

Application and Development of Numerical Simulation in Laser Cladding*

Yanwei Geng, Li Yin

Shanghai Maritime University, Shanghai
Email: gengyanwei88@163.com

Received: Aug. 14th, 2013; revised: Sep. 12th, 2013; accepted: Sep. 20th, 2013

Copyright © 2013 Yanwei Geng, Li Yin. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yanwei Geng, Li Yin. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: The application of domestic and overseas numerical simulation technology in the study of temperature field of laser cladding was described in this paper. Several main factors that affect the numerical simulation were analyzed. The problems of the application of numerical simulation in temperature field of laser cladding were pointed out and the important development direction was presented on this basis.

Keywords: Numerical Simulation; Laser Cladding; Temperature Field

激光熔覆数值模拟的应用及发展*

耿彦为, 尹 莉

上海海事大学, 上海
Email: gengyanwei88@163.com

收稿日期: 2013年8月14日; 修回日期: 2013年9月12日; 录用日期: 2013年9月20日

摘 要: 文中介绍了国内外数值模拟技术在激光熔覆温度场研究中的应用情况; 对影响数值模拟的几个主要因素进行了分析, 指出了数值模拟技术在激光熔覆温度场应用中存在的问题, 并在此基础上提出了未来的发展方向。

关键词: 数值模拟; 激光熔覆; 温度场

1. 引言

激光熔覆是一种新型的材料表面加工改性技术。它是在基材表面加入熔覆材料, 利用高能密度激光加热, 使熔覆材料与基材表面金属迅速熔化, 并经过快速凝固后形成熔覆层, 从而改善材料的表面性能。熔覆过程中熔池内存在着复杂的传热、对流等物理和化学现象, 而这些对材料的硬度、强度、耐磨性以及耐腐蚀性能都有直接的影响。另外, 在激光熔覆过程中工

件的局部温度会快速升高, 并伴有动态熔化现象, 形成形状小但是温度却非常高的熔池, 它的温度往往会快速降低。由于在熔覆过程中使用的是移动的热源, 致使工件的温度在时间与空间上变化较大, 进一步导致材料的热性能参数发生很大的改变, 还会伴随着发生熔化和相变潜热的现象。对于熔池中流体的流动、应力和温度瞬时分布, 以及熔池表面粉末、熔池、光束的相互作用和表面形状的形成, 很难用实验的方法测得^[1]。而数值模拟能够再现激光熔覆工艺全过程,

*基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50972089)。

能够掌握熔覆过程中组织的演变、温度的动态分布,以及对影响熔覆成形质量的材料因素和工艺因素进行分析,进而优化工艺参数^[2],这对实际应用的指导具有很重要的意义。

数值模拟具有以下优点: 1) 由于受到技术水平以及设备条件的限制,现实中一些很难实施的实验,可以在数值模拟中进行; 2) 对于材料熔覆的中间过程和变化趋势,可以通过数值模拟显示出来,便于研究热物性参数与工艺参数对熔池的形状和温度场的影响; 3) 根据数值模拟的结果与实验结果的对比,可以不断修改实验过程,达到优化设计的目的。

2. 数值模拟研究现状

人们很早就对激光熔覆的数值模拟进行研究。但由于计算机技术水平的限制以及这一实验研究过程的复杂性,激光熔覆的数值模拟热模型也经历了从低维到高维的不同发展阶段。在国外, Kar 等^[3]考虑到了激光熔覆过程中涂层的相互混合和粉末在熔池中的溶解建立起一维的热模型; Steen 等^[4]考虑到熔覆粉末颗粒在到达基材表面的过程中对激光束能量的吸收、反射及散射和在热流场中轨道重合作用的综合因素的影响提出了有限差分数学模型。Picass 等^[5]在综合考虑了液-气界面的热交换、热交换以及熔池中流体流动的因素后,建立了态的二维有限元模型,并且根据涂层的高度可以得到熔池的形态^[6]。除上述之外,

国外数值模拟发展作总结于表 1。

在国内,曾大文等^[11]建立了在热源移动的情况下激光熔池中流体流动和热量传导过程的三维非稳态的数学模型,该模型的动量方程是采用自适应网格技术离散求解出来的,从而计算得到激光熔覆过程中熔池温度和速度在不同时刻的分布情况。

黄延禄等^[12]通过全面考虑激光熔覆过程熔池中流动与传热、粉末流与激光束的相互作用以及熔覆层的形成等一些最主要的物理现象,提出了一种送粉激光熔覆中熔覆层表面形状和厚度的计算模型,把熔覆过程中出现的固相区、两相区和液相区看成一个连续的介质,流场和温度场用非稳态的固液相变统一模型来进行表达,而该过程中有关移动热源和传热的问题采用固定网格的移动坐标进行处理。用显焓来表示能量方程,有关潜热的对流项和非稳态项都用其源项处理,为了使模拟在粉末浓度较大的情况下也能够适用,粉末流和激光束的相互作用采用 Lambert-Beer 定理和米氏理论进行计算。

凌毓涛等^[13]在没有熔化的假定条件下,建立了热处理三维温度场的有限元数值模拟,在这个模型中只要考虑到试件的初始温度,并且在扫描方向上试件长度足够大,温度场的分布就可以精确的计算出来,并采用 Java3D 软件技术对热处理的三维温度场进行了模拟仿真。除此之外,在不同熔覆工艺和材料条件下,数值模拟的传热模型也取得了很大的发展,现做总结

Table 1. Foreign numerical simulation of heat transfer model development situation
表 1. 国外数值模拟传热模型发展概况

作者	模型	假定	结论
Ollier ^[7]	二维模型	激光熔覆表面为简单的圆弧。	建立了激光熔覆的二维模型,确定了熔覆层的高度和稀释率的主要影响因素。
Hoadley ^[8]	二维传热模型	1) 允许自由边界随着熔池区域的变化而变化; 2) 预先确定熔覆层的高度; 3) 不考虑横截面的流动换热情况。	建立了激光熔覆二维温度场、流场及可变形自由表面的数学物理模型。
L.F. Guo ^[9]	三维有限元模型	综合考虑移动热源、粉末与基板间隔热效应的影响。	获得了使基体与熔覆层呈良好冶金结合的最佳工艺参数,并进行了验证;在 ZM51 合金表面制备 Al-Si 复合涂层,模拟结果表明,在该工艺参下熔覆层的稀释率大大降低。
Kou ^[10]	移动热源三维准稳态热模型	1) 考虑浮力和表面张力梯度作为熔池流体流动的驱动力; 2) 熔池的形状通过计算得到,而不是事先给定; 3) 考虑雷诺数对熔池流动方式的影响。	模拟计算 3.2 mm 厚 6063 铝板熔化熔池中的流场和温度场,结果表明:表面张力温度系数 dY/dT 为正时金属液体从熔池中心高温区流向熔池边缘低温区,熔池变宽变浅,宽深比较大; dY/dT 为负时,金属液体从熔池高温区流向熔池底部低温区,宽深比较小。

于表 2。

这些假设后的物理模型比较符合实际情况，能够用于激光熔覆过程的有限元模拟，从而揭示激光熔覆过程的反应机理并对工艺参数进行优化。但是这些模型仍存在不足：熔池冶金动力学过程会受到低雷诺数湍流的影响，该影响可以很好的解释熔池流体流动的复杂性，而建立的模型中的大都没有考虑这点；在熔覆过程中材料的热物理性能会受到熔池自由表面合金元素的影响，而这对熔覆层的组织和性能有很大的影响，而模型中并没有把这些考虑进去；对于糊状凝固区较宽的合金系统，固液界面糊状凝固区流体流动换热对熔池温度场和流场的影响是不可忽略的，而国内外的模型中大都没有考虑这一因素^[18]。

3. 影响温度场数值模拟的主要因素

3.1. 导热微分方程

激光熔覆反应的过程实际上是一个热处理的过程，那么该过程中的热传导的行为可以使用根据能量守恒定律和傅立叶定律建立起来的导热微分方程，一般表达式是：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

其中， ρ 是材料的密度； C_p 是材料的比热容； T 是时间； λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别是材料在 x 、 y 、 z 方向上的热导率； Q 是内热源。

Table 2. Domestic numerical simulation of heat transfer model development situation

表 2. 国内数值模拟传热模型发展概况

作者	模型	假设	熔覆工艺及材料	结论
席明哲 ^[14]	连续移动三维瞬态激光熔池温度场计算模型	1) 合金粉末对激光熔池温度场没有影响；2) 要考虑到材料表面温度对激光吸收率的影响，以及相对对熔池温度场的影响。	用 ANSYS 的 Solid70 六面体八节点单元对 45# 钢板进行网格划分	1) 连续移动激光熔池纵切面的形貌呈“勺”状，熔池表面温度最高点不在激光束的中心，而是稍稍偏后于激光束中心；2) 在相同激光工艺参数下，计算熔池横截面尺寸与实验所测得的横截面尺寸吻合较好，表明所建立的连续移动熔池温度场计算模型是正确可靠的。
江世好 ^[15]	利用 APDL 参数化设计语言建立三维瞬态温度场数值模型	1) 材料是各向同性的；2) 忽略熔池流体流动、材料汽化对温度场的影响。	采用压片预置式，在镍基表面熔覆 NiCoCrAl-Y ₂ O ₃ 粉末片	1) 从该数值模型的温度场模拟结果得到熔覆过程中存在明显的热累积作用；2) 该模型能够较高精度地模拟计算出三维激光熔覆瞬态温度场的分布，为激光熔覆工艺的数值计算奠定了基础。
杨洗陈 ^[16]	基于非预混燃烧模型，将激光相处理为连续性介质，粉末颗粒看作离散相物质，建立了激光作用下粉末流的质量、动量和能量方程	1) 粉末粒子是均匀的吸光物质；2) 激光通过粉末流后的衰减能量全部被粉末流吸收；3) 粉末不吸收基体的反光；4) 不考虑颗粒热物性参数的变化和融化潜热，并忽略粒子间的对流换热。	采用同轴送粉末法，对粉末流的温度场进行数值模拟	1) 建立了激光作用条件下粉末流整体温度场的仿真模型；2) 数值模拟结果表明，沿喷嘴轴线方向喷嘴出口粉末流温度最低，随着距离增大温度快速升高；从 20 mm~100 mm 的距离，粉末流温度开始下降。激光工艺参数对粉末流温度分布有影响；增大粉末流速度会减少粉末流的温度值，增大激光功率将引起粉末流的温度升高。
赵洪运 ^[17]	建立模型时考虑到粉末到达基体前的温升，并作为初始温度场施加给熔覆单元，采用生死单元技术进行熔覆过程的模拟	1) 忽略激光的反射、折射、颗粒离子之间的相互加热和光束遮蔽的影响；2) 粉末颗粒的温度在迎光面和背光面是均匀一致的；3) 粉末颗粒只在迎光面吸收能量，而整个球体表面对外辐射；4) 粉末不吸收来自基体的反光。	分别对 Q235 基体上单道熔覆和多道接 Ni60 粉末进行数值模拟	1) 证明了该模型用于模拟送粉激光熔覆温度场的合理性，发现粒子温升和激光功率之间呈线性关系；2) 模拟发现单道熔覆层的温度变化呈一个锯齿状，升温过程近似直线上升，降温曲线近似呈双曲线的一支；3) 多道熔覆过程温度场呈后拖的偏椭圆状，节点上的热循环经过逐渐增大到峰值，峰值温度最终趋于稳定。

3.2. 激光加热热源

在激光熔覆的全部过程中，对数值模拟起着重要作用的是所建立的热源模型。温度场和应力变形场的计算结果和准确度直接受到热源模型的影响。因为在熔覆过程中热源是移动的，因此应该从时间和空间两个角度考虑热源模型的建立，也就是既要考虑到激光束能量在不同空间上的分布，又要考虑到光源移动即时间域上的分布^[19]。在激光熔覆热源输入的分析中，大多采用高斯分布热源模型。

高斯热源模型^[1]：高斯热源是一种只在表面施加正态分布的二维面状热源，它形成的熔池呈现圆形并且熔池的面积较小，是激光熔覆过程数值模拟时最常用的热源模型，如图 1 所示。

距加热中心任一点 A 的热流密度可以表示成下面的式子：

$$q_m = \frac{3r^2}{\pi R^2} Q \quad (2)$$

$$q(r) = q_m \exp\left(\frac{-3r^2}{R^2}\right) \quad (3)$$

式中 q_m 是热斑点中心的最大热流密度； R 为电弧的有效加热半径； r 为所求点距离电弧加热中心的长度； Q 为激光热源在瞬间给工件的热能。

随着对激光熔覆实验的研究不断深入，人们逐渐发现上述热源存在不足之处：熔覆中最常用的高斯热源没有考虑热透作用，只是在表面施加面热源，而热透作用对熔覆层的组织和性能有着很大的影响。而矩形光源加热均匀，对熔覆合金稀释程度小，单道熔覆面积大，具有功率低且扫描速度慢的特点，能更好的

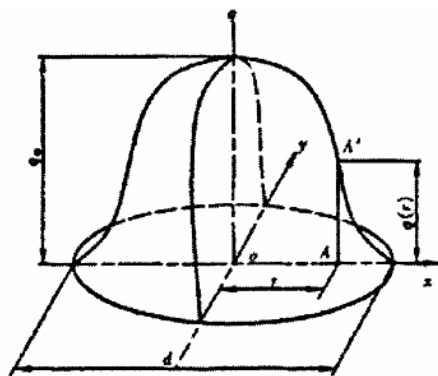


Figure 1. Classic Gaussian heat source model^[1]
图 1. 经典高斯热源模型^[1]

形成无裂纹的熔覆层，逐渐得到应用。李健等^[20]采用 2.5 mm/s 的扫描速度，激光功率 2500 W 的矩形光源，在 Q235 钢材上熔覆碳化物陶瓷涂层，结果表明：熔覆层组织细化，分布均匀，无团聚现象产生，熔覆层与基体的交界处出现一条明显的白亮带，熔覆层与基材之间呈良好的冶金结合。

3.3. 热分析材料的基本属性

比热容、焓、热传导率、对流换热系数、辐射系数、生热率是在热分析过程中经常用到的材料的热物性参数。而材料的这些属性一般都会随着温度的变化而改变，在温度变化范围比较小的情况下，可采用材料属性的平均值进行计算。但是在激光熔覆的过程中，材料的热物理属性会随着工件局部温度的剧烈变化而改变，这样导致了计算结果产生很大的偏差。目前所用到的数据大部分还是在室温条件下得到的，而在高温情况下的属性数据还一直处于空白状态，这给数值模拟计算带来很大的困难。插值法和外推法是最常用的两种近似获得材料在未知温度范围内的基本属性参数的方法。对于经常见到的大多数材料已经有现成的数据，通过查阅相关的手册就可以得到，但是对于某些新材料或特殊材料的热物属性仍然需要通过实验确定。

3.4. 相变潜热的处理

激光熔覆过程中存在着相应的组织转变，即在加热的过程中材料会从固态熔化成液态以及在冷却过程中从液态变为固态。相变潜热是指在相变过程中吸收和放出的热量。熔覆过程中材料焓会随温度的改变而不同，因此在利用 ANSYS 进行数值模拟时就用热焓的形式计算相变潜热。其数学表达式：

$$H = \int \rho c(T) dT \quad (4)$$

式中： H 是材料焓的变化； ρ 是指材料的密度； c 是指材料的比热容； T 是绝对温度。

3.5. 边界热交换的处理

在激光熔覆之前基材与预置涂层的初始温度基本上是一样的，一般设定为室温 25℃，但是在熔覆的过程中会产生局部高温，工件的边界与外界环境之间会产生很大的温差而发生热交换。其中主要包括热对

流和热辐射，为了计算方便，在数值模拟的过程中往往使用一个总数学式来表示这两种换热方式：

$$q = \beta(T - T_a) \quad (5)$$

式中 β 是总的换热系数， T_a 是外界环境的初始温度。

3.6. 应力场的影响

在热力学分析中，应力场往往伴随着温度场产生。激光熔覆热力学模拟时，温度场、应力、变形以及显微组织之间的相互影响是要重点考虑的，它们之间的关系如图 2 所示，其中实线表示影响较大，虚线表示影响较小^[21]。

温度场产生的热应力是引起熔覆层开裂的主要原因之一，数值模拟技术是理论研究开裂原因的有效手段。近几年激光熔覆应力场的数值模拟也取得了很大的进展，顾建强等^[22]采用 MSC.Marc 软件对 2Cr13 基体上同步送粉熔覆 2Cr13 粉末的温度场、应力场进行了直接耦合分析，模拟得到的结果表明：平行于激光扫描方向的拉应力值远大于垂直于激光扫描方向的应力值。姜秋月^[23]利用 ANSYS 软件对 Q235 钢板基体上多道熔覆 Ni60 粉末合金的应力场进行有限元模拟分析，从而得出熔覆层纵向应力最大，横向应力次之，厚度方向的应力最小；三向拉应力在材料进入弹性状态后，表现为横向和厚度方向的拉应力明显下降，纵向应力基本保持不变；而熔覆层中心区域一直受到拉伸应力。

4. 激光熔覆数值模拟存在的问题

数值模拟技术在激光熔覆过程中的应用已经取得了很大的进展，在建立一定模型的情况下能够较准

确的反应出熔覆过程中温度场、应力场的分布情况，并且可以对参数进行控制和对多种因素进行比较，分析出各个工艺参数在不同条下的影响及其共同作用的效果，优化实验缺陷，但是数值模拟在激光熔覆中的应用还不够成熟，在很多方面仍存在不足：

1) 综合国内外建立的数学物理模型来看，大都作了很多假设，简化了数值模拟的过程，而对于熔覆过程中的热对流、热辐射、热传导以及相变潜热的影响大都离开进行考虑，没有与传热控制的模型和对流控制的模型很好的结合起来；

2) 温度场的导热微分方程有的非常复杂，有的存在很大的局限性，而这对深入分析研究激光熔覆的加工参数很是不利。激光功率、光斑形状、扫描速度是激光加工的三个最基本的参数，它们对熔覆层的尺寸和组织性能有很大的影响，对这些参数的影响进行深入系统的研究，对优化激光加工设计有着十分重要的作用；

3) 材料在高温时的热物性参数很难确定，常采用插值法处理，对模拟结果和计算过程有很大的影响；

4) 建立的数学模型对熔池边界条件的确定有一定的局限，对流体流动的驱动力只考虑了表面的张力和浮力，没有考虑气体的压力和粉末对熔池表面的冲击力，而这些都直接影响到最终的计算结果；

5) 对激光熔覆的数值模拟大都处于正向推理，即知道材料的基本情况和加工工艺参数的情况下，模拟得到加工工件的硬度、相变组织、熔覆层表面状况等加工后的结果，而很少进行由激光熔覆的结果推出应选用的激光工艺参数的逆向推理研究；

6) 目前激光熔覆的数值模拟对温度场的研究较多，而对应力场的分析很少。

5. 发展趋势

随着人们对激光熔覆数值模拟研究的不断深入，数值模拟研究的焦点和方向主要集中在以下几个方面：

1) 研究开发新的单元技术。有限元技术的关键问题是单元技术，它对有限元的计算效率有着很大的影响，而提高有限元计算效率的主要方法就是研究开发出合适的单元技术；

2) 在激光熔覆数值模拟中运用相似理论。激光

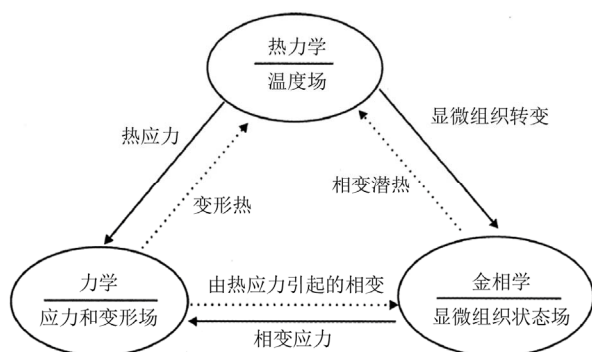


Figure 2. Coupling relationship between temperature, thermal stress, phase change
图 2. 温度、热应力、相变之间的耦合关系

熔覆的过程中会发生温度的变化、组织性能以及相变,是一个非常复杂的过程,不仅要提高数值模拟的计算速度和计算结果精度的同时,有必要引入相似理论;

3) 网格划分技术。移动热源是激光熔覆研究中经常用到的,整个工件的温度会随着的热源的移动在时间和空间上发生很大的变化,并同时存在着加热和冷却、加载和卸载的现象,因此采用自适应网格划分技术更能提高模拟结果的精确度;

4) 分布式并行处理和并行计算。为了缩短有限元分析的计算时间,大部分采用并行计算的技术,但是由于受到计算机硬件技术和并程序编制复杂性的限制,对这方面的研究发展缓慢;

5) 在动态区域实现分解算法。激光熔覆是一个瞬态加热的过程,在该过程中有限单元经历了温度的急剧变化,根据熔覆过程的这一现象,研究人员提出了动态区域的分解算法的设想,但到现在为之还处于研究阶段。激光熔覆采用移动热源,因此各有限单元的温度在熔覆的过程中都经历了迅速升高和快速降低的剧烈变化,但是在熔覆过程的某一个具体时刻,绝大部分单元的状态都是相对稳定的,只有微小的局部单元的温度状态发生巨大变化,而这些温度急剧变化的单元在不同的时刻的状态也是不稳定的。区域分解算法主要是针对结构进行的,是并行计算中的一个主要方法,它求解的全部时间域都是静态的,用于数值模拟中会导致计算效率的下降,而动态区域算法针对有限元网格中和求解相关的各物理量的动态情况,而改变区域的求解方案,则可以提高效率^[24]。如果把动态区域算法与自适应网格技术结合起来应用于数值模拟技术,则两者的优点可以得到更充分的发挥,从而更大程度的提高计算效率。然而这些研究会涉及到有限元的核心部分,从根本上改变了程序结构,将耗费大量的工作。

6. 结语

激光熔覆数值模拟技术的发展有赖于数学模型、物理参数的确定、验证计算结果的检测方法和计算机的能力。在数值模拟的研究中,应该建立熔覆熔池特点相适合的雷诺数的湍流模型,并根据熔池中气-液界面的真是边界条件,准确的模拟出熔池中合金元

素的分布和温度场的分布。全面考虑影响模拟的各种因素,建立能够反映现象本质和规律的数学模型,是模拟技术得到更大的发展和在工程中取得实际应用的重要因素之一。目前对模拟后试验验证工作、检测方法以及激光熔覆各种参数的确定还存在一定的困难,在熔覆过程中,熔覆层中产生的气孔、裂纹等很难在模型中体现出来。我们相信随着人们研究的不断深入和计算技术的飞速发展,将会建立起更加完善的数值模拟模型,使数值模拟技术在激光熔覆领域得到更大发展。

7. 致谢

本论文是在导师尹老师的精心指导和悉心关怀下完成,也得到国家自然科学基金的资助,在此,向他们表示衷心的感谢和崇高的敬意。在文章写作的过程中查阅和引用了各位著者的学术成果,思想上受到启迪,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 楼凤娟 (2009) 激光熔覆的温度及应力分析和数值模拟. 浙江工业大学, 杭州, 29-37.
- [2] 郭华峰, 熊永超, 李志 等 (2009) ANSYS 在激光熔覆成形温度场数值模拟中的应用. *工具技术*, 5, 73-76.
- [3] Kar, A. and Mazumder, J. (1987) One-dimensionnal diffusion model for extended solid solution laser cladding. *Applied Physics*, 61, 2645-2655.
- [4] Weerasinghe, V.M. and Steen, W.M. (1983) Laser cladding by powder injection. In: Mazumder, J., Chen, M.M. and Tucher, C. *Transport Phenomena in Materials Processing*, ASME, New York, 15-23.
- [5] Picasso, M. and Hoadley, A.F.A. (1994) Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 4, 61-83.
- [6] 朱晨光, 孙耀宁, 于青激 (2012) 光熔覆温度场的数值模拟研究进展. *材料热处理技术*, 8, 132-137.
- [7] Ollier, B., Pirch, N. and Kreutz, E.W. (1996) Laser photons. 1, 8.
- [8] Hoadley, A.F.A., et al. (1991) Heat-flow simulation of laser remelting with experimental validation. *Metallurgical Transactions B*, 22, 101-109.
- [9] Guo, L.F., Yue, T.M. and Man, H.C. (2004) A finite element method approach for thermal analysis of laser cladding of magnesium alloy with preplaced Al-Si powder. *Journal of Laser Applications*, 16, 229-235.
- [10] Kou, S. and Sun, D.K. (1985) Fluid flow and penetration in stationary arc welds. *Metallurgical Transactions A*, 16, 203-213.
- [11] 曾大文, 谢长生 (2002) 激光熔池三维非稳态对流传热过程的数值模拟. *激光技术*, 2, 102-105.
- [12] 黄延祿, 邹德宁, 等 (2003) 送粉激光熔覆过程中熔覆轨迹及流场与温度场的数值模拟. *稀有金属材料*, 5, 330-334.
- [13] 凌毓涛, 姚远, 华超 (2004) 激光热处理温度场数值模拟及仿真研究. *机械*, 6, 30-32.
- [14] 席明哲, 虞钢 (2004) 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数

- 值模拟. *中国激光*, **12**, 1527-1532.
- [15] 江世好, 黎向锋, 佐敦稳, 等 (2011) 基于预置压片的高温合金激光熔覆温度场仿真. *兵器材料科学*, **4**, 23-27.
- [16] 赵洪运, 舒凤远, 张洪涛, 等 (2010) 基于生死单元的激光熔覆温度场数值模拟. *焊接学报*, **5**, 81-84.
- [17] 杨洗陈, 栗丽, 张焯 (2009) 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟. *光学学报*, **11**, 3114-3120.
- [18] 王林林 (2007) 铝合金激光溶敷流场和温度的数值模拟. 华中科技大学, 武汉, 7-8.
- [19] 张尔康 (2010) 耐热钢激光表面改性辐照过程温度场数值模拟. 沈阳工业大学, 沈阳, 18-22.
- [20] 李健, 尹莉, 李文戈, 等 (2012) 激光反应熔覆碳化物陶瓷涂层温度场的有限元模拟. *机械工程材料*, **6**, 86-89.
- [21] 单磊, 陈罡 (2008) 激光熔覆陶瓷热应力分析. *宁波工程学院学报*, **2**, 8-12.
- [22] 顾建强, 骆芳, 姚建华 (2010) 激光熔覆过程残余应力的数值模拟. *激光与电子学进展*, **10**, 1-6.
- [23] 姜秋月 (2011) 多道激光熔覆应力场的模拟. *材料热处理技术*, **6**, 124-127.
- [24] 张宁 (2007) 铝合金激光熔覆金属基复合材料及数值模拟. 沈阳工业大学, 沈阳, 11-12.