doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20191104001

TA15 钛合金激光熔化沉积制件超声相控阵检测

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

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169; 3. 中国 科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为了确保激光增材制件的质量安全,对其进行可靠的无损检测与评价尤为重要。针对 TA15 钛合金激光熔化 沉积制件,使用常规超声以及超声相控阵检测技术对其内部缺陷进行检测,重点研究了激光增材制件内部缺陷的超声 检测特性以及超声相控阵检测技术在增材制件上的应用优势。使用激光熔化沉积技术制备了含有熔合不良缺陷的试 验样件,从 XYZ 3 个方向分别对样件进行了全面检测。结果表明,激光增材制件内部的缺陷具有明显的方向性,因此, 为了确保激光增材制件检测结果可靠,应从 XYZ 3 个方向分别进行全面检测。相比与常规超声检测,超声相控阵检测 技术大大提高了检测效率,能够直接成像缺陷的轮廓边界,降低了技术依赖性及人工疲劳性,针对大型增材制件的检测 需求具有广阔的应用前景。

关键词:激光熔化沉积;缺陷;超声相控阵检测;超声;检测方向

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2020)02-0127-09

Ultrasonic Phased Array Inspection of TA15 Titanium Alloy Components Produced by Laser Melting Deposition

HE Zhenfeng^{1, 2}, ZHAO Yuhui^{1, 2, 3}, ZHAO Jibin^{1, 2}, WANG Zhiguo^{1, 2}, SUN Changjin^{1, 2, 3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is particularly important to carry out reliable non-destructive testing and evaluation for components produced by laser additive manufacturing. Internal defects of TA15 titanium alloy samples produced by laser melting deposition was detected using conventional ultrasonic and ultrasonic phased array inspection technology. The ultrasonic inspection characteristic of internal defects of laser additive parts and the advantages of ultrasonic phased array inspection technology in additive parts are mainly studied. The sample with lack of fusion defects was manufactured by laser melting deposition technology and comprehensive inspection was carried out from *XYZ* three directions. Results show that defects in laser additive parts have obvious directionality. In order to ensure the reliable inspection of laser additive parts, comprehensive inspection should be carried out from *XYZ* three directions. Compared with conventional ultrasonic testing, ultrasonic phased array inspection technology can greatly improve inspection efficiency, directly image the contour boundary of defects, and reduce the technical dependence and artificial fatigue, which has broad application prospects for large additive parts.

Keywords: laser melting deposition; defects; ultrasonic phased array inspection; ultrasonic; inspection directions

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2020-04-01

通信作者: 赵宇辉(1983—), 男(汉), 副研究员, 硕士; 研究方向: 激光增材制造; E-mail: yhzhao@ sia. cn

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1104003)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFB1104003)

引用格式:何振丰,赵宇辉,赵吉宾,等. TA15 钛合金激光熔化沉积制件超声相控阵检测[J].中国表面工程,2020,33(2):127-135.
 HE Z F, ZHAO Y H, ZHAO J B, et al. Ultrasonic phased array inspection of TA15 titanium alloy components produced by laser melting deposition[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 127-135.

0 引 言

激光增材制造技术是一种数字化的"近净成 形"制造技术,可以直接成形任意复杂的三维几 何实体,成形时间短,制造成本低,广泛应用于航 空航天等领域。增材制件作为航空航天等领域 的重要结构件,对其进行可靠的无损检测与评价 尤为重要。增材制造由于逐点、逐线、逐层的材 料沉积方式以及快速冷却凝固的成形工艺,导致 增材制件内部容易产生气孔、熔合不良、裂纹等 缺陷[1-4]。关于金属增材制件无损检测领域的研 究主要集中在超声、射线和涡流检测^[5-7],射线检 测对裂纹、未熔合等面积型缺陷并不敏感,容易 发生漏检,而涡流检测只能检测表面或近表面缺 陷,相比较而言,超声检测对气孔、熔合不良、裂 纹等缺陷皆具有较高的可检性,并且更适用于工 业现场及大型零件的检测,针对增材制件具有更 广的检测适应性。

葡萄牙学者 Lopez 等^[8]研究了超声检测及射 线检测在电弧增材制件内部缺陷无损检测方面 的应用。意大利学者 Lévesque 等^[9]使用激光超 声检测技术成功检测到了 IN718 高温合金激光 熔粉、激光熔丝成形增材制件以及 Ti6Al4V 钛合 金电弧熔丝成形增材制件内部的脱粘、熔合不 良、弥散气孔等不同类型的缺陷。意大利学者 Cerniglia 等^[10]初步研究了增材制件激光超声在 线检测技术,成功检测到了镍基高温合金表面及 近表面的微小缺陷。中国航发北京航空材料研 究院史亦韦等[11-12]研究了增材制件不同方向的 超声声速以及检测灵敏度,并对比了气孔、熔合 不良缺陷的超声检测定量尺寸与真实尺寸的差 异。中航工业北京航空制造工程研究所韩立恒 等[13]研究发现超声相控阵检测技术能够很好地 识别 A-100 钢电子束熔丝成形制件内部射线检 测无法识别的微裂纹缺陷,但是超声波入射方向 和角度对微裂纹的识别很关键。以上研究对超 声无损检测技术在增材制造领域的应用推广具 有重要意义,但研究内容还有待深入,尚未形成 标准的检测工艺及检测方法。

超声相控阵检测技术将多个检测晶片集成于 一个探头,利用多声束进行扫描检测,通过控制声 束灵活的偏转聚焦,可大大提高检测效率,针对增 材制造技术成形的大型及复杂零件具有明显的检测优势。文中采用常规超声检测与超声相控阵检测技术研究 TA15 钛合金激光熔化沉积制件内部缺陷的超声检测特性,并对比了超声相控阵检测技术在增材领域的检测优势,为增材制件超声检测工艺及检测方法的建立提供依据与参考。

1 试验准备

1.1 样品制备

激光熔化沉积技术利用高能量激光束将金 属基体表层材料局部熔化并形成熔池,与此同时 把金属粉材送到熔池中,使其熔化并凝固成新的 金属层,通过激光束的移动形成由点到线的沉积 轨迹,之后由线到面,完成一层的轨迹沉积后,Z 方向增加一定高度进行下一层的粉末沉积,由此 完成三维零件的增材制造,是一种快速加热后急 剧冷却的成形过程。激光增材制造由于逐点、逐 线、逐层的沉积成形方式,成形后的组织具有明 显的方向性,表现为 XYZ 3 个方向各向异性,如 图1所示,其中X表示激光束步进方向,Y为激 光束扫描方向,Z为熔融沉积方向。激光增材制 件由于特殊的成形工艺使其组织、力学性能以及 内部缺陷特征都与传统锻件及铸件存在很大差 异[14-16],故应对组织方向性对其内部缺陷的超声 检测特性的影响进行研究。



图 1 增材制造成形方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the forming directions of additive manufacturing

试验通过改变扫描间距来制备含有缺陷的 激光熔化沉积试验样件,试验参数如表1所示, 扫描间距分别设定为2、2.5和3mm,其他试验参 数保持一致。试验所用的沉积材料为 TA15 钛合 金球形粉末,粉末粒度为 70 ~ 80 μm,其主要成 分(质量分数)如下: 6.53% Al, 1.53% Mo, 1.47% V, 1.78% Zr, 0.13% Fe, 0.033% Si, 0.012% C,0.014% N,0.005% H,0.11% O,其余 为 Ti。基材为锻造 TA15 钛合金板材,厚度为 20 mm。激光束 *X* 方向步进 22 mm(根据扫描间 距适当调整), Y 方向扫描距离为 20 mm, 沉积层 数为 20 层。为满足超声检测需求, 使用电火花 线切割机床对 6 个面进行切割, 预留 0.5 mm 加 工余量, 之后进行磨削, 确保检测表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu$ m, 加工后最终尺寸为 20 mm×18 mm× 11 mm($X \times Y \times Z$), 尺寸偏差为±0.1 mm, 试验样块 机加工后如图 2 所示。

表1 激光熔化沉积样件制备试验参数

Table 1 Experimental parameters of samples fabrication by laser melting depositon								
Serial	Laser	Scanning	Delivery	Spot	Carrier gas flow/	Protective gas	Oxygen	Hatch
number	power/W	speed/($mm \cdot s^{-1}$) speed/($g \cdot min^{-1}$)	diameter/mm	$(mL \cdot h^{-1})$	pressure/MPa	$content/10^{-6}$	spacing/mm
1	1200	6	5	3	450	0. 24	<100	2
2	1200	6	5	3	450	0.24	<100	2.5
3	1200	6	5	3	450	0.24	<100	3



Fig. 2 Samples produced by different hatch spacing

1.2 试验设备

1.2.1 激光熔化沉积设备

激光熔化沉积试验设备采用自主研发集成的六自由度同步送粉激光增材制造试验设备,由 史陶比尔机器人 RX160,2 kW 光纤激光器 YLS-2000-CL,水冷机 PH-LW150-TH2P,光纤激光加 工头 PLFDH0125,双料仓负压式气载式送粉系统 XSL-PF-01 A-2 及整机控制系统等组成。

1.2.2 超声检测设备

超声检测试验设备包括奥林巴斯相控阵整 合型仪器设备 FPX-1664PR, FocusPC 数据采集 分析软件, 5 MHz 常规探头 5P ϕ 6, 15 MHz 常规 探头 V113-RM, 5 MHz 一维线阵相控阵探头 5L64-38.4X10-A12-P-2.5-OM(结构示意图见 图 3), 0 度相控阵楔块 SA12-0 L-IHC, 拉绳编 码器, 以及机油耦合剂。使用的常规探头的晶 片面积为 9 π = 28.27 mm², 而相控阵探头的晶 片面积为 38.4×10= 384 mm², 单次检测面积增 大了 12 倍以上, 即单次扫查的检测效率提高了 12 倍以上。





1.3 试块

超声检测试块可分为标准试块和对比试块,标准试块用于仪器探头系统性能的校准,对比试 块是指与被检件或材料化学成分相似,含有意义 明确参考反射体(反射体应采用机加工方式制 作)的试块,用以调节超声检测设备的幅度和声 程,以将所检出的缺陷信号与已知反射体所产生 的信号相比较,即用于检测校准的试块。根据检 测需求,使用 TA15 锻造钛合金材料,参考 J/BT8428—2015标准设计并制造了含 $\phi 2 \text{ mm}$ 平 底孔以及含 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 平底孔的对比试块,试块 尺寸如图 4 所示,平底孔直径分别为 $\phi 2 \text{ mm}$ 、 $\phi 0.5 \text{ mm},校准距离为5,15 和 25 \text{ mm}.$



Fig. 4 Schematic diagram of reference blocks with flat bottom holes

1.4 相控阵探头扫查方向

一维阵列相控阵探头声束发射方向具有主动面与非主动面(被动面),主动面平行于阵列探头轴线,被动面平行于阵列探头宽度^[17]。相控阵探头沿不同的方向进行扫查,会出现不同的声束覆盖,可能得到不同的检测结果。现将扫查方向定义为探头轴线方向与扫查轴的夹角,如图5 所示,分别为0°扫查和90°扫查。0°扫查为主动面扫查,每条声束依次扫过缺陷,但扫查宽度与晶片的宽度相当,扫查面积较小。而90°扫查为 非主动面扫查,只有固定的声束扫过缺陷,扫查宽度与晶片阵列的宽度相当,扫查面积较小。而90°扫查为



2 结果与讨论

2.1 常规超声检测结果

2.1.1 5 MHz 常规探头检测结果

使用 ϕ 2 mm 平底孔对比试块进行声速、灵 敏度、以及 TCG 校准,将 ϕ 2 mm 平底孔的反射 回波波幅校准到 80%。用校准后的探头检测 ϕ 0.5 mm 的平底孔,检测结果如图 6 所示, φ 0.5 mm 平底孔的反射回波约为 11%,说明 5 MHz 的超声探头经φ 2 mm 平底孔校准后能够 识别大于φ 0.5 mm 平底孔当量的缺陷。用校准 后的探头分别从 X(Y-Z 面)、Y(X-Z 面)、Z(X-Y 面)3 个方向对 3 个试验样件进行全面检测,确保 检测区域无遗漏。



图 6 φ 0.5 mm 平底孔检测结果(5 MHz 常规探头, φ 2 mm 平底孔校准)

Fig. 6 Testing result of a ϕ 0.5 mm flat bottom hole (5 MHz probe, calibrated by ϕ 2 mm flat bottom holes)

检测发现,1号样件及2号样件内部皆未 检测到缺陷。而3号样件,从Y、Z方向进行检 测时皆未发现缺陷,但是从X方向检测到3处 缺陷。使用检测仪器自带的幅值包络功能获 取3个缺陷的最大反射波幅值,如图7所示, 但是图7中记录的探头移动过程中最大波幅 的包络曲线及对应的深度,并非真正的检测波 形,缺陷的具体形状及边界需要手动移动探头 进行定位识别,需要丰富的超声检测经验才能 完成。



Fig. 7 Envelope of the three defects' maximum reflected wave

2.1.2 15 MHz 常规探头检测结果

提高探头频率,能够减小声波波长,提高微 小缺陷的识别能力。考虑到 5 MHz 探头对 φ 0.5 mm 平底孔当量的缺陷的识别能力较差, 使用 15 MHz 常规探头进行检测研究。使用 ϕ 0.5 mm 平底孔对比试块进行声速、灵敏度、以及 TCG 校准,将 ϕ 0.5 mm 平底孔的反射回波波 幅校准到 80%。用校准后的探头检测 ϕ 0.5 mm 平底孔,检测结果如图 8 所示, ϕ 0.5 mm 平底孔 的反射回波波幅达到 80%,此时有足够的信噪比 能够对 ϕ 0.5 mm 平底孔当量的缺陷进行准确识 别,甚至能够检测到更小的缺陷,具有更高的灵 敏度。



图 8 φ 0.5 mm 平底孔检测结果(15 MHz 常规探头, φ 0.5 mm 平底孔校准)

Fig. 8 Testing result of a ϕ 0.5 mm flat bottom hole (15 MHz probe, calibrated by ϕ 0.5 mm flat bottom holes)

用校准后的探头分别从 XYZ 3 个方向对 3 个试验样件进行全面检测,确保检测区域无遗 漏。1 号样件及 2 号样件内部皆未检测到缺陷。 而 3 号样件,从 X 方向检测到 3 处缺陷,从 Y、Z 方向进行检测时仍未发现缺陷。

使用 5 MHz 及 15 MHz 常规探头校准后进行 检测,虽然具有不同的检测灵敏度,但获得的检 测结果一致,说明此次制备的试验样件中除了 3 号样件内部含有 3 处缺陷外不含 ϕ 0.5 mm 平 底孔当量以上的缺陷,且该类缺陷具有明显的方 向性,仅能从 *X* 方向检测到,从 *Y*、*Z* 方向检测 不到。

X方向为激光束步进方向,工艺参数一定时 激光熔粉沉积的宽度在固定范围内,当扫描间距 过大后会出现搭接不良,甚至无法搭接,如图 9 所示。而 3 组试验的扫描间距依次增大,故推测 3 号样件内部含有的 3 处缺陷为扫描间距过大导 致的道间熔合不良缺陷。

常规超声检测虽然能够对增材制件内部的 缺陷进行准确识别与定位,但检测效率较低,需 要手动移动探头对缺陷的形状及边界进行定位, 并手动划线记录,检测过程需要丰富的超声检测 经验。



(c) Excessive hatch spacing 图 9 扫描间距对试验结果的影响示意图 Fig. 9 Schematic diagram of the effect of hatch spacing on experimental results

2.2 超声相控阵检测技术及检测结果

使用 5 MHz 相控阵探头对试验样件进行检测,并对缺陷进行扫描成像。为防止探头磨损, 在探头上安装 0 度楔块,探头与楔块之间采用 机油耦合。检测过程中采用线性扫查,每次激 发 16 个晶片,共激发 49 个组。使用 ϕ 2 mm 平 底孔对比试块进行声速、灵敏度、以及 TCG 校 准,将 ϕ 2 mm 平底孔的反射回波波幅校准到 80%。

2.2.1 相控阵扫查方向分析

用校准后的探头分别采用 0°扫查和 90°扫查 对 φ 2 mm 平底孔对比试块内的标准反射体进行 扫查成像,使用拉伸编码器记录检测位置,获得 的检测结果如图 10、11 所示。

可以发现 0°扫查和 90°扫查的 A 扫和 S 扫 视图呈现的结果基本一致,而 C 扫视图呈现的结 果有很大区别,90°扫查的 C 扫描结果与缺陷的 真实形貌一致。此次扫查成像采用线性扫查,每 次激发 16 个晶片,共激发 49 个组,相当于有 49 组 具有不同延时的 A 扫描组进行扫查。当定义了 一个线性扫查时,扇形(S)扫描视图就表示为声 束的移动,每个聚焦法则的 A 扫描由一条水平 线表示,在这条线上,波幅经过颜色编码处理, 即不同的波幅以不同的颜色显示,所显示的实 时数据表明聚焦法则按照它们的生成顺序堆叠 在一起的情况。故扇形(S)扫描视图的水平轴 为声束的覆盖范围,垂直轴为检测的深度。而 C扫描视图中,水平轴是编码器记录探头移动 的距离,垂直轴是A扫描声束的覆盖范围,每条 水平线代表一个组的A扫描结果。0°扫查过程 中每条声束依次扫过缺陷,C扫描视图中显示 的为探头移动过程中每条声束扫描结果的叠 加,单条声束无法呈现缺陷的全貌,所以扫描结 果为一倾斜的长条,斜率代表探头移动的速率。 而 90°扫查过程中只有固定的声束扫过缺陷,每 条声束呈现一部分缺陷图像,所以叠加后的结 果为缺陷的真实形状,如图 11 所示,成像结果 与 ϕ 2 mm 平底孔基本一致。所以从 0°扫查成 像结果中能够直接看出每组声束的成像结果, 但是无法呈现缺陷的真实形貌,并且每组声束 重复扫过同一区域,导致检测效率降低。而 90° 扫查成像结果能够直接呈现缺陷的真实形貌, 准确反映缺陷的边界及轮廓,并且具有更高的 检测效率。





Fig. 10 0 degree scanning result of a ϕ 2 mm flat-bottomed hole



图 11 φ 2 mm 平底孔 90°扫查结果 Fig. 11 90 degree scanning result of a φ 2 mm flat-bottomed hole

2.2.2 试验样件超声相控阵检测

用校准后的相控阵探头,采用 90° 扫查的方式 分别从 XYZ 3 个方向对 3 个试验样件进行全面检 测,确保检测区域无遗漏。相控阵探头的晶片尺 寸为 38.4 mm×10 mm,试验样件的尺寸为 20 mm× 18 mm×11 mm(X×Y×Z),采用 90° 扫查的方式单次 扫查即可完成试验样件任一方向的全面扫查,大 大提高了检测效率,并且防止了手动移动常规探 头检测覆盖过程中的漏检现象。

检测发现,1号样件及2号样件内部皆未检

测到缺陷,而3号样件,从Y、Z方向进行检测时皆未发现缺陷,但是从X方向检测到3处缺陷,与常规探头的检测结果相同。使用拉伸编码器记录检测位置对缺陷进行扫查成像,检测结果如图12所示,C扫描图像显示的为最大一处缺陷,从C扫描图像中可以直接反映缺陷的真实形貌及边界尺寸,B扫描视图可以从X-Z平面方向反映3处缺陷的深度及相对位置。并且此次扫描的数据记录了3处缺陷的全部信息,提取3处缺陷的深度及最大反射波幅值如表2所示。



Fig. 12 90 degree scanning result of sample 3 from X direction

表 2 缺陷信息

Table 2 Defects information

Serial number	Maximum reflection amplitude/%	Depth ∕mm	
1	51.6	4.4	
2	69.8	10.0	
3	90.6	15.8	

根据以上超声检测结果可知,3个试验样件 中除了3号样件含有3处缺陷外不含大于 φ0.5 mm 平底孔当量的缺陷,该类缺陷面积较 大,形状不规则,具有明显的方向性,为平面状缺 陷。另外从表2中的深度信息可知,缺陷1与缺 陷2的深度距离为5.6 mm,缺陷2与缺陷3的深 度距离为5.8 mm,而3号样件的扫描间距为 3 mm,扫描间距偏大,考虑到超声定位误差、测量 误差以及道间熔融结合后的尺寸偏差,可以认为 缺陷间的距离约为2倍扫描间距,故判定该类缺 陷是由于扫描间距过大导致道间搭接不足形成 的道间熔合不良缺陷。根据以上分析可知,本次 3号样件中的3处未熔合缺陷为形状不规则的平 面状缺陷,具有明显的方向性,超声检测从 *X* 方 向能检测到该类缺陷,而从 *Y* 方向或 *Z* 方向无法 检测到该类缺陷。

2.3 缺陷磨抛分析

用电火花线切割机床将缺陷 3 沿着 YZ 面切 开,对切割面进行打磨抛光,在蔡司 Vert A1 显微 镜下观察,如图 13 所示为缺陷 3 的部分形貌,说 明超声检测到的缺陷并非一整块平面缺陷,而是 多处较小的熔合不良缺陷出现在道与道之间组 成的形状不规则的当量平面缺陷。另外从图 13 中的超声检测 C 扫描结果可知缺陷 3 的尺寸远 大于 φ 2 mm 平底孔的尺寸,但 A 扫描中的最大 反射波幅仅为 90.6%(φ 2 mm 平底孔的最大反 射波幅为 80%),也可说明缺陷 3 并非一整块平 面缺陷。



图 13 缺陷 3 部分形貌(Y-Z 平面) Fig. 13 Partial morphology of defect 3 (in Y-Z plane)

3 结 论

采用激光熔化沉积技术制备了不同扫描间 距的 TA15 钛合金试验样件,分别采用常规超声 检测及超声相控阵检测技术对样件内部的缺陷 进行检测,并对缺陷进行磨抛分析,得到的主要 结论如下。

(1)试验制备的激光熔化沉积样件除了3号 样件含有3处熔合不良缺陷外,不含φ 0.5 mm 平 底孔当量以上的缺陷,该类缺陷为扫描间距过大 导致的道间熔合不良缺陷,为多个较小的熔合不 良缺陷组成的形状不规则的平面状缺陷,具有明 显的方向性,在X方向具有最高的缺陷检出率,从 Y方向或Z方向无法检测到该类缺陷。

(2) 工艺不当可能导致增材制件内部产生 缺陷,增材制件内部的致缺陷具有明显的方向 性,为了防止缺陷漏检,应从 XYZ 3 个方向分别 进行全面检测。

(3)一维线阵相控阵探头按 0°扫查和 90°扫 查会得到不同的 C 扫描成像结果,0°扫查的成像 结果能够直接反应每组声束的成像情况,而 90° 扫查的成像结果能反映缺陷的真实形状及轮廓 边界,且声束的覆盖范围更大,检测效率更高。

(4)相比于常规超声检测,超声相控阵检测 技术极大地提高了检测效率,并能够直接呈现缺 陷的真实形貌及轮廓边界,降低了人工疲劳及对 检测技术、检测经验的要求,针对增材制造大型 零件的检测需求具有广阔的应用前景。

参考文献

 [1] 刘杰,陈向阳,范彦斌.选区激光熔化成形 H13 钢缺陷、 组织调控及拉伸性能[J].机械工程学报,2018,54 (16):101-107.

LIU J, CHEN X Y, FAN Y H. Tailoring the defects and microstructure and tensile properties investigation of H13 steel by selective laser melting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 101-107 (in Chinese).

[2] 徐滨士,董世运,门平,等.激光增材制造成形合金钢件 质量特征及其检测评价技术现状(特邀)[J]. 红外与激 光工程,2018,47(4):8-16.

XU B S, DONG S Y, MEN P, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 8-16 (in Chinese).

- [3] SEO J Y, SHIM D S. Effect of track spacing on porosity of metallic foam fabricated by laser melting deposition of Ti6Al4V/TiH₂ powder mixture [J]. Vacuum, 2018, 154: 200-207.
- LI Q, ZHANG H, LI D, et al. WxNbMoTa refractory highentropy alloys fabricated by laser cladding deposition [J]. Materials (Basel), 2019, 12 (3), doi: 10.3390/ ma12030533.
- [5] NILSSON P, APPELGREN A, HENRIKSON P, et al. Automatic ultrasonic testing for metal deposition [C] // World Conference on Nondestructive Testing, South Africa, 2012.
- [6] RUDLIN J, CERNIGLIA D, SCAFIDI M, et al. Inspection of laser powder deposited layers [C] // European Conference on Non-Destructive Testing, Czech Republic, 2014.
- [7] DAVIS G, NAGARAJAH R, PALANISAMY S, et al. Laser ultrasonic inspection of additive manufactured components
 [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019(5): 2571-2579.
- [8] LOPEZ A, BACELAR R, PIRES I, et al. Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 298-306.
- [9] LÉVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics [C] // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the European-american Workshop on Reliability of Nde, AIP Publishing LLC, 2016: 164–170.
- [10] CERNIGLIA D, SCAFIDI M, PANTANO A, et al. Inspection of additive-manufactured layered components[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 292–298.
- [11] 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 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 (in Chinese).

- [12] SHI Y W, YANG P H, LIANG J, et al. Relations among ultrasonic testing results and defect characteristics and material properties of laser additive manufacturing titanium alloy[C]// 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016.
- [13] 韩立恒,锁红波,马兆光,等. A-100 钢电子束熔丝成形件超声相控阵检测应用初探[J]. 航空制造技术, 2016, 59(8):66-70.

HAN L H, SUO H B, MA Z G, et al. PAUT of A-100 steel manufactured by EBWD [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(8): 66-70 (in Chinese).

[14] 丁莹,杨海欧,白静,等.激光立体成形 AlSi10Mg 合金 的微观组织及力学性能[J].中国表面工程,2018,31 (4): 46-54.

DING Y, YANG H O, BAI J, et al. Microstructure and mechanical property of AlSi10Mg alloy prepared by laser solid forming[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 46– 54 (in Chinese).

- [15] SZOST B A, TERZI S, MARTINA F, et al. A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components [J]. Materials & Design, 2016, 89: 559-567.
- [16] ZHANG B, LI Y, BAI Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting; A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 515-527.
- [17] 李衍. 相控阵超声检测系统特性评价的具体要求[J]. 中国特种设备安全, 2011, 27(8): 21-25.
 LI Y. Specific requirements for characteristics evaluation of phased array ultrasonic testing system[J]. Safety of Special Equipment in China, 2011, 27(8): 21-25 (in Chinese).