激光熔覆 316L 不锈钢残余应力工艺参数的优化模拟

王丽芳[1]， 孙亚新[2]， 朱刚贤[2*]， 龚丞[2]， 宋天麟[2]
([1]苏州大学工程训练中心，江苏 苏州 215021； [2]苏州大学机电工程学院，江苏 苏州 215021)

摘要 为了降低残余应力对激光熔覆层性能的影响，利用 ANSYS 软件建立了单层熔覆模型，采用正交实验法来探究激光工艺参数(激光功率、扫描速度与光斑直径)对熔覆层残余应力的影响规律，获得了优化的工艺参数。研究结果表明，扫描速度及激光功率对残余应力的影响最大，其次是光斑直径；对获得的优化工艺参数组合进行了计算，残余应力减低为 192 MPa。为工艺试验参数选择提供指导。

关键词 激光熔覆； 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.20193903.376

Optimization Simulation of Process Parameters on the Residual Stress in 316L Stainless Steel by Laser Cladding

Wang lifang[1]， Sun Yaxin[2]， Zhu Gangxian[2]， Gong Chen[2]， Song Tianlin[2]
([1]*Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*;
[2]*School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*)

Abstract In order to reduce the influence of residual stress on the quality of laser cladding layers, ANSYS software was adopted to establish a single-track model, the effect of process parameters on residual stress of cladding layers were investigated by using orthogonal test, and the optimized process parameters were obtained. The results show that scanning speed and laser power have greatly effect on residual stress, and next come spot diameter. The residual stress was calculated under the optimized process parameter combination, which is reduced to 192MPa. It provides guidance for selecting process parameters in experiments.

Key words laser cladding； residual stress； numerical simulation

0 引言

激光熔覆是一个非稳态、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力学性能及尺寸的稳定性，严重时将直接引发裂纹缺陷[1]。所以研究激光熔覆层残余应力对控制激光熔覆过程的变形及开裂具有重要的意义。

针对激光熔覆层残余应力研究，目前大多采用数值模拟的方法。如 G Palumho 等[2]研究了激光熔覆环形构件时，工艺参数对熔覆层温度场和应力场的影响规律。郝南海等[3]研究了激光熔覆 302 不锈钢时熔覆层温度场和应力场分布规律，结果表明熔覆层处于拉应力状态，并提出基体预热可有效降低残余应力。程广萍等[4]研究了扫描速度对熔覆层尺寸的影响及对残余应力和变形的影响规律。以上研究大多是研究了单一工艺参数对熔覆层残余应力分布规律，而鲜有以残余应力为评价指标，以优化出合理的工艺参数，为工艺实验参数选择提供指导。

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，采用正交试验方法，以残余应力为评价指标，综合分析工艺参数对熔覆层残余应力的影响规律，以获得最优的工艺参数组合。

收稿日期：2018-11-05
基金项目：国家重点研发计划资助项目(项目编号：2016YFB1100300)；苏州市科技计划项目(项目编号：SYG201643)
作者简介：王丽芳(1979－)，女，硕士，实验师，主要从事激光熔覆成形技术方面的研究。E-mail：lfwang@suda.edu.cn

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 激光熔覆有限元模型的建立

1.1 几何模型与仿真假设

由于随工艺参数的变化，熔覆层尺寸逐渐变化，进而几何模型也需实时变化。根据前期基础实验，选取试验所采用的工艺参数范围为激光功率 600～1 000 W，扫描速度 5～15 mm/s，光斑直径 1.5～2.5 mm，送粉量设定在 8 g/min 保持不变。将采用 $L_9(3^3)$ 正交表对应的工艺参数进行单道熔覆实验，通过光学显微镜对获得的单道熔覆截面尺寸进行测量，其结果及正交试验设计如表 1 所示。

表 1 正交试验设计

Tab. 1 Orthogonal test design

试验号	激光功率 /W	扫描速度 /(mm/s)	光斑直径 /mm	宽度 /mm	高度 /mm
1	600	5	1.5	1.6	1.0
2	600	10	2.5	1.8	0.4
3	600	15	2.0	1.9	0.3
4	800	5	2.5	2.2	0.9
5	800	10	2.0	2.2	0.6
6	800	15	1.5	1.5	0.5
7	1 000	5	2.0	2.3	1.1
8	1 000	10	1.5	1.4	0.7
9	1 000	15	2.5	1.9	0.4

图 1 为试验号 1 对应的有限元模型，其中熔覆层的尺寸长×宽×高是 30.0 mm×1.6 mm×1.0 mm，基板尺寸是 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 1(b)所示，在远离熔覆层的区域选择较大的网格划分。最小的单元尺寸为 0.27 mm×0.30 mm×0.17 mm。

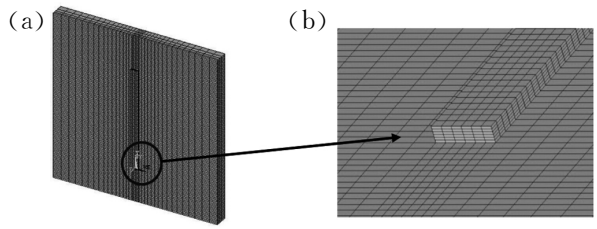


图 1 激光熔覆层有限元模型及网格划分
(a)整体图 (b)局部放大图

Fig. 1 Finite element model and mesh generation of laser cladding layer

激光熔覆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 Von Mises 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。

模拟激光熔覆过程中材料的熔覆行为，主要是通过 ANSYS 中的“生死单元法”[5] 来实现的。所谓“生死单元法”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 1.0×10^{-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。

1.2 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[6]

$$Q=(3\eta\frac{P}{\pi r^2})\exp(-3\frac{R^2}{r^2}) \tag{1}$$

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) 为

$$\begin{cases}x_0=0\\y_0=vt\end{cases} \tag{2}$$

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为

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R=\sqrt{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2} \tag{3}$$

所以熔覆层表面上任意一点(x,y)的热流密度可以表示为

$$\begin{cases} Hflux=Q & R\leqslant r \\ Hflux=Q & R>r \end{cases} \tag{4}$$

1.3 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[7-9],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2所示。

表2 316L不锈钢的热物性参数

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

Temp /℃	C /[J/(kg·℃)]	Kxx /[W/(m·℃]	Dens /(kg/m^3)	E / Pa	Aplx /K^{-1}	prxy	σ_σ /Pa	E / Pa
20	477	12.6	8	2.21×10^{11}	15.3e−06	0.3	0.297e9	2.21e10
200	515	16.3	8	1.96e11	15.3e−06	0.3	0.221e9	1.96e10
400	550	19.8	8	1.86e11	15.3e−06	0.3	0.202e9	1.86e10
600	582	22.6	8					
700	611	23.9	8	1.55e11	15.3e−06	0.3	0.099e9	1.55e10
800	640	25.5	8					
900	669	26.4	8					
1 000	675	27.5	8	0.50e11	15.3e−06	0.3	0.089e9	0.50e10
1 200	739	29.7	8	0.35e11	15.3e−06	0.3	0.059e9	0.35e10
1 430	760	31.7	8					

2 计算结果与讨论

2.1 温度场分布

选取试验号1对应的基本参数进行计算,整个熔覆过程,总耗时为1 000 s,其中扫描时间为6 s,其余为冷却时间。任意取6 s瞬态的温度场分布如图2所示,其对应的剖面温度场如图3(a)和图3(b)所示。

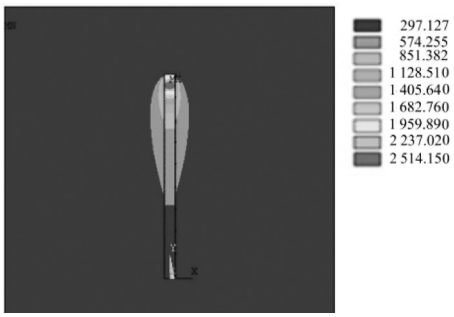
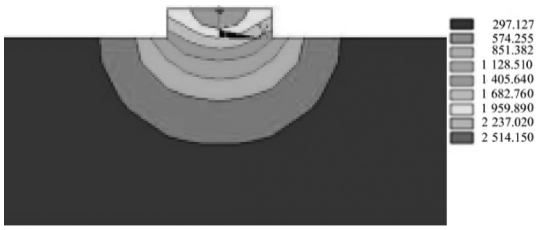


图2 $t=6$ s时的瞬态温度场

Fig. 2 Transient temperature field distribution at $t=6$ s

(a)



(b)

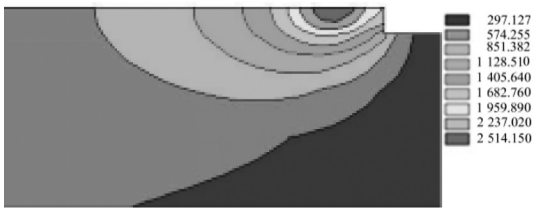


图3 $t=6$ s时温度场剖面示意图

(a) *X-Z* 平面 (b) *Y-Z* 平面

Fig. 3 Diagram of temperature field cross-section at $t=6$ s

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。

2.2 残余应力分布

2.2.1 影响因素及直观分析

为了研究熔覆层残余应力分布规律,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。以试验号1为例,对冷却1 000 s后的零件残余应力进行分析。图4为熔覆层等效残余应力Von Mises分布云图。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

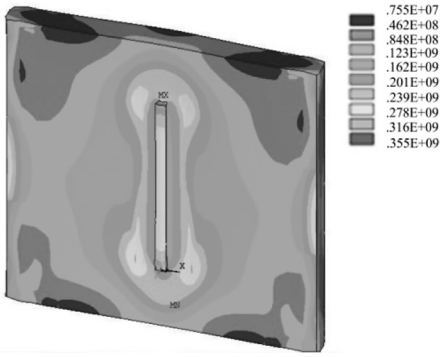


图 4　等效残余应力 Von Mises 分布图

Fig. 4　1Equivalent residual sress field distribution

从图 4 中可以看出，Von Mises 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 239 MPa。按照同样的方法，将正交试验的九组等效残余应力计算结果如表 3 所示。对等效残余应力计算结果进行直观分析，如图 5 所示。

表 3　等效残余应力正交试验计算结果

Tab. 3　Results of equivalent residual stress by orthogonal test

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
残余应力/MPa	239	204	260	244	257	253	202	235	257

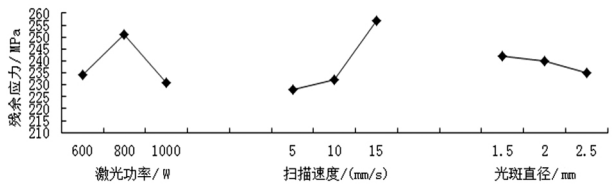


图 5　等效残余应力与因素水平的关系图

Fig. 5　Relational graph between Equivalent residual sress and factor levels

2.2.2 分析及讨论

从直观分析结果中，可以看出工艺参数对熔覆层等效残余应力的影响效果从大到小依次为：扫描速度＞激光功率＞光斑直径。在激光熔覆过程中，由于局部热输入导致不均匀温度场产生残余应力产生的直接原因。而温度梯度是激光增材过程中的重要特征参数，是不均匀温度场的直接体现，表示了单位长度上温度变化的快慢程度。一般情况下，激光熔覆过程温度梯度越大，其冷却后产生的残余应力也就越大。

在一定工艺参数范围内，随激光功率增大，残余应力先增大后降低；随扫描速度增大，残余应力逐渐增大；随光斑直径增大，残余应力逐渐降低。扫描速度对残余应力有着显著影响，主要是因为扫描速度的变化不仅影响进入熔池的能量，而且还影响进入熔池粉末量，进而对熔池的尺寸影响较大。随扫描速度增加，使得激光作用熔池时间减小，熔池体积减小，熔覆层宽度及高度均减小。当熔池温度一定时，熔覆层与基体间的温度梯度增大，凝固时的内应力增大，进而残余应力也增大，结果也与参考文献[10]一致。随激光功率增大，使得熔池体积逐渐增大，使得熔池熔化的越充分，温度梯度降低，凝固时的内应力减小，但是较小的激光功率使得熔覆层材料未能充分熔化，凝固的残余应力较小。随光斑直径增大，熔池宽度增大，使得参与变形过程的基板增大，而基板材料良好的塑性有利于吸收一定数量的残余应力，所以残余应力减小[10]。

以残余应力最小为评价指标，根据具体分析，最终获得的优化工艺参数为激光功率 1 000 W，扫描速度 5 mm/s，光斑直径 2.5 mm。

2.2.3 优化结果验证

为验证结果的正确性，将获得的最优工艺参数组合激光功率 1 000 W，扫描速度 5 mm/s，光斑直径 2.5 mm 这组实验参数再进行一次计算，结果如图 6 所示。可以获得在熔覆层整个区域内最大的残余应力值为 192 MPa。小于九组正交实验的中的残余应力计算结果，说明计算结果正确性。

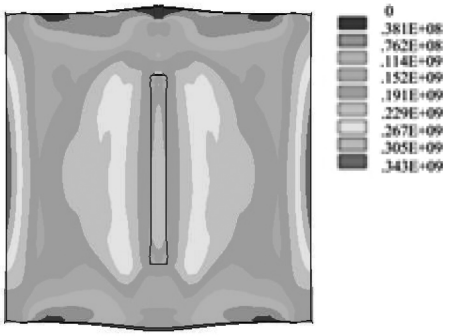


图 6　优化参数后对应等效残余应力 Von Mises 分布图

Fig. 6　Equivalent residual sress field distribution under optimization parameters

3　结论

本文针对激光熔覆层 316L 不锈钢的温度场和应力场进行了数值分析，通过正交试验方法，以残余应力为评价指标，确定了优化工艺参数组合。其中，对残余应力影响次序，扫描速度大于激光功率，激光功率大于光斑直径。对优化后的工艺参数进行计算，能够获得较小的残余应力，降低为 192 MPa。为

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

激光熔覆工艺参数的优化选择提供指导。

参考文献

[1] 董世运，闫晓玲，徐滨士. 微观组织及残余应力对瑞利波评价激光熔覆层应力的影响[J]机械工程学报，2015，51(24)：50-56.

[2] PALUMBO G，PINTO S，TRICARICO L. Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries[J]. Journal of Materials Processing Technology，2004(155-156)：1443-1450.

[3] 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)：10-14.

[4] 程广萍，李明喜，何宜柱. 激光熔覆层温度场和应力场数值模拟[J]. 热处理，2009，24(4)：49-54.

[5] 张国智，胡仁喜，陈继刚，等. ANSYS10.0 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.

[6] 刘顺洪，万鹏腾，周龙早，等. 激光焊温度场研究进展和展望[J]. 中国机械工程，2001，12(4)：478-481.

[7] 谭真，郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京：冶金工业出版社，1996.

[8] JIANG W，YAHIAOUI K，HALL F R. Finite element predictions of temperature distributions in a multipass welded piping branch junction[J]. Journal of Pressure Vessel，2005，127(1)：7-12.

[9] 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.

[10] 洪蕾，吴钢. 激光制造技术基础[M]. 北京：人民交通出版社，2008：259-287.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net