

SLM 增材制造 316L 钢超材料的 弹性各向同性优化研究*

鄢晨华¹ 李东铭² 胡泽文¹ 严梧桐¹ 匡友弟^{1,3**}

(¹ 暨南大学力学与建筑工程学院, 广州, 510632)(² 东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州, 511455)

(³ 五邑大学土木建筑学院, 江门, 529020)

摘要 现有各向同性超材料设计大多假设基材对称性为各向同性, 然而选区激光熔化增材制造 316L 钢基材通常具有力学各向异性, 且强烈依赖于制造工艺和参数, 目前有限的实验研究还不足以全面揭示不同扫描策略下 316L 钢基材的弹性对称性, 不同激光功率对空间杨氏模量的定量影响也未知. 本文采用超声共振实验, 表征了两种典型激光扫描策略(平行扫描、正交扫描)和两种典型激光功率(214.2W、274.2W)下 316L 钢的弹性常数. 实验表明: 采用正交扫描策略, 214.2W 功率下钢基材对称性退化为横观各向同性, 但 274.2W 功率下钢基材仍只能看作正交各向异性, 说明此横观各向同性只是特定激光功率下的结果. 相比正交扫描, 平行扫描制造的钢基材各向异性更强. 在考察的激光功率范围内, 空间杨氏模量对其不敏感. 基于实验获取的弹性常数, 结合有限元数值仿真, 本文对 FCC-BCC, SC-OT 和 SC-OT-BCC 三类杆系超材料开展了弹性各向同性优化, 通过优化杆件尺寸实现以形控性. 优化结果表明: 增材制造与铸造的 316L 钢各向同性超材料具有几乎相同的弹性力学性能. 从应用角度, 该研究工作可以为克服 SLM 增材制造各向同性超材料这个技术难点提供可行的解决方案.

关键词 金属增材制造, 力学超材料, 316L 钢, 弹性各向同性优化

DOI: 10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2024.060

0 引言

力学超材料是一种几何上呈现点阵形貌的结构化材料, 精心设计的内部结构赋予其非同寻常力学性能, 如轻质高强、负泊松比、负刚度、负压缩性等^[1-3], 在航空航天、智能制造、生物医疗等领域有着广泛应用^[4-6]. 类似于各向同性材料, 各向同性超材料因其力学性质与方向无关备受关注^[3,7-9], 但是, 在基材对称性为各向同性条件下, 力学超材料大多表现为非弹性各向同性^[10]. 如满足体心立方(BCC)晶格对称性、单胞内所有杆直径相等的杆系超材料, 其对角线杨氏模量远大于轴向杨氏模量^[11]. 原因在于: 超材料的弹性对称性不仅依赖于晶格对称性, 也

取决于单胞内部结构分布特征(如杆件尺寸和杆件形貌), 单胞内所有杆为等半径实心杆这个分布特征破坏了相应超材料的弹性各向同性. 于是研究者们通过调整超材料单胞内部结构以实现弹性各向同性: Xu 等^[11]通过调整两个基本单元杆径比, 实现可控的各向异性; Dejean 等^[12]将构建杆系超材料的实心杆替换为空心杆, 通过调整其内外径比率, 获得弹性各向同性结构; Ma 等^[13]优化三重周期极小曲面超材料不同位置的壳厚, 实现弹性各向同性. 不同于上述研究中采用的各向同性基材, 作为金属超材料重要制备手段的选区激光熔化(SLM)工艺, 其工艺特点决定了金属基材具有显著的各向异性^[14-16]. 即使从结构上(晶格对称性和单胞内部结构分布特征)保证设计的超材料为弹性各向同性, 打印的成品仍

* 国家自然科学基金项目(12172150), 广东省自然科学基金项目(2022A1515010287)与第四代核电示范快堆汽水分离再热器研制项目(2021ZD0009)资助.

2024-11-20 收到修改稿, 2024-11-22 网络首发.

** 通讯作者. E-mail: ykuang@jnu.edu.cn.

呈现各向异性^[17-19],与弹性各向同性设计预期相悖.因此,SLM 增材制造金属基材超材料的弹性各向同性优化是个值得研究的课题.

开展 SLM 增材制造金属基材超材料弹性各向同性优化,其首要任务是理解金属基材的弹性对称性,并定量表征其弹性常数.SLM 工艺通常采用平行扫描、正交扫描和 67° 旋转扫描三类激光扫描策略,打印的基材弹性对称性强烈依赖于扫描策略^[20],基材空间杨氏模量也依赖于相应激光功率参数^[21].目前,对于不同扫描策略下的 316L 钢,已有实验研究采用了单轴拉伸法^[18]、声波波速法^[22]、晶粒取向信息法^[23]等表征其弹性常数,但是还不足以全面揭示不同扫描策略下 316L 钢基材的弹性对称性,特别是平行和正交扫描策略下 316L 钢基材的弹性对称性.理论上,SLM 平行扫描和正交扫描策略下打印的 316 钢基材弹性对称性应满足正交各向异性^[24],但相关的实验工作^[25]报道了正交扫描策略获得了横观各向同性 316L 钢,该横观各向同性是否与特定激光扫描功率(或激光能量密度)有关,目前尚无定论.另外,不同激光功率对空间杨氏模量的定量影响也未知.因此,本文拟采用超声共振法等^[26,27]来实验表征平行和正交扫描策略下 316L 钢基材的弹性常数,该方法已经应用到镍基合金^[28]的弹性常数表征.与提及的其他实验表征方法相比,该方法为无损测量,表征技术上具有简单易行,高效快捷的优点:只需加工简单的块体试样,通过单次实验便可采集足量频率数据并反演弹性常数.

实验定量表征 316L 钢基材的弹性常数为超材料的弹性各向同性优化打下了必要的基础,目前,在相关优化研究方面,Zhang 等^[18]假设 67° 旋转扫描策略下 316L 钢为横观各向同性材料,并对三重周期极小曲面超材料开展弹性各向同性优化.Ma 等^[29]给出了当基材对称性为横观各向同性时,杆系超材料等效弹性矩阵的解析式,以此设计各向同性杆系超材料.但是对平行和正交扫描策略下的 316L 钢超材料的各向同性优化还缺乏研究.因此,本文重点关注平行扫描和正交扫描激光策略,通过超声共振实验表征了两种策略下 316L 钢弹性常数,并考察了激光功率对空间杨氏模量的影响.利用获取的弹性常数,结合有限元数值仿真开展了杆系超材料

的各向同性优化.通过优化其内部杆件半径,在相对密度恒定的条件下实现以形控性^[30],为克服 SLM 增材制造各向同性超材料的技术难点提供可行的解决方案.

1 弹性常数超声共振实验表征

本文设计了四组超声共振实验,从定性和定量角度研究扫描策略(平行扫描、正交扫描)和激光功率(214.2W、274.2W)对 316L 钢基材正交各向异性弹性常数和空间杨氏模量的影响.

1.1 实验原理

结构固有频率由其弹性常数、形状、密度和力学边界条件等因素决定,超声共振实验假设试样具有自由边界,通过测量其固有频率来反演其弹性常数.具体原理为^[31]:对于边界自由的给定弹性体,采用超声共振谱仪测得某段频率范围内 s 个固有频率 p_1, p_2, \dots, p_s .假定初始弹性常数,通过 Rayleigh-Ritz 法^[32]可得此段频率范围内 s 个计算频率 q_1, q_2, \dots, q_s .通过定义如下目标函数开展最小二乘优化^[33]:

$$F = \sum_s \omega_s (p_s - q_s)^2 \quad (1)$$

式中, ω_s 为实验频率可信度,取 0(不可信实测频率)或 1(可信实测频率).使用 Levenberg-Marquardt 算法^[34]不断调整和优化弹性常数,当满足 $F < 0.5\%$ 时迭代完成,即认为获得材料真实弹性常数.

1.2 样品制备与实验过程

本文采用的 316L 钢粉末由中航迈特公司提供,打印设备采用 EOS M290.扫描速度、铺粉层厚、舱口间距分别为 928 mm/s、40 μm 、100 μm ,打印过程在氧含量低于 0.3% 的氮气气氛下进行.打印完成后,在 550 °C 下退火 3 小时,消除残余应力.

激光打印过程中,以 30 W 激光功率为增量步长,采用排水法考察了 184.2 W 至 364.2 W 范围内边长为 10 mm 立方块体的致密度,发现在 274.2 W 获得最高致密度 99.54%.文献表明最高致密度的样品通常具有最优秀的综合力学性能^[35],因此本文取 274.2 W 的样品做测试.为了对比研究激光功率的影响,同时采用了 EOS 公司推荐激光功率 214.2 W 打印测试样品.激光平行扫描策略示意图见图 1

(a), 相邻铺层激光扫描路径层间转角为 0° , 正交扫描策略示意图见图 1(b), 相邻铺层激光扫描路径层间转角为 90° .

通过激光功率与扫描策略两两组合, 设计了四组工艺参数, 分别记为: (A) 214. 2W, 平行; (B) 214. 2W, 正交; (C) 274. 2W, 平行; (D) 274. 2W, 正交. 每

组制备两个试样, 共计八个(见图 1(c)).

样品频率采集设备为 RUSpec4000 超声共振谱仪, 测试频率范围为 100-300 kHz, 试样采用对角夹持方式(见图 1(d)), 与换能器点接触, 近似为自由边界条件, 每个试样进行两次频率采集.

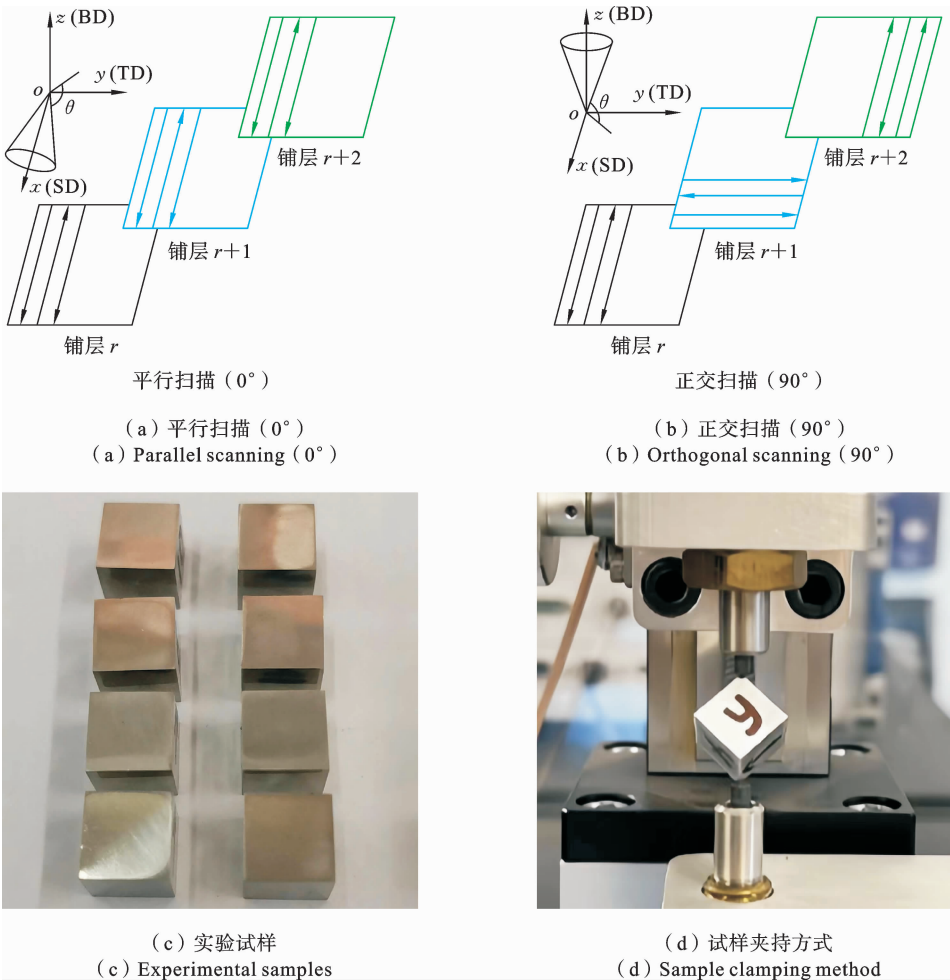


图 1 试样与实验表征

Fig. 1 Samples and experimental characterization

1.3 实验结果分析

如图 1(a), 以立方试样构建方向(BD)为 z 轴, 面内扫描方向(SD)为 x 轴, 面内垂直二者的方向(TD)为 y 轴创建笛卡尔坐标系, 并对平行扫描试样建立与 yoz 面夹角为 θ 的锥面, θ 范围从 0° (yoz 面)至 90° (x 轴), 对正交扫描试样建立与 xoy 面夹角为 θ 的锥面, θ 范围从 0° (xoy 面)至 90° (z 轴). 对于四组工艺参数下的试样, 实验表征得到的正交各向异性弹性常数见

表 1. 块体任意方向的杨氏模量, 即空间杨氏模量 E 可根据弹性常数矩阵 C 得到, 表达式如下:

$$E = 1 / (\mathbf{L} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{L}^T) \quad (2)$$

式中, $L = [l_1^2 l_2^2 l_3^2 l_2 l_3 l_1 l_3 l_1 l_2]$, l_1, l_2, l_3 为方向余弦, 块体空间杨氏模量分布云图见图 2. A 至 D 四组样品的空间杨氏模量最大值分别为 231. 25 GPa, 229. 43 GPa, 226. 73 GPa, 228. 61 GPa, 空间杨氏模量最小值分别为 121. 13 GPa, 121. 68 GPa, 123. 59 GPa、

128.02 GPa, 最大与最小值差异分别为 90.91%、88.55%、83.45%、78.57%, 已有文献报道差异范围为 25%~81%^[24,36,37], 证实 SLM 增材制造 316L 钢

基材具有强烈的各向异性. 其中 A 组 316L 钢全局杨氏模量差异最大, 为 90.91%, 造成该现象的原因是增材制造 316L 具备强烈的晶体结构^[24,37].

表 1 316L 钢弹性常数(GPa)

Table 1 Elastic constants of 316L steel (GPa)

弹性常数	(A)214.2W, 平行	(B)214.2W, 正交	(C)274.2W, 平行	(D)274.2W, 正交
C_{11}	244.12±20.11	446.73±14.89	290.99±14.78	358.57±13.03
C_{22}	401.99±24.06	465.16±21.94	451.51±16.84	405.65±6.550
C_{33}	346.86±19.37	320.76±7.650	376.63±7.870	287.72±7.490
C_{12}	198.28±23.90	299.31±18.26	260.87±15.63	228.42±6.920
C_{13}	181.43±22.02	271.33±11.90	209.83±6.620	210.50±10.47
C_{23}	211.53±21.52	277.03±14.41	255.32±9.190	231.05±3.590
C_{44}	72.87±1.32	79.04±0.76	67.94±0.79	84.70±2.88
C_{55}	88.08±1.48	86.99±0.80	95.14±1.11	83.80±1.14
C_{66}	81.85±0.33	77.06±0.74	78.02±1.04	79.50±0.94

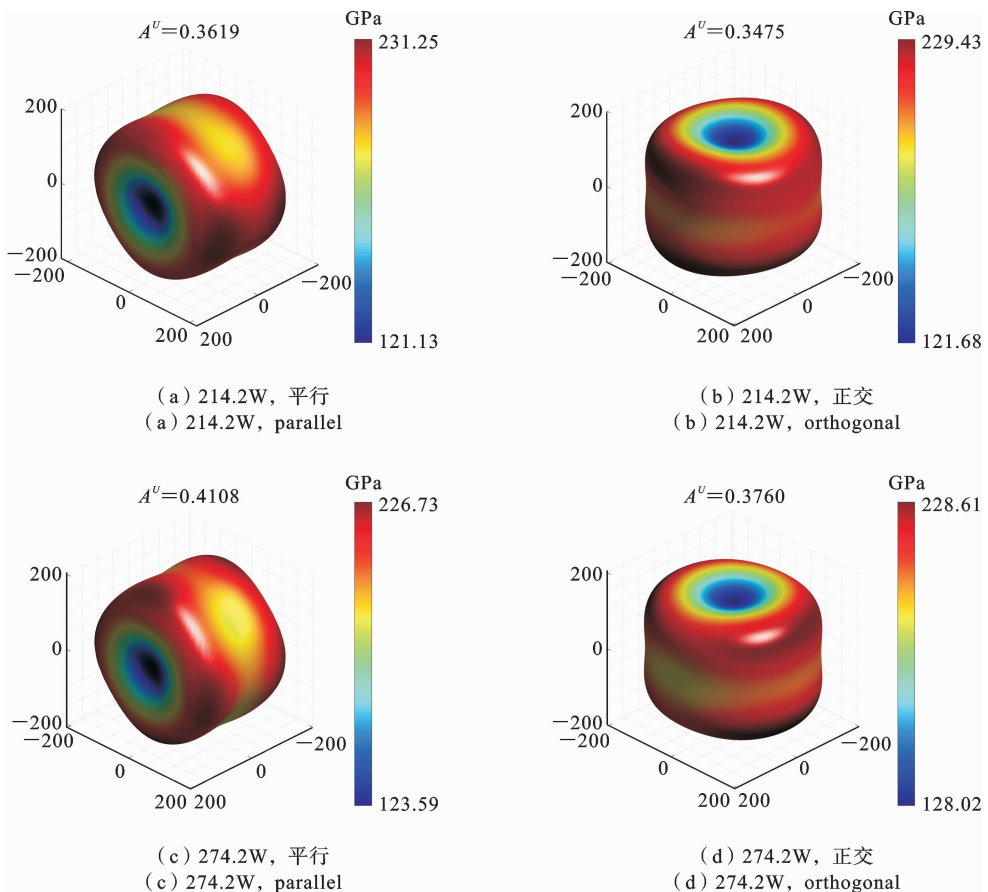


图 2 316L 块体杨氏模量云图

Fig. 2 Cloud diagram of Young's modulus of 316L block

为了描述空间上杨氏模量变化趋势,本文绘制了锥面内杨氏模量最大值 E_{\max}^{θ} 和最小值 E_{\min}^{θ} 与夹角 θ 的关系曲线,分别见图 3(a)和图 3(b). E_{\max}^{θ} 曲线的

最高点对应着空间最大杨氏模量 E_{\max} , E_{\min}^{θ} 曲线最低点对应着空间最小杨氏模量 E_{\min} . E_{\max}^{θ} 和 E_{\min}^{θ} 曲线的间距代表了对应锥面内模量的波动幅度.

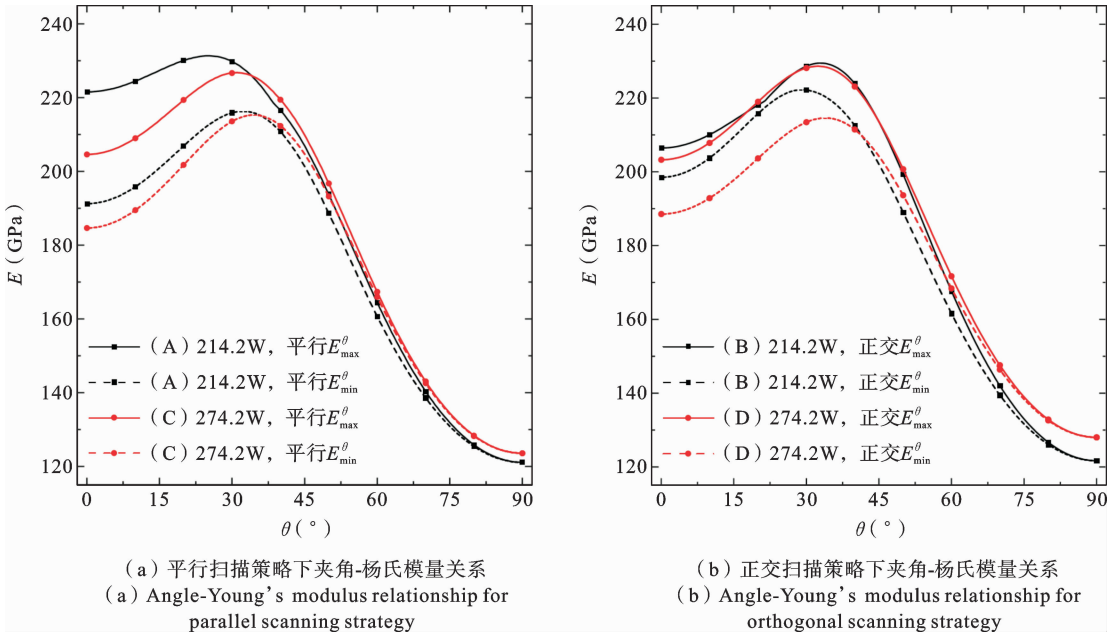


图 3 不同扫描策略下夹角-杨氏模量关系图

Fig. 3 Angle-Young's modulus relationship diagram for different scanning strategy

图 3(a)显示了平行扫描策略下,214.2 W 功率(A 组)对应的空间最大杨氏模量出现在 $\theta=25^{\circ}$ 附近,而 274.2 W 功率(C 组)对应的空间最大杨氏模量出现在 $\theta=31^{\circ}$ 附近,差异不大.两种功率对应的空间最小杨氏模量均出现在 $\theta=90^{\circ}$,即扫描方向.通过比较两种功率下的 E_{\max}^{θ} 曲线可以发现:同一个锥面内两者的差异最大只有 8.29%;对比其 E_{\min}^{θ} ,同一个锥面内两者的差异最大也只有 3.59%,说明激光功率对杨氏模量的影响可以忽略.此外,214.2 W 功率对应的锥面内杨氏模量波动幅度最大达到 15.83%;为进一步衡量其弹性对称性,本文参考了横观各向同性的四组弹性常数关系 $C_{22}=C_{33}$ 、 $C_{13}=C_{12}$ 、 $C_{55}=C_{66}$ 、 $C_{44}=(C_{22}-C_{23})/2$,以 214.2 W 功率对应的弹性常数作为输入,发现此四组关系中等式两边弹性常数的数值差异最大达到 13.71%.考虑到实验误差,如果以 10%作为可接受的近似上限,则该组工艺参数下的正交各向异性不可近似为横观各向同性.这里需要说明的是:平行扫描工艺采用了

零度层间转角扫描策略,决定了 316L 钢弹性对称性必然是正交各向异性,这里采用 10%作为近似上限是合理的.同样,274.2 W 功率对应的锥面内模量波动幅度最大达到 10.81%;以其弹性常数作为输入,上述四组关系中等式两边弹性常数数值差异最大达到 19.57%,仍然只能看作正交各向异性.

图 3(b)显示了正交扫描策略下,214.2 W 和 274.2 W 激光功率对应锥面内最大值 E_{\max}^{θ} 和最小值 E_{\min}^{θ} .可以看到:与平行扫描相比,正交扫描模量分布规律具有相似性.不同的是:两种激光功率下最小杨氏模量均出现在材料构建方向.在 214.2 W 功率(对应激光能量密度 57.70 J/mm^3),正交扫描策略下(B 组),锥面内模量波动不超过 5.70%;以其弹性常数作为输入,上述四组关系中等式两边弹性常数数值差异最大不超过 9.14%,小于 10%的近似上限,其正交各向异性可近似为横观各向同性.Yuan 等^[25]采用正交扫描策略,只研究了激光能量密度范围 $48.08\sim 64.10 \text{ J/mm}^3$,在此范围内获得了横观各

向同性 316L 钢. 本文使用的 214 W 功率对应的激光能量密度与之接近. 但是在本文使用的 274.2 W 高功率(对应激光能量密度 73.87 J/mm^3)情况下, 锥面内模量波动最大达到 7.80%; 以其弹性常数作为输入, 上述四组关系中等式两边弹性常数数值最大差异达到 18.14%, 则不能近似为横观各向同性. 因此, 本文不仅复现了前人的结论, 也证实: 正交扫描策略下, 316L 钢正交各向异性退化为横观各向同性是个特殊的现象, 在高功率(或高能量密度)下, 316L 钢仍只能看作正交各向异性.

为分析扫描策略对 316L 钢各向异性强弱的影响, 本文基于实验弹性常数计算了通用各向异性指数 A^U ^[38] (A^U 为材料各向异性的单调递增非负函数, 对于各向同性材料有 $A^U=0$): 在 214.2 W 功率下, 平行扫描策略(A 组)对应 $A^U=0.3619$, 高于正交扫描(B 组)对应的值 $A^U=0.3475$. 同样的, 对于 274.2 W 激光功率, 平行扫描策略(C 组)对应 $A^U=0.4108$, 高于正交扫描(D 组)对应的值 $A^U=0.2760$. 可见相比平行扫描, 正交扫描制造的钢基材各向异性更弱. B 组弹性对称性从正交各向异性退化为横观各向同性的现象也证实了该结论. 关于扫描策略, 目前 SLM 增材制造工艺技术学术研究中, 通常采用平行扫描、67°旋转扫描、正交扫描三种扫描策略, 它们各有特点: 对于平行扫描, 制备的 316L 钢构建方向断裂伸长率可达到 90% 以上^[39], 远高于另外两种扫描策略(50% 以下). 对于 67°旋转扫描, 制备的 316L 钢具有更低的各向异性^[40]. 对于正交扫描, 制备的 316L 钢具备最高的致密度(99.54%)和最优的综合力学性能^[35]. 在实际的工程应用和研究文献中, 三种策略选择并无显著倾向性.

2 杆系超材料各向同性优化

考虑到激光功率对杨氏模量影响不明显, 且 274.2 W, 正交扫描下 316L 钢基材具有最高的致密度, 本节采用 274.2 W, 正交扫描 316L 钢基材(正交各向异性)的弹性常数, 对相应立方对称杆系超材料开展弹性各向同性优化. 这三类杆系超材料的单胞见图 4(a)至图 4(c), 分别定义为 FCC-BCC, SC-

OT 和 SC-OT-BCC, 它们由等截面圆形直杆构建的面心立方(FCC)、体心立方(BCC)、简单立方(SC)、八角桁架(OT)单胞组合而成, 三种超材料单胞边长均为 $a=5 \text{ mm}$, 单胞相对密度均为 $\rho^*=20\%$, b 和 b' 分别为单胞顶点和面心上的球形节点半径. 根据单胞的晶格对称性和杆件空间角度, 独立的圆杆半径定义为: $R_i (i=1, 2, \dots, 8)$. 详细几何参数见表 2.

表 2 结构几何参数表(mm)

结构参数	FCC-BCC	SC-OT	SC-OT-BCC
a	5.0000	5.0000	5.0000
b	1.2000	1.1000	1.1000
b'	----	0.7000	0.600
R_1	0.4333	0.3326	0.3688
R_2	0.4333	0.3326	0.3688
R_3	0.4333	0.3326	0.3688
R_4	0.2722	0.3126	0.2673
R_5	0.2722	0.3126	0.2673
R_6	0.2722	0.3126	0.2673
R_7	0.3042	0.2602	0.1586
R_8	----	----	0.2594

为了说明基材弹性对称性对超材料对称性的影响, 本文首先假定基材为各向同性的铸造 316L 钢(杨氏模量 $E'=190 \text{ GPa}$, 剪切模量 $G'=76 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu'=0.25$). 使用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics 计算三类超材料等效的弹性矩阵 C ^[41], 并绘制相应杨氏模量云图, 见图 4(d)至图 4(f). 然后, 本文以选定的增材制造 316L 钢作为基材 ($C_{11}=358.57 \text{ GPa}$, $C_{22}=405.65 \text{ GPa}$, $C_{33}=287.72 \text{ GPa}$, $C_{12}=228.42 \text{ GPa}$, $C_{13}=210.50 \text{ GPa}$, $C_{23}=231.05 \text{ GPa}$, $C_{44}=84.70 \text{ GPa}$, $C_{55}=83.80 \text{ GPa}$, $C_{66}=79.50 \text{ GPa}$), 也绘出相应超材料模量云图, 见图 4(g)至图 4(i). 对比后可以看出: 当基材为各向同性时, 超材料为弹性各向同性, 当基材为正交各向异性时, 相应超材料不再为各向同性: FCC-BCC 超材料的空间杨氏模量最大值与最小值分别为 11.20

GPa、8.20 GPa, 差异达到 36.59%, 差异在三类超材料中最大。OT-SC 超材料的杨氏模量最大值与最小值分别为 11.12 GPa、8.76 GPa, 差异在三类超材料中最小, 但也达到 26.94%。这说明了超材料各向

同性优化的必要性。

需要说明的是: 这三类超材料单胞是经过本文人为设计的, 当基材为各向同性时候, 相应超材料恰好为各向同性。

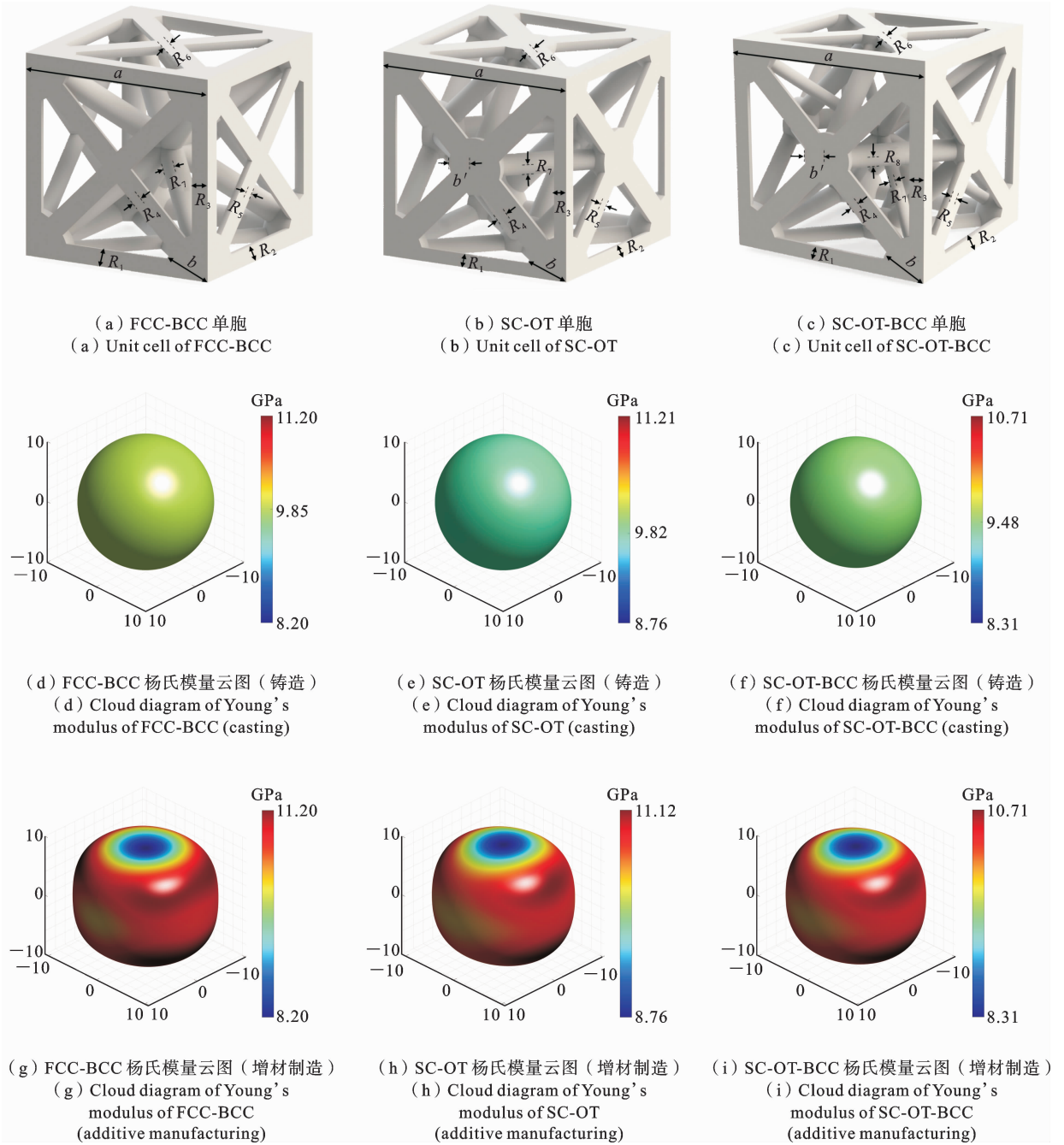


图 4 优化对象与杨氏模量云图

Fig. 4 Optimization objects and cloud diagram of Young's modulus

2.1 优化方法

超材料各向同性优化, 一般通过优化内部结构

参数来实现, 即通过以形控性来实现逆向设计^[30]。

对于以各向同性基材构建的立方对称超材料, 当超

材料为各向异性时,其各向同性优化只需要优化2~3个几何参数,如杆的直径^[8,11]、板的厚度^[8,42,43].在本文的研究中,根据单胞的晶格对称性和杆件空间角度,三类单胞需要独立优化的杆件半径数目 t 分别为 $t=7$ (FCC-BCC), $t=7$ (SC-OT), $t=8$ (SC-OT-BCC),即需要优化 7~8 个几何参数,优化难度增大.原因在于:相比文献中的各向同性基材,本文采用的基材对称性更低.

在本文的各向同性优化中,单胞边长和相对密度保持不变,在杆件相交处设置的球形节点半径 b 和 b' 亦保持恒定不变.优化流程见图 5,利用基材弹性常数和超材料初始几何参数,采用有限元方法计算超材料等效弹性矩阵 C ,通过等效弹性矩阵 C 表征超材料空间任意方向的杨氏模量.然后采用梯度下降法迭代优化超材料内部杆件半径,降低超材料空间模量差异,直至满足迭代收敛精度 0.5%,获得各向同性超材料.以 SC-OT-BCC 为例,包含 8 个优化参数,即 $R_i (i=1, 2, \dots, 8)$,优化收敛精度控制目

标为: $(E_{\max} - E_{\min})/E_{\min} \leq 0.5\%$. 优化迭代算法如下:

$$R_i(k+1) = (\bar{E}(k)/E_i(k))^m \cdot R_i(k) \quad i=1, 2, \dots, 7 \quad (3)$$

当 $t \leq 7$ 时候,即对于前 7 根杆,杆半径优化采用式(3), $R_i(k+1)$ 为第 k 次优化迭代后的 R_i 杆的杆半径.对于第 k 个优化步,单胞 7 个晶体学方向 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 杨氏模量定义为 $E_i (i=1, 2, \dots, 7)$,其均值为 $\bar{E}(k) = \sum_{i=1}^7 E_i(k)/7$,指数 $m (m \geq 1)$ 的取值满足 $m \propto \bar{E}(k)/E_i(k)$,用于控制杆半径优化幅度.即式(3)通过优化 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 101 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 方向的杆件半径 $R_i (i=1, 2, \dots, 7)$,来缩小超材料对应方向杨氏模量 $E_i (i=1, 2, \dots, 7)$ 之间的差异.当 $t=8$ 时,即对于第 8 根杆,根据超材料恒定相对密度 ρ^* 和公式(3)获得的其他 7 根杆半径,可直接确定其 $k+1$ 步的半径 $R_8(k+1)$.

对于只含有 7 个优化参数的 FCC-BCC 和 SC-OT 超材料,优化过程类似于 SC-OT-BCC.即首先优化并获得前 6 根杆半径 $R_i (i=1, 2, \dots, 6)$,第 7 根杆的杆半径 R_7 由恒定相对密度 ρ^* 和其他 6 根杆半径直接确定.

2.2 优化数值算例

上述优化迭代算法通过 MATLAB 实现^[44].三类超材料的杆件半径优化迭代过程分别见图 6(a)至图 6(c),经过 4 至 7 次优化迭代后可达到收敛精度.优化后单胞见图 6(d)至图 6(f),优化后杆件半径范围在 0.1432 至 0.5805 mm.对比优化前后的半径可知,半径增量最大杆为 SC-OT-BCC 中的 R_3 杆,增量达 35%,原因在于 R_3 杆轴向为 $\langle 001 \rangle$,对应 316L 钢基材杨氏模量最小方向(可参考图 2(d)).半径减少量最大的杆为 SC-OT 中的 R_4 杆,减少 10%,原因在于 R_4 杆轴向为 $\langle 111 \rangle$,对应 316L 钢基材杨氏模量最强方向.三类超材料中, R_1 优化前后的半径几乎保持不变,原因在于每个迭代步中, R_1 杆轴向为 $\langle 100 \rangle$,超材料在该方向杨氏模量 E_1 与模量均值 \bar{E} 接近,因而无须对 R_1 杆的半径做较大优化调整.以 SC-OT-BCC 为例,5 个迭代步中,

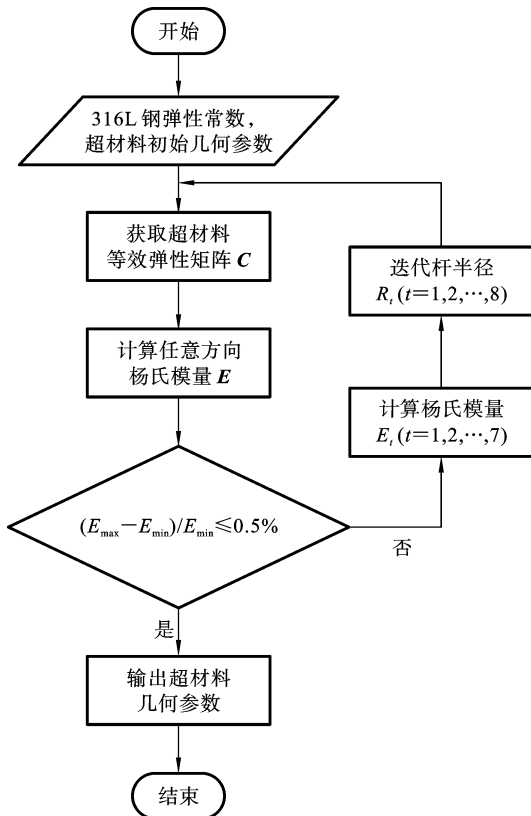


图 5 优化流程图

Fig. 5 Flow chart of optimization

E_1 与 \bar{E} 差异不超过 0.60%，故 R_1 杆半径增量仅 1.67%，变化可以忽略。

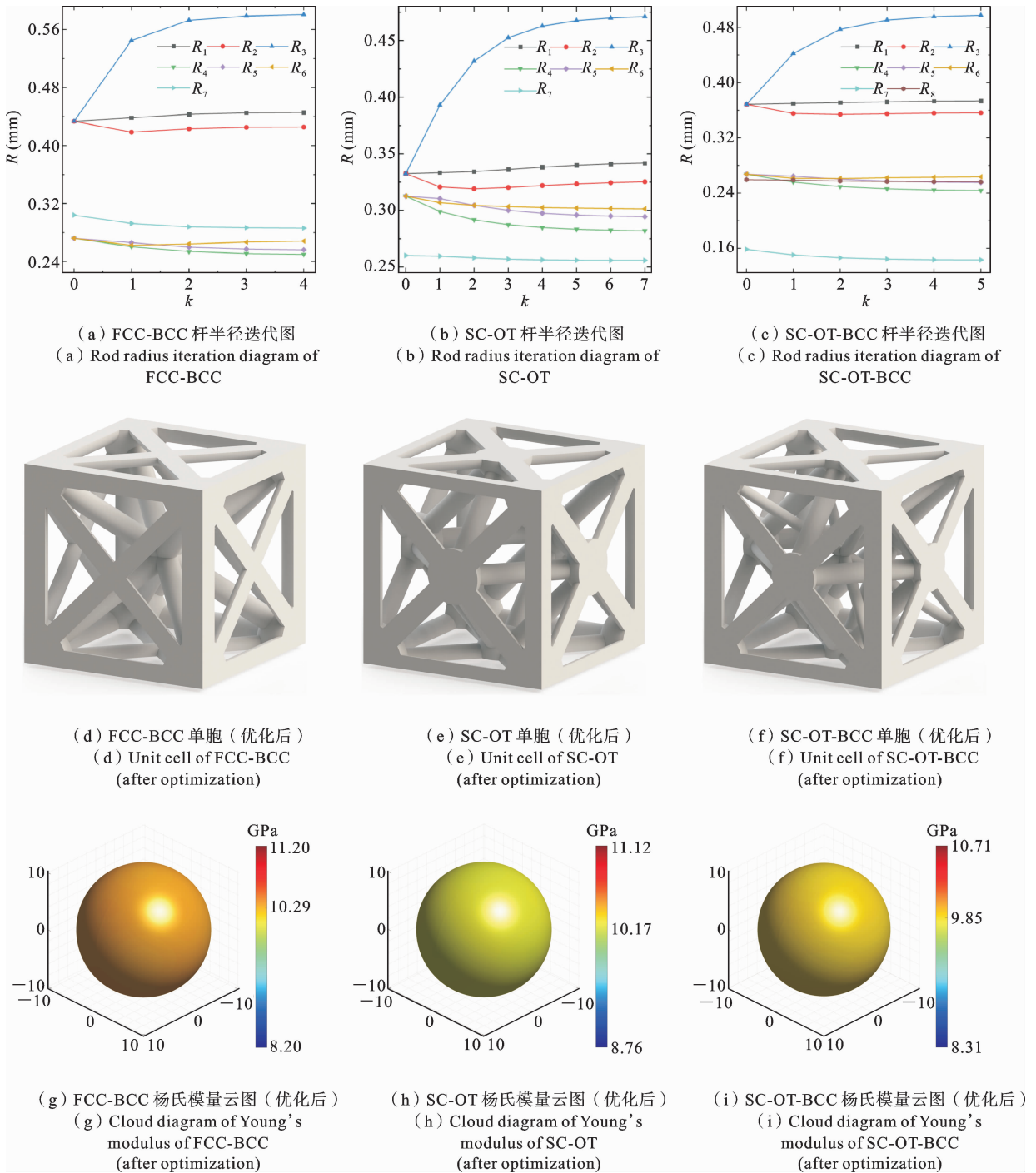


图 6 迭代优化图

Fig. 6 Iterative optimization diagram

FCC-BCC, SC-OT 和 SC-OT-BCC 三类超材料优化后模量云图见图 6(g)至图 6(i)。可以看到,经过优化后,三种超材料均实现了各向同性,优化后杨

氏模量分别为 10.29 GPa、10.17 GPa 和 9.85 GPa。当基材为铸造 316L 钢时,三类各向同性超材料杨氏模量分别为 9.85 GPa、9.82 GPa 和 9.48 GPa。这

说明增材制造与对应铸造的各向同性超材料具有近乎相同的杨氏模量,最大差异仅为 4.47%。本文对增材制造钢材(即图 1(c)中立方试样)空间上的杨氏模量进行均值计算,得到其杨氏模量均值为 181.29 GPa,接近于铸造钢的杨氏模量 190 GPa,从而间接解释了增材制造与对应铸造的各向同性超材料杨氏模量接近的原因。

本文进一步分析了 FCC-BCC, SC-OT 和 SC-OT-BCC 三类超材料剪切模量与泊松比。优化前后主要的数值结果见表 3。对于基材为增材制造 316L 钢,表中 G_{\max} , G_{\min} 与 ν_{\max} , ν_{\min} 为优化前超材料剪切模量、泊松比的最大值和最小值, G^* , ν^* 为优化后各向同性超材料剪切模量和泊松比, G^* , ν^* 对应基材为铸造 316L 钢时各向同性超材料剪切模量和泊松比。可以看到:优化前 FCC-BCC 超材料剪切模量最大值与最小值分别为 4.47 GPa、3.47 GPa,差异最大,达到 28.82%。SC-OT 超材料的剪切模量最大值与最小值分别为 4.43 GPa、3.67 GPa,差异在三类超材料中最小,但也达到 20.71%。优化后三类各向同性超材料剪切模量分别为 4.04 GPa、4.00 GPa 和 3.88 GPa,当基材为铸造 316L 钢时,三类各向同性超材料剪切模量分别为 3.91 GPa、3.91 GPa 和 3.77 GPa,增材制造与对应铸造的各向同性超材料具有几乎相同的剪切模量。

表 3 剪切模量与泊松比优化前后对比
(剪切模量单位:GPa)

Table 3 Comparisons of shear modulus and Poisson's ratio
(unit of shear modulus: GPa)

对比项	FCC-BCC	SC-OT	SC-OT-BCC
G_{\max}	4.47	4.43	4.30
G_{\min}	3.47	3.67	3.49
G_{\min}	4.04	4.00	3.88
G_{\min}^*	3.91	3.91	3.77
ν_{\max}	0.37	0.34	0.35
ν_{\min}	0.20	0.22	0.21
ν_{\min}	0.27	0.27	0.27
ν_{\min}^*	0.26	0.26	0.26

同样的,优化前 FCC-BCC 超材料泊松比最大值与最小值分别为 0.37、0.20,差异最大,达到 85.0%。SC-OT 超材料的泊松比最大值与最小值分别为 0.34、0.22,差异在三类超材料中最小,但也达到 54.55%。优化后三类各向同性超材料泊松比均为 0.27。当基材为铸造 316L 钢时,三类各向同性超材料泊松比均为 0.26。可以看到:增材制造与对应铸造的各向同性超材料具有几乎相同的泊松比,其泊松比、杨氏模量和剪切模量同样满足各向同性材料关系 $G = E/2(1 + \nu)$ 。

3 结论

本文通过超声共振实验研究 SLM 工艺中扫描策略和激光功率对 316L 钢各向异性的影响,基于实验获取的弹性常数,对 FCC-BCC, SC-OT 和 SC-OT-BCC 三类杆系超材料开展各向同性数值优化研究,得到如下结论:

(1) 实验分别给出了平行和正交扫描策略下, 214.2 W 和 274.2 W 功率对应的 316L 钢的弹性常数。在选取的激光功率范围内(对应激光能量密度 57.70~73.87 J/mm³),激光功率对杨氏模量影响可以忽略。平行扫描策略下最小杨氏模量出现在扫描方向,而正交扫描策略下最小杨氏模量出现在材料构建方向。

(2) 正交扫描策略下,316L 钢正交各向异性退化为横观各向同性的现象强烈依赖于激光功率。在 214.2 W 功率下,316L 钢可视为横观各向同性;在 274.2 W 功率下,316L 钢仍保持正交各向异性。相同激光功率下,正交扫描比平行扫描制造的 316L 钢的各向异性更弱。

(3) 通过分别优化 FCC-BCC, SC-OT 和 SC-OT-BCC 三类杆系超材料的杆件半径,本文均获得了弹性各向同性超材料,并且优化后的超材料与对应铸造各向同性超材料具有几乎相同的弹性力学性能。考虑这类超材料铸造的难度以及 SLM 增材制造钢材显著的各向异性,本文的优化工作可为 SLM 增材制造各向同性超材料的逆向设计提供参考方案。

参考文献

- [1] Jiao P, Mueller J, Raney J R, Zheng X, Alavi A H. Mechanical metamaterials and beyond [J]. *Nature communications*, 2023, 14(1): 6004.
- [2] Yu X, Zhou J, Liang H, Jiang Z, Wu L. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 114-173.
- [3] Berger J B, Wadley H N, McMeeking R M. Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness[J]. *Nature*, 2017, 543(7646): 533-537.
- [4] Han Z, Wei K, Liu X, Long Y, Li J, Chen X. Developing mechanical metamaterials under an adaptable topology optimization design framework [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2023, 36(2): 306-316.
- [5] Kolken H M, Zadpoor A. Auxetic mechanical metamaterials[J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(9): 5111-5129.
- [6] 张啸雨, 刘畅, 施丽铭, 蒋旭东, 曾惠忠, 周浩, 郭旭. 蒙皮点阵一体化支撑结构的移动可变形组件优化设计及空间站应用[J]. *固体力学学报*, 2022, 43(5): 551-563. (Zhang X Y, Liu C, Shi L M, Jiang X D, Zeng H Z, Zhou H, Guo X. Optimal design of shell-lattice infill integrated supporting structure based on the method of moving morphable components and its application in china space station[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2022, 43(5): 551-563. (in Chinese))
- [7] Li Z, Zhai W, Li X, Yu X, Guo Z, Wang Z. Additively manufactured dual-functional metamaterials with customisable mechanical and sound-absorbing properties [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(4): 864-880.
- [8] Duan S, Wen W, Fang D. Additively-manufactured anisotropic and isotropic 3D plate-lattice materials for enhanced mechanical performance: Simulations & experiments[J]. *Acta Materialia*, 2020, 199: 397-412.
- [9] Zhang Z, Zhang L, Song B, Yao Y, Shi Y. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of lightweight and high-strength mechanical metamaterials[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 26: 101268.
- [10] 肖李军, 李实, 冯根柱, 石高泉, 宋卫东. 增材制造三维微点阵材料力学性能表征与细观优化设计研究进展[J]. *固体力学学报*, 2023, 44(6): 718-754. (Xiao L J, Li S, Feng G Z, Shi G Q, Song W D. Research progress in mechanical characterization and mesoscopic optimal design of additively-manufactured 3D microlattice materials[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2023, 44(6): 718-754. (in Chinese))
- [11] Xu S, Shen J, Zhou S, Huang X, Xie Y M. Design of lattice structures with controlled anisotropy [J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 443-447.
- [12] Tancogne-Dejean T, Mohr D. Elastically-isotropic elementary cubic lattices composed of tailored hollow beams[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 22: 13-18.
- [13] Ma Q, Zhang L, Ding J, Qu S, Fu J, Zhou M D, Fu M W, Song X, Wang M Y. Elastically-isotropic open-cell minimal surface shell lattices with superior stiffness via variable thickness design[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102293.
- [14] Zhou B, Xu P, Li W, Liang Y, Liang Y. Microstructure and anisotropy of the mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. *Metals*, 2021, 11(5): 775.
- [15] Hitzler L, Hirsch J, Heine B, Merkel M, Hall W, Öchsner A. On the Anisotropic Mechanical Properties of Selective Laser-Melted Stainless Steel[J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1136.
- [16] Tang W, Tang Z, Lu W, Wang S, Yi M. Modeling and Prediction of Fatigue Properties of Additively Manufactured Metals[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2023, 36(2): 181-213.
- [17] Somlo K, Chauhan S S, Niordson C F, Poullos K. Uniaxial tensile behaviour of additively manufactured elastically isotropic truss lattices made of 316L[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2022, 246-247.
- [18] Zhang L, Ma Q, Ding J, Qu S, Fu J, Fu M W, Wang M Y. Design of elastically isotropic shell lattices from anisotropic constitutive materials for additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103185.
- [19] Liang C, Yin Y, Wang W, Yi M. A thermodynamically consistent non-isothermal phase-field model for

- selective laser sintering[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 259: 108602.
- [20] Zhou X, Li K, Zhang D, Liu X, Ma J, Liu W, Shen Z. Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 631: 153-164.
- [21] Sun Z, Tan X, Tor S B, Chua C K. Simultaneously enhanced strength and ductility for 3D-printed stainless steel 316L by selective laser melting[J]. *NPG Asia Materials*, 2018, 10(4): 127-136.
- [22] Javidrad H, Salemi S. Determination of elastic constants of additive manufactured Inconel 625 specimens using an ultrasonic technique[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107: 4597-4607.
- [23] Charmi A, Falkenberg R, Ávila L, Mohr G, Sommer K, Ulbricht A, Sprengel M, Neumann R S, Skrotzki B, Evans A. Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 799: 140154.
- [24] Zinovieva O, Romanova V, Balokhonov R. Effects of scanning pattern on the grain structure and elastic properties of additively manufactured 316L austenitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142447.
- [25] Yuan X, Li W, Deng M. Non-contact characterization of material anisotropy of additive manufacturing components by electromagnetic acoustic resonance technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 35(2): 026001.
- [26] Bernard S, Grimal Q, Laugier P. Accurate measurement of cortical bone elasticity tensor with resonant ultrasound spectroscopy[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, 18: 12-19.
- [27] Fisher K A. Estimation of elastic properties of an additively manufactured lattice using resonant ultrasound spectroscopy[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(6): 4025-4036.
- [28] Rossin J, Goodlet B, Torbet C, Musinski W, Cox M, Miller J, Groeber M, Mayes A, Biedermann E, Smith S, Daly S, Pollock T. Assessment of grain structure evolution with resonant ultrasound spectroscopy in additively manufactured nickel alloys[J]. *Materials Characterization*, 2020, 167: 110501.
- [29] Ma Q, Zhang L, Ding J, Qu S, Fu J, Fu M W, Song X, Wang M Y. Analytical design of stretching-dominated truss lattices with tailored elasticity from transversely isotropic base materials[J]. *Materials & Design*, 2023, 230: 111995.
- [30] 廉艳平, 王潘丁, 高杰, 刘继凯, 李取浩, 刘长猛, 贺小帆, 高亮, 李好, 雷红帅, 李会民, 肖登宝, 郭旭, 方岱宁. 金属增材制造若干关键力学问题研究进展[J]. *力学进展*, 2021, 51(3): 648-701. (Lian Y P, Wang P D, Gao J, Liu J K, Li Q H, Liu C M, He X F, Gao L, Li H, Lei H S, Li H M, Xiao D B, Guo X, Fang D N. Fundamental mechanics problems in metal additive manufacturing: A state-of-art review [J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(3): 648-701. (in Chinese))
- [31] Migliori A, Maynard J. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(12).
- [32] Wu J, Wang J, Xie L, Zhgoon S, Wu R, Zhang A, Ma T, Du J. An analysis and experimental validation of natural frequencies of elastic ellipsoids with the Rayleigh-Ritz method [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023, 30(17): 3491-3501.
- [33] 丁军磊, 吴景慧, 吴丹, 马廷锋, 王骥. 超声共振法测定圆柱体材料弹性常数的影响因素分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(6): 53-58. (Ding J L, Wu J H, Wu D, Ma T F, Wang Y. The influence factors for measurements of elastic constants of isotropic steel cylinders by resonant ultrasound spectroscopy[J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2020, 33(6): 53-58. (in Chinese))
- [34] Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, 2(2): 164-168.
- [35] Zhang Z, Chu B, Wang L, Lu Z. Comprehensive effects of placement orientation and scanning angle on mechanical properties and behavior of 316L stainless steel based on the selective laser melting process[J].

- Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 166-175.
- [36] Wang H, Jiang P, Yang G, Yan Y. An investigation of the anisotropic mechanical properties of additive-manufactured 316L SS with SLM [J]. Materials, 2024, 17(9): 2017.
- [37] Charmi A, Falkenberg R, Ávila L, Mohr G, Sommer K, Ulbricht A, Sprengel M, Neumann R S, Skrotzki B, Evans A. Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 799: 140154.
- [38] Ranganathan S I, Ostoja-Starzewski M. Universal elastic anisotropy index[J]. Physical review letters, 2008, 101(5): 055504.
- [39] Wang X, Muñoz-Lerma J A, Shandiz M A, Sanchez-Mata O, Brochu M. Crystallographic-orientation-dependent tensile behaviours of stainless steel 316L fabricated by laser powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766: 138395.
- [40] Somlo K, Frodal B H, Funch C V, Poullos K, Winter G, Hopperstad O S, Borvik T, Niordson C F. Anisotropic yield surfaces of additively manufactured metals simulated with crystal plasticity[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2022, 94: 104506.
- [41] COMSOL, Inc. COMSOL Multiphysics, Version 6.1 [EB/OL]. <https://www.comsol.com>, 2023.
- [42] Tancogne-Dejean T, Diamantopoulou M, Gorji M B, Bonatti C, Mohr D. 3D plate-lattices: an emerging class of low-density metamaterial exhibiting optimal isotropic stiffness[J]. Advanced Materials, 2018, 30(45): 1803334.
- [43] Qi D, Yu H, Liu M, Huang H, Xu S, Xia Y, Qian G, Wu W. Mechanical behaviors of SLM additive manufactured octet-truss and truncated-octahedron lattice structures with uniform and taper beams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 163: 105091.
- [44] The MathWorks, Inc. MATLAB, Version R2023a [EB/OL]. <https://www.mathworks.com>, 2023.

Study on the Optimization of Elastic Isotropy in SLM Additive Manufactured 316L Steel Metamaterials

Chenhua Yan¹ Dongming Li² Zewen Hu¹ Wuhuai Yan¹ Youdi Kuang^{1,3}

(¹*School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, Guangzhou, 510632*)

(²*Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou, 511455*)

(³*School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen, 529020*)

Abstract Most existing isotropic metamaterial designs assume that the base material possesses isotropic symmetry. However, 316L steel produced by selective laser melting (SLM) typically exhibits mechanical anisotropy, which strongly depends on the manufacturing process and parameters. The limited experimental studies currently available are insufficient to fully reveal the elastic symmetry of 316L steel under different scanning strategies, and the quantitative impact of varying laser powers on Young's modulus remains unknown. In this study, ultrasonic resonance experiments were conducted to characterize the elastic constants of 316L steel under two typical laser scanning strategies (parallel and orthogonal scanning) and two laser power levels (214.2 W and 274.2 W). The results indicate that under the orthogonal scanning strategy, the symmetry of the steel degraded to transverse isotropy at a power of 214.2 W, while the material remained orthotropic at a power of 274.2 W, indicating that transverse isotropy results from specific laser power. Compared to orthogonal scanning, 316L steel produced using parallel scanning exhibited stronger anisotropy. Within the range of laser powers investigated, Young's modulus was found to be insensitive to power variations. Based on the experimentally obtained elastic constants and finite element simulations, we optimized the elastic isotropy of three types of truss metamaterials: FCC-BCC, SC-OT, and SC-OT-BCC, achieving shape control by adjusting rod dimensions. The optimization results showed that isotropic metamaterials made from SLM 316L steel and cast 316L steel possess nearly identical elastic properties. From an application perspective, this research offers feasible solutions to overcome the technical challenges of producing isotropic metamaterials using SLM additive manufacturing.

Key words metal additive manufacturing, mechanical metamaterials, 316L steel, elastic isotropic optimization