激光增材制造 316L 不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究

龚丞[1]，　王丽芳[2]，　朱刚贤[1]*，　宋天麟[1]

([1]苏州大学机电工程学院，江苏 苏州 215021；　[2]苏州大学工程训练中心，江苏 苏州 215021)

摘要　为了探究激光增材制造熔覆层残余应力分布，减小残余应力对零件性能的影响，采用 ANSYS 软件建立了单层熔覆模型，对其温度场和应力场进行了分析，研究了激光增材制造熔覆层截面轴向方向和水平方向残余应力的分布规律。结果表明，残余应力主要体现在轴向方向，且轴向方向的残余应力主要表现为拉应力，随熔覆层深度增加拉应力先增大后降低趋势，其最大拉应力为位置处在距离基材 0.2 mm 处。与现有文献实验结果一致，验证了该模型的正确性及可靠性，为调控或降低残余应力的工艺参数优化选择提供指导。

关键词　激光增材制造；　熔覆层；　残余应力；　数值模拟

中图分类号：TN249　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.14128/j.cnki.al.20183803.402

Numerical Simulation of Residual Stress in 316L Stainless Steel Cladding Layer by Laser Additive Manufacturing

Gong Chen[1]，　Wang Lifang[2]，　Zhu Gangxian[1]，　Song Tianlin[1]

([1]*School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*;
[2]*Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*)

Abstract　In order to study the residual stress distribution of laser additive manufacturing cladding layer and reduce the influence of residual stress on the performance of parts, ANSYS software was adopted to establish a single-layer model, the temperature field and stress fields were analyzed, and the distribution of residual stress in the axial and horizontal directions of the laser additive manufacturing cladding layer was investigated. The results show that the residual stress is mainly in the axial direction, and which is mainly tensile stress. As the depth of the cladding increases, the tensile stress increases first and then decreases. The maximum pull is 0.2 mm from the substrate. It is consistent with the experimental results of the existing literature, and verifies the correctness and reliability of the model, and provides guidance for the optimization and selection of process parameters to control or reduce the residual stress.

Key words　laser additive manufacturing;　cladding layer;　residual stress;　numerical simulation

0　引言

激光增材制造技术是 20 世纪 80 年代初期发展起来的一项先进制造技术[1]，以粉末或丝材为原料，通过高功率激光熔化/快速凝固逐层累加，能直接制造出全致密且力学性能优异的金属零件，在航空航天、汽车船舶及武器装备等领域具有广阔的应用前景[2-3]。激光增材制造本身是一个非稳态、极冷极热的瞬态过程，在制造累加过程中局部热输入就必然会导致不均匀的温度场，这种局部热效应就直接表现为熔池在凝固及随后冷却过程中极易形成残余应力。残余应力作为一种内应力，将直接影响成形件的静载荷强度、疲劳强度、抗应力腐蚀等性能及尺寸

收稿日期：2018-01-11；　收到修改稿日期：2018-06-28

基金项目：国家自然科学基金资助项目(项目编号：51405319)；苏州市科技计划资助项目(项目编号：SYG201643)

作者简介：龚丞(1994－)，男，硕士研究生，主要从事激光快速成形技术方面的研究。E-mail：cgong2016@stu.suda.edu.cn

*通信作者：朱刚贤(1980－)，男，博士，副教授，主要从事激光快速成形及数值模拟等方面的研究。E-mail：gxzhu@suda.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的稳定性，严重时将直接引发裂纹缺陷[4]。所以研究激光增材制造熔覆层残余应力对控制激光增材制造过程的变形及开裂具有重要的意义。

目前对于降低激光增材制造熔覆层残余应力，一直是国内外研究热点。如 Dai K[5]采用数值模拟方法对多材料激光增材制造过程的温度场、瞬态应力场、残余应力及变形进行了分析，得到产生残余应力的主要原因是熔覆材料与基体材料间的热物性参数性能差异导致的。Labudovic M 等[6]则建立了激光增材制造的温度场和残余应力场模型，探究了温度梯度变化对热应力的影响。郝南海等[7]进行激光熔覆温度场和应力场的数值模拟计算，研究了不同工艺下的应力分布规律。石力开等[8]对激光增材制造薄壁件的应力场进行了模拟计算，得出最大拉应力区域位于熔覆层与基材连接面上。以上研究大多是研究最大内应力位置，并没有完整分别给出整个方向的应力分布特征，本文将通过 ANSYS 软件建立单道熔覆层有限元模型，在温度场计算的基础上进行了间接热力耦合的应力场计算，找出零件横截面轴向方向和水平方向残余应力的分布规律，为降低减少残余应力的工艺参数的优化调控提供指导。

1 有限元热分析理论

1.1 传热模型及理论

激光增材制造过程中，金属粉末在激光作用下瞬间受热升温熔化形成熔池，所以激光增材制造温度场是典型的非线性的瞬态热分析。根据热力学第一定律和傅立叶定律，所得的三维瞬态温度场热源控制微分方程[9]为

$$\rho C_\rho \frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\overline{Q} \tag{1}$$

式中，ρ 为材料密度；c 为材料比热；t 为时间；$\overline{Q}$为体生热率；K_x、K_y、K_z为沿 x、y、z 方向导热系数。

为求解热传导方程，还需要设定初始条件和边界条件。

初始条件，当 $t=0$ 时，基材具有均匀的初始温度，即环境温度

$$T(x,y,z,t)\big|_{t=0}=T_0 \tag{2}$$

式中，σ_x、σ_y、σ_z为 x、y、z 方向正应力；τ_{xy}、τ_{yz}、τ_{xz}为切应力。

流动准则是定义材料发生塑性变形时塑性应变分量的大小和方向，其微分方程为[11-12]

边界条件，采用本文提出的热源模型，考虑工件与周围环境的对流换热，包括三种类型的边界条件，可表示为

$$T=T^* \tag{3}$$

$$K_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+K_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+K_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z=q \tag{4}$$

$$K_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+K_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+K_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z=h(T_\alpha-T) \tag{5}$$

式中，q 为热流量；n_x，n_y和 n_z为边界外法线的方向余弦；h 为表面总热系数；T_α 为周围环境温度；T 为零件表面温度。

在金属加热过程中会出现固液相变的问题，也就是在组织发生变化时会吸收或释放潜热，这在一定程度上影响着冷却时间和微观组织。为了考虑相变潜热对计算的影响，ANSYS 中通过焓值和比热容来实现

$$\Delta H(T)=\int_0^T pc(t)\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中，H 为热焓值；ρ 为材料密度；c 为材料比热。

1.2 热弹－塑性有限元模型及理论

激光增材制造过程中容易产生的热应力，将会引起弹－塑性变形，即应力－应变曲线分为弹性和塑性两段，当金属受力超过屈服应力后改变为塑性变形。因此处理这类问题时，需要引入结构单元内的弹塑性本构平衡方程[10]

$$\sum[K]^e\{\mathrm{d}\delta\}=\sum(\{\mathrm{d}F\}^e+\{\mathrm{d}R\}^e) \tag{7}$$

式中，$\{\mathrm{d}F\}^e$为单元节点上的力增量；$\{\mathrm{d}R\}^e$为温度引起的单元初应变等效节点力增量；$\{\mathrm{d}\delta\}^e$ $\{\mathrm{d}\delta\}^e$为节点位移增量；$[K]^e$为单元刚性矩阵。

$$[K]^e=\int[B]^T[D][B]\mathrm{d}V \tag{8}$$

$$\{\mathrm{d}R\}^e=\int[\mathrm{B}]^T\{\mathrm{C}\}\mathrm{d}T\mathrm{d}V \tag{9}$$

式中，$[D]$根据单元处于塑性或弹性区，分别为弹性矩阵$[D]_e$或塑性矩阵$[D]_{ep}$；$\{C\}$为与温度有关的向量。

当材料的变形超出弹性变形范围后材料的行为为塑性变形，塑性理论有三部分组成：屈服准则、流动法则和强化准则。

Von Mises 屈服准则[11]，当等效应力$\bar{\sigma}$大于屈服应力时，零件发生屈服

$$\bar{\sigma}=\sqrt{[(\sigma_x-\sigma_y)+(\sigma_y-\sigma_z)+(\sigma_z-\sigma_x)+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{xz}^2)]/2} \tag{10}$$

$$\mathrm{d}g=\frac{\partial g}{\partial\sigma_{ij}}\mathrm{d}\,\sigma_{ij}+\frac{\partial g}{\partial\varepsilon^p{}_{ij}}\mathrm{d}\,\varepsilon^p{}_{ij}+\frac{\partial g}{\partial k}\mathrm{d}k \tag{11}$$

式中，σ_{ij}为总应力；ε_{ij}^p为总塑性应变；k 为硬化参数。

强化准则，它用于表述屈服面的变化情况，该模

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型为随动硬化模型，屈服面中心在应力空间沿着屈服的方向移动，但屈服面的大小和形状不发生改变，如图 1 所示。

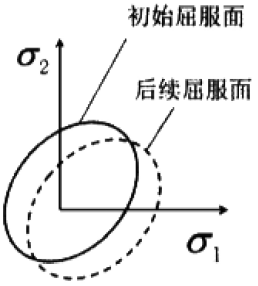


图 1　随动硬化模型

Fig. 1　Kinematic hardening model

2　激光增材制造有限元模型的建立

2.1　几何模型与仿真假设

图 2 为金属零件有限元模型，其中熔覆层尺寸为 2.2 mm×30.0 mm×0.6 mm，基材尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm。熔覆层与基材先采用 Solid70 单元的网格划分进行温度场分析，当进行应力场分析时将 Solid70 单元转换为 Solid45 单元来进行结构分析。在熔覆层及其附近采用小的网格划分，局部放大如图 2(b)所示，在远离熔覆层的区域选择较大的网格划分。熔覆层最小的单元尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×0.2 mm。

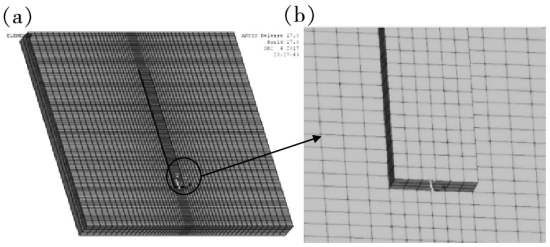


图 2　激光增材制造熔覆层有限元模型及网格划分
(a)整体图　(b)局部放大图

Fig. 2　Laser additive manufacturing cladding layer finite element model and mesh division

激光增材制造过程是一个复杂的工艺过程，其影响因素较多，不能一一考虑。为了简化计算，本文建立的模型遵从如下几个假设：(1)基材与金属粉末各向同性；(2)熔覆层表面与空气的对流换热系数一定；(3)不考虑熔池的流动作用对熔覆层温度场和应力场的影响；(4)不考虑基材与金属粉末的汽化作用；(5)基材与金属粉末的屈服准则采用 VonMises 准则；(6)金属材料的塑性区段满足流动准则和硬化准则；(7)热源及产生的光斑各项始终性能保持不变。

模拟激光增材制造过程中材料的熔覆行为，主要是通过 ANSYS 中的“生死单元法”[13]来实现的。所谓“生死单元方法”中，即是将该单元的刚度(或传导，或其他分析特性)矩阵乘以一个很小的因子，其默认值为 $1.0E^{-6}$，从而不对载荷向量生效(但仍然在单元载荷的列表中出现)。同样，被杀死单元的质量，阻尼，比热和其他类似效果也设为 0 值，被杀死单元的质量和能量将不包括在模型求解结果中，单元的应变在“杀死”的同时也将设为 0。当移动热源的光斑覆盖到该单元位置时激活该单元，以此来模拟金属粉末受热与基材形成熔池的过程。因此，只要根据热源移动的路径逐个激活单元，并加载上与热源相对应的生热率，就可以模拟整个激光增材制造过程。

2.2　热源模型的建立

激光器产生的热流密度呈现正态高斯分布，本文采用移动高斯热源模型与实际情况一致。高斯热源模型表达式为[14]

$$Q=\left(3\eta\frac{P}{\pi r^2}\right)\exp\left(-3\frac{R^2}{r^2}\right) \tag{12}$$

式中，Q 为在光斑内任意点的热流密度；η 为激光利用率；P 为激光功率；r 为激光光斑半径；R 为任意点到热源中心的距离。

激光器在产生瞬时高能热源的同时，随着时间而快速纵向移动，快冷快热。因此热源模型需要定义空间与时间变量。

首先定义位于熔覆层表面的移动热源中心点 (x_0, y_0)

$$\begin{cases} x_0=0 \\ y_0=vt \end{cases} \tag{13}$$

式中，v 为激光移动速度；t 为时间。

计算熔覆层表面上任意一点 (x, y) 到热源中心点的距离

$$R=\sqrt{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2} \tag{14}$$

所以熔覆层表面上任意一点 (x, y) 的热流密度可以表示为

$$\begin{cases} Hflux=Q & R\leqslant r \\ Hflux=0 & R>r \end{cases} \tag{15}$$

2.3　材料的热物性参数

金属材料的热物性参数随着温度的变化往往呈现非线性。本文中基材与粉末均为 316L 不锈钢(00Cr17Ni14Mo2)，通过查阅有关文献[15-17]，运用插值法和外推法，可以获取所需温度范围内材料的非线性热物性参数和力学性能参数，如表 1 所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　316L 不锈钢的热物性参数

Tab. 1　Stainless steel thermophysical properties

Temp /℃	C/ (J/kg·℃)	Kxx /(W/m·℃)	Dens /(kg/m³)	E / Pa	Aplx /(K^{-1})	Prxy	σ_σ /Pa	E / Pa
20	477	12.6	8	$2.21e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.297e^{9}$	$2.21e^{10}$
200	515	16.3	8	$1.96e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.221e^{9}$	$1.96e^{10}$
400	550	19.8	8	$1.86e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.202e^{9}$	$1.86e^{10}$
600	582	22.6	8					
700	611	23.9	8	$1.55e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.099e^{9}$	$1.55e^{10}$
800	640	25.5	8					
900	669	26.4	8					
1 000	675	27.5	8	$0.50e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.089e^{9}$	$0.50e^{10}$
1 200	739	29.7	8	$0.35e^{11}$	$15.3e^{-06}$	0.3	$0.059e^{9}$	$0.35e^{10}$
1 430	760	31.7	8					

3　计算结果与讨论

3.1　温度场分布

激光增材制造中采用的基本工艺参数为激光功率 630 W，光斑直径 2.2 mm，扫描速度 6 mm/s。整个熔覆过程，总耗时为 205 s，其中扫描时间为 5 s，冷却时间为 200 s。任意取 5 s 瞬态的温度场分布如图 3，其对应的剖面温度场如图 4(a)和图 4(b)所示。

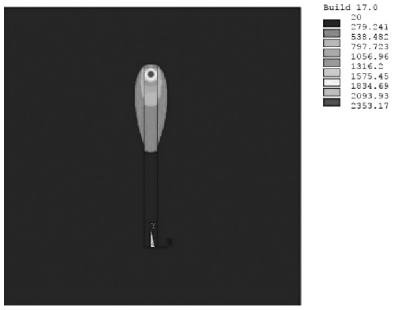


图 3　5 s 瞬态温度场分布图

Fig. 3　5 s transient temperature field distribution

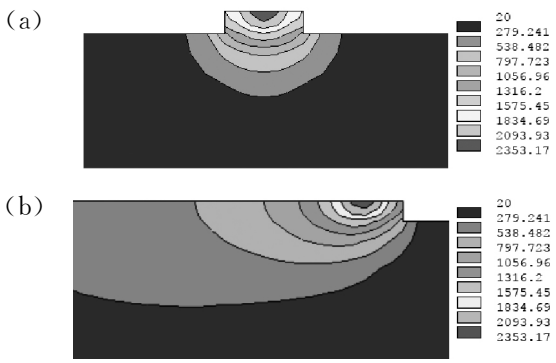


图 4　温度场剖面示意图

(a)沿 X-Z 平面　(b)沿 Y-Z 平面

Fig. 4　Temperature field section diagram

316L 的熔点为 1 398 ℃，从图 3 中可以看出光斑经过的位置基材与金属粉末迅速熔化形成熔池，同时温度向周围传导，熔池前端温度梯度较大，熔池的后端温度梯度较小，越接近尾部温度梯度越小。在熔覆层中间处(y=15 mm)沿 X-Z 平面剖切，在所得截面中选取节点 O(x=0.000 0 mm，z=0.000 0 mm)、A(x=0.000 0 mm，z=0.200 0 mm)、B(x=0.000 0 mm，z=0.400 0 mm)、C(x=0.000 0 mm，z=0.600 0 mm)、D(x=−1.100 0 mm，z=0.000 0 mm)、E(x=−0.733 3 mm，z=0.000 0 mm)、F(x=−0.366 7 mm，z=0.000 0 mm)、G(x=0.366 7 mm，z=0.000 0 mm)、H(x=0.733 3 mm，z=0.000 0 mm)、I(x=1.100 0 mm，z=0.000 0 mm)，并通过节点 C、B、A、O 作路径 path1，通过节点 D、E、F、O、G、H、I 作路径 path2，如图 5 所示。取节点 A(x=0 mm，z=0.02 mm)作随时间变化的温度曲线图，如图 6 所示。

由图 6 可以看出，激光束在 2.733 s 抵达节点 A，此时该点温度迅速攀升，急增至 1 950 ℃，随着光斑移动，0.061 s 后热源中心离开该点，但该点仍受热源边缘辐射，其温度只略微下降至 1 920 ℃，又过了 0.183 s，热源彻底离开该点，该点温度迅速下降。温度梯度是激光增材过程中的重要特征参数，其表示了单位长度上温度变化的快慢程度。如图 7 所示的是激光束抵达该横截面时(t=2.733 s)，path1 和 path2 路径方向的温度梯度值。

由图 7 可见，整体上温度梯度较大区域集中在熔覆层上与基材交界处。路径 path1、path2 的 Z 方向温度梯度比 X、Y 方向温度梯度大，体现了深度方向上沿基板向下传热速度快。而位于熔覆层中(x

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

=0 mm，z=0.1～0.5 mm）的温度梯度（TG_{sum}）较大，这表明该处节点及其所在区域内应力较大，更容易产生裂纹的倾向。

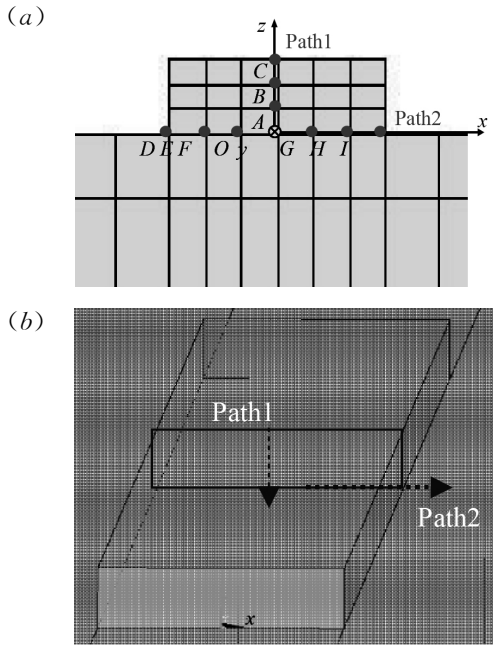


图 5　截面节点、路径位置示意图
(a)节点对应位置　(b)路径 path1、path2
Fig. 5　Section node and path location

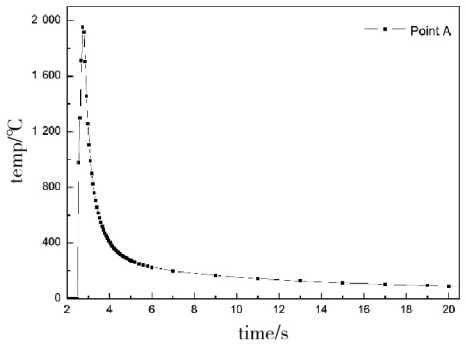
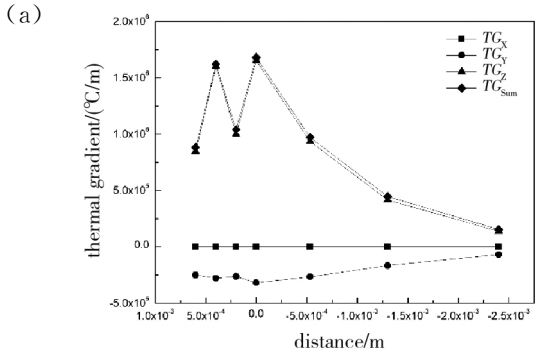


图 6　熔覆层中心节点 A 温度随时间变化曲线图
Fig. 6　The temperature of the center node A of the cladding layer changes with time



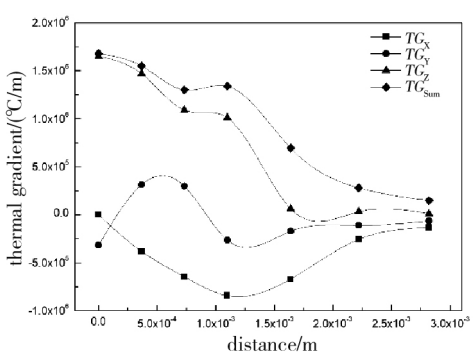
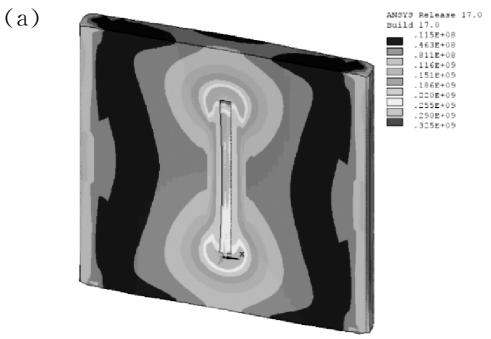


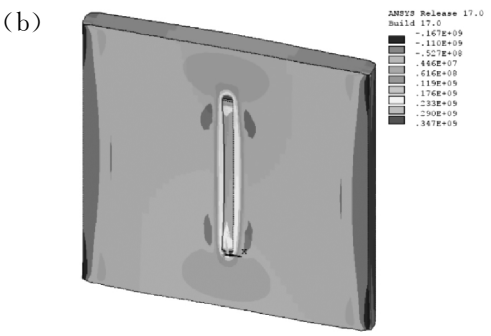
图 7　t=2.733 s 时熔覆层截面上温度梯度值路径
(a)路径 path1　(b)路径 path2
Fig. 7　The path of temperature gradient on the cross section of cladding layer at t=2.733 s

3.2 残余应力分布

为了研究轴向方向及水平方向残余应力分布规律，在温度场计算的基础上进行了间接热力耦合的应力场计算。在进行结构分析时，在基板两侧施加线约束以模拟激光熔覆及冷却过程中的夹板固定。对增材制造零件使用性能产生影响的是其冷却后的残余应力，下面就对冷却 200 s 后的零件残余应力进行分析。图 8 为冷却后 X、Y、Z 三个方向和 Von-Mises 的残余应力分布云图。

从图 8 中可以看出，VonMises 残余应力主要分布在熔覆层首尾两端，呈现哑铃状，熔覆层上最大应力为 290 MPa；Y 方向残余应力分布整体表现是底部到熔覆层表面均为拉应力，熔覆层熔道首尾两端





(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

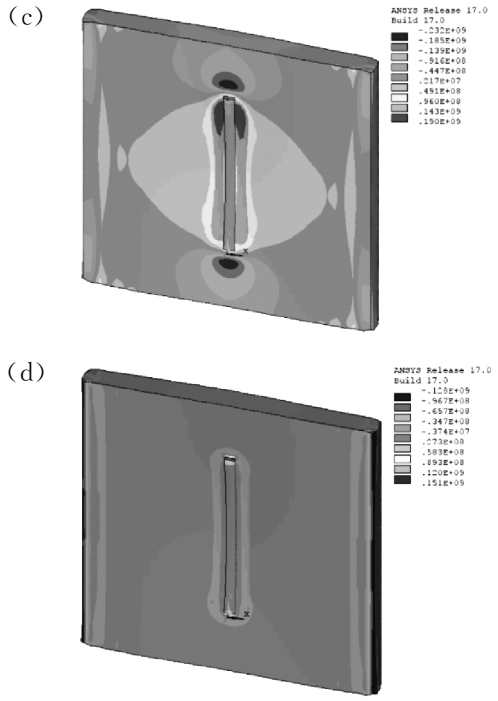


图 8　残余应力分布图

(a)Von Mises　(b)Y **方向**

(c)X **方向**　(d)Z **方向**

Fig. 8　Residual stress distribution

呈现应力集中；X 方向残余拉应力主要集中在熔覆层两侧，而熔道的中间区域从基体底端到熔覆层表面则表现为压应力。Z 方向残余应力数值总体较小，熔覆层的首尾两端分布着拉应力，熔覆层上则是压应力。

图 9(a)和图 9(b)所示为冷却 200 s 后，path1 路径(通过节点 C、B、A、O)和 path2(通过节点 D、E、F、O、G、H、I)对应的 X、Y、Z 方向和 vonMises 应力曲线。

从图 9(a)看出，沿 path1 深度方向，对于 Y 方向来说其残余应力均为拉应力。随熔覆层深度增大，残余应力先增大后降低。且在熔覆层中部位置，即距基材 0.2 mm 处存在最大拉应力为 252 MPa，这与图 7 所示的温度梯度结果吻合，即熔覆层内 z =0.2 mm 处的温度变化较大，容易产生更多的残余应力；X 方向的残余应力则在熔覆层表面呈现拉应力随着深度的增加逐渐变为压应力，在基材部分则重新变回拉应力，但总体数值小于 Y 方向的残余应力，这是因为熔覆层的宽度有限，熔覆过程中沿横向所受的变形阻力相对较小，金属粉末与基材熔覆形成熔池而产生的粘附作用，在充分冷却后熔覆层的拉应力和基体内热影响区的压应力互相平衡的结果；Z 方向的残余应均为轻微的拉应力，其数值比 X、Z 方向应力小很多。

从图 9(b)看出，沿 path2 水平方向，应力场整体呈现左右对称分布，而且在熔覆层与基材的边界位置(x=±1.1 mm)其数值都有所急增，这是因为边界区域比熔覆层内散热更快，造成了内应力不平衡；对于 Y 方向的残余应力来说，其残余拉应力表现为中心最大，向熔覆层左右两侧递减，这表明了熔覆层不断延长的过程中，因为基材温度较低而产生的黏滞效果，激光扫描方向的变形阻力将会增大，与之对应的残余应力也将变大，这也符合图 7 中的温度梯度分布规律；X 方向的残余应力则在熔覆层中心为压应力，在熔道两侧逐渐递增为拉应力，在边缘侧温度梯度较大；而 Z 方向的残余应力则呈现压应力趋势且数值相对较小。

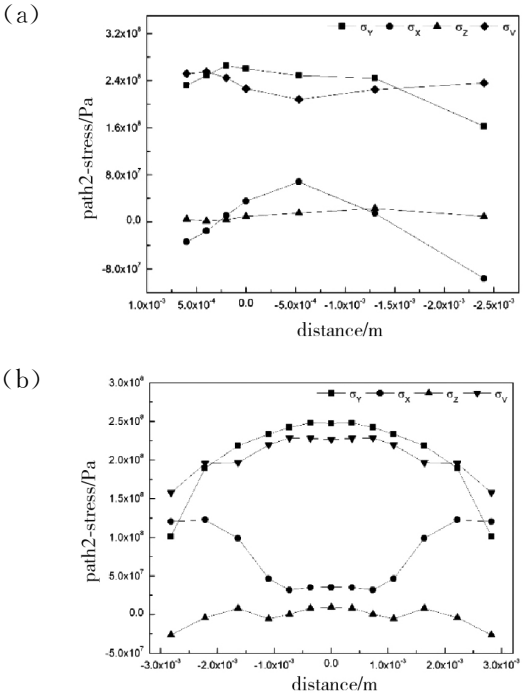


图 9　轴向方向及水平方向路径 σ_x、σ_y、σ_z 和 vonMises 的应力分布曲线

(a)path1　(b)path2

Fig. 9　Stress distribution curves of axial and horizontal path σ_x, σ_y, σ_z and vonMises

通过图 9 可知，Y 方向的拉应力数值明显大于 X、Z 方向的应力，为主要残余应力。也与文献[18]一致，激光增材制造熔覆层的开裂方向近似垂直于光束扫描方向，所以平行扫描方向的残余应力起主导作用。且随熔覆层深度增加呈现先增大后降低趋势，进一步验证了模拟的正确性与合理性。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 结论

本文针对激光增材制造316L熔覆层的温度场和应力场进行了数值分析，得出残余应力主要体现在轴向方向，且轴向方向的残余应力主要表现为拉应力，其最大拉应力为位置处在距离基材0.2 mm处，为调控或降低残余应力的工艺参数优化选择提供指导。

参考文献

[1] 张永忠，石力开. 高性能金属零件激光快速成形技术研究进展[J]. 航空制造技术，2010(8)：47-50.

[2] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术，2013，6(3)：5-7.

[3] DUTTA B，SINGH V，NATU H，et al. Direct metal deposition[J]. Advanced Materials & Processes，2009，167(3)：29-31.

[4] 杨健，陈静，杨海鸥，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.

[5] DAI K，SHAW L. Thermal and stress modeling of multi-material laser processing[J]. Acta Materialia，2001，49(20)：4171-4181.

[6] LABUDOVIC M，HU D，KOVACEVIC R. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping[J]. Journal of Materials Science，2003，38(1)：35-49.

[7] 郝南海，陆伟，左铁钏. 激光熔覆过程热力耦合有限元应力场分析[J]. 中国表面工程，2004，17(6)：20-23.

[8] 石力开，高士友，席明哲，等. 金属直薄壁件激光直接沉积过程的有限元模拟 II. 沉积过程中热应力场的模拟[J]. 金属学报，2006，42(5)：449-453.

[9] 占焕校，王勇，韩涛，等. 42CrMo钢表面单道激光宽带处理后熔凝层的残余应力[J]. 中国激光，2008，35(4)：625-630.

[10] 康士廷，胡仁喜. ANSYS14.0热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京：机械工业出版社，2013.

[11] 原思宇. 特殊钢棒线材热连轧过程的有限元模拟与分析[D]. 大连：大连理工大学，2007.

[12] 彭善德. 钛合金激光搭接焊及数值模拟[D]. 武汉：华中科技大学，2006.

[13] 张国智，胡仁喜，陈继刚，等. ANSYS 10.0热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[14] 刘顺洪，万鹏腾，胡良果. 激光焊温度场研究进展和展望[J]. 中国机械工程，2001，12(40)：478-481.

[15] 谭真，郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京：冶金工业出版社，1994.

[16] VENNEKENS J，WITTOCX J，MARIËN M，et al. Finite element predictions of temperature distributions in a multipass welded piping branch junction[J]. Journal of Pressure Vessel Technology，2007，127(1)：979-987.

[17] 顾建强，骆芳，姚建华. 激光熔覆过程残余应力的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展，2010，47(10)：81-86.

[18] 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.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net