

激光熔覆热影响区及残余应力分布特性研究

华亮^{1,2} 田威² 廖文和² 曾超²

¹南京铁道职业技术学院动力工程学院, 江苏 南京 210031

²南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 采用三维有限元分析方法对 16MnR 钢激光熔覆 Ni-Cr-B-Si 合金粉末过程进行了仿真分析,得到了不同激光熔覆参数(激光功率、扫描速度、光斑直径)下的温度场及残余应力分布。采用两种方法来判断最优的激光熔覆工艺参数:1)利用正交试验的直观分析法对基体材料热影响区深度进行进一步分析以获得最优参数;2)利用最大残余拉应力和材料断裂强度的比值来选择最优参数。两种方法得到的最优激光熔覆参数相同。

关键词 激光技术;有限元;激光熔覆;温度场;残余应力分布;热力耦合

中图分类号 TG156.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.091401

Study of Thermal-Mechanical Coupling Behavior in Laser Cladding

Hua Liang^{1,2} Tian Wei² Liao Wenhe² Zeng Chao²

¹College of Power Engineering, Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing, Jiangsu 210031, China

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract A three dimensional finite element model is employed to simulate the cladding process of Ni-Cr-B-Si coatings on 16MnR steel under different parameters including laser power, scanning speed and spot diameter. The temperature and residual stress distribution, the depth of the heat affected zone (HAZ) and the optimized parameters for laser cladding remanufacturing technology are obtained. The orthogonal experiment and intuitive analysis on the depth of the HAZ are performed to study the influence of different cladding parameters. A new criterion based on the ratio of the maximum tensile residual stress and fracture strength of the substrate is proposed for optimization of the remanufacturing parameters. The results show well agreement with that of the HAZ analysis.

Key words laser technique; finite element method; laser cladding; temperature field; residual stress distribution; thermal-mechanical coupling

OCIS codes 140.6810; 350.1820; 350.3850

1 引言

激光熔覆技术由于具有热影响区小、稀释率低、熔覆材料和基体能够构成冶金结合等优点而广泛应用于金属快速制造^[1-2]、零件表面改质及处理^[3-4]、零件修复及再制造^[5-6]等领域。激光熔覆过程中基体的温升及冷却都非常迅速,且在基体上形成的熔池尺寸较小,温度却很高,因此难以用实验的方法测量熔池的温度分布,故国内外研究者多采用数值模拟的方法对其进行研究^[7-11]。

激光熔覆过程中不均匀的温度场以及由之产生的局部塑性变形、基体和熔覆材料热膨胀性能的差异均会在材料内部引发残余应力。不同的激光熔覆参数必然在材料内部形成不同的温度场,不同的温度场所造成的残余应力场亦不同,而残余应力对材料的使用及疲劳性能有很大的影响^[12-14]。因此研究激光熔覆过程中温度场及残余应力场的分布规律及其耦合特性,在优化激光熔覆参数、提高熔覆层质量、改善激光熔覆工

收稿日期: 2014-04-08; 收到修改稿日期: 2014-04-15; 网络出版日期: 2014-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51105205)、中央高校基本科研业务费专项科研项目(NS2012051)

作者简介: 华亮(1979—),男,博士,讲师,主要从事激光熔覆、寿命评估等方面的研究。

E-mail: hua672@163.com

件使用性能等方面都具有显著意义。

本文利用大型有限元软件 ANSYS(13.0), 综合考虑激光熔覆过程中热源的移动、对流及辐射换热、材料高温下的相变、熔覆熔池内液体流动等情况, 对不同参数(光斑直径、激光功率、扫描速率)下激光熔覆过程的温度分布及残余应力进行了研究, 得出了优化的激光熔覆工艺参数, 为更好地了解激光熔覆过程中复杂的冶金物理现象提供了有益参考。

2 有限元模型分析

有限元分析中基体选用 16MnR 钢, 密度为 7850 kg/m^3 , 基体尺寸为 $48 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 熔覆材料为 Ni-Cr-B-Si 镍合金, 密度为 8410 kg/m^3 , 16MnR 钢及 Ni-Cr-B-Si 镍合金的化学成分和热物理性能参数如表 1~4 所示^[15-16]。熔覆层位于基体宽度方向的中心, 其横截面形状假定为半圆形, 半径取 1 mm 。考虑到模型结构上的对称性, 研究对象为模型的一半, 如图 1 所示。

表 1 16MnR 钢化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 16MnR steel (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	S	P
16MnR	≤ 0.20	0.20~0.60	1.20~1.60	≤ 0.035	≤ 0.035

表 2 Ni-Cr-B-Si 化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of Ni-Cr-B-Si (mass fraction, %)

Material	C	Cr	B	Si	Fe	Ni
Ni-Cr-B-Si	0.6~1.0	14~17	2.5~4.5	3.0~4.5	< 15	Bal.

表 3 16MnR 钢热物理性能参数

Table 3 Thermo-physical and mechanical properties of 16MnR steel

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Elasticity modulus / GPa	Shear modulus / GPa	Poisson's ratio	Thermal conductivity / $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	Thermal expansion coefficient / (10^{-6}C^{-1})	Density / (g/cm^3)
20	209	82.0	0.280	—	—	—	7.850
100	207	80.4	0.286	—	—	12.6	
200	201	77.7	0.291	37.1	481	12.9	
300	193	72.1	0.307	36.6	515	13.5	
400	185	69.5	0.333	35.5	561	14.0	
500	172	68.7	0.249	34.9	649	14.4	
600	—	—	—	33.9	—	14.6	
700	—	—	—	32.0	—	14.7	

表 4 Ni-Cr-B-Si 热物理性能参数

Table 4 Thermo-physical and mechanical properties of Ni-Cr-B-Si

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Elasticity modulus / GPa	Yield stress / MPa	Thermal expansion coefficient / (10^{-6}C^{-1})	Thermal conductivity / $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	Poisson's ratio	Density / (g/cm^3)
20	191	789	12.3	12.6	410	0.28	8.410
250	169	645	12.9	13.2	452		
500	147	457	14.1	14.0	485		
750	121	287	15.4	15.4	546		
1000	109	152	16.2	18.3	642		

采用间接法模拟激光熔覆过程的温度分布及残余应力分布, 即先进行热分析, 得到熔覆过程的温度分布, 然后以之作为体载荷施加到随后进行的应力分析中, 最终得到激光熔覆后试件的残余应力分布。

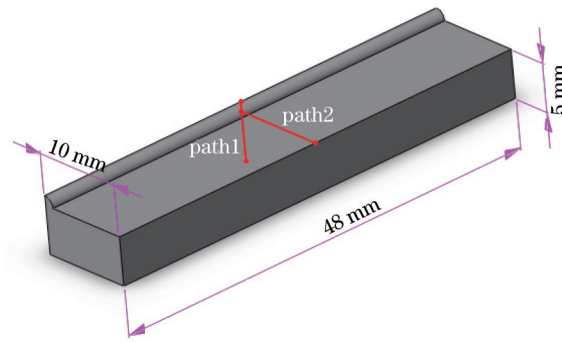


图1 熔覆几何模型及路径定义

Fig.1 Geometrical model of specimen and locations of paths

2.1 热分析

为研究各个参数对激光熔覆过程中温度及残余应力的影响规律,有限元分析中采用的激光熔覆参数采用正交分析法进行设计,如表5所示。表5中各熔覆参数依据文献[16]的激光熔覆试验进行选择。试验表明本文选择的参数,可以使熔覆层和基体间实现牢固的冶金结合,从而保证所选熔覆参数的合理性及有效性。

表5 激光熔覆参数

Table 5 Laser cladding parameters

	P /kW	V /(mm/s)	D /mm
1	1.8	3	2.0
2	1.8	4	2.5
3	1.8	5	3.0
4	2.4	3	2.5
5	2.4	4	3.0
6	2.4	5	2.0
7	3.0	3	3.0
8	3.0	4	2.0
9	3.0	5	2.5

分析中用到的有限元模型如图2所示。考虑到熔覆层及其附近区域温度梯度较大,为了计算的精确性,该区域网格进行了局部加密。网格单元选用适用于瞬态热分析的8节点六面体单元Solid 70,模型中共有节点数为24056,单元数为20544。

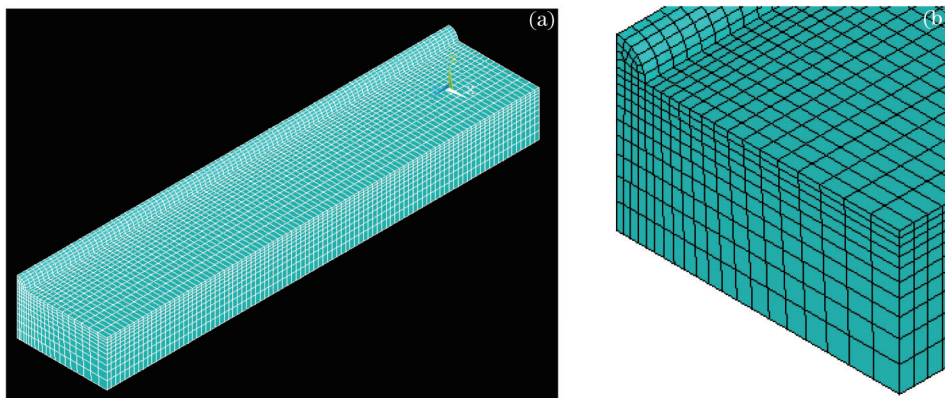


图2 (a)有限元模型和(b)局部放大图

Fig.2 (a) Finite element model; (b) partial enlarged detail

2.1.1 控制方程

激光熔覆过程的热传导控制方程为^[9,17]:

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

式中 ρ 、 c 及 λ 分别为密度、比热容和导热系数, T 是温度分布函数, t 表示时间。

2.1.2 初始条件及对流辐射边界条件

分析中假定试件及环境的初始温度均为 20 °C。由于激光熔覆过程中熔覆层附近区域温度很高, 辐射换热的影响不可忽略, 因此需综合考虑对流及辐射换热的影响^[18-20]。总的传热系数可表示为^[19-20]

$$h = \begin{cases} 0.0668\theta, & 0 < \theta \leq 500 \text{ °C} \\ 0.231\theta - 82.1, & \theta > 500 \text{ °C} \end{cases} \quad (2)$$

2.1.3 熔池内液体流动的影响

为了考虑熔池内液体流动对传热的影响, 一般采用人为增加导热系数的方法^[20-21], 即在温度超过材料熔点的区域人为增加材料的导热系数, 本文亦采用此方法考虑熔池内液体流动对激光熔覆温度场的影响。

2.1.4 相变的影响

激光熔覆过程中, 随着温度的快速升高及急剧冷却, 材料发生固-液-固间的相变, 相变过程伴随的热量变化必然对温度造成影响。ANSYS 软件可通过定义材料随温度变化的焓值来考虑材料相变的影响。在数值模拟中焓值的变化可表示为

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

2.1.5 热源模型

激光熔覆过程使用的热源模型多为高斯热源^[22-24], 但高斯热源是面热源, 不能考虑到激光的穿透作用, 而双椭球型热源模型克服了高斯热源的这个缺点, 逐渐为广大研究者所采用。双椭球型热源模型可表示为^[20]

前半段椭球:

$$Q(x', y', z', t) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q_w}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp(-3x'^2/a_1^2) \exp(-3y'^2/b^2) \exp(-3z'^2/c^2), \quad (4a)$$

后半段椭球:

$$Q(x', y', z', t) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q_w}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp(-3x'^2/a_2^2) \exp(-3y'^2/b^2) \exp(-3z'^2/c^2), \quad (4b)$$

式中 f_f 、 f_r 分别为前后两部分椭球的能量分数, 且 $f_f + f_r = 2$, 本文中 $f_f = 1.4$, $f_r = 0.6$ 。 a_1 、 a_2 、 b 、 c 为热源模型特征参数, Q_w 为激光有效功率, 激光效率假定为 0.4。

激光熔覆过程中, 由于熔覆材料的输送是和移动的激光束同步的, 因此熔覆层单元在激光束移动到该单元之前是不能参加计算的。解决这一问题的方法是, 在激光束照射到某一单元之前, 先将它“杀死”, 使之不能参与计算, 当激光束照射到这一单元时, 再将之“激活”用于计算。即通过引入单元的“生”和“死”功能予以解决。

2.2 应力分析

应力分析中用到的有限元模型和热分析中的有限元模型完全相同, 只不过网格单元类型及边界条件不同。进行应力分析之前, 先把单元类型转变成结构分析单元 Solid 185, 并将热分析得到的温度场作为应力分析的初始条件, 对称面采用对称面边界条件, 熔覆试件底面采用固定边界条件, 取其在垂直方向的应变为零。

3 数值模拟结果

3.1 激光熔覆温度场分析

激光熔覆温度场如图 3 所示(参数 1)。基体材料上温度处于其熔点(1430 °C)和相变温度(812 °C)之间的区域称之为热影响区(如图 4 所示), 热影响区是影响工件疲劳寿命的薄弱环节^[25-26], 因此, 需重点研究不同激光熔覆参数下基体材料热影响区的大小。

图 4 所示为熔覆参数 1 条件下路径 1(如图 1 所示)上的温度分布曲线, 根据该变化曲线可以计算出基体材料在熔覆参数 1 条件下的热影响区深度为 0.957 mm。

所有激光熔覆参数下热影响区深度的计算结果如表 6 所示。

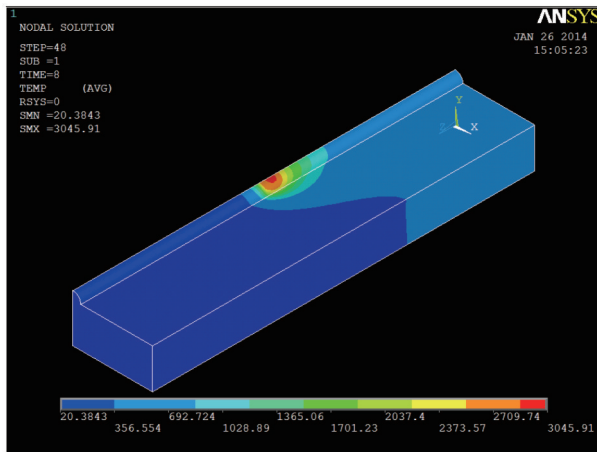
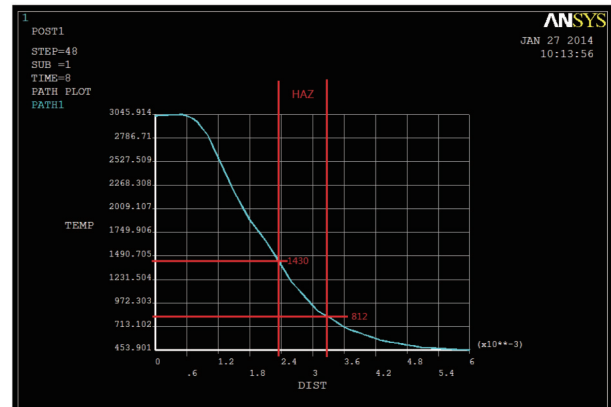
图3 $t=8$ s时,熔覆参数1条件下的三维温度场分布Fig.3 Three dimensional temperature distribution with parameter one ($t=8$ s)

图4 路径1温度曲线

Fig.4 Temperature distribution on path 1

表6 热影响区深度计算结果

Table 6 Depth of heat affected zone

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Depth /mm	0.957	0.579	0.486	0.846	0.674	0.793	0.888	1.009	0.698

从表6可以看出,参数3的热影响区深度最小。为进一步评估激光功率、扫描速度和激光半径对热影响区深度的影响,对表6的计算结果采用正交直观分析法进行分析,结果如表7所示。

表7 直观分析法计算结果

Table 7 Calculation results of orthogonal intuitive analysis method

Parameter	P	V	D
x_1^{AVE}	0.674	0.897	0.92
x_2^{AVE}	0.771	0.754	0.708
x_3^{AVE}	0.865	0.659	0.683
R	0.191	0.238	0.237

表7中 x_1^{AVE} 、 x_2^{AVE} 、 x_3^{AVE} 表示各因子不同水平模拟计算结果的平均值,极差 R 表示 x_1^{AVE} 、 x_2^{AVE} 、 x_3^{AVE} 三者最大值与最小值的差, P 为激光功率, V 为扫描速度, D 为光斑直径。由 x_1^{AVE} 、 x_2^{AVE} 、 x_3^{AVE} 的计算结果可以看出:激光功率越大、扫描速度越慢、激光半径越小,热影响区深度越大;由极差 R 的计算结果可以看出:扫描速度和激光半径对热影响区深度的影响大致相当,激光功率对热影响区深度的影响最小;依据表7的计算结果可以得出:参数 $P_1V_3D_3$ (即参数3)是最优参数。

温度场仿真结果显示,在参数3条件下,熔覆过程最高温度为 $2005.19\text{ }^\circ\text{C}$,高于熔覆材料及基体材料的熔点,可以在覆层及基材间形成良好的冶金结合。

3.2 残余应力分析

基体和熔覆材料热膨胀性能的差异、熔覆过程中不均匀的温度场以及由之产生的局部塑性变形是产生激光熔覆残余应力的根本原因。残余应力对结构的疲劳性能、承载能力等均有影响^[26]。

图5为熔覆参数1条件下试件在路径2(如图1所示,位于基体表面,垂直于激光熔覆方向)上的残余应力分布曲线。从图5中可以看出,熔覆中心区域,基体材料上存在较大的残余拉应力,且纵向和垂向上的残余拉应力比横向残余拉应力大得多,并迅速在熔覆交界处变为压应力;远离熔覆区域的地方残余应力较小。影响结构疲劳性能的主要是残余拉应力,为评估熔覆残余拉应力对试件疲劳性能的影响,定义参数 k 为

$$k = \sigma_l / \sigma_f, \quad (5)$$

式中 σ_l 为纵向(沿熔覆方向)最大残余拉应力, σ_f 为16MnR钢的真断裂强度。16MnR钢的真断裂强度为 1118.3 MPa ^[27]。 k 越小说明熔覆残余拉应力对工件疲劳性能的影响越小,即该熔覆参数越适合于实际的

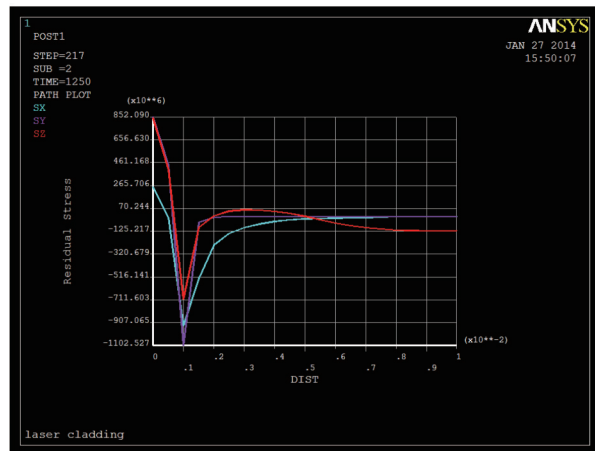


图5 熔覆参数1条件下试件在路径2上的残余应力分布曲线

Fig.5 Residual stress distributions along path 2 under parameter one

熔覆过程,若 k 值大于1,则说明熔覆过程会出现裂纹,该熔覆参数应不予采用。

所有激光熔覆参数 k 值的计算结果如表8所示。

表8 k 值计算结果Table 8 Results of calculated k

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_r /MPa	852.09	903.00	591.28	922.81	804.45	1086.9	865.01	1161.88	1115
k	0.762	0.807	0.529	0.825	0.719	0.972	0.774	1.039	0.997

从表8的计算结果可以看出:参数3的 k 值最小,即参数3为最优参数,这和热分析的结论是一致的,因此依据参数 k 值的大小来判断激光熔覆参数优劣的方法是可行的。

4 结 论

1) 仿真过程热源模型采用更符合激光熔覆实际的双椭球型热源,利用“生死单元”技术模拟熔覆层材料的输入,并综合考虑了对流及辐射换热、熔池内液体流动及相变的影响,使仿真结果更真实可靠。

2) 对激光熔覆过程的温度场及残余应力场进行了仿真分析,仿真结果显示:激光功率越大、扫描速度越慢、激光光束半径越小,热影响区深度越大;扫描速度和激光光束半径对热影响区深度的影响大致相当,激光功率对热影响区深度的影响最小。

3) 仿真结果显示:参数3为最优参数,即激光功率为1.8 kW,扫描速度为5 mm/s,激光光束直径为3 mm时,基体材料的热影响区及残余拉应力均较小,并且可以获得较好的熔覆效果。

4) 采用自定义的参数 k ($k = \sigma_r / \sigma_f$) 值的大小来判断激光熔覆参数优劣的方法是可行的。

参 考 文 献

- Hussam El Cheikh, Bruno Courant, Samuel Branchu, *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 413-422.
- Igor Smurov. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(18): 4496-4502.
- T Baldrige, G Poling, E Foroozmehr, *et al.*. Laser cladding of inconel 690 on inconel 600 superalloy for corrosion protection in nuclear applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(2): 180-184.
- I Manna, J Dutta Majumdar, B Ramesh Chandra, *et al.*. Laser surface cladding of Fe-B-C, Fe-B-Si and Fe-BC-Si-Al-C on plain carbon steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(1-2): 434-440.
- J Leunda, C Soriano, C Sanz, *et al.*. Laser cladding of vanadium-carbide tool steels for die repair [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(A): 345-352.
- E Díaz, J M Amado, J Montero, *et al.*. Comparative study of Co-based alloys in repairing low Cr-Mo steel components by laser cladding [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 368-375.
- W C Tseng, J N Aoh. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source

- [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 141-152.
- 8 Hao Mingzhong, Sun Yuwen. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 352-360.
- 9 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- 10 Shi Shihong, Wang Chen, Xu Aiqin, *et al.*. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303002.
石世宏, 王晨, 徐爱琴, 等. 基于环形光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002.
- 11 Sun Daojin, Liu Jichang, Li Qindong. Phase-field method simulation of microstructure evolution at the bottom of melt pool in coaxial laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403005.
孙道金, 刘继常, 李钦栋. 激光熔覆纯镍熔池底部组织生长的相场法模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403005.
- 12 Tso-Liang Teng, Peng-Hsiang Chang. Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints [J]. J Materials Processing Technology, 2004, 145(3): 325-335.
- 13 C D M Liljedahl, J Brouard, O Zanellato, *et al.*. Weld residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of aluminium alloy 2024-T351 [J]. International J Fatigue, 2009, 31(6): 1081-1088.
- 14 G Pouget, A P Reynolds. Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds [J]. International J Fatigue, 2008, 30(3): 463-472.
- 15 Chen Yunyuan. Performance Data Sheet of Mechanical Engineering Material [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Co., 1995. 105-106.
陈运远. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 105-106.
- 16 Zeng Chao. A Study of Thermal Damage for Laser Cladding Technology and Its Detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. 25-26.
曾超. 激光熔覆热损伤评估及其检测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013. 25-26.
- 17 I A Roberts, C J Wang, R Esterlein, *et al.*. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing [J]. International J Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(12-13): 916-923.
- 18 Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Steve Corbin. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(6): 849-867.
- 19 B Brickstad, B L Josefson. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [J]. International J Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 11-25.
- 20 Dean Deng, Hidekazu Murakawa. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements [J]. Computational Materials Science, 2006, 37(3): 269-277.
- 21 Goldak J, Bibby M, Moore J, *et al.*. Computer modeling of heat flow in welds [J]. Metallurgical Transactions B, 1986, 17(3): 587-600.
- 22 J W Hirsch, L G Olson, Z Nazir, *et al.*. Axisymmetric laser welding of ceramics: comparison of experimental and finite element results [J]. Opt Lasers Eng, 1998, 29(6): 465-484.
- 23 M Alimardani, E Toyserkani, J P Huissoon. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process [J]. Opt Lasers Eng, 2007, 45(12): 1115-1130.
- 24 B S Yilbas, S S Akhtar, C Karatas. Laser surface treatment of Inconel 718 alloy: thermal stress analysis [J]. Opt Lasers Eng, 2010, 48(7-8): 740-749.
- 25 Chao Zeng, Wei Tian, Wen-He Liao, *et al.*. Study of laser cladding thermal damage: a quantified microhardness method [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 236: 309-314.
- 26 Henry Köhler, Knut Partes, Joana Rebelo Kornmeier, *et al.*. Residual stresses in steel specimens induced by laser cladding and their effect on fatigue strength [J]. Physics Procedia, 2012, 39: 354-361.
- 27 Zhao Shaobian, Wang Zhongbao. Methods and Data of the Anti-Fatigue Design [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Co., 1997. 96.
赵少汴, 王忠保. 抗疲劳设计——方法与数据[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 96.