

成形方式与方向对 TA15 钛合金显微组织 及超声参量的影响

杨 光¹, 吴怀远¹, 任宇航¹, 周思雨¹, 钦兰云¹, 王向明²

(1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 中国航空工业集团公司 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘 要: 为研究 TA15 钛合金成形方式与成形方向对显微组织以及超声参量的影响规律, 进而明晰材料声学特性, 以锻造和激光沉积制造 TA15 钛合金为研究对象, 制备含有相同横通孔缺陷的相同规格尺寸检测试样, 使用超声波无损检测设备对试样不同成形方向进行检测以获取试样缺陷处幅值、纵波声速和超声波衰减系数, 并利用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对显微组织进行观测。结果表明: 成形方式会对组织特征产生影响, 进而影响超声参量; 激光沉积制造试样组织各向异性明显, 致使不同成形方向超声参量差异较大; 双重退火态与沉积态试样相比显微组织中板条状 α 相长宽比减小, 导致各向纵波声速平均减小 167 m/s, 衰减系数增大 13%~20%; 而双重退火态相比于锻造态试样, 因其组织特征差异明显, 致使 X 向与 Z 向纵波声速分别降低 392 与 466 m/s, 衰减系数分别增大 39%、55%。研究成果对激光增材制件的超声波无损检测以及 TA15 钛合金材料内部缺陷的无损评估有一定参考价值。

关键词: 激光沉积制造; 超声参量; 超声检测; TA15 钛合金; 显微组织

中图分类号: TG115.285; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)05-1760-07

TA15 钛合金是一种新型高铝当量的近 α 型钛合金, 其名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V, 由于 α 稳定元素 Al 含量高达 6.5%, 同时又含有 β 稳定元素 Mo 和 V, 所以它兼具 α 型与 $\alpha+\beta$ 型钛合金的优点。由于 TA15 钛合金的高强度、高韧性、良好的焊接性能以及优异的工艺性能, 使其在航空航天、国防等领域的应用越来越广泛^[1]。激光沉积制造技术 (laser deposition manufacturing, LDM) 是增材制造技术的一种, 是结合了激光熔覆技术与快速原型技术的一种新型一体化制造技术, 该技术以待加工粉末同步送进为特征, 按照预先设定好的加工路径利用激光逐层熔化沉积, 对于结构复杂、难加工材料以及薄壁零件的加工均有很好的效果, 同时具备加工周期短、无模具和材料利用率高等优点, 在多种材料中都有很好的建树, 如钛合金、高温合金、铁基合金以及铝合金、陶瓷等^[2-5]。通过激光沉积制造技术与 TA15 钛合金材料的结合, 可以实现材料的充分利用。超声波无损检测是检测零件内部缺陷的重要手段, 超声参量的不同会对缺陷的判断产生影响, 同时激光沉积制造出的结构件与传统锻铸件相比, 内部组织、力学性能均发生改变, 所以不能直

接挪用铸锻件检测数据^[6]。目前, 国内外学者已对多种材料的超声波检测问题进行了广泛的研究。

Sol 等^[7]利用 TOF 声速测量与 2 种衰减方法对激光增材 AlSi10Mg 样品进行了检测, 揭示了横波声速和衰减方面与组织各向异性的关系; Durkee 等^[8]在电子束熔融 Ti-6Al-4V 试样上人工制造孔洞缺陷, 利用超声波检测对孔洞进行识别后结合图像处理技术进行评估; Samarasingha 等^[9]对钢进行超声波检测, 提出一种基于纵波与横波声速之比确定晶粒尺寸的方法, 其比值随晶粒尺寸增大而增大; Javadi 等^[10]通过填充碳化钨球充当电弧增材制造样品内部缺陷, 针对超声相控阵检测开发了一种程序, 对精确确定未熔合缺陷尺寸具有很好的效果; 阮雪茜等^[11]研究了 TC4 不同热处理制度下不同显微组织对纵波声速和衰减系数的影响, 其结果对激光沉积制件声学特性的认知提供了重要帮助; 杨平华等^[12]对激光、电子束增材制造和变形 TC18 钛合金进行超声检测, 分析结果表明不同成形方式其声速、衰减与检测灵敏度均存在较大差异; 孙长进等^[13]探究了不同激光熔化沉积工艺参数对 TA15 钛合金的超声检测的影响程度。TA15 钛合金作为一种重

收稿日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1100504); 国家自然科学基金 (51975387)

作者简介: 杨 光, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89723852, E-mail: yangguang@sau.edu.cn

要的航空材料, 国内外对其不同成形方式试样的超声检测对比研究及超声参量的变化研究较少, 因此本实验以锻造和激光沉积制造 TA15 钛合金材料为研究对象, 采用超声波无损检测设备对同规格同缺陷的检测试样进行检测, 对比不同试样 2 个检测方向幅值、纵波声速与超声波衰减系数的差异, 研究不同成形方式与方向造成显微组织改变而对超声参量的影响, 旨在为材料声学特性为内部缺陷的评判做准备。

1 基本原理

1.1 激光沉积制造原理

激光沉积制造过程是不断地将金属粉末熔化, 冷却凝固, 进而层层堆积逐渐成形, 沉积过程中已经凝固成形的各层需要经过反复加热、冷却的热循环^[14], 导致激光沉积制件不同成形方向组织、力学性能以及缺陷分布有较大的差异^[15,16]。图 1 为激光沉积制造过程示意图, 图中 X 为激光束步进方向, Y 为激光束扫描方向, Z 为激光沉积方向。

1.2 超声波检测原理及衰减因素

超声波检测通过分辨回波波形判断缺陷的性质, 通过测算表面波与缺陷波的时间差判断缺陷的深度, 图 2 为其原理图。不同缺陷形式其回波形式有些许差异, 对于横通孔类缺陷, 其超声波传播示意图如图 3 所示。由于横通孔分为上下 2 个圆弧, 当超声波传递到上半圆弧时, 声波会向多个方向反射, 有少部分声波会反射到探头, 同时也有部分声波会穿过上圆弧到达下圆弧, 上下圆弧均会充当异质界面, 从而产生回波^[17]。对金属材料而言, 引起衰减的主要因素有扩散衰减、散射衰减以及吸收衰减^[18], 其中吸收衰减影响最小。

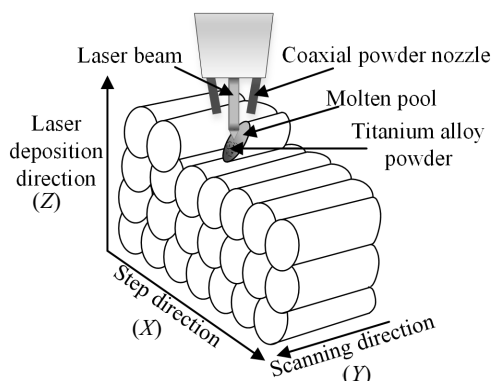


图 1 激光沉积制造过程及成形方向示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser deposition manufacturing process and forming direction

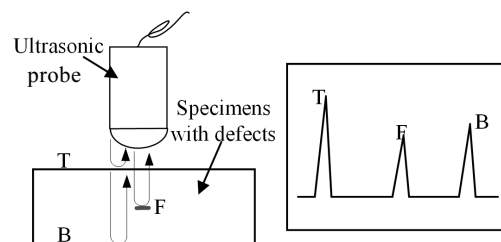


图 2 超声波检测原理图

Fig.2 Ultrasonic testing schematic

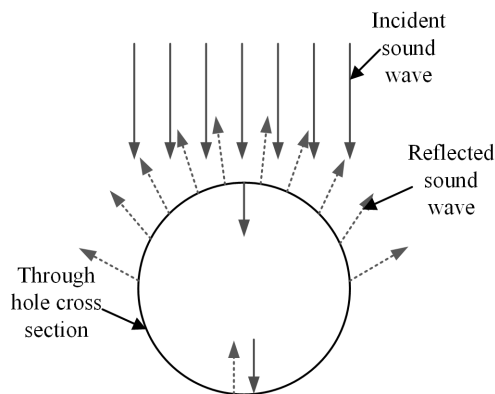


图 3 横通孔超声波传播示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic propagation through a through hole

2 实验

激光沉积制造实验中激光器选用德国 IPG 公司制造的光纤激光器 YLS-6000, 光纤直径可以达到 $800\ \mu\text{m}$ 。通过三通道载气式送粉器及四路同轴送粉头输送粉末, 同时配备冷水机、氩气保护箱以及氧分析仪使实验顺利进行。实验所需的 TA15 球形粉末粒径为 $47\sim 156\ \mu\text{m}$, 其化学成分见表 1。在激光沉积前对粉末进行 $120\ ^\circ\text{C}$ 真空烘干处理, 并对选取的 TA15 锻件基材表面进行打磨且用丙酮擦拭。

实验工艺参数为: 激光功率 $2200\ \text{W}$, 光斑直径 $5\ \text{mm}$, 扫描速度 $10\ \text{mm/s}$, 送粉速度 $10\ \text{g/min}$, 扫描间距 $2.3\ \text{mm}$, 分层厚度 $0.6\ \text{mm}$ 。沉积制备出 2 块试样, 其中 1 块试样进行双重退火处理, 其热处理工艺为 $850\ ^\circ\text{C}$ 保温 $2\ \text{h}$, 空冷再 $650\ ^\circ\text{C}$ 保温 $2\ \text{h}$, 空冷。同时选取 TA15 钛合金锻件, 将锻造态、沉积态与双重

表 1 TA15 钛合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy powder ($\omega/\%$)

Al	Zr	Mo	V	Fe	O	Ti
6.53	1.78	1.53	1.47	0.13	0.11	Bal.

退火态 TA15 钛合金试样加工至尺寸 45 mm (X) × 20 mm (Y) × 45 mm (Z), 将试样加工至表面粗糙度 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$ 以减小表面粗糙度对超声波检测时入射能量散射的影响。再在 3 块试样 X-Z 平面加工出 7 个直径 $\Phi 1 \text{ mm}$ 的横通孔, 分别距 X-Y 面 (激光沉积方向, Z 向)、Y-Z 面 (步进方向, X 向) 2、4、6 和 8 mm。分别从 X 向与 Z 向 2 个方向对横通孔进行超声波检测, 锻造态试样则在 2 个不同方向进行检测, 称之为方向 1 与方向 2, 图 4 为试样超声波检测示意图及实物图。

对于多晶金属材料, 由于多种因素的衰减, 超声波传递到达不同深度时的能量不同, 能量的降低程度可侧面反映出金属材料的衰减情况。利用德国 PVA TePla 生产的 SAM 300 超声波扫描显微镜进行超声波检测, 检测方式为水浸式超声检测, 耦合剂为去离子水, 相比于接触式超声检测, 水浸式超声探头与试样不接触, 保护探头, 超声波的发射与接收更稳定; 超声波在水中指向性较好, 有利于缺陷的检出^[17]。为了避免水声距对检测结果的影响^[19], 检测过程中通过多次校准找到试样表面波峰值最高时的水声距为 5 mm, 并固定增益为 16 dB, 使试样表面波保持 100% 幅值。探头选用频率为 5 MHz 水

浸聚焦探头, 探头直径 15.5 mm。利用设备进行超声波 A 扫与 C 扫, 检测得到不同深度横通孔的幅值大小。

声速是在超声检测时的重要声学参量之一, 声速的变化规律可以反映出材料特性的不同。采用脉冲回波法测量 3 块试样 2 个检测方向的纵波声速, 即通过横通孔间的声程与时间来计算声速, 具体公式为:

$$v = \frac{2(L_2 - L_1)}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中, L_1 与 L_2 分别为不同深度横通孔距离试样表面的距离, T_1 与 T_2 分别为不同横通孔上圆弧反射波波峰距离表面波波峰的时间。由于横通孔存在加工误差, 测量时在不同位置进行多次测量, 并取其算数平均值, 纵波声速检测原理示意图如图 5 所示。

超声波衰减系数同样可作为无损评估的标准, 由于水浸超声检测设备能量低, 无法检测到试样的底面波, 故而采用德国 GE 生产的 USM36 超声波探伤仪进行检测, 探头为平底探头, 频率为 4 MHz, 直径 16.5 mm。对于厚度小于 200 mm 的薄板, 可利用以下公式进行衰减系数的测定^[11]:

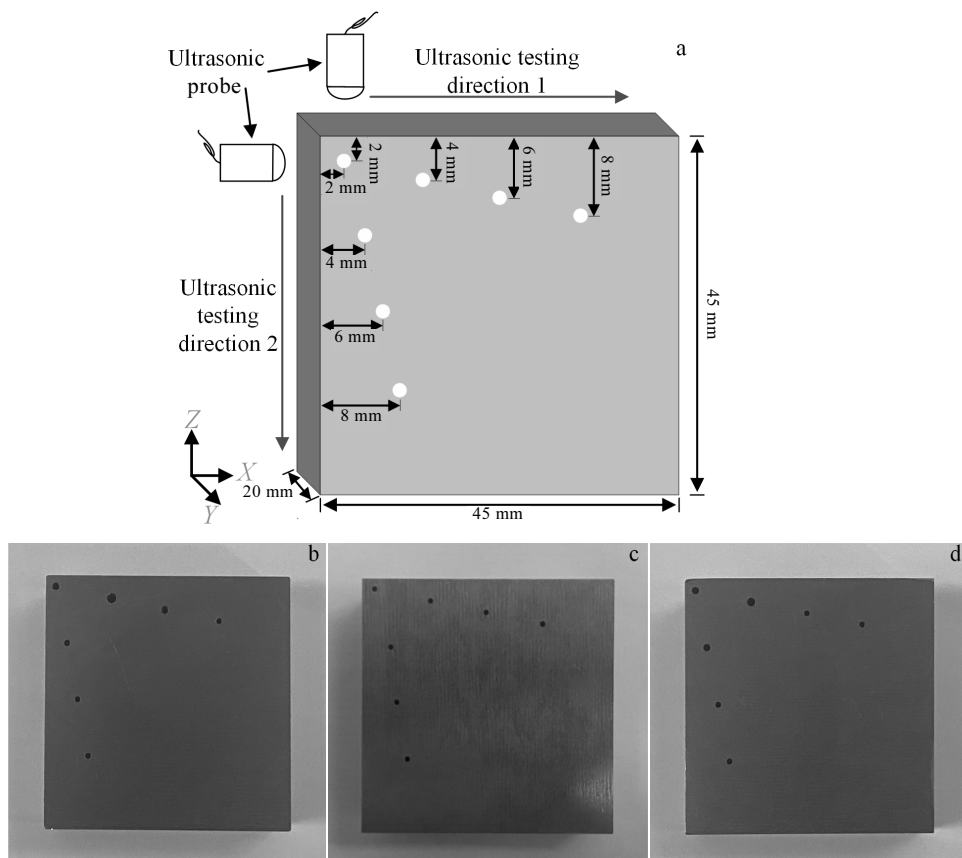


图 4 试样超声波检测示意图及实物图

Fig.4 Ultrasonic detection schematic (a) and physical maps of the samples: (b) forged state, (c) deposited state, and (d) double-annealed state

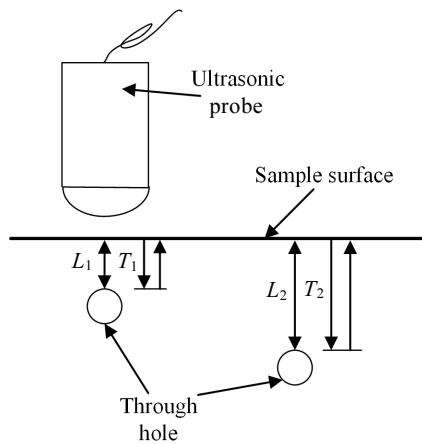


图5 纵波声速检测原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of longitudinal wave sound velocity detection principle

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_m / B_n) - \delta}{2(n - m)d} \quad (2)$$

式中, m 和 n 为底波的反射次数; B_m 和 B_n 分别为第 m 次与第 n 次底波高度; δ 为反射损失, 每次反射损失为 0.5~1.0 dB; d 为薄板厚度。测量时薄板厚度 d 利用游标卡尺多次测量并取平均值, 衰减系数的测定利用各试样 2 个检测方向的一次底波与二次底波高度之比, 每个试样均在不同位置多次测量后取平均值。

采用体积配比为 1:6:7 的 HF-HNO₃-H₂O 腐蚀液对 3 块试样 2 个检测方向进行腐蚀, 利用 OLYMPUS GX51 光学显微镜与 ZEISS ΣIGMA 扫描电子显微镜对腐蚀好的金相试样进行观测, 并分析不同组织特征对试样幅值大小、声速变化以及超声波衰减的影响。

3 结果与分析

图 6 是通过超声水浸检测设备检测到的图像, 其

中图 6a 为 A 扫波形图, 横轴是时间, 纵轴为 100% 幅值, 从波形图中可以找到表面波和横通孔上下圆弧反射波; 图 6b 是横通孔 C 扫图像, 虚线外的虚化是由于柱形缺陷圆弧表面散射作用形成的; 图 6c 是横通孔上圆弧三维视图。

利用设备幅值检测功能, 得到 3 个试样不同检测方向横通孔幅值曲线如图 7 所示。从图中可明显看到, 锻造态试样不同方向幅值基本相同, 并且幅值高于沉积态试样, 双重退火态试样幅值最低。沉积态试样 X 方向幅值则大于 Z 方向幅值, 双重退火态同样表现出这一特点。通过幅值曲线发现, 2 mm 横通孔幅值较低, 明显低于 4 mm 处横通孔幅值, 这是因为 2 mm 属于 5 MHz 探头的检测盲区, 检测灵敏度低, 所以测量声速时舍弃 2 mm 横通孔。纵波声速测量结果如图 8 所示, 表 2 为不同试样纵波声速及衰减系数测量结果, 为保证数据准确性, 采取多次测量取平均值处理。结合图 8 与表 2 结果可见: 锻造态试样声速最高, 不同方向差异也不大, 方向 1 与方向 2 纵波声速差值仅为 0.5%; 沉积态声速次之并且大于双重退火态, 并且对于激光沉积制件, 检测方向不同声速有明显差异, 沉积态与双重退火态试样的 X 向声速均高于 Z 向, 差值约为 1.15%, 这与幅值曲线所反映的结果较为一致。同时, 试样的衰减系数也有较大差异, 声速较大的锻造态试样, 衰减系数较小; 而激光沉积制件衰减系数大于锻造试样, 变化幅度在 23%~55%, 相比于声速变化, 衰减系数变化更为明显。

图 9、图 10 与图 11 分别给出了 TA15 钛合金锻造态、沉积态以及双重退火态的宏观与微观显微组织照片。图 9 呈现出典型的双态组织特征, 组织内存在未完全等轴化近似椭球状的初生 α 相, 同时 β 转变组织中含有部分细长状次生 α 相。图 10a 和 10b 分别是沉积态激光沉积 TA15 钛合金 $Y-Z$ 面与 $X-Y$ 面显微组织宏观形态, 图 10a 中组织呈现出贯穿多个沉积层的粗

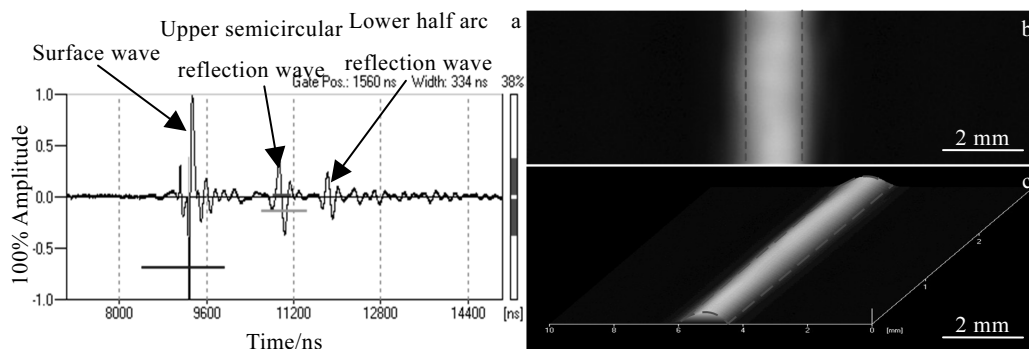


图6 横通孔水浸超声检测结果

Fig.6 Through-hole water immersion ultrasonic testing results: (a) A-scan waveform diagram, (b) C-scan image, and (c) three-dimensional view

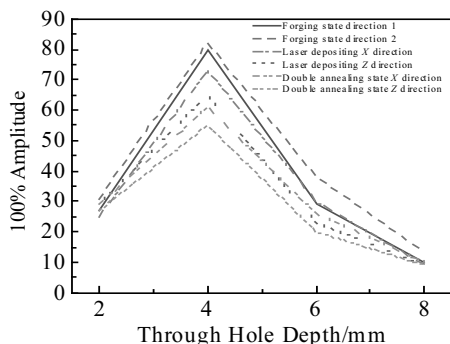


图 7 不同检测试样横通孔幅值曲线

Fig.7 Amplitude curves of through holes of different test samples

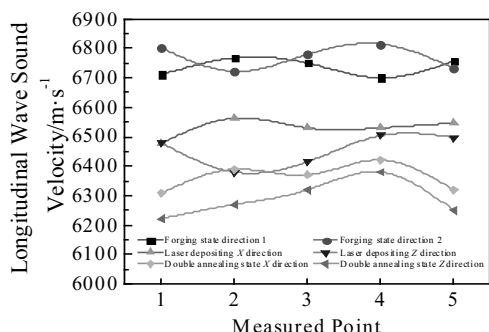


图 8 不同检测试样纵波声速

Fig.8 Longitudinal wave sound velocity of different test samples

表 2 不同检测试样纵波声速及衰减系数测量结果

Table 2 Measurement results of longitudinal wave sound velocity and attenuation coefficient of different test samples

Sample status	Forming direction	Longitudinal wave sound velocity/m·s ⁻¹	Attenuation coefficient
Forging state	Direction 1	6737	0.0548
	Direction 2	6771	0.0533
Laser depositing state	X direction	6529	0.0665
	Z direction	6455	0.0699
Double annealing state	X direction	6362	0.0754
	Z direction	6288	0.0836

大 β 柱状晶，柱状晶方向与沉积方向大致平行；由图 10b 中可以看到多个大小不同形状为不规则多边形的晶界；图 10c 为微观组织形态，晶粒内部是由随机取向的板条 α 相以及填充在 α 相间的 β 相组成的网篮组织， α 片层组织各向异性较为明显，长宽比较大，为 17~23。双重退火热处理后显微组织图片见图 11，在宏观图像 11a、11b 中可以看到与沉积态相同的粗大 β

柱状晶以及大小晶界，并未发生太大变化，而图 11c 中微观显微组织变化较为明显，大部分 α 相被不同方向生长的 α 相相互截断，由原来的细长状变为长粗棒状，组织变得更为均匀，同时 α 相长宽比变为 9~13，低于沉积态试样。

可见激光沉积制造钛合金材料与锻造钛合金组织具有明显的差别，激光沉积试样组织具有方向性。锻造态 TA15 钛合金为双态组织，并且组织较为均匀，无明显方向性，致使各检测方向超声参量无明显差异；相比于锻造态，超声波在激光沉积制造材料中传播时，由于板条 α 相的随机取向以及 β 柱状晶晶界处聚集的 α 片层会导致严重的散乱反射而引起反射衰减，结合表 2 与显微组织照片发现，等轴初生 α 相及次生 α 相对超声波的衰减作用小于板条 α 相，从而导致锻造态试样声速明显大于沉积制件，衰减系数小于沉积制件。同时激光沉积制件组织各向异性也在声速与衰减系数上得到了体现，超声波沿 X 向传播时，超声波能量衰减更小，从而出现了较高的声速与较低的衰减系数，而沿 Z 向传播时则相反。双重退火试样中 α 相为粗棒状， α 相长宽比低于沉积态，结合表中数据可以判断： α 相长宽比减小，超声波纵波声速随之减小，衰减系数增大。相比于沉积态试样，经双重退火热处理后，显微组织宏观特征未发生改变，其显微组织形貌改变致使各向平均纵波声速减少约 167 m/s，衰减系数增大幅度在 13%~20%。这是由于超声波经过粗化的板条 α 相两端时，曲率增大的两端会增加传播阻力从而导致散射作用更为明显，所以相比于沉积态出现更低的声速和更高的衰减系数，因此对于显微组织不同的试样，应制备专用的超声检测试块。由于激光沉积制件宏观组织方向性与热处理后显微组织的改变，导致双重退火态试样相比于锻造态试样，其超声参量发生了明显的改变，双重退火态试样 X、Z 向平均声速比锻造态试样平均声速分别减小 392 与 466 m/s，变化更明显的超声波衰减系数增大幅度分别为 39%、55%。

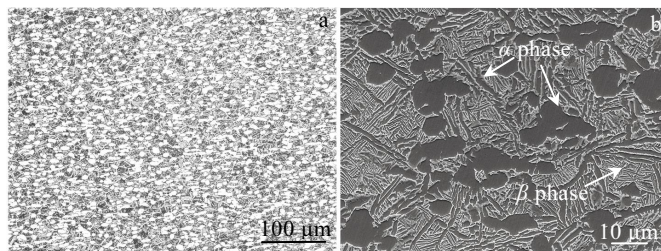


图 9 锻造态 TA15 钛合金组织照片

Fig.9 OM (a) and SEM (b) images of forged TA15 titanium alloy

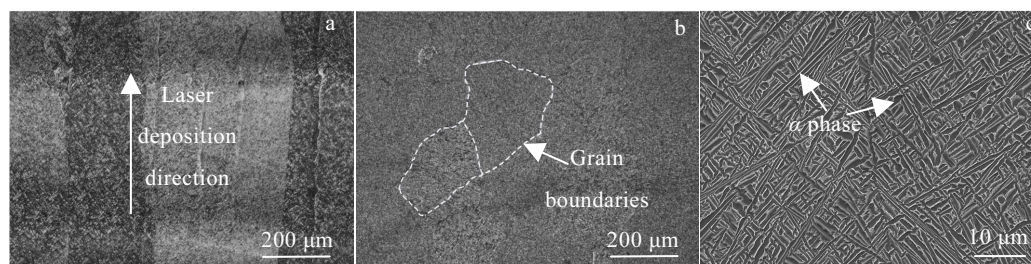


图10 沉积态激光沉积TA15钛合金组织

Fig.10 OM (a, b) and SEM (c) images of TA15 titanium alloy in the as-deposited laser deposition: (a) Y-Z plane and (b) X-Y plane

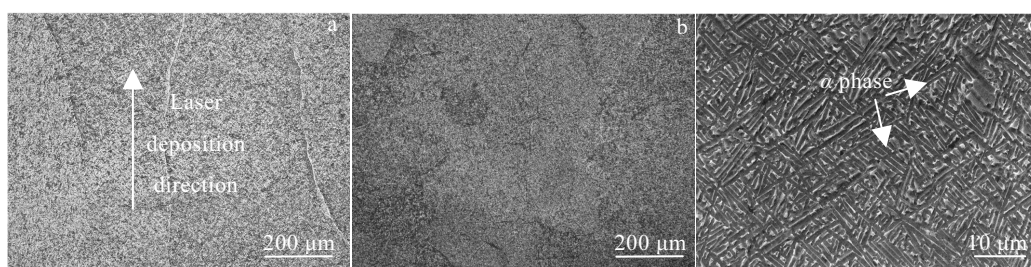


图11 双重退火态激光沉积TA15钛合金组织

Fig.11 OM (a, b) and SEM (c) images of double-annealed laser deposited TA15 titanium alloy: (a) Y-Z plane and (b) X-Y plane

4 结 论

1)成形方式不同导致试样的显微组织存在较大差异,锻造态TA15钛合金为典型的双态组织,而激光沉积态试样宏观上为粗大 β 柱状晶,晶内为网篮组织,超声波在激光沉积试样内部传播时的衰减程度明显高于其在锻造态试样内部传播。

2)锻造态试样两方向超声参量基本相同,纵波声速差值仅为0.5%;而激光沉积TA15钛合金显微组织具有明显的各向异性特征,导致X向声速高于Z向,X向衰减系数更小,同时相同位置横通孔缺陷幅值曲线具有很好的对应性。

3)在宏观组织方向性与微观组织差异性的共同作用下,双重退火态试样相比锻造态试样,X向声速减小390 m/s左右,衰减系数增大39%;Z向声速减小约466 m/s,衰减系数增大55%。

4)双重退火态试样 α 相长宽比小于沉积态试样,纵波声速随长宽比增大而明显增大,衰减系数则减小,波幅升高,其纵波声速平均减小167 m/s,衰减系数增大13%~20%。

参考文献 References

[1] Li Xingwu(李兴无), Sha Aixue(沙爱学), Zhang Wangfeng(张旺峰) et al. *Progress in Titanium Industry*(钛工业进展)[J],

2003, 20(4): 90

[2] Nesma T A, Marco S, Luke P et al. *Progress in Materials Science*[J], 2019, 106: 100 578

[3] Li Huaixue(李怀学), Gong Shuili(巩水利), Sun Fan(孙帆) et al. *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 416(20): 26

[4] Lin Xin(林鑫), Huang Weidong(黄卫东). *Chinese Science: Information Sciences*(中国科学:信息科学)[J], 2015, 45(9): 1111

[5] Yang Qiang(杨强), Lu Zhongliang(鲁中良), Huang Fuxiang(黄福享) et al. *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2016, 507(12): 26

[6] Yang Pinghua(杨平华), Gao Xiangxi(高祥熙), Liang Jing(梁菁) et al. *Journal of Materials Engineering* (材料工程)[J], 2017, 45(9): 13

[7] Sol T, Hayun S, Noiman D et al. *Additive Manufacturing*[J], 2018, 22: 700

[8] Durkee A D, Lingenfelter A J, Liu D. *AIAA Sci Tech Forum*[C]. San Diego: AIAA, 2018: 1

[9] Samarasingha S D M, Ellegama E G H D B, Piyathilake S A K V M et al. *2018 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*[C]. New York: IEEE, 2018: 330

[10] Javadi Y, Macleod C N, Pierce S G et al. *Additive Manufacturing*[J], 2019, 29: 100 806

- [11] Ruan Xueqian(阮雪茜), Lin Xin(林 鑫), Huang Chunping(黄春平) *et al.* *China Laser*(中国激光)[J], 2015, 42(1): 0 103 005
- [12] Yang Pinghua(杨平华), Shi Lijun(史丽军), Liang Jing(梁 菁) *et al.* *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2017, 60(5): 38
- [13] Sun Changjin(孙长进), Zhao Jibin(赵吉宾), Zhao Yuhui(赵宇辉) *et al.* *Acta Optica Sinica*(光学学报)[J], 2019, 39(10): 210
- [14] Yang Guang(杨 光), Ding Linlin(丁林林), Qin Lanyun(钦兰云) *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2014, 26(11): 119 002
- [15] Peng Qian(彭 谦), Dong Shiyun(董世运), Yan Shixing(闫世兴) *et al.* *Materials Reports*(材料导报 A: 综述篇)[J], 2018, 32(8): 2666, 2683
- [16] Li Yongtao(李永涛). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017
- [17] Nondestructive Testing Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. *Ultrasonic Testing 2nd Edition*[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 38, 103
- [18] Chu Changchun(褚长春). *Science & Technology Innovation and Application*(科技创新与应用)[J], 2016, 21: 162
- [19] Zhang Chenxin(张晨昕), Li Xiongbing(李雄兵), Song Yongfeng(宋永锋) *et al.* *Journal of Central South University, Natural Science Edition*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2016, 47(4): 1151

Effect of Forming Method and Direction on Microstructure and Ultrasonic Parameters of TA15 Titanium Alloy

Yang Guang¹, Wu Huaiyuan¹, Ren Yuhang¹, Zhou Siyu¹, Qin Lanyun¹, Wang Xiangming²

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the forming method and forming direction of TA15 titanium alloy on the microstructure and ultrasonic parameters, so as to clarify the acoustic properties of the material, the TA15 titanium alloy was manufactured by forging and laser deposition. The test specimens with the same cross hole defect and the same standard size were manufactured. Ultrasonic non-destructive testing equipment was used to inspect the sample to obtain the defect amplitude, longitudinal wave sound velocity, and ultrasonic attenuation coefficient of the sample, and the optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM) were used for the observation of the microstructure. The results indicate that the forming method affects the tissue characteristics, and then affects the ultrasonic parameters. The laser deposition manufactured sample has obvious tissue anisotropy, which results in a large difference in ultrasonic parameters in different forming directions. Compared with laser-deposited sample, the length-width ratio of lath shape α phase in the microstructure of the double-annealed sample has a decrease, resulting in an average reduction of the longitudinal sound velocity in all directions by 167 m/s and an increase by 13%~20% in attenuation coefficient. And compared with the forged sample, the double annealed sample has obvious differences in characteristics of microstructure, which leads to the X-direction and Z-direction longitudinal wave sound velocity decreases by 392 and 466 m/s, respectively, and the attenuation coefficient increases by 39% and 55%, respectively. The research results have certain reference value for the ultrasonic non-destructive testing of laser additive parts and the non-destructive evaluation of internal defects of TA15 titanium alloy materials.

Key words: laser deposition manufacturing; ultrasonic parameters; ultrasonic testing; TA15 titanium alloy; microstructure

Corresponding author: Yang Guang, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89723852, E-mail: yangguang@sau.edu.cn