

## 超声旋转微锻造增材件数值模拟

任朝晖, 贾昌烨, 武志伦, 王云贺  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对目前金属增材制造中复杂的温度变化导致制件产生残余应力, 进而引起孔洞、裂纹等缺陷问题, 以圆形轨迹 TC4 钛合金件作为研究对象, 利用超声微锻造技术, 对工件表面施加高频的微小振动, 进而达到细化晶粒、降低残余应力的效果。通过研究单层激光熔覆层的不同特征点的热应力变化, 得到热应力场结果后导入超声旋转微锻造系统中, 进而研究微锻头直径、工具头转速、振幅、锻造温度对于熔覆层残余应力的影响效果。结果表明: 激光熔丝增材制造具有“快冷快热”的特点, 在锻造系统中, 不同的锻造参数对于提升增材件的性能都有着不同的影响。

**关键词:** 金属增材制造; 残余应力; 超声旋转微锻造; TC4 钛合金; 热应力

中图分类号: TG 146.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0057-07

## Numerical Simulation of Ultrasonic Rotary Micro-forging Additive Parts

REN Zhao-hui, JIA Chang-ye, WU Zhi-lun, WANG Yun-he

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: REN Zhao-hui, E-mail: zhren\_neu@126.com)

**Abstract:** In view of the complex temperature changes in metal additive manufacturing that lead to residual stress in the parts and then form holes, cracks and other defects, TC4 titanium alloy parts with circular tracks were taken as the research object, and ultrasonic micro-forging technology was used to apply high-frequency micro-vibration on the surface of the workpiece, so as to achieve the effect of refining the grains and reducing the residual stress. By studying the thermal stress changes of different characteristic points of the single-layer laser-cladding layer, the thermal stress field results were obtained and imported into the ultrasonic rotary micro-forging system, and then the effects of the diameter of the micro-forging head, the rotating speed of the tool head, the amplitude and the forging temperature on the residual stress of the cladding layer were studied. The results showed that laser fuse additive manufacturing has the characteristics of “fast cooling and fast heating”. In the forging system, different forging parameters have different effects on improving the performance of additive parts.

**Key words:** metal additive manufacturing; residual stress; ultrasonic rotary micro-forging; TC4 titanium alloy; thermal stress

增材制造过程中, 材料在短时间内经历了熔化与凝固等变化, 在热物性的影响下, 使其成形过程中的表面容易形成裂纹与凸起等缺陷, 激光熔覆层也存在较大的残余应力, 这些因素对金属制件的物理和化学性能产生了非常不利的影响, 制约了增材制造技术的发展。本文拟将超声旋转

技术与微锻造技术相融合, 将传统的二维锻造平面拓展到三维旋转锻造空间, 提出了超声旋转微锻造 (ultrasonic rotary micro-forging, URMF) 的新型辅助增材加工技术, 对其作用机理进行研究, 为超声旋转微锻造增材件的力学性能调控提供技术支撑。

收稿日期: 2024-03-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2303011); 辽宁省自然科学基金资助项目(2022-MS-125)。

作者简介: 任朝晖(1968—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

针对上述问题,学者们对增材制造过程中表面和内部应力的调控进行了大量探索.有学者提出在制造过程中加入超声振动,可以对熔池产生搅拌作用<sup>[1]</sup>,以达到细化晶粒,均化熔覆层材料成分,降低残余应力的效果.还有学者提出了在熔覆层表面施加高频微锻造的研究思路,逐层改变熔覆层的应力状态,使得残余应力明显降低,开裂现象也得到改善.在增材制造技术发展初期,美国 Sandia 实验室联合多家单位率先展开了研究<sup>[2]</sup>,通过对激光直接成形过程中多种材料的研究,制备了多种高温合金以及钛合金梯度材料,并成功应用于某卫星的钛合金毛坯件的制造中<sup>[3-4]</sup>.20世纪90年代末,AeroMet公司首次利用激光增材制造技术打印飞机某钛合金结构件,并且实现了机载应用.Cai等<sup>[5]</sup>利用有限元软件进行微锻头对板料成形的仿真分析,弹塑性变形量的模拟结果与实验结果基本一致,验证了数值模拟方法在超声微锻造分析中的有效性.Ye等<sup>[6]</sup>通过实验观测的方法,研究在超声微锻造(ultrasonic micro-forging, UMF)处理激光金属丝沉积 Ti-6Al-4V 合金时,不同振幅和载荷对增材件组织和力学性能的影响.Walker等<sup>[7]</sup>研究了超声冲击对直接金属激光烧结 Ti-6Al-4V 材料疲劳寿命的影响,通过衡量表面孔隙率、粗糙度、硬度和残余应力等指标来表征材料性能.综上,对于增材件熔覆层的超声微锻造方面的研究已经逐渐进入了新的发展领域.

从现有的研究结果来看,超声微锻造在表面处理方面的应用已经非常成熟,而针对增材件性能处理的相关研究还处于发展阶段,超声微锻造处理复杂应力状态下的增材件还是一个有待拓展的研究方向,如何更好地将增材制造工艺与超声微锻造处理工艺有机结合起来,将成为以后的重要议题.本文使用 ANSYS 有限元软件,以 TC4 钛合金为研究对象,对单道激光熔覆的熔覆层进行温度场和应力场分析,并且从不同角度研究超声旋转微锻造消除残余应力的作用和效果.通过改变锻造参数来提升锻造过程的效果,提高激光熔丝增材件的加工质量,改善增材件的力学性能和微观组织.

## 1 有限元模型的建立

激光熔丝增材制造过程中,熔覆层表面的应力场和温度场会发生变化,将温度场与应力场作

为初始条件设置超声旋转微锻造加工系统,之后进行热-结构耦合数值模拟研究.

### 1.1 建立模型并划分网格

单层单道熔覆层方便建立,同时能更直观地得到激光增材制造过程中温度场和应力场的变化.基材直径为 20 mm,高为 5 mm,单层单道圆形轨迹的宽度和高度分别为 2.04 mm 和 0.68 mm,熔覆轨迹的半径为 5 mm.为方便展示微锻造处理后的真实变形,熔覆层截面形状采用圆弧形.最终得到有限元模型如图 1 所示.

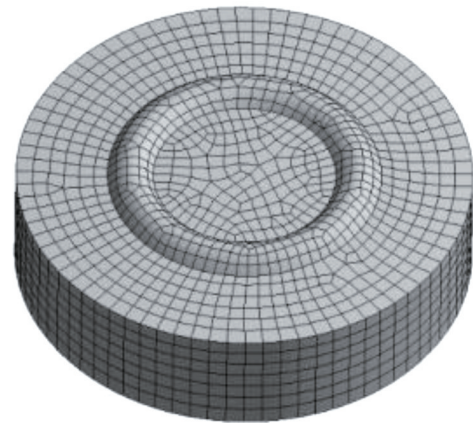


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

### 1.2 热源设置

在激光增材制造中,激光热源产生的热流分布大多服从高斯热源模型,因此在数值模拟中同样采用高斯热源模型.该模型很好地表达了距离热源中心各位置的温度分布,其表达式如式(1)所示<sup>[8]</sup>:

$$q(r) = \frac{3P\eta}{\pi r^2} \exp\left[-3\left(\frac{x^2+y^2}{r^2}\right)\right]. \quad (1)$$

式中: $P$ 为激光功率; $\eta$ 为激光作用在熔覆层表面上的效率; $r$ 为激光热源半径; $x$ 和 $y$ 分别为作用面某一点距离热源中心的相对坐标.

根据实验参数,设定激光增材工艺参数如下:激光功率为 500 W、光斑直径为 2 mm、扫描速度为 5 mm/s.

### 1.3 材料选取

本文模拟增材使用的材料为 TC4 钛合金线材,其各元素组成成分如表 1 所示<sup>[9]</sup>.

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy %

Fe	Al	V	C	Ti
0.3	5.5	3.5	≤0.1	其余

材料的热物性参数对模拟结果有着决定性的影响,TC4热物性参数的设置来源于有限元软件ANSYS - Workbench的增材制造材料库,其熔点为1 605 °C,其余随温度变化的相关参数如图2所示。

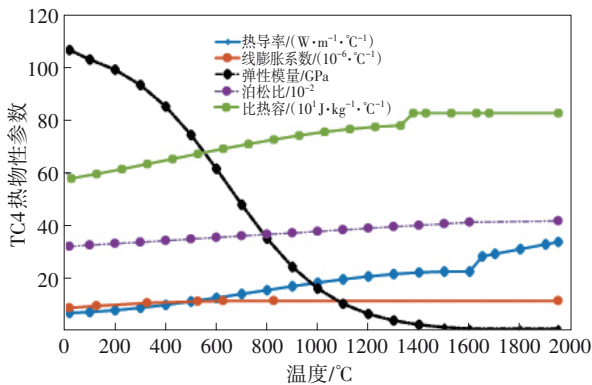


图2 TC4钛合金热物性参数

Fig. 2 Thermal physical parameters of the TC4 titanium alloy

#### 1.4 增材实现与边界条件

为了真实地模拟增材制造中材料由无到有的过程,可以在有限元软件的瞬态热分析设置中插入“生死单元”模块.生死单元可以随着预先设置的子步同步加入,这可以避免未成形的部分受热源加载的影响,从而保证模型的准确性.本文合理地设置了生死单元,这可以保证增材件各物理场结果的连贯性和真实性.

合理的散热边界条件可以使模拟结果更加准确,本文设定的环境为气体环境,温度为22 °C.模型的基板底面与工作台接触,散热方式主要为热传导,因此可设定较大的传热系数,其值为60 W/(m<sup>2</sup>·K).基板的其余表面和各熔覆层侧面的散热方式主要为热对流,增材过程在保护气体中进行,材料的表面传热系数通常设定为10 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[10]</sup>.考虑热辐射的影响,设定其系数为0.2.在应力场的分析中,设定基板底面中心平面为固定约束,外圆柱面自由变形,可以减少约束条件对真实加工中应力结果的影响.

## 2 结果与分析

随着移动热源的加载,丝状材料发生了复杂的物态和热力变化.由于温度场及物态变化的影响,熔覆层应力场也会随之发生改变,所以需要温度场和应力场分布进行研究.

### 2.1 单道激光熔覆层温度场分析

图3为基板与熔覆层结合面上沿不同路径按顺序排列的等距测点的温度循环图.由图3a可以看出,当热源经过各点时,材料从100 °C加热到温度峰值(约2 300 °C)只用了0.7 s,其中达到熔点1 605 °C用时0.5 s,并以熔融态经过了0.6 s后温度降低到熔点以下,这体现出了增材制造中材料“快热快冷”的特点.在冷却过程中,材料温度随时间的变化率越来越小,当温度降低到350 °C左右时各特征点的温度循环曲线几乎重合,此时各特征点温度梯度较小,导热缓慢,热量散失主要依靠材料表面与空气的对流换热.选取的5个特征点随着热源的加载,所呈现出的温度变化几乎一致.

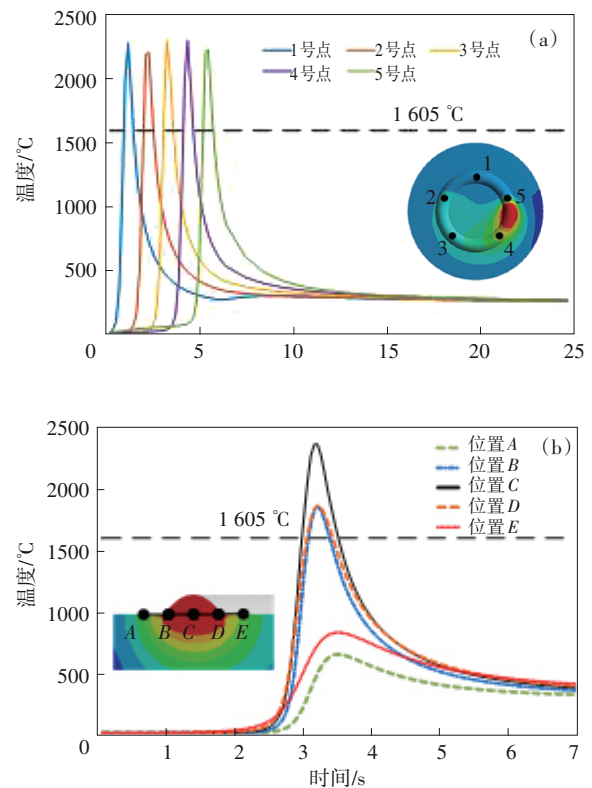


图3 激光熔覆层沿不同路径的温度变化

Fig. 3 Temperature variation along different paths of laser-cladding

(a)—扫描路径方向;(b)—垂直路径方向.

从图3b可以发现,增材部分的材料温度变化的扫描路径方向和垂直路径方向同步,最高温度都在熔点以上并且热源中心位置的温度最高,而外侧的两点温度峰值较低且到达时间相对滞后,这是由于高斯热源的直径与熔覆层宽相同,热源两侧材料的升温还需要依靠热源中心材料的热传导.

## 2.2 单道激光熔覆层应力场分析

为了更好地理解增材制造过程中熔覆层的应力变化规律和产生应力的具体原因,在温度场讨论的熔覆层横截面内,自上到下每隔 0.15 mm

选取 1 个特征点,共 4 个,插入应力检测探针.得到各特征点的等效应力、周向应力,径向应力及 Z 方向应力随时间的变化,如图 4 所示.

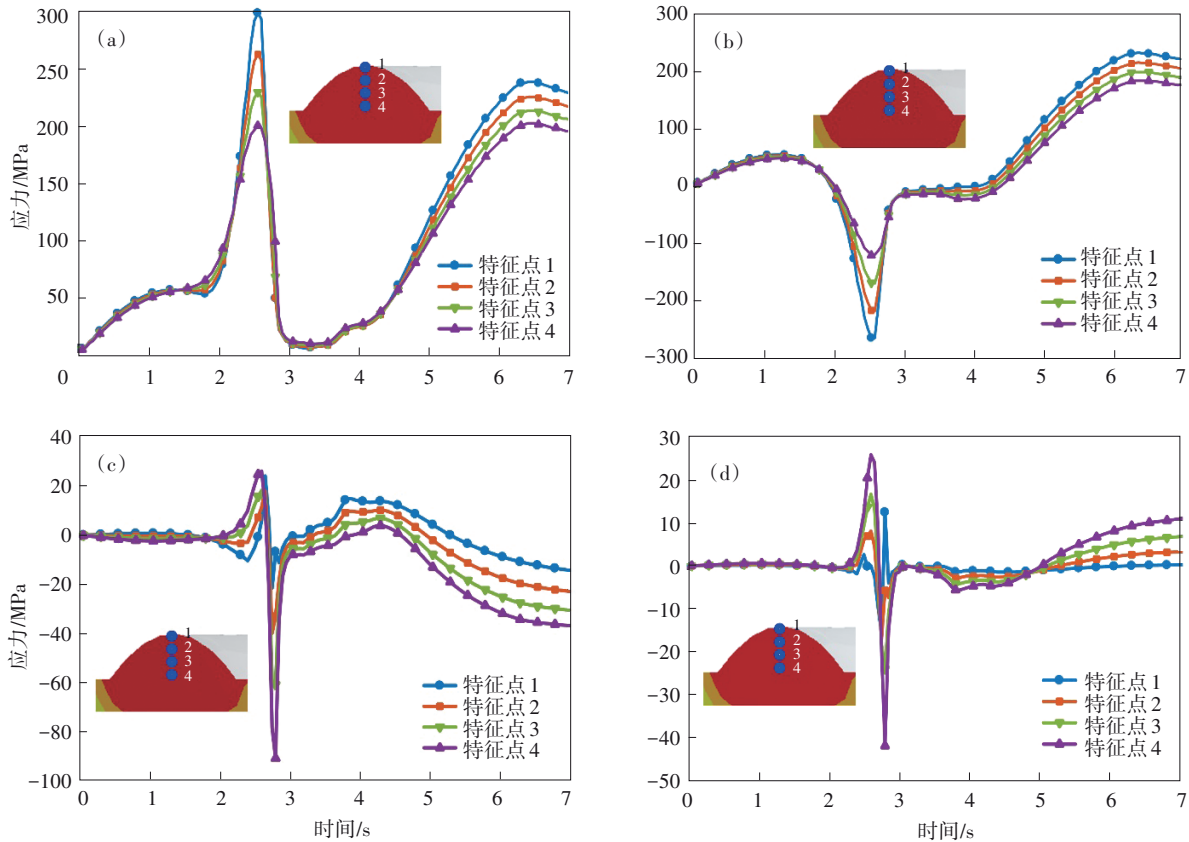


图 4 节点应力变化曲线

Fig. 4 Change curves node stress

(a)—等效应力; (b)—周向应力; (c)—径向应力; (d)—Z 向应力.

从图 4a 的等效应力变化曲线图中可以看出:当热源靠近该截面时,各点的等效应力迅速上升;在熔覆层温度迅速上升并形成液态的时间内,各点的等效应力迅速降低,且接近 0 MPa;当熔覆层形成固态时,各点的等效应力上升后接近稳定,其中熔覆层表面的特征点 1 等效应力最大,最底部的特征点 4 等效应力最小.在柱坐标系中,周向即为熔覆行进的方向,从图 4b 的周向应力图可以看出:当热源靠近探测位置时,周向应力呈现降低的趋势,这是因为已经熔化的区域受热发生膨胀变形,挤压未熔化的区域形成了较大的压应力,表面最大应力达到 -264 MPa;当热源远离时,材料凝固膨胀变形使得特征点产生了拉应力,最大拉应力仍然发生在熔覆层表面,为 232.6 MPa.对于垂直于熔覆轨迹方向的应力,从图 4c 可以发现,在探测位置的材料发生熔化之前,特征点先呈现出较小的拉应力,随后应力迅速下降

产生较大的压应力;随着材料发生熔融,应力迅速消失且接近于 0 MPa;凝固后的材料各点的径向应力呈现为较小的压应力.从图 4d 可以看出,垂直于成形表面的 Z 向应力在材料熔化之前的变化趋势与径向应力基本相同,凝固之后的熔覆层表面应力为 0 MPa,内部也呈现出极小的拉应力,与基板相同,熔覆层表面在 Z 向上为自由表面,可以自由变形而不受其他材料的限制,熔覆层内部特征点在 Z 向上的应力相比其他方向更接近于 0 MPa.

综上所述,熔覆层内各点的应力变化趋势基本相同,由于等效应力最大处始终发生在熔覆层表面上,因此对熔覆层表面进行处理将是减小等效应力的有效方法.从 3 个方向的应力变化曲线来看,沿着材料生长方向的应力相比垂直于材料生长方向的应力要大许多,沿着熔覆层深处方向的应力有所降低,这种应力状态很好地解释了增

材制造中裂纹的产生方向及其向深处拓展的原因.

### 2.3 超声旋转微锻造参数对制件性能的影响

通过微锻造可以降低增材件的残余应力并提高其质量,进而研究不同的锻造参数对于增材件残余应力的作用效果.将热应力场结果作为初始条件设置到超声旋转微锻造系统中,选择了微锻造头直径、振幅、转速以及锻造温度 4 个主要参数作为研究对象,通过建立不同的有限元模型以及设定边界条件开展工艺参数对制件性能的影响研究.

#### 2.3.1 超声旋转微锻造有限元模型的建立

微锻头的直径为 2 mm,头部为半球形,被锻造的熔覆层为 10 mm×2 mm×2 mm 的立方体,微锻头头部顶点与工件边缘的中点重合.微锻头采用多区域网格的划分方法,单元尺寸为 0.3 mm;钛合金件的单元尺寸为 0.1 mm.超声旋转微锻造有限元模型如图 5 所示.

#### 2.3.2 微锻头直径影响分析

X 向应力代表垂直于锻造路径的方向应力,Y 向应力代表沿着锻造路径的方向应力.从图 6a 可知,不同的微锻头直径对残余应力分布趋势影响相同,且最大残余应力产生的深度都为 62.5 μm,

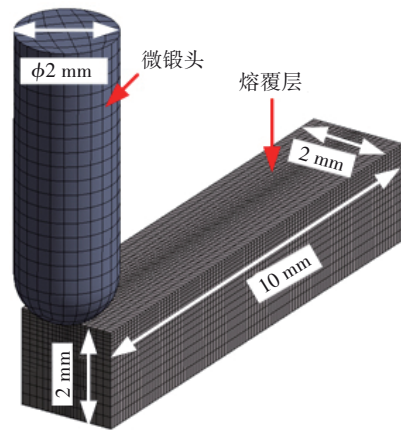


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

较明显的区别是,直径为 2 mm 的工具头在熔覆层内部产生的最大压应力最大,直径为 3 mm 的次之,直径为 4 mm 的工具头产生的最大压应力最小.此外,对于压应力层的深度而言,直径越小的压应力层越早转变为拉应力,当直径由 2 mm 增大到 4 mm 时,压应力层深度可以达到 167 μm.图 6b 中微锻头直径对 Y 向应力的影响与 X 向应力基本相同.不同的微锻头直径对残余应力分布趋势影响相同,微锻头直径的改变对最大压应力影响明显,对压应力层在深度方向上的影响较小.

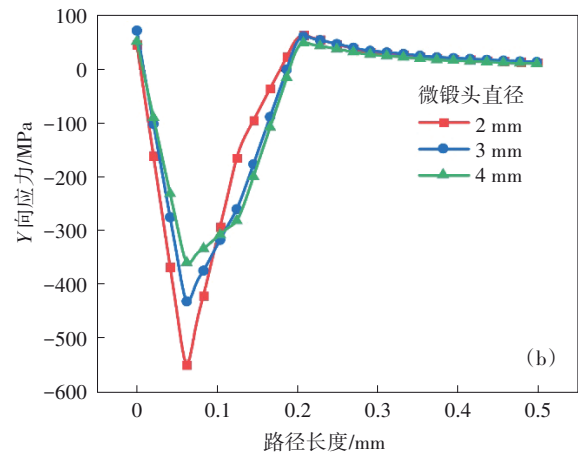
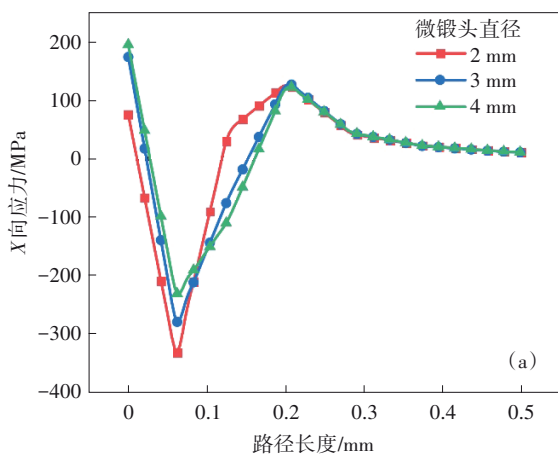


图 6 不同微锻头直径下沿深度方向残余压应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution along depth under different diameters of the micro-forging head

(a)—X 向应力;(b)—Y 向应力.

#### 2.3.3 转速的影响分析

在不改变其他参数的情况下,只改变工具头的主轴转速,得到沿深度方向的残余应力分布和压应力最大值(见图 7),可知转速的改变对沿深度方向的残余应力影响较小,3 种转速在应力转变趋势和作用深度上近乎一致,对于 X 向和 Y 向

残余应力,转速为 3 000 r/min 的最大压应力值最大.

#### 2.3.4 振幅的影响分析

从图 8a 可以看出,振幅为 10 和 15 μm 时的最大压应力深度一致,都在表面下方 62.5 μm 处,而振幅为 20 μm 时的最大压应力发生在距表面

125  $\mu\text{m}$  处.随着振幅的增加,压应力最大值和压应力层深度都有明显的增加,当超声振幅从 10  $\mu\text{m}$  增加到 15  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  时,压应力层的深度从 120  $\mu\text{m}$  增大到了 187  $\mu\text{m}$  和 235  $\mu\text{m}$ .对于深处的拉应力层,振幅越大,产生的残余拉应力越大.从图 8b 可以看出,振幅为 15 和 20  $\mu\text{m}$  时的最大压应力深度都增加到了表面下方 125  $\mu\text{m}$  处.同样

地,随着振幅的增加,压应力最大值和压应力层深度也有增加,当超声振幅从 10  $\mu\text{m}$  增加到 15  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  时,压应力层的深度从 180  $\mu\text{m}$  增大到 250  $\mu\text{m}$  和 320  $\mu\text{m}$ .在更深处压应力层,振幅的增加对 Y 向压应力提升效果要小于 X 向,这意味超声振幅对两向残余压应力的大小和深度范围都有显著的影响.

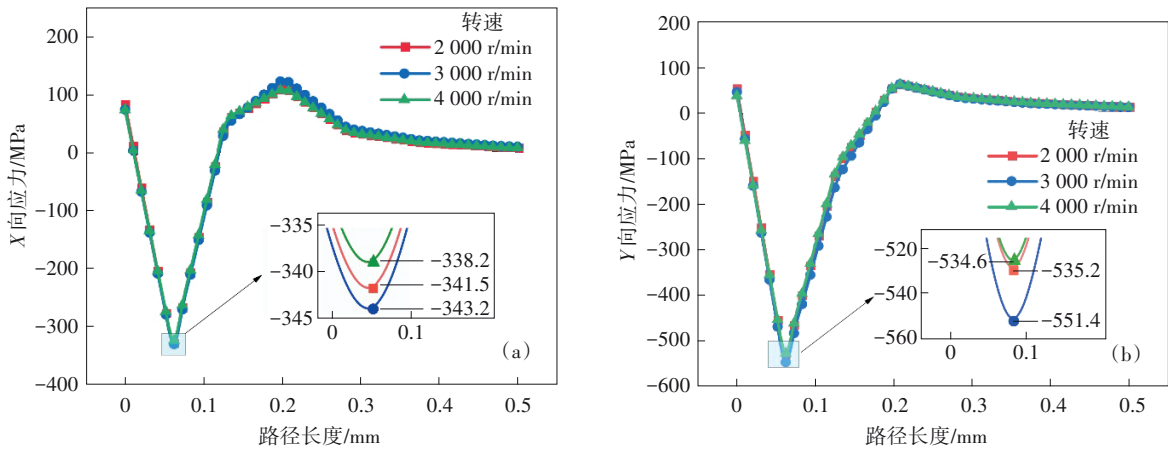


图 7 不同转速下沿深度方向的残余应力分布

Fig. 7 Residual stress distribution along the depth direction at different speeds

(a)—X向应力;(b)—Y向应力.

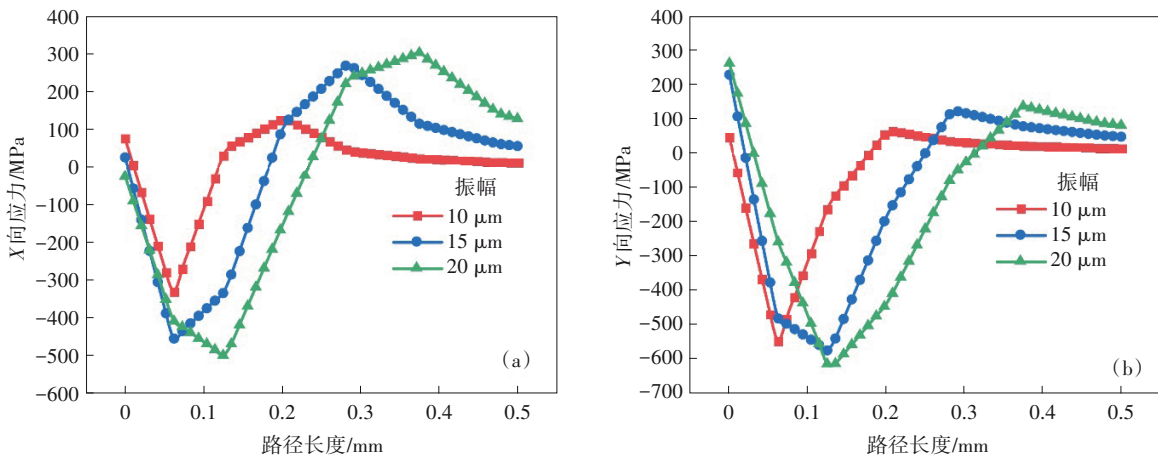


图 8 不同振幅下沿深度方向的残余应力分布

Fig. 8 Residual stress distribution along depth direction at different amplitudes

(a)—X向应力;(b)—Y向应力.

### 2.3.5 锻造温度的影响分析

对 TC4 钛合金而言,其在微观上具有不同的组织类型,而这种组织类型受材料的温度影响,因此在不同温度下的组织形态,将会导致最终力学性能的差异<sup>[11]</sup>.从图 9a 中发现,不同锻造温度下的 X 向最大残余压应力产生的深度相同,在数值上也较为相近,在压应力层的深度对比中,

300  $^{\circ}\text{C}$  和 400  $^{\circ}\text{C}$  形成的压应力层深度比较相近,而 500  $^{\circ}\text{C}$  时的压应力层深度要更大一些.从图 9b 中看出,不同锻造温度在材料内部形成的残余应力存在明显差异,在深度为 62.5  $\mu\text{m}$ ,锻造温度为 300  $^{\circ}\text{C}$  时,应力值最小,400  $^{\circ}\text{C}$  的次之,500  $^{\circ}\text{C}$  的残余应力值最大.不同锻造温度下的 X 向最大残余压应力产生的深度相同,在数值上也较为相近.

而在Y向应力图中看出,不同的锻造温度在材料内部形成的残余应力存在明显差异。

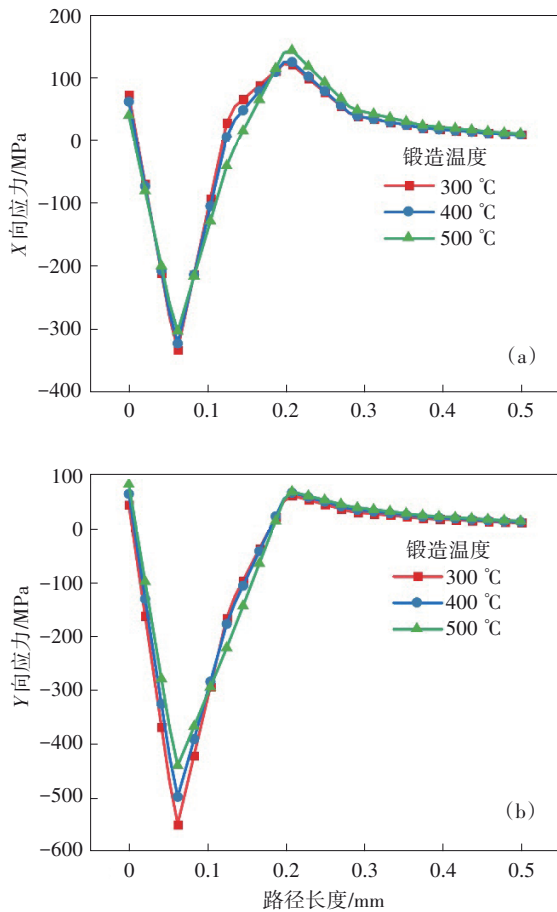


图9 不同锻造温度下沿深度方向的残余应力分布

Fig. 9 Residual stress distribution along depth direction at different forging temperatures  
(a)—X向应力;(b)—Y向应力。

### 3 结 论

1) 激光熔丝增材制造具有“快热快冷”的特点,当热源经过各点时,材料从100 °C加热到温度峰值(约2 300 °C)只用了0.7 s,其中达到熔点1 605 °C用时0.5 s,并以熔融态经过了0.6 s后温度降低到熔点以下。

2) 发现熔覆层内各点的应力变化趋势几乎相同,同时等效应力最大值始终出现在表层,因此对熔覆层表层进行处理是减小等效应力的有效办法,并且沿着材料生长方向的应力相比垂直

于材料生长方向的应力要大许多,沿着熔覆层深处方向的应力也有所降低。

3) 通过实验,明确了微锻头直径、工具头转速、超声振幅以及锻造温度对熔覆层残余应力和表面变形的影响。其中,微锻头直径的增加会减弱加工工艺产生残余压应力的效果;工具头转速对熔覆层的残余应力影响较小;超声振幅对两向残余压应力的大小和深度范围都有显著的影响;锻造温度对沿进给方向的残余应力分布影响明显,温度过高不利于残余应力的降低。

### 参考文献:

- [1] Momono T. Effect of ultrasonic output power on refining the crystal structures of ingots and its experimental simulation [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2005, 21 (1): 47-52.
- [2] Abbott D H, Arcella F G. Laser forming titanium components[J]. *Advanced Materials & Processes*, 1998, 153 (5): 29-30.
- [3] Arcella F G, Froes F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. *Journal of Metals*, 2000, 52(5): 28-30.
- [4] Hofmeister W, Griffith M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing [J]. *Journal of Metals*, 2001, 53(9): 30-34.
- [5] Cai Z Y, Li M Z. Finite element simulation of multi-point sheet forming process based on implicit scheme[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161 (3): 449-455.
- [6] Ye H, Ye K, Guo B G, et al. Effects of combining ultrasonic micro-forging treatment with laser metal wire deposition on microstructural and mechanical properties in Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Characterization*, 2020, 162: 110187.
- [7] Walker P, Malz S, Trudel E, et al. Effects of ultrasonic impact treatment on the stress-controlled fatigue performance of additively manufactured DMLS Ti-6Al-4V alloy[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(22): 4787.
- [8] Yue J F, Dong X T, Guo R, et al. Numerical simulation of equivalent heat source temperature field of asymmetrical fillet root welds[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 42-49.
- [9] Jiao J K, Zou Q, Ye Y Y, et al. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites and TC4 alloy laser assisted joining with the metal surface laser plastic-covered method [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 213: 108738.
- [10] Heigel J C, Michaleris P, Reutzel E W. Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 5: 9-19.
- [11] 王博涵,程礼,崔文斌,等. 锻造工艺对TC4钛合金组织和力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(23): 17-21. (Wang Bo-han, Cheng Li, Cui Wen-bin, et al. Effect of forging process on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50 (23): 17-21.)