

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, 沈阳 110819

摘要: 针对金属增材制造产品的材料特性相对于传统制造工艺有所不同, 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以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; 不同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。对比试块应与待检件材料和工艺参数相同, 并对待检件每个检测方向的声速分别进行标定。

关键词 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

Effect 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, Liaoning Shenyang 110016, China

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

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

Abstract As the material properties of metal additive components are different from that of traditional manufacturing processes, the original ultrasonic nondestructive testing methods are no longer applicable. In order to study the ultrasonic nondestructive testing peculiarity of metal additive components and improve the ultrasonic nondestructive testing accuracy, six specimens of TA15 alloy with different laser power and overlap rate were fabricated by laser melting deposition. The sensitivity and sound velocity of longitudinal wave which are excited by contact ultrasonic testing by a phased array ultrasonic equipment were compared and analyzed. The result show that ultrasonic sensitivity is greatly affected by laser power. Ultrasonic velocity is affected by forming directions and process parameters, and forming directions are more effective factor. The material and process parameters of the reference block should be the same as those of the parts to be tested, and the sound velocity of each detection direction of the parts should be calibrated respectively.

Key words laser melting deposition; ultrasonic testing; standardization; sensitivity; sound velocity

OCIS codes 140.3390; 110.7170; 160.3390

收稿日期: 年-月-日; **修回日期:** 年-月-日; **录用日期:** 年-月-日 (格式保留, 具体日期不用填写)

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: yhzhaosia@sia.cn; (*的标记形式请在投稿前确认好, 投稿后不能修改)

1 引言

激光熔化沉积 (Laser Melting Deposition, 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], 由于制造过程不需要模具, 因此有利于简化结构、提高可靠性及降低重量^[2]。使用该工艺制造的各类钛合金增材制品已在某些型号飞机上进行小批量应用并逐渐向规模化发展^[3-4]。但由于增材制造工艺“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的关注^[6]。

代顿大学的 Schehl N 使用超声检测对 Ti-6Al-4V 钛合金增材制造航空面板进行了缺陷和完整性的分析^[7]。思克莱德大学大学的 Tofeldt O 等人对电子束选区熔化的 718 合金材料各成型方向超声声速进行了检测并发现两者之间存在相关性^[8]。以色列内盖夫本古里安大学的 Sol T 等人利用 TOF 横波超声测量了增材 AlSi10Mg 试样的超声声速并发现其和成型方向之间的关系^[9]。中国航发北京航空材料研究院的高翔宇等人用超声检测对 TC4 钛合金增材结构梁进行了缺陷的检测并分析了内部缺陷成因^[10]。陆军装甲兵学院的门平对 45 钢材进行不同热处理并测定了相应的超声声速并建立了相应的标定模型^[11]。中国航发北京航空材料研究院的杨平华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^[12]。

关于金属增材结构的超声检测标定的研究目前较少, 且金属增材制造设备种类多、工艺参数相差大, 将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, TA15 钛合金常用作飞行器的主承力件材料^[13], 是一种较为常见的金属增材制造原料, 本文中试制具有不同工艺参数、相同外形尺寸的 TA15 钛合金激光熔化沉积 (LMD) 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 and 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

由于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; 相反地, 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”金属之间需一定程度重叠^[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同一的最优搭接率。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 Schematic diagram of overlapping on cross-sectional multiple channels

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，加工中检测氧含量，以保证样块成型质量。

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其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也不相同，其中纵波的声速 c_l 为^[19]：

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

式中： E 为杨氏弹性模量； 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。超声灵敏度则表征被测试件介质超声声波的衰减程度，超声检测通过测量缺陷反射波的强度判断缺陷大小，因此灵敏度影响对缺陷大小的测定。各参量间的关系如图 2 所示。

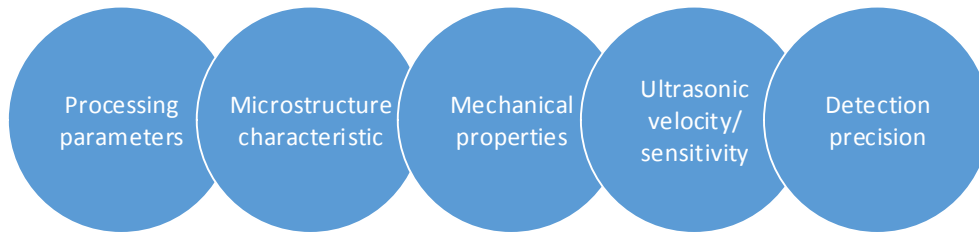


图 2 增材制造各参量参量间关系

Fig.2 Relationship among indices of additive manufacturing

超声检测设备采用 OLYMPUS 的 FOCUS PX 作为数据采集仪, 探头采用中心频率 5MHz 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。

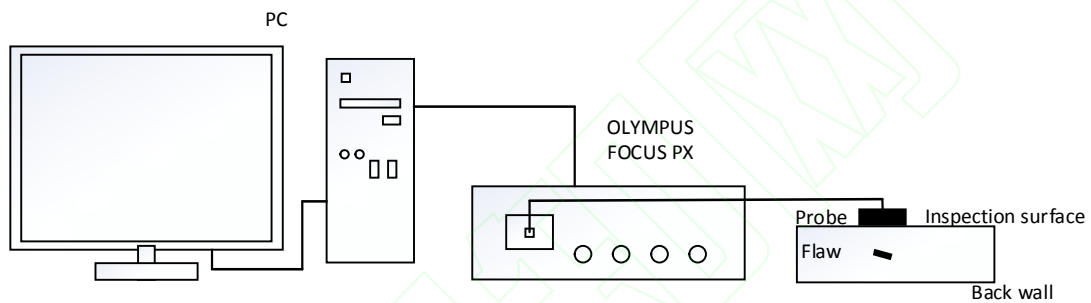


图 3 超声检测系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic testing system

3 试验结果与数据分析

3.1 样块参数

增材制造的特殊性, 在材料成型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项异性^[20-21], 因此将成型方向作为试验样块的长 (X, 扫描方向) 宽 (Y, 搭接方向) 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 size of test specimens

Laser power	Scanning speed	Powder feeding Rate	Spot diameter	Hatch space	X direction	Y direction	Z direction
W	v/mm·s-1	g/min	D/mm	mm	mm	mm	mm

1800	6	0.8	3	2	20.10	18.10	16.08
1200	6	0.8	3	2	20.00	18.04	16.00
900	6	0.8	3	2	20.10	18.14	16.08
600	6	0.8	3	2	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	20.10	18.12	16.18

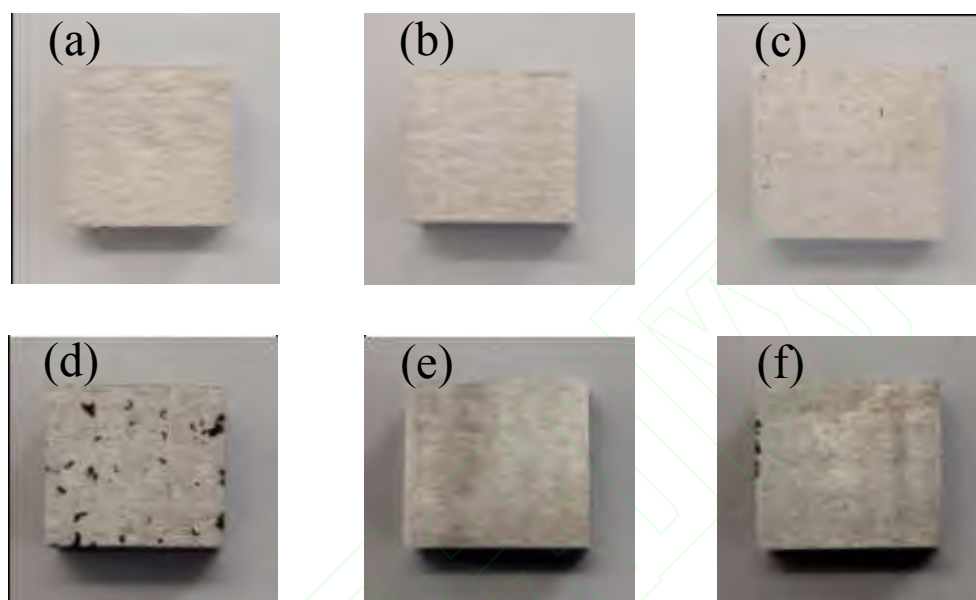


图4 样块实物图

激光功率/W-扫描间距/mm (a) 1800-2 (b)1200-2 (c)900-2 (d)600-2 (e)1200-2.5 (f)1200-3

Fig.4 Real photograph of sample coupons

Laser power/W-Hatch space/mm (a) 1800-2 (b)1200-2 (c)900-2 (d)600-2 (e)1200-2.5 (f)1200-3

从图3可以看出，在相同扫描路径、不同激光功率条件下，图片(a)和(b)在外观上相差不大；当激光功率下降到图片(c)时，样块表面开始出现小缺陷，但还满足超声检测条件；当激光功率下降到图片(d)时，样块表面遍布裂纹，因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(1200W)不同扫描间距条件下，扫描间距增加时(e)、(f)多层搭接高度不足(b)高度70%且表面质量差，对(e)、(f)额外多堆积两层后高度仍较(b)相差很大，机械加工后的样块表面质量也随扫描间距增大略微下降。

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(2.5MHz-8MHz)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音信号干扰，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。

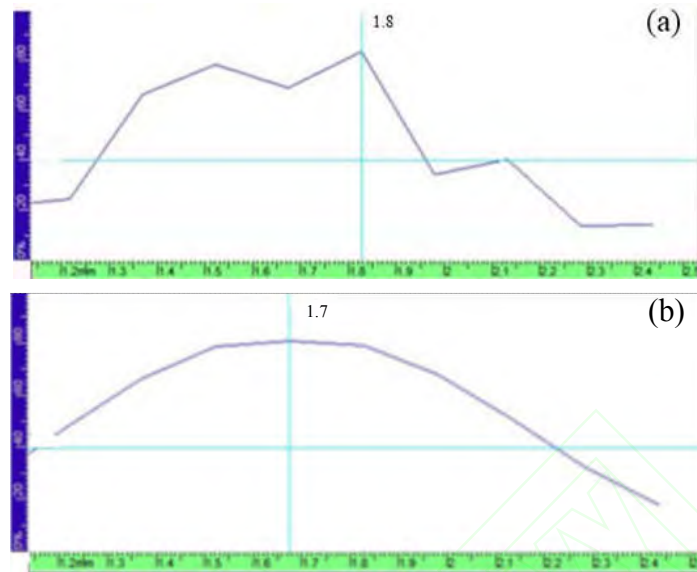


图 5 波形对比图 (a) 平滑滤波前 (b) 平滑滤波后

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会发生衰减，其中主要是吸收和散射^[22]。介质对超声波吸收程度主要受超声波的频率影响。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的组织特征和性能影响，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 20db，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百分比。经对比可发现，激光功率对超声检测中灵敏度影响较大，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应选择与待检产品具有相同激光功率的材料。由图 6 (b) 可见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。

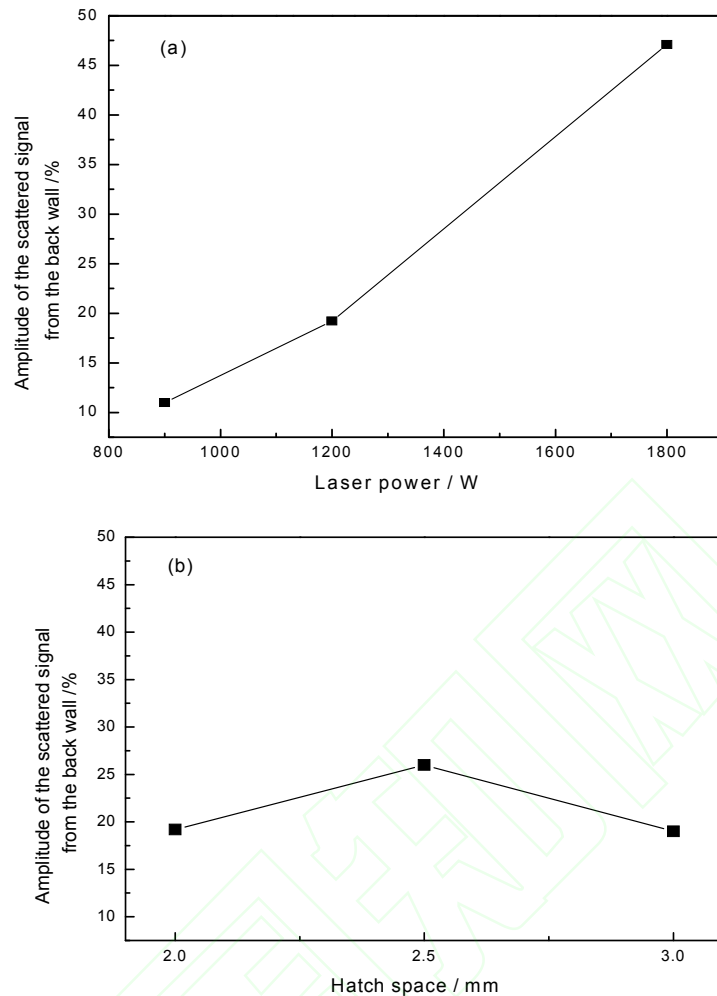


图 6 工艺参数对一次底波回波声强度的影响 (a)激光功率 (b)扫描间距

Fig.6 Influence of process parameters on scattered signal from the back wall (a) Laser power (b) Hatch space

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，将两种材料 5mm 深度平底孔反射波调制大概相同的波幅，分别记录各个平底孔最大反射波波幅。由图 7 可见，在 5-35mm 范围内，TA15 锻件试样对超声波纵波的衰减程度随反射体深度呈一定线性变化；在 5-20mm 范围内，TA15 激光增材试样的变化曲线是一条凹曲线，随着深度增加衰减程度增加速度减小。由此可见，激光增材工艺因其自身的特殊性，使得其对超声检测的灵敏度变化较常规的锻件工艺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。

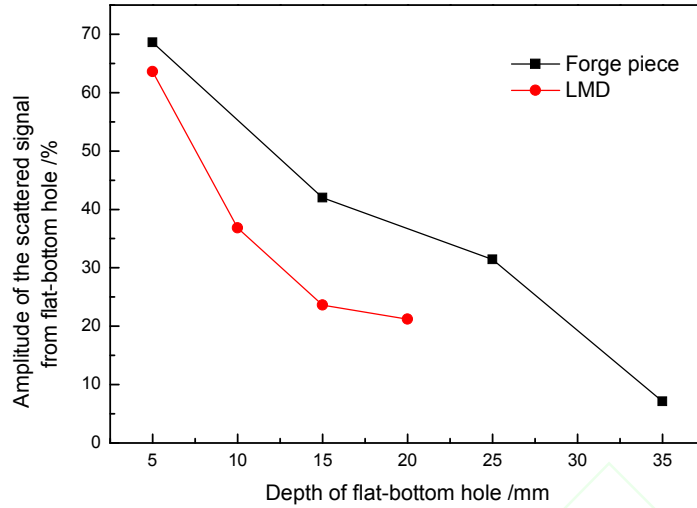


图 7 材料厚度对超声波波幅衰减的影响

Fig.7 Influence of material thickness on the 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]。由 Kai Wang 等人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^[24]，因此该介质各向超声声速也不同。

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，从而得到材料实际声速。

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

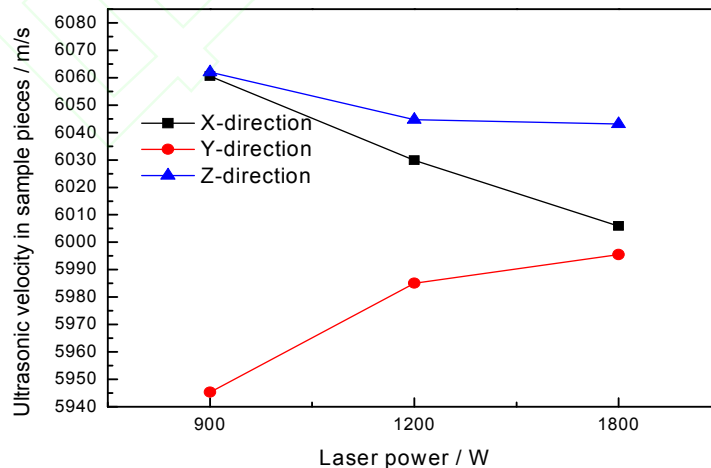
式中： c_m 为材料实际声速； c_r 为材料参考声速； l_m 为样块实际尺寸； l_r 为样块参考尺寸。

激光熔化沉积 TA15 钛合金实际声速比对如图 7 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，影响在 1%左右。由式（1）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受能量密度（global energy density, GDE）影响^[25]，

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

式中：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 GED 较低时出现，是由每层熔融粉末之间未熔合的粉末造成^[27]，层内孔隙在 GED 较高时出现，是由熔池蒸发时产生的气孔导致^[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的增加。由 Chunlei Qiu 等人研究表明，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^[29]。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，这就会导致以气孔为特征的层间孔隙增加，使材料 X 方向超声声速的降低；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。X、Y 两个方向影响较小，且扫描间距 2.5mm 和 3mm 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型方向对声速影响最大，激光功率次之，扫描间距影响最小。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，制作对比试块时需考虑声速各方向异性和制造工艺参数。



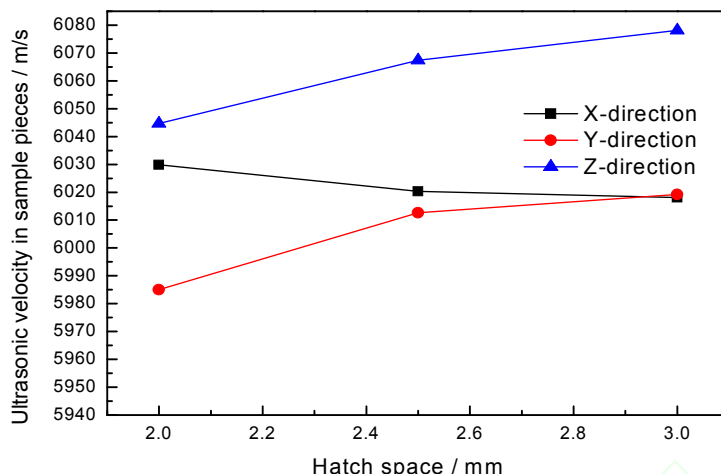


图 8 工艺参数对超声声速的影响 (a)激光功率 (b)扫描间距

Fig.8 Influence of process parameters on ultrasonic velocity (a) Laser power (b) Hatch space

4 结论

本文通过对不同激光功率和搭接率的 TA15 样块进行超声灵敏度和超声声速的检测得到了以下结论:

(1) 通过比较不同激光功率和搭接率 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。

(2) 通过比较 TA15 钛合金激光熔化沉积样块不同成形方向、激光功率和搭接率的超声声速,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的深度精度,因声速差异较小且缺陷深度对材料性能影响较小,一般其情况下可忽略影响。

参考文献:

- [1] Zhan X, Lin X, Gao Z, *et al.* Modeling and simulation of the columnar-to-equiaxed transition during laser melting deposition of Invar alloy[J]. Journal of Alloys & 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, 王宝齐, 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, 沈竞兴, 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 & Structures, 2000, 37(1): 13-27.

- [7] Schehl N; Kramb V, Dierken J, *et al.* Ultrasonic Assessment of Additive Manufactured Ti-6Al-4V[C]// 44th Annual Conference on Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2017, Jul: 16-21.

- [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, Gothenburg, Sweden.

- [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): 69-77.

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): 69-77.

- [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, 524(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, 524(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(03):119-126.

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(03):119-126.

- [15] Lai Y B. Research on processing characteristics during laser metal direct deposition additive manufacturing [D]. Beijing: 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]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [16] R. Halmshaw, Introduction to the Non-destructive Testing of Welded Joints, second ed., Abington Publishing, Cambridge, 1996.
- [17] Hislop J D, Flaw size evaluation in immersed ultrasonic testing, Non-Destructive Testing, 1969, 2(3): 183–192.
- [18] W. Kleinert, Defect Sizing using Non-destructive Ultrasonic Testing, Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [19] Zheng H, Lin S Q. Ultrasonic testing[M]. 2th 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 304 L stainless steel[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(5):342-348.
- [22] He B B. The basic research of ultrasonic technology in polymer morphology and structure characterization and on-line detection of injection molding process[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型过程在线检测中应用的基础研究[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] Kai Wang, Rui Bao, Dong Liu, *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 V 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.
- [26] Wang L, Pratt P, Felicelli S, *et al.* Pore formation in laser-assisted powder deposition process[J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2009, 131:051008.
- [27] Susan D, Puskar J, Brooks J, *et al.* Quantitative characterization of porosity in stainless steel lens powders and deposits[J]. Mater. Charact., 2006, 57:36-43.
- [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]. J. Laser Appl., 2011, 23:

022009.

- [29] Chunlei Qiu, Chinnapat Panwisawas, Mark Ward, *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.



网络首发:

标题: TA15钛合金激光熔化沉积工艺参数对超声检测精度的影响

作者: 孙长进,赵吉宾,赵宇辉,何振丰,王志国,高元

收稿日期: 2019-05-09

录用日期: 2019-06-27

DOI: 10.3788/aos201939.1014002

引用格式:

孙长进,赵吉宾,赵宇辉,何振丰,王志国,高元. 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):1014002.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

基于数字显微镜成像系统的响应曲线标定方法研究

冯维 曲兴华 王惟婧 张福民

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

光学学报,2018,38(4):0411006

基于多层石墨烯材料的光纤声波传感器

李晨 陆雪琪 庾财斌 吴繁 吴宇

电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

光学学报,2018,38(3):0328017

基于定点旋转的显微三维数字图像相关系统标定方法

吴敏杨 郭建军 蒋明

苏州科技大学数理学院, 江苏 苏州 215009

光学学报,2018,38(12):1215010

投影校正系统的参数标定技术研究

杨帆 韩成 白宝兴 张超

长春理工大学计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022

光学学报,2018,38(1):0115001

基于虚拟双球面的仿生复眼系统标定

何建争 简慧杰 马孟超 王克逸

中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027

光学学报,2017,37(7):0722001