中空环形激光熔覆层温度场与应力场的数值模拟研究

李广琪[a]，朱刚贤[a]，赵亮[a]，王丽芳[b]，石世宏[a]

（苏州大学 a.机电工程学院，b.工程训练中心，江苏 苏州 215021）

摘 要：目的 研究基于“光束中空、光内送粉”工艺下中空环形激光熔覆层温度场分布规律、应力演化过程及沿熔覆层深度方向上的残余应力分布，为调控或降低光内送粉激光熔覆层残余应力提供参考。**方法** 采用 ANSYS 软件 APDL 语言建立单道熔覆层物理模型，利用生死单元法模拟激光加载，从而得到温度场结果，在此基础上进行热力耦合，分析熔覆层内应力演化过程，在熔覆层深度方向上建立路径，得到沿路径方向上的残余应力分布结果，最后进行实验测定。**结果** 当采用中空环形激光束加载时，光斑温度分布呈“马鞍形”，熔覆层横切面上温度分布形状呈对称的“W”形，两侧温度高，中间温度低，熔覆层上表面扫描路径上的节点在扫描过程中都会经历两次温度峰值，且第二次温度峰值要高于第一次。热应力随着扫描过程进行而不断变化，由起初产生的熔覆层压应力逐渐转化为拉应力。沿扫描方向上的残余应力值最大，可达到 273 MPa。熔覆层深度方向沿扫描方向上的残余应力值在上表面位置有最大值 235 MPa，熔覆层与基材接合面处有最小值 185 MPa。最后结合实验测定，数值计算与实验结果一致。**结论** 中空环形激光光斑“马鞍形”式的能量分布使得熔覆层温度分布更为均匀，可有效降低温度梯度。环形光斑后半环高温区域的重熔作用有利于能量的再分配，有利于减缓应力集中。熔覆层深度方向沿激光扫描方向上的残余应力分布，随着深度的增加而逐渐减小。

关键词：中空环形激光；残余应力；数值模拟；温度场；应力演化；实验测定

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)07-0319-10

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.040

Numerical Simulation on Temperature Field and Stress Field of Cladding Layer by Hollow-Ring Laser

LI Guang-qi[a], *ZHU Gang-xian*[a], *ZHAO Liang*[a], *WANG Li-fang*[b], *SHI Shi-hong*[a]

(a.School of Mechanical and Electrical Engineering, b.Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou 215021, China)

收稿日期：2019-11-20；**修订日期：**2020-01-16

Received：2019-11-20；**Revised：**2020-01-16

基金项目：国家重点研发计划（2016YFB1100300）

Fund：Supported by the National Key Research and Development Plan (2016YFB1100300)

作者简介：李广琪（1995—），男，硕士研究生，主要研究方向为激光金属增材制造技术。

Biography：LI Guang-qi (1995—), Male, Master student, Research focus: laser metal additive manufacturing technology.

通讯作者：朱刚贤（1980—），男，博士，副教授，主要研究方向为激光熔覆成形技术。邮箱：gxzhu@suda.edu.cn

Corresponding author：ZHU Gang-xian (1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: laser cladding forming technology. E-mail: gxzhu@suda.edu.cn

引文格式：李广琪, 朱刚贤, 赵亮, 等.中空环形激光熔覆层温度场与应力场的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 319-328.

LI Guang-qi, ZHU Gang-xian, ZHAO Liang, et al. Numerical simulation on temperature field and stress field of cladding layer by hollow-ring laser[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 319-328.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ABSTRACT: The work aims to study the distribution law of temperature field, stress evolution process and residual stress distribution along the cladding depth direction of hollow ring laser cladding layer based on the process of "hollow beam and inside-beam powder feeding" and provide guidance for regulating or reducing the residual stress of laser cladding layer. APDL language in ANSYS software was used to establish physical model of single cladding layer and simulate the laser loading to obtain the temperature field result by birth and death element. Based on this, the thermo-mechanical coupling was performed, the stress evolution process was analyzed and the path along the depth direction of the cladding layer was established, and the residual stress distribution results were obtained. Finally, the experimental determination was made. The spot temperature distribution was in “saddle” shape and the temperature distribution on the cross section of the cladding layer was in symmetric “W” shape when the hollow-ring laser beam was loaded. At the same time, the temperature of the cladding layer on both sides was high and the intermediate temperature was low. The nodes on the upper surface of cladding layer were heated twice during the laser scanning, and the second peak temperature was higher than the first time. The thermal stress changed continuously in the scanning process, which was transformed form compressive stress generated in the initial cladding process into tensile stress. The residual stress value along the scanning direction was the largest, which was up to 273 MPa, while the largest value at the upper surface was 235 MPa. The minimum value of the bonding surface between the cladding layer and the substrate was 185 MPa. Finally, the numerical calculation was consistent with the experimental results through the experimental determination. The "saddle-shaped" energy distribution of the hollow ring laser spot makes the temperature distribution of the cladding layer more uniform, which can effectively reduce the temperature gradient. The remelting effect of the high temperature region in the rear half of the ring spot facilitates the redistribution of energy and reduces stress concentration. The residual stress distribution in the depth direction of the cladding layer along the laser scanning direction gradually decreases with increasing depth.

KEY WORDS: hollow ring laser; residual stress; numerical simulation; temperature field; thermal stress evolution; experimental determination

激光增材制造技术是利用高能量密度的激光作为热源，以金属粉末为原材料，将粉末同步熔化、逐层累加，能直接制造出具有良好致密性、优越力学性能金属零件的一种先进制造技术，在航空航天、汽车船舶等领域具有广阔的应用前景[1]。在激光增材制造过程中，局部热输入必然导致不均匀的温度场，产生大的温度梯度，冷却后极易在熔覆层内部产生残余应力，高的残余应力易导致零件变形及裂纹[4]，进而影响成形件的力学性能[6]。因此，如何解决熔覆层残余应力问题，已成为激光增材制造领域的研究热点。目前对于激光增材制造熔覆层残余应力的研究大多是基于高斯光源下的数值模拟研究。

Wang 等[7]对激光沉积成形过程中工艺参数对残余应力的影响进行了数值模拟与实验研究，结果表明熔覆层顶层残余应力随激光功率的减小、扫描速度的增大、预热温度的升高等呈下降趋势。Haider 等[8]采用实验研究了扫描路径对残余应力的影响，其中采用分块扫描路径的残余应力最大，改变扫描路径对材料性能的影响不显著。卞宏友等[9]采用有限元模拟方法研究了基体预热对熔覆层温度场及残余应力的影响，研究发现温度梯度随着基体预热温度的升高而逐渐下降，热应力显著减小。Wang 等[10]利用有限元数值模拟与实验测定，比较分析了激光工艺参数与不同的扫描策略对熔覆层残余应力的影响，并得出结论：熔覆层内应力的形成主要是因为不均匀的热输入导致较大的温度梯度，从而引起材料塑性变形形成残余应力。Heigel 等[11]利用有限元热力耦合模型，采用变形实时的测量方法，研究了 TC4 钛合金激光沉积过程中的应力演化规律，结果表明较大的温度梯度会导致较大的残余应力与塑性变形。

上述研究均是集中在高斯热源圆形光斑熔覆方式，其沿扫描方向，能量在中心部分较为集中，远离光斑中心的边缘部分能量较低，能量分布方式不利于形成平整的熔覆层，尤其在熔道边缘两侧位置极易出现熔不透现象，降低了成形件的表面精度和成形质量。为了解决高斯光产生的不平整现象，本课题组发明了基于“光束中空、光内送粉”的激光熔覆喷头装置，通过光束转换将实心光斑变成环形光斑，即将能量集中区域从中心变为外缘，能量分布更为均匀合理，能够消除高斯实心光斑熔覆时造成的熔道边缘熔不透现象，改善冶金结合性差的缺点[12]。但基于“光束中空、光内送粉”新工艺下熔覆层的温度场及应力场如何分布，尚缺乏研究。所以，本文利用 ANSYS 软件建立单道熔覆层有限元模型，采用生死单元技术[13]模拟环形光源下激光增材制造过程，采用函数加载法实现环形光斑在熔覆层表面的移动，模拟环形激光光内送粉激光熔覆的温度场分布，在此基础上进行热力耦合，对应力场进行计算。结合激光熔覆实验，探究中空环形激光熔覆层内的残余应力分布，为有效降低光内送粉方式下激光熔覆层裂纹开裂倾向提供参考。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　“光束中空、光内送粉”激光熔覆工艺

1.1　环形光斑产生原理

本课题组自主研发的光内同轴送粉喷头装置[14]，中空环形激光光斑产生原理如图 1a 所示。该原理是利用圆环-圆锥双反射镜技术，将入射的实心激光束通过锥形反射镜，再经圆环镜反射在基体表面进行聚焦，形成环形光斑，如图 1b 所示。粉管被激光束包裹在内部，垂直下落到熔池中，避免了粉末分流，大大提升了粉末利用率，实现了粉斑与激光光斑同轴，粉末流与激光束同轴，有利于降低熔覆层表面粗糙度，获得精度良好的成形件。

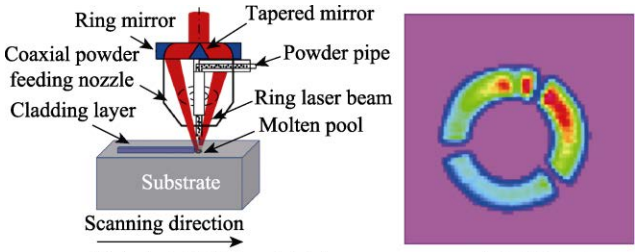


图 1　中空环形光光内送粉激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic diagram of hollow ring laser cladding with inside powder feeding: (a) schematic diagram for ring beam inside powder feeding; (b) ring laser spot

1.2　中空环形光斑能量分布模型

基模状态下，环形光光斑辐照的二维能量分布如图 2 所示[12]，它反映了沿激光扫描方向吸收光能的分布情况。由图 2 可知，沿激光扫描方向中空激光光斑能量分布呈现“马鞍形”，中心中空区域能量较低，两侧边缘位置能量较高，能量梯度较大。因此在熔覆过程中，中空激光光源可有效补偿光斑边缘部分的热量损失，避免了熔不透现象，有利于形成熔覆层与基材良好的冶金结合效果；同时在熔覆过程中由于两侧能量相对集中，但是散热相对中心区域较快，所以整体而言，中心区域能量与边缘区域能量相当，有利于形成表面较为平整的熔覆层。

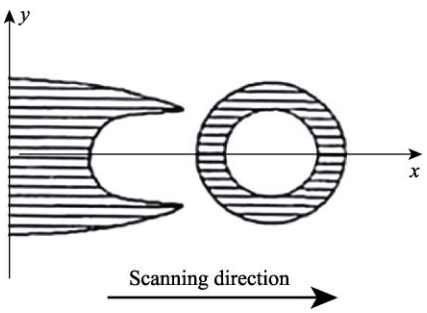


图 2　环形激光光斑能量分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of ring laser spot energy distribution

中空环形激光在环形区域内呈“类高斯”能量分布，负离焦区域内的中空激光能量密度函数为[15]：

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

式中：P 为激光器功率，W；η 为激光吸收效率；R_0 为激光在焦点位置处的外径，mm；z 为离焦量，mm；φ 为中空激光束与水平方向夹角；ξ 为能量峰位置系数。由式(1)可知，用函数法加载过程中，只需要确定上述几个参数和某一时刻的位置，即可确定任意一点处所加载的能量。

2　建立中空环形激光熔覆有限元模型

2.1　模型假设

激光增材过程是一个急冷急热的非稳态过程，熔池的产生与凝固都在极快的时间内完成，实际的熔覆层尺寸较小，在增材过程中熔池大小基本保持稳定，为了简化模型、计算方便，对模型做以下假设[16]：熔覆层近似为一个规则的长方体，各截面都为规则的矩形；基体材料与熔覆层材料各向同性；在激光熔覆过程中不会引起材料的汽化；材料的密度不随温度改变；不考虑熔池的流动作用对于熔覆层的影响，将流体视为屈服应力极低的固体[17]。

2.2　材料热物理性能

本文中的基材与熔覆层材料均采用 316 L 不锈钢（022Cr17Ni12Mo2），化学成分如表 1 所示。

表 1　316L 不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 316L stainless steel

wt.%

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.03	1.00	2.00	0.03	0.045	18	14	3

经查阅有关文献[18]并利用数值模拟插值法和外推法，获取了随温度变化的 316L 不锈钢材料的热物理参数和力学性能参量，如表 2 与表 3 所示，其中：c 为比热容，κ 为导热系数，ρ 为材料密度，E 为弹性模量，α_1 为热膨胀系数，ν 为泊松比，σ 为屈服应力，E'为材料的切线模量[21]。

2.3　几何建模与网格划分

中空环形激光熔覆层模型与基材模型如图 3 所示，熔覆层尺寸为 30 mm×30 mm×0.4 mm，基材尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm，为了简化模型和计算方便，忽略模型圆角等细小特征。同时为了提升计算精度，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　316L 不锈钢的热物理参数

Tab.2 Thermo-physical parameters of 316L stainless steel

Temperature/K	c/(J·kg^{-1}·K^{-1})	κ/(W·m^{-1}·K^{-1})	ρ/(g·cm^{-3})
293	477	12.6	8
473	515	16.3	8
673	550	19.8	8
873	582	22.6	8
973	611	23.9	8
1073	640	25.5	8
1173	669	26.4	8
1273	675	27.5	8
1473	739	29.7	8
1703	760	31.7	8

表 3　316L 不锈钢的力学性能参数

Tab.3 Mechanical properties of 316L stainless steel

Temperature/K	E/GPa	α_1/(×10^{-6} K^{-1})	ν	σ/GPa	E'/GPa
293	221	15.3	0.3	0.297	22.1
473	196	15.3	0.3	0.221	19.6
673	186	15.3	0.3	0.202	18.6
973	155	15.3	0.3	0.099	15.5
1273	50	15.3	0.3	0.089	5
1473	35	15.3	0.3	0.059	3.5

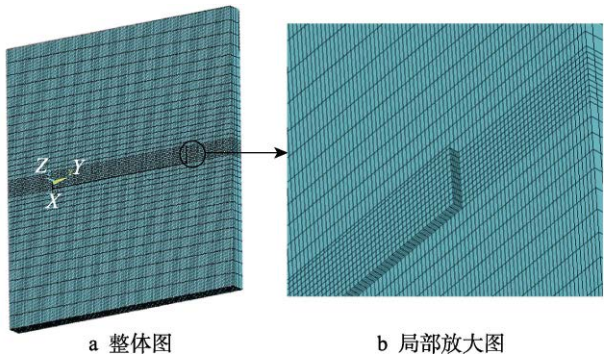


图 3　模型网格划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of model meshing: (a) whole; (b) local enlargement

在熔覆层及其附近区域划分网格较为精细，熔覆层区域网格尺寸为 0.3 mm×0.3 mm×0.1 mm，远离熔覆层区域采用粗略划分，网格类型采用六面体单元。

2.4　边界条件

中空环形激光增材过程中，边界条件主要包括激光热载荷、基材与空气的自然对流以及基材与熔覆层接合面的热传导三部分。为了运算方便，忽略了热辐射条件，基材与空气、基材与熔覆层的边界条件都取热传导系数为 30 W/(m·℃)的自然对流，空气温度设为 25 ℃。

2.5　定义路径

为研究熔覆层不同方向上温度及应力的分布规律，在熔覆层上定义如图 4 所示的三条路径：Path 1 为熔覆层沿深度方向（Z 方向）上的路径，Path 2 为垂直于扫描方向（X 方向）上的路径，Path3 为平行于扫描方向（Y 方向）上的路径。

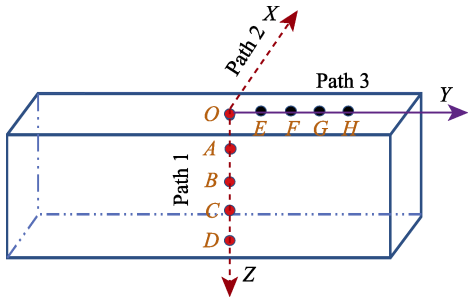


图 4　熔覆层上路径定义示意图

Fig.4 Schematic diagram of path definition on the cladding layer

3　中空环形激光温度场计算

进行温度场数值模拟时，使用的单元类型为 Solid70，选取环形光斑外径为 1.5 mm，内径为 0.8 mm，如表 4 所示的工艺参量进行熔覆计算，整个环形激光扫描过程为 4.8 s，800 s 后冷却至室温。

表 4　激光熔覆参数

Tab.4 Parameters of laser cladding

Power/W	Scanning speed/(mm·s^{-1})	Defocus amount/mm	Laser absorptivity	Energy peak position coefficient	Laser beam angle/(°)
500	6	−3	0.25	0.5	75

3.1　温度分布云图

为找出中空环形激光熔覆扫描过程的特征，分别取 0.25、2、3 s 三个时刻的温度分布云图，如图 5 所示。由分布云图可知，在中空环形激光扫描过程中温度分布呈彗星状，熔覆刚开始时，光斑呈现完整的环形，最高温度为 1624 ℃，中空区域温度较低；随着熔覆过程的进行，环形光斑高温区域逐渐呈现“马鞍形”，高温区域为 2100 ℃，且温度分布趋于稳定状态，证实了中空环形激光能量分布呈现“中间低、边缘高”，与理论分析较为符合。

熔覆层环形激光光斑中心部位截面温度分布如图 6 所示，图 6a 是 t=2.5 s 时刻的横截面温度分布云图，可知横截面温度分布呈现对称的“W”形，熔覆层表层处有两个深谷，两侧温度高，中间区域温度低，随着熔覆层深度增加，温度逐渐降低，这是因为随着深度增加，热传导作用减弱，激光热能逐渐衰减，因此低温区域内的温度分布逐渐呈现平缓的弧线状。熔覆层与基体结合处的温度达到 1500 ℃，超过了 316 L 不锈钢的熔点（1389 ℃），形成了良好的冶金结合。图 6b 是同一时刻的纵截面温度分布云图，高温区域呈现不对称的“W”形，熔池后半部分温度较高，区域较深，熔池前部区域较浅。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

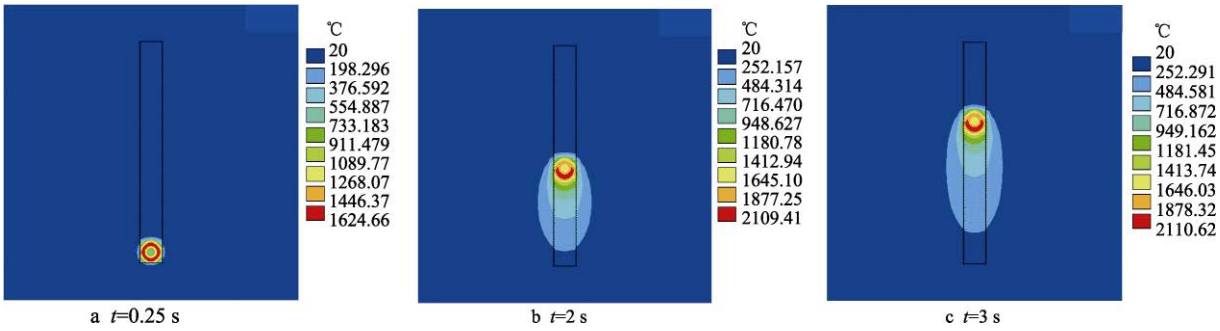


图 5　不同时刻中空环形激光的温度分布云图

Fig.5 Temperature distribution cloud diagram of hollow ring laser at different time

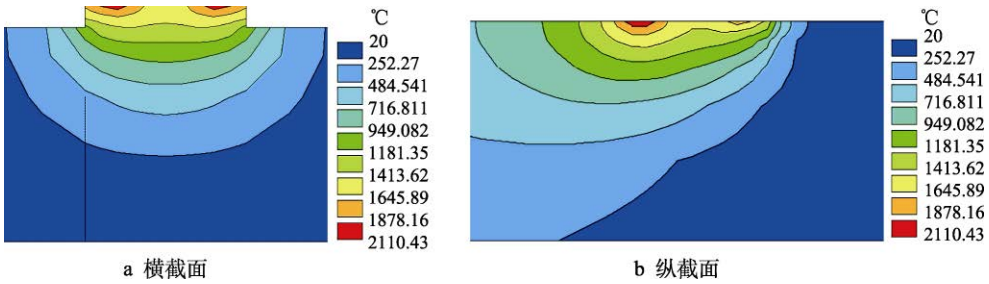


图 6　t=2.5 s 时刻熔覆层横、纵截面的温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution cloud map of cladding cross section and longitudinal section at t=2.5 s

3.2　温度曲线循环特性

图 7 是中空环形激光在 Path2 路径上的温度随位移变化分布曲线。由图 7 可知，在垂直于环形激光扫描方向上温度分布呈对称性，0~0.6 mm 与 2.4~3 mm 为环形内高温分布区域，0.6~2.4 mm 区域为中空无光区域。在两侧环形区域内，温度较高，中空无光区域温度较低。在上半环内，经过高能量区域温度迅速上升达到 1828 ℃，随后经过中空无光区域，温度迅速下降，在光斑中心达到最低值 1355 ℃；后半环温度分布与前半环温度变化一致。由此可知，垂直于激光扫描方向上的熔覆层温度变化趋势与横截面的温度分布云图变化趋势相符，验证了温度场的正确性。

图 8a 是中空环形激光在 Path3 路径上所定义点

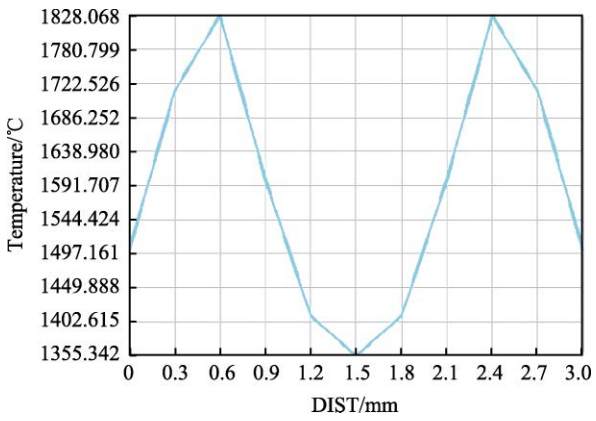


图 7　Path2 路径上温度-位移曲线图

Fig.7 Temperature-displacement curve on Path 2

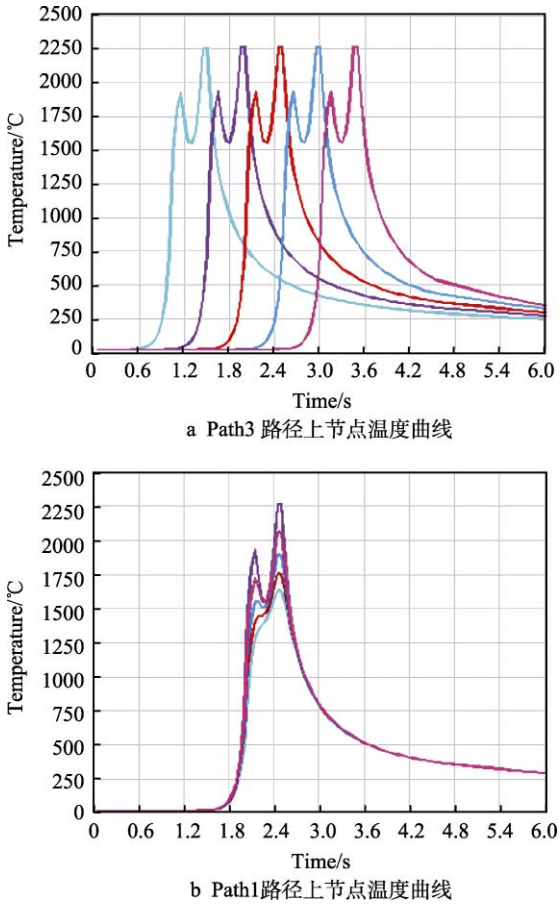


图 8　Path 3、Path1 路径上定义节点的温度-时间历程曲线图

Fig.8 Temperature-time history curve of nodes defined on Path 3 and Path 1

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（*O*、*E*、*F*、*G* 和 *H*）的温度-时间历程曲线图，由曲线图可知，当激光热源没有扫描到相应节点时，温度接近室温，当激光热源扫过该节点时，温度迅速上升，超过 1500 ℃，高于材料熔点形成熔池，当激光热源离开该节点时，已经形成的熔池开始冷却凝固，温度急剧下降，这验证了激光熔覆过程是一个急热急冷的过程。在整个激光扫描过程中，熔覆层表面的节点都达到了两次温度峰值，这是因为环形光高能量区域集中在前半环和后半环，且后半环能量高于前半环，因此熔覆过程中会经历两次升温且第二次温度峰值远超第一次；由于熔覆过程中热传导所致的热聚集效应，熔覆层表面靠后的节点温度要略高于靠前的节点温度。

图 8b 是 Path1 路径上所定义节点（*O*、*A*、*B*、*C* 和 *D*）的温度-时间历程曲线图，可知在熔覆层底部节点位置处，温度峰值相对较低，双峰值效果不明显，随着熔覆层高度的增加，温度峰值逐渐明显且温度大幅度升高，在熔覆层表面节点处温度最高，双峰值效果最明显，这是因为中空激光热源作为面热源作用在熔覆层上表层，随着熔覆深度的增加，热传导效果减弱，吸收的热能降低，因此温度下降明显。

4　中空环形激光熔覆层应力场研究

采用热-应力顺序结构耦合方式，在温度场计算的基础上，将 Solid70 单元转变为 Solid45 单元，通过 *ETCHG* 命令将热传导单元转换为结构单元，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，并将温度场计算结果作为载荷，从而获得熔覆层应力分布。

4.1　应力场数值计算

4.1.1　应力分布云图

通过分析计算结果发现，800 s 之后残余应力接近稳定，所以取冷却 800 s 之后熔覆层的残余应力进行研究。图 9 为冷却 800 s 之后熔覆层和基材 *X*、*Y*、*Z* 三个方向和 Von-Mises 残余应力分布云图，可知 *X* 方向上最大残余应力达到 236 MPa，分布在熔覆层于基材接合面两端，呈对称分布；*Y* 方向上最大残余应力集中在熔覆层上表面，最大值达到 273 MPa，整个熔覆层均为拉应力，呈现应力集中；*Z* 方向整体残余应力较小，熔覆层为压应力。等效应力分布呈现“哑铃状”，最大应力主要集中在熔覆起始位置，最大值达到 299 MPa。

4.1.2　熔覆层热应力演化过程

由图 9 分析可知，平行于扫描方向上（即 *Y* 方向上）的残余应力值最大，与参考文献一致[22]，裂纹容易在垂直于扫描方向上的位置发生，因此重点研究 *Y* 方向上的应力分布。任选 0.35、2.3、3.6、4.8 s 四个时刻激光熔覆过程中 *Y* 方向（扫描方向）的应力分布云图，如图 10 所示。

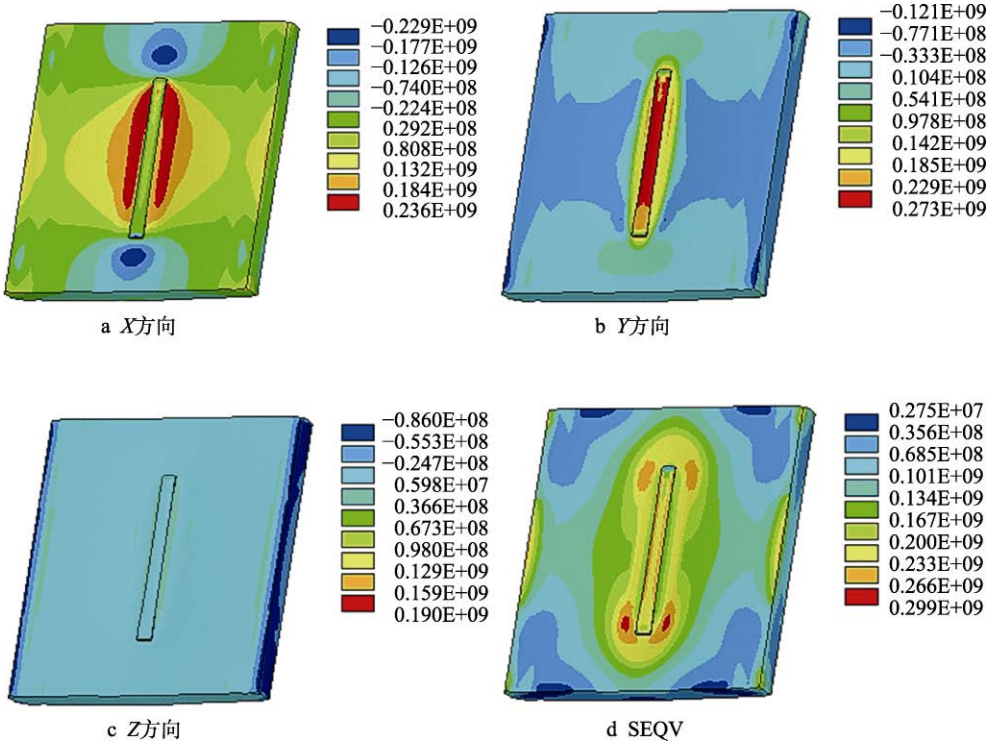


图 9　*X*、*Y*、*Z* 方向残余应力和等效残余应力云图

Fig.9 Cloud diagram of residual stress and equivalent residual stress in *X*, *Y* and *Z* directions

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

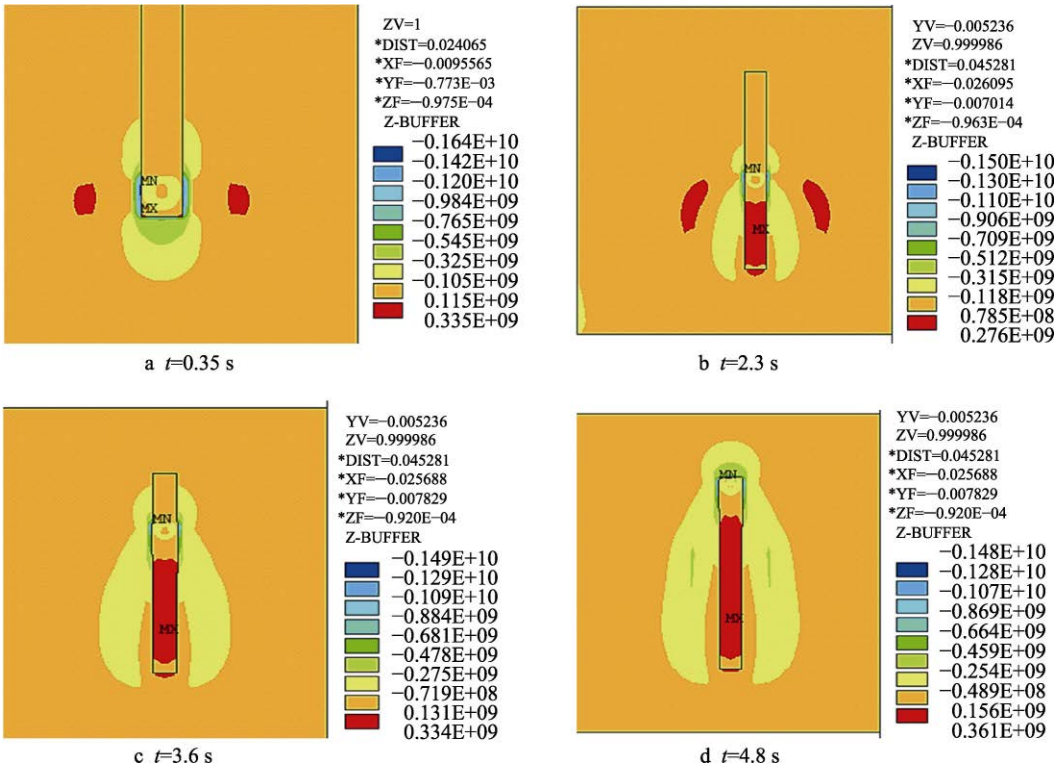


图 10　不同时刻 *Y* 方向的应力云图演化过程

Fig.10 Evolution of stress cloud diagram in the *Y* direction at different time

由图 10 可知，随着激光束不断向前移动，应力分布也不断变化，当 *t*=0.35 s 时刻，激光扫描刚开始，熔覆层材料受热急剧升温，熔化膨胀，对周围基材造成挤压，但受到周围较冷的基材的限制作用，因此整个熔覆层呈现出压应力状态；随着激光束向前扫描，热源离开，已熔化的材料迅速冷却凝固收缩，原先呈现的压应力状态迅速转变拉应力，且随着扫描进行，拉应力不断增大，与此同时对应的压应力区继续随着扫描过程向前移动。

为了探究熔覆层内部的应力演化情况，取 *t*=2.55 s 时刻熔覆层扫描方向上中间位置（*Y*=15 mm）处进行横截面与纵截面剖切，如图 11 所示。*t*=2.55 s 时刻激光光源中心位于扫描到该截面处，熔覆层材料受热急剧升温熔化，形成熔池，熔池内部呈现较低的流动应力，熔覆层受热膨胀对周围基体造成挤压，又受到基材的束缚，因此热影响区内呈现较低的压应力，但熔覆层顶部中间位置处出现较低的拉应力，这是因为环形无光区域能量较低，无法完全形成熔池，熔池状态呈现半熔化、半凝固状态，因此出现了拉应力。

t=2.75 s 时刻，如图 12 所示，光斑中心离开熔覆层该截面位置处，但仍位于环形光斑内，熔覆层之前已熔化的区域开始冷却凝固，在周围基材的约束作用下，熔覆层内开始产生拉应力，由纵截面应力分布图可知，之前熔覆过的区域已经冷却凝固，压应力迅速转化为拉应力。

t=4 s 时刻，环形光斑已完全离开截面中心，熔覆层中心位置处已冷却 1.45 s，由图 13 可知，整个熔覆层基本已经转化为拉应力，且拉应力值随着冷却凝固进一步增大。

t=800 s 时刻，激光熔覆结束后整个熔覆层已经冷却至室温，工件内部形成永久的残余应力。图 14 是截面处应力分布图，可知冷却到室温时刻，整个熔覆层内完全转化为拉应力，最大拉应力集中在熔覆层上表面位置处，达到 273 MPa，且随着熔覆层深度的

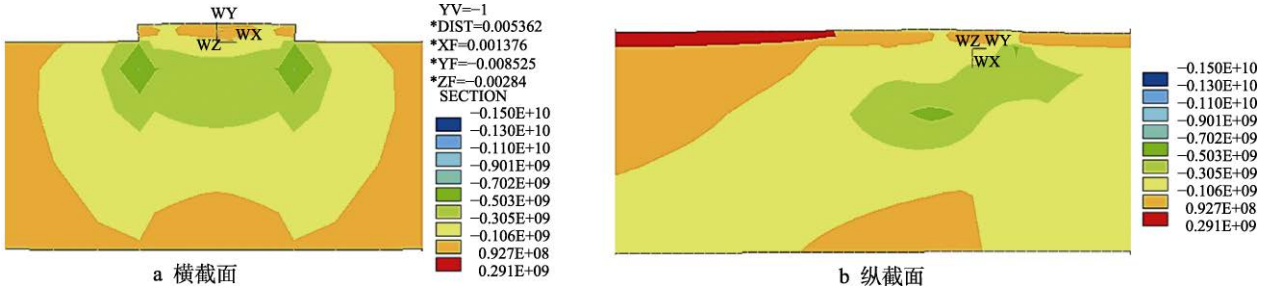
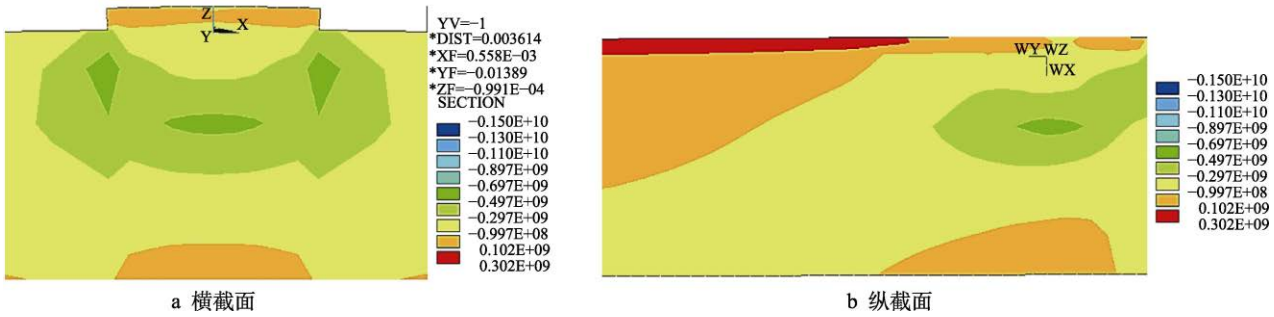


图 11　*t*=2.55 s 时刻 *Y*=15 mm 处横截面、纵截面在 *Y* 方向上的应力分布图

Fig.11 Stress distribution diagram in *Y* direction of cross section (a) and longitudinal section (b) at *t*=2.55 s and *Y*=15 mm

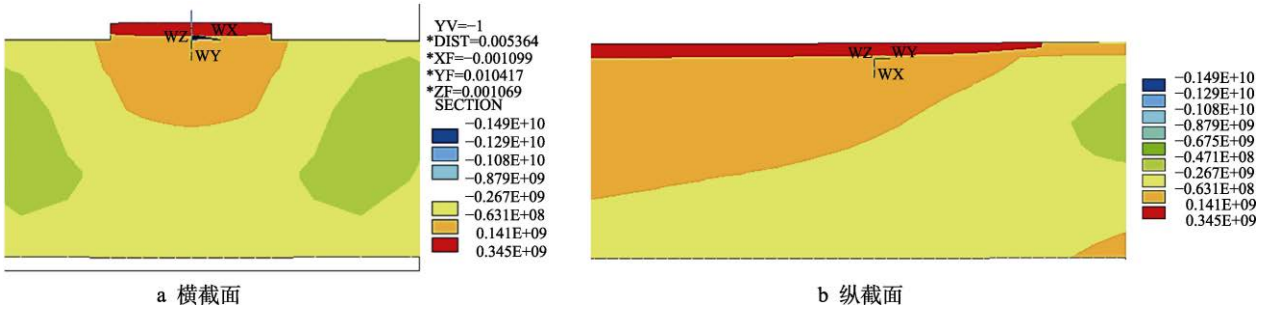
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a 横截面　　b 纵截面

图 12　t=2.75 s 时刻 Y=15 mm 处横截面、纵截面在 Y 方向上的应力分布图

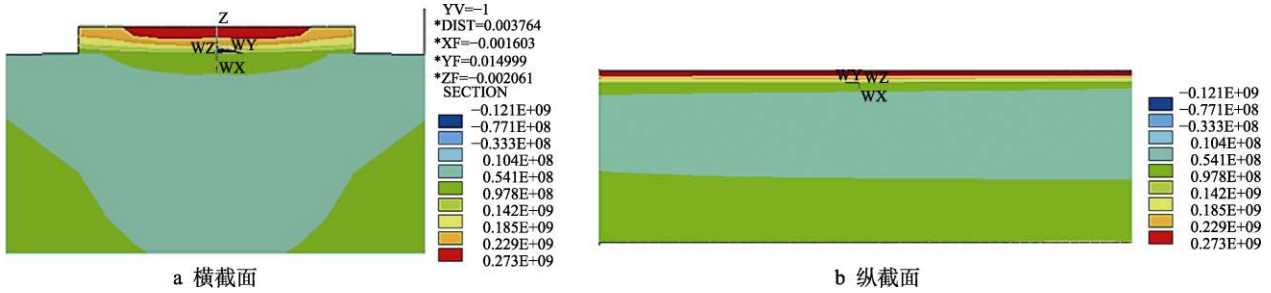
Fig.12 Stress distribution diagram in Y direction of cross section (a) and longitudinal section (b) at t=2.75 s and Y=15 mm



a 横截面　　b 纵截面

图 13　t=4 s 时刻 Y=15 mm 处横截面、纵截面在 Y 方向上的应力分布图

Fig.13 Stress distribution diagram in Y direction of cross section (a) and longitudinal section (b) at t=4 s and Y=15 mm



a 横截面　　b 纵截面

图 14　t=800 s 时刻 Y=15 mm 处横截面、纵截面在 Y 方向上的应力分布图

Fig.14 Stress distribution diagram in Y direction of cross section (a) and longitudinal section (b) at t=800 s and Y=15 mm

增大，拉应力值逐渐减小。

4.1.3　路径上的应力分布规律

熔覆层在 Path1 路径上各个方向的应力分布情况如图 15 所示。由图 15 可知，整个熔覆层内 Y 方向上都呈现拉应力，且随着熔覆层深度的增加，残余应力值逐渐下降，这是因为随着深度增加，热传导作用减弱，温度降低，熔覆层内部与基材的温差减小，温度梯度减小，因此残余应力降低，在熔覆层上表面有最大值，达到 235 MPa，在熔覆层与基材接合面处有最小值，达到 185 MPa。X 方向上整体也呈现轻微的拉应力，应力值比 Y 方向要小很多，这主要因为熔覆层宽度较窄，熔覆层在冷却收缩过程中受到的变形阻力较小，因此在 X 方向上残余应力较小，残余应力随深度的增加而增大。Z 方向整体残余应力值较小，变化比较平缓。等效应力值与 Y 方向上的残余应力变化趋势一致。

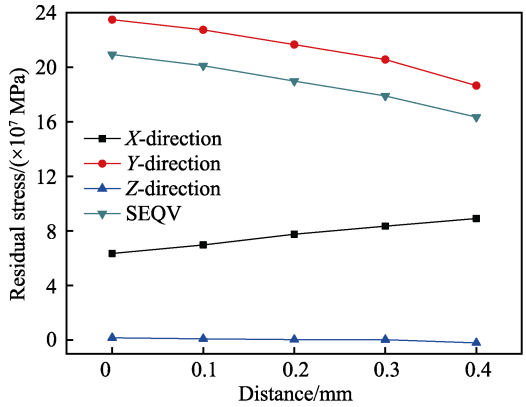


图 15　Path1 路径上各个方向上的应力分布规律

Fig.15 Stress distribution in all directions on Path 1

4.2　实验研究测定残余应力

使用 2KW-IPG 光纤激光器、6 轴 KUKA 机械手及光内同轴送粉装置，在 316L 不锈钢基体上进行激光熔覆 316L 粉末的实验。实验参数与数值模拟参数一致。采用 X-350AX 射线应力测定仪对熔覆后试样进行残余应力测定，实验测定参数及测量方法如表 5 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5　实验测定参数

Tab.5 Experimental determination parameters

Parameters	Value
Ψ/(°)	0、25、35、45
Stress constant/ MPa	−601
2θ scan start angle/(°)	133.00°
2θ scan end angle/(°)	124.00°
Scan step/(°)	0.10°
X light pipe voltage/kV	22.0
X light pipe current/mA	6.0
Collimation tube diameter/mm	1

在测量残余应力前，使用饱和 NH_4Cl 溶液对试样逐层剥离、电解抛光，然后逐层测试熔覆层深度方向沿 *Y* 方向（激光扫描方向）的残余应力，测试点分别为 *O*、*A*、*B*、*C*、*D*（图 4 所示），将测试完成的结果与数值模拟结果进行对比，如图 16 所示。由结果对比可知，整个熔覆层内 *Y* 方向上均呈现拉应力，且随着熔覆层深度的增加，残余应力值降低，实验结果与仿真结果的残余应力分布趋势一致，验证了数值模拟的正确性。但同时可以看出实验结果在数值上较仿真结果有所降低，考察实验值与仿真值之间的误差，主要有以下两方面：一方面，模型假设简化，有限元网格不可能划分太细，因此导致计算产生误差；另一方面，采用逐层剥离策略测量不同深度熔覆层表面应力时，本身剥离过程会对残余应力产生一定的释放及影响。

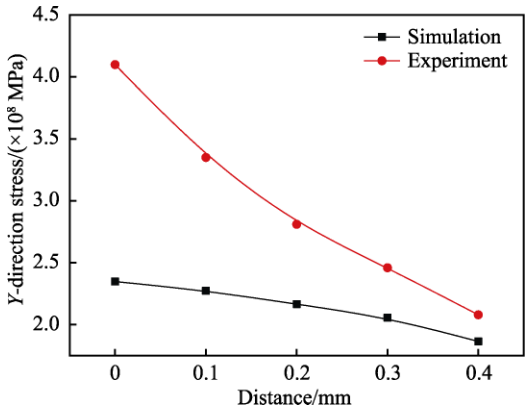


图 16　Path1 路径 *Y* 方向上残余应力的实验结果与模拟结果的对比示意图

Fig.16 Comparison of experimental results and simulation results of residual stress in *Y* direction of path1

5　结语

1）当采用中空环形激光束加载时，光斑能量分布呈“马鞍形”，熔覆层横截面上的温度分布形状呈对称的“W”形，两侧温度高，中间温度低，熔覆层上表面扫描路径上的节点在扫描过程中都会经历迅速升温—降温—升温—降温的变化过程，经历了两次温度峰值，且第二次温度峰值要高于第一次，这样的能量分布有利于能量再分配，温度分布更均匀。

2）热应力随着扫描过程的进行而不断变化，当激光热源中心照射到某点时，该处的熔覆材料迅速熔化而受热膨胀，但受到周围基材的约束，整个熔覆层及热影响区呈压应力，随着扫描过程的进行，熔覆层压应力逐渐转化为拉应力。激光光斑后半环的重熔作用可释放一部分应力，减缓应力集中。

3）沿扫描方向上的残余应力值最大，熔覆层深度方向沿扫描方向上的残余应力分布随着深度的增加而逐渐减小，在熔覆层上表面位置处有最大值（234 MPa），底部位置有最小值（186 MPa）。

参考文献：

[1] WANG H M. High performance metal component manufacturing technology opens a new chapter in national defense[J]. Defence manufacturing technology, 2013, 6(3): 5-7.

[2] DUTTA B, SINGH V, NATU H, et al. Direct metal deposition[J]. Advanced materials & processes, 2009, 167(3): 2931.

[3] 贾帅, 傅戈雁, 石世宏, 等. 激光机器人光内送粉异形实体成形研究[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 654-659.
JIA Shuai, FU Ge-yan, SHI Shi-hong, et al. Laser direct forming research of irregular-section entity base on inside-laser powder feeding and robotic technology[J]. Laser technology, 2016, 40(5): 654659.

[4] KEMPEN K, VRANCKEN B, BULS S, et al. Selective laser melting of crack-free high density M2 high speed steel parts by base plate preheating[J]. Journal of manufacturing science & engineering, 2014, 136(6): 1-6.

[5] BRANNER M G. Investigation on residual stresses and deformations in selective laser melting[J]. Production engineering, 2009, 1(4): 35-45.

[6] 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(12): 1304-1307.
YANG Jian, CHEN Jing, YANG Hai-ou, et al. Experimental study on residual stress distribution of laser rapid forming process[J]. Rare metal materials and engineering, 2004, 33(12): 1304-1307.

[7] WANG H. Effect of process parameters on residual stress distribution during direct laser metal deposition[J]. Advanced materials research, 2014, 989/994: 46-54.

[8] HAIDER A, HASSAN G, KAMRAN M. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

of selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. Materials science and engineering: A, 2018, 712: 175-187.

[9] 卞宏友, 翟泉星, 曲伸, 等. 基体预热下激光沉积修复 GH4169 合金温度场和应力场演变[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 327-332.
BIAN Hong-you, ZHAI Quan-xing, QU Shen, et al. The evolution of temperature field and stress field in laser deposition repair GH4169 with substrate preheating[J]. Applied laser, 2017, 37(3): 327-332.

[10] WANG L, JIANG X, ZHU Y, et al. An approach to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2018, 97(9/12): 1-12.

[11] HEIGEL J C, MICHALERIS P, REUTZEL E W, et al. Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V[J]. Additive manufacturing, 2015(5): 9-19.

[12] 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: 15-17.
TIAN Mei-ling. 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: 15-17.

[13] 李美艳, 韩彬, 蔡春波, 等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 25-28.
LI Mei-yan, HAN Bin, CAI Chun-bo. Numerical simulation on temperature and stress fields of laser cladded Ni-based coating[J]. Transactions of the China welding institution, 2015, 36(5): 25-28.

[14] 邵其文. 基于光内送粉的激光熔覆快速成形技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
SHAO Qi-wen. Research on laser cladding rapid prototyping technology based on powder feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2008.

[15] 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 Jian-jun. Mechanism study of non-supportive overhang part by hollow laser cladding forming[D]. Suzhou: Soochow University, 2019.

[16] 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 Shu-rong, FAN Ding, XIONG Jin-hui, 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.

[17] 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.
FANG Jin-xiang, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, 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.

[18] 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 Guang-wen. Thermal properties of engineering alloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1944.

[19] 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.

[20] 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.
GU Jian-qiang, LUO Fang, YAO Jian-hua. Numerical simulation of residual stress during laser cladding[J]. Laser & optoelectronics progress, 2010, 47(10): 81-86.

[21] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002: 510-526.
China aeronautical materials handbook editorial committee. China aeronautical materials handbook[M]. 2nd edtion. Beijing: China Standard Press, 2002: 510-526.

[22] 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.
HUANG Wei-dong, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Laser solid forming[M]. Xi′an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net