DOI: 10.3901/JME.2020.08.141

激光增材制造钛合金构件的阵列超声检测方法研究*

李文涛¹ 周正干^{1,2}

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083;
2. 北京航空航天大学先进航空发动机协同创新中心 北京 100083)

摘要: 钛合金激光增材制造技术已经逐步应用于航空航天等领域中复杂构件的直接近成形制造。然而, 由于特殊的制造工艺导致的高衰减性和不均匀性使其内部缺陷采用常规超声检测方法检测效率低、成像结果差, 为此研究了阵列超声检测方法在增材制造钛合金构件检测中的关键技术。采用激光增材制造方法制备 TC18 钛合金试样, 利用高频水浸超声方法分析其超声衰减特性, 提出适用于增材制造钛合金构件的内部回波成像方法。基于线阵换能器全矩阵数据采集的方法分析声波沿试样不同表面入射时声波群速度随角度的变化规律, 对增材制造钛合金试样的各向异性进行分析, 并基于测量结果对阵列超声成像算法进行校正。分别采用线阵和环阵换能器对试样进行 C 扫描检测试验, 分析影响检测结果的主要因素。研究表明, 采用环阵换能器结合全聚焦算法能更精确地表征试样的内部缺陷, 在增材制造钛合金构件的无损检测中有较好的应用前景。

关键词: 增材制造; TC18 钛合金; 高衰减; 阵列超声; 无损检测

中图分类号: TB553

Research on Ultrasonic Array Testing Methods of Laser Additive-manufacturing Titanium Alloy

LI Wentao¹ ZHOU Zhenggan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083;
2. The Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-engine, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: Laser additive manufacturing (AM) technology of titanium alloy has been gradually applied to rapid prototyping of complex components in aerospace and other fields. However, due to the high attenuation and inhomogeneity caused by its special manufacturing process, it is inefficient and poor imaging results to detect its internal defects by conventional ultrasonic testing methods. For this reason, the key technologies of ultrasonic array method in the detection of additive-manufacturing titanium alloy are studied. A TC18 titanium alloy specimen is prepared by laser AM method, the ultrasonic attenuation characteristics of the specimen are analyzed based on the high frequency ultrasonic immersion method, and the internal echo imaging method for AM titanium alloy components is proposed as well. The variation trends of ultrasonic group velocity in the specimen with different propagating angles are measured using full matrix capture method of linear array transducer. In addition, the anisotropy of the AM titanium alloy is summarized and the ultrasonic array imaging algorithms are corrected based on the measurement results. Finally, the C scan detection experiments are conducted on the specimen by using the linear array and the annular transducer respectively, and the main factors that affect the test result are analyzed. The results show that the internal defects of the AM titanium alloy specimen can be more accurately characterized using the annular array transducer with the total focusing method (TFM), and it has a good application prospect in the nondestructive testing of the AM titanium alloy components.

Key words: additive manufacturing; TC18 titanium alloy; high attenuation; ultrasonic array; nondestructive testing

* 国家自然科学基金资助项目(51775026)。20190618 收到初稿, 20191209 收到修改稿

0 前言

增材制造技术相对于锻造、铸造和机械加工等传统制造技术,具有可设计性强、易加工成型等独特优势。当前激光增材制造钛合金构件的力学和疲劳性能可媲美常规的锻铸件,已经逐步应用于航空航天、武器装备等重大等领域^[1-3],但是钛合金增材制造技术涉及材料熔化成形的复杂物理过程,在制造过程中可能会产生气孔、裂纹等多种类型缺陷^[4-6],这会严重影响增材制造钛合金构件使用性能,甚至导致严重的事故发生。然而,增材制造工艺的特殊性使得增材制造钛合金内部具有不均匀、晶粒粗大和高衰减等特性,直接采用针对锻件或铸件的常规超声检测方法很难得到准确直观的检测结果甚至无法检测^[7-9],这也一定程度上限制了增材制造钛合金构件在关键承力结构中的应用。因此,研究有效的超声检测方法实现其内部各类缺陷的准确评价具有重要意义。

由于增材制造技术的发展时间较短,目前在国内外关于增材制造构件内部缺陷的无损检测技术研究均处于起步阶段,大多直接沿用传统构件的检测技术。ZELTMANN 等^[7]采用频率为 5 MHz,焦距为 25.4 mm 的常规单通道水浸超声探头没能检测到增材制造试样中预埋的小于 0.5 mm 大小的缺陷,但是这种缺陷在疲劳载荷条件下会影响试件拉伸性能,提出在满足分辨率要求下如何克服衰减和噪声的影响是检测增材制造构件的一个重要挑战。CERNIGLIA 等^[10]提出了一种能在线检测增材制造铬镍铁构件的激光超声检测方法,该系统能检测到试样单沉积层表面直径为 0.1 mm 的微缺陷和深度小于 0.8 mm 的较大缺陷,并利用高灵敏度 X 射线技术对检测结果进行了验证,但是该系统存在设备成本高、检测效率低等问题。美国国家航空航天局(NASA)研究中心^[11]在增材制造结构无损检测报告中介绍了采用阵列超声相控阵 B 扫描成像的方法能实现 2219 铝电子束增材制造结构中嵌入空隙和弱沉积层缺陷的检测,但是信噪比较差、检测精度不高。阵列超声技术是一种基于多组独立阵元晶片的多通道超声技术,具有检测分辨率高、声束控制灵活的特点,在航空航天、核电等领域复杂结构和特殊材料的检测中已经展示了其巨大潜力^[12-14]。但是,将阵列超声检测方法应用于增材制造钛合金构件内部缺陷的检测时还需要根据其声学特性做进一步研究。一方面,超声波会在增材制造钛合金构件内部产生不规则的散射和声束扭曲,难以对声束传播路径进行控制。另一方面,增材制造钛合金构件具有

高衰减特性,声束非聚焦区域的缺陷信号容易被散射和噪声信号所淹没。

为了准确检测增材制造钛合金构件的内部缺陷,以采用激光增材制造技术制备的 TC18 钛合金试样为研究对象,分别采用常规水浸超声检测方法和线阵换能器全矩阵数据采集方法对其衰减特性和整体各向异性进行了分析和总结。在此基础上,优化了采用线阵换能器的电子扫描成像和环阵换能器的全聚焦成像算法,实现了增材制造钛合金试样内部预埋缺陷的整体检测。最后分析了试样内部缺陷的 C 扫描成像结果,提出了适用于增材制造钛合金构件的超声检测方法。

1 增材制造钛合金构件声学特性研究

1.1 激光增材制造钛合金试样

增材制造结构实质上是一种逐层熔覆的整体焊接结构,成形过程如图 1a 所示。试验所采用的试样是由高能束激光打印的 TC18 钛合金立方体,为了便于对试样进行分析,定义试样成形过程中激光扫描和步进的面为打印面,即试样垂直于沉积方向的表面;其他包括所有熔覆层的两个非打印面分别为沉积面 1 和沉积面 2。试样的低倍宏观晶相组织为沿沉积方向生长的典型柱状晶组织,晶粒平均宽度约为 3 mm,试样及晶粒分布示意图 1b 所示。

图 1 增材制造 TC18 钛合金试样的成形示意及实物图

增材制造 TC18 钛合金试样是边长为 55 mm 的正方体结构, 分别在试样的打印面及相邻的两个非打印面的不同位置加工直径为 0.8 mm、深度为 5 mm 的平底孔, 分别定义为缺陷 1、缺陷 2 和缺陷 3, 试样在三个正交方向的投影图像中均包含有一个平底孔和两个横孔缺陷的投影, 缺陷尺寸及位置分布示意图如图 2 所示。

图 2 试样预埋缺陷的尺寸及分布示意图

1.2 增材制造钛合金构件的衰减特性分析

为了准确分析增材制造钛合金构件对超声波的衰减差异, 采用水浸超声 C 扫描检测系统对试样进行检测试验, 探头的频率为 15 MHz、焦距为 50.8 mm, 设定扫描步距大小为 0.2 mm, 利用底面回波信号进行检测成像。

换能器分别在打印面和两个沉积面内进行扫描的 C 扫描检测结果如图 3 所示。可以发现, 试样同一表面的底面回波幅值在不同位置处的差异很大, 最大差值超过了 20 dB。此外, 不同表面的底面回波衰减规律也有差异: 底面回波最高幅值在打印面呈“点”状和“栅格”状分布, 而在两个非打印面(沉积面 1 和沉积面 2)沿沉积方向呈“带”状分布。究其原因, 在增材制造过程中存在沿沉积方向生长的粗壮柱状晶, 如图 1b 所示, 声波沿不同方向传播时, 经过的晶粒界面数量和散射程度有所差异, 从而导致增材制造试样不同成形表面的底面回波具有不同的衰减规律; 其次, 由于从不同方向检测时底面回波幅值衰减差异明显且无可量化的规律, 难以通过增益补偿的方法对检测结果进行优化。因此, 基于

图 3 基于底面回波幅值的试样整体 C 扫描结果

底面回波幅值的成像方法不适用于增材制造钛合金构件内部缺陷的评价。

为此, 将成像闸门设置在试样内部区域并适当增大检测增益, 基于试样内部区域回波信号的 C 扫描成像结果如图 4 所示。可以看出, 声波从不同表面入射时成像结果的信噪比均较差, 无法从 C 扫描结果中识别预埋缺陷的尺寸和形貌。这主要由于常规固定焦距的探头只能在试样内部某一深度处聚焦, 有效作用于非聚焦区域缺陷的声波分量大幅度削减, 导致回波信号幅值较低无法与噪声信号区分。当增大检测仪器增益时, 噪声信号和试样内部的散射信号被放大, 容易导致 C 扫描检测结果中产生噪声干扰和“伪像”。

图 4 基于内部缺陷回波的水浸超声 C 扫描结果

1.3 增材制造钛合金构件的声速各向异性分析

采用阵列超声检测方法能实现声束在试样内部的多点动态聚焦, 但是声速随角度变化的各向异性会导致阵列超声合成声束无法准确聚焦在指定位置。增材制造钛合金构件的声速各向异性本质上由移动熔池的快速非平衡凝固引起^[15], 内部凝固晶粒会导致声束发生偏转扭曲, 难以准确确定其内部缺陷。为了对试样的声波群速度变化特性进行分析, 采用了一种线阵换能器全矩阵数据采集的测量方法, 即换能器某一阵元激发, 第 1 至 N 个阵元分别接收的声束发射接收模式^[16], 当换能器在打印面沿 x 方向布置时, 声波群速度随角度的变化规律的测量原理如图 5 所示。

图 5 基于全矩阵数据采集方法的声波群速度测量原理

某一时刻阵元 i 发射, 阵元 j 接收时的声波群速度 $c(\theta_i)$ 可表示为

$$c(\theta_i) = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + 4h^2}}{t_{ij}} \quad (1)$$

式中, $(x_i - x_j)$ 为发射阵元和接收阵元的相对距离; h 为试样厚度; 传播角度 $\theta_i = \theta_j = \arctan(|x_i - x_j|/2h)$; t_{ij} 为声波的传播时间, 可依次按照这种不同的发射-接收模式得到不同角度下的声波群速度。

为了分析增材制造钛合金试样不同方向的声速变化规律, 分别对试样三个相邻表面的正交方向进行测量, 即将线阵超声换能器分别布置在试样打印面的 x 方向和 y 方向, 沉积面 1 的 y 和 z 方向, 沉积面 2 的 x 和 z 方向进行测量, 对每个方向测量三次取平均值, 得到的声速计算结果如图 6 所示。

(a) 打印面入射时的群速度随角度变化关系

(b) 沉积面 1 入射时的群速度随角度变化关系

(c) 沉积面 2 入射时的群速度随角度变化关系

图 6 增材制造钛合金试样声速各向异性的测量结果

图 6a 所示为声波从试样打印面入射时声速随

角度变化的测量结果, 可以发现声波群速度及其变化规律在 x 和 y 两个方向较为相近, 在 $0^\circ \sim 24^\circ$ 偏转范围内, 声波群速度随着偏转角度增大呈逐渐上升趋势, 偏转角度每增大 1° , 速度平均上升约 6.3 m/s 。然而, 当声波沿非沉积方向从沉积面 1 和沉积面 2 进行入射时, 根据阵元排列的方向, 声波群速度随角度呈明显不同的变化规律: 当换能器阵元沿熔覆层进行排列时(沉积面 1 的 x 、沉积面 2 的 y 方向), 声波群速度随角度的变化与打印面相似, 均随着角度的增大而增大, 但增长幅度较小; 当阵元排列方向与沉积方向一致时(z 方向), 声波群速度随角度的变化呈无规则趋势。因此, 当采用线阵超声换能器从试样非打印面进行入射检测时, 还需要根据换能器具体摆放位置确定声速各向异性。此外, 声波沿着沉积方向的声速略低于垂直于沉积方向的声速。可以看出, 增材制造钛合金构件的声速各向异性较为复杂, 在采用超声检测方法时, 除了考虑其声速各向异性的影响之外, 还需要考虑声波的入射面。

根据增材制造 TC18 钛合金试样的衰减特性分析结果可知, 由于声波在试样各个位置处的底面回波幅值差异较大, 利用底面回波的成像方法无法对内部缺陷进行评价, 因此需提高材料内部的声波能量分布以提高基于缺陷反射信号成像结果的信噪比。同时, 由于声波从不同成形表面入射时群速度随角度变化的规律有明显差异, 在校正声速各向异性时需同时考虑增材制造钛合金构件的成形方向和换能器与被测试样的相对位置参数。

2 检测试验

2.1 检测系统设置

线阵和环阵换能器具有声场聚焦性能优良、声束控制简单等特点, 常用于大厚度、高衰减材料的检测^[17], 在上述理论研究的基础上, 分别利用线阵和环阵换能器, 设计相应的检测方案对增材制造 TC18 钛合金试样进行检测试验, 换能器参数如表 1 所示。为了得到更加直观的检测结果, 建立了阵列超声 C 扫描检测系统^[18], 如图 7 所示。

表 1 换能器参数

类型	频率/MHz	阵元个数	阵元间距/mm	孔径大小
线阵换能器	10	64	0.3	48
环阵换能器	10	16	1.3	16

2.2 线形阵列超声检测

采用表 1 所示的线阵换能器检测时, 设定扫查水距为 20 mm 、激发孔径大小为 48 个阵元的电子扫

图7 阵列超声 C 扫描检测系统构成

描方式进行扫查；其次，为了保证采用常规聚焦算法时试件内部各个深度均有较强的缺陷回波信号，本试验利用动态聚焦算法在试样内部以 5 mm 的间隔设置 10 个动态聚焦点，并利用各向异性的测量结果对延时法则进行优化。最后设定闸门起始范围接近 55 mm，利用整个试件内部回波信号进行成像，如图 8 所示。

图8 采用电子扫描的线阵换能器 C 扫示意图

以图 1 中所定义的增材制造钛合金试样的打印面作为声束入射面进行 C 扫描检测，扫查结果如图 9 所示。从 C 扫描结果中可以明显分辨出试样中所预制的三个人工缺陷。但是，因为线阵换能器的焦斑宽度沿阵元排列方向和阵元长度方向不相等，导致平底孔缺陷呈椭圆形状，两个横孔缺陷的形状也

图9 采用电子扫描的线阵换能器 C 扫结果(打印面)

产生了不同程度的“畸变”，缺陷的成像尺寸远大于缺陷实际尺寸。此外，距离近表面的缺陷 2 与底面的缺陷 1 的中心幅值差异较大，难以对缺陷进行准确的定量表征。

上述结果表明，要准确获得增材制造钛合金试样内部缺陷的 C 扫描成像结果，还需要对以下两个方面进行考虑：受增材制造钛合金构件复杂各向异性的影响，换能器焦斑的对称性也会较大程度上影响其扫查结果，仅仅通过各向异性声速校准算法也无法实现试样内部缺陷的准确成像；另一方面，增材制造钛合金构件内部缺陷回波信号的幅值会随着其深度的增大而急剧下降，为避免非聚焦区域和较大深度区域缺陷的回波信号幅值过低，应尽可能提高增材制造钛合金构件内部的聚焦点数量。

然而，采用阵列超声相位控制技术进行检测时，合成声束动态聚焦点的数量受到超声激励接收硬件性能的限制。为此，采用可在指定区域中实现大规模离散点虚拟聚焦的全聚焦方法(Total focusing method, TFM)^[19]，有效避免增材制造钛合金构件不同区域的声能分布差异。但是，线阵换能器的 TFM 成像区域通常为一个矩形区域且阵元数量相对较多，其庞大的全矩阵数据导致采用现有大部分硬件难以实现实时的 C 扫成像；同时，线阵换能器沿阵元长度方向无法聚焦，焦斑宽度沿阵元排布方向远小于沿阵元长度方向，这也是导致扫查结果不够准确的主要原因。因此，采用阵元呈同心圆分布且阵元数量较少的环阵换能器对增材制造钛合金试样展开检测研究。

2.3 环形阵列超声检测

根据环形阵列超声换能器的特点，建立了一种可在其中心轴线上设置“无限”个虚拟聚焦点的 TFM 检测方法，如图 10 所示。由于在固定位置的 TFM 成像区域只包含换能器的中心轴线区域，且环阵换能器的阵元数量相对较少，这可以大大减少全矩阵数据量，保证了采用环阵换能器 TFM 检测时的扫描速度和成像的实时性。

图10 采用 TFM 的环阵换能器 C 扫示意图

为了便于对比检测结果, 设置与采用线阵换能器检测时相同的扫描水距和步进间距, 沿中心轴线方向每隔 0.2 mm 离散为一个虚拟聚焦点, 同样利用第 1.3 节各向异性的分析结果对环阵换能器 TFM 算法进行优化, 在打印面扫查的检测结果如图 11 所示。

图 11 采用 TFM 的环阵换能器 C 扫结果(打印面)

对比检测结果, 环阵 TFM 算法的阵列超声检测方法能有效克服增材制造钛合金构件的高衰减特性, 大大减小了不同深度缺陷回波信号幅值的差异。同时, 由于其完全对称的声场分布特性, 结合相应的各向异性校准算法能有效提升不同类型和不同位置处缺陷的成像精度。

由第 1.2、1.3 节的研究结果可知, 增材制造钛合金试样从不同成形面检测时有不同的衰减特性和各向异性, 为了进一步探究增材制造试样声学特性对检测结果的影响, 采用同样的环阵换能器参数和聚焦算法, 分别从沉积面 1 和沉积面 2 入射进行检测, 结果如图 12a 和图 12b 所示。检测结果中同样可以识别出所预埋的全部 3 个缺陷。但是, 图 12a 和图 12b 的横孔缺陷在宽度方向均产生了不同程度的“畸变”, 一方面由图 6 测量结果可知, 声波从沉积面 1 和沉积面 2 进行入射时, 声波群速度随角度的变化在扫描和步进方向有较大差异, 难以用特定的群速度校正公式去优化。另一方面, 受试样内部沿沉积方向生长的柱状晶影响^[20], 当声波垂直于晶粒生长方向入射时, 经过的晶粒界面增加而加重声

(a) 采用 TFM 的环阵换能器 C 扫结果(沉积面 1)

(b) 采用 TFM 的环阵换能器 C 扫结果(沉积面 2)

图 12 从沉积面进行 TFM 扫查的 C 扫结果

束的散射和扭曲, 声束的衰减要大于声波沿着晶粒方向传播时的衰减, 所以图 12a 和 12b 中检测结果的信噪比低于图 11 所示的检测结果。

3 结论

(1) 采用激光增材制造技术制备了 TC18 钛合金试样, 基于常规水浸超声底面回波幅值的成像结果表明其同一表面不同位置处的底面回波幅值衰减有较大差异, 不同成形表面的底面回波也具有不同的衰减规律, 因此采用底面回波的方法难以对其内部缺陷进行检测。

(2) 声波沿增材制造钛合金试样不同成形表面入射时, 群速度沿角度的变化差异较大。当声波沿试样沉积方向入射时, 群速度在不同方向的变化较为规律, 易用特定的拟合曲线去校准成像算法。

(3) 由于增材制造钛合金构件的各向异性和高衰减特性, 在基于内部回波信号进行检测时, 不同深度声波的能量大小和换能器焦斑的对称性对其 C 扫描检测结果有较大影响。

(4) 分别利用线阵和环阵换能器对增材制造钛合金试样进行了检测, 环阵换能器 TFM 的 C 扫结果能更准确地检测到试样内部不同位置预制的缺陷, 更适合于增材制造钛合金构件等高衰减材料的 C 扫描检测。

(5) 增材制造钛合金构件的各向异性与它内部晶粒生长方向有密切关系, 通过增材制造钛合金试样的 C 扫描检测结果可知, 在采用超声方法检测增材制造材料时有必要考虑其成形方向, 尽可能沿着其沉积方向进行入射检测。

参 考 文 献

- [1] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5): 28-30.

- [2] DANIEL G, BASTIAN H, FRANZ G, et al. Continuous 3D printing for additive manufacturing[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2014, 20(4): 320-327.
- [3] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698. WANG Huaming. Materials fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [4] HOOREWEDER B V, MOENS D, BOONEN R, et al. Analysis of fracture toughness and crack propagation of Ti6Al4V produced by selective laser melting[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2012, 14(1-2): 92-97.
- [5] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMIATIN S L, et al. Effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(4): 299-305.
- [6] 阮雪茜, 林鑫, 黄春平, 等. TC4 合金激光立体成形孔洞类缺陷的超声检测[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1203001-1-1203001-8. RUAN Xueqian, LIN Xin, HUANG Chunping, et al. Ultra-sonic nondestructive testing of hole type defects in laser solid forming TC4 alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203001-1-1203001-8.
- [7] ZELTMANN S E, GUPTA N, TSOUTSOS N G, et al. Manufacturing and security challenges in 3D printing[J]. *JOM*, 2016, 68(7): 1872-1881.
- [8] 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. YANG Pinghua, SHI Lijun, LIANG Jing, et al. Experimental research on ultrasonic characteristics of tc18 additive manufacturing titanium alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 524(5): 38-42.
- [9] 凌松. 增材制造技术及其制品的无损检测进展[J]. *无损检测*, 2016, 38(6): 60-64. LING Song. Additive manufacture technique and related NDT for its products[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(6): 60-64.
- [10] CERNIGLIA D, SCAFIDI M, PANTANO A, et al. Inspection of additive manufactured layered components[J]. *Ultrasonics*, 2015, 62: 292-298.
- [11] WALLER J M, PARKER B H, HODGES K L, et al. Nondestructive evaluation of additive manufacturing state of the discipline report[R]. NASA, 2014(218560), 2014.
- [12] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for nondestructive evaluation: A review[J]. *NDT&E International*, 2006, 39(7): 525-541.
- [13] GUAN X, ZHANG J, RASSELKORDE E M, et al. Material damage diagnosis and characterization for turbine rotors using three-dimensional adaptive ultrasonic NDE data reconstruction techniques[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54: 516-525.
- [14] SONG S J, SHIN H J, JANG Y H. Development of an ultrasonic phased array system for non-destructive tests of nuclear power plant components[J]. *Nuclear Engineering Design*, 2002, 214: 151-161.
- [15] 王华明, 张述泉, 王韬, 等. 激光增材制造高性能大型钛合金构件凝固晶粒形态及显微组织控制研究进展[J]. *西华大学学报*, 2018, 37(4): 9-14. WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Tao, et al. Progress on solidification grain morphology and microstructure control of laser additively manufactured large titanium components[J]. *Journal of Xihua University*, 2018, 37(4): 9-14.
- [16] CHUAN L, DAMIEN P, PAUL, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2013, 53(1): 8-17.
- [17] SCHMERR L W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays [M]. London: Springer International, 2015.
- [18] 周正干, 李文涛, 李洋, 等. 相控阵超声水浸 C 扫描自动检测系统的研制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 28-34. ZHOU Zhenggan, LI Wentao, LI Yang, et al. Development of ultrasonic phased array immersion c-scan automatic detection system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 28-34.
- [19] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 701-711.
- [20] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. *中国科学*, 2015, 45(9): 1111-1126. LIN Xin, HUANG Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. *Science China*, 2015, 45(9): 1111-1126.

作者简介: 李文涛, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为现代超声检测技术。

E-mail: liwentao@buaa.edu.cn

周正干(通信作者), 男, 博士, 教授。主要研究方向为超声无损检测和计算机测控技术等。

E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn