

热处理对激光立体成形 TC4 残余应力的影响

张霜银, 林 鑫, 陈 静, 黄卫东

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 采用小孔释法对激光立体成形 TC4 钛合金沉积态和热处理后的残余应力进行了测试。结果表明, 激光立体成形 TC4 合金的残余应力属于低应力水平, 沿激光扫描方向的残余应力 σ_y 和垂直于激光扫描方向的残余应力 σ_z 具有类似地分布规律。激光扫描起始位置的残余应力值较小, 到中间位置达到最大的压应力, 而到熔覆结束位置转变为最大的拉应力; 靠近基材处熔覆层的残余应力为较大的压应力, 随着熔覆高度的增加, 到顶部转变为较小的拉应力。相比沉积态试样, 去应力退火后 σ_y 和 σ_z 分别平均降低 59.8% 和 72.3%, 固溶时效处理后分别平均降低 64.7% 和 67.8%。热处理后残余应力分布趋于平缓, 可有效地消除和调整激光成形过程产生的残余应力。

关键词: 激光立体成形; TC4; 热处理; 残余应力

中图分类号: TG 146.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)05-0774-05

残余应力是一种内应力, 是指产生应力的各种因素不复存在时 (如外加载荷去除、加工完成、温度已均匀、相变过程终止等), 由于形变、体积变化不均而残留在构件内部并自身保持平衡的应力。激光立体成形以高能激光束作为移动热源, 通过与基材和粉末材料相互作用形成熔池, 并快速熔凝。在激光与基材和粉末材料的相互作用过程中, 熔覆层及基材经受一个极不均匀的快热快冷作用, 熔池及其附近部位以远高于周围区域的速度被急剧加热并局部熔化, 熔覆层与基材间产生了很大的温度梯度。在随后凝固和冷却过程中, 这种大的温度梯度造成熔覆层的收缩变形将受到周围较冷区域约束, 使得两者的体积膨胀和收缩不一致, 相互牵制, 结果在熔覆层中形成内应力。激光立体成形残余应力对材料性能有很大的影响, 此外还影响构件微观组织稳定性和尺寸稳定性。

目前, 关于残余应力对材料性能的影响研究已经越来越为工程技术界所重视。随着残余应力测试手段的不断改进, 近年来该领域的研究取得了很大进展^[1~12]。报道中常用的测试方法有小孔释法、X 射线衍射法和中子衍射法。X 射线衍射法和中子衍射法都是基于布拉格方程建立起衍射角 θ 的变化与材料局域晶格中晶面间距的变化之间的定量关系^[13]。X 射线法测得的主要是材料表面几微米到 20~30 μm 的残余应力。中子衍射法则可以同时测量材料表面和内部的残余应力, 但是受到可得到的中子源较少的限制, 目

前国内很少有采用中子衍射法测试残余应力的报道。钻孔贴应变片法测定的是小孔深度内的平均残余应力, 在定性或半定量考察应力分布特性时是可行的测试方法, 也是目前应用较为广泛的一种残余应力测试方法。目前, 关于激光立体成形过程中残余应力的研究也已经逐渐得到了国内外研究者的重视^[1~4, 7~11]。不过, 大多数研究报道侧重于理解残余应力的分布规律, 而对于如何控制、消除和调整残余应力的报道甚少。此外, 通过数值模拟的方法获得激光立体成形过程温度场及应力场分布的研究逐渐增多^[9~11], 但数值模拟应力场在定量上的准确性还很不够, 同时, 数值模拟的准确性也需要实测数据的验证。因此, 准确测定激光成形件热处理前后残余应力的分布, 对于理解激光立体成形过程中残余应力的形成机理, 实现成形件残余应力的控制和消除具有重要的现实意义。

激光立体成形过程残余应力主要是由于激光快速熔凝引起的骤冷骤热所导致的, 虽然随后的熔覆沉积过程对已沉积层所施加的反复退火效应能够在一定程度上减小成形件的残余应力, 但是仍然无法完全消除成形件中的残余应力。采用进一步的热处理方法是消除调整成形件中残余应力的一个重要手段。本研究采用小孔释法, 对比测定了激光立体成形 TC4 合金沉积态及热处理后残余应力的分布及大小, 考察了热处理后残余应力的调整或消除程度, 并分析其作用机理。

收稿日期: 2008-07-02

基金项目: 国家杰出青年科学基金(NCET-06-0879); 国家自然科学基金重点项目(50331010); “863”计划 (2006AA03Z0449); “973”计划(2007CB613800); 高等学校学科创新引智计划 (08040) 资助

作者简介: 张霜银, 女, 1976 年生, 博士生, 西北工业大学, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88494001, E-mail: shyin0925@126.com

1 实验

1.1 试样制备

采用激光立体成形制备规则形状的单道多层板件,如图 1 所示。激光立体成形系统由 RS-850 型 5 kW CO₂ 激光器、LPM-408 四轴联动数控工作台、高精度送粉器、侧向送粉喷嘴及惰性气体保护箱等组成。选用粒度分布为 74~150 μm 的 TC4 粉末作为熔覆沉积材料,以减少粉末吸潮的影响,实验之前在 120 °C 左右真空条件下(约 0.1 Pa)对其进行烘干处理。基材为纯钛,为保持熔覆表面清洁,实验前用砂纸对基材进行打磨,并使用丙酮清洗。采用逐层单方向扫描,为消除成形过程中熔池高温对送粉喷嘴的累积加热可能造成的堵粉现象,成形 20 层厚度约 6 mm,停 30 s 再进行下一个循环,其工艺参数见表 1。采用相同的工艺参数获得 3 组激光沉积态试样,成形尺寸为 70 mm×30 mm×3 mm。热处理工艺参考前期研究^[14],形

成以下 3 组试样状态(每组试样 7 个测试点): (1) 激光成形沉积态(1-1~1-7); (2) 沉积态+去应力退火处理(550 °C, 4 h, AC) (2-1~2-7); (3)沉积态+固溶时效处理(950 °C, 1 h, AC+550 °C, 4 h, AC (3-1~3-7)。

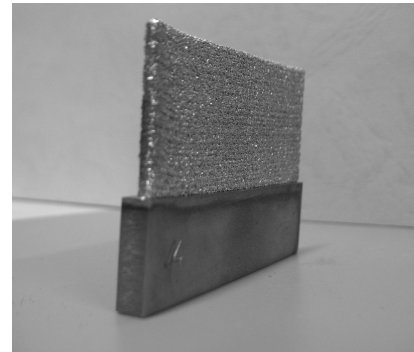


图 1 激光立体成形 TC4 残余应力测试试样

Fig.1 Laser solid forming TC4 alloy sample for residual stress testing

表 1 激光立体成形工艺参数

Table 1 The parameters of laser rapid forming

Laser power/ W	Scanning speed/ mm·s ⁻¹	Powder feeding rate/ g·min ⁻¹	Flux of shielding gas/ L·min ⁻¹	Laser spot diameters/ mm	Increment of Z/ mm
2100	5	3.005	7.5	3	0.3

1.2 残余应力测试

据实验过程中曾出现的沿基材与熔覆层结合面断裂的现象并结合残余应力场的模拟结果^[11]判断,残余应力较大部位应该位于基材和熔覆层结合处的附近区域,而且熔覆初始阶段和后续熔覆的状态差异可能导致应力状态有所不同。因此,选择以下的测量位置(如图 2a 所示): 一是在距熔覆层与基材结合面 3 mm 处从激光起始扫描位置到结束扫描位置均匀分布 5 个测量点,二是在试样中间位置沿基材到熔覆层顶部均匀分布 3 个点。标准应变片相对于小孔的分布如图 2b 所示。

测试采用 CCZ-1 型磁力测钻台钻孔,采用 BE120-2CA-K 电阻应变片及相应胶水贴片进行应力测试。考虑到试样厚度很薄(2~3 mm),采用钻孔法进行残余应力测量,孔径为 2 mm。用 CM-1L-32 型静态电阻应变仪测量释放的应变。钻孔结束待读数稳定,每隔 5 min 记录一次应变仪读数,取几次数据的平均值作为测试结果,基于实验测得的应变数据,采用通孔的 Kirch 解推导出的公式计算残余应力^[15],公式中涉及到释放系数 A、B 的计算,其中包括材料的弹性常数 E 和 μ,计算时取弹性模量 E=110 GPa、泊松比 μ=0.34^[16]。由于激光熔覆得到的试样表面比较粗糙,而钻孔法需要应变片粘贴在试样表面并很好地结合。

因此在测试前需要对试样表面进行抛光处理,达到用 800#的金相砂纸打磨的程度。

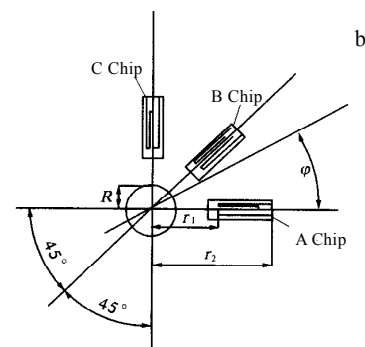
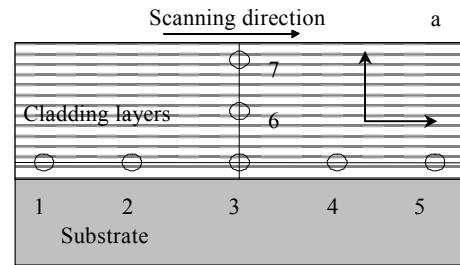


图 2 板状试样残余应力测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of residual stress measurement of plate sample: (a) distribution of test points and (b) distribution of resistance strain gauge

2 结果与分析

对于激光立体成形过程而言,由于成形件中沿激光扫描方向的残余应力 γ 和垂直于扫描方向残余应力 z

的大小和分布及材料某些力学行为有更直接的联系,故在进行残余应力分布规律分析时,将所获得的主应力值按其角度分别转换为 γ 和 z 。表 2 为激光沉积态、去应力退火和固溶时效态的残余应力测试数据。

表 2 3 种状态下试样的残余应力

Table 2 The residual stress date of three conditions

As-deposited			LSF+annealing			LSF+solution aging		
Test point number	γ /MPa	z /MPa	Test point number	γ /MPa	z /MPa	Test point number	γ /MPa	z /MPa
1-1	-58.24	11.62	2-1	6.81	32.59	3-1	-27.77	21.21
1-2	-87.75	-82.34	2-2	-41.24	0.52	3-2	-55.57	-15.36
1-3	-114.88	-69.00	2-3	-49.01	-2.87	3-3	-20.61	14.70
1-4	-65.67	-30.87	2-4	-32.67	5.74	3-4	-7.86	15.08
1-5	42.16	83.93	2-5	19.36	73.24	3-5	90.09	33.38
1-6	32.32	12.99	2-6	-77.12	-44.38	3-6	-25.09	23.12
1-7	43.27	0.73	2-7	-14.89	-26.49	3-7	-68.28	-45.33

2.1 沿激光扫描方向的残余应力

图3为靠近基材与熔覆层区域(测试点1-5)沿激光扫描方向残余应力的分布曲线。从图中可以看出,残余应力为低应力水平。对于激光沉积态,除了在激光扫描末端位置为拉应力,成形件中的残余应力主要为压应力,并且中间部位的残余压应力达到最大。另外,无论是沉积态还是热处理态,成形件沿激光扫描方向的 γ 和垂直于激光扫描方向的 z 具有类似的分布规律,起始熔覆位置的残余应力值较小,中间位置具有最大的压应力,到熔覆结束位置转变为较大的残余拉应力。这与杨健等^[7,8]对Ni20激光成形板状试样的测试结果是基本一致的,杨健等的结果也显示 γ 在靠近基材的熔覆层主要表现为压应力。需要指出的是,与起始位置的应力分布相比,熔覆结束位置的应力值普遍较大,且全部为残余拉应力。另外,与 σ_γ 在激光扫描起始位置主要为压应力不同, z 尽管在起始位置的残余应力值较小,但均为拉应力。

在激光沉积过程中,熔池冷却凝固过程的热量主要是通过基材导出的。起始熔覆位置由于最早开始冷却,因此通常冷速较快,到了熔覆结束的尾部位置,相比起始熔覆位置,冷速最慢。由于先熔覆的区域冷却凝固低于塑性温度时,后熔覆区域还处于塑性状态,当该区域继续冷却时,其收缩受到已凝固区域的阻碍,从而使得先凝固区域承受压应力,每一层最后凝固的区域受到拉应力。这样导致起始熔覆位承受较小的压应力,中间部位由于受到周围和基体的约束最大,因此承受最大压应力,而在熔覆末端由于最后冷却,承受拉应力。

从图 3a 可以看出,经过去应力退火处理后,残余应力有了明显的降低。成形件中 γ 的最大降幅达到了 65.87 MPa (从 -114.88 MPa 降低到 -49.01 MPa), 平均

降低残余应力 59.8% (以距离 0 点的绝对值之差计算单个点值, 然后取平均值)。 z 单点最大降幅达 81.82 MPa (从 -82.34 MPa 变化到 0.52 MPa), 平均降低 72.3%, 且整体分布趋于平缓(图 3b 所示)。相比去应力退火处理, 固溶时效处理对残余应力的消除程度相当, γ 平均降低 64.7%, z 平均降低 67.8%。由于测试点“5”的位置是应力集中部位, 热处理后残余

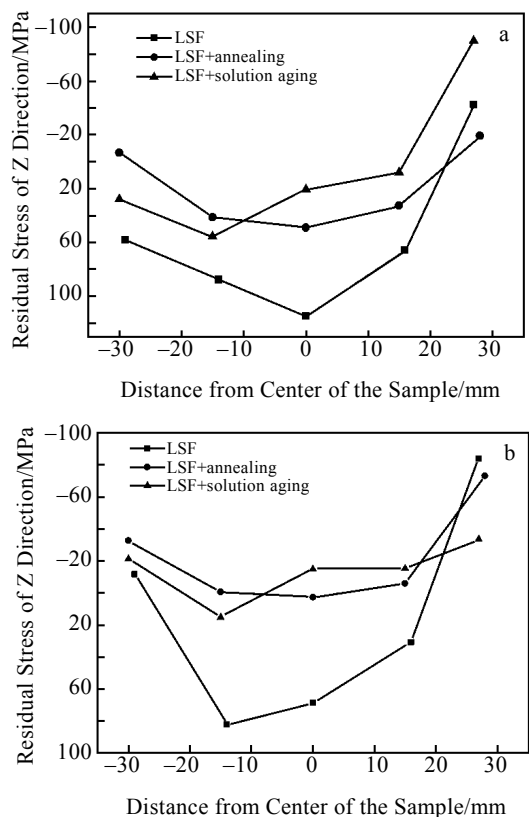


图 3 沿激光扫描方向的残余应力

Fig.3 The residual stress along laser scanning direction: (a) γ and (b) z

应力有一定的减少，但是消除程度不明显。另外，由图 3 可以看出，热处理似乎有将成形件中沿激光扫描方向分布的残余压应力减小并转变为残余拉应力的趋势，同时，去应力退火有利于 y 沿激光扫描方向的均匀化，固溶时效处理有利于 z 沿激光扫描方向的均匀化。

表 3 为 Ti-6Al-4V 锻件在不同温度下的拉伸性能^[16]。可见，随着温度的升高，材料的抗拉强度和屈服强度显著降低。热处理过程中，残余应力高的地方会发生微观塑性变形，随着保温时间的延长，会产生缓慢的应力松弛，从而达到调整与消除残余应力的目的。

表 3 不同温度下 Ti-6Al-4V 合金的拉伸性能^[16]

Table 3 The tensile properties of Ti-6Al-4V alloy at different temperatures

Temperature/°C	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
20(HB 5432-1989)	895	825	10.0	30.0
400	645	508	17.3	60.1
500	583	401	26.5	78.1
600	413	212	47.9	93.8
700	245	89	118.0	99.0

2.2 垂直于激光扫描方向的残余应力分布

图 4 为成形件中部垂直激光扫描方向从基材到熔覆层顶部的残余应力分布（测试点 3、6、7）。可以看到，对于激光沉积态，靠近基材处熔覆层的残余应力为较大的压应力，随着熔覆层数的增加，到中部直至顶部逐渐转变为残余拉应力，但是数值较小（图 4a）。这是因为靠近基材处先凝固冷却，而成形件的其它部位后冷却，因此靠近基材处先降低塑性温度，这样后续成形件其它部位的冷却收缩造成靠近基材处承受压应力。随着熔覆高度的增加，熔池逐渐远离基材，热量散失的路径加长，导致熔覆层热量不断积累，降低了熔池及周围区域的温度梯度，使得从底部到顶部的温度梯度逐渐减小。同时，后续熔覆过程的加热相当于对已熔覆层起到回火作用，使得应力有所释放，因而导致应力分布呈现出从底部到顶部逐渐减小的趋势。激光沉积 Ni20 的残余应力测试结果也表明，随着熔覆层数的增加，压应力数值逐渐减小并向拉应力转变^[7,8]。另外，本研究的测试结果与贾文鹏等^[11]对采用数值模拟所获得的激光成形空心叶片残余应力场分布规律基本吻合。模拟结果表明，最大等效应力出现在叶片根部，即熔覆层与基材结合处，最小等效应力出现在顶部。

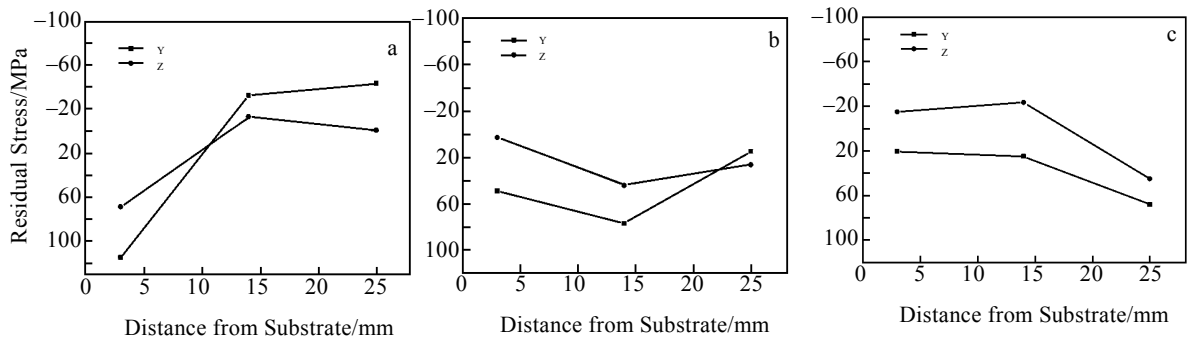


图 4 沿垂直于激光扫描方向的残余应力

Fig.4 The residual stress normal to laser scanning direction: (a) as-deposited, (b) annealing treatment, and (c) solution aging treatment

热处理过程是一个内部残余应力重新平衡的过程，成形件经热处理后总应力降低并趋于平稳。同时，可以看到，热处理使靠近基材的熔覆层残余应力水平明显降低。由于基材和成形件的厚度不同，导致热处理过程中的冷却速率不同。基材较厚，因此冷速较慢，而成形件因厚度小而冷速较快，当成形件温度低于塑性温度时，基材仍然存在较大的冷却收缩量，导致成形件在热处理后主要承受压应力（图 4b）。但是，热处理也使得成形件顶部的残余应力由拉应力转变为压应力，这主要是由于成形件顶部的冷却条件较好，冷

速较快的缘故。

3 结论

1) 激光立体成形 TC4 合金的残余应力属于低应力水平，沿激光扫描方向的 y 和垂直于激光扫描方向的 z 具有类似的分布规律，熔覆起始位置的残余应力值较小，到中间位置为最大的压应力，到熔覆结束位置转变为最大拉应力。

2) 靠近基材处熔覆层的残余应力为较大的压应力，随着熔覆层数的增加，到中部直至顶部转变为较小的拉应力。

3) 与沉积态相比, 成形件经热处理后残余应力有了明显的降低, 且分布平缓。去应力退火后, σ_Y 平均降低 59.8%, σ_Z 平均降低 72.3%。固溶时效处理与去应力退火处理对残余应力的消除程度相当, σ_Y 和 σ_Z 分别平均降低 64.7%和 67.8%。

参考文献 References

- [1] Griffith M L, Schlienger M E, Harwell L D *et al.* *Materials and Design*[J], 1999, 20: 107
- [2] Maziasz P J. *Scripta Materialia*[J], 1998, 39(10): 1471
- [3] Rangaswamy P, Griffith M L *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 399: 72
- [4] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 317: 59
- [5] Martinez S A, Sathish S, Blodgett M P *et al.* *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*[C]. Indianapolis, Indiana: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002: 3733
- [6] Hu Mulin(胡木林) *et al.* *Laser Technology*(激光技术)[J], 2006, 30(3): 262
- [7] Yang Jian(杨健) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(12): 1304
- [8] Yang Jian(杨健) *et al.* *Research on Mechanical Behavior of Laser Rapid Forming Metal Part*(激光快速成形金属零件力学行为研究)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004
- [9] Dai K, Shaw L. *Acta Mater*[J], 2001, 49: 4171
- [10] Xi Mingzhe(席明哲) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报) [J], 2003, 13 (4):887
- [11] Jia Wenpeng(贾文鹏) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2007, 34(9): 1308
- [12] He Xiaodong(何小东) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2005(5): 45
- [13] Zhang Dingquan(张定铨) *et al.* *X-Ray Diffraction Analysis and Process of Materials Residual Stress*(材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用)[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1999
- [14] Zhang Shuangyin(张霜银) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(7): 1263
- [15] Lu Caishan(陆才善). *Measure of Residual Stress*(残余应力测试)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991
- [16] Editor Committee of Engineering Material Application Manual. *Engineering Material Application Manual*(工程材料实用手册)[M]. Beijing: Chinese Industrial Standards Publishing Company, 2001

Influence of Heat Treatment on Residual Stress of Ti-6Al-4V Alloy by Laser Solid Forming

Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The residual stress of Ti-6Al-4V alloys by laser solid forming was measured adopting the standard strain gauge technique involving hole drilling method. Sample treatments were divided into three conditions, that is as deposited, annealing and solution aging treatment. The results indicate that the residual stress exhibits the similar distribution along the laser scanning direction (σ_Y) and normal to the scanning direction (σ_Z). At the location of laser starting scanning, the stress is lower. The largest stress is the compressive stress at the center position and transformed to the highest tensile stress at the location of ending of laser scanning. It can also be found that the residual stress exhibits bigger compressive stress near the substrate, and with increasing of the cladding layer, it develops to lower tensile stress at the top of sample. After annealing treatment, the stress decreases averagely σ_Y for 59.8% and σ_Z for 72.3%, respectively. After treating by solution aging, the stress decreases averagely σ_Y for 64.7% and σ_Z for 67.8%, respectively. Heat treatment was found to relieve and adjust the residual stresses of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy effectively.

Key words: laser solid forming; Ti-6Al-4V; heat-treatment; residual stress

Biography: Zhang Shuangyin, Candidate for Ph. D., Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494001, E-mail: shyin0925@126.com