

激光熔覆过程残余应力的数值模拟

顾建强^{1,2,3} 骆芳^{1,2,3} 姚建华^{1,2,3}

¹浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014

²浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室, 浙江 杭州 310014

³浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

摘要 在考虑热传导系数、比热容、热膨胀系数和弹性模量等热物性参数随温度变化的条件下,采用 MSC. Marc 软件对同步送粉激光熔覆 2Cr13 粉末的温度场、应力场进行了直接耦合分析,并进一步模拟得到了不同扫描速度下的应力场分布情况。考察工件表面和深度方向两条路径上的应力分布。结果表明,平行于激光扫描方向拉应力值远大于垂直激光扫描方向的拉应力值。由此推测,激光扫描方向上拉应力的存在是造成熔覆层裂纹的主要原因。随着扫描速度的增大,熔覆层表面的 VonMises 等效应力峰值也随之增大,曲线变得更陡。

关键词 材料;激光熔覆;残余应力;有限元方法

中图分类号 TG404

OCIS 140.0140 140.3390 000.4430

文献标识码 A

Numerical Simulation of Residual Stress during Laser Cladding

Gu Jianqiang^{1,2,3} Luo Fang^{1,2,3} Yao Jianhua^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,

Zhejiang University of Technology, Ministry of Education, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

²Zhejiang Provincial Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,

Hangzhou, Zhejiang 310014, China

³Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology,

Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract Considering the thermal physical properties such as heat transfer coefficient, heat capacity, thermal expansion coefficient, and elastic modulus change with temperature, the temperature field and stress field of the synchronous powder feeding laser cladding process are conducted with direct coupled analysis using the software MSC. Marc. The residual stress distributions under different scanning speeds are studied. The stress distribution along the two paths with one on the surface of the workpiece and the other along the depth of the workpiece is measured, and the results show that the longitudinal stress is much greater than the value of transversal stress. It can be speculated that, along the laser scanning direction, the existence of the residual tensile stress caused by laser cladding is the main reason for cladding layer cracks. When scanning speed increases, the VonMises equivalent peak stress on the surface of the cladding layer also increases, and the curve becomes steeper.

Key words materials; laser cladding; residual stress; finite element method

1 引言

激光熔覆技术作为一项先进的零件加工与表面改性技术,具有稀释率低、热影响区小、与基体形成冶金结合、熔覆件扭曲变形小、过程易于实现自动化控制等优点。激光熔覆应用于废品件的修复,可大量节约加工成本;应用于快速制造金属零件,可减少工件的制造工序。2Cr13 不锈钢常用于制作叶片、泵轴、轴套、叶轮等受较高应力的零件,淬火状态下硬度高,耐腐蚀性良好。2Cr13 不锈钢粉末结合激光熔覆技术可用于汽轮

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-05-21

作者简介: 顾建强(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光加工过程数值模拟方面的研究。

E-mail: acailaogu1984@gmail.com

导师简介: 姚建华(1965—),男,教授,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

机叶片的修复和再制造。

激光熔覆后工件内部的残余应力分布对工件的使用性能和寿命影响很大,也一直是国内外相关领域的研究热点之一。国内外很多学者在进行激光熔覆温度场和应力场耦合计算时,大多采用间接耦合方法。如郝南海等^[1]根据激光熔覆的特点,建立了送粉式激光熔覆温度场和应力场的间接耦合分析模型。赖鹏^[2]建立了预置粉末激光熔覆物理模型,以 ANSYS 软件为平台,对激光熔覆过程中的温度场和应力场进行了间接耦合分析。沈显峰等^[3]建立了直接金属选区激光烧结热应力场有限元模型,李守卫等^[4]建立了多组元金属粉末激光选区烧结热力耦合有限元应力场分析模型,M. Labudovic 等^[5]建立了激光直接金属成形过程的温度场和残余应力场模型。考察以上各个激光熔覆热力耦合数值模型,发现均是基于 ANSYS 平台的间接耦合模型,而与之对应的直接耦合模型却少有报道。

激光熔覆过程中必然形成熔池,但是由于受到有限元耦合技术和现有计算条件的限制,现有的模型一般都很难同时考虑温度场/流场/应力场三场耦合。一般只能分别考虑温度场和熔池流场或温度场和应力场之间的耦合作用^[6]。由于金属在熔化状态下不存在应力,而在凝固冷却的过程中残余应力才得以形成。由于忽略了熔池的作用,有限元模型和实际物理过程之间不可避免地存在误差。本文通过定义随温度变化而改变的材料流动应力(屈服应力)来减小误差,即定义随着温度的增大而逐渐降低的材料的流动应力,在熔点左右流动应力几乎减小为零。考虑到实际激光熔覆过程中工艺参数经常变化,建立了不同扫描速度下的应力场模型。使用 MSC. Marc 非线性有限元分析软件对 2Cr13 不锈钢基体上激光熔覆 2Cr13 合金粉末的热-力过程进行了直接耦合分析。

2 数学模型的建立

激光熔覆三维瞬态温度场热源控制方程采用的傅里叶导热微分方程为^[7,8]

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

式中 ρ 为密度, C_p 为比热, λ 为导热系数, \bar{Q} 为内热源强度(包括激光施加的热量以及相变释放的热量), T 为温度, t 为时间。其中, λ 和 C_p 都随温度变化。

初始条件:当 $t=0$ 时,工件具有均匀的初始温度,一般为周围环境温度。

$$T = T_0. \quad (2)$$

边界条件:采用本文提出的热源模型,考虑工件与周围环境的对流换热。边界上的物体与周围介质的热交换为^[9]

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = -\beta(T_a - T_s), \quad (3)$$

式中 T_a 为周围介质温度, T_s 为工件表面温度, n_x , n_y 和 n_z 为边界外法线的方向余弦, β 为表面总的换热系数。

3 激光熔覆数值模型的建立

3.1 几何模型的建立及网格划分

网格划分时,要求在熔覆层及其附近采用小的网格尺寸,而在远离熔覆层的区域选择较大的网格尺寸。基体尺寸为 $60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,熔覆层设置为球冠形,高度为 1 mm ,宽度为 3 mm ,三维有限元网格模型如图 1 所示。

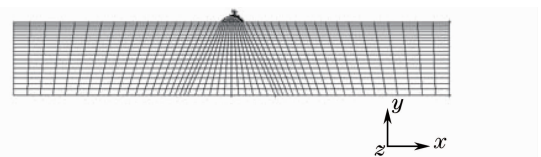


图 1 三维有限元网格模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element mesh model

由于激光熔覆熔池流动及传热过程比较复杂,影响因素众多,为了简化计算,作出如下假设^[10]:

1) 工件的初始温度为室温($20 \text{ }^\circ\text{C}$); 2) 忽略熔池内部的化学反应和搅拌、对流等现象; 3) 激光熔覆以恒定速度进行,热源的能量密度服从高斯分布; 4) 熔覆材料和基体都是各向同性材料; 5) 不考虑工件与实验台之间的热传导,假设工件的所有外边界仅与空气发生对流换热,将辐射换热的影响耦合到对流换热中,而不作单独考虑。

3.2 激光熔覆热源

热源选择合适与否,对激光熔覆温度场的计算精度,特别是对靠近熔池热源的高温区有很大的影响。针对激光热源选择的影响以及激光熔覆过程中相当部分热量是通过热传导和辐射直接传输给工件的,为此,本文采用高斯分布热源,分布函数为^[11]

$$q(x, y, z, t) = \frac{3Q}{\pi r^2} \exp\left\{-\frac{3x^2 - 3[z + v(\tau - t)]^2}{r^2}\right\}, \quad (4)$$

式中 Q 为能量输入率, $q(x, y, z, t)$ 为 t 时刻在 (x, y, z) 位置的热流量, r 为热源的集中系数, v 为熔覆速度; τ 为热源位置滞后的时间因素。激光熔覆采用的工艺参数为:激光功率 2000 W,扫描速度 10 mm/s,光斑直径定为 3 mm,且假设工件对激光能量的吸收率为 40%^[12]。

3.3 材料的热物理性能参数

熔覆材料 2Cr13 的比热容、导热系数、弹性模量、热膨胀系数与温度的关系可从 MARC 软件材料库中读取,如图 2 所示。密度随温度变化不大,取为常数,泊松比取 0.3。材料相关的应力应变数据由程序在运行时自动从材料流动应力库中读取。2Cr13 的化学成分如表 1 所示。同时,忽略同态相变潜热的影响^[13,14]。

表 1 2Cr13 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 2Cr13(mass fraction, %)

C	Mn	P	S	Si	Cr
0.16~0.25	≤1.0	≤0.035	≤0.030	≤1.0	12.00~14.00

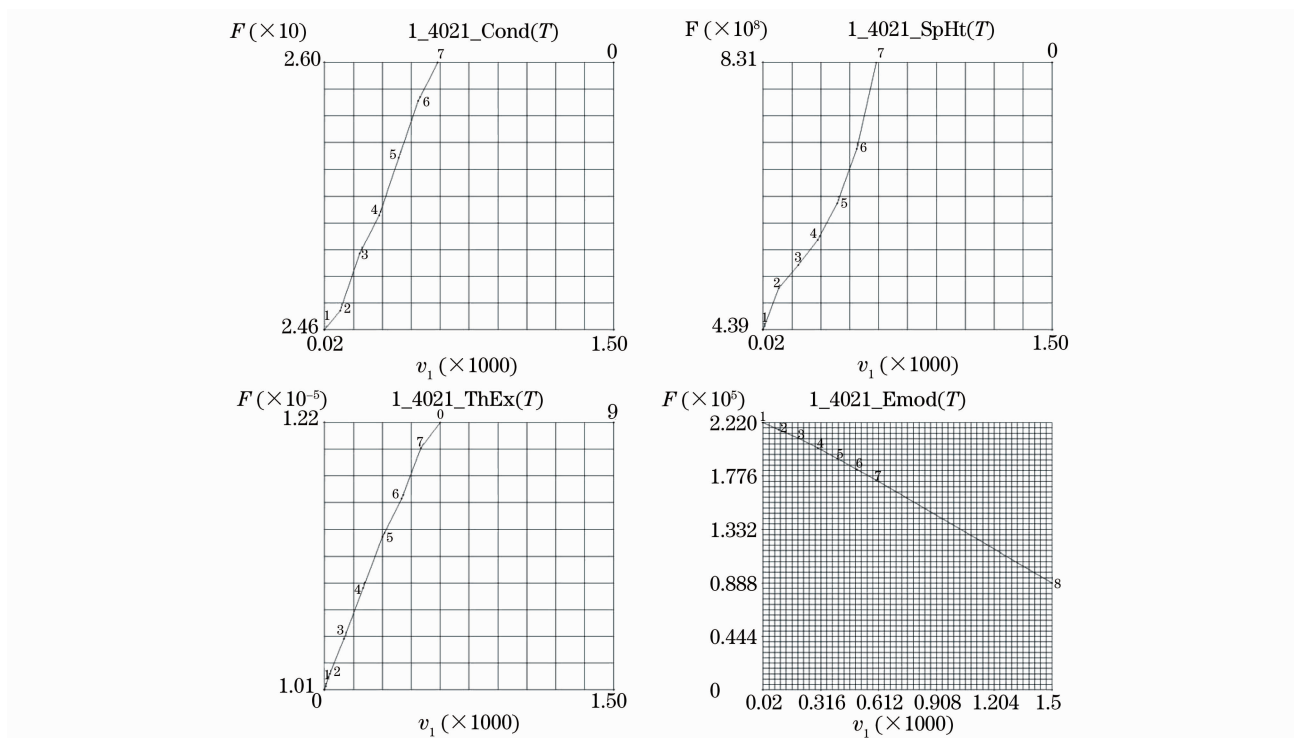


图 2 2Cr13 热物性参数随温度变化图。(a)热传导系数,(b)比热容,(c)热膨胀系数,(d)弹性模量

Fig. 2 2Cr13 thermal physical properties change with temperature. (a) thermal conductivity, (b) heat capacity,

(c) coefficient of thermal expansion, (d) modulus of elasticity

4 结果与分析

4.1 沿工件表面和工件纵截面垂直于激光扫描方向路径上的应力分布

在工件表面上定义一路径如图 3 所示,考察该路径上的各个方向的应力分布,如图 4 所示。由图 4 可知,在定义的路径上,各个应力的分布具有相同的特点,都是在熔覆层区域出现应力的峰值,并且应力随着离熔覆层的距离的增大而迅速降低,可见激光熔覆过程形成的残余应力具有影响范围小、具有局部性的特点,

这符合激光熔覆过程快速加热快速冷却的特性。在各个方向的应力分布方面,横向应力的峰值低于纵向应力的峰值,由于熔覆层的宽度有限,激光熔覆过程中沿横向所受的变形阻力相对较小。由于网格划分和数值计算精度的原因,横向应力曲线出现了一些波动,但整体趋势没有改变。而在平行于激光扫描方向的纵向方向,随着激光熔覆过程的进行,熔覆层越来越长,因此在熔覆过程中纵向的变形阻力会比较大,与之对应的纵向的残余应力也会比较大。实验表明,纵向残余应力是造成熔覆层开裂的主要原因,在实际激光熔覆过程中出现的裂纹也大多垂直于激光扫描方向,与数值模拟结果相符合。

在工件纵截面上定义一沿深度方向的路径如图 5 所示,考察该路径上的应力分布情况如图 6 所示。由图 6 可知,在纵截面沿深度方向路径上的应力分布也呈逐渐递减的趋势,在距离工件表面大约 6 mm 深度以下,几乎没有残余应力的存在,各个应力分量均趋于零。而在熔覆层及工件表面附近,存在比较大的残余拉应力,其中纵向残余应力的值最大,而横向残余应力相对比较小,这与工件表面路径上的应力分布相吻合。在基体的热影响区附近,出现了一定的残余压应力,这跟力的平衡原则是相符合的,即熔覆层的拉应力和基体内热影响区的压应力互相平衡。作为材料屈服准则的 VonMises 等效应力也是随着深度的增加而减小,直至为零。在熔覆层内, VonMises 应力的大小接近材料的屈服应力(材料在常温下的理论屈服应力大约为 780 MPa)。由于激光熔覆过程中熔覆层和基体必然产生塑性应变,材料肯定会达到其屈服点,因此模拟结果和实际情况具有一致性。

4.2 不同扫描速度下工件表面路径上的应力分布

在保持模型其他条件不变的情况下,建立了不同扫描速度下激光熔覆温度场和应力场模型,模拟求解得到了不同扫描速度下的温度场和应力场分布。考察图 3 定义的工件表面路径上的 VonMises 应力分布情况,得到结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着扫描速度的增大,熔覆层表面的等效 VonMises 应力峰值也随之增大。扫描速度为 8 mm/s,对应的应力峰值为 600 MPa;扫描速度为 10 mm/s,对应的应力峰值为 630 MPa;扫描速度为 12 mm/s,对应的应力峰值为 680 MPa。同时随着扫描速度的增大,相对的热输入量减小,对熔覆层周围的基体的热影响区相对减小, VonMises 等效应力曲线下落更快,曲线变得更陡。在扫描速度增大的情况下,与之对应的基体的加热和冷却速率也随之增大,熔覆层材料经历更加剧烈的快速熔化和冷却过程,导致材料在冷却过程中有更多的塑性变形被保留下来,由此引发残余应力的增大。

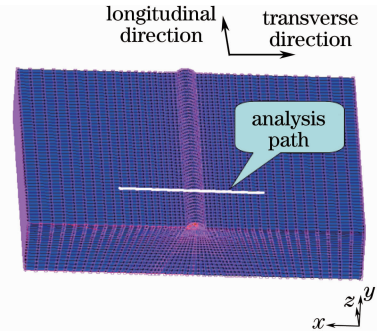


图 3 工件表面路径定义

Fig. 3 Definition of surface path

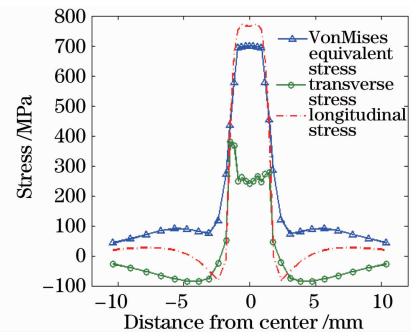


图 4 工作表面路径上的应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution along the surface path

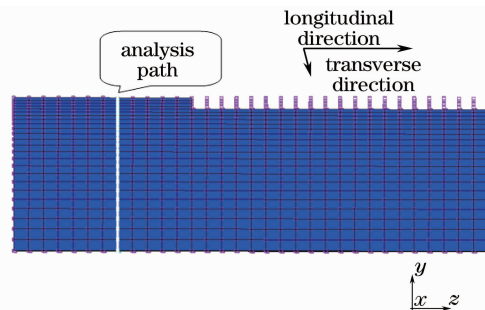


图 5 工件纵截面路径定义

Fig. 5 Definition of longitudinal section path

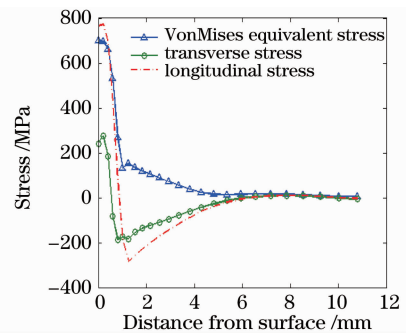


图 6 纵截面路径上的应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution along the longitudinal section path

5 激光熔覆实验以及残余应力测定

使用 7 kW 横流 CO₂ 激光器,在 2Cr13 基体上进行同步送粉激光熔覆 2Cr13 粉末的实验。实验所用激光功率为 2000 W,扫描速度 600 mm/min,光斑大小为直径 3 mm。激光熔覆实验结果如图 8 所示。

使用 Proto-LXRD 型 X 射线应力测定仪进行了应力测试。设备的主要参数为: X 光管工作电压为 30 kV,工作电流 25 mA,Cr-Ka 辐射,准直管直径 1 mm,Fe(211) 衍射面。测量前先将试样表面用细砂纸打磨平整,再使用 X 射线应力仪进行测试。表面残余应力的测量位置如图 8 所示,在测试路径上选取 6 个点进行测量。测量结果及其与模拟结果的对比如图 9 所示。

由图 9 可看出,激光熔覆层区域主要存在拉应力,但模拟值和实验值之间存在一定的误差,实验值相对模拟值要小。在热影响区附近转变为压应力,数值相对较小。而在远离熔覆层区域应力逐渐减小为零。考察实验值和模拟值之间的误差,主要由以下 4 方面引起:

- 1)数值模型建立的过程是对实际激光熔覆过程的简化和近似,如模型中只考虑温度场和应力场的相互耦合效应,但却无法进一步考虑熔池形成和组织转变对应力场的影响。
- 2)由于计算条件限制,有限元网格不可能划分太细,计算模型与实际有差别,由此造成误差。
- 3)X 射线衍射应力测定的精度问题。由于 X 射线在金属表面的穿透深度只有 10 μm 左右,由此造成 X 射线应力测定对工件的表面状态比较敏感,从而造成一定的测量误差。而处于表层的金属原子由于约束的减少,其应力已经获得一定程度的释放,由此也会造成表面应力测试结果的减小。
- 4)由于 X 射线衍射光斑直径的限制,测量准确性也会受到一定的影响。

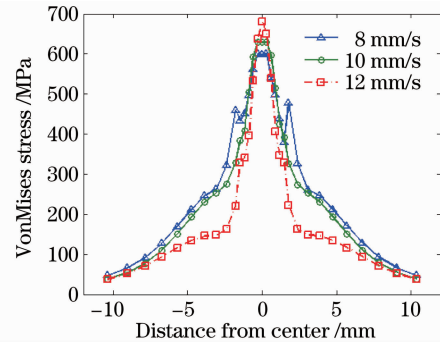


图 7 不同扫描速度下工件表面路径上的应力分布
Fig. 7 Stress distribution along the surface path under different scanning speeds

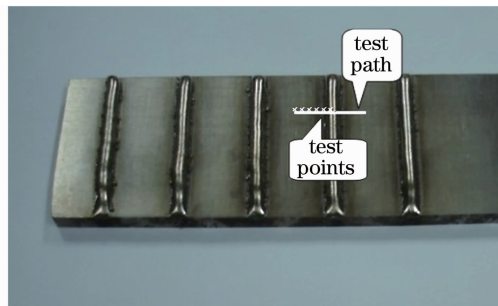


图 8 激光熔覆试样及应力测试路径
Fig. 8 Laser clad sample and the stress test path

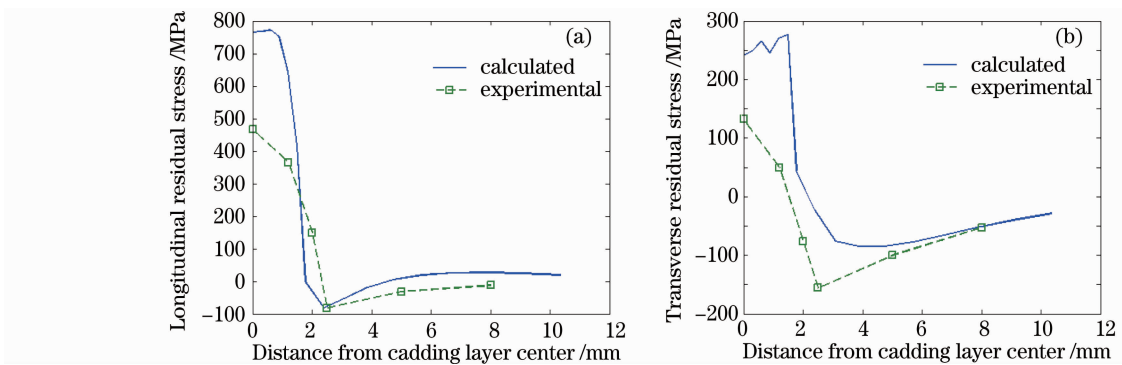


图 9 表面路径上纵向(a)和横向(b)应力的测量结果与模拟结果的对比
Fig. 9 Comparisons of measurement results and simulation results along the surface path
(a) longitudinal stress; (b) transverse stress

6 结 论

采用 MSC. Marc 软件建立了同步送粉激光熔覆过程的有限元模型,直接耦合温度场和应力场,考察了激光熔覆之后工件表面及内部的残余应力分布规律。研究表明,沿激光扫描方向的拉应力远大于横向的拉应力,且应力分布随着深度的增大而逐渐减小;同时,随着扫描速度的增大,熔覆层表面的等效

VonMises 应力峰值也随之增大。激光熔覆实验和表面残余应力测定结果表明,残余应力模拟值和实验测量结果基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Hao Nanhai, Lu Wei, Zuo Tiechuan. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of stress field in laser cladding process[J]. *Chinese Surface Engineering*, 2005, **18**(1): 20~23
郝南海, 陆伟, 左铁钊. 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*, 2005, **18**(1): 20~23
- 2 Lai Peng. Numerical simulation of laser cladding process[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2009
赖鹏. 激光熔覆过程的数值模拟[D]. 广州: 华南师范大学硕士学位论文, 2009
- 3 Shen Xianfeng, Wang Yang, Yao Jing *et al.*. Finite element simulation of thermal stress distribution in direct metal laser sintering[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4): 343~346
沈显峰, 王洋, 姚进等. 直接金属选区激光烧结热应力场有限元模拟[J]. *激光技术*, 2005, **29**(4): 343~346
- 4 Li Shouwei, Shen Yifu, Gu Dongdong *et al.*. Thermal~mechanical coupling finite element analysis of stress field in selective laser sintering of multi~component metal powder[J]. *Chinese Mechanical Engineering Society*, 2007, **18**(6): 751~755
李守卫, 沈以赴, 顾冬冬等. 多组元金属粉末激光选区烧结热力耦合有限元应力场分析[J]. *中国机械工程*, 2007, **18**(6): 751~755
- 5 M. Labudovic, D. Hu, R. Kovacevic. A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping[J]. *J. Materials Science*, 2003, **38**(1): 35~49
- 6 Cheng Guangping, Li Mingxi, He Yizhu *et al.*. Numerical simulation of temperature field and stress field in laser clad coating[J]. *Heat Treatment*, 2009, **24**(4): 49~53
程广萍, 李明喜, 何宜柱等. 激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟[J]. *热处理*, 2009, **24**(4): 49~53
- 7 Yao Guofeng, Chen Guangnan. Numerical simulation of transient thermal field and residual stress in laser melting process [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 241~243
姚国风, 陈光南. 激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2): 241~243
- 8 Zhan Huanxiao, Wang Yong, Han Tao *et al.*. Residual stress analysis of the remelting zone on 42CrMo steel plate in single-pass laser wide-band treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 625~630
占焕校, 王勇, 韩涛等. 42CrMo 钢表面单道激光宽带处理后熔凝层的残余应力[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 625~630
- 9 Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 931~936
陈瑞芳, 郭乃国, 花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 931~936
- 10 Yu Shurong, Fan Ding, Xiong Jinhui *et al.*. CO₂ laser welding of tailored aluminum alloy sheets with different thickness and numerical simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1795~1800
余淑荣, 樊丁, 熊进辉等. 铝合金不等厚板的 CO₂ 激光拼焊及数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1795~1800
- 11 Li Shaojie, Fan Xingjuan, Yao Xiaoliang *et al.*. Numerical simulation of temperature field during superalloy laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(19): 76~79
李绍杰, 范兴娟, 姚晓亮等. 高温合金激光熔覆过程温度场的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2007, **36**(19): 76~79
- 12 F. Bruckner, D. Lepski, E. Beyer. Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, **16**(3): 355~373
- 13 Yan Dongyang, Wu Aiping, Jiao Haojun *et al.*. Numerical simulation of residual stress and deformation on laser welding of "grooved-coat" structure[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(11): 13~16
鄢东洋, 吴爱萍, 焦好军等. 沟槽蒙皮结构激光焊接应力和变形的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(11): 13~16
- 14 Wang Yeping, Zhu Chengming. Finite element simulation of temperature field and stress field in laser forming [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2007, (1): 22~24
王野平, 朱成明. 激光弯曲成形温度场与应力场的有限元模拟[J]. *机械工程与自动化*, 2007, (1): 22~24