

杆径对激光选区熔化 NiTi 合金点阵结构动态减振特性的影响

霍明政¹, 陈捷¹, 杨琴¹, 向政¹, 戴冬华², 袁上钦³, 黄姝珂¹, 沈显峰^{1*}

¹中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621000;

²南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

³西北工业大学无人系统技术研究院, 陕西 西安 710072

摘要 采用激光选区熔化(SLM)技术制备了具有不同杆径的 NiTi 体心立方(BCC)点阵结构, 分析了其成形质量及相变行为, 通过有限元分析与实验探究了杆径对一阶固有频率以及结构阻尼的影响。结果表明: 杆径对 BCC 结构的一阶固有频率及结构阻尼有重要影响; 杆径增加会使结构的整体刚性增大, 一阶模态随之上升, 这为通过调控杆径实现多频段减振性能提供了依据; 杆径减小导致 NiTi 点阵的相变温度与孔隙率降低, 而相变温度降低与孔隙数量减少会使材料阻尼降低, 从而导致低杆径下 NiTi 合金 BCC 点阵结构的结构阻尼显著下降。

关键词 激光技术; NiTi 形状记忆合金; BCC 结构; 激光选区熔化; 阻尼性能; 有限元仿真

中图分类号 TG139.6

文献标识码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402305

1 引言

NiTi 合金以其优越的超弹性和形状记忆效应被称为最重要的形状记忆合金^[1-2], 并在航空航天、汽车制造和生物医学等领域被广泛应用^[3-5]。与传统的金属材料相比, 马氏体相变特征使 NiTi 形状记忆合金具有更高的阻尼能力^[6-8]。但是, NiTi 合金的高耐磨性和超弹性使得其难以切削加工, 很难制造具有复杂几何构型的结构, 从而限制了该合金的进一步应用。增材制造(AM)几乎可以成形出具有任意复杂构型的结构件, 且能实现结构功能一体化^[9-11]。与定向能量沉积^[12]、电子束熔化成形、激光直接沉积技术^[13]等增材制造方法相比, 激光选区熔化(SLM)在成形具有较高几何精度和表面粗糙度的复杂多孔结构方面具有突出优势^[14]。

周期点阵结构具有轻质、高强等特点, 常被作为缓冲吸振结构^[15]。周期点阵结构具有优异的力学性能, 除此之外, 通过构型设计或孔隙填充等方法进行功能化设计可使周期点阵结构具有吸波、隔热和减振等功能特性^[16]。点阵结构作为最具潜力的可设计性结构之一, 受到了众多研究人员的青睐, 如: Schaedler 等^[17]提出了基于周期性空心管的微点阵结构, 该结构可在 50% 压缩形变后完全恢复; Frenzel 等^[18]设计了一类包含弯曲微杆的三维微点阵结构, 该结构表现出

的屈曲力学不稳定性可使其在压缩应变达到 30% 时完全恢复; Li 等^[19]研究了 SLM 制备的 Ti6Al4V 面心立方垂直支柱(FCCZ)和体心立方垂直支柱(BCCZ)的断裂和失效行为, 结果发现 FCCZ 样品的抗压强度比 BCCZ 样品高约 30%; Rosa 等^[20]测量了 316L 点阵结构在低频正弦激励下的阻尼能力, 结果发现该点阵结构具有的高阻尼特性与发生在梁节点和纵梁中的内摩擦现象有关; Scalzo 等^[21]探究了具有不同几何构型的 AlSi10Mg 和 316L 点阵结构, 结果表明, 与固体材料相比, 点阵结构具有更好的阻尼特性。可见, 大多数学者重点关注的是点阵结构在准静态条件(拉伸/压缩)下的弹塑性行为, 而针对点阵结构动态阻尼行为的研究还相对较少, 特别是对材料和点阵结构的阻尼特性进行耦合的研究还有待进一步开展; 此外, 在实际工况下, 构件的动态阻尼特性相比静态阻尼特性更重要。因此, 对材料与结构耦合的动态阻尼特性进行研究具有重要的理论意义和工程应用价值, 并可为 NiTi 点阵结构在阻尼器上的应用提供技术支撑。

本课题组采用 SLM 技术制备了一种典型的 NiTi 体心立方(BCC)点阵结构, 研究了不同杆径下 BCC 点阵结构的固有频率和阻尼特性, 并通过有限元仿真及微观组织表征研究了杆径尺寸、微观组织对结构固有频率和阻尼特性的影响。

收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-10-19; 录用日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金(U1930207)、国家自然科学基金青年科学基金(52001289)

通信作者: *xianfeng_shen@163.com

2 实验材料与方法

2.1 结构参数设计

为评估点阵结构的杆径对振动特性的影响,本课题组设计了 4 种杆径不同且单胞尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的 BCC 点阵结构。利用 UG 12.0 三维建模软件对基于 CAD 的 BCC 点阵结构进行建模,基于 CAD 的 BCC 单元由圆杆桁架布尔相并得到,通过控制杆径 d 可以实现对单元体积分数(ρ_t)的调控, d 分别设置为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm,对应的体积分数为 1.85%、

3.23%、4.95%、7.00%。为了研究多单元 NiTi BCC 点阵结构的振动特性,对不同杆径的 BCC 单元分别进行阵列合并,得到 4×4 的均匀 BCC 点阵结构模型(外部尺寸均为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$)。为安装加速度传感器,在每个点阵结构模型的俯视图中心点与正视图中心点设计了尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的安装底座。为了将振动台与点阵结构相连,实现振动信号的传输与测试,在点阵结构底面的 4 个支点处设计了尺寸为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的带圆孔的正方形块体。如图 1 所示,所有三维模型均导出为 STL 格式。

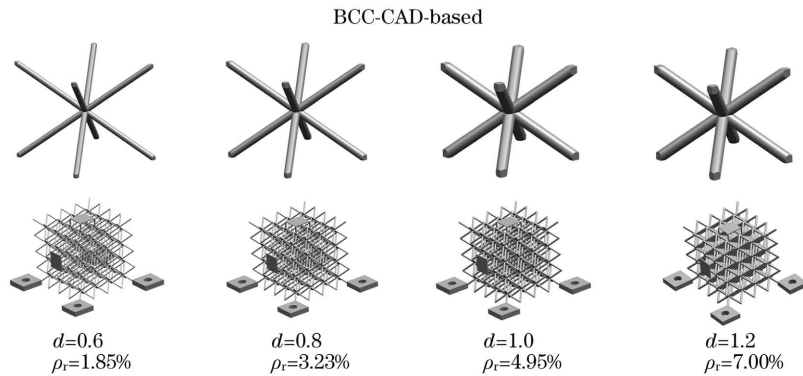


图 1 通过 UG 建立的 BCC 单元与整体模型

Fig. 1 BCC unit and overall model modeled by UG

2.2 样品制备

实验所用原料为深圳微纳增材技术有限公司生产的 $\text{Ni}_{50.4}\text{Ti}_{49.6}$ 近等原子比形状记忆合金粉末,该粉末采用电极感应熔融气体雾化(EIGA)工艺制备。粉末粒度分布及显微图像如图 2(a)、(b)所示,大多数粉末具有球形或接近球形的形态,粉末流动性良好,有利于

SLM 铺粉进程的连续。

采用南京航空航天大学生产的 SLM-100B 型选区激光熔化金属 3D 打印机进行 NiTi 合金点阵结构的制备,该设备配备了德国 IPG200W 单模光纤激光器。模型的前处理使用 Materialise Magics 软件进行,包括添加支撑、打印参数设置和切片处理。打印参数

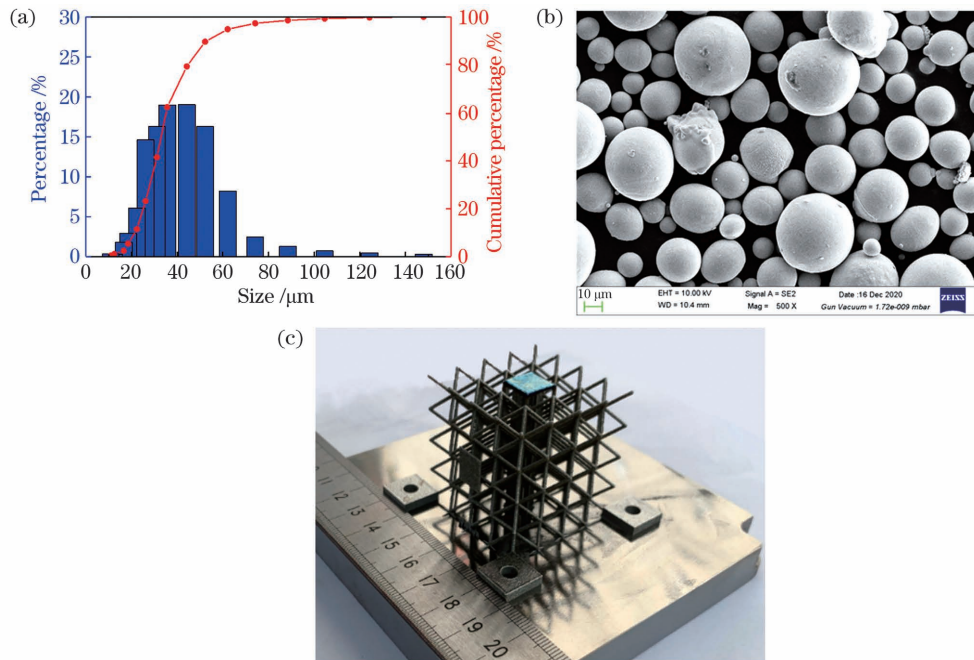


图 2 NiTi 粉末及打印的点阵结构。(a)NiTi 粉末的粒径分布;(b)NiTi 粉末的显微图像;(b)SLM 打印的 NiTi BCC 点阵结构
Fig. 2 NiTi powder and printed lattice structure. (a) Particle size distribution of NiTi powder; (b) microscopic image of NiTi powder; (c) NiTi BCC lattice structure printed by selective laser melting (SLM)

设置如下:激光功率 180 W,扫描速度 700 mm/s,扫描间距 0.05 mm,层厚 0.03 mm,光斑尺寸 0.06 mm,层间转角 67°,初始角度 57°,无轮廓,无图案,无跳转角度。打印过程中的激光能量密度 E 为 171.4 J/mm^3 ,其计算公式为

$$E = \frac{P}{v \cdot \Delta h \cdot d}, \quad (1)$$

式中: P 为激光功率; v 为激光扫描速度; Δh 为激光扫描间距; d 为铺粉层厚。

试样的打印在高纯(99.99%)氩气氛中进行,目的是减少打印过程中材料的氧化。打印样品如图 2(c) 所示。通过线切割将样品与基板分离,最后用游标卡尺测量样品的整尺寸,用天平称量样品的质量。

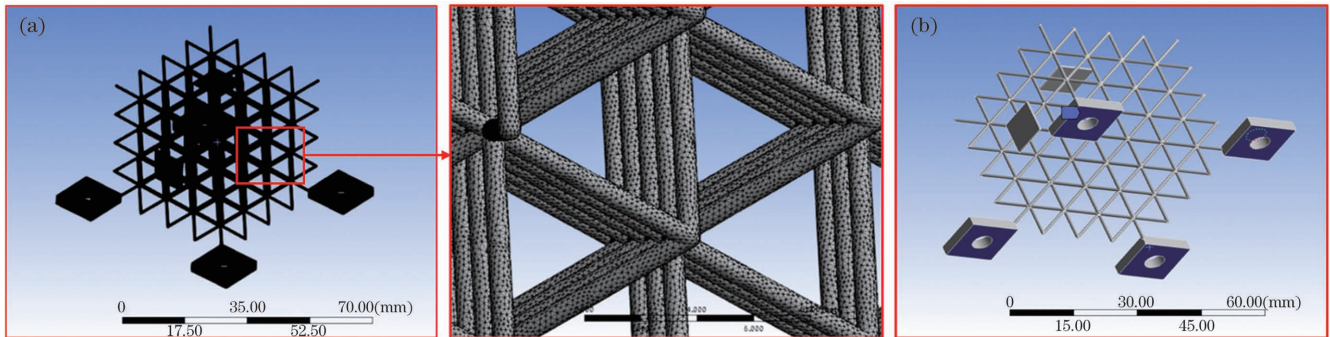


图 3 有限元分析设置。(a)有限元模型网格划分;(b)边界条件确定

Fig. 3 Finite element analysis settings. (a) Finite element model meshing; (b) boundary condition determination

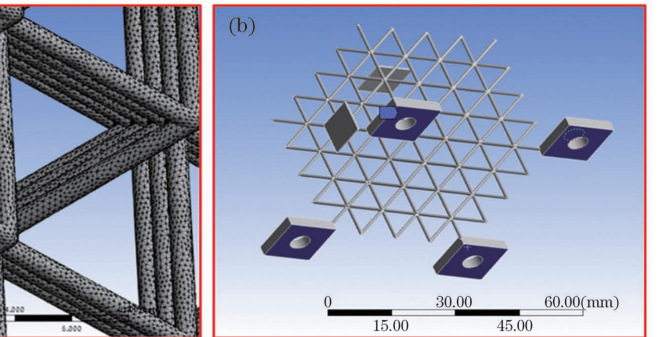
2.4 阻尼测试

使用北京航天希尔测试技术有限公司的 M544A 型振动台对动态振动性能进行正弦扫频测试,该系统可施加高达 100 kN 的动态载荷,并具有 2~2700 Hz 的扫频范围(台体的一阶固有频率为 2400 Hz)。通过有限元仿真可知所有杆径的 BCC 点阵结构的一阶固有频率远小于振动台台体的一阶固有频率,说明该实验台满足实验条件。

正弦扫频测试的输入条件:频率为 0~2000 Hz,加速度为 g 。通过扫频测试可以得到被测结构的幅频

2.3 有限元仿真分析

有限元分析采用 ANSYS 20.0 中的 Workbench 仿真模块进行,如图 3 所示。首先将多单元 BCC 点阵模型导入 Workbench 中,选择 Modal 模态分析。材料属性设置为:杨氏模量 38.0 GPa,密度 6.45 g/mm^3 ,泊松比 0.33,屈服强度 $\sigma_{0.2} = 145.5 \text{ MPa}$ 。其中:屈服强度与泊松比通过 SLM NiTi 材料的拉伸测试获得;密度通过阿基米德排水法获得;杨氏模量通过动态热机械分析(DMA)获得。采用 Solid185 六面体单元进行网格划分,网格单元的近似全局尺寸设置为 0.15。为了模拟振动台测试下的真实振动情况,将多单元 BCC 点阵的下表面设置为完全固支,将上表面设置为自由端,预测点阵结构的前六阶模态及变形模式。



特征曲线,图 4(b)所示的半功率带宽法用于估计每个被测结构在激励 Z 方向上一阶固有频率的结构阻尼比。该方法假定响应阻尼小,并且相邻模态对分析的模态不存在影响。结构阻尼比 ξ 的定义为

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0}, \quad (2)$$

式中: f_0 表示谐振频率; f_{\min} 和 f_{\max} 表示半功率幅度 $Y_{\max}/\sqrt{2}$ 对应的频率。一阶固有频率下的结构阻尼比用于对每个结构的频率响应进行分析,以评估结构的减振特性。

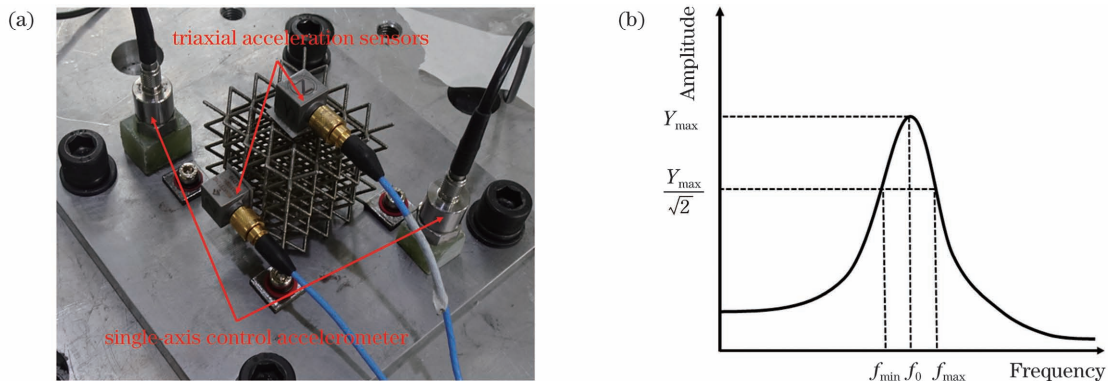


图 4 动态性能测试。(a)点阵结构振动测试装置的俯视图,该装置包括转接板上的单轴控制加速度计以及点阵结构 X、Z 方向上的两个三轴加速度传感器;(b)半功率带宽法

Fig. 4 Dynamic performance test. (a) Top view of vibration test device with a lattice structure, including two single-axis control accelerometer on the adapter board and two triaxial acceleration sensors in the X and Z directions of the lattice structure; (b) half-power bandwidth method

2.5 微观表征

NiTi 合金 BCC 点阵结构的马氏体转变温度通过 Netzsch DSC 214 差示扫描量热仪 (DSC) 进行测试, 冷却/加热速率均为 10 K/min。DSC 测量过程中的初始温度设定为 25 °C, 首先将样品从 25 °C 加热至 150 °C, 达到完全奥氏体状态, 随后冷却至 -100 °C, 然后再次加热至 120 °C, 最后冷却至 25 °C。BCC 点阵结构的化学成分使用 ONH836 型氧氮氢分析仪进行表征。此外, 利用 FF85 CT 微焦点 X 射线计算机断层扫描 (Micro-CT) 对 BCC 单元进行扫描与重建, 分析其缺陷的体积分数。

3 实验结果与分析

3.1 不同杆径 NiTi 正八面体结构的动态减振特性

3.1.1 有限元仿真

通过有限元模态仿真分析可得 NiTi 合金不同杆径 BCC 点阵结构的前六阶固有频率, 由于未改变结构的整体构型, 因此不同杆径 BCC 点阵结构的振型相似。以 0.6 mm 杆径为例, NiTi 合金 BCC 结构的前六阶模态如图 5(a) 所示。前六阶模态振型具有以下

特征: 当激励频率接近 BCC 点阵结构的一阶模态频率时, BCC 点阵结构整体朝侧向传感器连接板方向摆动; 当激励频率接近 BCC 点阵结构的二阶模态频率时, BCC 点阵结构整体朝未安装侧向传感器连接板方向摆动; 当激励频率接近 BCC 点阵结构的三阶模态频率时, BCC 点阵结构中心固定, 边缘部分向外侧摆; 当激励频率接近 BCC 点阵结构的四阶模态频率时, BCC 点阵结构整体朝侧向传感器安装板方向扭转; 当激励频率接近 BCC 点阵结构的五阶模态频率时, BCC 点阵结构两侧朝安装 Z 向传感器连接板方向上摆; 当激励频率接近 BCC 点阵结构的六阶模态频率时, BCC 点阵结构的四个侧面均相对于 Z 向传感器连接板方向向上侧摆。

图 5(b) 统计了不同杆径结构的一阶固有频率, 杆径为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 的点阵结构对应的一阶固有频率分别为 790.4、1001、1105、1240 Hz。随着杆径增大, 结构的一阶固有频率呈类线性增大。这是由于粗杆径的 BCC 晶格结构更易受到轴向力的影响, 且当杆长度一定时, 增大杆径会增加结构的体积分数, 使结构的弹性模量增大, 结构的一阶固有频率随之增大^[22-23]。

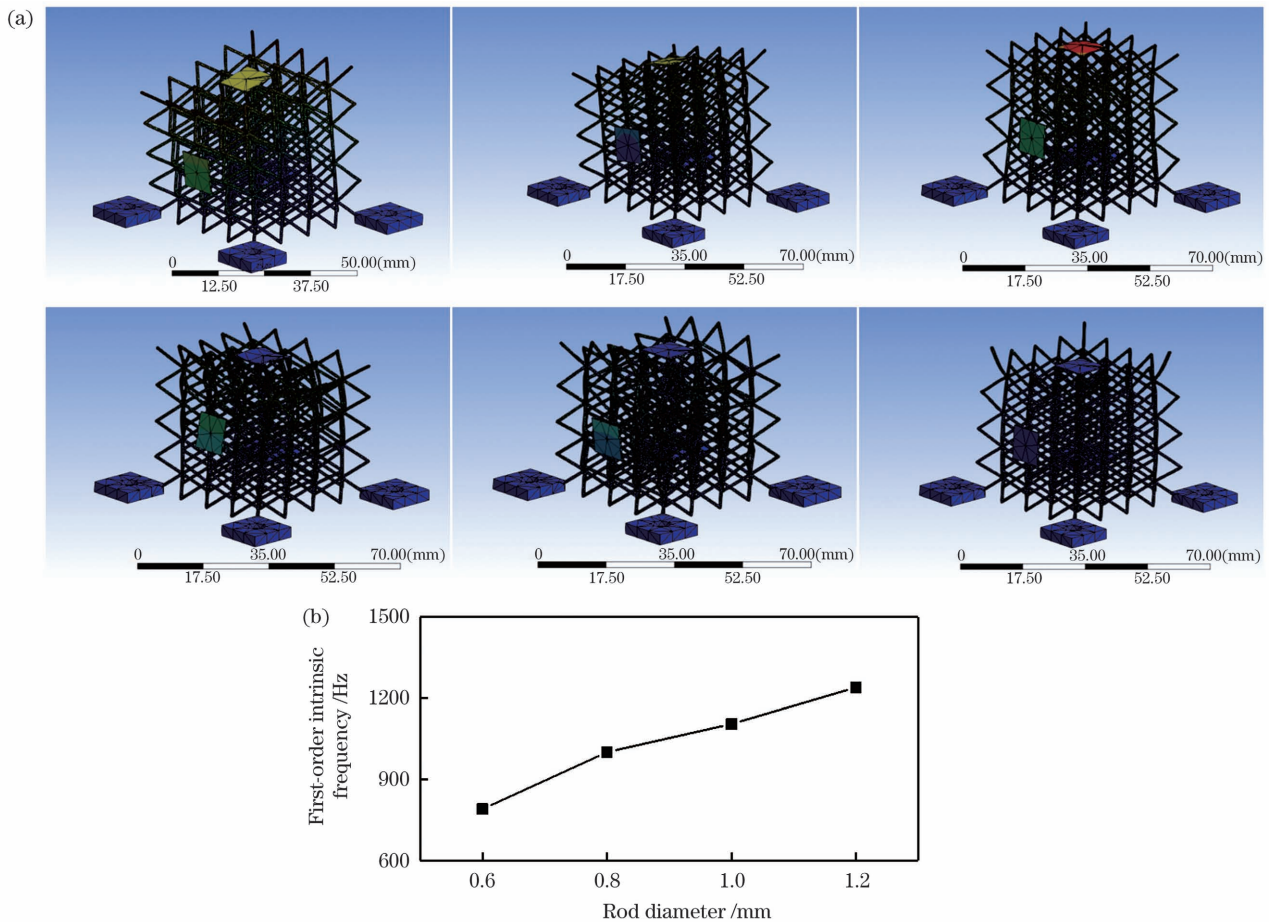


图 5 模态仿真结果。(a) NiTi 合金 BCC 点阵结构的前六阶模态振型图; (b) 杆径与一阶固有频率的关系

Fig. 5 Modal simulation results. (a) The first six modes of NiTi alloy BCC lattice structure; (b) relationship between rod diameter and first-order intrinsic frequency

3.1.2 正弦扫频实验

图 6 给出了无负载条件下, 不同杆径 NiTi 合金多单

元 BCC 点阵结构的正弦扫频响应曲线图。杆径为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 的 NiTi 合金多单元 BCC 点阵结构的一

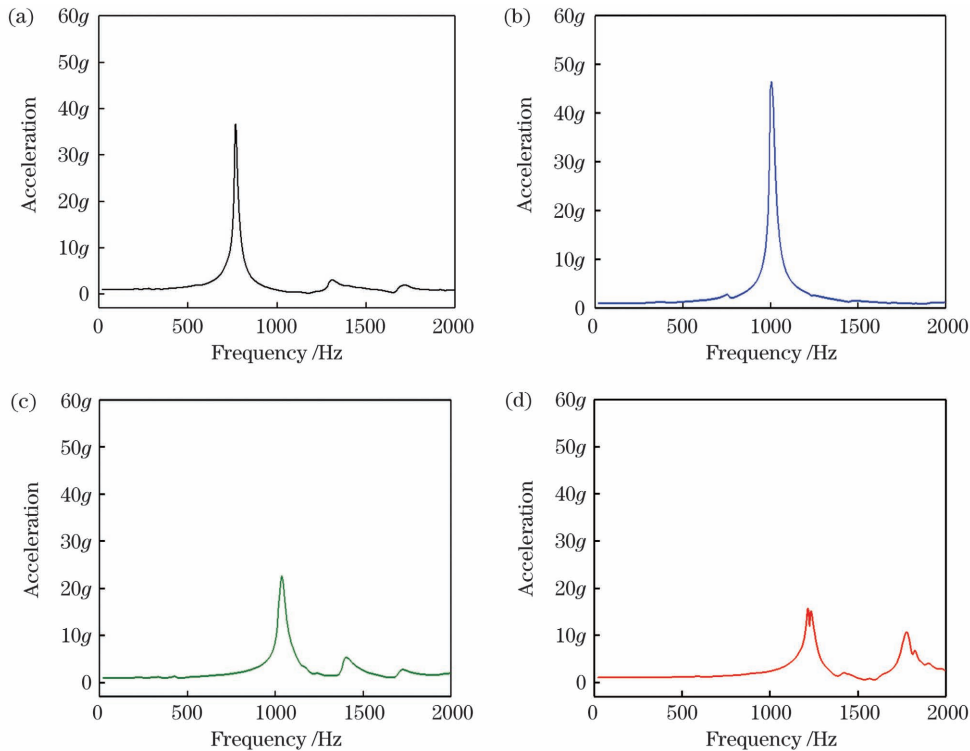


图 6 不同杆径点阵结构正弦扫频的幅频特征曲线图。(a) 0.6 mm 杆径;(b) 0.8 mm 杆径;(c) 1.0 mm 杆径;(d) 1.2 mm 杆径
Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic curve of sine sweep frequency for lattice structure with different rod diameters.

(a) 0.6 mm rod diameter; (b) 0.8 mm rod diameter; (c) 1.0 mm rod diameter; (d) 1.2 mm rod diameter

阶固有频率分别为 768.8、1004.4、1044.3、1215.4 Hz。

由图 6 所示幅频特性曲线以及结构阻尼计算公式可以得到不同杆径结构的一阶固有频率及对应的阻尼比,如图 7 所示。由模态分析结果可以发现:当杆径为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 时,实验与模拟分析得到的 BCC 点阵结构的一阶固有频率误差依次为 2.8%、0.3%、5.8%、2.0%。仿真与实际测试结果的误差可能与打印过程中的粉末黏结、制造几何误差以及振动实验中夹持力的大小等因素有关。随着杆径增加, NiTi 记忆合金多单元 BCC 结构的刚性增大,结构的一阶固有频率总体呈类线性增大,全部结构的固有频率均在 2000 Hz 以下。由结构阻尼比计算公式可知,当杆径为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 时,结构阻尼比分别

为 0.012、0.015、0.019、0.020。在不考虑材料这一影响因素的情况下, Syam 等^[24]发现点阵结构的杆径与结构阻尼比呈反比关系,即杆径增大会导致结构刚性增加,而结构刚性增加是结构的阻尼比呈现类线性下降趋势的因素之一。然而在本实验中,随着杆径从 0.6 mm 增大到 1.2 mm,结构的阻尼却发生了类线性升高,呈现出了与 Syam 等研究结果完全相反的现象。这说明除了结构的刚度会影响结构阻尼比以外, NiTi 合金在不同杆径下相应的材料阻尼特性也会对结构的阻尼比产生巨大影响。

3.2 相变分析

为了阐明 SLM 制备的 NiTi 记忆合金多单元 BCC 点阵结构阻尼的影响因素,本课题组对不同杆径

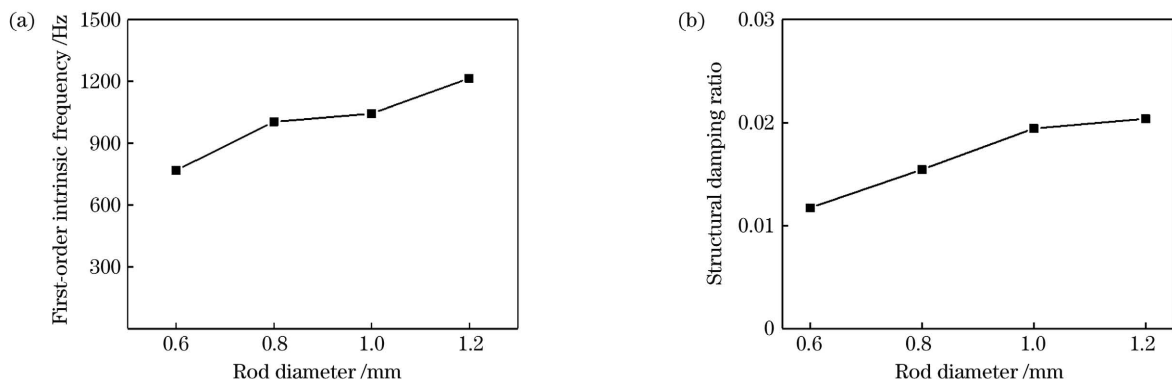


图 7 正弦扫频实验数据总结。(a) 杆径—一阶固有频率曲线;(b) 杆径—结构阻尼比曲线

Fig. 7 Summary of sine sweep frequency experimental data. (a) First-order intrinsic frequency versus rod diameter; (b) structural damping ratio versus rod diameter

NiTi 合金 BCC 结构的相变点进行了测试,其中 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 杆径样品对应的 M_s 点(马氏体转变的起始温度)分别为 53.8、65.9、69.2、71.1 °C, A_f 点(奥氏体转变终止温度)分别为 89.4、95.8、101.2、103.9 °C。由以上数据可知 M_s 和 A_f 都随杆径的增加而上升。由图 8 可见,所有杆径样品在加热和冷却时均存在双相变峰。这可能是由于采用 SLM 制备的 NiTi 点阵结构内部的成分与组织并不完全均匀。已有研究表明,SLM 是对金属粉末逐层进行扫描的,当扫描是非垂直进行时,会产生阶梯效应。这是因为重叠部位(内部)下是已经凝固的实体材料,而非重叠部位(外部)下是未熔化的金属粉末,粉末的热导性远小于已凝固实体,不同部位经历的热循环不同,从而导致了点阵结构内部成分与组织存在不均匀性,进而产生了双相变峰^[25-26]。此外,随着杆径增加,主相变峰逐渐右移,且相变温度逐渐升高。其外因主要有两个:1)不同杆径下的激光实际输入能量密度与设定值不同,这一现象在 SLM 制备的其他材料的点阵结构上有过报

道^[27-28]。当激光扫描速度与激光功率确定时,SLM 扫描一次的过程实际上是激光光斑从 0 开始加速到设定的扫描速度,维持该速度扫描,最后速度逐渐减小到 0 的过程。结构的杆径越小,激光在实际扫描时,加速与减速的时间占比就会越大,导致实际扫描速度比设定的扫描速度偏低,最终使得激光能量输入偏高。2)杆径越小,BCC 结构在 SLM 成形过程中的散热能力越差,熔池凝固速度越慢,吸收的激光能量越多。相变温度产生变化的内因主要是 NiTi 合金中 Ni 和 Ti 的原子数比在 SLM 过程中发生了改变。胡泽华等^[5]的研究表明,在 SLM 成形过程中,成形腔内虽然填充了惰性气体,但由于 SLM 的工艺过程是逐层进行铺粉的,在进行每一次铺粉时仍会不可避免地释放出粉末所携带的少量氧气。而 NiTi 合金中含有的活泼元素 Ti 易与成形腔中的 O 元素结合形成杂质相(如 $Ti_4Ni_2O_x$ 和 TiO_2),导致基体中的 Ti 元素减少,而且激光能量输入和吸收越大时,这种现象越明显。

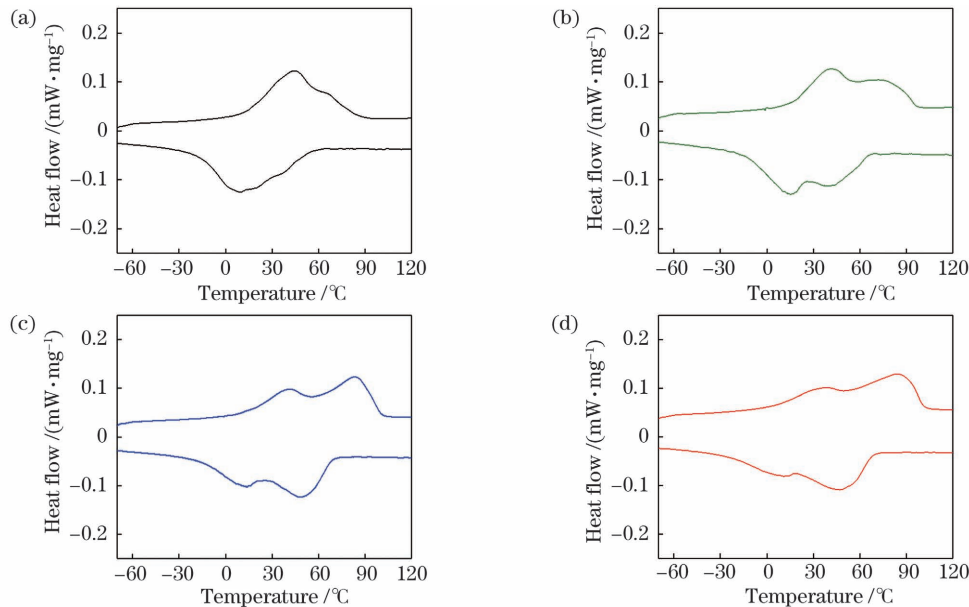


图 8 不同杆径样品的 DSC 曲线图。(a) 0.6 mm 杆径;(b) 0.8 mm 杆径;(c) 1.0 mm 杆径;(d) 1.2 mm 杆径
Fig. 8 DSC curves of samples with different rod diameters. (a) 0.6 mm rod diameter; (b) 0.8 mm rod diameter; (c) 1.0 mm rod diameter; (d) 1.2 mm rod diameter

为了分析该因素对不同杆径 BCC 结构相变温度的影响,使用氧氮氢分析仪对所有杆径的 NiTi 合金 BCC 样品进行 O 元素含量的测定,用于表征 SLM 过程中所损失的 Ti 元素。表 1 的结果显示,随着杆径减小,O 元素含量逐渐升高,形成的杂质相(如 $Ti_4Ni_2O_x$ 和 TiO_2)增多。Frenzel 等^[29]发现,当 Ni 元素含量仅上升 0.1% (原子数分数)时,相变温度会下降约 20 °C。因此,当杆径从 1.2 mm 减小到 0.6 mm 时,激光扫描速度的降低与杆散热能力的变差会使激光的实际能量输入和吸收上升,Ti 元素损失增多,Ni 和 Ti 的原子数之比逐渐变大,室温下的马氏体含量减少。此外,Zhao 等^[30]的研究表明,马氏体相中的可移动孪

晶界面是 NiTi 合金的重要阻尼源之一,相变温度的下降使 SLM NiTi 合金的材料阻尼降低,而材料阻尼的降低是结构阻尼比显著下降的诱因之一。

表 1 不同杆径 BCC 结构的 O 元素含量与相变温度分析
Table 1 Analysis of O element content and phase transition temperature of BCC structures with different rod diameters

Rod diameter / mm	Mass fraction of oxygen / %	M_s / °C	A_f / °C
0.6	0.18	53.8	89.4
0.8	0.15	65.9	95.8
1.0	0.14	69.2	101.2
1.2	0.12	71.1	103.9

3.3 内部缺陷分析

采用 Micro-CT 对不同杆径 BCC 结构单胞的孔隙率与孔隙数量进行表征与分析,结果如图 9 所示,其中不同杆径 BCC 结构的孔隙数量统计结果如图 9 中的第二列图所示,其中横轴表示孔隙的直径,纵轴表示单位体积内的孔隙数量。通过孔隙率分析可以发现样

品内部孔隙的直径小于 0.25 mm,所有样品的致密度均在 98.9% 以上,整体成形质量良好。孔隙数量统计结果表明,对于不同杆径的 BCC 点阵结构,其内部孔隙的数量是完全不同的;随着杆径从 1.2 mm 减小到 0.6 mm,孔隙的类型未发生明显改变,但其数量却急剧减少。

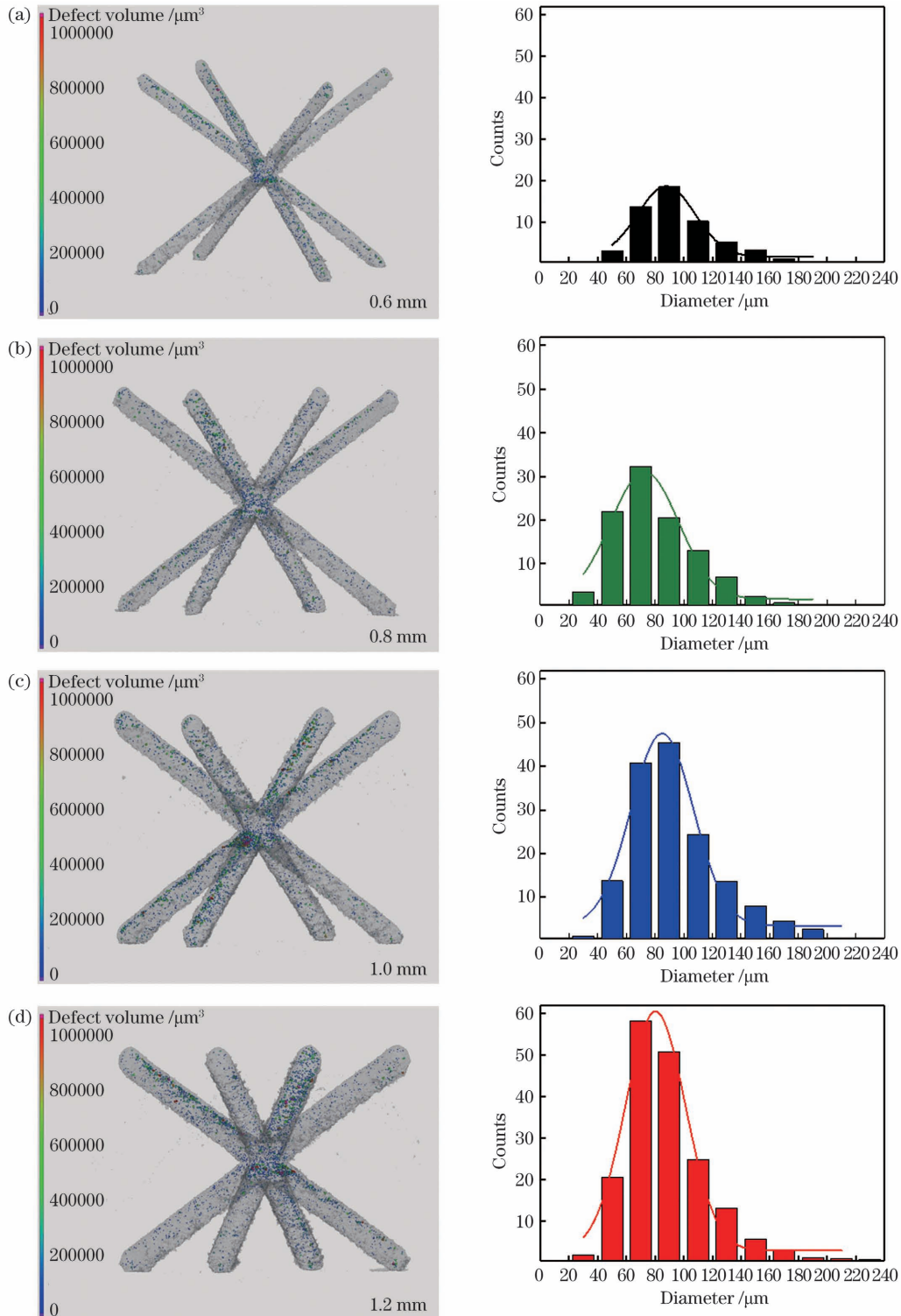


图 9 不同杆径 BCC 结构单胞的 Micro-CT 孔隙分析与统计结果。(a) 0.6 mm 杆径;(b) 0.8 mm 杆径;(c) 1.0 mm 杆径;
(d) 1.2 mm 杆径

Fig. 9 Micro-CT porosity analysis and statistical results of BCC cells with different rod diameters. (a) 0.6 mm rod diameter;
(b) 0.8 mm rod diameter; (c) 1.0 mm rod diameter; (d) 1.2 mm rod BCC cells with diameter

已有研究表明,材料孔隙周围的应力集中会使材料阻尼增强^[31-32]。孔隙影响材料阻尼的机理如下:在动态热机械分析中,正弦交变应力使材料内部的应力与应变分布不均匀,导致孔隙发生变形。从微观角度来看,试样中的每一个点都会产生一个微小的位移;在切向应力作用下,即使循环剪应力很小,也会在孔隙周围产生相当大的多轴应力,导致原子、分子的黏性流重新排列;原子、分子的运动可以将黏性流转化成热能,依据热力学分析可知热能的产生是一种能量耗散,有利于材料阻尼性能的提升^[33]。此外,胞内马氏体孪晶界面的运动会在一定程度上将应变能耗散为动能。这是因为随着孔隙数量的增加和孔隙尺寸的减小,NiTi 基体与孔隙之间的界面面积会增加,而界面面积的增加会增强应力集中行为,扩大受应力应变影响的区域,从而增强应力引起的孔隙周围的弹塑性弯曲等变形^[34]。更重要的是,这种情况将会增强马氏体中应力辅助的孪晶界运动。

综上,当 BCC 结构的杆径逐渐减小时,其相变温度会显著下降,单位体积内的孔隙数量也会明显减少,而这两个因素都不利于材料阻尼性能的提升,所以导致低杆径结构的阻尼比偏低。

4 结 论

本文通过实验探究结合有限元方法的模态仿真分析研究了杆径对 NiTi 合金 BCC 点阵结构减振效果的影响,主要得出以下结论:

1) SLM 可以用于制备较高质量的 NiTi 合金 BCC 点阵结构,样品内部的孔隙直径小于 0.25 mm,样品致密度可达 98.9%。

2) 正弦扫频实验得到的点阵结构的一阶固有频率与有限元模态仿真结果基本一致,总体误差小于 6%。当杆径增加时,由于结构的整体刚性增强,因此一阶模态随之增大,这给通过编辑参数实现多频段减振提供了机会。

3) 杆径越小,SLM NiTi 点阵结构的相变温度越低,而相变温度的下降会导致 NiTi 合金的材料阻尼降低,进而使得 NiTi 合金 BCC 点阵结构的结构阻尼显著下降。

4) 随着杆径减小,SLM NiTi 点阵结构单位体积内的孔隙数量减少,而微小孔隙也是提供材料阻尼的重要因素之一,因此低杆径下孔隙数量的减少导致结构阻尼明显下降。

参 考 文 献

- [1] Elahinia M, Moghaddam N S, Andani M T, et al. Fabrication of NiTi through additive manufacturing: a review[J]. *Progress in Materials Science*, 2016, 83: 630-663.
- [2] Elahinia M H, Hashemi M, Tabesh M, et al. Manufacturing and processing of NiTi implants: a review[J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(5): 911-946.
- [3] Biffi C A, Bassani P, Fioocchi J, et al. Microstructural and

- mechanical response of NiTi lattice 3D structure produced by selective laser melting[J]. *Metals*, 2020, 10(6): 814.
- [4] Xia M L, Sun Q P. Thermomechanical responses of nonlinear torsional vibration with NiTi shape memory alloy-alternative stable states and their jumps[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 102: 257-276.
- [5] 胡泽华, 宋长辉, 刘林青, 等. 镍钛合金激光选区熔化成形技术研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1202005.
Hu Z H, Song C H, Liu L Q, et al. Research progress of selective laser melting of nitinol[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1202005.
- [6] Wang X B, Speirs M, Kustov S, et al. Selective laser melting produced layer-structured NiTi shape memory alloys with high damping properties and Elinvar effect[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 146: 246-250.
- [7] Jin M J, Song Y W, Wang X D, et al. Ultrahigh damping capacity achieved by modulating R phase in $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ shape memory alloy wires[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 183: 102-106.
- [8] Wu S K, Lin H C. Damping characteristics of TiNi binary and ternary shape memory alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, 355(1/2): 72-78.
- [9] Lu H Z, Yang C, Luo X, et al. Ultrahigh-performance TiNi shape memory alloy by 4D printing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 763: 138166.
- [10] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [11] 杨永强, 王迪, 吴伟辉. 金属零件选区激光熔化直接成型技术研究进展(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0601007.
Yang Y Q, Wang D, Wu W H. Research progress of direct manufacturing of metal parts by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0601007.
- [12] Hamilton R F, Palmer T A, Bimber B A. Spatial characterization of the thermal-induced phase transformation throughout as-deposited additive manufactured NiTi bulk builds[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 101: 56-59.
- [13] Halani P R, Shin Y C. *In situ* synthesis and characterization of shape memory alloy nitinol by laser direct deposition[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(2): 650-657.
- [14] 钦兰云, 门继华, 赵朔, 等. TiB_2 含量对选区激光熔化 TiB/Ti-6Al-4V 复合材料组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 0602102.
Qin L Y, Men J H, Zhao S, et al. Effect of TiB_2 content on microstructure and mechanical properties of TiB/Ti-6Al-4V composites formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 0602102.
- [15] Ha C S, Lakes R S, Plesha M E. Cubic negative stiffness lattice structure for energy absorption: numerical and experimental studies[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 178/179: 127-135.
- [16] Salari-Sharif L, Schaedler T A, Valdevit L. Energy dissipation mechanisms in hollow metallic microlattices[J]. *Journal of Materials Research*, 2014, 29(16): 1755-1770.
- [17] Schaedler T A, Jacobsen A J, Torrents A, et al. Ultralight metallic microlattices[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 962-965.
- [18] Frenzel T, Findeisen C, Kadlic M, et al. Tailored buckling microlattices as reusable light-weight shock absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(28): 5865-5870.
- [19] Li P Y, Ma Y E, Sun W B, et al. Fracture and failure behavior of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 244: 107537.
- [20] Rosa F, Manzoni S, Casati R. Damping behavior of 316L lattice structures produced by selective laser melting[J]. *Materials &*

- Design, 2018, 160: 1010-1018.
- [21] Scalzo F, Totis G, Vaglio E, et al. Experimental study on the high-damping properties of metallic lattice structures obtained from SLM[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 63-77.
- [22] Zhao M, Liu F, Fu G, et al. Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM [J]. Materials, 2018, 11(12): 2411.
- [23] Ashby M F. The properties of foams and lattices [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2006, 364 (1838): 15-30.
- [24] Syam W P, Wu J W, Bo Z, et al. Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation [J]. Precision Engineering, 2018, 52: 494-506.
- [25] Dong Z C, Liu Y B, Zhang Q, et al. Microstructural heterogeneity of AlSi10Mg alloy lattice structures fabricated by selective laser melting: phenomena and mechanism [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 833: 155071.
- [26] Delroisse P, Jacques P J, Maire E, et al. Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting [J]. Scripta Materialia, 2017, 141: 32-35.
- [27] Yang Q, Sun K H, Yang C, et al. Compression and superelasticity behaviors of NiTi porous structures with tiny strut fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 858: 157674.
- [28] Dadbakhsh S, Speirs M, Kruth J P, et al. Influence of SLM on shape memory and compression behaviour of NiTi scaffolds [J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 209-212.
- [29] Frenzel J, George E P, Dlouhy A, et al. Influence of Ni on martensitic phase transformations in NiTi shape memory alloys [J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3444-3458.
- [30] Zhao M, Shao Y M, Zheng W J, et al. Tailoring the damping and mechanical properties of porous NiTi by a phase leaching process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 855: 157471.
- [31] Zhang J, Gungor M N, Lavernia E J. The effect of porosity on the microstructural damping response of 6061 aluminium alloy [J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(6): 1515-1524.
- [32] Fraczkiewicz M, Zhou A G, Barsoum M W. Mechanical damping in porous Ti_3SiC_2 [J]. Acta Materialia, 2006, 54(19): 5261-5270.
- [33] Gu J, Wu G H, Zhang Q. Effect of porosity on the damping properties of modified epoxy composites filled with fly ash [J]. Scripta Materialia, 2007, 57(6): 529-532.
- [34] Peng W L, Liu K, Shah B A, et al. Enhanced internal friction and specific strength of porous TiNi shape memory alloy composite by the synergistic effect of pore and Ti_2Ni [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152578.

Influence of Rod Diameter on Dynamic Vibration Damping Characteristics of NiTi Alloy Lattice Structure Fabricated by Selective Laser Melting

Huo Mingzheng¹, Chen Jie¹, Yang Qin¹, Xiang Zheng¹, Dai Donghua², Yuan Shangqin³, Huang Shuke¹, Shen Xianfeng^{1*}

¹ Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, Sichuan, China;

² College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

³ Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

Abstract

Objective Nickel-titanium (NiTi) alloy is considered the most crucial shape memory alloy owing to its excellent superelasticity and shape memory effect. It can widely be used in aerospace, automobile manufacture, and biomedical fields. Compared with traditional metal materials, NiTi shape memory alloy has high damping capability owing to its martensitic transformation characteristics. However, fabricating NiTi alloy into structures with complex geometric configurations is difficult owing to its high wear resistance and superelastic properties. Nonetheless, as an emerging additive manufacturing technology, selective laser melting (SLM) has outstanding advantages in forming complex lattice structures with high geometric accuracy and surface finish. As one of the widely used structures in SLM structure design, the periodic lattice structure is often used as a buffer absorber given its light weight and high strength. Presently, most studies on forming NiTi alloy lattice structure using SLM focus on the elastic-plastic behavior under quasistatic conditions (tensile/compression). However, only few researchers have focused on the dynamic damping behavior of the lattice structure, especially the coupling between the damping characteristics of the material and the structural damping of the lattice structure. Therefore, the influence mechanism of the dynamic damping characteristics on the material-structure coupling must be investigated.

Methods First, body-centered cubic (BCC) lattice structures with different rod diameters were modeled using the UG12.0 modeling software. BCC lattice structures with different rod diameters were fabricated using $Ni_{50.4}Ti_{49.6}$ shape memory alloy powder by SLM. Moreover, the first six orders of modalities and deformation modes of the BCC lattice structure were predicted using ANSYS finite element simulation. The first-order intrinsic frequencies and damping ratios of the BCC lattice structure with different rod diameters were obtained by shaking the table with sinusoidal sweeping experiments. The influencing factors of damping drop on the BCC lattice structure with a decreasing rod diameter were

explored. The phase composition, chemical element content, number of defects, and morphology of the NiTi-BCC lattice structure at different rod diameters were analyzed through differential scanning calorimetry (DSC), oxygen-nitrogen-hydrogen analyzer, and microfocus X-ray computed tomography (Micro-CT).

Results and Discussions Simulation and experimental results indicate that the first-order intrinsic frequency of the structure increased linearly as the rod diameter increased from 0.6 to 1.2 mm (Figs. 5 and 6). The enlargement of the rod diameter resulted in increased the volume fraction and elastic modulus of the structure with a certain rod length, thereby increasing the first-order intrinsic frequency of the structure. The decrease in the rod diameter contributed to the deterioration of the structural damping ratio from 0.020 to 0.012 (Fig. 7). To explain the decline in the structural damping ratio as the rod diameter decreases, phase transition temperature and chemical elemental analyses were conducted on samples with different rod diameters (Fig. 8, Table 1). First, the phase transition temperature gradually reduced as the rod diameter decreased. The decline of the laser scanning speed and the deterioration of the rod heat dissipation ability increased the actual laser energy input and absorption. Therefore, the effective oxidation led to the augmentation of the Ti element loss and the reduction of martensite content in the structure. The movable twin interface in the martensite phase is one of the critical damping sources of the NiTi alloy. Thus, the damping property of the SLM-NiTi alloy was reduced by the decreased phase transition temperature. Second, the porosity and number of pores in the BCC structure were characterized and analyzed by using Micro-CT. With the decrease in the rod diameter from 1.2 to 0.6 mm, the type of pores did not considerably change, but the pore number reduced dramatically (Fig. 9). On the one hand, the thermal energy dissipation resulted from the multiaxial stresses around the pores was attenuated by the decrease of pore number, which reduced the damping property. On the other hand, the interface area of NiTi matrix and pores were reduced by the decrease of pores number, thereby reducing the stress-assisted twin grain boundary motion in the martensite. Thus, the material damping was decreased. As mentioned above, the drop in material damping reduces structural damping.

Conclusions The effects of rod diameter on the first-order intrinsic frequency and structural damping of NiTi alloys prepared by the SLM method were investigated using finite element analysis and experiments. Results show that the rod diameter had an essential effect on the first-order intrinsic frequency and damping of the BCC lattice structure. As the rod diameter increased, the overall stiffness of the structure increased and the first-order mode rose accordingly, which provide a basis to achieve multifrequency damping performance by controlling the rod diameter. The reduction of phase transition temperature and pore number, thereby reducing material damping, was the result of the decreased rod diameter. Therefore, the significant decrease in the structural damping of the NiTi-BCC lattice structure was attributed to the decreased rod diameter.

Key words laser technique; NiTi shape memory alloy; body-centered cubic lattice structure; selective laser melting; damping capacity; finite element simulation