

# 基板预变形下激光立体成形直薄壁件应力和变形的有限元模拟

王 凯<sup>1</sup> 杨海欧<sup>1</sup> 刘奋成<sup>1,2</sup> 林 鑫<sup>1</sup> 黄卫东<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072  
<sup>2</sup>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)

**摘要** 针对单道多层的直薄件激光立体成形过程,建立了基板预变形和无预变形条件下的 3D 参数化有限元模型,进行了应力和变形的瞬时热弹塑性有限元模拟分析。模拟结果表明,基板预变形处理影响成形件应力和变形的分布与大小,并可减轻基板的翘曲变形。预变形下基板下表面具有初始拉应力点的残余应力值比无预变形要小,基板与熔覆层接触的界面中间位置残余应力也小于无预变形的情况,直薄壁件最大残余压应力所在位置也发生变化。在两模型中,熔覆层两侧边缘位置变形严重,而中间位置变形较小。熔覆层首层的沉积对基板变形量影响最大,后续熔覆层的沉积对基板变形量影响程度逐渐减小并最终趋于稳定。成形前对基板进行适当的预变形处理可以有效控制成形件变形和改善应力分布。

**关键词** 光学制造;激光立体成形;有限元模拟;基板预变形;应力;变形

**中图分类号** TG142 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0603002

## Stress and Deformation Finite Element Method Simulation of Thin Wall Part with Pre-Deformation Substrate during Laser Solid Forming

Wang Kai<sup>1</sup> Yang Haiou<sup>1</sup> Liu Fencheng<sup>1,2</sup> Lin Xin<sup>1</sup> Huang Weidong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China  
<sup>2</sup> National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

**Abstract** Finite element method (FEM) models are established to perform transient thermo-elastic-plastic FEM analysis on stress and deformation of single-pass multilayer with and without substrate pre-deformation during laser solid forming (LSF). Simulation results show that substrate with pre-deformation can affect the distribution and size of stress and deformation in formed parts which can effectively alleviate the warpage of substrate. The point with initial tensile stress on the bottom surface of substrate has a smaller residual stress than that of the substrate without pre-deformed. The middle position of the interface between the substrate and the cladding layer also has a smaller residual stress than that of the substrate without pre-deformation. In both models, the positions of maximum residual compressive stress are different. Both sides of cladding layers deform badly compared with the middle location. The first cladding layer has the largest effect on substrate deformation; the deformation of the substrate gradually reduces as the cladding process proceeds. The longitudinal displacement change rate of the substrate constantly reduces and eventually tends to stable. Appropriate pre-deformation of the substrate before LSF can effectively control

**收稿日期**: 2011-12-09; **收到修改稿日期**: 2012-03-07

**基金项目**: 中国博士后科学基金(20090461312)、西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-JC200808)和凝固技术国家重点实验室自主研究课题项目(16-TZ-2007, 39-QZ-2009, 05-BZ-2010)资助课题。

**作者简介**: 王 凯(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光立体成形及修复仿真模拟等方面的研究。

E-mail: kail2a@126.com

**导师简介**: 黄卫东(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事凝固理论和激光立体成形等方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

deformation of the substrate and improve stress distribution of the part.

**Key words** optical fabrication; laser solid forming; finite element simulation; substrate with pre-deformation; stress; deformation

**OCIS codes** 220.4610; 350.3390; 310.4925

## 1 引言

激光立体成形(LSF)技术是在快速原型技术和激光熔覆技术基础上发展起来的一项先进制造技术,具有无模具、短周期、近净成形,组织均匀致密,无宏观偏析等优点<sup>[1]</sup>。随着激光热源的移动,熔池快速产生和凝固,致使整个成形件的温度分布随时间、空间的不同急剧变化,这导致成形件中残余应力的形成。残余应力的存在会造成一定程度的变形,甚至出现熔覆层剥落和裂纹,严重影响了激光立体成形件的性能和精度,因此对激光立体成形中应力应变的研究具有重要的意义。

关于激光立体成形中应力应变的研究,国内外学者采用了多种不同的实验方法来测量残余应力,如小孔释放法,中子衍射法,显微硬度压痕法等<sup>[2~4]</sup>。随着有限元技术的发展,采用有限元方法研究激光立体成形中热及应力应变的演化更有优势。席明哲等<sup>[5]</sup>建立了激光快速成形三维瞬态薄板零件温度场计算模型,对温度场随时间的变化规律进行了研究;贾文鹏等<sup>[6]</sup>模拟了TC4钛合金空心叶片激光立体成形过程中的温度场、应力应变演化过程;K. Dai等<sup>[7]</sup>和A. H Nickel等<sup>[8]</sup>同样采用有限元方法研究了激光熔覆过程中沉积路径对成形件应力和变形的影响。

王波等<sup>[9]</sup>发现了基板预变形可缓解激光立体成形过程中基板的变形,为实现成形过程基板的变形控制提供了途径。基于此,本文建立了基板预变形和无预变形条件下激光立体成形直薄壁件的瞬时热弹塑性有限元模型,研究了成形件的应力和变形演化规律,并对比分析基板预变形处理对直薄壁件应力和变形的影响。

## 2 有限元模拟方法

### 2.1 简化假设

1) 材料为各向同性,成形中基板材料吸收的激光热源能量保持不变,熔覆层生长速度与激光扫描速度大小相等,忽略成形过程中材料的汽化作用。

2) 材料的初始应力值为零,并且服从双线性随动强化准则和米塞斯(Von Mises)屈服准则,与温度有关的应力应变在微小的时间段内呈线性变化趋势。

3) 激光热源以热载荷的形式施加在有限元模型中,施加单元体载荷作为激光的等效热源,体载荷的大小由激光功率、光斑直径和扫描速度等工艺参数决定。

### 2.2 成形路径和网格模型

用316不锈钢粉末在304L不锈钢基板上进行单道多层涂覆,成形工艺参数为:激光功率 $P=2000\text{ W}$ ,光斑直径 $D=3\text{ mm}$ ,扫描速度 $v=360\text{ mm/min}$ ,共涂覆15层,单层层高 $0.4\text{ mm}$ 。成形时分别将预变形和无预变形长条形基板水平自由地放置在铜质工作台上,成形路径采用激光连续往返扫描方式,如图1所示,其中 $x$ 轴为长度方向, $y$ 轴为高度方向。304L不锈钢长条形基板的尺寸为 $162\text{ mm}\times 27\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ ,熔覆沉积层尺寸为 $120\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。考虑到成形工件的对称性,为简化计算,取工件的一半进行分析,以 $1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 的六面体等参单元来划分熔覆层,基板的单元尺寸大小为 $1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ ,网格模型如图2所示。

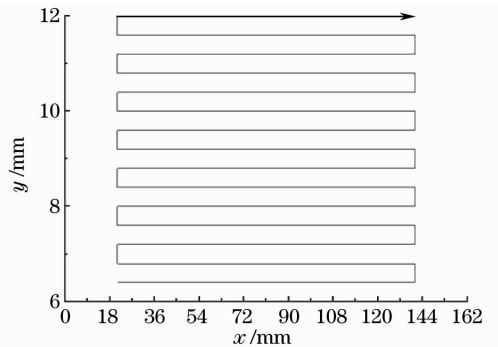


图1 激光立体成形路径图

Fig. 1 Deposition path of LSF

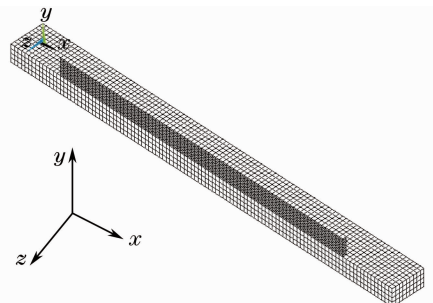


图2 激光立体成形试样的网格模型

Fig. 2 Mesh model of the LSF sample

### 2.3 单元生死技术的应用

为正确仿真激光立体成形的应力应变演化过程,必须考虑熔覆层单元的出现和消失,具体过程为,首先用有限元单元将成形件离散,杀死要激光成形部分的单元,接着按成形路径依次激活熔覆层单元,为激活的单元施加等效体载荷,作用时间为激光

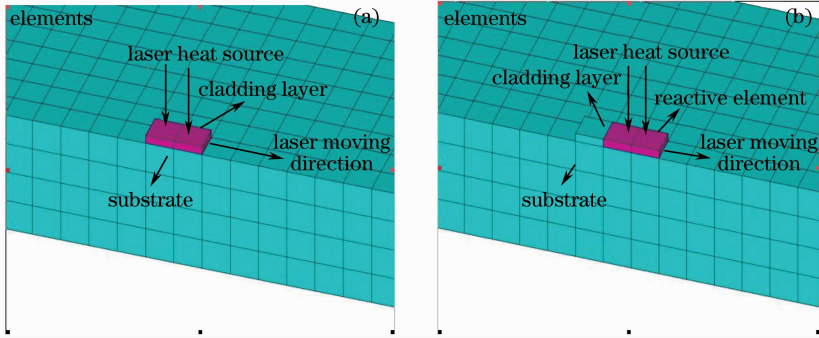


图 3 热源加载和单元生死。(a)第一载荷步;(b)第二载荷步

Fig. 3 Applying thermal loads and element's birth and death. (a) First load; (b) second load

### 2.4 基板预变形的实现方法

首先对基板下表面中心点施加位移自由度的全约束,然后对基板两端短轴线施加相同大小的向下外力。基板在外力的作用下弯曲到所需的指定位置后卸载,卸载后将发生一定程度的回弹变形,从而实现成形前基板的预变形处理。为了保证基板对激光能量的吸收率与熔覆层成形质量基本一致,预变形基板的挠曲度不宜过大。在此选用的基板预变形尺寸为 3 mm,成形前基板最终的挠曲度为 1.27 mm,如图 4 所示。

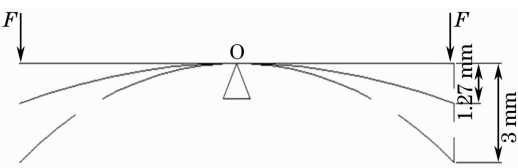


图 4 预变形基板示意图

Fig. 4 Skematic of pre-deformation substrate

### 2.5 边界条件与其他问题

假定周围环境和基板的初始温度为 300 K,除基板与工作台接触的底面、模型对称面和杀死的单元外,模型外表面施加自然对流换热边界条件,对称面施加对称边界条件。基板与工作台接触的底面与大的铜质工作台接触,传热较快,通过对底面施加较大的对流换热系数来模拟其传导传热过程。温度场对应力应变场有很大影响,而应力应变场对温度场的影响很小,故求解应力应变时采用顺序耦合的方法,即先做温度场的分析,再将温度场分析的结果应用于结构分析。为保证基板的自由变形和防止基

束扫描单元所需时间,以此来计算成形温度场。在进行应力应变计算时,对每一子部的温度场数值模拟结果进行选择,温度超过熔点的已激活单元令其“死亡”,以正确模拟熔覆层生长及熔池的熔化、凝固过程。图 3 为第一和第二载荷步热源加载和单元生死的示意图。

板发生扭曲,在应力变形分析求解过程中,基板采用“十字对称”的约束条件<sup>[10]</sup>。计算中所采用的相关热物性参数随着温度的变化而变化,基板和粉末材料的热物性参数参照相关文献<sup>[9, 11]</sup>。

## 3 结果讨论与分析

### 3.1 基板预变形处理后应力分析

基板形状为长条形,在坐标轴的三个方向上,纵向挠曲变形是其主要变形方式,y 向刚度很小,残余应力较小,而 x 方向的刚度最大,其残余应力也最大,故基板应力分析时主要讨论 x 方向的应力。图 5 为预变形处理后基板的初始应力分布图,step 表示 ANSYS 软件中载荷步数;SUB 表示图中在此载荷步中的载荷子步数;time 为时间;SX 为平行于坐标轴 x 方向上的应力;RSYS:0 表示直角坐标系

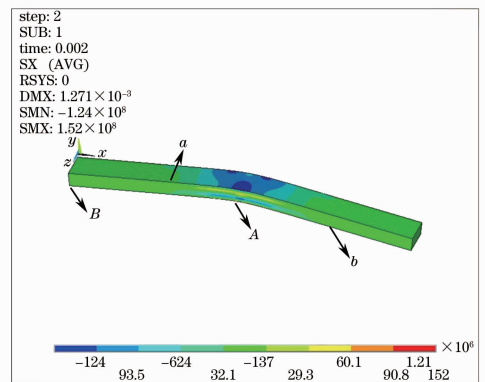


图 5 预变形处理后基板的应力分布图

Fig. 5 Distribution of residual stress after substrate pre-deformation

DMX 为最大位移量; SMN 与 SMX 分别表示图中数值结果的最小和最大值; Nod1 代表路径中的第一个节点号, Nod2 代表路径中的最后一个节点号。图中  $a$  和  $b$  为模型对称面与基板上下表面的交线,  $A$  和  $B$  为  $b$  线上相应位置的两点。预变形处理后上表面的残余应力主要为压应力, 下表面主要为拉应力, 残余应力主要集中在基板中间附近, 而在基板两端为零, 变形方式主要为弹性变形。

### 3.2 直薄壁件应力场分析

由于基板预变形量相对较小, 基板预变形对温度场的影响可以忽略不计, 即认为在两种模型中, 温度场分布及大小是基本相同的。受基板预变形处理的影响, 应力场呈现出不同的特点。

为研究基板预变形处理对实时应力的影响, 分析基材下表面中心位置  $A$  点应力的演化过程, 如图 6 所示。基板预变形下  $A$  点初始处于拉应力状

态, 应力大小为 79 MPa, 无预变形时,  $A$  点初始应力为零。  $A$  点应力大小随激光热源的移动而周期性变化, 成形阶段每当激光热源向  $A$  点靠近时, 拉应力数值减小, 甚至在前 3 层熔覆中变为压应力。随激光热源远离  $A$  点, 拉应力数值变大或压应力数值减小。在成形开始阶段, 预变形条件下  $A$  点的最大拉应力数值均大于无预变形的情况, 但随着熔覆过程的进行, 两者之间的差值变小。从第 10 层起, 预变形条件下  $A$  点的最大拉应力开始小于无预变形的情况, 并且两者之间的差值逐渐变大; 冷却阶段, 预变形和无预变形条件下  $A$  点残余应力数值随时间的增加而逐渐减小, 但两者的差值继续变大; 冷却结束时, 预变形条件下  $A$  点仍处于残余拉应力状态, 应力大小为 29 MPa, 无预变形时残余拉应力大小为 160 MPa。最终, 预变形下位于基板下表面具有初始拉应力点的残余应力值比无预变形时要小。

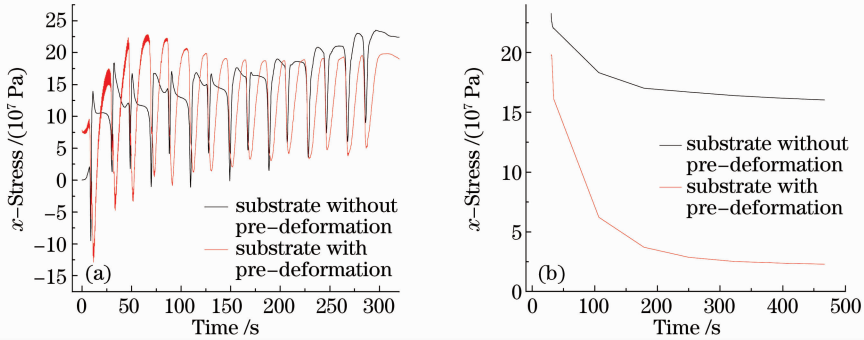


图 6 激光立体成形时  $A$  点应力随时间变化的曲线。(a) 成形阶段; (b) 冷却阶段

Fig. 6 Variation of the stress at point  $A$  with time during LSF. (a) Forming process; (b) cooling process

图 7 为成形件彻底冷却后,  $a$  线上的残余应力分布, 其中横坐标代表  $x$  方向上的距离。无论基板是否经预变形处理,  $x$  方向的残余应力主要为拉应力,  $a$  线两端应力曲线基本重合, 且在熔覆层与基板接触的两端拉应力数值比其他位置要大; 除  $a$  线两端部位置外, 预变形后熔覆层与基板接触的界面中间

位置残余拉应力要比无预变形条件小一些, 与预变形基板相比, 无预变形基板两端上翘, 中间下凹, 基板中间位置受到由两端变形引起的额外压应力, 中间位置的拉应力突然减小。

图 8 为整个成形件冷却后的残余应力分布, 无论基板在成形前是否经过预变形处理, 直薄壁件整体残余应力水平均不高, 属于低残余应力水平。最大残余拉应力均位于熔覆层与基板接触的最右端根部, 且数值大小基本相同, 即 SMX 点。在基板无预变形条件下, 最大残余压应力位于熔覆层最后熔覆的位置处, 且范围很小; 而在预变形条件下, 最大压应力的位置发生改变, 位于靠近右端的熔覆层中, 且压应力数值略微增大, 即 SMN 点; 成形后基板由“ $\cap$ ”形变为“ $W$ ”形, 凹下去的两部分熔覆层中存在低压应力区。由此可见, 基板预变形处理对直薄壁件残余应力的分布和大小产生了影响。

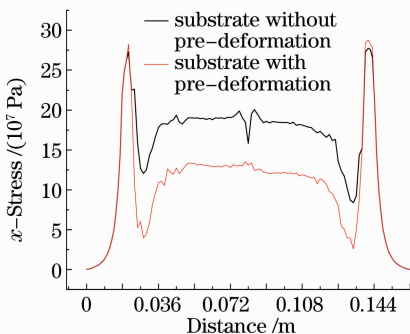


图 7 沿  $a$  线的残余应力分布

Fig. 7 Distribution of residual stresses at line  $a$

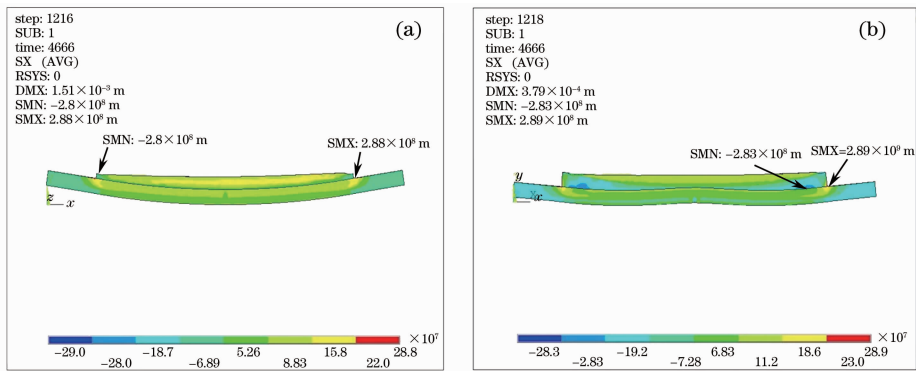


图 8 成形件残余应力分布。(a)基板无预变形;(b)基板预变形

Fig. 8 Residual stress distribution of the part after laser solid forming. (a) Substrate without pre-deformation; (b) substrate with pre-deformation

## 4 变形分析

### 4.1 基板变形分析

激光立体成形薄板试样时,平直基板的翘曲变形是经常出现的现象,长条形基板主要的变形方式是纵向挠曲变形。故基板变形分析时,选取图 5 中  $B$  点的纵向位移  $LUY$  为研究目标。

图 9 为  $B$  点  $LUY$  的变化曲线,成形阶段的数据点对应每层结束时  $B$  点的位移。在基板预变形处理阶段,基板两端受到向下 3 mm 的位移约束,以基板下表面中心所处的位置为原点,即图 4 中的  $O$  点, $B$  点位于  $-3$  mm 的位置,卸载后弹性变形将消失,而塑性变形得以保留,此时  $B$  点回复到约  $-1.27$  mm 的位置,即  $B$  点变形量为  $1.27$  mm。在成形阶段,刚开始很短时间内, $B$  点位移由  $-1.27$  mm 变化到  $-1.38$  mm,因为高能激光束快速加热基板表面形成熔池,在材料厚度方向上产生剧烈变化的温度场,熔池及其附近热膨胀受周围较冷材料的约束,产生压应力。同时熔池及其附近温度很高,在高温下屈服强度明显降低,产生局部的塑性压缩。在这段时

间内,激光束对基材产生的压应力大于熔池凝固收缩产生的拉应力,产生向下的弯矩, $B$  点向下移动。此后,相对于熔池产生的压应力,熔池凝固收缩产生的拉应力开始占到主要地位,在此拉应力的作用下产生向上的弯矩, $B$  点开始向上移动。

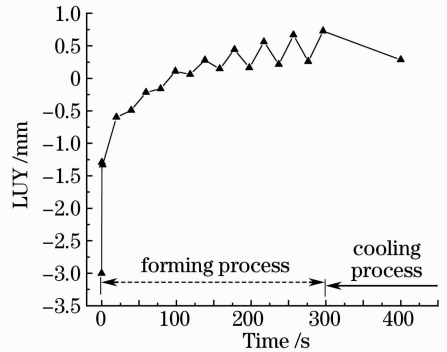


图 9  $B$  点随时间变化的位移曲线

Fig. 9 Variation of the displacement at point  $B$  versus time during LSF

由于受激光成形路径的影响, $B$  点位移处于不断波动之中。为更好地研究基板的变形规律,在

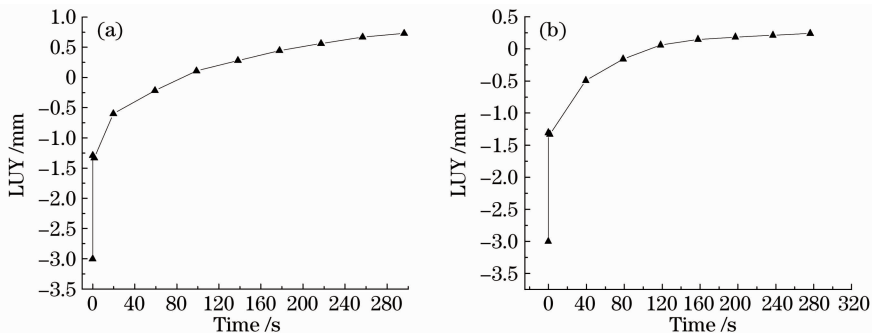


图 10  $B$  点随时间变化的位移曲线。(a)奇数层成形;(b)偶数层成形

Fig. 10 Displacement of point  $B$  versus time during LSF. (a) At the time of odd-numbered layers completed; (b) at the time of even-numbered layers completed

图 9 的基础上,将成形阶段分为奇数层和偶数层的成形阶段,以排除成形路径对基板变形的影响,如图 10 所示。由图可知,基板的总体变形不断向上移动,熔覆层首层的沉积对基板变形量影响最大,且位移的变化量随成形层的增加而逐渐减小并最终趋于稳定。这与随成形过程的进行,基板温度不断升高,温度梯度不断减小有关。在随后的冷却阶段,弹性变形部分消失,B 点将发生一定程度的回复变形,但回复变形量较小,位移最终变为 0.28 mm,如图 9 所示。

基板下表面 *b* 线位移可反映基板最终的变形情

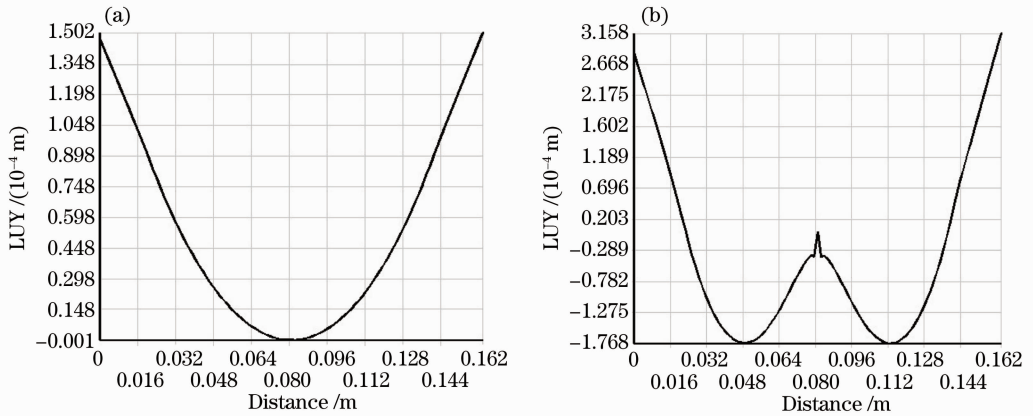


图 11 *b* 线最终的位移。(a)基板无预变形;(b)基板预变形

Fig. 11 Substrate deflection of line *b* after laser solid forming. (a) Substrate without pre-deformation; (b) substrate with pre-deformation

#### 4.2 熔覆层的变形分析

熔覆层的变形主要由熔池的收缩特性决定,但熔覆层两端的变形要比其中间位置变形严重。图 12(a)为基板无预变形条件时成形件 *x* 方向的位移(LUX)分布图,最大位移为 0.33 mm,位于熔覆层的最左端,最小位移为-0.43 mm,位于熔覆层的最右端,熔覆层中间位置则为位移过渡区,相对熔覆层中间位置,边缘位置的变形更严重。图 12(b)为

基板预变形的情况,与无预变形情况有类似的位移分布规律,但最大位移为 0.42 mm,最小位移为-0.322 mm。这一方面与激光热源的扫描方式有关,由于激光热源采用连续往返扫描的方式,在熔覆层的两边缘位置,激光束停留的时间比在中间位置要长,基板或已成形的熔覆层吸收更多的热量,温度相对更高,温度梯度增大,熔池的尺寸也变大,形成比中间部位要大的应力。另一方面与熔覆层端部的边

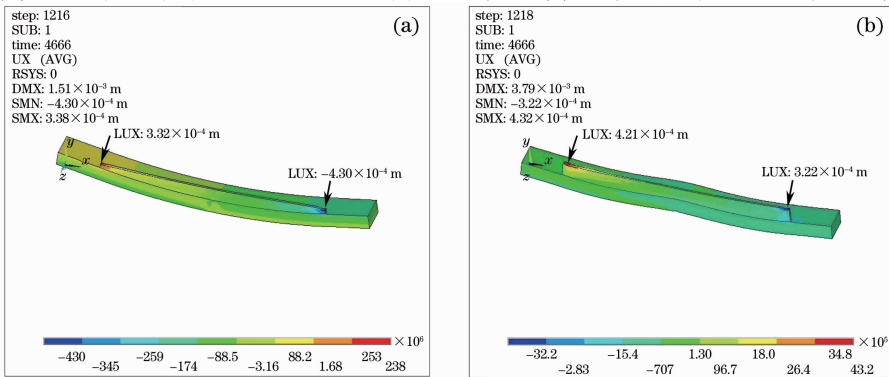


图 12 成形件 *x* 方向的位移分布图。(a)基板无预变形;(b)基板预变形

Fig. 12 *x*-direction displacement distribution of the part. (a) Substrate without pre-deformation; (b) substrate with pre-deformation

界效应有关,熔覆层的两端直接与空气接触,受熔覆层材料的约束作用较小,在应力作用下,熔覆层端部边缘位置易发生变形。

## 5 结 论

建立了基板预变形和无预变形条件下直薄壁件的激光立体成形瞬态热弹塑性模型,并对比分析了预变形对直薄壁件的应力和变形的影响,结果表明,

1) 基板预变形处理影响成形件残余应力的分布和大小。基板预变形处理时,基板与熔覆层接触的界面位置应力发生变化,直薄壁件最大残余压应力位置也发生改变,位于基板下表面具有初始拉应力点的残余应力值比无变形情况要小。

2) 基板的变形主要决定于成形过程中产生的热应力。熔覆层首层的沉积对基板变形量的影响最大,随后各层的沉积对基板变形的影响程度逐渐减小并最终趋于稳定,适当的基板预变形处理能提高基板成形后的平整度。

3) 熔覆层的变形主要与激光热源的扫描方式和熔覆层端部的边界效应有关,基板预变形处理对熔覆层变形的影响虽不明显,但在两模型中,熔覆层两侧的边缘位置变形严重,而中间位置变形相对较小。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2007. 1~5  
黄卫东, 林 鑫, 陈 静等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 1~5
- 2 P. Rangaswamy, T. M. Holden, R. B. Rogge *et al.*. Residual stresses in components formed by the laser-engineered net shaping process[J]. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*,

- 2003, **38**(6): 519~527
- 3 Yang Jian, Chen Jing, Yang Haiou *et al.*. Experimental study on residual stress distribution of laser rapid forming process[J]. *Rare Metal Materials and engineering*, 2004, **33** (12): 1304~1307  
杨 健, 陈 静, 杨海欧等. 激光快速成形过程中残余应力分布的实验研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, **33** (12): 1304~1307
- 4 F. Liu, X. Lin, G. Yang *et al.*. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**: 208~213
- 5 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Shilikai *et al.*. Numerical simulation of 3D transient temperature field in thin-wall metal parts fabricated by laser direct deposition [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, **13**(4): 887~892  
席明哲, 张永忠, 石力开等. 激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2003, **13**(4): 887~892
- 6 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/Stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1308~1312  
贾文鹏, 林 鑫, 陈 静等. 空心叶片激光快速成形过程的温度应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1308~1312
- 7 K. Dai, L. Shaw. Thermal and stress modeling of multi-material laser processing[J]. *Acta Materialia*, 2001, **49**(20): 4171~4181
- 8 A. H. Nickel, D. M. Barnett, F. B. Prinz. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, **317**(1-2): 59~64
- 9 Wang Bo, Lin Xin, Ma Liang *et al.*. A thermo mechanical finite element method simulation of 304 L stainless steel during laser solid forming with pre-deformation substrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 242~249  
王 波, 林 鑫, 马 良等. 基板预变形304 L不锈钢激光立体成形过程热弹塑性有限元分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 242~249
- 10 Ma Liang, Huang Weidong, Yu Jun *et al.*. Parametric finite element model of temperature/stress field evolution by metal laser solid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3226~3232  
马 良, 黄卫东, 于 君等. 金属激光立体成形热应力场参数化有限元模型[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3226~3232
- 11 O. Sayman, F. Sen, E. Celik *et al.*. Thermal stress analysis of Wc-Co/Cr-Ni multilayer coatings on 316 L steel substrate during cooling process[J]. *Materials and Design*, 2007, **190** (1-3): 26~32