制造

□ 高强铝合金晶体学仿生混杂结构成形性分析

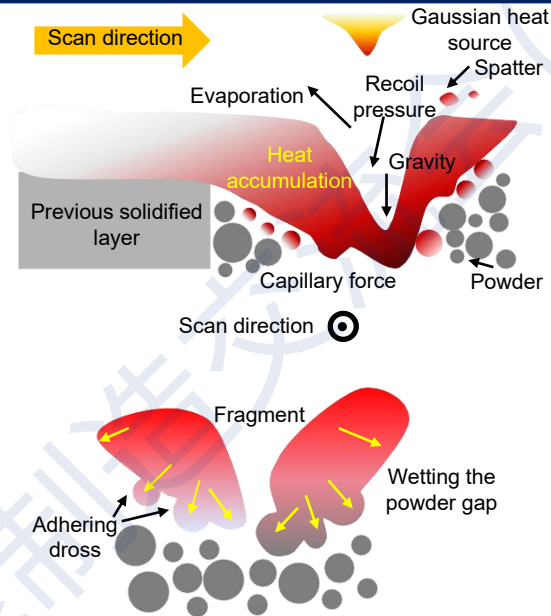
点阵结构的尺寸精度和微观组织表现出位置敏感性，并与支撑条件有关。在粉末导热率低、重力和毛细力的影响下，悬垂下表面产生了严重的热积累，在Marangoni流和反冲压力的驱动下，熔池进一步紊乱。



悬垂结构缺陷及组织



悬浮状态下熔池速度场



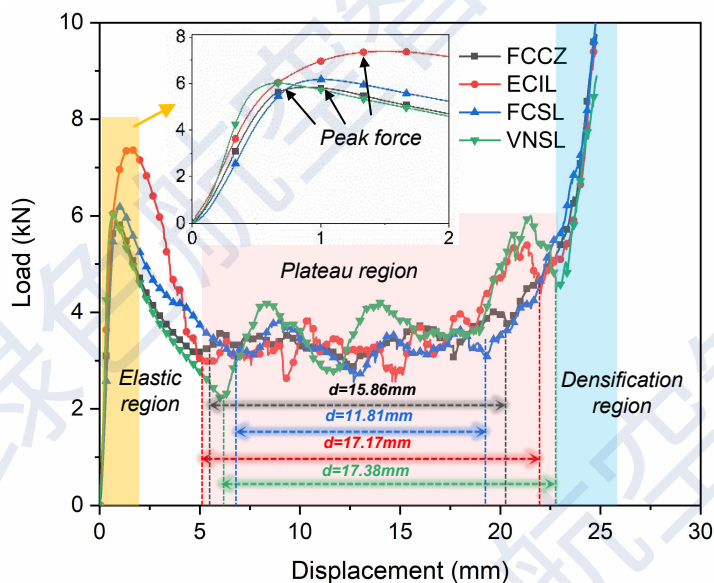
挂渣形成机制

建立了悬垂结构的有限元模型，揭示了悬垂条件下的熔池动力学行为及下表面挂渣缺陷的形成机制

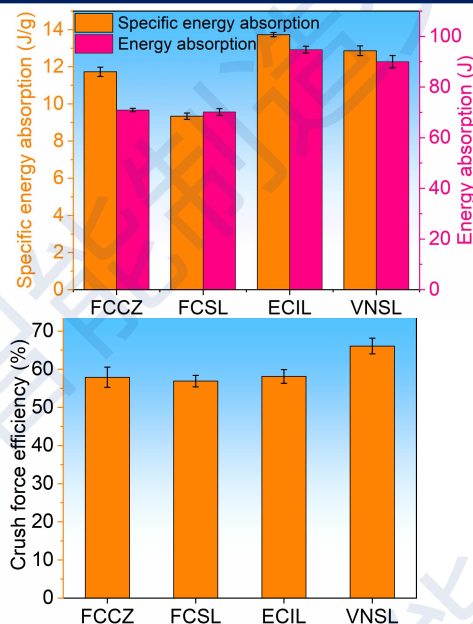
晶体学仿生混杂结构增材制造

高强铝合金晶体学仿生混杂结构力学性能

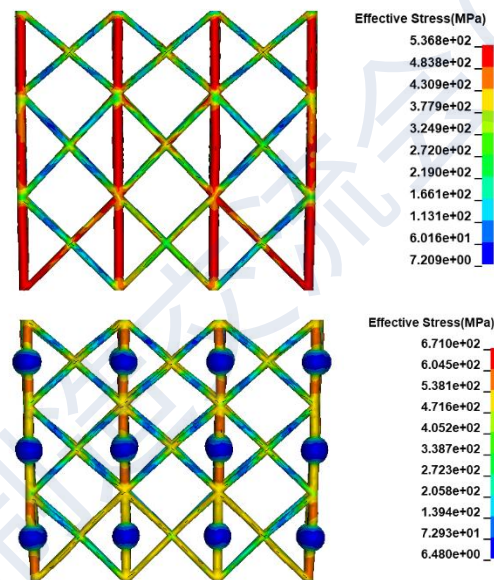
球形节点增强了竖直杆的刚度，进一步分散应力，棱心间隙混杂结构具有优异的抗压强度和能量吸收性能，比能量吸收（SEA）最高（13.7J/g），与初始结构相比提高了17%，置换点阵性能优于间隙点阵。



压缩应力应变曲线



能量吸收性能



应力云图

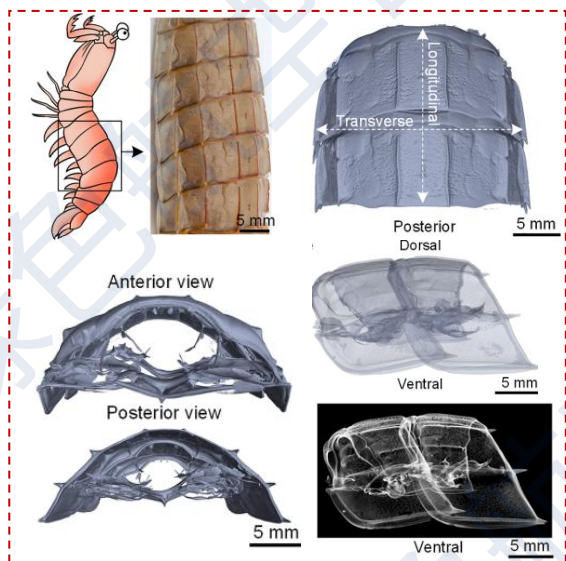
实现了微观尺度的强化机制与宏观点阵强化效果的有机统一，揭示了晶体材料固有强化机制可指导混杂点阵结构的设计

仿螳螂虾腹节螺旋结构增材制造

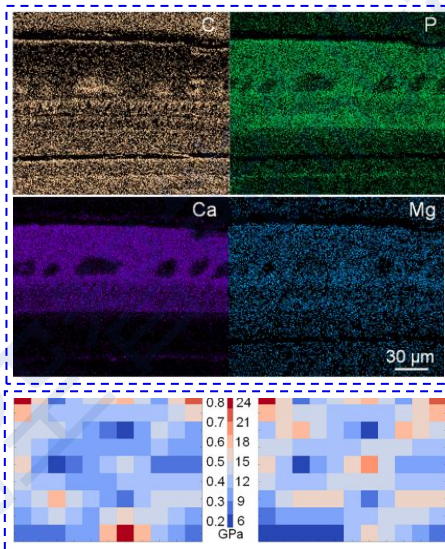
螳螂虾腹节结构特征解析

Int. J. Mech. Sci. 231 (2022) 107573

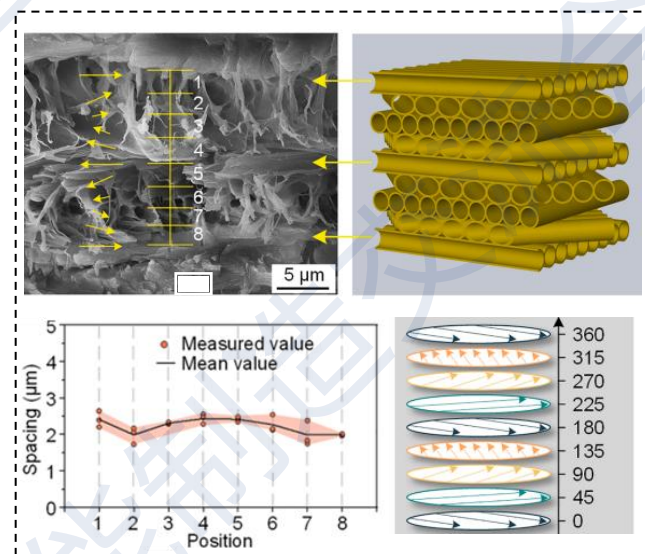
受螳螂虾腹节螺旋多孔纤维排布微观结构特征启发，建立了螳螂虾腹节微观结构、纤维排布方式、力学性能之间的关系，发现由于腹节外角质层 CaCO_3 和 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的富集，其强度和韧性较高，纳米硬度可达0.2-0.8GPa，弹性模量可达6-24GPa



宏观形貌分析



纳米力学性能



微观结构解析

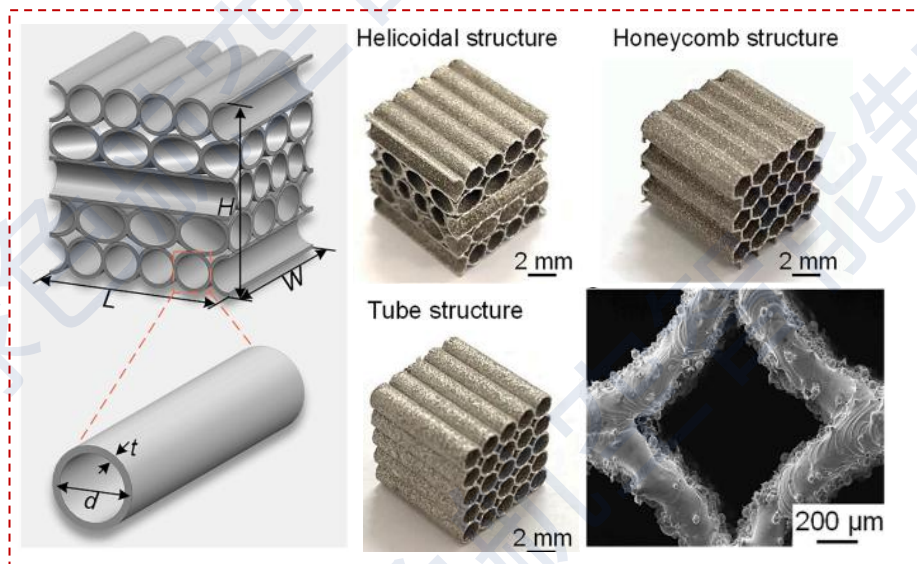
螳螂虾腹节螺旋结构兼具柔性弯曲特性和自身防护性能，
可有效耗散冲击能量、抑制裂纹扩展

仿蝗螂虾腹节螺旋结构增材制造

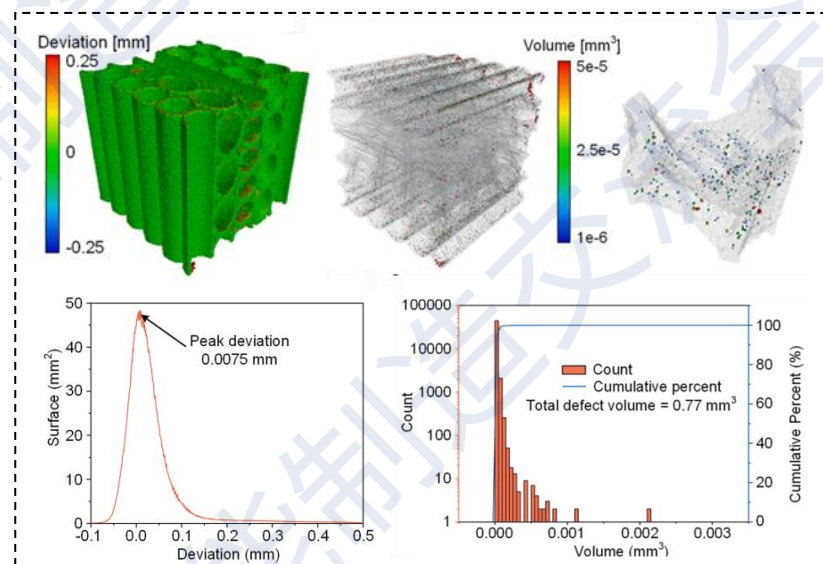
仿蝗螂虾腹节螺旋结构设计及LPBF成形

Int. J. Mech. Sci. 231 (2022) 107573

LPBF成形的仿蝗螂虾螺旋结构**内部缺陷**体积范围为 1×10^{-6} 至 $5 \times 10^{-5} \text{mm}^3$ ，**主要分布于螺旋结构上下两层**，尤以边缘居多；表面积最大偏差为 $7.5 \mu\text{m}$ ，内部缺陷体积为 0.77mm^3 ，**致密度可达99.78%**。



LPBF成形仿生结构



尺寸精度及孔隙率

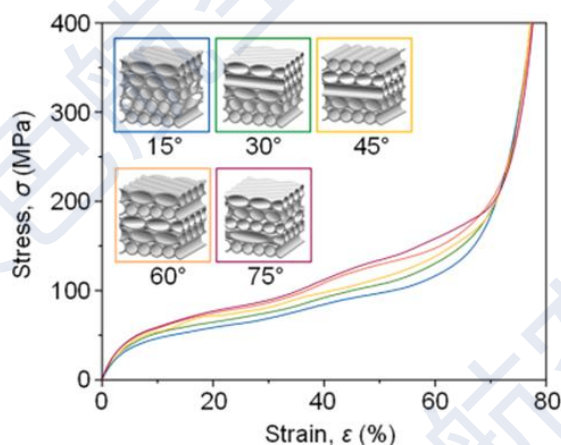
实现了仿蝗螂虾腹节螺旋结构高成形精度与高致密度LPBF成形

仿蝗螂虾腹节螺旋结构增材制造

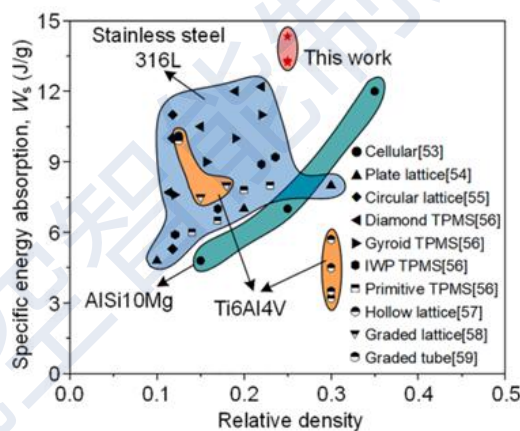
仿蝗螂虾腹节螺旋结构力学性能及变形机制

Int. J. Mech. Sci. 231 (2022) 107573

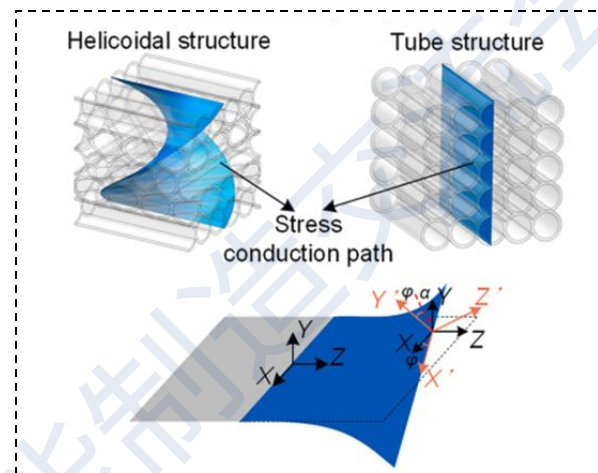
相较于管结构平面应力传导路径，螺旋结构具有独特的扭转应力传导路径，应力分布更加均匀，有助于提高能量吸收性能；扭转角为 45° 、层数为3的螺旋结构力学性能最佳，比吸能 14.3J/g ，平台应力 68.4MPa ，能量吸收效率可达 83.4%



应力-应变曲线



比能量吸收对比



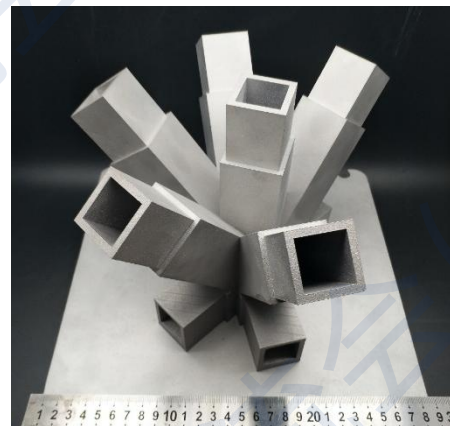
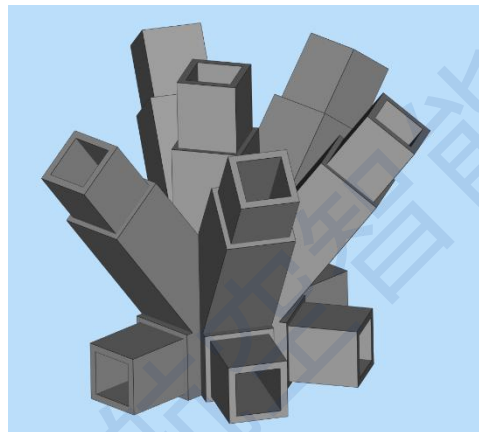
应力传递机制

揭示了扭转应力传导路径对仿蝗螂虾螺旋结构的应力传导与变形机理

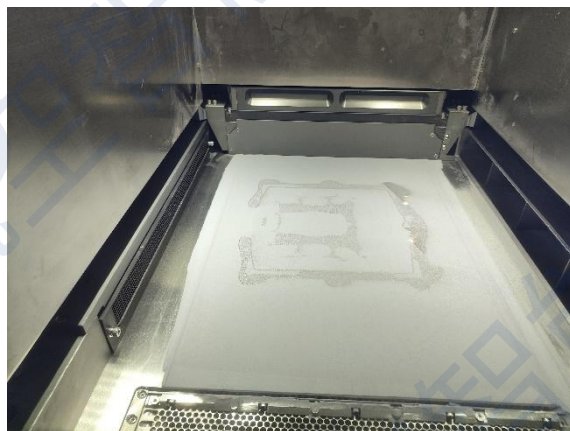
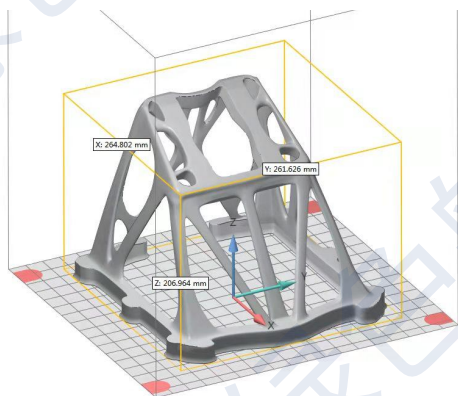
➤ 激光增材制造典型构件

- 35 -

■ 激光增材制造整体集成构件



相控雷达十一孔接头



点阵填充卫星支架

4、总结及展望

- 36 -

**材料
创新**

**稀土改性高强
耐腐蚀铝合金**

**性能
突破**

**比强度耐蚀性
接近钛的水平**

**工艺
进步**

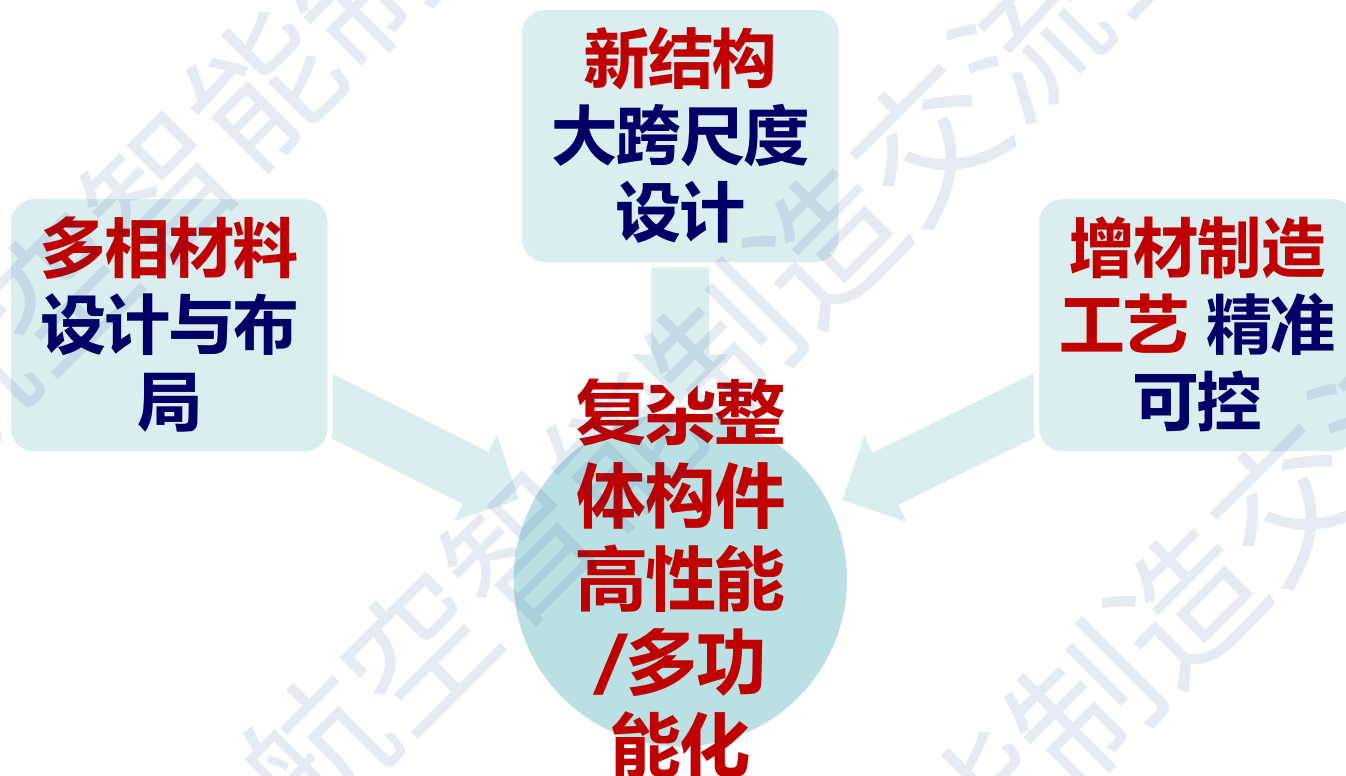
**高性能复杂构件
激光一体化制造**

**为航空高性能铝合金绿色制造
提供新材料、新工艺、新技术**

4、总结及展望

- 37 -

□ 未来增材制造技术创新要素



为复杂整体构件高性能/多功能化提供新思路
其中蕴含结构、材料、工艺等方面新挑战



**NANJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS**



南航增材制造团队与您携手共进!