

铝合金点阵激光选区熔化成形及其准静态与动态压缩性能研究

张康^{1, 2}, 史子木², 王幸福³

1. 中国科学技术大学 安徽合肥 230026

2. 中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所 安徽合肥 230031

3. 东莞理工学院交叉科学研究中心 广东东莞 523808

摘要: 研究探索了铝合金点阵材料的激光选区熔化 (SLM) 制备工艺, 通过调整激光功率和扫描速率, 成功制备出BCC型AlSi10Mg点阵结构, 并系统考察了SLM工艺参数、热处理对铝合金点阵结构准静态与动态压缩性能的影响。试验结果表明: SLM技术制备的AlSi10Mg合金点阵结构具有良好的成形性, 其压缩性能随激光功率增加而显著提升, 且展现出明显的应变率强化效应。树脂填充进一步增强了铝合金点阵结构的抗冲击性能, 并降低了基于组织缺陷的应变率敏感性, 为该结构在缓冲防护、抗冲击及轻量化防爆装置等工程领域应用提供了支持。

关键词: 激光选区熔化; AlSi10Mg合金; 点阵结构; 动态压缩性能

Quasi-static and dynamic compression properties of selective laser melted AlSi10Mg aluminum alloy lattice materials

ZHANG Kang^{1, 2}, SHI Zimu², WANG Xingfu³

1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

2. ChinaKey Laboratory of Materials Physics, Solid-state Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

3. Research Institute of Interdisciplinary Sciences (RISE) and School of Materials Science & Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China

Abstract: The preparation technology of aluminum alloy lattice materials using Selective Laser Melting (SLM) was explored in the study. By adjusting the laser power and scanning rate, the BCC-type AlSi10Mg lattice structure was successfully fabricated. The effects of SLM process parameters and heat treatment on the static and dynamic compressive properties of aluminum alloy lattice structures were systematically investigated. The experimental results indicated that the AlSi10Mg lattice structure prepared by SLM technology exhibited good formability. Its compressive properties were significantly enhanced with an increase in laser power and demonstrated a notable strain rate strengthening effect. The incorporation of resin filling further augmented the impact resistance of the aluminum

基金项目: 安徽省重点研发计划协同创新专项 (NO. 2021001); 安徽省重大基础性研究项目 (No. 2023z04020015)。

第一作者: 张康, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金增材制造, E-mail: m2165683217@163.com。

通信作者: 史子木, 博士, 研究员, 主要从事轻质金属材料的研究, E-mail: shizimu@issp.ac.cn。

alloy lattice structure and reduced the strain rate sensitivity associated with structural defects. This provides support for the application of this structure in engineering fields such as cushioning protection, impact resistance, and lightweight explosion-proof devices.

Keywords: selective laser melting; AlSi10Mg alloy; lattice structure; dynamic compression performance

1 序言

铝合金点阵材料是一种新型轻质空间网架类有序多孔材料, 该材料具有突出的比强度、比刚度和单位质量吸能性等物理特性, 是目前国际上公认的最有应用前景的超强韧轻质结构功能一体化材料^[1-3]。点阵结构的传统制造方法主要包括熔模铸造、冲压成形和挤压切割等^[4-6], 但这些方法存在产品精度差、后处理工艺繁琐及材料利用率低等缺点。新近发展的激光选区熔化 (SLM) 技术可以有效解决上述问题, 同时可实现传统技术难以成形的复杂点阵结构的加工与制造^[7-9]。如空客公司采用SLM技术制造了点阵结构机舱隔板, 与蜂窝结构相比, 隔板减重45%。目前, SLM点阵结构已初步应用于航空航天工业中的缓冲和散热领域。与不锈钢等其他材料相比, 铝合金表面对激光反射率较高, 导致其点阵结构成形能力偏低。

DADBAKHSH等^[10]筛选了多种适用于SLM成形的铝合金粉末, 研究发现, AlSi10Mg合金因其较低的导热性和氧化层的易分解性, 展现出优异的成形质量和较高的致密度。SOLTANI等^[11, 12]研究进一步揭示, 在SLM成形过程中, AlSi10Mg合金中的Si元素能有效降低热裂纹的形成, 并与Mg元素反应生成Mg₂Si相, 从而产生时效强化的效果。点阵结构因其固有的多孔桁架结构限制, 成形过程受热传导、凝固, 以及是否支撑等因素影响, 其加工工艺与SLM块体铝合金有所区别。LEARY等^[13]成功制造了不同单元类型的AlSi12Mg合金点阵结构, 但观察到点阵支杆表面存在明显的粘粉现象。同时, 他们还发现, 由于圆角半径较小, 对角支杆交叉处出现了应力集中现象。PIRINU等^[14]对AlSi10Mg合金点阵结构中不同取向的支杆进行了细致研究, 测试结果显示, 与对角和垂直支杆相比, 水平支杆存在更多的几何缺陷。SING等^[15]采用回归和方差分析法, 系统研究了SLM工艺参数对点阵结构尺寸精度和力学性能的影响, 结果表明, 激光功率相较于扫描速率

和层厚, 对点阵结构的尺寸精度和力学性能具有更大的影响。AL-KETAN等^[16]则探究了不同类型周期性晶格结构的压缩性能, 发现相较于弯曲主导型结构, 具有拉伸主导行为的点阵晶格结构展现出更高的刚度和屈服强度。

上述研究表明, AlSi10Mg块体材料SLM制备技术虽然已相对成熟, 但结构完整且具有良好力学性能的铝合金点阵制备仍需深入研究。目前, 一些研究已经开始聚焦于铝合金点阵成形结构的表面质量和准静态压缩性能^[17-20], 但对于SLM铝合金点阵结构压缩变形失效模式, 以及点阵结构抗冲击性能的研究仍相对较少。因此, 本文首先探究了不同激光功率和扫描速率下SLM AlSi10Mg合金点阵结构准静态压缩变形行为, 并探讨了侧面支撑板约束对铝合金点阵抗压性能的影响。通过准静态压缩及点阵结构失效分析, 确定了最佳的SLM工艺参数。随后, 针对优化铝合金点阵试样进行了动态冲击测试, 分析了不同应变率对点阵结构冲击性能的影响。本研究将为点阵结构在缓冲、抗冲击等领域的应用提供理论基础与技术支持。

2 试验

2.1 试验材料与方法

选取雾化AlSi10Mg粉末作为原材料, 粉末粒径控制在15~53μm。AlSi10Mg粉末球形度较高, 仅极少数粉末呈不规则形状, 如图1所示。其化学成分见表1。SLM铝合金点阵样品采用华曙高科

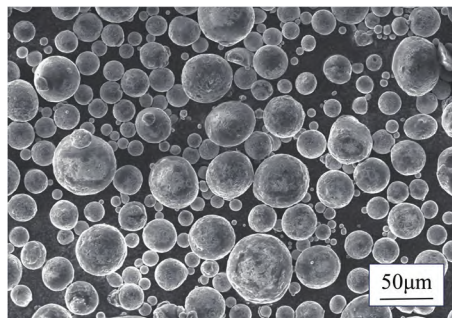


图1 AlSi10Mg粉末的SEM照片

mFormics273型金属激光熔融增材制造设备打印，全程在氮气气氛（纯度高达99.999%）下制备，激光束直径为90 μm ，邻层之间旋转67°，激光功率设定在250~450W，扫描速率为900~1700mm/s，扫描间距为0.1mm，层厚0.03mm。试验设计了25组SLM工艺参数进行工艺优化，具体见表2。在制备铝合金点阵结构之前，对基板进行了喷砂和粗化处理，并将基板的初始温度设定为100℃。

表1 AlSi10Mg粉末的化学成分（质量分数）（%）

Mg	Zn	Cu	Fe	Si	Ni	Sc	Cr	Al
0.47	0.03	0.02	0.18	9.6	0.03	0.21	0.01	余量

表2 SLM工艺参数

激光功率/W	250	300	350	400	450
扫描速率 / (mm/s)	900	900	900	900	900
	1100	1100	1100	1100	1100
	1300	1300	1300	1300	1300
	1500	1500	1500	1500	1500
	1700	1700	1700	1700	1700

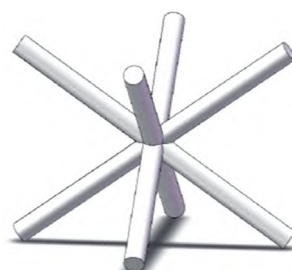
2.2 点阵结构设计制备

点阵结构的设计构型为BCC型，其杆单元对称分布，特别适合SLM工艺。另外，BCC点阵属于拉伸主导型结构，具有较高的平台应力和优异的能量吸收能力，非常适合用作抗冲击结构。

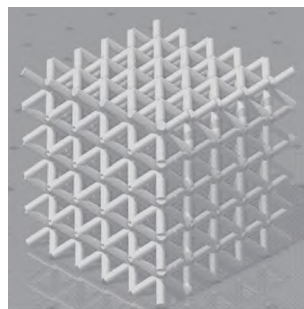
BCC单胞如图2a所示。其单胞构型主要设计参数包括：杆单元直径、杆长、杆单元与投影面夹角、杆截面形状、点阵层数和每层单胞个数。本研究，杆单元直径为1.2mm、杆长为8.66mm，杆单元与投影面夹角为45°，点阵层数为5层，每层单胞数为“5×5”。为进一步增强该结构的强度，还在“5×5×5”BCC点阵结构的两侧添加了厚度为2.5mm的支撑板。点阵结构的整体形态如图2b、c所示。最终，SLM样品在280℃下进行了2h的热处理，以减少SLM制备过程中产生的残余应力。

2.3 表征与测试

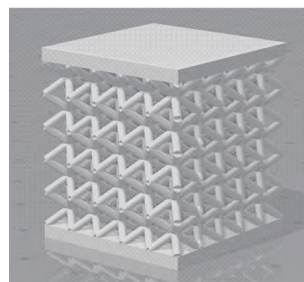
铝合金点阵样品相继采用丙酮、酒精超声波清洗3min以上，以去除残留的松散粉末或污染物；使用光学显微镜（OM，Zeiss）观察点阵结构支杆的表面成形质量；采用场发射扫描电子显微镜（SEM，日立SU8020）观察合金粉末的形态、点阵结构的表面成形质量及压缩试样的断口形貌；参照GB/T 7314—2005《金属材料 室温压缩试验方



a) BCC单胞



b) “5×5×5”点阵结构



c) 带支撑板的点阵结构

图2 BCC点阵结构

法》，采用Instron 3369材料测试系统对打印态和热处理态点阵样品进行单轴压缩试验，压缩速率设置为2mm/min，每件样品在试验前用砂纸轻微打磨，以消除边缘处摩擦造成的影响；为了评估点阵结构的抗冲击性能，采用分离式霍普金森压杆（SHPB）进行不同应变率（150/s、300/s、450/s）下的冲击试验，试验样品采用两侧带支撑板的点阵结构。另外，还制备了树脂填充型点阵复合材料，并研究了复合材料的抗冲击和能量吸收性能。

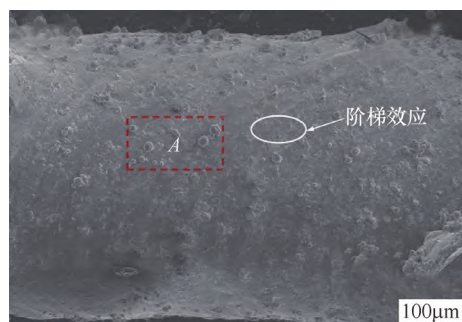
3 结果与讨论

3.1 点阵结构成形质量及表面形貌分析

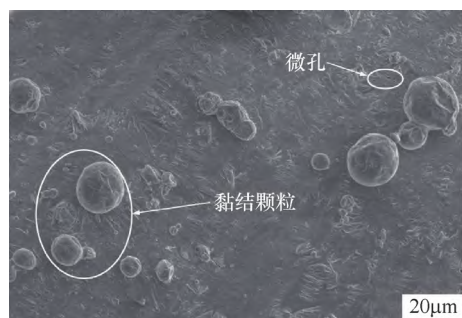
本研究通过SLM技术成形了BCC点阵结构，在不同SLM工艺条件下，点阵结构在建造过程中均无坍塌、翘边等现象，整体质量良好。经对比，SLM成形样品尺寸略大于设计模型尺寸，导致这种现象主要有3种原因：一是未熔化或部分熔化的粉末颗粒粘在了支撑结构（支杆）的表面，增加了样品的整

体尺寸；二是激光熔化粉末时形成的熔池，会对最终样品的尺寸产生影响；三是阶梯效应，由于逐层熔化沉积模式，层片之间不可避免会产生阶梯状连接，所以导致最终成形的样品尺寸略有偏差。尽管SLM成形中存在尺寸上的细微差异，但并不影响点阵结构抗压性能^[21, 22]。

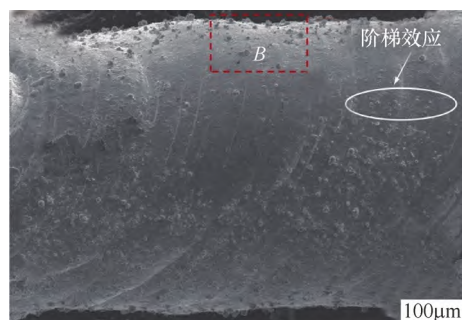
图3所示为AlSi10Mg合金点阵结构支杆表面形貌。从图3可观察到，逐层增材制造倾斜支柱时阶梯



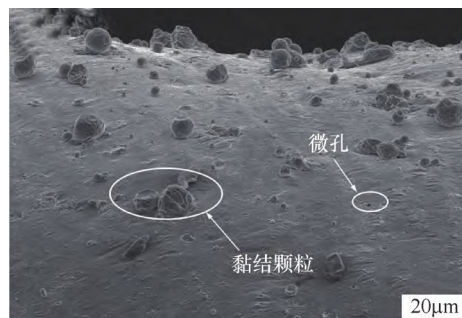
a) SLM试样



b) A部放大



c) 热处理试样



d) B部放大

图3 $P=400\text{W}$ 、 $v=1500\text{mm/s}$ 时支杆表面的SEM照片

效应导致的波纹状台阶，这在一定程度上影响了结构的尺寸精度。对比热处理前后铝合金点阵支杆的SEM照片，试样表面均存在较多的未熔化或部分熔化的粉末颗粒，以及少量的微孔缺陷。热处理不能去除球形黏结粉末。

3.2 准静态压缩力学性能

(1) SLM点阵结构压缩性能 图4、图5所示分别为激光功率(P) 250~450W下不同扫描速率(v) SLM点阵结构压缩应力-应变曲线和变形模式。从图4可看出，不同激光功率与扫描速率组合所得点阵结构在压缩过程中都经历了4个重要阶段。

1) 在应变达到约5%之前，点阵结构处于弹性变形阶段，此时压缩应力和应变遵循线性关系增加，卸载后，晶格结构可以恢复到原来的状态。

2) 压缩持续进行时，曲线开始缓慢偏离直线且增长趋势变缓，压缩进入屈服阶段。这一阶段的主要特征表现为：随着应变的逐渐增大，应力值呈非线性增长然后保持在一定水平，且增长缓慢。应变接近7%时，应力达到最大值，出现极短的屈服平台。出现这一现象的原因是随着应变量的逐步增加，局部结构承载的力达到屈服强度，发生塑性弯曲变形。随后压缩应力快速降低，几乎降到0。结合图5中应变为10%时的变形模式可知，导致应力快速下降的原因是点阵结构沿45°方向发生了剪切断裂。

3) 点阵结构发生剪切断裂后，压缩进入第三阶段，即应力波动阶段。在此阶段，随着应变的增加，应力反复波动，但峰值应力几乎达不到初始峰值应力水平。多个尖峰的出现是由于支撑杆的屈曲断裂和对角破坏带的形成导致应力急剧下降，这种失效模式为拉伸主导的模式，此模式下结构的抗压性能不稳定。点阵结构在这一阶段开始发生断裂和脱落，其完整性逐渐被破坏。

4) 最后，进入致密化阶段，这一阶段随着应变的增加，应力会随之不断增大，直至点阵结构被压实为止。

图6所示为在 900~1700mm/s扫描速率下不同激光功率SLM点阵试样压缩应力-应变曲线。

对比图4和图6可以发现，激光功率对点阵结构压缩初始峰值应力的影响较大，而扫描速率的影响较小。在相同扫描速率下，初始峰值应力(σ)

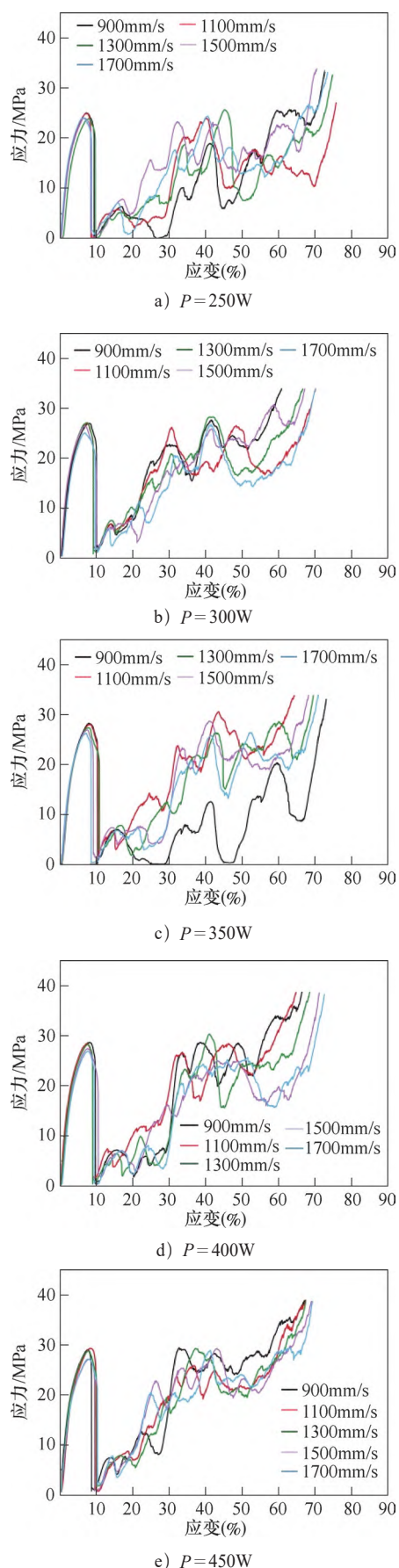


图4 不同扫描速率条件下SLM点阵试样压缩应力-应变曲线

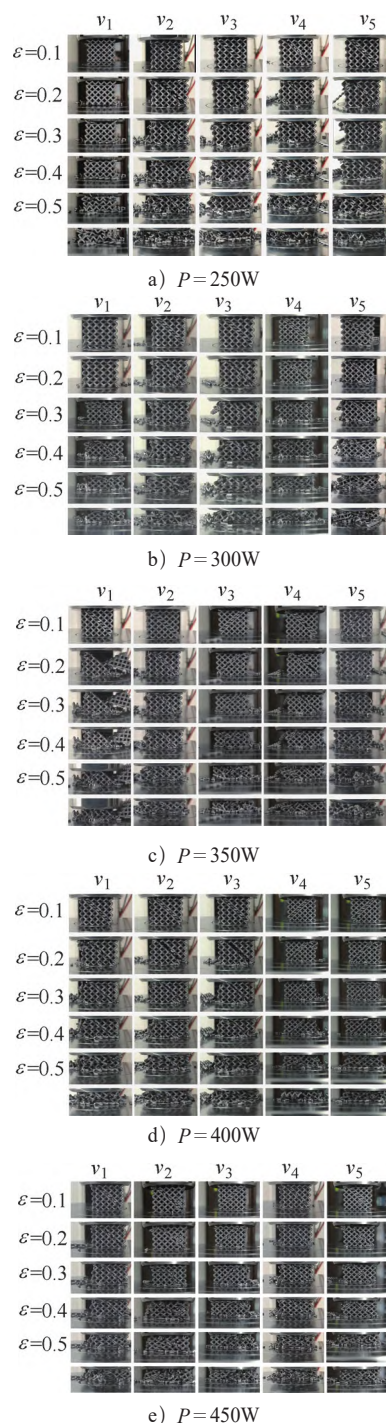


图5 点阵试样压缩变形模式 ($v_1 \sim v_5$: 900~1700mm/s)

随激光功率的增加而增大，但激光功率从400W增加到450W时，初始峰值应力的增量很小，且在 $v = 1500\text{mm/s}$ 时，其值反而减小。这是因为在低激光功率下，粉末熔化不完全或熔体的流动时间较短而来不及填充间隙，从而导致成形试样内部存在较多的微观缺陷。而激光功率过高时，会导致熔融材料从熔池中大量飞溅和气体逸出受阻，冷却凝固速度大于熔体流动速度，导致铝合金凝固收缩后材料未能

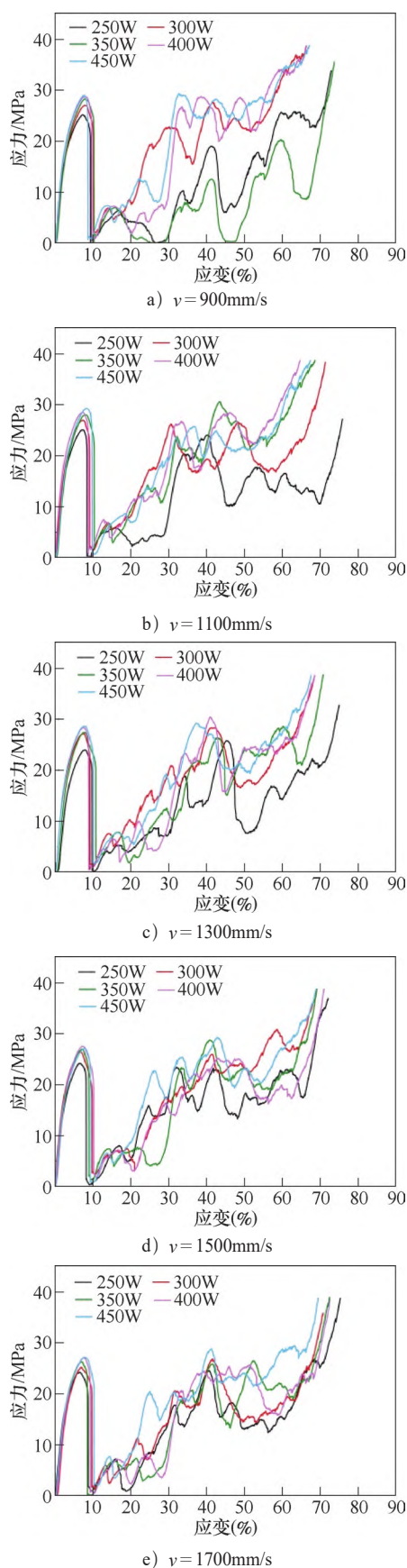


图6 不同激光功率SLM点阵试样压缩应力-应变曲线

填满整个熔池，从而留下孔洞和热裂纹缺陷，进而导致SLM点阵试样力学性能下降。

(2) 热处理态点阵结构压缩性能 图7、图8所示分别为热处理后点阵结构的压缩应力-应变曲线和变形模式。对比图4可知，热处理SLM点阵结构的压缩应力平台更宽，这表明热处理能够改善结构的脆断缺陷，有助于提升点阵结构的抗压和缓冲性能。当激光功率达到400W和450W时，压缩应力在达到初始峰值应力后，不再出现快速降低至几乎为0的情况，而是出现小范围的波动或保持平稳状态。

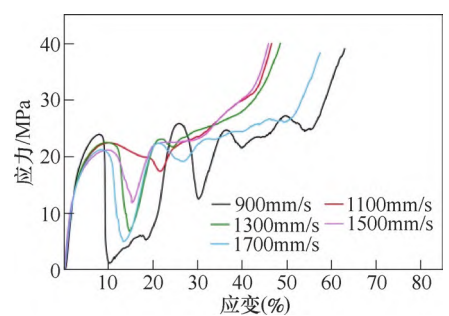
由图8可知，当 $P=400\text{W}$ 时，点阵试样未出现沿 45° 方向的剪切断裂，而是沿压缩方向发生逐层溃缩，直至完全致密化。压缩过程中支杆不发生断裂和脱落，因此很好地保持了点阵结构的完整性。在逐层溃缩的过程中，点阵支杆的结点处形成了塑性铰，这些部位承载了最大应力。在压缩平台阶段，支杆绕结点旋转和断裂，其应力-应变曲线较为平坦，表现为弯曲主导的变形模式，即随着应变的增加，应力缓慢增大或基本保持稳定。由此可见，热处理态SLM点阵结构的抗压稳定更强，这有助于提升点阵结构的吸能特性，拓宽其适用范围。

(3) 支撑板约束的点阵结构压缩性能 为进一步提高点阵结构的强度，设计了两侧带有2.5mm厚的支撑板约束点阵铝合金试样。考虑到上述研究不同SLM工艺参数条件下铝合金点阵结构性能及其形成效率，确定扫描速率为1500mm/s，采用不同激光功率来制备支撑板约束点阵试样，并进行了热处理。其压缩应力-应变曲线和变形模式分别如图9、图10所示。

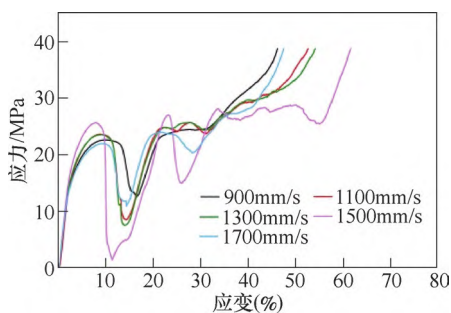
结果表明，随着两侧支撑板的引入，点阵结构的压缩初始峰值应力值得以大幅提升，但应力-应变曲线仍保留了无侧板点阵结构的压缩特性。当应变达到23%左右时，结构两侧的支撑板发生胀裂，压缩应力下降到对应的无支撑板点阵结构的压缩初始峰值应力水平，即此时支撑板已经失效，后续变形模式即为无侧板约束型点阵结构力学特性。

3.3 点阵结构动态压缩力学性能

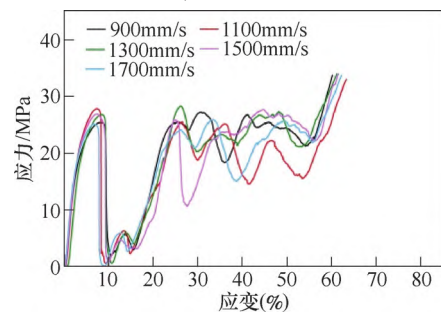
选取 $P=400\text{W}$ 、 $v=1500\text{mm/s}$ SLM工艺参数下获得的铝合金点阵结构，利用分离式霍普金森压杆（SHPB）进行动态冲击性能测试。应变率选择为150/s、300/s和450/s。



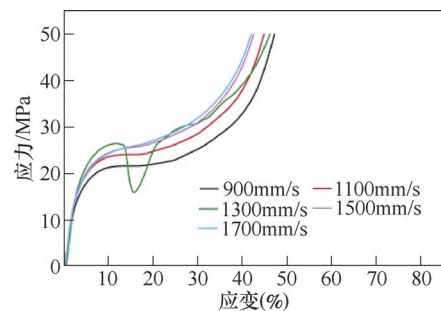
a) $P=250W$



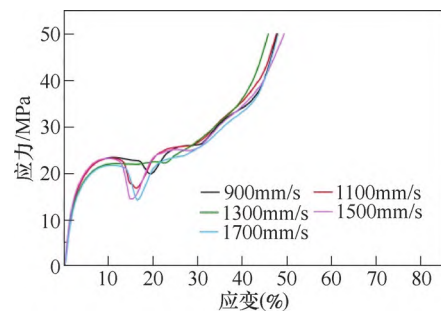
b) $P=300W$



c) $P=350W$

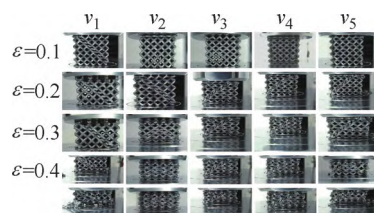


d) $P=400W$

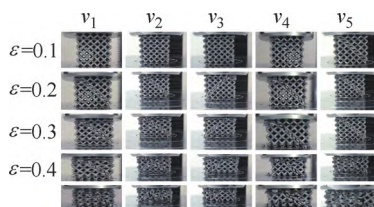


e) $P=450W$

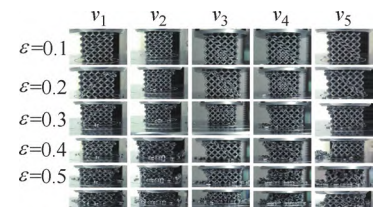
图7 不同扫描速率热处理态点阵试样压缩应力-应变曲线



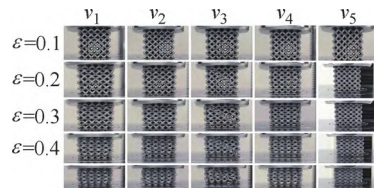
a) $P=250W$



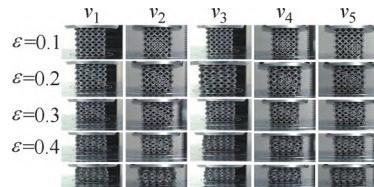
b) $P=300W$



c) $P=350W$



d) $P=400W$



e) $P=450W$

图8 不同扫描速率热处理态点阵试样压缩变形模式
($v_1 \sim v_5$: 900~1700mm/s)

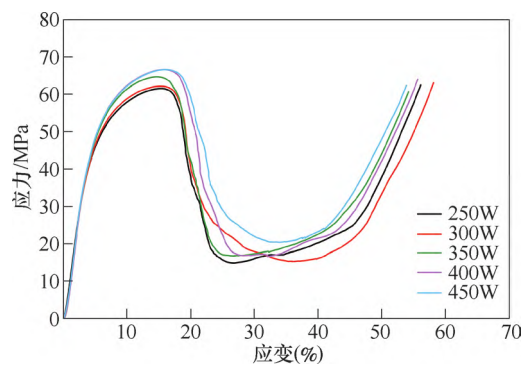


图9 不同激光功率所得点阵试样沿支撑板方向的压缩
应力-应变曲线 ($v=1500mm/s$)

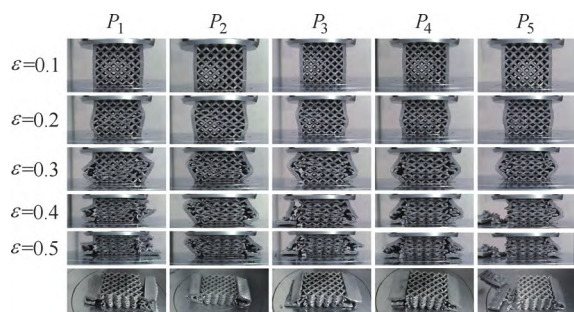


图10 不同激光功率所得试样沿支撑板方向的压缩变形模式 ($P_1 \sim P_5$: 250~450W)

图11所示为不同应变率下的动态压缩应力-应变曲线。冲击过程可分为弹性阶段和塑性破坏阶段。本试验中, 由于应变率限制, 子弹的冲击能量有限, 因此点阵结构动态压缩致密化阶段没有出现。与图7中点阵结构准静态压缩曲线相比, 动态压缩点阵结构 (见图11a) 的弹性阶段变得更短, 在极小的应变条件下应力达到初始峰值。初始峰值后的应力-应变曲线呈现出锯齿状波动, 这是由于材料内部的缺陷造成的。随着应变率增大, 压缩曲线的波动更加明显, 即材料内部缺陷对应变率的敏感性较高。对比不同应变率下的曲线可知, 初始峰值应力随应变率的增加而增大, 可见点阵结构具有明显的应变率强化效应。

为进一步提高结构的抗冲击能力, 选择密度较

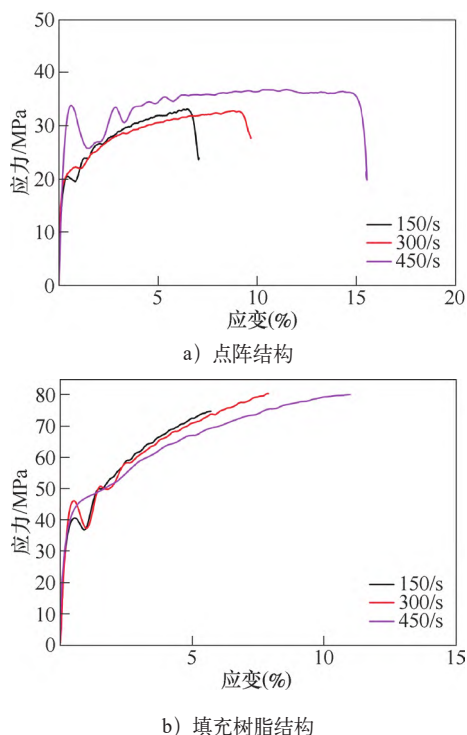


图11 不同应变率下的试样动态压缩应力-应变曲线

小、韧性较好的树脂材料填充点阵的孔隙。图12、图13所示分别为不同应变率下点阵结构和填充树脂结构的脉冲信号。

结合图11与图12、图13可知, 填充树脂后的点阵结构仍保持原结构的压缩特性, 其抗冲击性能得到了显著的提升, 但应变率强化效应降低。对比不同应变率下的脉冲信号可知, 填充树脂后的波形较为相似, 而未填充的点阵结构波形差异较大, 这反映出复合结构对应变率的敏感性降低。图11b中试样动态压缩曲线波动现象减弱, 这表明材料内部缺陷对复合点阵结构压缩性能的影响降低。当应变率为450/s时, 应力未出现峰值, 而是在弹性阶段结束后随应变的增加而增大。由此可知, 填充树脂的复合点阵材料在较高的应变率下应力波动趋缓, 抗冲击性能更加稳定。

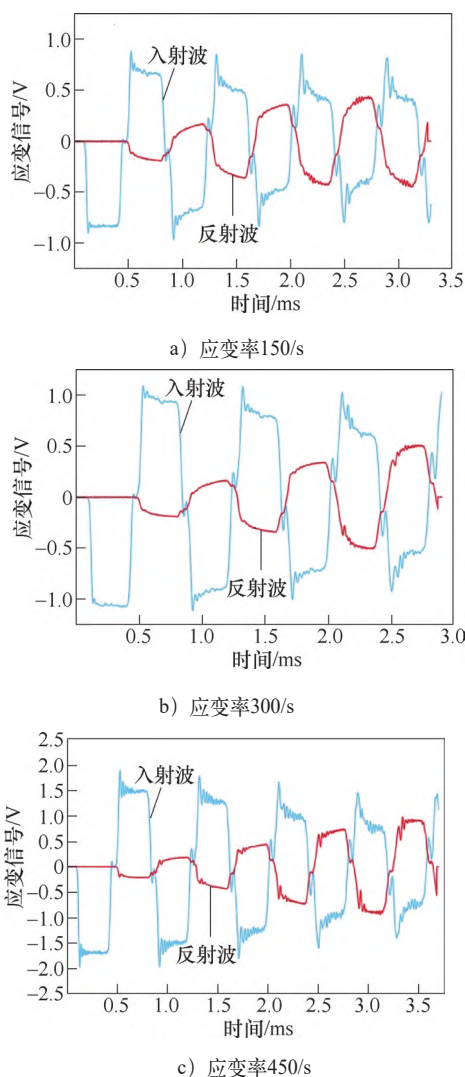


图12 不同应变率下点阵结构的脉冲信号

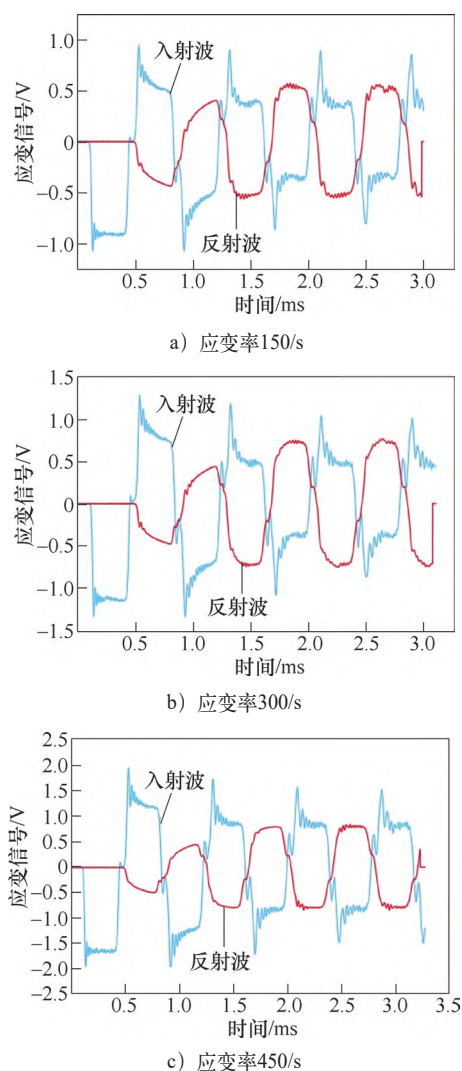


图13 不同应变率下填充树脂结构的脉冲信号

4 结束语

采用SLM技术制备了BCC型AlSi10Mg合金点阵结构,研究了激光功率和扫描速率对点阵结构压缩性能的影响。同时,设计了带支撑板和填充树脂的点阵结构,研究了其在不同应变率下的动态压缩性能,得出以下结论。

1) AlSi10Mg合金点阵结构具有良好的SLM工艺成形性,但支杆表面存在较多的未熔化或部分熔化粉末颗粒,试样表面质量有待提升。

2) AlSi10Mg合金点阵结构的压缩性能随激光功率的增大而明显提升,扫描速率对试样压缩性能的影响较小。试验获得的最佳SLM工艺参数为: $P=400\text{W}$ 、 $v=1500\text{mm/s}$ 。 $280^\circ\text{C}\times 2\text{h}$ 退火处理能够有效消除点阵结构残余应力,改善其韧性,并拓展点阵结构应力平台。通过两侧添加支撑板约束的方

式,可以在显著提升点阵结构抗压强度的同时,仍保持无约束点阵结构的压缩特性。

3) AlSi10Mg合金点阵动态压缩性能表现出显著的应变率强化效应:随应变率增大,点阵结构抗冲击性能提升。材料组织缺陷对应变率敏感性较高,填充树脂材料后,复合点阵结构的抗冲击性能得到了大幅提升,且应变率敏感性降低,表现出更为稳定的抗冲击特性。

参考文献:

- [1] WADLEY H N G. Multifunctional periodic cellular metals[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2006, 364 (1838): 31-68.
- [2] ROSENTHAL I, STERN A, FRAGE N. Strain rate sensitivity and fracture mechanism of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2017, 682: 509-517.
- [3] HOOREWEDER B V, APERS Y, LIETAERT K, et al. Improving the fatigue performance of porous metallic biomaterials produced by selective laser melting[J]. Acta Biomaterialia, 2017, 47: 193-202.
- [4] 赵冰, 李志强, 侯红亮, 等. 金属三维点阵结构制备技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (8): 2189-2200.
- [5] JISHI H Z, UMER R, CANTWELL W J. The fabrication and mechanical properties of novel composite lattice structures[J]. Materials & Design, 2016, 91 (5): 286-293.
- [6] 袁佩, 何沛建, 黄英杰, 等. 点阵铝合金的压缩行为及能量吸收性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (20): 52-56, 61.
- [7] AZIZ N A, ADNAN N, WAHAB D A, et al. Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: Current status and future outlook for remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021 (3): 126401.
- [8] PRAGANA J P M, SAMPAIO R F V, BRAGANCA I M F, et al. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review[J]. Advance in Industrial and Manufacturing Engineering, 2021, 2: 100032.
- [9] 聂云飞, 刘斌, 李忠华, 等. 基于选区激光熔化制

- 备的点阵优化结构形貌和组织分析[J]. 应用激光, 2020, 40 (2) : 205-213.
- [10] DADBAKHS S, HAO L. Effect of Al alloys on selective laser melting behaviour and microstructure of in situ formed particle reinforced composites[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 541: 328-334.
- [11] SOLTANI N, BAHRAMI A, PECH-CANUL M I. The effect of Ti on mechanical properties of extruded in-situ Al-15 pct Mg₂Si composite[J]. Metall Mater Trans A, 2013, 44: 4366-4373.
- [12] SOLTANI N, NODOOSHAN JAFARI H R, BAHRAMI A, et al. Effect of hot extrusion on wear properties of Al-15wt.% Mg₂Si in situ metal matrix composites[J]. Mater Des 2014, 53: 774-781.
- [13] LEARY M, MAZUR M, ELAMBASSERIL J, et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures - ScienceDirect[J]. Materials & Design, 2016, 98: 344-357.
- [14] PIRINU A, PRIMO T, DEL PRETE A, et al. Mechanical behaviour of AlSi10Mg lattice structures manufactured by the selective laser melting (SLM) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124 (5) : 1651-1680.
- [15] SING S L, WIRIA F E, YEONG W. Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 170-180.
- [16] AL-KETAN O, Rowshan R, ABU AL-RUB R K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials[J]. Additive Manufacturing, 2018 (19) : 167-183.
- [17] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, AREMU A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 670: 264-274.
- [18] SERCOMBE T B, LI X, ROBERTS P, et al. Selective laser melting of Zr-based bulk metallic glasses: Processing, microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Processing Report, 2016, 112: 217-226.
- [19] DONG Z, LIU Y, LI W, et al. Orientation dependency for microstructure, geometric accuracy and mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg lattices[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 490-500.
- [20] LI ZH H, NIE Y F, LIU B, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108709.
- [21] BAEL S V, KERCKHOFS G, MOESEN M, et al. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528 (24) : 7423-7431.
- [22] QIU C, YUE S, ADKINS N J E, et al. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 628: 188-197.

MW 20240715