

TC4激光立体成形显微组织对超声参量的影响

阮雪茜¹ 林 鑫¹ 黄春平² 弋 楠³ 孟永乐⁴ 黄卫东¹

¹西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072

²南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330063

³陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000

⁴西安热工院有限公司, 陕西 西安 710032

摘要 以TC4钛合金激光立体成形件及锻件为研究对象,采用不同热处理制度对TC4钛合金激光立体成形件进行处理得到不同的热处理组织,并采用超声波无损检测方式获得超声波纵波声速和衰减系数,明晰超声参量和显微组织的相互作用机理。结果表明,不同的显微组织具有不同的超声波纵波声速和衰减系数;相比超声波纵波声速而言,衰减系数对TC4钛合金激光立体成形显微组织的变化更为灵敏。

关键词 激光技术;激光立体成形;TC4钛合金;超声参量;显微组织

中图分类号 TG115.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0103005

Effect of Microstructure of Laser Solid Forming TC4 Titanium Alloy on Ultrasonic Parameters

Ruan Xueqian¹ Lin Xin¹ Huang Chunping² Yi Nan³ Meng Yongle⁴ Huang Weidong¹

¹State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

²Processing Defense Science and Technology Key Laboratory of Light Alloy, Nanchang Aeronautical University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

³Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi 712000, China

⁴Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China

Abstract Laser solid forming (LSF) TC4 alloys and forging TC4 titanium alloy are studied. LSF-TC4 alloys are processed by different heat treatments to get different heat treatment microstructures. In order to figure out the relationship between ultrasonic parameters and microstructures, ultrasonic nondestructive testing is taken on these alloys to get ultrasonic longitudinal wave velocity and attenuation coefficient. The results show that samples with different microstructures have different velocities and attenuation coefficients. Compared with longitudinal wave velocity, attenuation coefficient is more sensitive to the change of microstructure of laser solid forming alloys.

Key words laser technique; laser solid forming; TC4 titanium alloy; ultrasonic parameters; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 120.7250

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51323008)、国家863计划(2013AA031103)

作者简介: 阮雪茜(1990—),女,硕士,主要从事激光加工及无损检测等方面的研究。E-mail: 18292460690@163.com

导师简介: 黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事增材制造理论、技术及应用等方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

1 引言

TC4钛合金作为一种轻质高强度结构材料,因其具有优异的综合力学和物理性能,被广泛应用于航空、航天、船舶等领域,是制造航空发动机重要零部件和飞机结构件的重要工程材料^[1-3]。但TC4钛合金熔点高以及变形抗力大,采用传统加工方法加工复杂构件非常困难,同时材料利用率低^[4]。20世纪90年代初发展起来的激光立体成形技术以离散、堆积为手段,通过增材方法直接成形复杂结构零件,成形效率高,成形件使用性能好^[5-7],已经成为大型复杂TC4钛合金结构件的一种重要成形和加工手段。

目前,对于大部分重要结构件,在其使用之前必须进行无损探伤,超声探伤是其中一种重要的无损探伤手段。而激光立体成形件(LSF)具有独特的逐层快速熔凝组织外延生长特征^[8-9]和往复加热快速回火/退火过程,具有与传统铸锻件不同的显微组织。因而在超声探伤过程中相比传统铸锻件具有不同的声学特征,采用传统超声参量有可能使探伤结果出现较大偏差。实际上,在探伤过程中,为能排除材料显微组织对探伤结果的干扰,获得可靠的探伤结果,准确得到材料的性能、使用寿命等信息,首先必须明确材料显微组织的超声参量。为此,通过不同的热处理方法,考察TC4钛合金激光立体成形件的显微组织特征,研究显微组织特征对超声参量的影响,并通过与锻件进行对比,以期为实现钛合金结构件准确无损的超声探伤奠定重要的理论和技术基础。

2 实验过程

TC4钛合金激光立体成形试样是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的LSF-V系统上制备完成的。该系统由8 kW CO₂激光器、五轴四联动数控工作台、高精度送粉器、同步送粉系统和惰性气体保护箱等组成。实验所用粉末为粒度44~178 μm的TC4钛合金球形粉末,采用锻压成形的TC4板材作为基材。实验前将TC4粉末在120 ℃真空条件下进行干燥处理,以除去粉末中吸附的水分;用砂纸打磨锻件基材,并用乙醇和丙酮溶液依次清洗,以减少表面油污等杂质对成形过程造成的影响。

实验采用的工艺参数如表1所示。试样分为4组,分别为激光立体成形沉积态试样,去应力退火态试样,固溶时效态试样和参比锻件。选用的热处理制度为:1)去应力退火:540 ℃保温4 h,空冷(AC);2)固溶时效处理:固溶处理,920 ℃保温2 h,空冷;然后进行时效处理,540 ℃保温4 h,空冷。为避免超声测量过程中侧壁、波束发散和近场区等的影响,试样尺寸设定为130 mm×60 mm×80 mm,经磨床加工后试样表面粗糙度 $R_a < 3.2 \mu\text{m}$ 。为保证实验的可靠性,同组试样均从同一成形试块中获取。

表1 TC4激光立体成形工艺参数

Table 1 Parameters of laser solid forming of TC4 alloy

Laser power /kW	Scanning speed / (mm/s)	Increment of Z /mm	Laser spot diameter /mm	Powder feeding rate / (r/min)	Carrier gas flow / (L/h)	Overlap ratio /%
7~8	10~15	0.8~1.5	6	15~30	800~1000	40~50

引起超声波衰减的主要原因是波束扩散、晶粒散射和介质吸收。对于多晶金属而言,超声波衰减主要是由散射衰减引起^[10],散射衰减高度依赖于晶粒尺寸、形状、组织、方位等因素^[11-13]。衰减系数 α 包括介质的散射衰减、吸收衰减和声束的扩散衰减。鉴于本实验采用的试样几何尺寸的一致性较好,且加工精度较高,设备比较完备,从而保证了测试系统的稳定性和一致性,故而对于金属材料等固体介质而言,除材质外的声能损失均可忽略不计。对于厚度小于200 mm板材,可以利用薄板工件衰减系数公式来进行测定^[14]:

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_m/B_n) - \delta}{2(n-m)d}, \quad (1)$$

式中 m 、 n 为底波的反射次数; B_m 、 B_n 分别为第 m 次和第 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 为薄板的厚度。利用GE USM 35型手持超声探伤仪,探头为2.5MΦ14,分别测出各试样的一次底波和二次底波高度之比,采用(1)式计算出各试样的衰减系数,每个试样均多个位置测量后取平均值。

上述几种热处理组织中,退火处理和固溶时效处理对材料的密度和泊松比通常影响较小,基本可以不予考虑。引起材料不同组织声速差异的主要原因是弹性模量的变化,与材料的组织、相的种类及相的相对

含量等因素密切相关^[14-17]。无限大固体介质中,纵波传播速度 C_L 可表示为^[14]

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (2)$$

式中 E 为杨氏弹性模量(N/m^2), ρ 为介质密度(kg/m^3), σ 为泊松比。采用脉冲回波法计算超声纵波声速,即通过测量超声波在介质中往返一次的声程和时间来计算声速:

$$V = \frac{2L}{T_2 - T_1}, \quad (3)$$

式中 L 为被测件厚度, T_1 、 T_2 分别为第一、二次底面反射回波最高点所对应的时间。测量时在不同位置多次取点,最后结果取算数平均值。声速测量结果的误差 ε 主要包括系统误差 ε_{cl} 和随机误差 σ_{cl} , 超声声速测量误差公式为

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{cl}} \pm \sigma_{\text{cl}} = \frac{\partial V}{\partial L} \varepsilon_L + \frac{\partial V}{\partial t} \varepsilon_t \pm \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial L}\right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2}, \quad (4)$$

式中 V 为被测件声速, L 为被测件厚度, t 为超声波在被测件中的传播时间, ε_L 、 ε_t 分别为厚度和时间直接测量值的系统误差, σ_L 、 σ_t 分别为厚度和时间直接测量值的随机误差。

仪器的时间测量精度为 1 ns, 试样尺寸的测量精度为 0.01 mm。对纵波声速为 6000 m/s 左右的材料, 超声声速的测量误差在 3 m/s 以内。由表 2 可知不同组织的声速测量结果相差最小值为 5 m/s, 超出了实验误差范围。

3 结果与分析

表 2 为经热处理后的 TC4 钛合金激光立体成形件和 TC4 钛合金锻件的超声波纵波声速和衰减系数测量值。可以看到, 锻件的超声声速最大, 激光立体成形件经去应力退火态后的声速略低于锻件, 沉积态试样的声速次之, 激光立体成形件经固溶时效处理后的声速最小。

表 2 TC4 钛合金超声纵波声速和衰减系数测量结果

Table 2 Results of ultrasonic longitudinal wave velocity and attenuation coefficient of TC4 alloy

Sample status	Longitudinal wave velocity l /(m/s)	Attenuation coefficient
LSF+solution aging	6104	0.102
As-deposited	6125	0.090
LSF+annealing	6130	0.088
Forging	6146	0.084

图 1 给出了 TC4 钛合金激光立体成形件固溶时效态、沉积态、退火态试样和 TC4 钛合金锻件的显微组织照片。可以看到, 激光立体成形件经固溶时效处理后的显微组织由不同方向交叉排列的 α 板条组成[见图 1(a)]。超声波在该组织中传播时, 遇到声阻抗不同的界面会使超声声速降低^[18], α 板条杂乱交错排列会使超声波发生散乱反射, 超声波能量降低, 声速减小。依据这种组织特征可以判断, TC4 钛合金激光立体成形件经固溶时效处理后衰减系数最大的主要原因如下: 1) 固溶时效后的组织主要由粗化的 α 板条编织成的网篮组织为主, 原始 β 晶界变得不连续, 残余 β 晶界处汇聚有粗大的 α 相, 这种粗大的晶界以及不规则板条间 α 相界面对超声波具有较大的散射作用; 2) 相互交叉排列的板条 α 相中间夹杂着近似球形和椭球形的 α 相, 超声波经过此处时, 会绕过球状 α 相而继续传播, 在一定程度上削减超声波能量, 造成超声波的衰减^[19]。从图 1(b) 可以看到, 沉积态组织由少量针状 α 和大量魏氏 α 板条组成, 与固溶时效态组织相比, α 板条长宽比由固溶时效态的 2~11 增加至沉积态的 6~12, α 相更为细长, 避免了粗大界面对超声波的强烈散射作用, 使得超声波在其中传播时阻力相对较小, 且沉积态组织晶界细小连续, α 相无明显球化现象, 超声波不会因绕射现象而增大衰减, 因而沉积态试样的超声波声速较固溶时效态大, 衰减系数则低于固溶时效态。图 1(c) 显示 TC4 钛合金激光立体成形件经去应力退火后的组织相比沉积态虽无较大改变, 但 α 板条有一定程度的粗化, 张霜银等^[20]研究表明, 沉积态试样内部存在较大的残余应力, 其整体应力水平在垂直于沉积方向比去应力退火态高出 59.8% 左右, 沿沉积方向则高出 72.3% 左右, 试样内部原子错配, 晶格畸变, 降低原子间的结合

力,减小了合金弹性模量,从而使得去应力退火态试样的超声波声速大于沉积态试样的超声波声速。去应力退火后的组织相比沉积态,初生 β 柱状晶尺寸基本没发生变化,但层带现象明显减弱,如图1(b)、(c)左下角所示。沉积态组织中层带结构的出现实际上是由于不同熔覆层熔覆沉积时对底部已沉积层的再热退/回火处理导致的局部 α 板条粗化所致,沉积态试样经去应力退火后,整体发生再回复,特别是,试样在 $\alpha + \beta$ 相区保温时发生 $\alpha \leftrightarrow \beta$ 相变,产生Oswald粗化,使得层带局部细小 α 板条发生一定程度的熔解,粗化的 α 板条逐渐圆整化,不同 α 板条的尺寸差别逐渐减小,最终使退火后试样组织趋于均匀化^[21],从而减小超声波传播的阻尼作用,故而去应力退火后的试样衰减系数略低于沉积态试样。锻造态TC4钛合金显微组织为等轴晶组织,对超声波的散射衰减作用明显低于具有魏氏组织、 α 板条相互交叉排列的激光立体成形件试样,且其 α 相所占比例较大, α 相属于密排六方结构,致密度大于体心立方结构的 β 相,超声波在致密的 α 相中传播速度大于在致密度较小的 β 相中的传播速度,因而TC4锻件对超声波衰减作用最小而超声波声速最大。

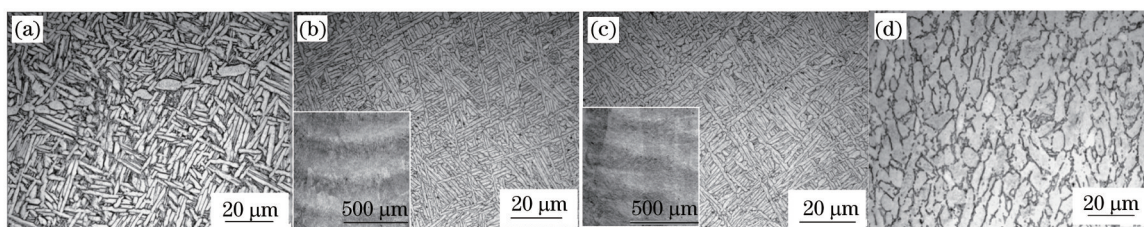


图1 TC4钛合金显微组织。(a)固溶时效态;(b)沉积态;(c)退火态;(d)锻造态

Fig.1 Microstructure of TC4 alloy. (a) Solution aging treatment; (b) as-deposited; (c) annealing treatment; (d) forging

对比表1和图1可知,TC4钛合金激光立体成形件的显微组织变化确实一定程度上会影响超声波的声速和衰减系数。随着 α 相长宽比减小,超声波纵波声速逐渐减小但变化幅度不大,不同组织之间声速值仅相差约0.3%~0.7%,即作为TC4钛合金激光立体成形显微组织的表征参量,超声波纵波声速并不灵敏。随 α 相长宽比减小和组织的均匀化程度降低,超声波衰减系数逐渐增加且变化程度明显大于声速,不同组织之间衰减系数变化为14%~50%。纵观4组试样可以发现,等轴 α 相对超声波的衰减作用小于板条 α 相,应力的存在会降低超声波的传播速度。

4 结 论

1) 不同显微组织试样中,激光立体成形件经去应力退火后的超声声速最大,沉积态声速次之,固溶时效态处理后的超声声速最小,衰减系数规律则相反;TC4锻件的声速大于激光立体成形件,而衰减系数则小于激光立体成形件;

2) 随着 α 相长宽比减小和组织的均匀化程度降低,超声波纵波声速逐渐减小但变化幅度不大,而衰减系数逐渐增加,变化幅度大于超声波纵波声速。较超声波纵波声速而言,衰减系数对TC4钛合金激光立体成形显微组织的变化更为灵敏;

3) 等轴 α 相对超声波的衰减作用小于板条 α 相,应力的存在会降低超声波传播速度。

参 考 文 献

- 1 L Lineberger. Titanium aerospace alloy[J]. *Advanced Materials and Processes*, 1998, 153(5): 45-46.
- 2 T Alloys, G Welsch, R Boyer, *et al.*. *Material Properties Handbook: Titanium Alloys*[M]. Ohio: ASM International, 1994. 483-636.
- 3 Qian Jiahong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2000, 24(3): 218-221.
钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. *稀有金属*, 2000, 24(3): 218-221.
- 4 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(7): 1263-1266.
张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 热处理对激光立体成形TC4合金的组织 and 性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(7): 1263-1266.
- 5 Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. *Materials China*,

- 2010, 29(6): 12-27.
黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- 6 Zhang Fengying, Tan Hua, Chen Jing, *et al.*. Mechanical properties of laser solid formed Ti-Al-V ternary system titanium alloys[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0603004.
张凤英, 谭 华, 陈 静, 等. 激光立体成形 Ti-Al-V 系的合金力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0603004.
- 7 Chen Bo, Shao Bing, Liu Dong, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403001.
陈 博, 邵 冰, 刘 栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403001.
- 8 Zhao Weiwei, Lin Xin, Liu Fencheng, *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser solid forming inconel 718 super alloy[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3220-3225.
赵卫卫, 林 鑫, 刘奋成, 等. 热处理对激光立体成形 Inconel718 高温合金组织和力学性能的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3220-3225.
- 9 Zhang Ying, Lin Xin, Yang Gaolin, *et al.*. Structural characteristics of laser solid forming Zr-based bulk metallic glass[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303005.
张 莹, 林 鑫, 杨高林, 等. 激光立体成形锆基块体非晶合金的组织特征[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303005.
- 10 E P Papadakis. Physical acoustics and microstructure of iron alloys[J]. International Metals Reviews, 1984, 29(1): 1-24.
- 11 E P Papadakis. Ultrasonic attenuation caused by scattering in polycrystalline media[J]. Physical Acoustics, 2012, 4(Part B): 269-328.
- 12 D N Collins, W Alcheikh. Ultrasonic non-destructive evaluation of the matrix structure and the graphite shape in cast iron[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55(2): 85-90.
- 13 K Vijayalakshmi, V Muthupandi, R Jayachitra. Influence of heat treatment on the microstructure, ultrasonic attenuation and hardness of SAF 2205 duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 529: 447-451.
- 14 Zheng Hui. Ultrasonic Testing[M]. Beijing: China Labor and Social Security Press, 2008.
郑 晖. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- 15 A Kumar, T Jayakumar, B Raj, *et al.*. Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials[J]. Acta Materialia, 2003, 51(8): 2417-2426.
- 16 A Vary. Correlations between ultrasonic and fracture toughness factors in metallic materials[C]. Proceedings of the 11th Symposium on Fracture Mechanics, 1978. 17.
- 17 D N Collins, W Alcheikh. Ultrasonic non-destructive evaluation of the matrix structure and the graphite shape in cast iron[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55(2): 85-90.
- 18 A BadidiBouda, S Lebaili, A Benchaala. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 1-5.
- 19 Liu Li. Influence of Microstructures of Titanium Alloy on Ultrasound Parameters and Corrosion-Resistance[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2012.
刘 俐. 钛合金显微组织对其超声参量及耐腐蚀性能的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- 20 Zhang Shuangyin. Research on the Heat Treated Microstructures and Properties of Laser Solid Forming Ti-6Al-4V Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009.
张霜银. 激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金的热处理组织与性能[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- 21 Zhang Xiyan, Zhao Yongqing, Bai Chenguang. Titanium and Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 106-108.
张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 106-108.