

TA15 钛合金激光熔化沉积工艺参数对 超声检测精度的影响

孙长进^{1,2,3}, 赵吉宾^{1,2}, 赵宇辉^{1,2*}, 何振丰^{1,2}, 王志国^{1,2}, 高元^{1,2,4}

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016;

³中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

⁴东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 金属增材制造产品的材料特性相对于传统制造工艺的有所不同,故原有超声无损检测方法不再适用。为探索金属增材制品的超声无损检测特性,提高超声无损检测精度,采用激光熔化沉积工艺并以 TA15 钛合金作为材料,制作具有相同外形尺寸、不同激光功率和搭接率的检测样块。使用相控阵超声设备对比分析了不同工艺参数下该材料的接触式超声波纵波灵敏度和声速。结果表明:激光功率对超声检测灵敏度影响较大;成形方向和工艺参数对超声声速有影响,其中成形方向影响较大。因此,对比试块的材料和工艺参数应与待检件相同,检测时需对待检件每个检测方向的声速分别进行标定。

关键词 激光光学; 激光熔化沉积; 超声检测; 标定; 灵敏度; 声速

中图分类号 TN249; TB559

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1014002

Effects of Laser Melting Deposition Process Parameters on Ultrasonic Testing Accuracy of TA15 Titanium Alloy

Sun Changjin^{1,2,3}, Zhao Jibin^{1,2}, Zhao Yuhui^{1,2*}, He Zhenfeng^{1,2},
Wang Zhiguo^{1,2}, Gao Yuan^{1,2,4}

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences,
Shenyang, Liaoning 110016, China;

²Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences,
Shenyang, Liaoning 110016, China;

³School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract Since the material properties of metal additive components differ from those produced by traditional manufacturing processes, the original ultrasonic nondestructive testing methods are no longer applicable. To study the ultrasonic nondestructive testing characteristics of metal additive components and improve the ultrasonic nondestructive testing accuracy, TA15 alloy specimens are prepared by laser melting deposition with different laser powers and overlap rates. The sensitivity and sound velocity of the longitudinal wave, which are excited by contact ultrasonic testing with a phased array ultrasonic equipment, are compared and analyzed. Results show that ultrasonic sensitivity is considerably affected by laser power. Ultrasonic velocity is affected by the forming direction and process parameters. Forming direction is a more important parameter. The material and process parameters of the reference block should be the same as those of the parts to be tested. In addition, the sound velocity in each detection direction of the parts should be calibrated.

Key words laser optics; laser melting deposition; ultrasonic testing; calibration; sensitivity; sound velocity

OCIS codes 140.3390; 110.7170; 160.3390

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-06-04; 录用日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104003, 2016YFB1102502, 2018YFB1105802)、国家自然科学基金(51805526)

* E-mail: yhzha@sia.cn

1 引 言

激光熔化沉积(LMD)是一种增材制造工艺,金属粉末经激光熔化后逐层叠加并冷却成形^[1],制造过程不需要模具,这有利于简化工艺流程,降低成本^[2]。使用该工艺制造的各类钛合金增材制品已小批量应用在某些型号飞机上并逐渐向规模化发展^[3-4]。但由于增材制造工艺采用的是“逐点化”的制造方式,其组织特征、内部缺陷的类型和分布都与传统锻、铸件有所区别,现有的无损检测方法在增材结构上已不再适用^[5]。目前,各无损检测技术在增材结构件上的应用已成为新的热点,超声检测因其检测速度快、适用性广、对人体和环境无害等优势得到了广泛关注^[6]。

代顿大学的 Schehl 等^[7]使用超声检测对 Ti-6Al-4V 钛合金增材制造的航空面板进行了缺陷和完整性分析。思克莱德大学的 Tofeldt 等^[8]对电子束选区熔化 718 合金材料各成形方向的超声声速进行了检测,发现成形方向与超声声速之间存在相关性。以色列内盖夫本古里安大学的 Sol 等^[9]利用 TOF(time of flight)横波超声测量了增材 AlSi10Mg 试样的超声声速,并发现了其与成形方向之间的关系。中国航发北京航空材料研究院的高翔宇等^[10]用超声检测对 TC4 钛合金增材结构梁中的缺陷进行了检测,并分析了内部缺陷的成因。陆军装甲兵学院的门平等^[11]对 45 钢进行了不同热处理,测定了相应的超声声速,建立了相应的标定模型。中国航发北京航空材料研究院的杨平华等^[12]比较了激光和电子束两种工艺下 TC18 材料的超声声速和灵敏度。

目前,关于金属增材结构的超声检测标定的研究较少,且金属增材制造设备种类多、工艺参数相差大,对检测数据与制造过程中的工艺参数进行相关性分析有助于提高检测精度。在航空航天领域,常将 TA15 钛合金用作飞行器的主承力件材料^[13]。TA15 钛合金是一种较为常见的金属增材制造原料,本文在不同的工艺参数下试制了具有相同外形尺寸的 TA15 钛合金激光熔化沉积样块,使用超声相控阵测量系统测量各样块不同成形方向的超声波灵敏度和样块介质内的超声声速,以提高超声检测对潜在缺陷大小和深度的判断精度。

2 基本原理

2.1 激光熔化沉积原理

激光熔化沉积是一个喷射金属粉末使其熔化、

冷却、沉积的过程,制造过程中的热积累是影响成形质量的关键因素之一。激光功率越高,熔池温度越高;相反,扫描速度越快,送粉速度越快,熔池温度梯度越大^[14]。

在制造过程中,将金属粉末按规划好的路径一道道喷射在基材上。为保证成形质量,不同“道”金属之间需要一定程度的重叠^[15],如图 1 所示,用搭接率或扫描间距来表征这种状态。不同增材制造设备之间并没有统一的最优搭接率。为验证熔池温度的影响并简化试验流程,选定激光功率和扫描间距为样块加工时的自变量,扫描速度和送粉速度为不变量。



图 1 多道间搭接截面示意图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of multiple channel overlapping

扫描时,将基材底板固定,由机器人带动激光和同轴送粉头在三维空间运动,扫描路径由程序编写并输入工控机内。开始加工前,将工作台密封抽真空后注入氩气形成无氧环境,加工中需检测氧含量,以保证样块成形质量。

2.2 超声检测原理

常规超声检测及在此基础上发展起来的相控阵超声检测的工作原理是通过对比检测试件潜在缺陷反射波波幅与对比试块预制缺陷波幅,判断该潜在缺陷是否为需检出缺陷;通过计算表面回波与潜在缺陷回波时间差,确定该潜在缺陷深度位置,因此检测试件应与对比试块有大致相同的声波衰减幅度(取决于制造工艺)及超声声速^[16-18],需对超声检测的灵敏度和声速进行标定。超声波在待测物体中的声速由介质的性质(密度和弹性模量)决定,不同波形的超声波传播速度不相同,其中纵波的声速 c_1 为^[19]

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-\sigma)}}, \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量; σ 为泊松比; ρ 介质密度。

金属增材制品的生产工艺变化时,内部的组织特征和材料密度就可能发生变化,导致力学性能发生改变,进而影响超声波在其内部传播时的声速,影响对缺陷特征深度的测定。超声灵敏度用来表征被测试件介质超声波的衰减程度,超声检测通过测量缺陷反射波的强度判断缺陷大小,因此灵敏度会影响超声检测对缺陷大小的测定。各参量间的关系如图 2 所示。

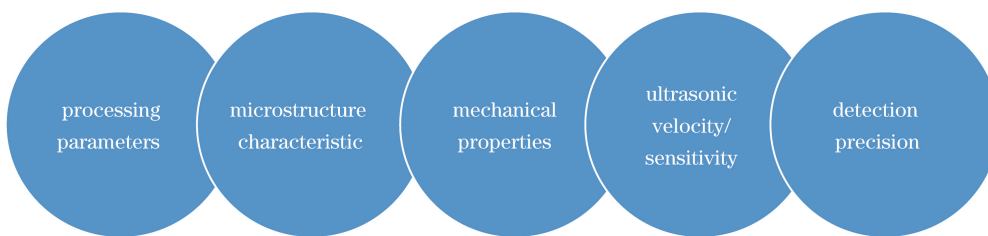


图 2 增材制造各参量间关系

Fig. 2 Relationship among indices of additive manufacturing

超声检测设备采用日本 OLYMPUS 的 FOCUS PX 作为数据采集仪,探头采用中心频率为 5 MHz 的相控阵探头;楔块角度为 0° ,耦合剂为机油。采用直接接触法、垂直入射超声波纵波进行检测。

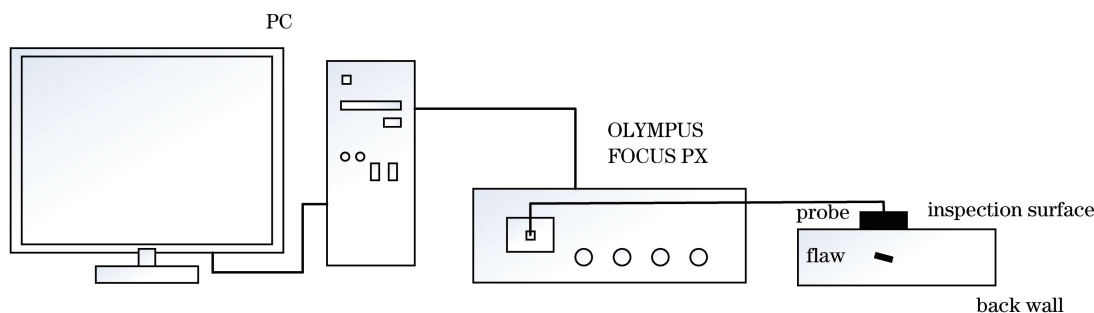


图 3 超声检测系统原理图

Fig. 3 Schematic of ultrasonic testing system

3 试验结果与数据分析

3.1 样块参数

因增材制造的特殊性,在材料成形过程中受沉积方向冷却速率和热交换梯度的影响,材料在沉积方向易形成柱状晶粒结构,这种组织特征使金属增材材料表现出力学性能各向异

性^[20-21],因此将成形方向分别作为机加工后试验样块的长(X ,扫描方向)、宽(Y ,搭接方向)和高(Z ,沉积方向)。

为了验证激光功率和搭接率的影响,共制备 6 组试验样块,对各试块进行机械加工,使其各方向长度相同。具体工艺参数及加工后尺寸见表 1,加工后的样块外观如图 4 所示。

表 1 样块加工工艺参数及尺寸

Table 1 Processing parameters and sizes of test specimens

Laser power /W	Scanning speed $v /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Powder feeding rate g /min	Spot diameter D /mm	Hatch space /mm	X /mm	Y /mm	Z /mm
1800	6	0.8	3	2.0	20.10	18.10	16.08
1200	6	0.8	3	2.0	20.00	18.04	16.00
900	6	0.8	3	2.0	20.10	18.14	16.08
600	6	0.8	3	2.0	20.06	18.08	16.08
1200	6	0.8	3	2.5	20.20	18.16	16.16
1200	6	0.8	3	3.0	20.10	18.12	16.18

从图 4 可以看出:在相同扫描路径、不同激光功率条件下,图(a)和(b)在外观上相差不大;当激光功率下降到 900 W[图 4(c)]时,样块表面开始出现小缺陷,但还满足超声检测条件;当激光功率下降到 600 W[图 4(d)]时,样块表面遍布裂纹,超声波无法传播到样块底面,导致检测无法进行,表明样块内部

材质十分不均匀,缺陷严重。在相同激光功率(1200 W)、不同扫描间距条件下,扫描间距较大时的图 4(e)和(f)多层搭接高度不足图 4(b)高度的 70%,且表面质量差,对图 4(e)和(f)额外多堆积两层后高度较图 4(b)仍相差很大,机加工后的样块表面质量也随扫描间距增大而略微下降。

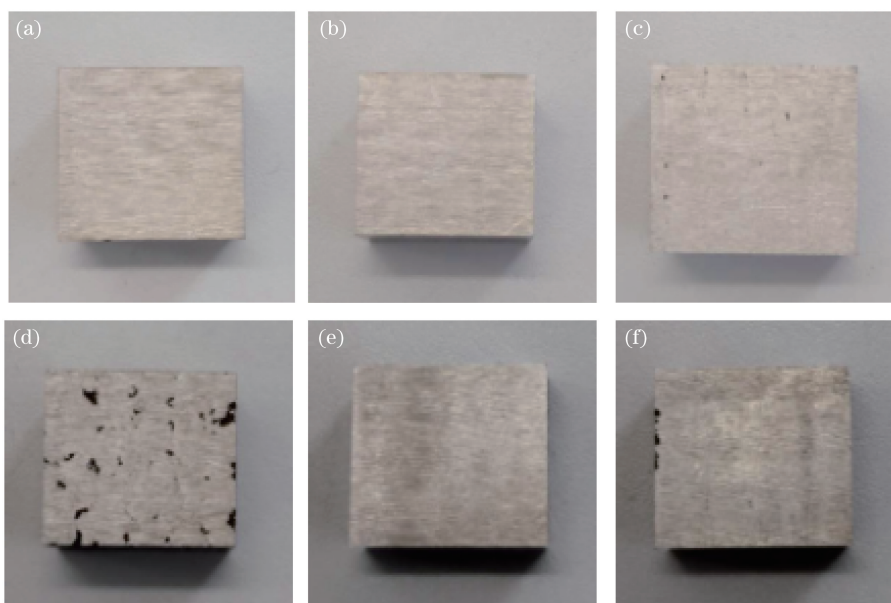


图 4 不同激光功率和扫描间距下的样块实物图。(a)1800 W-2.0 mm; (b) 1200 W-2.0 mm; (c) 900 W-2.0 mm; (d) 600 W-2.0 mm; (e) 1200 W-2.5 mm; (f) 1200 W-3.0 mm

Fig. 4 Real photographs of samples under different laser powers and hatch spaces. (a) 1800 W-2.0 mm; (b) 1200 W-2.0 mm; (c) 900 W-2.0 mm; (d) 600 W-2.0 mm; (e) 1200 W-2.5 mm; (f) 1200 W-3.0 mm

3.2 超声检测测量方法

采用数据采集仪器内部滤波器,保留探头发射中心频率(2.5~8.0 MHz)波段声波;选择反射波的波峰作为数据采集点。当工艺参数偏离理想值时,超声检测中会产生很多噪声信号干扰,采用平滑滤波消除干扰,这样虽然会损失边缘信息但对波峰的影响较小,不影响采样点的选取。平滑滤波前后波形如图 5 所示。

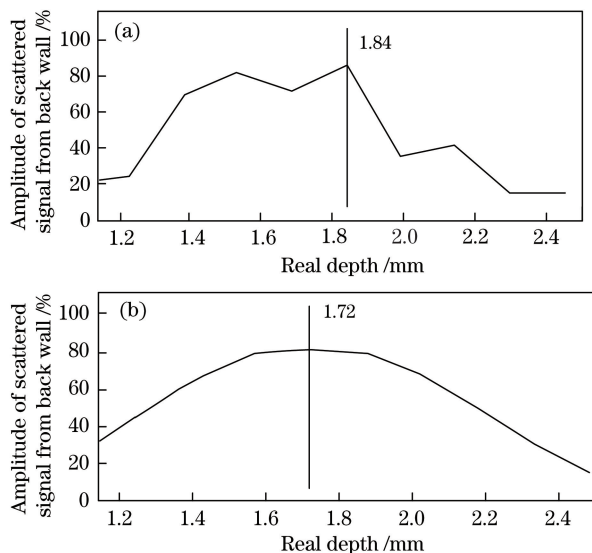


图 5 波形对比图。(a)平滑滤波前;(b)平滑滤波后
Fig. 5 Waveform comparison. (a) Before smooth; (b) after smooth

3.3 工艺参数对超声灵敏度的影响

超声波在介质材料中传播时会发生衰减,其中主要是吸收和散射^[22]。介质对超声波的吸收程度主要受超声波频率的影响。超声波频率越高,介质对超声波吸收程度越强,超声波穿透能力就越弱。超声波散射则主要受介质材料本身组织特征和性能的影响,材料本身各向异性、结构不均匀、晶粒粗大或排列不规则等都会造成超声波在介质中发生反射、折射和波形转换,这都会造成超声波能量的衰减。

为研究激光熔化沉积工艺对超声检测中灵敏度的影响,将超声增益设置为 20 dB,记录各样块在 X 方向的一次底面反射波强度相对于上表面回波强度的百分比。经对比可发现,激光功率对超声检测中灵敏度的影响较大,激光功率和材料超声灵敏度之间存在一定的线性关系。因灵敏度对潜在缺陷的判定影响较大,在超声检测对比试块材料时应选择与待检产品具有相同激光功率的材料。由图 6(b)可知,扫描间距即搭接率对灵敏度影响较小,各搭接率样块的灵敏度基本处在同一水平线上。

分别使用 TA15 锻件和激光增材材料,在材料底面制作具有相同直径、不同深度的平底孔。使用常规超声探头在上表面发射超声纵波进行检测。为更好地观察不同工艺下材料对超声传播的衰减程度,调节信号增益使两种材料在 5 mm 深度处平底孔的反射波波幅大致相当,分别记录各个平底孔最

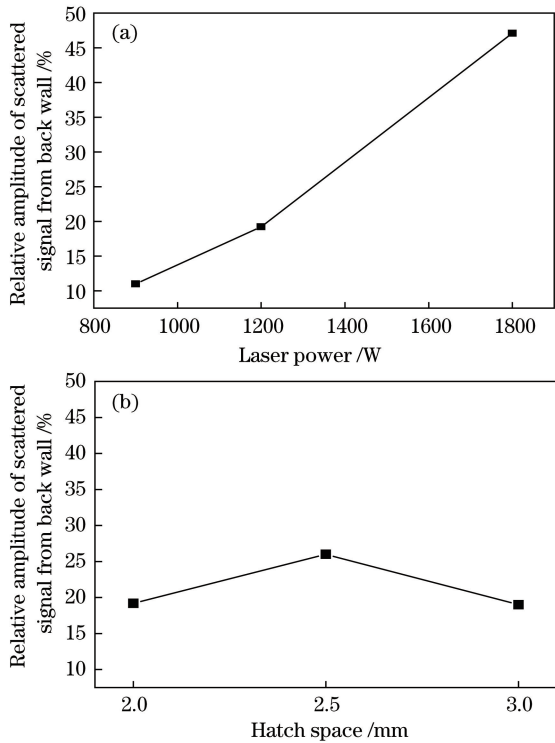


图 6 工艺参数对一次底面波相对强度的影响。
(a)激光功率; (b)扫描间距

Fig. 6 Influences of process parameters on relative amplitude of scattered signal from back wall. (a) Laser power; (b) hatch space

大反射波波幅。由图 7 可知:在 5~35 mm 范围内, TA15 锻件试样对超声波纵波的衰减与反射体深度呈一定的线性变化;在 5~20 mm 范围内, TA15 激光增材试样的变化曲线是一条凹曲线,随着深度增加衰减速度减小。由此可知,激光增材工艺自身的特殊性,使得增材材料对超声检测的灵敏度变化与常规的锻件材料有着较大的差异,用常规工艺材料来判断激光增材材料的超声灵敏度误差较大。

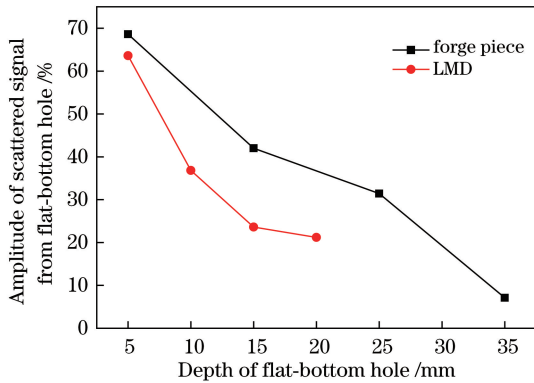


图 7 材料厚度对超声波幅衰减的影响

Fig. 7 Influence of material thickness on attenuation of ultrasonic wave amplitude

3.4 工艺参数对超声声速的影响

在超声检测中,通过计算发射、接收回波的时间和介质声速判断缺陷深度^[23]。文献[24]的研究表明激光熔化沉积钛合金呈现显著的塑性各向异性特征,即该介质各向超声声速不同。

为考察激光熔化沉积工艺对超声声速的影响,对样块长宽高三个方向进行独立检测,分别记录 A 扫中始波和一次底波波峰间距离、一次底波和二次底波波峰间距离。在多次测量中,两种取样测量距离偏差不大于 0.25%。取两次测量的平均值作为样块的测量尺寸,再与样块实际尺寸和材料参考声速进行比对,就可得到材料实际声速。材料实际声速可表示为

$$c_m = c_r \frac{l_m}{l_r}, \quad (2)$$

式中: c_r 为材料参考声速; l_m 为样块实际尺寸; l_r 为样块参考尺寸。

激光熔化沉积 TA15 钛合金实际声速比对如图 8 所示。在同一工艺参数下,Z 方向声速最高,Y 方向最低,二者差值在 2%左右。激光功率对 TA15 样块超声声速的影响主要体现在 X 方向和 Y 方向,

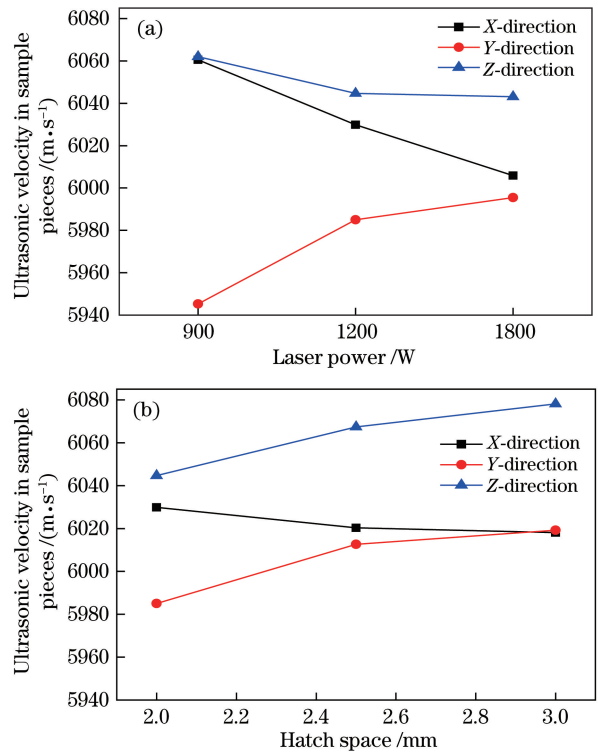


图 8 工艺参数对超声声速的影响。

(a)激光功率; (b)扫描间距

Fig. 8 Influences of process parameters on ultrasonic velocity.

(a) Laser power; (b) hatch space

影响在 1% 左右。由(1)式可知,材料介质超声声速与其自身组织特征决定的力学性能有关,而金属增材材料的组织特征尤其是孔隙率易受能量密度(GDE)影响^[25]。能量密度的表达式为

$$E_{\text{GED}} = \frac{P}{sd}, \quad (3)$$

式中: E_{GED} 为能量密度; P 为激光输出功率; s 为扫描速度; d 为激光光斑直径。

孔隙率又分为层间孔隙和层内孔隙^[26]。层间孔隙在能量密度较低时易出现,是由每层熔融粉末之间未熔合粉末造成的^[27];层内孔隙在能量密度较高时易出现,是由熔池蒸发时产生的气孔导致的^[28]。 Z 方向为金属粉末多层堆积方向,主要受层间孔隙影响。观察 Z 方向超声声速随激光功率的变化,可以发现由融合不良导致的层间孔隙增加会使超声声速增大。文献[29]研究表明,熔池的蒸发可以导致熔池表面的快速冷却以及表面区域和中心区域之间的热梯度发展,再加上脉冲激光的反冲力,这些因素都会导致熔池振荡和流动不稳定。而激光功率越高,熔池温度就越高,单道熔化沉积材料的温度梯度也就越大,这些均会导致以气孔为特征的层间孔隙增加,使材料 X 方向超声声速降低; Y 方向受层间孔隙和层内孔隙双重影响,随着激光功率增加,单道打印材料会重新熔化并经历更多的热辐射和热对流,这将使多道打印材料间组织向单道打印材料组织转变,材料 Y 方向超声声速曲线趋近于 X 方向超声声速曲线。扫描间距即搭接率对多层堆积高度即 Z 方向高度有直接影响,超声声速在 Z 方向也产生了规律性的变化,影响在 0.5% 左右;扫描间距对 X 、 Y 两个方向超声声速的影响较小,且扫描间距 2.5 mm 和 3 mm 这两组声速数据十分相近,考虑到氧含量波动和测量系统误差干扰,难以判断其规律和影响大小。以上各影响因素中,成形方向对声速影响最大,激光功率次之,扫描间距影响最小。在制作试块时,如需对金属激光熔化沉积材料进行超声检测且对检测结果精度要求较高时,要考虑声速的各向异性和制造工艺参数。

4 结 论

本文对不同激光功率和搭接率的 TA15 样块的超声灵敏度和超声声速进行了检测。通过比较不同激光功率和搭接率下 TA15 钛合金激光熔化沉积样块在超声检测中同一增益下上表面

回波波幅和一次底波回波波幅,发现在 TA15 钛合金中超声传播的衰减受激光功率影响较大。为保证超声检测的精度,应确保对比试块制造材料和待检试件具有相同的激光功率参数,且超声灵敏的标定范围应尽量大于检测深度范围。通过比较不同成形方向、激光功率和搭接率下制作的 TA15 钛合金激光熔化沉积样块的超声声速发现,成形方向和制造工艺参数均对该材料超声声速存在一定影响,其差值在 2% 左右。超声声速主要影响潜在缺陷深度的测量精度,因声速差异较小且缺陷深度对材料性能影响较小,一般情况下可忽略。

参 考 文 献

- [1] Zhan X H, Lin X, Gao Z N, *et al.* Modeling and simulation of the columnar-to-equiaxed transition during laser melting deposition of invar alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 755: 123-134.
- [2] Pu Y S, Wang B Q, Zhang L G. Metal 3D printing technology[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 78-84.
蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属 3D 打印技术的研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 78-84.
- [3] Gong S L. Application of high power beam processing technology in aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(9): 34-37.
巩水利. 高能束流加工技术在航空发动机领域的应用[J]. *航空制造技术*, 2013(9): 34-37.
- [4] Wang Y Q, Shen J X, Wu H Q. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(4): 89-98.
王延庆, 沈竟兴, 吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(4): 89-98.
- [5] Li S J, Murr L E, Cheng X Y, *et al.* Compression fatigue behavior of Ti-6Al-4V mesh arrays fabricated by electron beam melting[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 793-802.
- [6] Achenbach J D. Quantitative nondestructive evaluation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(1/2): 13-27.
- [7] Schehl N, Kramb V, Dierken J, *et al.* Ultrasonic assessment of additive manufactured Ti-6Al-4V [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1949: 020008.
- [8] Tofeldt O, Pierce S G, Smillie G, *et al.* Investigation of fundamental ultrasonic propagation characteristics in NDT of electron beam melted additive manufactured samples[C]//12th European

- Conference on Non-Destructive Testing, June 11-15, 2018, Gothenburg, Sweden. Scotland, Glasgow: University of Strathclyde, 2018.
- [9] Sol T, Hayun S, Noiman D, *et al.* Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 700-707.
- [10] Gao X Y, Gao X X, Jiang T, *et al.* Defects analysis of large additive manufacturing beam of titanium alloy [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2018, 13(1): 43-48.
高翔宇, 高祥熙, 姜涛, 等. 增材制造大型钛合金横梁缺陷分析[J]. *失效分析与预防*, 2018, 13(1): 43-48.
- [11] Men P, Dong S Y, Yan S X, *et al.* Influence of heat treatment and measurement methods on material hardness evaluation by longitudinal wave velocity[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(11): 2312-2320.
门平, 董世运, 闫世兴, 等. 热处理及测量方式对纵波声速评价材料硬度的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(11): 2312-2320.
- [12] Yang P H, Shi L J, Liang J, *et al.* Experimental research on ultrasonic characteristics of TC18 additive manufacturing titanium alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(5): 38-42.
杨平华, 史丽军, 梁菁, 等. TC18 钛合金增材制造材料超声检测特征的试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017(5): 38-42.
- [13] Li X W, Sha A X, Zhang W F, *et al.* TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe [J]. *Titanium Industry Progress*, 2003, 20(4): 90-94.
李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. *钛工业进展*, 2003, 20(4): 90-94.
- [14] Li L Q, Wang J D, Wu C C, *et al.* Temperature field of molten pool and microstructure property in laser melting depositions of Ti6Al4V [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0302009.
李俐群, 王建东, 吴潮潮, 等. Ti6Al4V 激光熔化沉积熔池温度场与微观组织特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0302009.
- [15] Lai Y B. Research on processing characteristics during laser metal direct desposition additive manufacturing[D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
来佑彬. 金属激光直接沉积增材制造工艺研究[D]. 沈阳: 中国科学院大学, 2015.
- [16] Halmsaw R. Introduction to the non-destructive testing of welded joints[M]. England: Woodhead Publishing Limited, 1996.
- [17] Hislop J D. Flaw size evaluation in immersed ultrasonic testing[J]. *Non-Destructive Testing*, 1969, 2(3): 183-192.
- [18] Kleinert W. Defect sizing using non-destructive ultrasonic testing[M]. Cham: Springer, 2016.
- [19] Zheng H, Lin S Q. Ultrasonic testing[M]. 2nd ed. Beijing: China Labor and Social Security Press, 2008: 20-25.
郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008: 20-25.
- [20] Kirka M M, Greeley D A, Hawkins C, *et al.* Effect of anisotropy and texture on the low cycle fatigue behavior of Inconel 718 processed via electron beam melting[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 105: 235-243.
- [21] Tilita G A, Chen W, Kwan C C F, *et al.* The effect of ultrasonic excitation on the microstructure of selective laser melted 304L stainless steel[J]. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2017, 48(5): 342-348.
- [22] He B B. Characterizing of polymer morphologies & *in situ* monitoring of injection molding process using ultrasonic techniques[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
何波兵. 超声技术在聚合物形态结构表征及注射成形过程在线检测中的应用的基础研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [23] Felice M V, Fan Z. Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: a review[J]. *Ultrasonics*, 2018, 88: 26-42.
- [24] Wang K, Bao R, Liu D, *et al.* Plastic anisotropy of laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 746: 276-289.
- [25] Kruth J P, Vandenbroucke B, van Vaerenbergh J, *et al.* Rapid manufacturing of dental prostheses by means of selective laser sintering/melting[C]//Les 11ièmes Assises Européennes du Prototypage Rapide, October 4-5, 2005, Paris, France. [S.l.: s.n.], 2005.
- [26] Wang L, Pratt P, Felicelli S D, *et al.* Pore formation in laser-assisted powder deposition process [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(5): 051008.
- [27] Susan D F, Puskar J D, Brooks J A, *et al.* Quantitative characterization of porosity in stainless steel LENS powders and deposits[J]. *Materials Characterization*, 2006, 57(1): 36-43.
- [28] Ahsan M N, Bradley R, Pinkerton A J. Microcomputed tomography analysis of intralayer porosity generation in laser direct metal deposition

and its causes[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(2): 022009.

[29] Qiu C L, Panwisawas C, Ward M, *et al.* On the role

of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2015, 96: 72-79.