

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107705

基于双模式超声换能器的选择性激光熔化 316L 制件弹性常数无损表征研究*

戴安帮,袁懋诞,吴俊伟,胡子健,纪轩荣

(广东工业大学 省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室 广州 510006)

摘要:选择性激光熔化技术(SLM)可以快速成型任意结构的金属零件,但其制件的内部组织和材料性能与传统制件有着显著区别。基于双模式超声换能器对 SLM 316L 不锈钢制件的不同方向弹性常数及其分布进行表征研究。首先通过设计并制备高性能双模式超声换能器,搭建超声弹性常数分布测量系统。对 SLM 制备的 316L 不锈钢试样依次进行纵波和两个正交横波声速测量,获得同位置处不同方向弹性模量和泊松比。通过不同成型方向的声速测量,发现 SLM 制件在堆积 z 方向熔化层内呈现显著区别,表现出明显的各向异性。而 $y-z$ 平面内弹性常数分布表征表明,杨氏模量 E_{13} 大于 E_{12} ,泊松比 σ_{13} 小于 σ_{12} ,且制件各熔化层弹性常数分布规律相似。此外,还讨论了加工过程中扫描速度和扫描间距等工艺参数对弹性参数的影响。选择性激光熔化制件弹性常数的有效无损表征将为增材制件内部质量控制和工艺改善提供技术基础。

关键词:选择性激光熔化;双模式超声换能器;弹性常数;各向异性;工艺参数

中图分类号: TH824 TB551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Nondestructive characterization of elastic constants for 316L parts by selective laser melting based on dual-mode ultrasonic transducer

Dai Anbang, Yuan Maodan, Wu Junwei, Hu Zijian, Ji Xuanrong

(State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Selective laser melting (SLM) can be used for rapid forming of metal parts with arbitrary structure, but the internal structure and material properties of the parts are significantly different from traditional parts. The elastic constants and their distribution in different directions of SLM 316L stainless steel parts are characterized based on a dual-mode ultrasonic transducer. Firstly, a measurement system of ultrasonic elastic constant distribution is built by designing and fabricating a high-performance dual-mode ultrasonic transducer. The longitudinal wave and two orthogonal shear wave velocities of 316L stainless steel samples prepared by SLM are measured successively, and the elastic modulus and Poisson's ratio in different directions at the same position are obtained. Through the measurement of sound velocity in different forming directions, it is found that SLM parts show significant difference in the melted layer in the z direction of stacking, showing obvious anisotropy. The distribution of elastic constants in the $y-z$ plane shows that Young's modulus E_{13} is greater than E_{12} , and Poisson's ratio σ_{13} is less than σ_{12} , and each melted layer of the part has similar elastic constant distribution rule. In addition, the influences of main process parameters such as scanning speed and hatch space on the elastic constants are also discussed. The effective nondestructive characterization of elastic constants of selective laser melting parts will provide a technical basis for internal quality control and process improvement of additive manufacturing parts.

Keywords: selective laser melting; dual-mode ultrasonic transducer; elastic constants; anisotropy; process parameters

收稿日期:2021-04-02 Received Date: 2021-04-02

* 基金项目:国家自然科学基金(51805097,51975131,11804059)、广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2016ZT06G375)、国家重点研发计划(2018YFF01010500)项目资助

0 引言

增材制造基于离散化逐点或逐层堆积成型原理,利用实体三维模型逐层近净成形来制造零件,实现了零件的“自由制造”^[1-2]。英国《经济学人》杂志认为“它与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”^[3]。其中,选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)是金属增材制造领域中的重要技术之一,通过高能量密度的激光束将金属粉末快速熔化,然后快速冷却成形,具有致密度高、表面质量好和成形精度高等优势,广泛应用于航空航天、医疗器械和汽车制造等领域^[4]。

这些关键领域通常对零部件的力学性能有很高要求,而由于离散-堆积的独特制造工艺,增材制件的力学性能与传统制件显著不同。因此,有效的金属增材制件力学性能表征技术研究具有重要实际工程意义。弹性常数作为金属材料弹性形变的重要力学性能指标,不仅可以评估材料本身特性,而且为零件的可靠性评估和失效分析提供重要依据。目前,力学性能测试大多采用静态拉伸法^[5],但该方法会给制件带来损伤,且难以测定特殊制备的不规则材料及脆性材料,不能很好满足生产实践的需求。其他无损检测技术,如纳米压痕^[6]、X射线衍射^[7-8]和数字图像技术^[9]等,仪器设备价格昂贵、便携性差,对被测制件几何尺寸和测试环境要求高,无法在实际工程中广泛应用。

超声法具有适应范围广、测量速度快、无损、设备便携等优势,在材料力学性能无损表征中受到广泛关注。中国矿业大学的Hu等^[10]采用纵波探头和横波探头分别测量金属合金中的纵、横波声速,计算出各向同性材料中弹性常数,并分析了环境温度的影响。以色列Sol等^[11]对SLM制备的AlSi10Mg合金制件不同成型方向的弹性常数进行表征,发现弹性常数与其成型方向有关。美国俄亥俄州立大学Foster等^[12]分别通过三方向的纵横波声速测量,实现Al 3003-H18合金超声增材制件的弹性常数测量,并分析了弹性常数随界面孔隙的变化。Javidrad等^[13]对激光粉末床熔化技术制造的Inconel 625镍基合金制件,测量8个凸多面体试样不同方向的纵横波声速,利用刚度矩阵实现正交各向异性弹性常数的无损表征。以上超声表征方法都是通过纵波和横波传感器分别测量纵波和横波声速,从而获得各向同性或各向异性材料的弹性常数,这种方式需要制备多个样品,分别在不同方向进行声速测量,效率低下,且最终所得的弹性常数为被测试样的平均值,而不能反映制件的弹性常数分布状态。北京工业大学宋国荣等^[14]利用聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)线聚焦超声探头同时测量SLM制备的Inconel 718镍基合金制件的纵波和表面波声速,结合超声显微测试系统实现了不同方向、不同位

置的弹性常数测量。然而,超声显微系统扫查范围小、检测效率低,难以实现大范围区域的弹性常数快速、全面测量。在岩土工程领域里,王赞等^[15]将纵横波晶片合为一体,同时获取岩心的纵横波声速,用于岩心弹性常数测量。这种纵横波组合传感器不仅可以快速而有效地获得岩样的弹性常数分布,而且可以用来测量岩石的动态弹性模量和泊松比。

与岩样类似,金属增材制件在成型过程中受堆积方向冷却速率和热交换梯度的影响,制件易形成柱状晶粒结构,使得制件表现出材料各向异性^[16],而且内部组织随工艺参数变化而呈现不均匀变化,因此,其弹性常数的分布式测量至关重要。本文将基于纵横波一体的双模式超声换能器对选择性激光熔化316 L不锈钢制件的弹性常数分布式测量及其工艺参数影响开展研究。针对增材制件中存在的严重声散射和衰减问题,设计并制备高性能双模式超声换能器。搭建超声扫查系统,实现不同方向、不同位置的弹性常数测量,并讨论扫描速度和扫描间距等主要工艺参数对弹性常数的影响,为增材制件内部质量评估和工艺优化奠定技术基础。

1 SLM 试样制备

选择性激光熔化是利用高能量密度激光束的热作用对金属粉末进行快速熔化和快速凝固,其制件成型质量主要取决于样品粉末特性和工艺参数^[17]。在制件开始扫描加工前,通常需将工作空间密封抽真空后注入保护气体形成无氧环境,以保证制件成型质量。此外,为了减小打印过程中产生的热应力集中,降低打印过程中变形的风险,本文将棋盘式网格扫描方式制备SLM试样,即将大横截面划分为若干的小棋盘格,以优化的顺序跳跃扫描加工制件^[18-19],如图1所示,上表面箭头和编号①~⑧分别表示打印过程中激光扫描方向和跳跃扫描顺序, y - z 表面虚线箭头和编号#1~#15分别表示弹性常数分布测量实验中探头相对样品移动的方向和测量点的顺序。

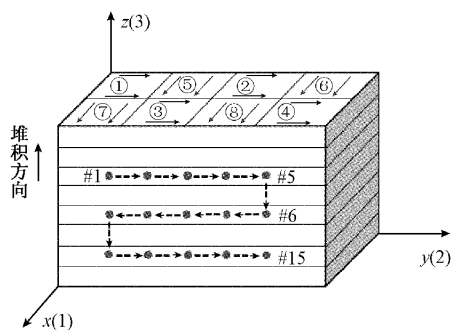


图1 棋盘式网格扫描方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of checkerboard grid scanning mode

SLM制件的力学性能受打印过程中多个工艺参数影响,为研究扫描速度和扫描间距等主要工艺参数对SLM制件弹性常数的影响,本文控制激光光斑直径为60 μm,铺粉层厚度为30 μm,激光功率为300 W等参数不变。本实验采用广东汉邦激光科技有限公司生产的SLM-100C成型设备进行试样制备,共制备5组不同工艺参数的试样,通过线切割机加工将样品与基板分离,具体加工工艺参数如表1所示。为实现弹性常数表征,需测量各样品的质量密度。本文采用华志PTX-FA210S电子天平对样品的质量密度进行测量,如表1所示。可以看出,随着扫描速度或者扫描间距增加,增材制件的质量密度不断减小。此外,为准确测量试块声速,需对最终成型样品的尺寸进行准确测量,采用游标卡尺对每个样品3个成型方向分别测量6次求平均值作为样品厚度,样品不同成型方向厚度如表1所示。

表1 样品加工工艺参数、测量密度和尺寸
Table 1 Processing parameters, density and sizes of SLM specimens

样品	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	扫描间距 /mm	质量密度 /(g·cm ⁻³)	x /mm	y /mm	z /mm
1	2 600	0.07	7.41	29.61	34.30	20.74
2	2 500	0.07	7.45	29.75	34.74	20.64
3	2 700	0.07	7.32	29.79	34.67	20.75
4	2 600	0.06	7.52	29.61	34.75	20.59
5	2 600	0.08	7.11	29.63	34.62	20.65

2 基本原理

2.1 弹性常数与声速的关系

超声法测量材料的弹性常数是基于超声声速与弹性常数的相互关系。根据弹性动力学理论,超声波在各向同性介质中传播的纵波声速和横波声速与材料的密度和弹性常数有关,可用如下方程表示^[20-21]:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (2)$$

其中, V_L 为纵波声速; V_S 为横波声速; ρ 为密度; E 为杨氏模量; σ 为泊松比。在各向异性材料中,不同方向声速和弹性常数都各不相同。为考虑各向异性,以 V_{ij} 表示声速,其中 i 为波形传播方向, j 为波形振动方向。当 $i = j$ 时,为纵波;反之,则为横波。利用不同模式超声声速,可以得到不同方向的弹性常数分量,如

式(3)、(4)所示:

$$\sigma_{ij} = \frac{V_{ii}^2 - 2V_{ij}^2}{2(V_{ii}^2 - V_{ij}^2)} \quad (3)$$

$$E_{ij} = \frac{\rho V_{ij}^2 (3V_{ii}^2 - 4V_{ij}^2)}{V_{ii}^2 - V_{ij}^2} \quad (4)$$

当利用纵横波一体探头同时测得SLM制件某位置的纵波声速 V_{ii} 和两个横波声速 V_{ij} 后,结合制件密度 ρ 测量,由式(3)和(4)可得该点被测制件两个方向的泊松比 σ_{ij} 和杨氏模量 E_{ij} 。再结合扫查系统,可以实现SLM制件中弹性常数分布测量。

2.2 超声弹性参数测量系统

搭建弹性常数超声测量系统,如图2所示,其主要由双模式超声换能器、XYZR精密移动平台、DPR500脉冲发射接收器、示波器和计算机组成。由DPR500脉冲发射接收器激励脉冲能量为12.4 μJ的尖峰脉冲信号激励换能器产生超声波。在同一位置,该系统通过双模式换能器可以依次激励纵波和横波模式,垂直入射至制件,并由示波器采集底面回波信号。通过将该换能器旋转90°,实现3种不同模式超声波(一种纵波和两种相互正交横波)的检测。根据脉冲回波法,计算第1次底面反射回波的峰值点所对应的时间 t_{B1} 和第2次底面反射回波的峰值点所对应的时间 t_{B2} 之间的时间差,结合制件的厚度,可以确定3种模式的超声波在该方向的传播速度^[22]。

$$V = \frac{2h}{t_{B2} - t_{B1}} \quad (5)$$

其中, h 为制件厚度, $(t_{B2} - t_{B1})$ 为第1次底波和第2次底波的时间差。由这3种模式的超声波声速和密度,根据式(3)和(4)获得该位置两个不同方向的杨氏模量和泊松比。结合XYZR精密移动平台(其中精度为30 μm,平行度为20 μm)可以实现弹性常数的分布式测量。该移动平台可以实现试样与换能器之间准确的相对移动,同时保证换能器与样品表面之间的高平行度,以确保声束垂直入射至待测样品,从而实现制件弹性常数分布式测量的准确性。

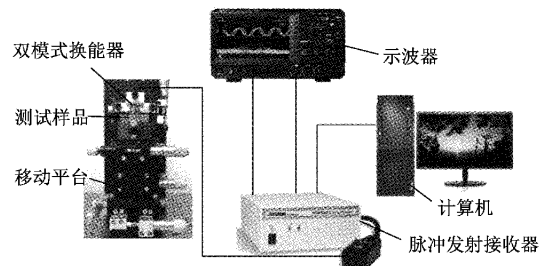


图2 超声弹性参数测量系统

Fig. 2 Ultrasonic testing system for elastic constants

3 双模式超声换能器的设计与制备

为实现单位位置弹性常数的快速、有效测量,本文设计并制备适用于增材制件的高性能纵横波组合换能器。该换能器结构示意图及实物如图3所示,包括匹配层、纵波压电晶片、横波压电晶片、阻尼块、吸声材料、电缆线以及外壳等,其中纵波晶片和横波晶片分别为纵向极化的锆钛酸铅压电陶瓷(lead zirconate titanate piezoelectric ceramics, PZT-5H)和横向极化的PZT-2压电陶瓷,封装后的换能器尺寸为 $\phi 14\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 。纵波压电晶片和横波压电晶片以内嵌包含式组合在一起,外环为纵波晶片激励纵波,内部为横波晶片激励横波。其特点在于可以在不移动换能器的情况下,同时直接激励和接收纵横波信号,实现制件同一位置的纵波和横波声速的同时测量。而且横波信号是由压电晶片横向极化直接产生,无需纵波通过斜入射楔块而经波形转换得到,从而可以避免波形转换带来的杂波信息^[23]。此外,由于横波晶片的正交特性,通过旋转该换能器方向,可以便捷地实现同位置处两个正交横波的声速测量,从而适用于非均质各向异性制件的弹性常数测量及分布状态快速准确表征。

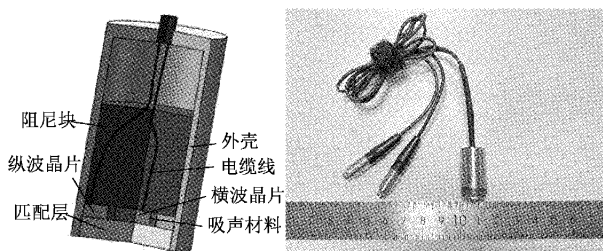


图3 双模式超声换能器结构示意图及实物

Fig. 3 Schematic diagram and real product of the dual-mode ultrasonic transducer

为验证双模式换能器测量结果的准确性和可靠性,以普通铝合金试块作为测试样品,通过直接接触法垂直入射,测试纵横波的脉冲回波响应。如图4所示为纵波传感器的前两次底面回波 A-scan 信号及第一次底面回波的频率响应。该换能器在铝块中的纵波和横波第一次底面回波信号的信噪比分别为 31.78 dB 和 27.69 dB。纵波和横波换能器具有相同的中心频率为 5.80 MHz, -6 dB 相对带宽分别为 43.45% 和 50.34%, 如表2所示。该带宽较小,可以保证声波在衰减较大的增材制件中具有足够穿透能力,实现两次底波信号声时差的准确测量。此外,实验测得纵波和横波在铝板中传播的速度分别为 6.40 km/s 和 3.10 km/s,与铝中的超声声速相符。

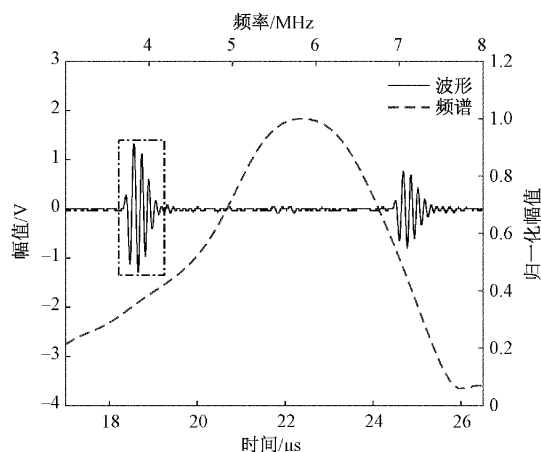


图4 纵波时域信号及频谱

Fig. 4 Received waveform and its spectrum of longitudinal wave

表2 换能器性能测试结果

Table 2 Results of the ultrasonic transducer

参数	纵波直探头	横波直探头
中心频率/MHz	5.80	5.80
-6 dB 带宽/%	43.45	50.34

4 实验结果与分析

4.1 成型方向的声速测量

针对 SLM 制件的成型特性,首先考察不同方向上声速的区别。采用超声测量系统对 SLM 316 L 不锈钢制件 3 个成型方向(x 、 y 和 z 方向)纵波传播声速进行测量。为减少声速测量过程中的误差,在任一方向法向面上随机测量 8 次求平均值作为该方向的纵波声速。图5所示为样品1中3个成型方向的声速大小。由图5可知,在同一平面内测量的纵波声速分布较为均匀, x 、 y 和 z 3 个方向的最大相对误差分别为 0.45%、0.47% 和 0.61%。而 3 个方向的纵波速度之间存在明显差异,其中沿 z 方向传播的纵波速度最低,为 5 249.25 m/s,与 z 方向相比, x 与 y 方向有 2.29% 和 3.06% 差别。此外,在 2~5 号 316 L 不锈钢增材制件中也具有类似的规律。这表明,SLM 制件在 3 个方向表现出明显的各向异性,尤其是在堆积方向。这是由于在这个方向上,每个激光熔化堆叠层的质量密度存在微小波动,当超声波穿过低质量密度区域时,由于粒子之间结合力的减弱,使得声速存在降低的现象^[24]。由于熔化层面内 x 和 y 方向声速相差小于 1%,而与堆积 z 方向声速差别较大,因此,该 SLM 增材制件可近似认为是横观各向同性材料。

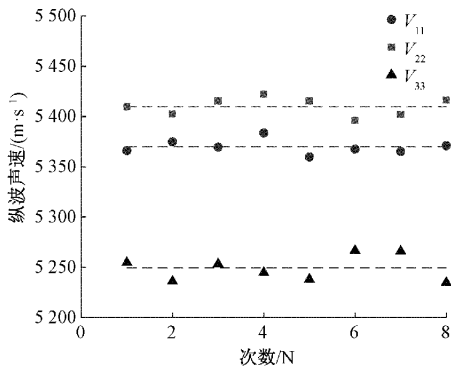


图 5 不同成型方向纵波声速分布

Fig. 5 Distribution of longitudinal wave velocity in different forming directions

4.2 弹性常数的分布测量

为实现 SLM 316 L 不锈钢制件弹性常数表征,还需要对样品同一位置的纵波声速和横波声速进行测量。且由于 SLM 制件在堆积方向与堆积面内差异较大,因此,对堆积侧面 $y-z$ 面的弹性常数进行表征,需要测量两个正交方向的横波速度。本文采用双模式换能器对 SLM 316 L 不锈钢制件 $y-z$ 平面内 0° 和 90° 两个方向的横波声速依次进行测量,其中 0° 方向为制件堆积方向与横波振动方向平行,即横波声速为 V_{13} ; 90° 方向为制件堆积方向与横波振动方向垂直,即横波声速为 V_{12} 。再按图 1 所示扫描顺序对 $y-z$ 平面两个方向的横波传播速度进行测量,步距为 2 mm,样品 1 在 $y-z$ 平面两个方向横波声速分布如图 6 所示。虽然同一平面内纵波声速没有明显差异,但是两个横波声速存在恒定差异。可以看出 0° 方向的横波声速大于 90° 方向的横波声速,即 V_{13} 大于 V_{12} ,且二者变化趋势相似,再次说明 SLM 制件呈现明显各向异性。

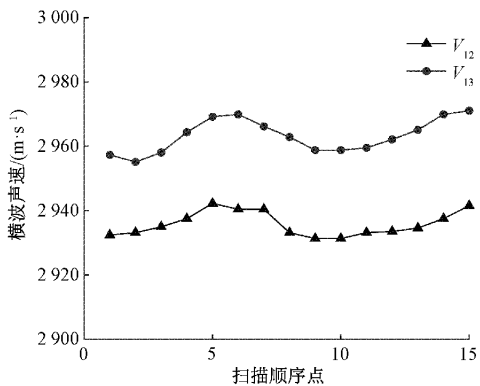


图 6 $y-z$ 平面内 0° 和 90° 方向横波声速分布

Fig. 6 Distribution of shear wave velocity in the 0° and 90° directions in the $y-z$ plane

根据式(3)、(4)得到样品 1 在 $y-z$ 平面内 0° 和 90° 两个方向杨氏模量和泊松比,平面分布如图 7、8 所示。由图 7 可知, $y-z$ 平面内 0° 测得的杨氏模量大于 90° 测得的杨氏模量,即 E_{13} 大于 E_{12} ,其中 E_{13} 的平均值为 166.64 MPa,而 $E_{12} = 164.33$ MPa,相对误差为 1.41%。由图 8 可知, $y-z$ 平面内 0° 测得的泊松比小于 90° 测得的泊松比,即 σ_{13} 小于 σ_{12} ,其中 σ_{13} 的平均值为 0.280,而 $\sigma_{12} = 0.286$,相对误差为 2.14%。这是因为激光熔化时层内温度较高,而与其正交的堆积方向是直接冷却成型的,使得熔化层与堆积方向存在巨大温度差,材料的晶格方向有所改变,导致制件 $y-z$ 平面内两方向的材料组织存在较大差异,弹性常数发生改变^[14]。同时可以看出,在 $y-z$ 平面内各层间弹性常数具有相同的变化趋势,说明堆积方向各熔化层的成型质量相似。对其他工艺参数的制件,虽然大小有所区别,但是其分布也存在着相似分布规律。

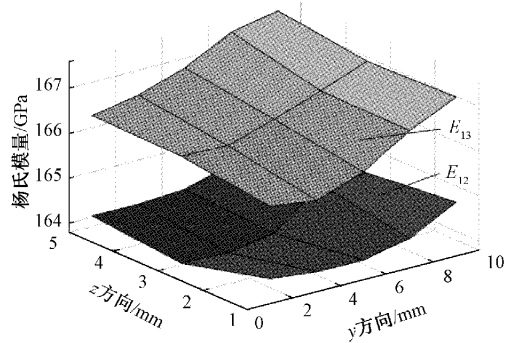


图 7 $y-z$ 平面 0° 和 90° 方向杨氏模量分布

Fig. 7 Distribution of Young's modulus in the 0° and 90° directions in the $y-z$ plane

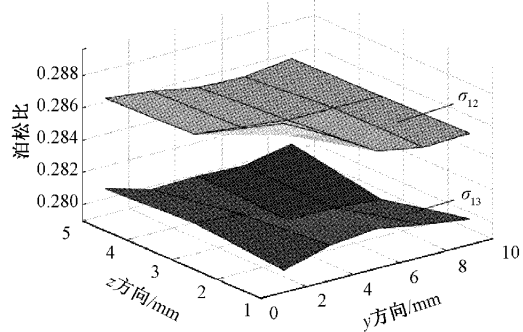


图 8 $y-z$ 平面 0° 和 90° 方向泊松比分布

Fig. 8 Distribution of Poisson's ratio in the 0° and 90° direction in the $y-z$ plane

4.3 工艺参数对弹性常数的影响

为了进一步研究工艺参数对 SLM 制件弹性常数的影响,改善 SLM 成型工艺,本文还分析了加工过程中扫描速度和扫描间距等关键工艺参数对弹性参数的影响。图 9 所示为扫描速度对杨氏模量和泊松比的影响趋势。由结果可知,在 2 500~2 700 mm/s 范围内,随着激光扫描速度的增大,增材制件在 y - z 平面内两个方向的杨氏模量和泊松比均有减小的趋势。这是由于扫描速度的增大,使得金属粉末未得到的激光能量密度不断减小,输入的热量不足以完全熔化金属粉末,易形成内部微小孔隙、闭合裂纹等缺陷,而这些微观缺陷的存在极大的降低了 SLM 制件的力学性能^[25],表现为弹性模量和泊松比下降。

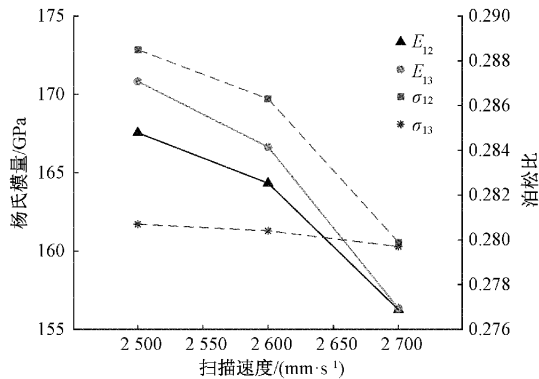


图 9 扫描速度对弹性常数的影响

Fig. 9 Influence of scanning speed on elastic constants

此外,扫描间距对杨氏模量和泊松比的影响,如图 10 所示。在 0.06~0.08 mm 范围内,随着激光扫描间距的增大,增材制件 y - z 平面内两方向的杨氏模量和泊松比均有减小的趋势。这是因为随着扫描间距的逐渐增加,扫描轨迹间金属粉末液相搭接率减小,在搭接区域出现粉末未完全熔合的现象,导致不锈钢增材制件的力学性能降低^[26],这里表现为两个方向杨氏模量和泊松比随扫描间距增大而不断减小。

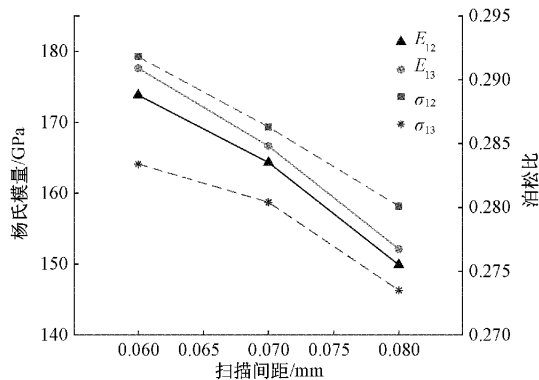


图 10 扫描间距对弹性常数的影响

Fig. 10 Effect of hatch space on elastic constants

5 结 论

本文针对各向异性金属增材制件材料弹性常数快速准确测量及分布状态表征的问题,采用选择性激光熔化技术制备 316 L 不锈钢试样,通过双模式超声换能器测量 3 种模式超声声速,实现两个正交方向弹性常数的测量,探讨了 y - z 平面内的弹性常数分布,并分析了扫描速度和扫描间距等关键工艺参数变化对 SLM 制件弹性常数的影响。

1) 双模式超声换能器实现同位置处纵波和两个正交横波声速的测量。沿堆积 z 方向传播的纵波速度最低,且与沿堆积面内 x - y 方向有显著差别,而堆积侧面 y - z 面的两个正交横波存在恒定声速差异,表现出明显的各向异性。

2) 结合扫描系统,实现 316 L 不锈钢增材制件堆积侧面 y - z 面内弹性常数分布表征,其中杨氏模量 E_{13} 大于 E_{12} ,泊松比 σ_{13} 小于 σ_{12} ,且不同熔化层的弹性常数分布规律相同。

3) 随着加工过程中扫描速度或者扫描间距的增加,两方向的杨氏模量和泊松比均有减小的趋势。说明扫描速度或者扫描间距的增加可能会降低 SLM 制件的力学性能。

本研究还将进一步探讨金属增材制件在各向异性模型本构关系下,通过更多模式组合超声换能器实现测量同位置处多模式声速测量,从而构建出各向异性材料中弹性常数的更多分量,真正实现非均匀各向异性弹性常数分布测量。此外,通过金属增材制件弹性常数与工艺参数的相关性研究,将为增材制件内部质量控制和工艺优化提供技术指导和数据支撑。

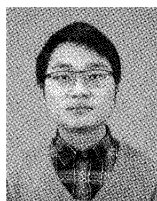
参考文献

- [1] 杨永强,陈杰,宋长辉,等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1):9-21.
YANG Y Q, CHEN J, SONG CH H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1):9-21.
- [2] 刘伟,李能,周标,等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 128-151+159.
LIU W, LI N, ZHOU B, et al. Progress in additive manufacturing on complex structures and high-performance materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20):128-151+159.
- [3] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1):10-16.
ZHANG X W. Application of metal additive

- manufacturing in aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1):10-16.
- [4] 许宁,田虎成,张俊,等. 选择性激光熔化工艺参数的分区控制[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020,43(8):1149-1152.
XU N, TIAN H CH, ZHANG J, et al. Zoning control of process parameters of selective laser melting[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(8): 1149-1152.
- [5] 周玥丞,赵阳. 增材制造技术制备316L不锈钢的拉伸性能[J]. *土木工程学报*, 2020,53(10):26-35.
ZHOU Y CH, ZHAO Y. Tensile performance of 316L stainless steel by additive manufacturing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020,53(10):26-35.
- [6] 李浩楠,高坤元,丁宇升,等. 纳米压痕法研究单晶 Al_3Sc 相的硬度和杨氏模量[J]. *金属热处理*, 2020, 45(2):250-252.
LI H N, GAO K Y, DING Y SH, et al. Hardness and Young's modulus of Al_3Sc single crystal studied by nanoindentation[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(2):250-252.
- [7] KAWAMURA Y, AKINIWA Y. Measurement of the X-ray elastic constants of amorphous polycarbonate[J]. *Quantum Beam Science*, 2020,4(35):35.
- [8] KIEFER D, GIBMERIER J, STARK A. Determination of temperature-dependent elastic constants of steel AISI 4140 by use of in situ X-ray dilatometry experiments[J]. *Materials*, 2020,13(10):2378.
- [9] 刘刘,姬晓慧,郝自清,等. 数字图像相关技术在多孔气凝胶基复合材料弹性力学常数识别中的应用[J]. *北京理工大学学报*, 2020,40(10):1033-1042.
LIU L, JI X H, HAO Z Q, et al. Identification of a set of elastic parameters in 2D plain woven aerogel-based matrix composites using mixed numerical-experimental method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020,40(10):1033-1042.
- [10] HU E, WANG W, MERODIO J. The elastic constants measurement of metal alloy by using ultrasonic nondestructive method at different temperature [J]. *Mathematical problems in engineering*, 2016,2016:1-7.
- [11] SOL T, HAVUN S, NOIMAN D, et al. Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 700-707.
- [12] FOSTER D R, DAPINO M J, BABU S S. Elastic constants of ultrasonic additive manufactured Al 3003-H18[J]. *Ultrasonics*, 2013,53(1):211-218.
- [13] JAVIDRAD H R, SINA S. Determination of elastic constants of additive manufactured inconel 625 specimens using an ultrasonic technique[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(11-12):4597-4607.
- [14] 宋国荣,徐煜阳,吕炎,等. 特殊制备材料力学性能超声无损检测与评价方法[J]. *北京工业大学学报*, 2017,43(10):1449-1456.
SONG G R, XU Y Y, LYU Y, et al. Ultrasonic nondestructive testing and evaluation method of special processing mechanical properties[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017,43(10):1449-1456.
- [15] 王赞,陈一健,王洪艳,等. 新型声波探头的研制与应用[J]. *石油机械*, 2009,37(4):60-62.
WANG Z, CHEN Y J, WANG H Y, et al. Development and application of new acoustic probe [J]. *China Petroleum Machinery*, 2009,37(4):60-62.
- [16] 孙长进,赵吉宾,赵宇辉,等. TA15钛合金激光熔化沉积工艺参数对超声检测精度的影响[J]. *光学学报*, 2019,39(10):210-217.
SUN CH J, ZHAO J B, ZHAO Y H, et al. Effects of laser melting deposition process parameters on ultrasonic testing accuracy of TA15 titanium alloy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019,39(10):210-217.
- [17] 张凤英,陈静,谭华,等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007(2):211-215.
ZHANG F Y, CHEN J, TAN H, et al. Research on forming mechanism of defects in laser rapid formed titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007(2):211-215.
- [18] THIJS L, KEMPEN K, KRUTH J, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder[J]. *Acta Materialia*, 2013,61(5):1809-1819.
- [19] 孙靖,朱小刚,王联凤,等. 扫描方式与预热温度对激光选区熔化制备大尺寸AlSi10Mg合金性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2017,41(10):52-57.
SUN J, ZHU X G, WANG L F, et al. Effect of scanning strategy and preheating temperature on properties of large-scale AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017,41(10):52-57.
- [20] 宋国荣,卢东,吕炎,等. 轴类镀层结构材料力学性能声学表征方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017,38(3):672-680.
SONG G R, LU D, LYU Y, et al. Research on measurements of material mechanical properties of layer-coated cylinders with ultrasonic method [J]. *Chinese*

- Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 672-680.
- [21] 战宇, 林中亚, 刘常升. 激光超声测量金属材料弹性常数实验与有限元分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(9): 1363-1368.
ZHAN Y, LIN ZH Y, LIU CH SH, et al. Experiment and finite element simulation for laser ultrasonic measurement of the elastic constants of metal materials[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(9): 1363-1368.
- [22] 门平, 董世运, 程志远, 等. 微观组织及测量信号对超声横波评价材料硬度影响[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 146-155.
MEN P, DONG SH Y, CHENG ZH Y, et al. Microstructure and measurement signal influences based on ultrasonic shear wave for applied hardness determination [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 146-155.
- [23] 杨理践, 张晓丹, 高松巍, 等. 超声波在管道防腐层剥离内检测中的传播特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 9-18.
YANG L J, ZHANG X D, GAO S W, et al. Research on the propagation characteristics of ultrasonic wave in the detection of pipeline coating[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 9-18.
- [24] AMADO B A, RAMOS G J, JOSE Y M, et al. Elastic tensor stiffness coefficients for SLS Nylon 12 under different degrees of densification as measured by ultrasonic technique [J]. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(5): 260-270.
- [25] 梁庆杰. 工艺参数对选区激光熔化成形 316L 不锈钢的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(3): 1013-1019.
LIANG Q J. Influence of process parameter on 316L stainless steel produced via selective laser melting [J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2018, 43(3): 1013-1019.
- [26] 李洋. 激光增材制造(3D打印)制备生物医用多孔金属工艺及组织性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
LI Y. Study on the process and properties of porous metal prepared by laser additive manufacturing (3D printing) [D]. Suzhou: Soochow University, 2015.

作者简介



戴安帮, 2019年于南昌工程学院获得学士学位, 现为广东工业大学硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测技术。

E-mail: 2505483802@qq.com

Dai Anbang received his B. Sc. degree from Nanchang Institute of Technology in 2019. He

is currently a master student at Guangdong University of Technology. His main research interest is ultrasonic nondestructive testing technology.



袁懋诞 (通信作者), 2015年韩国成均馆大学获得博士学位, 现为广东工业大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为固体中的超声传播、非线性超声技术、超声导波检测、残余应力测量等。

E-mail: mdyuan@gdut.edu.cn

Yuan Mandan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Sungkyunkwan University in 2015. He is currently a lecturer and a master advisor at Guangdong University of Technology. His main research interests include ultrasonic propagation in solids, nonlinear ultrasonic technology, ultrasonic guided wave testing, residual stress measurement, etc.



吴俊伟, 2010于南京理工大学获得学士学位, 2013年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得硕士学位, 现为广东工业大学博士研究生, 主要研究方向为压电超声换能器的设计、制作与表征。

E-mail: 1111901004@mail2.gdut.edu.cn

Wu Junwei received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2010, and received his M. Sc. degree from Shanghai Institute of Ceramics of the Chinese Academy of Sciences in 2013. He is currently a Ph. D. student at Guangdong University of Technology. His main research interests include design, fabrication and characterization of piezoelectric ultrasonic transducers.



胡子健, 2018年于韶关学院获得学士学位, 现为广东工业大学硕士研究生, 主要研究方向为金属3D打印。

E-mail: 15819210741@163.com

Hu Zijian received his B. Sc. degree from Shaoguan university in 2018. He is currently a master student at Guangdong University of Technology. His main research interests is metal 3D printing.



纪轩荣, 2015年华南师范大学获得博士学位, 现为广东工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新型超声无损检测与监测、生物医学成像的换能器、仪器、成像与信号处理算法等。

E-mail: xr.ji@gdut.edu.cn

Ji Xuanrong received his Ph. D. degree from South China Normal University in 2015. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Guangdong University of Technology. His main research interests include new ultrasonic nondestructive testing and monitoring, transducers for biomedical imaging, instruments, imaging and signal processing algorithms, etc.