离焦量对中空环形激光熔覆层温度场及应力场的影响

李广琪[1] 朱刚贤[1] 王丽芳[2] 赵 亮 石世宏[1]
1.苏州大学机电工程学院,苏州,215021
2.苏州大学工程训练中心,苏州,215021

摘要:为减小光内送粉激光熔覆层的残余应力,研究了不同离焦量对熔覆层温度场和应力场分布的影响规律。采用数值模拟与实验验证相结合的方法分别对离焦量为0、-1 mm、-2 mm、-3 mm、-4 mm的温度场及应力场进行了研究。结果表明:采用负离焦量的温度分布更为均匀,熔覆层内的残余应力更小;离焦量增大时,激光扫描方向上的残余应力随熔覆层深度增大逐渐减小。

关键词:中空环形激光;离焦量;熔覆层;温度场;应力场
中图分类号:TG174.4
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2021.05.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Influence of Defocusing Amount on Temperature and Stress Field of Hollow-ring Laser Cladding Layer

LI Guangqi[1] ZHU Gangxian[1] WANG Lifang[2] ZHAO Liang[1] SHI Shihong[1]
1.College of Mechanical and Electrical Engineering,Soochow University,Suzhou,215021
2.Engineering Training Center,Soochow University,Suzhou,215021

Abstract: To reduce residual stress of laser cladding layer based on inside-beem powder feeding laser cladding, the work aims to study influence of different defocusing amounts on temperature and stress field distribution of cladding layer. Numerical simulation and experimental verification were carried out to investigate temperature and stress distribution when defocusing amount was as 0, -1 mm, -2 mm, -3 mm, -4 mm. The results show that the temperature distribution is more uniform and the residual stress is lower with negative defocusing amounts. As defocusing amount increases, the residual stress along the laser scanning direction gradually decreases with the increases of cladding layer depth.

Key words: hollow-ring laser; defocusing amount; layer cladding; temperature field; stress field

0 引言

激光熔覆具有冷却快、涂层稀释率低、变形小、粉末选择几乎没有限制、熔覆层厚度可控范围大和工艺过程易于实现自动化等优点,并可显著改善基体表面耐磨、耐蚀、耐热及抗氧化等特性而得到广泛应用[1]。激光熔覆过程中,局部热输入必然导致不均匀的温度场,产生大的温度梯度,且冷却后极易在熔覆层内部产生残余应力,而高残余应力易导致零件变形及裂纹,影响成形件的力学性能[2],因此如何解决熔覆层残余应力问题一直是激光熔覆领域的研究热点。目前对激光熔覆层残余应力的研究大多基于高斯热源下的数值模拟。YAN等[3]探究了工艺参数对激光熔覆316L不锈钢熔覆层变形的影响,发现降低送粉速率与激光功率可以减小熔覆层残余应力及变形。ZHU等[4]探究了激光离焦量与粉末聚焦特性对激光直接金属沉积表面质量的影响,发现粉末聚焦点位于基材下方且激光聚焦点在基材上方时的成形件表面质量较好。WANG等[5]通过有限元法研究了激光熔覆TI-6Al-4V金属粉末过程中的工艺参数对热行为的影响,发现采用低激光功率、高扫描速度会导致零件产生裂纹倾向。李亚敏等[6]针对45钢表面激光熔覆Inconel718合金进行了数值模拟,结果表明随着离焦量的增大,熔池最高温度降低,稀释率变小,成形效果更优。

上述研究都是基于高斯热源熔覆方式,通过优化工艺参数来调控熔覆层内应力、减小基材变形。高斯热源能量集中在光斑中心,远离光斑中心的边缘部分能量较低,温度梯度较大,容易引发大的内应力,不利于形成平整的熔覆层,降低了成形件的表面精度和力学性能。为消除高斯热源熔

收稿日期:2020-01-20
基金项目:国家重点研发计划(2016YFB1100300)

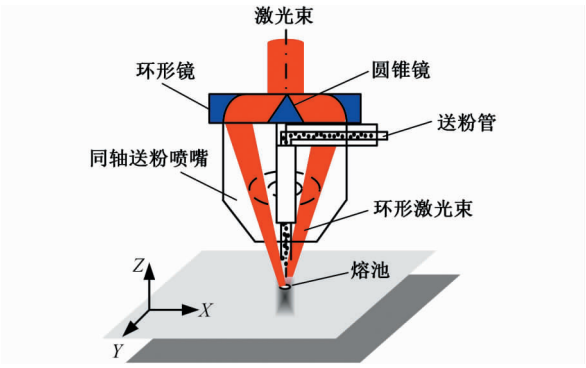
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

覆时产生的不平整，基于光内送粉激光熔覆工艺，利用光内送粉喷头装置消除高斯实心光斑熔覆时造成的熔道边缘塌陷现象，弥补高斯热源下冶金结合性差的不足[7]，但熔覆层温度与应力在这种新型熔覆工艺下的分布规律尚缺乏研究。离焦量作为激光熔覆的重要工艺参数之一，直接决定进入熔池的激光能量及光斑大小，对熔覆层成形质量有显著影响。基于此，笔者利用数值模拟，对不同离焦量下的单道熔覆层温度场、应力场进行了研究并对熔覆层深度方向上的残余应力进行实验验证，以扫描方向残余应力为参考指标，获得了最佳离焦量。

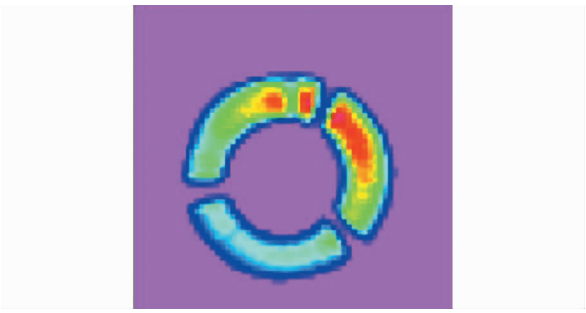
1 中空环形激光熔覆有限元模型

1.1 中空环形光斑产生机理

光内送粉原理如图 1a 所示，平行激光束通过双环形-锥形镜进行聚焦形成中空环形光斑，高能量集中区域从中心变为外缘，能量分布呈马鞍形，如图 1b 所示。送粉管包裹在激光束中，粉末可以垂直落入熔池避免发散飞溅，实现粉斑与光斑同心、粉末流与激光束同轴，有利于提高粉末利用率。



(a)环形光光内送粉原理



(b)环形激光光斑

图 1 中空环形光光内送粉激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic diagram of hollow ring laser cladding with powder feeding

1.2 激光能量数学模型

能量在环形区域内呈“类高斯”分布，负离焦(指的是熔覆过程中，光斑作用平面位于焦点位置之上)区域内的中空激光能量密度函数为[8]

$$q_z(x,y)=\frac{2\eta P}{\pi R_0(R_0+2z\cot\varphi)}\cdot \exp\left(-\frac{2[\sqrt{x^2+y^2}-(z\cot\varphi+\xi R_0)]^2}{R_0^2}\right) \quad (1)$$

式中，$q_z(x,y)$ 为激光光斑在扫描过程中点(x,y)处的能量密度；P 为激光器功率；η 为激光吸收效率；R_0 为激光在焦点位置处的外径；z 为离焦量；φ 为中空激光束与水平面的夹角；ξ 为能量峰位置系数，考虑到光头结构，$\xi=0.5$；R_A 为环形光斑内径，$R_A=z\cot\varphi$；R_B 为环形光斑外径，$R_B=R_A+R_0$。

由式(1)可知，在函数法加载过程中，只需要确定离焦量，即可确定点(x,y)处所加载的能量。$z=0$ 时，中空激光能量满足高斯分布。

2 基本假设

激光熔覆过程是一个急冷急热的瞬态过程，熔池的产生与凝固都在极短的时间内完成，实际的熔覆层尺寸较小，为简化模型、方便计算，对模型做以下假设：① 熔覆层与基体材料都近似为一个规则的长方体，各截面为规则的长方形；② 基体材料与熔覆层材料都具有各向同性[9]；③ 熔覆过程不会引起材料的汽化；④ 材料密度不随温度变化；⑤ 不考虑熔池的流动作用对熔覆层的影响[10]。

2.1 材料热物理性能

查阅文献[11-13]并利用插值法获得 316L 不锈钢(密度 $\rho=8\times10^3$ kg/m^3，泊松比 $\nu=0.3$，热膨胀系数 $\alpha_1=15.3\times10^{-6}$ K^{-1})的热物理参数(温度 T、比热容 c、热导率 λ)和力学性能参量(弹性模量 E、屈服应力 σ、材料的切线模量 E')，如表 1、表 2 所示。

表 1 316L 不锈钢的热物理参数

Tab.1 Thermo-physical parameters of 316L stainless steel

T(K)	293	473	673	873	973
c(J/(kg·K))	477	515	550	582	611
λ(W/(m·K))	12.6	16.3	19.8	22.6	23.9
T(K)	1073	1173	1273	1473	1703
c(J/(kg·K))	640	669	675	739	760
λ(W/(m·K))	25.5	26.4	27.5	29.7	31.7

表 2 316L 不锈钢的力学参数

Tab.2 Mechanical properties parameters of 316L stainless steel

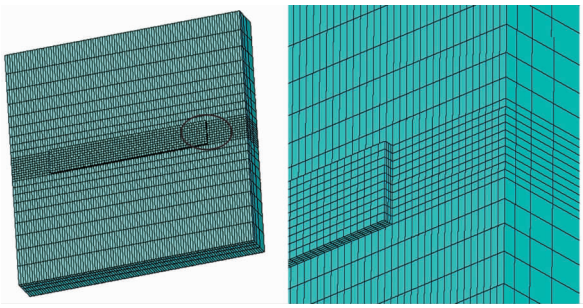
T(K)	293	473	673	973	1273	1473
E(GPa)	221	196	186	155	50	35
σ(MPa)	297	221	202	99	89	59
E'(GPa)	22.1	19.6	18.6	15.5	5.0	3.5

2.2 几何建模与网格划分

基板及熔覆层物理模型如图 2 所示，其中，基板尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm，熔覆层长 30 mm、高 0.4 mm，离焦量为 0、−1 mm、

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

−2 mm、−3 mm、−4 mm 时，熔覆层对应宽度分别为 1.0 mm、1.6 mm、2.2 mm、2.7 mm、3.2 mm。熔覆层单元为六面体，单元尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×0.1 mm。熔覆层及临近区域网格划分较细，远离熔覆层区域网格划分较粗。



(a)有限元模型整体图　　(b)熔覆层局部放大图

图 2　几何建模与网格划分

Fig.2　Geometric modeling and meshing

2.3　定义路径

为探究不同方向的中空环形激光熔覆不同离焦量时的温度场与应力场的分布规律，以熔覆层表层中心节点 O 为起点，建立图 3 所示的 3 条路径，其中，路径 1 沿熔覆层深度方向，路径 2 沿熔覆层宽度方向，路径 3 沿激光扫描方向。

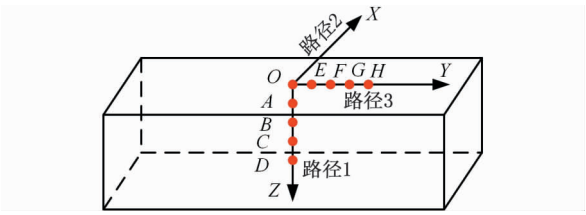


图 3　熔覆层上路径示意图

Fig.3　Schematic diagram of path in cladding layer

3　计算结果及分析

3.1　温度场计算结果

3.1.1　温度场分布云图

通过计算可知，熔覆层激光扫描时间为 4.85 s，扫描完成 1000 s 后，熔覆层冷却至室温。图 4 是不同离焦量的激光扫描至 2.5 s 时的温度分布图和光斑中心横截面等温线图。

由图 4 可知，离焦量为 0 时，激光光斑形状为实心圆，能量呈高斯函数分布，集中在焦点，因此光斑中心的温度较高，达到 2809 ℃，边缘温度较低，横截面温度分布呈现 V 形，接合面温度达到 1700 ℃，这表明熔覆层与基材冶金接合效果较好；但中心与边缘温差较大，易引起高的热应力。离焦量为−1 mm 时，光斑形状接近实心圆，最高温度达到 3312 ℃，这是因为光斑接近焦点，能量较为集中，且熔池在短时间内经过两次高温加热，

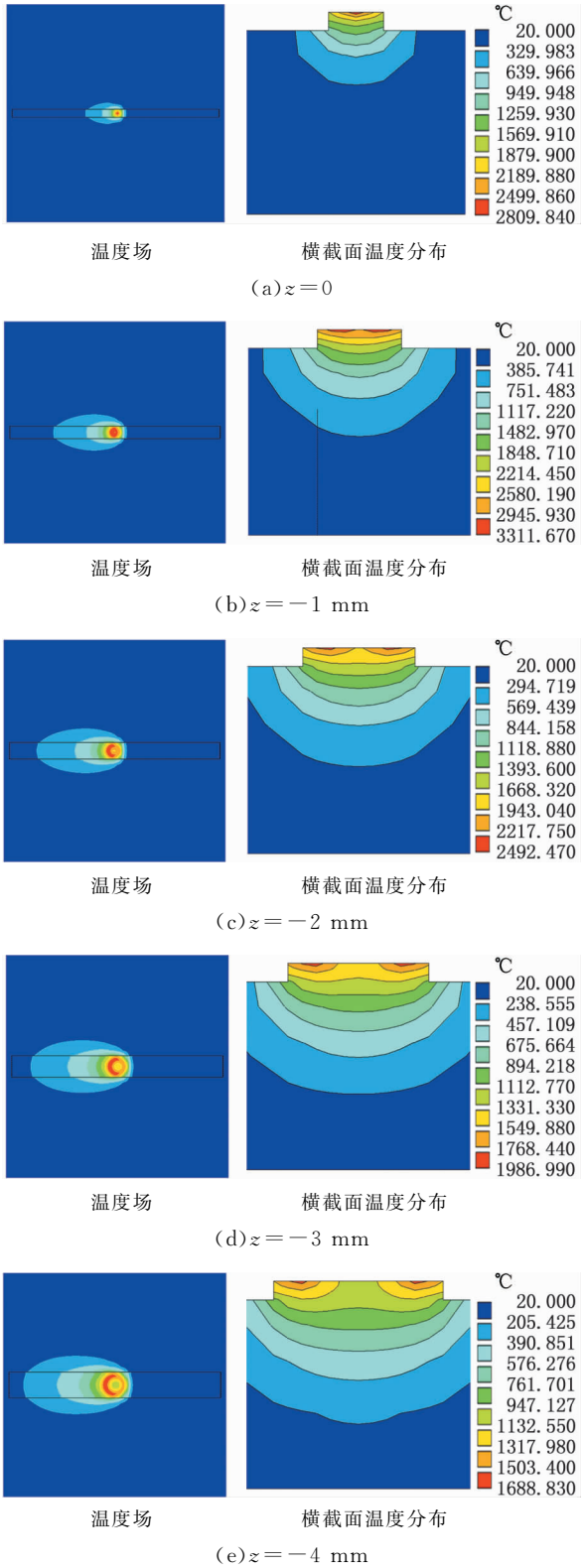


图 4　2.5 s 时的温度场与横截面等温线分布

Fig.4　Temperature field and cross-sectional isotherm distribution at 2.5 s

因此温度较高。横截面高温区域呈对称的 W 形，两侧温度高、中间区域温度低，热影响区较大，熔覆层与基材接合面处温度达到 2000 ℃，冶金结合效果较好。随着离焦量增大，光斑直径增大，中空区域所占比增大，根据激光能量密度计算公式

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$H=P/(Dv)$(其中，H 为激光能量密度，P 为激光功率，D 为光斑直径，v 为激光扫描速度)可知，在激光功率和扫描速度保持恒定的前提下，光斑直径越大，激光能量密度越低，因此峰值温度逐渐降低，如图 5 所示。离焦量达到 −4 mm 时，横截面熔覆层表层高温区域 W 形分布逐渐消失，热影响区缩小，高温区域集中在熔覆层边缘，中间温度较低且低于材料熔点，在熔覆过程中容易出现熔道欠熔，冶金结合效果变差。

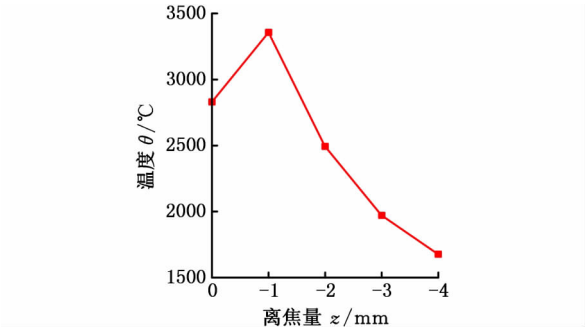
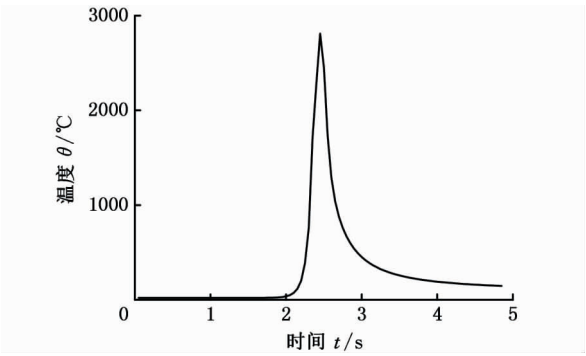


图 5　不同离焦量下的温度峰值

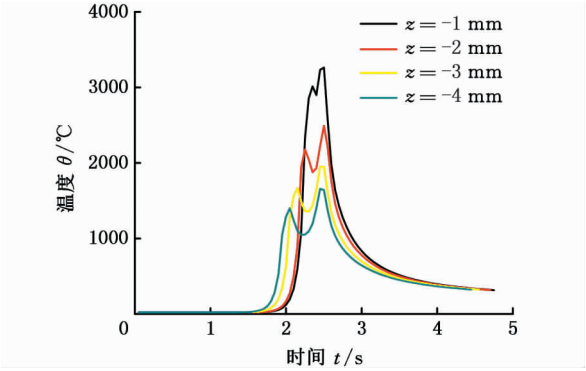
Fig.5　Temperature peaks at different defocusing amounts

3.1.2　节点温度-时间曲线

图 6 所示为熔覆层上表面中心 O 的节点温度-时间曲线，可以看出，不同离焦量时节点 O 的温度变化曲线趋势一致，即在未扫描到该节点位置时，温度较低，为室温；激光扫描到该节点时，温度快速上升，迅速达到温度峰值；激光离开节点后，温度迅速下降，这表明激光扫描是一个急热急冷的过程。离焦量为 0 时，光斑为圆形实心光斑，节点在整个扫描过程中经历了一次温度峰值，然后温度迅速降低；采用负离焦量时，节点在整个扫描过程经历了两次温度峰值，且第二次温度峰值大于第一次温度峰值。这是因为在扫描过程中，光斑后半环区域能量较高，熔池边缘区域的热量可以得到有效补偿。随着离焦量的增大，温度峰值逐渐减小，无光区域面积增大，两个温度峰值之间的时间间隔加大。



(a)离焦量为 0



(b)离焦量为负值

图 6　不同离焦量下熔覆层节点 *O* 的温度曲线

Fig.6　Temperature curves of node *O* on cladding layer under different defocusing amounts

3.1.3　温度梯度分布

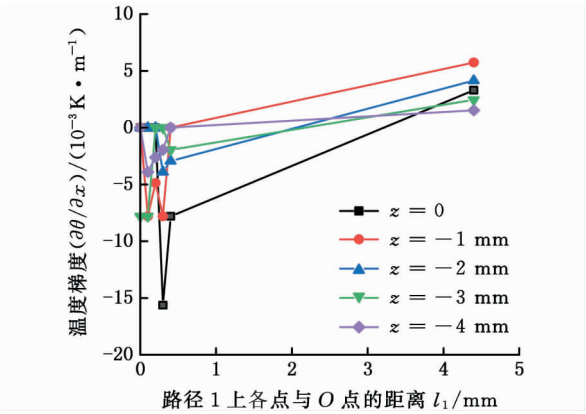
图 7 所示为激光经过熔覆层上表面 O 点时，不同离焦量下路径 1 上各个方向的温度梯度。由图 7a 可知，X 方向、Y 方向上的温度梯度较小，不同离焦量下的 X 方向温度梯度在 0 附近，温度梯度较小。由图 7b 可知，Y 方向的温度梯度随熔覆层深度增大而减小，在熔覆层与基体接合面处达到最小；随着深度继续增大，Y 方向的温度梯度线性增大；随着离焦量的增大，Y 方向的温度梯度逐渐减小。由图 7c 可知，Z 方向的温度梯度明显大于 X 方向、Y 方向的温度梯度，这表明熔池的热量散失主要沿高度方向。离焦量为 0 时，Z 方向温度梯度最大值位于熔覆层表层，为 5.6×10^6 K/m。随着熔覆层深度的增大，温度梯度逐渐减小。离焦量为负值时，光斑形状为环形，能量集中在边缘，激光热作用的热积聚效应使光斑中心区域能量保持较高，能量分布较为均匀，因此温度梯度较小；Z 方向温度梯度随着熔覆层深度增大而增大，在熔覆层与基体接合面处达到最大值。这是因为在接合面处，基材导热能力较强，熔池冷却速率加快。接合面处温度梯度过大，容易导致应力集中，产生裂纹。随着离焦量的增大，温度梯度逐渐减小，这是因为离焦量增大导致中空无光区域所占比增大，热传导作用减弱，单位长度上的温差减小，温度梯度下降。

3.2　应力场计算结果

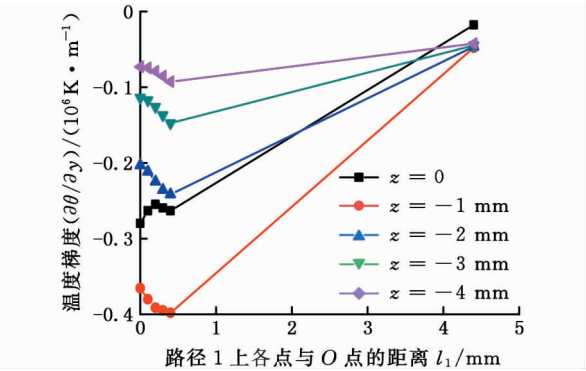
3.2.1　应力分布云图

图 8 所示为冷却 1000 s 后的 X 方向与 Y 方向的残余应力分布，可知不同离焦量时，X 方向残余应力都呈对称分布，熔覆层残余应力为压应力及轻微的拉应力，这是因为熔覆层宽度有限，在冷却收缩过程中受到的变形阻力较小，因此拉应力较小，最大残余拉应力出现在熔覆层与基体交界处两侧；Y 方向残余的拉应力主要集中在熔覆

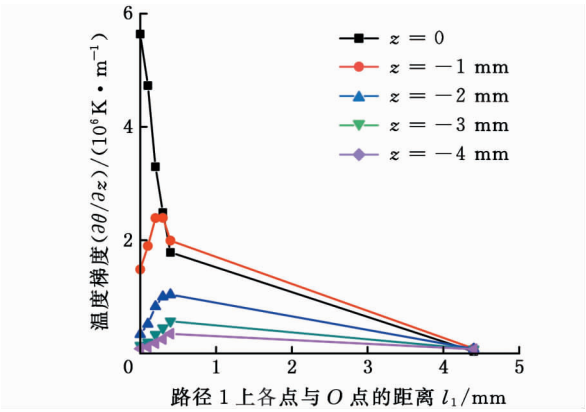
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)X 方向温度梯度分布



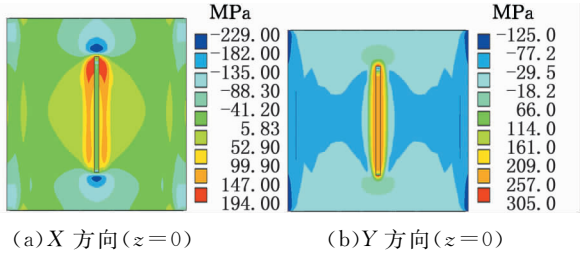
(b)Y 方向温度梯度分布



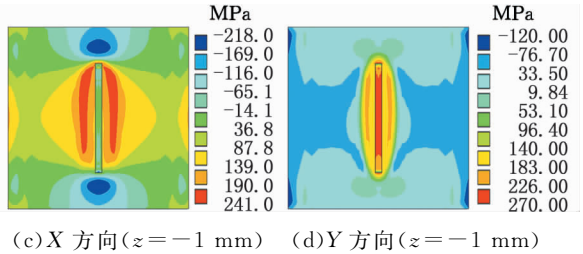
(c)Z 方向温度梯度分布

图 7　光斑中心位于 O 点时路径 1 的温度梯度分布

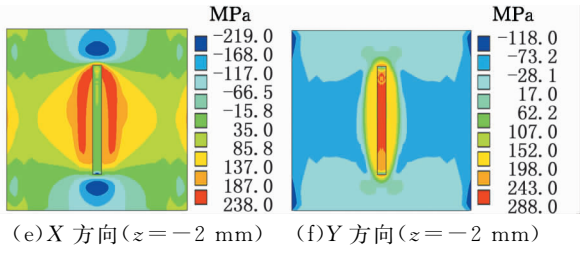
Fig.7　Temperature gradient distribution on path1 under different defocusing amounts when the spot center is at O



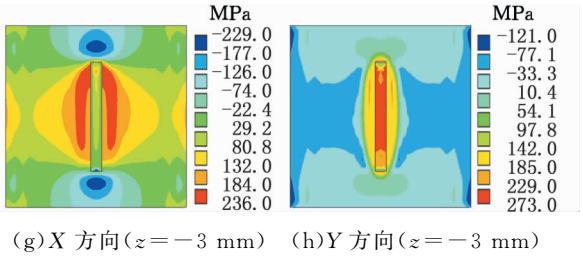
(a)X 方向(z=0)　(b)Y 方向(z=0)



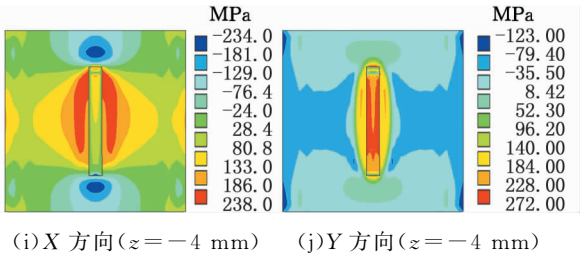
(c)X 方向(z=−1 mm)　(d)Y 方向(z=−1 mm)



(e)X 方向(z=−2 mm)　(f)Y 方向(z=−2 mm)



(g)X 方向(z=−3 mm)　(h)Y 方向(z=−3 mm)



(i)X 方向(z=−4 mm)　(j)Y 方向(z=−4 mm)

图 8　不同离焦量的残余应力分布

Fig.8　Residual stress distribution under different defocusing amounts

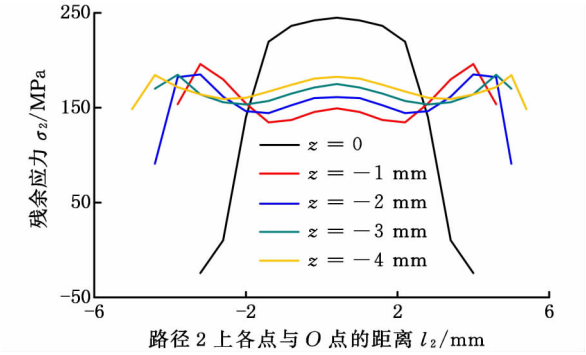
层且应力较大，最大值达到 270 MPa，这是因为激光扫描方向的长度较大，冷却收缩过程中受到已凝固熔覆区的约束阻力较大，因此熔覆层上 Y 方向的拉应力(226～305 MPa)远大于 X 方向的拉应力(5.83～133 MPa)。

3.2.2　不同路径下的应力分布规律

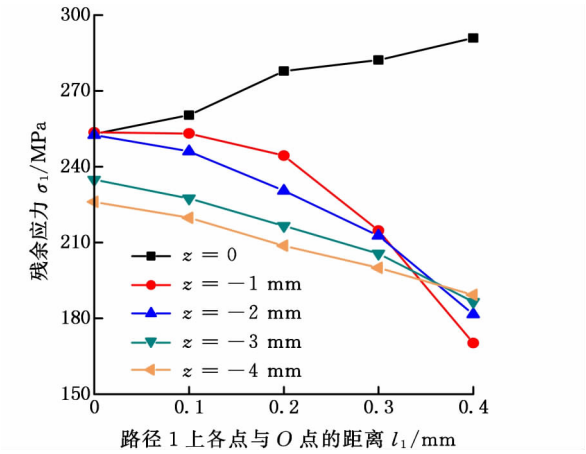
由上述分析可知沿激光扫描方向的残余应力为最大应力，这与文献[14]的结论一致。本文主要探究激光扫描方向(Y 方向)的残余应力分布，以冷却 1000 s 后熔覆层中心位置截面为研究对象。图 9a 所示为残余应力沿路径 2 的分布，图 9b 所示为残余应力沿路径 1 的分布。

由图 9a 可知，离焦量不同时，残余应力在路径 2 上的分布规律大致一致，关于熔覆区域中心呈对称分布。离焦量为 0 时，熔覆层热影响区应力较小，熔覆区域残余应力较大，应力由压应力迅速转变为拉应力，并呈抛物线分布，熔覆区域中心的残余应力达到 245 MPa。离焦量为负值时，整个路径上的残余应力都为拉应力。残余应力由基材到熔覆层先增大、后减小、再增大，最大残余应力出现在基材区域，达到 196 MPa；熔覆区域残余应力分布较为均匀，最大值为 182 MPa。随着离

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)路径 2 上的残余应力分布



(b)路径 1 上的残余应力分布

图 9　不同路径上的 Y 方向残余应力分布

Fig.9　Residual stress distribution in Y direction of different paths

焦量的增大，熔覆层区域内的应力逐渐增大，这是因为离焦量增大时，光斑直径增大，光斑中心到两侧高能量区域的距离增大，导致单位长度内的温差增大。凝固收缩时，较大温度梯度容易产生应力集中，因此残余应力逐渐增大。通过对比可知，离焦量为负值时，应力分布更加均匀，残余应力梯度变化更为平缓，熔覆层残余应力较离焦量为 0 时明显减小，有利于获得成形质量良好的零件。

由图 9b 可知，当离焦量为 0 时，随着熔覆层深度增大，Y 方向残余应力逐渐增大，并在熔覆层与基体接合面处达到最大值 290 MPa；离焦量为负值时，Y 方向残余应力随深度增大逐渐减小，在熔覆层表面有最大值，且随离焦量增大，残余拉应力逐渐减小，主要是因为离焦量的增大扩大了中空无光区域，导致中空区域能量下降，热传导能力减弱，因此深度方向上单位长度内的温差较小，不易形成应力集中，这与图 6c 所示的温度梯度随离焦量增大而减小的规律一致，证明了结论的正确性。离焦量为负值时的残余应力最大值为 253 MPa，小于离焦量为 0 时的应力，再次证实了中空环形激光光斑能量分布的合理性。

图 10 所示为不同离焦量下路径 1 上 Y 方向残余应力最大值的分布。由图 10 可知，随着离焦量增大，Y 方向残余应力最大值减小。离焦量为 −4 mm 时，最大应力为 226 MPa，比离焦量为 0 的最大应力 290 MPa 减小了 22.1%，可见增大离焦量可以有效减小残余应力。

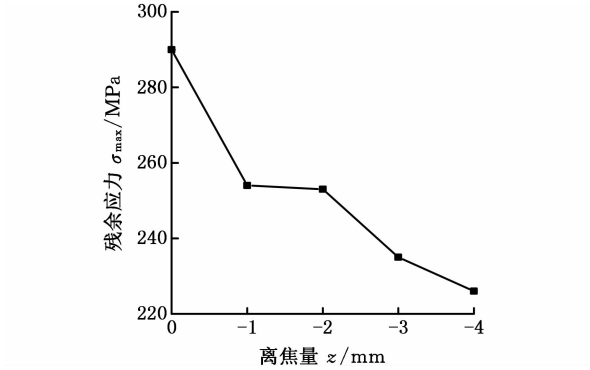


图 10　路径 1 上的残余应力最大值

Fig.10　Maximum residual stress along path 1

4　实验测定残余应力分布

4.1　实验材料及方法

本文中的基材与熔覆层材料均为 316L 不锈钢，实验采用 2KW-IPG 光纤激光器、KUKA 机器人系统控制单元，送粉载气和保护气均选用氮气。单道激光熔覆实验参数的如表 3 所示。采用光内同轴送粉可调离焦喷头，分别将离焦量调至 0、−1 mm、−2 mm、−3 mm、−4 mm，分析不同离焦量下的熔覆层应力分布规律。

表 3　激光熔覆工艺参数

Tab.3　Process parameters of laser cladding

激光功率(W)	离焦量(mm)	扫描速度(mm/s)
500	0、−1、−2、−3、−4	6
激光利用率(%)	能量峰位置因数	激光束夹角(°)
30	0.5	75

4.2　实验结果及分析

不同离焦量的激光熔覆试样如图 11 所示。采用 X 射线应力测定仪 X-350A 对试样进行测定。为获得路径 1 的 Y 方向残余应力，采用饱和 NH_4Cl 溶液对试样进行逐层剥离电解抛光，逐层测量熔覆层残余应力，结果如图 9b 所示，仿真结果如图 12 所示。

由图 9b 实验测定结果可知，整个熔覆层区域残余应力均为拉应力，残余应力实验结果与仿真结果的分布趋势一致，验证了数值模拟的正确性，同时也看出实验结果与仿真结果存在一些差异。一方面是因为有限元模型网格由于计算条件的限制，不能划分太细，导致计算产生误差；另一方面

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

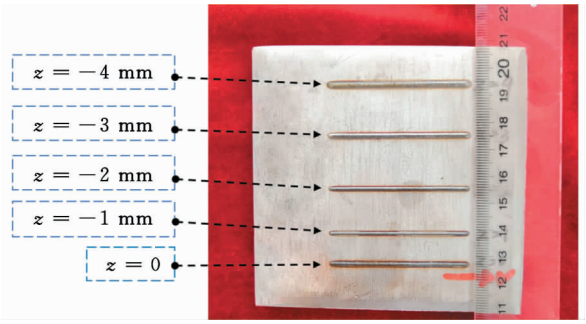


图 11　不同离焦量下单道熔覆实验

Fig.11　Single-track cladding experiment at different defocusing amount

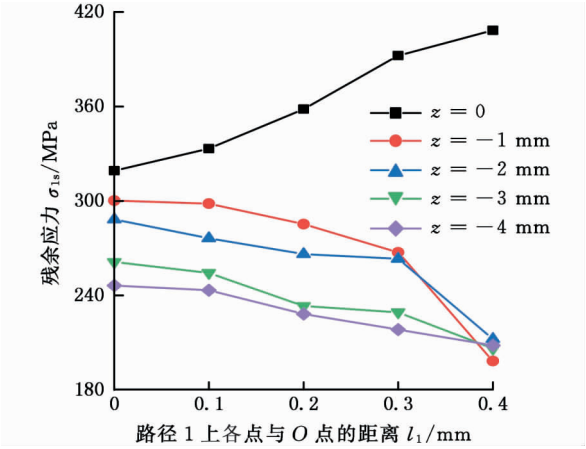


图 12　*Y* 方向残余应力的实验测量结果

Fig.12　Experimental measurement results of residual stress in *Y* direction

样件在实验剥离过程中有测量误差，因此仿真结果与实验结果存在差异。

5　结论

(1)中空环形激光熔覆层温度峰值随离焦量增大而逐渐减小，离焦量为负值时，熔覆层温度分布更均匀，温度梯度较小。

(2)离焦量为 0 时，熔覆层 *Y* 方向的残余应力随着深度增大而增大，在熔覆层与基材接合面处有最大值 290 MPa。离焦量为负值时，残余应力随深度增大而减小，在熔覆层上表面有最大值；随离焦量的增大，残余应力逐渐减小。

(3)离焦量为负值时，熔覆层 *Y* 方向残余应力最大值较 0 离焦量时均有减小，由此可见，采用负离焦量可显著减小熔覆层内的残余拉应力，离焦量为−4 mm 时的最大残余拉应力比离焦量为 0 时的最大残余拉应力减小 22.1%，更利于获得力学性能良好的成形件。

参考文献：

[1]　WENG F, CHEN C Z, YU H J. Research Status of Laser Cladding on Titanium and Its Alloys: a Review[J]. Materials & Design, 2014, 58:412-425.

[2]　KUSINSKI J, KAC S, KOPIA A, et al.Laser Modification of the Materials Surface Layer-a Review Paper [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences—Technical Sciences, 2012, 60(4):711-728.

[3]　YAN Zhaorui, LIU Weiwei, TANG Zijue, et al. Effect of Thermal Characteristics on Distortion in Laser Cladding of AISI 316L[J]. Journal of Manufacturing Process, 2019, 44:39-318.

[4]　ZHU Gangxian, LI Dichen, ZHANG Anfeng, et al. The Influence of Laser and Powder Defocusing Characteristics on the Surface Quality in Laser Direct Metal Deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2):349-356.

[5]　WANG Tao, QIN Lingchao, LIUI Jiaqi. Parameter Analysis of Thermal Behavior during Laser Melting of Ti-6Al-4V Alloy Powder[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5/8):2875-2885.

[6]　李亚敏，咬登治，范福杰. 激光熔覆 718 合金工艺参数优化的数值模拟研究[J]. 应用激光，2018，38(6):920-926.
LI Yamin, YAO Dengzhi, FAN Fujie. Numerical Simulation Study on Process Parameters Optimization of 718 Alloy Induced by Laser Cladding[J]. Applied Laser, 2018, 38(6):920-926.

[7]　田美玲. 光内送粉多道搭接多层堆积实体成形及温度场模拟研究[D]. 苏州：苏州大学，2014.
TIAN Meiling. Temperature Field Simulation of Multi-channel and Multi-layer Stacking and Research of Solid Parts Forming Process Based on Coaxial Inside-beam Powder Feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2014.

[8]　史建军. 激光内悬垂结构熔覆成形机理研究[D]. 苏州：苏州大学，2019.
SHI Jianjun. Mechanism Study of Non-supportive Overhang Part by Hollow Laser Cladding Forming [D]. Suzhou: Soochow University, 2019.

[9]　余淑荣，樊丁，熊进辉，等. 铝合金不等厚板的 CO_2 激光拼焊及数值模拟[J]. 中国激光，2008(11):1795-1800.
YU Shurong, FAN Ding, XIONG Jinhui, et al. CO_2 Laser Welding of Tailored Aluminum Alloy Sheets with Different Thickness and Numerical Simulation[J]. Chinese Lasers, 2008, 35(11): 1795-1800.

[10]　方金祥，董世运，徐滨士，等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析[J]. 中国激光，2015，42(5):139-146.

(下转第 599 页)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术，2018，61(10)：16-25.
WANG Xiangming，SU Yadong，WU Bin，et al. Application of Micro-truss Lattice Structure in Aircraft Structure/Function Integration[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2018，61(10)：16-25.

[3] BURTON H E，EISENSTEIN N M，LAWLESS B M，et al. The Design of Additively Manufactured Lattices to Increase the Functionality of Medical Implants[J]. Materials Science & Engineering C，2019，94：901-908.

[4] 廖中源，王英俊，王书亭. 基于拓扑优化的变密度点阵结构体优化设计方法[J]. 机械工程学报，2019，55(8)：65-72.
LIAO Zhongyuan，WANG Yingjun，WANG Shuting. Graded-density Lattice Structure Optimization Design Based on Topology Optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering，2019，55(8)：65-72.

[5] FRIEDMAN N，IBRAHIMBEGOVIC A. Overview of Highly Flexible，Deployable Lattice Structures Used in Architecture and Civil Engineering Undergoing Large Displacements[J]. YBL Journal of Built Environment，2013，1(1)：85-103.

[6] 赵芳垒，敬石开，刘晨燕. 局部相对密度映射的变密度多孔结构设计方法[J]. 机械工程学报，2018，54(19)：121-128.
ZHAO Fanglei，JING Shikai，LIU Chenyan. Variable Density Cellular Structure Design Method Base on Local Relative Density Mapping[J]. Journal of Mechanical Engineering，2018，54(19)：121-128.

[7] AL-SAEDIABS D S J，MASOOD H，MUHAMMAD F，et al. Mechanical Properties and Energy Absorption Capability of Functionally Graded F2BCC Lattice Fabricated by SLM[J]. Materials & Design，2018，144：32-44.

[8] ANTON D P，INA Y，IGOR Y. Ti6Al4V Lightweight Lattice Structures Manufactured by Laser Powder Bed Fusion for Load-bearing Application[J]. Optics & Laser Technology，2018，108：521-528.

[9] WU J，WANG W，GAO X，et al. Design and Optimization of Conforming Lattice Structures[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics，2021，27(1)：43-56.

[10] KANG D，PARK S，SON Y，et al. Multi-lattice Inner Structures for High-strength and Lightweight in Metal Selective Laser Melting Process[J]. Materials & Design，2019，175：107786.

[11] WU Qianqian，MA Li，WU Linzhi，et al. A Novel Strengthening Method for Carbon Fiber Composite Lattice Truss Structures[J]. Composite Structures，2016，153：585-592.

[12] XIONG J，MA L，VAZIRI A，et al. Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composite Lattice Core Sandwich Panels Fabricated by Laser Cutting[J]. Acta Materialia，2012，60(13/14)：5322-5334.

[13] PHAM M，LIU C，TODD I，et al. Damage-tolerant Architected Materials Inspired by Crystal Microstructure[J]. Nature，2019，565(7739)：305-311.

[14] GUBICZA J，FARBANIEC L，CSISZÁR G，et al. Microstructure and Strength of Nickel Subjected to Large Plastic Deformation at Very High Strain Rate[J]. Materials Science & Engineering A，2016，662(26)：9-15.

（编辑　张　洋）

作者简介：**任利民**，男，1995年生，硕士研究生。研究方向为数字化设计制造技术、三维打印技术等。发表论文3篇。**戴　宁**（通信作者），男，1978年生，教授。研究方向为逆向工程、数字化设计制造技术、三维打印技术等。发表论文70余篇。E-mail：dai_ning@nuaa.edu.cn。

（上接第593页）

FANG Jinxiang，DONG Shiyun，XU Binshi，et al. Study of Stresses of Laser Metal Deposition Using FEM Considering Phase Transformation Effects[J]. Chinese Journal of Lasers，2015，42(5)：139-146.

[11] 谭真，郭光文. 工程合金热物理性[M]. 北京：冶金工业出版社，1994.
TAN Zhen，GUO Guangwen. Thermal Properties of Engineering Alloys[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，1944.

[12] JIANG W，YAHIAOUI K，HALL F R. Finite Element Predictions of Temperature Distributions in a Multi-pass Welded Piping Branch Junction[J]. Journal of Pressure Vessel，2005，127(1)：7-12.

[13] 王新堂，张金一，DU Yingang. 00Cr17Ni14Mo2不锈钢高温力学性能[J]. 建筑材料学报，2015，18(5)：767-772.
WANG Xintang，ZHANG Jinyi，DU Yingang. High Temperature Mechanical Properties of 00Cr17Ni14Mo2 Stainless Steel[J]. Journal of Building Materials，2015，18(5)：767-772.

[14] 黄卫东. 激光立体成形-高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安：西北工业大学出版社，2007.
HUANG Weidong. Laser Solid Forming-rapid Free Forming of High Performance Compact Metal Parts[M]. Xi'an：Northwest University of Technology Press，2007.

（编辑　张　洋）

作者简介：**李广琪**，男，1995年生，硕士研究生。研究方向为激光增材制造技术。发表论文4篇。E-mail：1183695769@qq.com。**朱刚贤**（通信作者），男，1980年生，博士、副教授。研究方向为激光熔覆成形技术。发表论文45篇。E-mail：gxzhu@suda.edu.cn。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net