

# 激光熔覆 Inconel718 镍基合金温度场与应力场模拟

戴德平<sup>1</sup> 蒋小华<sup>1</sup> 蔡建鹏<sup>1</sup> 芦凤桂<sup>2</sup> 陈 源<sup>2</sup> 李铸国<sup>2\*</sup> 邓德安<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045

<sup>2</sup>上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

**摘要** 以 Abaqus 软件为平台, 开发了用于模拟激光熔覆过程温度场和应力场的非线性有限元计算方法。根据激光熔覆过程的特点, 通过开发 Abaqus 用户子程序建立了相应的移动热源模型。利用开发的计算方法, 对激光单道单层熔覆、单道双层熔覆和单道十层熔覆过程的温度场和应力场进行了数值模拟。基于数值模拟结果, 对激光熔覆的温度场特征和焊接应力的演化过程进行了探究。数值模拟得到的温度-应力演化过程结果将有助于理解激光熔覆过程中冶金缺陷(如热裂纹)的形成机理和提出相应的防止对策。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 有限元; 移动热源; 温度场; 残余应力

**中图分类号** TG457.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0903005

## Numerical Simulation of Temperature Field and Stress Distribution in Inconel718 Ni Base Alloy Induced by Laser Cladding

Dai Deping<sup>1</sup> Jiang Xiaohua<sup>1</sup> Cai Jianpeng<sup>1</sup> Lu Fenggui<sup>2</sup> Chen Yuan<sup>2</sup>

Li Zhuguo<sup>2</sup> Deng Dean<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Based on Abaqus code, a nonlinear finite element method is developed to simulate temperature field and stress distribution in 718 alloy induced by laser cladding. According to the characteristics of laser cladding, a moving heat source model is established through developing a user subroutines in Abaqus code. Temperature and residual stress fields in single-channel monolayer cladding, single-channel double layers cladding and single-channel ten layers cladding are calculated using the developed computational approach. The features of temperature field and the formation of stress are investigated numerically. The results obtained from this research are helpful in deeply understanding mechanism of metallurgical defects such as hot cracking and are also beneficial for finding measures to prevent the occurrence of these defects.

**Key words** laser technique; laser cladding; finite element; moving heat source; temperature field; residual stress

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

### 1 引 言

激光熔覆也称激光包覆, 是一种先进的表面改性技术。它通过在基材表面添加熔覆材料, 利用高能量密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝的方法, 在基层表面形成与其为冶金结合的添料熔覆层<sup>[1]</sup>。与传统的堆焊和喷涂相比, 激光熔覆具有更低的稀释率、较少的气孔和裂纹缺陷, 同时还具备组织致密及熔覆

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(51275544)

作者简介: 戴德平(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事焊接数值模拟和金属材料焊接等方面的研究。

E-mail: ddp20093892@163.com

导师简介: 邓德安(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接数值模拟和金属材料焊接等方面的研究。

E-mail: deandeng@cqu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: lizg@sjtu.edu.cn

层与基体结合性好等特点,因此激光熔覆技术应用前景十分广阔。随着控制技术以及计算机技术的发展,激光熔覆技术越来越向智能化、自动化方向发展。20世纪80年代,从直线和旋转的一维激光熔覆发展到二维曲线路径的熔覆,再到20世纪90年代已经发展到可以采用三维(3D)同时运动熔覆路径来制造金属零件的水平。目前,已经把激光器、五轴联动数控激光加工机、外光路系统、自动化可调合金粉末输送系统、专用CAD/CAM软件和全过程参数检测系统集成构筑了闭环控制系统,直接制造出金属零件,标志着激光熔覆技术的发展迈上了新的台阶。

由于激光熔覆采用的激光功率较高,加热和冷却速度都较快,加之熔池尺寸较小,温度较高,难以用实验的方法测量熔池中液体的温度分布以及后续的应力分布。目前,对激光作用下的温度场主要采用数值模拟的方法<sup>[2]</sup>来获得。近几年来研究者对激光熔覆过程的数值模拟进行了大量的研究。Feng等<sup>[3]</sup>对厚板激光熔覆过程的温度场和变形进行了模拟,在研究过程中主要讨论了热输入对于熔池尺寸、残余应力和角变形的影响,但没有对多道激光熔覆过程的温度场和应力场特征进行讨论和研究。Palumbo等<sup>[4]</sup>对环形构件激光熔覆过程进行了数值模拟,探究了激光熔覆过程中焊接参数对于温度循环和应力分布的影响,在温度场研究中没有考虑结晶潜热对于温度场的影响,在应力场分析中对于激光熔覆过程的应力分布特征只考虑和分析了最终状态的应力分布而没有探究激光熔覆过程应力的演化过程。Farahmand等<sup>[5]</sup>采用高能激光器进行单道和多道激光熔覆,对温度和应力场进行了数值模拟和实验研究,研究表明数值模拟结果和实验结果得到了较好的吻合。以往的研究表明:采用数值模拟方法来分析和研究激光熔覆过程的热-力学行为是可行的,同时激光熔覆过程中的热-力学行为及热-冶金-力学耦合行为还有待做更深入系统的研究。

本文以718镍基合金为研究对象,以Abaqus软件为平台开发热-弹-塑性有限元方法对激光熔覆过程中的温度场和应力场进行模拟,重点探讨了激光熔覆过程中温度循环的特点和应力的演化与形成过程。

## 2 有限元模拟

### 2.1 激光熔覆实验和激光光斑能量分布

在数值模拟前,本文在718镍基合金上进行了单道单层、单道双层及单道十层激光熔覆实验。3个实验中采用的基材形状、尺寸及熔覆层厚度分别如图1(a)~(c)所示。实验过程中激光的能量分布如图2所示。通过实验得到的激光光斑的尺寸为6.4 mm×2.5 mm,而且在X-Z平面内呈现出近似高斯分布形状的特征。

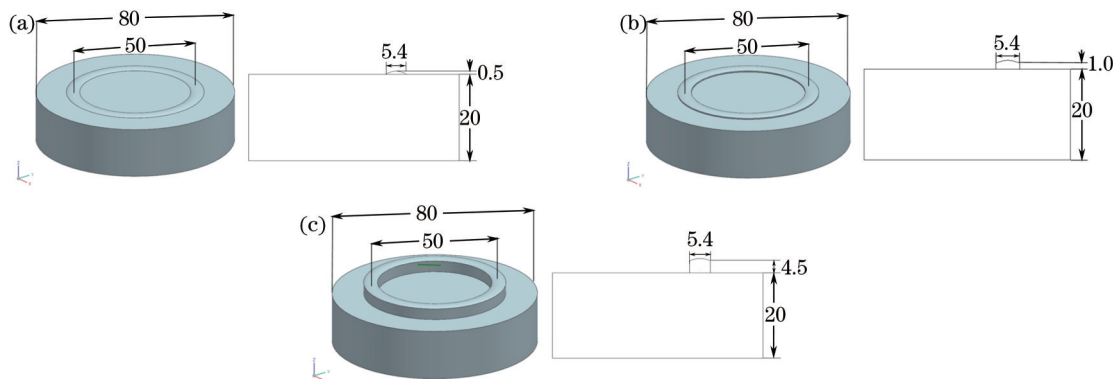


图1 激光熔敷试件的形状、尺寸及熔敷层高度(mm)。(a) 单道单层; (b) 单道双层; (c) 单道十层

Fig.1 Shape and dimension of laser cladding specimen, and height of cladding layer (mm). (a) Single-channel monolayer cladding; (b) single-channel double layers cladding; (c) single-channel ten layers cladding

### 2.2 有限元模型

建立了与激光熔覆实验中采用的3个试件——对应的3个有限元模型,3D有限元模型的形状如图3所示,基材尺寸为: $D80\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的圆柱体。需要说明的是,在有限元模型中为了避免网格划分上的困难,在模型中央留有一个小圆孔。这个小圆孔由于尺寸很小,对随后的温度场和应力场的计算影响可以忽略不计。

3个模型的熔覆层厚度分别为0.5, 1.0和4.5 mm,熔覆层的平均宽度为5.4 mm。熔覆层(焊道)所在位置如图4所示。

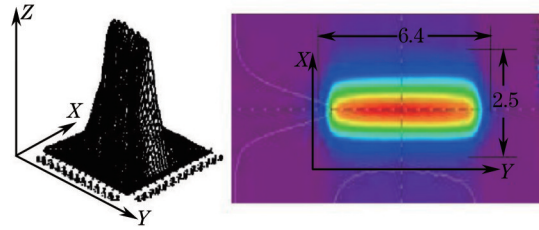


图2 半导体激光光斑能量分布示意图

Fig.2 Energy distribution of semiconductor laser spot

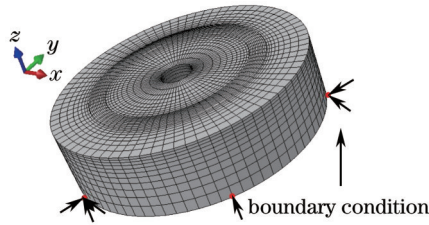


图3 三维有限元模型及拘束条件

Fig.3 3D finite element model and restraint condition

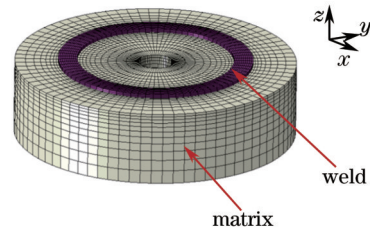


图4 焊道(熔覆)位置图

Fig.4 Location of laser path

### 2.3 温度场的计算

在温度场计算过程中,由激光光源产生的热在工件内部的传导可用非线性传热方程描述。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中  $T, \lambda, q_v, \rho$  和  $c$  分别代表温度、热传导系数、内部热源的发热率、密度和比热容。 $x, y$  和  $z$  代表直角坐标系的3个方向。

在计算模型中,根据激光热源分布特征(图2),开发了如图5所示的等密度热源来近似模拟激光热源的热输入。假设激光有效功率为  $P$ , 热源体积为  $V$ , 则可通过(2)式得到热流密度  $q$ :

$$q = \frac{P}{V} = \frac{2P}{\pi abc}, \quad (2)$$

式中  $a, b, c$  为体热源模型的形状参数,它们的值如图5所示。

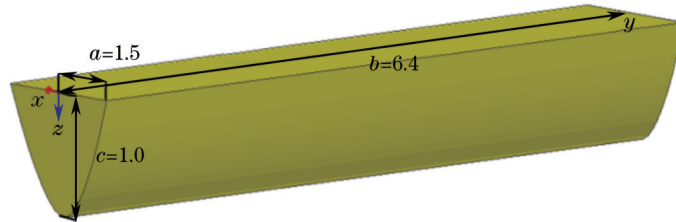


图5 热源模型形状及尺寸参数(mm)

Fig.5 Shape and dimension of heat source model (mm)

除了考虑热传导和移动热源外,还考虑了工件与周围环境之间通过对流和辐射进行热交换。工件与周围空气之间的对流热交换可用牛顿方程描述:

$$q_a = -h_a(T_s - T_a), \quad (3)$$

式中  $q_a$  是工件与周围空气之间的热交换,  $h_a$  是对流热交换系数,  $T_a$  是空气的温度(20 °C),  $T_s$  是工件表面温度。在温度计算中,假定  $h_a$  是不随温度变化的定值, 设定为  $10 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$ 。

通过热辐射损失的热量  $q_r$  可表示为

$$q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4], \quad (4)$$

式中  $\varepsilon$  是热辐射系数,在计算中  $\varepsilon$  取值为 0.8,  $\sigma$  是 Stefan-Boltzman 常数。

在本研究中,通过编写 Abaqus 中的 DFLUX 子程序和 FILM 子程序来分别模拟移动热源和散热(对流和辐射)边界条件。此外,还考虑了结晶潜热对温度场的影响,718 合金结晶潜热值取为 300 J/g,液相线温度和固

相线温度分别为 1450 °C 和 1400 °C<sup>[6]</sup>。

由于熔覆金属与母材的化学成分很接近,加上目前缺乏熔覆金属的材料参数,在有限元模型中,假设母材和熔覆材料为同一种材料,且材料为各向同性。同时采用 MODEL CHANGE/ADD 功能考虑激光熔覆过程中的粉末追加,并随时修正热边界条件。在温度场计算过程中,详细考虑了材料热物理性能随温度变化的特性。计算中采用的热物理性能参数如图 6 所示<sup>[7]</sup>。

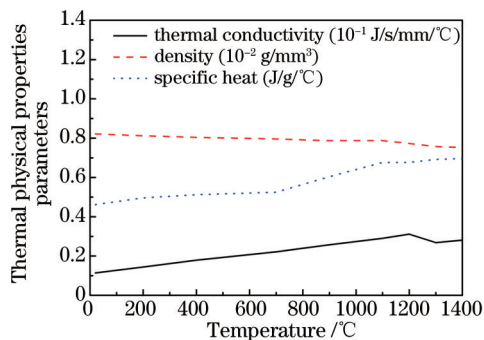


图 6 718 合金的热物理性能参数

Fig.6 Thermal physical properties of 718 alloy

## 2.4 应力场的计算

在应力分析模型中,采用了与温度计算时完全相同的有限元模型,只是单元类型不同。在温度场计算中采用了 DC3D8 单元,而应力分析中采用了 C3D8I 单元。将温度计算中得到的各节点温度循环作为热载荷加载到应力计算模型中,求解整个焊接过程中的位移、应变和应力。应力计算中,假设材料弹性应力-应变关系服从各向同性 Hooke 定律,塑性行为服从 Von Mises 准则。在热-弹-塑计算过程中考虑了材料的力学性能随温度变化的特性。718 合金的高温力学性能参数如图 7 所示<sup>[8]</sup>。在应力分析过程中忽略了加工硬化效应。

由于工件在实验过程中没有外部的拘束,所以在力学计算中,拘束条件的设定仅用来防止模型产生刚体位移,拘束条件(边界条件)如图 3 所示。热分析和应力分析的数值计算在 4 CPU 微型计算机(CPU 3.4 GHz, RAM 8.0 GB)上完成。

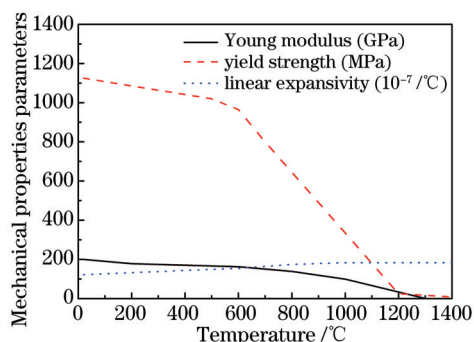


图 7 718 合金的力学性能参数

Fig.7 Temperature-dependent mechanical properties of 718 alloy

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 温度场计算结果

#### 3.1.1 温度场云图

图 8 是单道单层激光熔覆过程的温度场分布云图。从图中可以看出,熔池的最高温度约为 1952 °C,由于激光移动的速度相对于传热的速度较快,使得熔覆产生的温度梯度较大。图中灰色部分为温度高于 1450 °C 的熔池区域。可以看到激光熔池在表面层上为椭圆形分布,熔池前端温度梯度最大,而熔池后部的温度梯度较小,熔池两侧温度梯度也比较大。

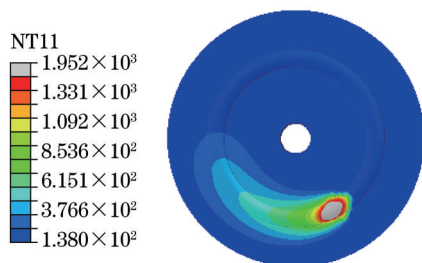


图8 激光单道单层熔覆温度场云图

Fig.8 Profile of temperature fields due to single channel monolayer cladding

图9(a)为单道双层时的第1层激光熔覆过程的温度分布,此图与图8十分相似。图9(b)为第2层激光熔覆过程的温度分布,从此图中可以看到,除了熔池最高温度略高于第1层外,其他特征与图8没有显著区别。由于第1层与第2层之间的时间间隔为10 min,第1层熔覆后,还没有完全冷却就开始熔覆第2层,这样对第2层就相当于有了一个预热,因此在相同熔覆条件下,熔池的最高温度会有所增加。总体而言,双层激光熔覆过程中的温度分布特点与单道单层熔覆没有本质上的区别。

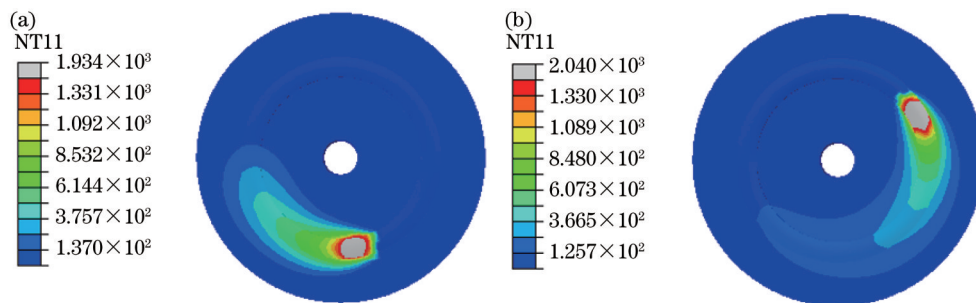


图9 单道双层熔敷过程中的温度场。(a) 第1道温度场; (b) 第2道温度场

Fig.9 Temperature fields during single-channel double cladding. (a) First layer; (b) second layer

### 3.1.2 温度热循环曲线

本节重点考察单道双层激光熔敷的温度循环,这里选取几个如图10所示的特征位置的温度循环来进行分析。

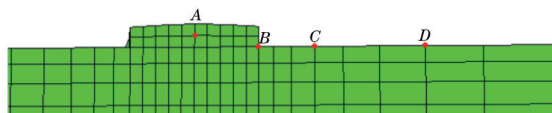


图10 温度循环的位置定义

Fig.10 Nodes whose temperature histories will be plotted

图11是单道双层激光熔覆的温度循环曲线。从图中可以看到,激光的加热速度非常快,在2 s内就可将填充粉末加热到熔点以上(大于1900 °C),同时还可以看到,高温停留(大于800 °C)时间约为2.5 s,而且冷却速度也很快。图中特征点都经历了两个温度循环。由于考虑了结晶潜热对焊接热过程的影响,所以在图11中

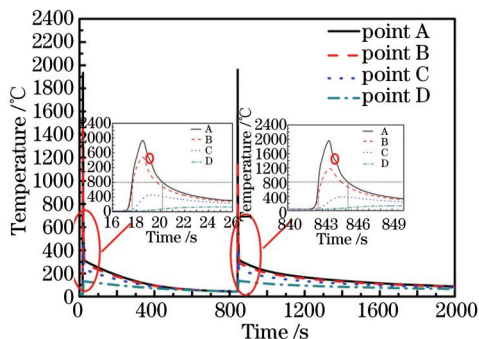


图11 A, B, C和D点的温度循环曲线

Fig.11 Temperature histories of points A, B, C and D

放大的图形部分可以看见凝固过程产生的梯台。

### 3.2 应力场数值模拟结果

本节重点考察了单道双层和单道十层的应力场分布特征。图 12 是单道双层激光熔覆过程的径向应力、

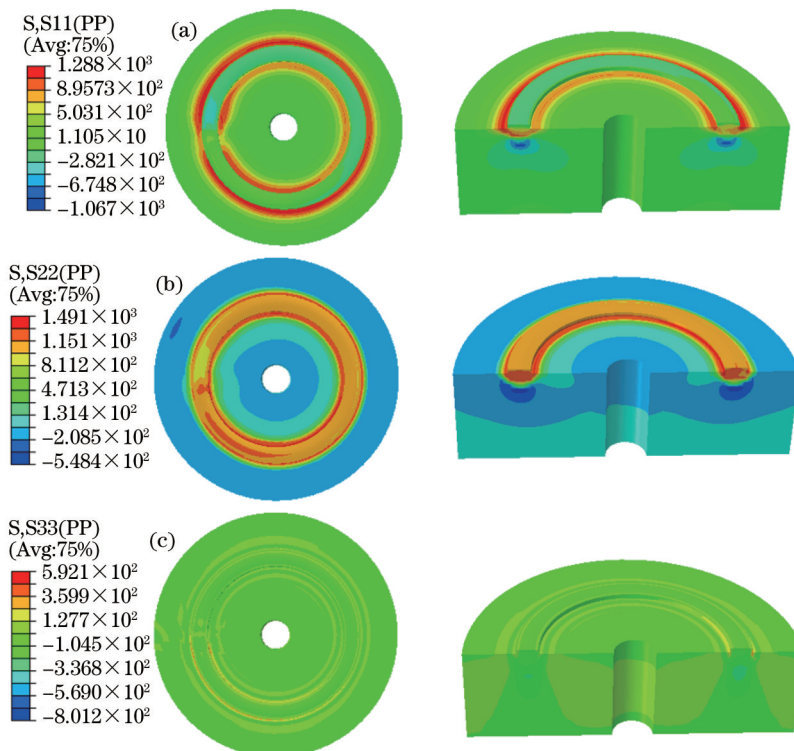


图 12 单道双层熔敷模型的残余应力分布

Fig.12 Profiles of residual stress distribution induced by single-channel double cladding

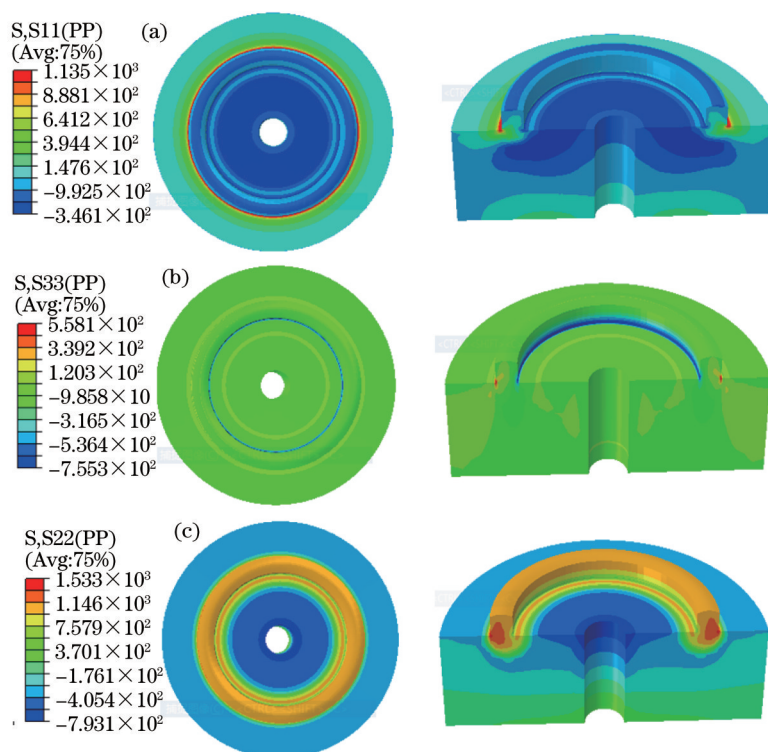


图 13 单道十层熔敷模型的残余应力分布

Fig.13 Profiles of residual stress distribution induced by single-channel ten layers cladding

周向应力和板厚方向应力的分布云图。从中可以看出,径向残余应力的峰值约为 1288 MPa,周向残余应力的峰值约为 1490 MPa,这两者均大于材料常温时的屈服极限(1125 MPa)。在板厚方向上的残余应力的峰值较小,仅为屈服强度值的一半,而且,整体上板厚方向的应力不大。在整条焊道上,由于起始位置经历了两次热循环,从而使其3个方向的应力分布与其他部位有所不同,这主要是热端部效应造成的<sup>[9]</sup>。

图 13 是单道十层激光熔覆的残余应力分布云图。从图中可以看出单道十层激光熔覆模型的应力分布特征与单道双层激光熔覆模型有类似之处。在焊道与母材交界处出现的径向残余应力比较大,其峰值接近母材的屈服极限。周向残余应力即焊缝方向残余应力最大,接近或超过了材料的屈服强度,且高拉伸应力区域集中分布在熔覆金属及其附近的区域。至于轴向残余应力,其值在焊道与母材交界处也比较大,在焊道内侧表现为压应力,在焊道外侧表现为拉应力。为了定量研究应力场的特点,选取了如图 14 所示的路径上 path 1 的应力分布来进行分析。

图 15 是单道双层熔覆 path1 上的残余应力分布。从图中可以很直观地看出,周向残余应力的值比径向残余应力的要大。对于周向残余应力,在熔覆金属与母材的交界处应力值较大,而且超过了材料的屈服强度,而在熔覆金属区域内应力值有所降低,但仍然接近材料的常温屈服极限值。对于径向残余应力而言,在熔覆金属与母材交界处产生了较高的拉应力,而且外侧的拉应力比内侧的要高,其峰值接近材料常温屈服强度,而在熔覆金属中央区域呈现出了压缩应力,在整个熔覆金属的宽度方向(径向方向)应力梯度十分大,在数毫米范围内径向应力在 -200~1150 MPa 之间变化。

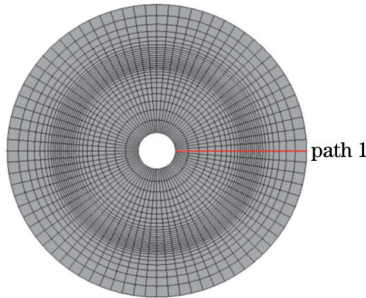


图 14 残余应力的路径定义(单道双层)  
Fig.14 Path definition of residual stress (single-channel double layers)

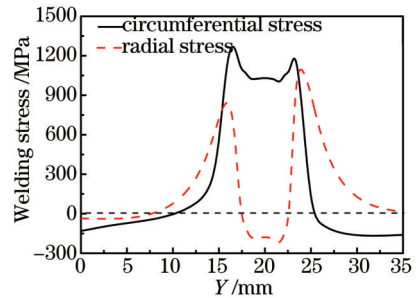


图 15 Path1 上的周向和径向应力分布 (单道双层)  
Fig.15 Circumferential stress and radial stress distribution in the path1 (single channel double layers)

在激光熔覆过程中,出现的冶金缺陷(如高温裂纹,包括结晶裂纹、液化裂纹和高温失效裂纹等)往往与焊接过程产生的应力有着密切的关系。这里基于数值模拟结果对应力随温度变化的过程进行考察。

图 16(a)和(b)分别是单道双层第 1 层激光熔覆过程中焊缝中心的温度-周向应力和温度-径向应力曲线图。从图中可以看出,在加热过程中,随着温度的升高,熔覆金属在一定的温度范围内会受到一定的压缩周向应力和压缩径向应力。当温度达到 1500 °C 时,熔覆金属受到的应力值几乎为零。在冷却过程中,当熔覆金属从液态凝固成固态的过程中,周向应力和径向应力均非常小,当温度达到 1250 °C,焊缝方向(周向)和垂直焊缝方向(径向)的应力开始出现拉伸应力,而此时所处的温度区间称为“脆性温度区”,也是高温裂纹

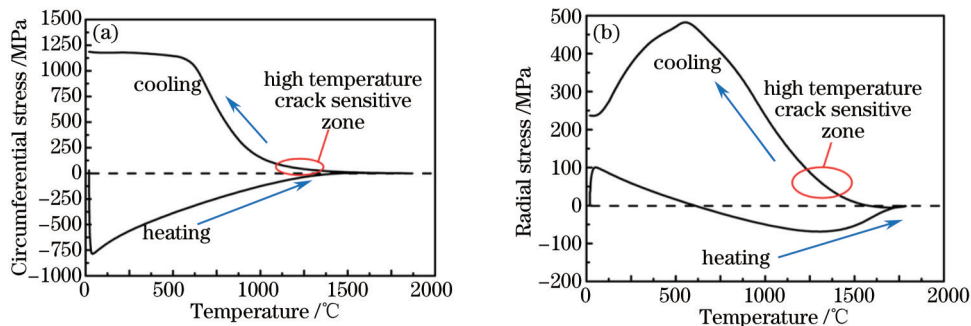


图 16 (a) 温度-周向应力曲线 (b) 温度-径向应力曲线  
Fig.16 (a) Temperature-circumferential stress curve (b) temperature-radial stress curve

敏感区域,只要熔覆金属所受到的拉伸应力大于熔覆金属所具有的塑性就有可能产生裂纹。随着温度继续降低,熔覆金属已完全凝固,此时熔覆金属受到较大的拉伸周向应力和拉伸径向应力,如果此时熔覆金属有较高强度和较好的塑性,一般不会产生裂纹。温度-应力关系曲线可以为熔覆过程中裂纹产生机理的分析提供有价值的信息。

## 4 结 论

基于 Abaqus 软件,开发了用于激光熔覆过程温度场、残余应力和变形预测的数值模拟方法。以 718 镍基合金为研究对象,对单道单层、单道双层和单道十层激光熔覆过程的温度场、应力形成过程进行了数值模拟。在数值模拟结果的基础上,分析了激光熔覆过程的温度场分布和热循环特征。同时,基于计算结果详细讨论了激光熔覆的残余应力分布特点。此外,对激光熔覆过程中的温度-应力关系也进行了初步探讨,这些结果有助于理解激光熔覆过程中冶金缺陷(如热裂纹)的形成原因,优化激光熔覆工艺和提高产品质量。

## 参 考 文 献

- 1 Li Yajiang, Li Jianing. Laser Welding/Cutting/Cladding Technology[M]. Beijing, Chemical industry press, 2012: 200-201.  
李亚江, 李嘉宁. 激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 200-201.
- 2 Zhao Yong, Huang Anguo, Lin Xuenan, *et al.*. Simulation of laser cladding process[J]. Electric welding machine, 2007, 37(3): 37-38.  
赵 永, 黄安国, 林雪楠, 等. 激光熔覆过程模拟[J]. 电焊机, 2007, 37(3): 37-38.
- 3 Feng K, Li Z G, Deng D. Numerical simulation of transient temperature field and distortion in thick plate caused by laser cladding [C]. Visual-J W2012, Osaka, Japan, 2012.
- 4 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: 1443-1450.
- 5 Farahmand P, Kovacevic R. An experimental-numerical investigation of heat distribution and stress field in single-and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 63: 154-168.
- 6 Lippold J C, Kiser S D, Dupont J N. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys[M]. A John Wiley & Sons, Inc, Publication Press, 2009: 281-324.
- 7 Yilbas B S, Akhtar S S, Karatas C. Laser surface treatment of Inconel 718 alloy: Thermal stress analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(7): 740-7493.
- 8 Maloy S A, James M R, Willcutt G, *et al.*. The mechanical properties of 316 L/304 L stainless steels, Alloy 718 and Mod 9 Cr - 1 Mo after irradiation in a spallation environment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 296(1): 119-128.
- 9 Liang W, Murakawa H, Deng D. Investigation of welding residual stress distribution in a thick-plate joint with an emphasis on the features near weld end-start[J]. Materials and Design, 2015, 67: 303-312.

栏目编辑: 张浩佳