

激光与光电子学进展

抽油泵内筒材料激光熔覆高熵合金的热力耦合仿真研究

丁前峰, 庞铭*

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为突破抽油泵内筒材料表面激光熔覆高熵合金容易形成裂纹的技术瓶颈, 本研究团队建立了激光熔覆高熵合金热力耦合仿真模型, 该模型以材料热物性参数随温度的变化、相变潜热、激光功率和激光扫描速度为主要自变量。仿真结果表明: 由于激光熔覆过程具有局部的快速加热和冷却特性, 高的温度梯度主要集中在激光熔覆区域及其附近; 在激光熔覆高熵合金温度的空间分布非均匀性、激光辐照区域几何结构的非对称性等因素的影响下, x 方向的最大残余拉应力大于 y 方向和 z 方向的最大残余拉应力; 熔覆区域与基体结合区域存在几何结构突变及温度梯度, 因此该区域存在应力集中; 残余应力的形成与温度梯度、温度高低、结构约束等因素相关, 因此, 随着激光功率增大, 熔覆层内 x 方向的最大残余应力增大, y 方向的最大残余应力先降低后升高, z 方向的残余应力增大; 随着扫描速度增加, x 方向的最大残余应力降低, y 方向和 z 方向的最大残余应力均先升高后降低。随着激光扫描速度增加, 在温度降低带来的热膨胀变形减小与非协调变形对应力影响的综合竞争下, 最大残余拉应力增大。最后通过试验对仿真模型进行了验证, 验证结果证明了模型的正确性。

关键词 激光技术; 数值模拟; 温度场; 残余应力; 热力耦合

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514002

Thermal-Mechanical Coupling Simulation of High-Entropy Alloy Laser Cladding for Inner Barrel of an Oil Pump

Ding Qianfeng, Pang Ming*

Airport College of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract A thermal-mechanical coupling simulation model of laser cladding high-entropy alloy is established herein to break through the technical bottleneck that the laser cladding high-entropy alloys on the surface of the inner cylinder of the pump easily form cracks. The model considers the changes of the material's thermal physical properties with temperature, latent heat, laser power, and laser scanning speed as the main independent variables. The simulation results show that the high temperature gradient is mainly concentrated in the laser cladding region and its vicinity because the laser cladding process has a local rapid heating and cooling characteristics. Due to the non-uniformity of the spatial distribution of the temperature of the laser cladding high-entropy alloy and the asymmetry of the geometric structure of the laser irradiated area, the maximum tensile residual stress in x direction is greater than that in y and z directions. The stress concentration exists in the interface region between the cladding region and the matrix because of the influence of the geometric structure mutation and the temperature gradient in the region. Due to the formation of residual stress is related to temperature gradient, temperature level, structure constraints, and

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-07-23; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 中国民航大学研究生科研创新资助项目

*E-mail: pangming1980@126.com

other factors related, therefore, with the increase of laser power, the maximum residual stress in x direction increases, the maximum residual stress in y direction decreases and then increases, and the residual stress in z direction increases. The maximum residual stress in x direction decreases with the increase of the scanning speed, the maximum residual stresses in y and z directions increase and then decrease. With the increase of laser scanning speed, the maximum tensile residual stress increases under the comprehensive competition of the reduction of thermal expansion deformation caused by the decrease of temperature and the influence of uncoordinated deformation on stress. The simulation model is verified by experiments, and the verification result proved the correctness of the model.

Key words laser technique; numerical simulation; temperature field; residual stress; thermal-mechanical coupling

OCIS codes 140.3380; 000.4430

1 引言

油泵长期运行在含砂量高以及 CO_2 、 H_2S 浓度高的腐蚀环境中,泵筒表面容易发生磨损和腐蚀。泵厂通常采用化学热处理(渗碳、渗氮、碳氮共渗)和电镀对泵筒表面进行处理,以提高其表面耐磨性,达到一定的耐磨减阻效果。对于渗碳、渗氮等化学处理后的泵筒,其表面韧性较差,在井下砂石、油水的持续冲击下易脱落,从而发生腐蚀和磨损。对泵筒进行电镀后,基材与表面的结合性能较差,表层易脱落,甚至出现卡泵现象。同时,电镀过程中产生的颗粒、气体和液体会对环境造成很大污染,这些污染物的回收处理也会增加生产成本^[1-2]。激光熔覆具有激光束功率密度高、冷却速度快、热影响区小^[3-4],以及熔覆层可与基体材料实现冶金结合等特点。

与传统合金相比,高熵合金的抗断裂能力、抗拉强度、耐蚀性及抗氧化特性都较好。在激光熔覆过程中,局部热输入必然导致不均匀的温度场,产生大的温度梯度,冷却后极易在熔覆层内部产生残余应力,而高的残余应力易导致零件变形及产生裂纹^[5-6],进而影响成形件的力学性能^[7]。如何解决这些问题成为国内外的研究热点。石力开等^[8]研究了激光增材薄壁零件的应力场分布,结果发现,最大拉应力区域位于熔覆层与基体交界区域。Wang 等^[9]通过数值模拟与试验研究了激光工艺参数对熔覆层残余应力的影响,结果表明,残余应力的形成主要源于高的温度梯度。卞宏友等^[10]研究了预热温度对熔覆层温度场和残余应力的影响,结果表明,提高基体预热温度可以降低热应力。

激光熔覆过程的热力耦合响应与材料的参数密切相关,但很少有激光熔覆高熵合金热力耦合仿真方面的报道。鉴于此,本文基于热弹塑性原理构建了激光熔覆高熵合金热力耦合本构模型,分析激

光功率和激光扫描速度对热力耦合的影响规律,并通过试验对仿真结果进行了验证。本研究结果可为工程参数的进一步优化提供支撑。

2 数学物理模型

2.1 数学模型

本文采用间接耦合方法实现激光熔覆高熵合金热力耦合的计算,即先进行温度场的模拟,再进行应力场的模拟,应力模拟过程中各节点的温度从热分析的温度场中获得,最终实现材料的热力耦合。

在激光熔覆高熵合金过程中,温度在时间和空间上是波动的,且与时间是相关的,并满足方程^[11]

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q, \quad (1)$$

式中: k 为材料的热导率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$; ρ 为材料的密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; T 为材料的温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为材料的比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$; t 为时间, s ; Q 是与内部热源及潜热有关的效应项; k 、 ρ 、 C 均为温度 T 的函数。

在激光熔覆过程中,材料被加热到熔点以上时会形成熔池,冷却到熔点以下时会凝固。在加热过程中,高温区域材料的热膨胀会受到周围区域材料的约束,从而产生较高的热应力;当热应力超过材料的屈服极限时,就会发生塑性变形。当温度冷却到室温后,由于材料有恢复到原状的趋势,因此材料中会产生残余应力。在应力分析中,将温度场计算得到的瞬态温度作为应力场模拟的热边界。应力计算的本构方程为^[12]

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}]\{d\epsilon\} - [C^{th}][M][\Delta T], \quad (2)$$

式中: $d\sigma$ 为应力增量; $d\epsilon$ 为应变增量; $[D^{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵; $[C^{th}]$ 为热刚度矩阵; $[M]$ 为温度形函数;

$[\Delta T]$ 为温度变化量。

$$H = \int \rho C(T) dt, \quad (3)$$

2.2 材料的热物性参数

基体材料选用抽油泵内筒材料 45 钢,熔覆层材料为 FeCoNiCrAl 高熵合金粉末。激光熔覆过程中的相变潜热和熔化潜热通过焓值表示,采用热焓法计算焓值^[13],公式为

式中: H 为焓值, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$; t 为时间, s 。密度、热导率、比热容等热物性参数均为温度的函数。使用插值法获得该材料在未知温度下的热物性参数,如表 1 所示。熔覆层材料 FeCoNiCrAl 高熵合金粉末的热物性参数如表 2 所示。

表 1 45 钢的热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of 45 steel

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Specific heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elasticity modulus/ GPa	Poisson ratio
25	47.68	472	7.824	210	0.26
100	45.53	480	7.824	205	0.26
200	40.44	498	7.824	185	0.26
400	36.02	560	7.824	185	0.26
1000	24.02	602	7.824	185	0.26

表 2 高熵合金 FeCoNiCrAl 的热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of high-entropy alloy FeCoNiCrAl

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Specific heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elasticity modulus/ GPa	Poisson ratio
25	11	430	8.02	17	0.25
200	15	453	8.02	16	0.25
400	19	500	8.02	15	0.25
600	23	522	8.02	14	0.25
1000	31	821	8.02	13	0.25

2.3 物理模型

激光熔覆高熵合金的基体为长 50 mm、宽 20 mm、高 10 mm 的长方体,熔覆区的长、宽和高分别为 50 mm、5 mm 和 0.5 mm,位于基体上表面的中间部分。熔覆区的有限元模型如图 1(a) 所示,图 1(b) 为图 1(a) 中红圈部分的放大图。

为了提高仿真精度,在熔覆区域及相邻基体区

域对网格进行精细划分,细化后网格的长、宽、高分别为 0.5 mm、0.5 mm、0.1 mm。有限元单元选择六面体高阶实体热单元,同时利用表面效应单元加载与外界的对流换热^[14]。激光熔覆高熵合金采用的是预置粉法,粉末被预置在涂层上面,然后采用激光进行扫描。通过 ANSYS 软件的 APDL 语言进行二次开发,实现热源对高熵合金的连续扫描。

模型的初始温度为环境温度(25 $^{\circ}\text{C}$),激光为圆形平顶光束,激光加载区域的边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q = \frac{\eta P}{\pi R^2}, \quad (4)$$

式中: q 为激光功率密度; n 为边界外法线方向; P 为激光功率; η 为激光能量吸收率; R 为激光光斑半径。

激光加载区域以外的区域与外界的热交换为对流换热,故采用第三类热边界条件^[15]。基体底面与耐火砖接触,而耐火砖的热导率很低,因此基体底面可以认为是绝热材料,不与外界换热。

应力计算的热边界条件为瞬态温度场,力的约

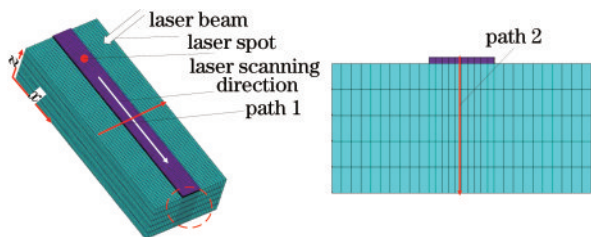


图 1 激光熔覆高熵合金的有限元模型。(a)激光熔覆高熵合金的有限元模型;(b)有限元模型的局部放大图

Fig. 1 Finite element model of laser cladding high entropy alloy. (a) Finite element model of laser cladding high-entropy alloy; (b) partially enlarged view of finite element model

束条件是对基体材料底面进行位移约束,这与实际试验过程中底面的约束是一致的。

3 结果分析与讨论

3.1 激光参数对温度场的影响

图 2 是在激光功率变化的情况下扫描到 5 s 时路径 1 和路径 2 上的温度分布。可以看出,随着激光功率增大,最高温度也随着升高。本文采用预置粉末的方式将高熵合金预置在基体上,然后用激光进行扫

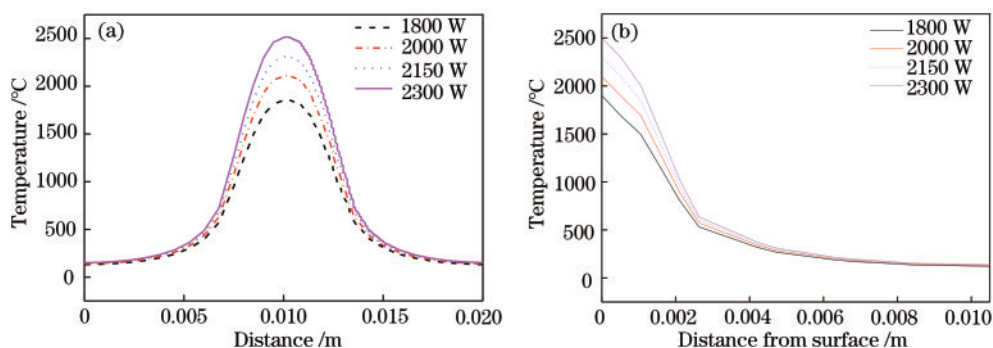


图 2 激光功率对温度的影响(激光扫描速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)。(a) 路径 1; (b) 路径 2

Fig. 2 Effect of laser power on temperature (laser scanning speed of $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$). (a) Path 1; (b) path 2

图 3 是在激光扫描速度变化的情况下扫描到 5 s 时路径 1 和路径 2 上的温度分布。从图 3(a)中可以观察到,在垂直于激光扫描方向上,温度对称分布,但空间上的温度梯度则随扫描速度变化而发生了改变。激光扫描速度对提取的路径温度具有影响的原因如下:激光扫描速度的大小会影响激光能量作用在单位区域的时间,由于激光具有快速加热和冷却的特性,能量持续作用的时间会显著影响材料的温

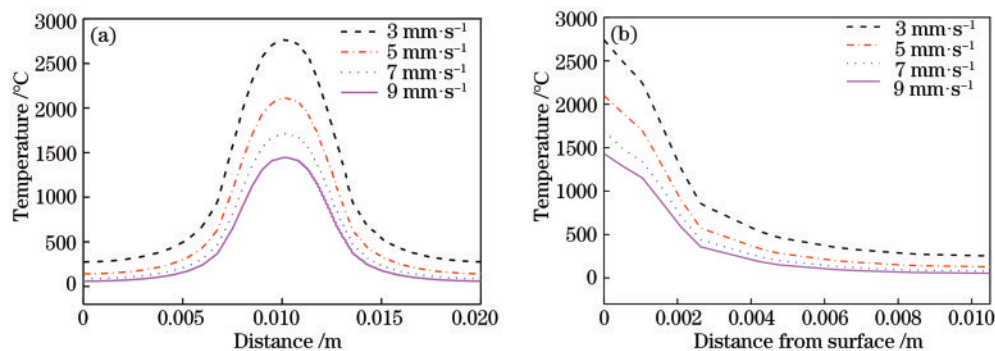


图 3 激光扫描速度对温度的影响(激光功率为 2000 W)。(a) 路径 1; (b) 路径 2

Fig. 3 Influence of laser scanning speed on temperature (laser power of 2000 W). (a) Path 1; (b) path 2

3.2 残余应力场模拟分析

温度场求解完成后,通过 APDL 语言中的命令流转换热分析单元,并将温度场的结果作为施加载荷,从而得到冷却后熔覆模型的残余应力分布云图,

由图 2(a)可以看出:由于激光加载的热源是对称的,而且沿激光扫描方向的中心线左右的几何结构也是对称的,因此在垂直于激光扫描方向上,温度是对称分布的;激光扫描到的区域,温度梯度大,而远离激光熔覆的区域,温度梯度逐渐降低,这与激光的快速局部加热特性有关。由图 2(b)可以看出,在路径 2 的方向上,从熔覆层表面到基体的温度梯度发生了改变,且最大温度梯度没有出现在熔覆层表面。温度梯度的大小与熔池周边区域的传导散热等因素有关。

升以及温度的空间分布。根据传热学原理,热量由高温区域向低温区域传递,当激光扫描速度较小时,单位区域的激光作用时间就会增加,同时热量有更多的时间在材料内部进行扩散。高功率密度激光的输入会引起局部快速加热,当加热速度大于能量扩散速度时就会导致局部温度升高,温度梯度增大。

从图 3(b)可以看出,随着激光扫描速度增加,路径 2 上的最高温度和温度梯度发生了变化。

如图 4 所示。图 4 中正值为拉应力,负值为压应力。由图 4 可以看出:在激光熔覆区域, x 、 y 方向的最大残余拉应力位于熔覆层与基体界面且靠近熔覆层的区域, z 方向的最大拉应力位于底面,这是因为残余

应力的形成与温度梯度、结构约束等有关;在熔覆层与基体交界区域, x 方向和 y 方向的残余拉应力比较大,这是因为熔覆层与基体呈冶金结合状态,在熔覆层和基体界面处形成了一个结构突变区域。从图 4

中还可以看出, x 方向的最大残余拉应力高于 y 方向和 z 方向的最大残余拉应力, x 方向的最大残余拉应力易诱发 y 方向的裂纹,且 x 方向的拉应力主要集中在熔覆层与基体界面且靠近熔覆层的区域。

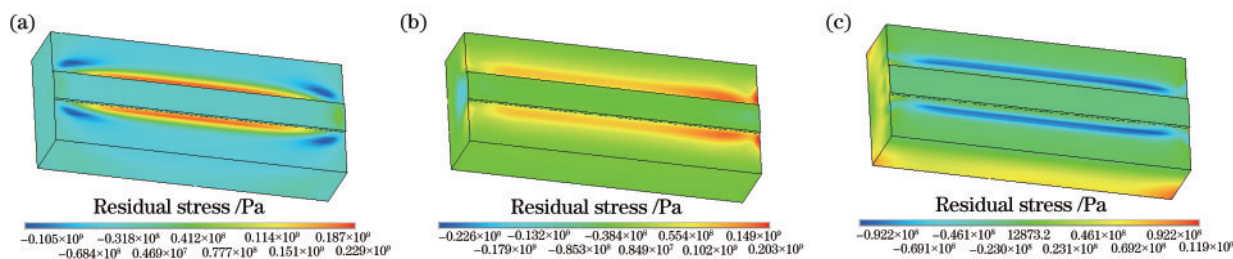


图 4 残余应力场分布(激光扫描速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 激光功率 $P=2000 \text{ W}$)。(a) x 方向的残余应力;(b) y 方向的残余应力;(c) z 方向的残余应力

Fig. 4 Residual stress field distributions (laser scanning speed of $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, laser power of 2000 W). (a) Residual stress in x direction; (b) residual stress in y direction; (c) residual stress in z direction

由图 5 可以看出:当激光功率为 1800 W 时,最大残余应力最小,当激光功率增大到 2000 W 时,最大残余应力急剧增大。这是由于残余应力与温度梯度、最高温度等相关,而输入的激光能量只有一部分使局部区域升温,另一部分则通过热传导熔化周围的金属;当增加的能量所形成的时间和空间上的温度分布导致高温下的塑性变形量增加时,就会诱发更大的残余应力。随着激光功率增大, x 方向的最大残余应力增大,且当激光功率增大到一定值

后,最大残余应力增大的速率就会降低; y 方向的最大残余应力则是先降低后增大。 x 方向残余应力的变化与温度梯度相关, x 方向是激光扫描方向,在激光熔覆过程中,随着激光功率增大,激光输入的能量增加,在温度梯度增大等的综合作用下, x 方向熔覆层中的残余应力增大;随着激光功率增大,由于熔池温度升高诱发的激光在空间的温度分布等综合作用, y 方向残余应力随激光功率的增大而先降低后升高。

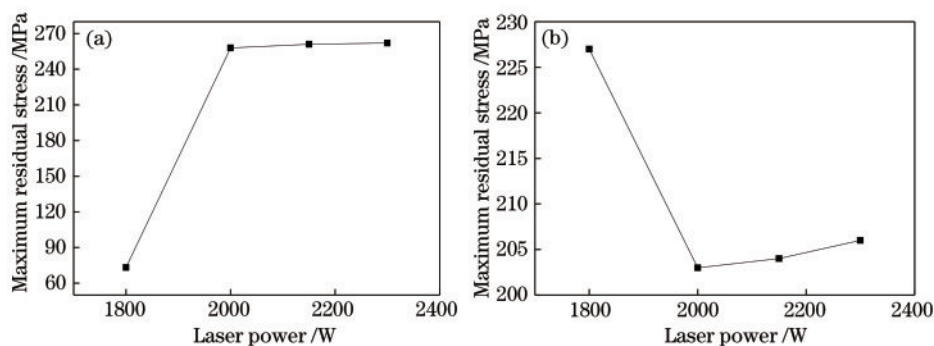


图 5 激光功率对最大残余应力的影响。(a) x 方向的最大残余应力;(b) y 方向的最大残余应力

Fig. 5 Effect of laser power on maximum residual stress. (a) Maximum residual stress in x direction; (b) maximum residual stress in y direction

图 6 为激光功率对路径 1 上残余应力的影响规律。由图 6(a)、(b)可以看出, x 方向和 y 方向上的残余拉应力在靠近熔覆层两侧时增大;由图 6(c)可以看出, z 方向的残余拉应力从熔覆层向两侧变为压应力。对比图 6(a)、(b)、(c)可以发现,最大残余拉应力主要集中在 x 方向上。在激光熔覆过程中,温度在时间和空间上的非均匀分布,以及空间上非均匀分布

的温度引起的非均匀性变形、熔覆层与基体交界因几何结构突变而诱发的应力集中等因素,导致熔覆层与基体交界区域出现了高的残余拉应力^[16-18]。

图 7 为固定激光扫描速度 $v=5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,激光功率对路径 2 上残余应力分布的影响。从图 7(a)可以看出:在路径 2 的 x 方向上,从熔覆层表面到基体内部,残余应力逐渐降低,由拉应力转

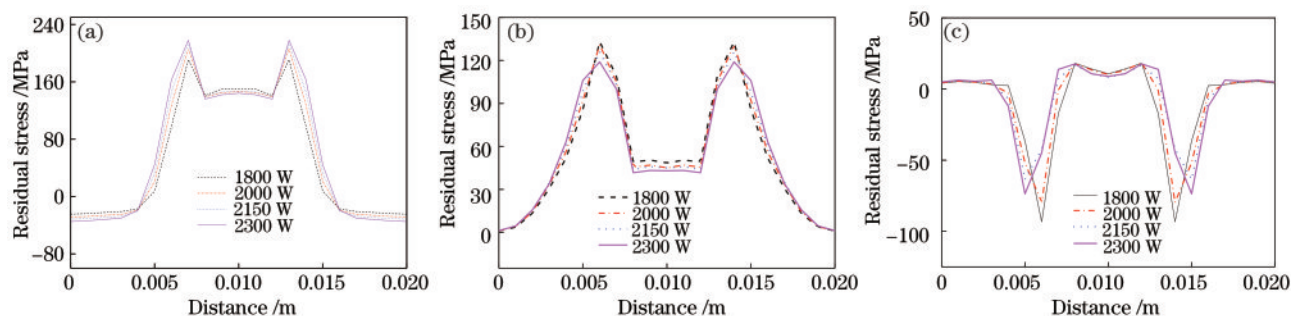


图 6 激光功率对路径 1 上残余应力的影响。(a) x 方向的残余应力;(b) y 方向的残余应力;(c) z 方向的残余应力

Fig. 6 Effect of laser power on residual stress on path 1. (a) Residual stress in x direction; (b) residual stress in y direction; (c) residual stress in z direction

变为压应力;从基体内部到基体底部,残余应力逐渐增加,由压应力转变为拉应力。残余应力的形成与高温下材料被约束产生的塑性变形等相关,当试样温度降到室温时,高温下的塑性变形区域由于不能恢复到原状,导致高温状态下为受压状态的高温区域,在室温下变成受拉状态。残余应力的大小与温度高低、由温度梯度引起的非协调变形约束以及基体外部的约束等因素相关。由图 7(b)可以看出, y 方向的残余应力在熔覆层表面为压应力,随着到表面距离的增加,残余应力由压应力变

为拉应力,然后再由拉应力变成压应力。由图 7(c)可以看出: z 方向的残余应力在熔覆层与基体交界处最大。 z 方向的最大残余应力没有出现在熔覆层表层,而是在距熔覆层表层的一定距离处。这是由于熔覆层表层在 z 方向可以自由变形,而且在距离熔覆层表层一定距离的区域,受到了周边材料的约束以及熔覆层与基体界面的几何结构的约束作用。

图 8 为激光扫描速度对路径 1 上残余应力的影响规律。从图 8(a)、(b)可以看出,在熔覆层两侧与

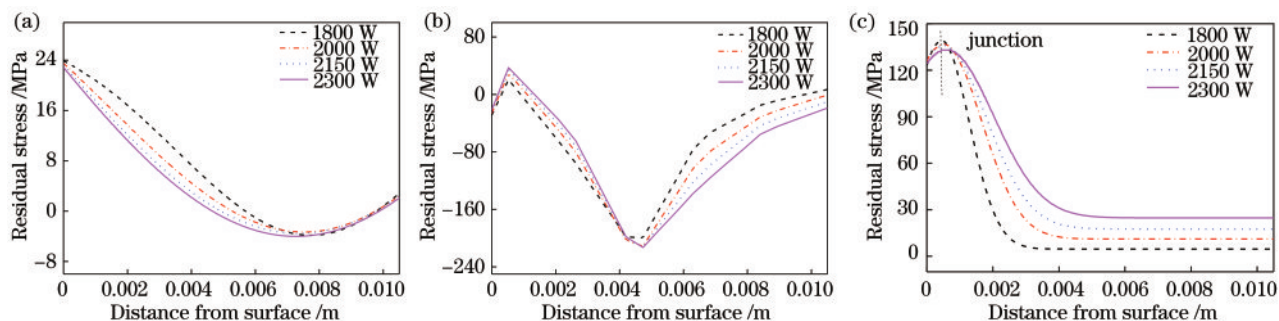


图 7 激光功率对路径 2 上残余应力的影响。(a) x 方向的残余应力;(b) y 方向的残余应力;(c) z 方向的残余应力

Fig. 7 Effect of laser power on residual stress on path 2. (a) Residual stress in x direction; (b) residual stress in y direction; (c) residual stress in z direction

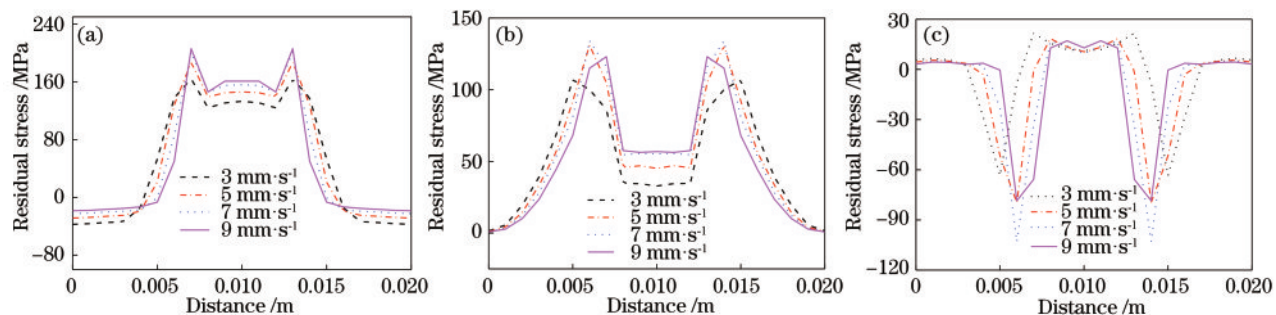


图 8 激光扫描速度对路径 1 上残余应力的影响。(a) x 方向的残余应力;(b) y 方向的残余应力;(c) z 方向的残余应力

Fig. 8 Effect of laser scanning speed on residual stress on path 1. (a) Residual stress in x direction; (b) residual stress in y direction; (c) residual stress in z direction

基体的交界处, x 、 y 方向上的残余应力最大, 并向熔覆层左右两侧逐渐减小。这是因为熔覆层两侧与基体交界处在冷却收缩时受到的变形阻力较大, 因此残余应力比较大。由图 8(c) 可以看出, z 方向的残余应力在熔覆区域为拉应力, 且从中部向两侧变为压应力。这是因为熔覆层受激光加热而膨胀, 对两侧的基体有挤压作用, 但同时基体对其有约束作用, 因此熔覆层两侧呈现压应力^[19-20]。

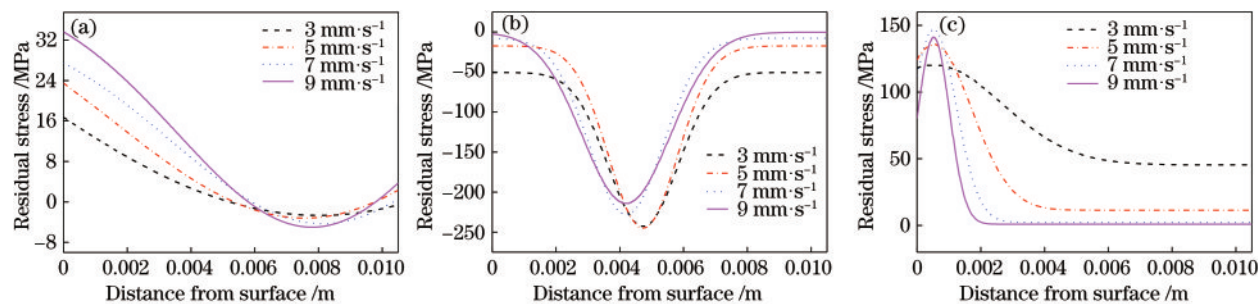


图 9 激光扫描速度对路径 2 上残余应力的影响。(a) x 方向的残余应力; (b) y 方向的残余应力; (c) z 方向的残余应力

Fig. 9 Effect of laser scanning speed on residual stress on path 2. (a) Residual stress in x direction; (b) residual stress in y direction; (c) residual stress in z direction

4 试验验证

激光熔覆过程的残余应力会影响熔覆层中裂纹的形成^[21-23], x 方向的残余应力易导致 y 方向的裂纹, y 方向的残余应力易导致 x 方向的裂纹。由仿真结果可知, x 方向的最大残余拉应力高于 y 方向和 z 方向的最大残余拉应力, 易产生 y 方向的裂纹。因此本文在仿真研究的基础上进行了试验验证。

验证试验采用 45 钢为基体材料, 基体尺寸为 $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 激光熔覆粉末选择粒径为 $45 \sim 105 \mu\text{m}$ 的 FeCoNiCrAl 高熵合金粉末。试验前用 50 目砂纸去除基体表面的氧化层, 然后用丙酮进行清洗, 以去除基体表面的油污。试验设备为 Nd:YAG 固体激光器, 激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 额定功率为 3 kW, 光斑半径为 2.5 mm。试验采用的是预置粉末法, 用氩气作为保护气, 氩气流量为 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采用与仿真一致的参数开展激光熔覆试验, 然后采用荧光粉对试样进行探伤。

当激光扫描速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 激光熔覆高熵合金表面裂纹随激光功率的变化如图 10 所示, 裂纹数变化如图 11 所示。从图 10 和图 11 可以看到: 裂纹垂直于激光扫描方向, 且随着激光功率增大, 裂纹数增多。这与仿真时 x 方向的残余拉应力最大, 且残余应力随着激光功率增加而增大的趋势一致。

图 9 为固定激光功率为 2000 W 时, 激光扫描速度对路径 2 上残余应力的影响规律。从图 9(a) 可以看出, x 方向的残余应力随着远离熔覆区而逐渐降低, 远离熔覆区的位置表现为压应力。由图 9(b) 可以看出, 在基体中部表现为压应力, 这与激光在空间的温度幅值、温度梯度以及约束等有关。从图 9(c) 可以看出, 在基体与熔覆层熔合线处的应力最大, 这是因为熔覆层与基体的冶金结合约束了变形的释放, 从而导致残余应力较大。

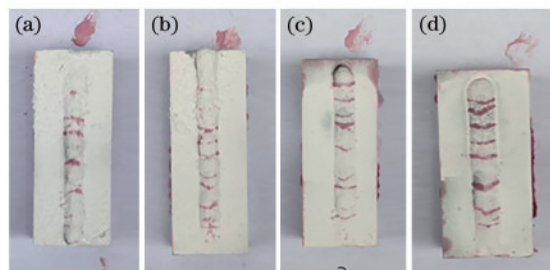


图 10 激光熔覆高熵合金表面裂纹随激光功率的变化。(a) $P=1800 \text{ W}$; (b) $P=2000 \text{ W}$; (c) $P=2150 \text{ W}$; (d) $P=2300 \text{ W}$

Fig. 10 Laser cladding high-entropy alloy surface cracks as a function of laser power. (a) $P=1800 \text{ W}$; (b) $P=2000 \text{ W}$; (c) $P=2150 \text{ W}$; (d) $P=2300 \text{ W}$

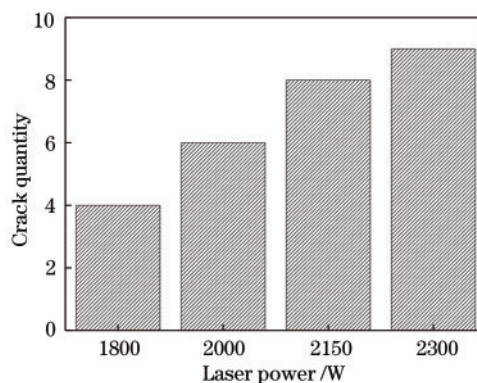


图 11 裂纹数随激光功率的变化

Fig. 11 Variation of crack quantity with laser power

当激光功率为 2000 W 时,激光熔覆高熵合金表面裂纹随激光扫描速度的变化如图 12 所示,裂纹数的变化如图 13 所示。从图 12 和图 13 可以看出,随着激光扫描速度增大,垂直于 x 方向的裂纹数目增多,这与仿真中最大残余拉应力为 x 方向,且残余应力随着激光扫描速度增加而增大的趋势一致。

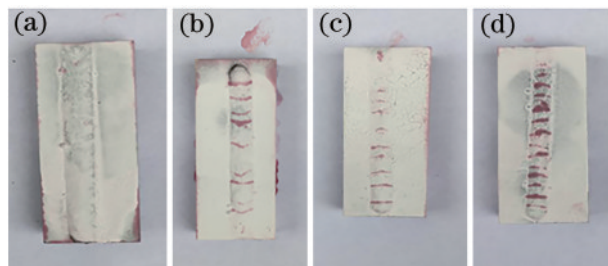


图 12 激光熔覆高熵合金表面裂纹随激光扫描速度的变化。(a) $v=3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $v=5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $v=7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $v=9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 12 Laser cladding high-entropy alloy surface cracks as a function of laser scanning speed. (a) $v=3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $v=5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $v=7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $v=9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

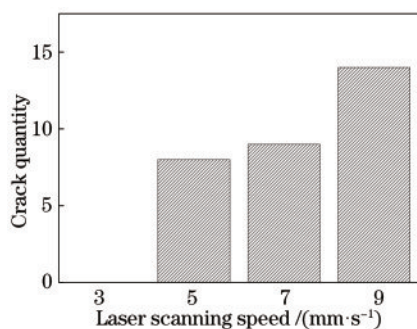


图 13 裂纹数随激光扫描速度的变化

Fig. 13 Variation of crack quantity with laser scanning speed

5 结 论

激光熔覆的快速局部加热和冷却特性,使得激光熔覆区域高的温度梯度主要集中在熔覆层区域。在单道激光熔覆过程,由于熔覆层与基体交界区域存在几何结构突变,以及熔覆区域温度空间分布的非均匀性,熔覆区域与基体交界区域存在高的残余应力。残余应力的形成与温度峰值、温度分布等因素有关。随着激光功率和扫描速度增加, x 方向的最大残余拉应力有增大的趋势。

参 考 文 献

[1] Zhang X M, Hu S, Zhao Y R, et al. Research progress of wear-resistant technology for the barrel

and plunger of pumpjack[J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(1): 73-80.

张心明, 胡嵩, 赵怡然, 等. 抽油泵泵筒与柱塞表面耐磨技术研究进展[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(1): 73-80.

[2] Zheng L. Investigation on the friction and lubrication properties of bionic hexagonal-textured surface for pumpjack plunger[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

郑龙. 抽油泵柱塞仿生六边形织构表面摩擦和润滑性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[3] Pang M, Tan W D. Effect of preheating temperature on residual stress field of laser melting RuT300 valve seats [J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 296-301.

庞铭, 谭雯丹. 预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场的影响研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 296-301.

[4] Pang M, Zhang X H. Retardation of RuT300 end pit defects by laser melting[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 131-138.

庞铭, 张啸寒. 激光熔凝强化 RuT300 收尾凹坑缺陷抑制方法研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 131-138.

[5] Kempen K, Vrancken B, Bults S, et al. Selective laser melting of crack-free high density M2 high speed steel parts by baseplate preheating[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 061026.

[6] Zaeh M F, Branner G. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting [J]. Production Engineering, 2010, 4(1): 35-45.

[7] Yang J, Chen J, Yang H O, 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.

[8] Shi L K, Gao S Y, Xi M Z, et al. Finite element simulation for laser direct depositing processes of metallic vertical thin wall parts I. The simulation for temperature field during depositing processes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5): 449-453.

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 I. 沉积过程中温度场的模拟[J]. 金属学报, 2006, 42(5): 449-453.

[9] Wang L F, Jiang X H, Zhu Y H, et al. An approach

- to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(9/10/11/12): 3535-3546.
- [10] Bian H Y, Zhai Q X, Qu S, 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.
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.
- [11] Pang M, Fu Y X. Numerical simulation study on asymmetric distribution of laser melting magnesium alloy pool [J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(20): 110-113.
庞铭, 浮艺旋. 激光熔凝镁合金熔池非对称分布数值模拟研究 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(20): 110-113.
- [12] Li M Y, Han B, Cai C B, et al. Numerical simulation on temperature and stress fields of laser clad Ni-based coating [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.
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, 32, 114.
- [13] Hu H W, Ding X P, Duan X M, et al. Numerical study on selective laser melting thermal behavior of AlSi10Mg aluminum alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(20): 53-57.
胡红伟, 丁雪萍, 段宣明, 等. AlSi10Mg 铝合金选区激光熔化热行为的数值研究 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(20): 53-57.
- [14] Pang M, Zhang X H, Fu W, et al. Numerical simulation of laser melting temperature field of RuT300 valve seat [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(22): 117-123.
庞铭, 张啸寒, 付威, 等. RuT300 气门座激光熔凝温度场数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47(22): 117-123.
- [15] Liu X D, Jiang H L, Xie M. Analysis on residual stress of Q345 steel in laser cladding process [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(3): 226-230.
刘晓东, 姜洪雷, 谢蒙. Q345 钢激光熔覆的残余应力分析 [J]. *金属热处理*, 2020, 45(3): 226-230.
- [16] Yu T B, Qiao R Z, Han J B, et al. Residual stress numerical simulation of laser cladding on inclined substrate [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(2): 75-79.
于天彪, 乔若真, 韩继标, 等. 倾斜基体激光熔覆残余应力场的数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49(2): 75-79.
- [17] Gong C, Wang L F, Zhu G X, et al. Numerical simulation of residual stress in 316L stainless steel cladding layer by laser additive manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(3): 402-408.
龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造 316L 不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究 [J]. *应用激光*, 2018, 38(3): 402-408.
- [18] Gong C, Wang L F, Zhu G X, et al. Influence of process parameters on the residual stress of cladding layers by laser additive manufacturing [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(2): 263-268.
龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造工艺参量对熔覆层残余应力的影响 [J]. *激光技术*, 2019, 43(2): 263-268.
- [19] Li G Q, Zhu G X, Zhao L, 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.
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.
- [20] Li G Q, Zhu G X, Zhao L, et al. Influence of defocus amount on temperature field and stress field of hollow annular laser cladding layer [J/OL]. *China Mechanical Engineering* [2020-06-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZGJX20200405000&v=ekpxZz4Orb6p5d8%25mmd2ByvcF4AyuV1ghrw5lp7lzWCKtu1Qf nbhwQQZsUfmckcZNyUHD>.
李广琪, 朱刚贤, 赵亮, 等. 离焦量对中空环形激光熔覆层温度场及应力场的影响研究 [J/OL]. *中国机械工程* [2020-06-23]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZGJX20200405000&v=ekpxZz4Orb6p5d8%25mmd2ByvcF4AyuV1ghrw5lp7lzWCKtu1Qf nbhwQQZsUfmckcZNyUHD>.
- [21] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, et al. Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051404.
任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051404.
- [22] Bian P Y, Yin E H. Effect of laser power for metal selective laser melting on morphology of 316L stainless

steel molten pool and residual stress [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011403.

边培莹, 尹恩怀. 选区激光熔化激光功率对 316L 不锈钢熔池形貌及残余应力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011403.

[23] Pang M, Tan W D. Numerical simulation of stress field

of laser phase transformation hardening vermicular graphite cast iron based on beam discretization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231403.

庞铭, 谭雯丹. 基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁应力场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231403.