

## 激光熔覆温度场模拟与表征的研究现状

王旭<sup>1,2,3</sup>, 于月光<sup>2,3</sup>, 黄恩泽<sup>2,3</sup>, 杜开平<sup>2,3</sup>, 李正秋<sup>2,3</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;  
3. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206)

摘要: 激光熔覆熔池内存在传质、传热、对流及气-液-固界面间的反应, 熔覆过程中温度场的变化对熔覆层组织和性能产生重要影响, 正确解析这一复杂物理冶金过程, 对激光技术发展有重要指导作用。本文回顾了近年国内外激光熔覆温度场的模拟研究进展, 重点评述了激光加工温度场从数学分析到数值模拟的研究历程, 并针对这一领域今后的发展提出了一些看法。

关键词: 激光加工; 温度场; 模拟与表征

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2019)12-0002-06

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2019.04.002

## Research Status of Laser Cladding Temperature Field Simulation

Xu Wang<sup>1,2,3</sup>, Yueguang Yu<sup>2,3</sup>, Enze Huang<sup>2,3</sup>, Kaiping Du<sup>2,3</sup>, Zhengqiu Li<sup>2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819;

2.BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;

3.Beijing Engineering Research Center on Surface Strengthen and Restoration of Industrial Parts, Beijing 102206)

**Abstract:** There are many kinds of interaction in the laser cladding pool, such as mass transfer, heat transfer, convection and the reaction between gas liquid solid interface, which seriously affected the structure and performance of the cladding layer. Correct analysis of this complex physical metallurgical process has important guiding role for the development of laser technology. This article reviews the recent progress of laser cladding temperature field simulation research at home and abroad, which mainly focused on the develop from mathematical analysis to numerical simulation of the laser processing temperature field, and some suggestions on the future development of this field has been proposed.

**Key words:** Laser processing; Temperature field; Simulation and characterization

### 0 引言

激光熔覆技术自诞生以来, 在工业中已获得了大量应用。目前, 国际上关于激光熔覆的研究

热点主要集中于如表 1 所示的领域。不难看出, 激光加工的温度场和流场的模拟与表征依然是各国机构关注的重点之一<sup>[1]</sup>。

第一作者: 王旭 (1985-), 男, 博士, 高级工程师。Email: 409852080@qq.com。

基金项目: 国家重点研发计划 (YFB0306100) 和国家自然科学基金 (51271034) 项目。

表1 国内外研究热点  
Table1 Distribution of research hot spots

地区	国家	研究方向	代表机构
欧洲	德国	(1) 熔覆过程的研究与模拟；	德国亚琛工业大学、弗劳恩霍夫激光技术研究所、罗伯特科勒材料研究所、卡尔斯鲁厄理工学院、GTV公司、亚琛国际公司、法国圣埃蒂安国家学院、英国劳伦斯拉夫堡大学等；
	英国	(2) 制备金属基复合涂层；	
北美	芬兰	(3) 恢复零件和工具尺寸；	美国佛罗里达中央物理与电气工程学院、北德克萨斯大学、南方卫理公会大学激光辅助制造中心等；
	法国	(4) 显微裂纹和残余应力；	
	美国	(5) 涂层电化学性质；	
	加拿大	(6) Mg合金表面激光熔覆显微组织性能；	
亚洲/澳洲	日本	(1) 修复工具钢和模具钢；	日本名古屋大学、澳大利亚布兰特工业研究所、印度甘内什激光焊接与表面工程公司、库库雷亚激光焊接与表面工程实验室；
	印度	(2) 增强金属基复合涂层；	
	澳大利亚	(3) 增强零件性能；	
	中国	(4) 显微裂纹和残余应力；	
亚洲/澳洲	中国	(5) 涂层电化学性质；	北京工业大学、清华大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、上海交通大学、装甲兵工程学院、浙江工业大学、山东大学、苏州大学等。
		(1) 在激光熔覆过程中添加某种金属元素，对特定合金组织形成的影响；	
		(2) 扫描速度对熔覆层硬度和厚度的影响；	
		(3) 激光熔覆制备金属基复合涂层以提高机械性能；	
		(4) Mg表面熔覆金属材料涂层的机械性能；	
		(5) 激光熔覆设备的研究。	

## 1 激光熔覆温度场的研究

### 1.1 激光熔覆温度场的影响因素

激光熔覆过程中，温度场的影响众多，如送粉速率、熔覆层厚度、光斑直径、扫描速度等，用实验的方法来研究热机制或者使用设备来检测熔池温度、涂层应力分布等十分困难，且成本非常惊人<sup>[2-5]</sup>，送粉法激光熔覆工艺原理如图1所示。随着计算机技术在数值模拟领域的广泛应用，为研究熔覆过程中的复杂物理化学现象提供有效的手段，目前激光快速成型领域内温度场模拟工作的软件数量众多，使用较为普遍的有 ANSYS、MSC.Marc、ABAQUS/Standard 等软件。

激光熔覆热源的选取对熔覆层的质量有很大的影响。在热源热输入的分析中，高斯分布热源模型和双椭圆功率密度模型应用最为广泛。其中，高斯分布热源模型如下：设激光的辐照功率为  $P$ ，基模高斯光束的半径为  $\omega$ ，定义  $\eta$  为基模高斯光束的占有系数，则 TEM00 及 TEM10 两种理想模

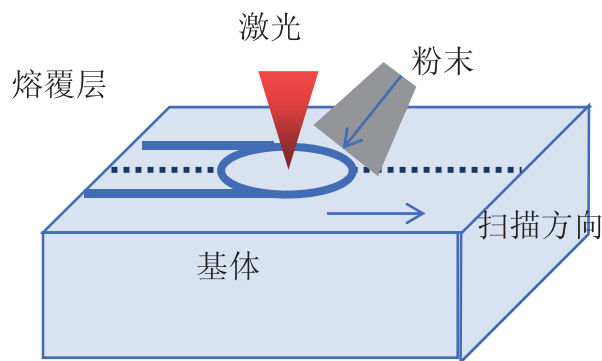


图1 送粉法激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic diagram of powder feeding laser cladding

式按不同强度比例进行叠加的光束在  $(x, y)$  平面的功率密度分布函数可表示为：

$$P(x, y) = \frac{4P}{\pi\omega^2(2\eta+1)} \left( \eta + \frac{x^2+y^2}{\omega^2} \right) \cdot \exp \left( -2 \frac{x^2+y^2}{\omega^2} \right) \quad (1)$$

选择不同的  $\eta$  (通常取  $\eta=0、0.5、0.75$ )，将得到不同形式的光束。在进行实际模拟计算时，常假设激光光束的能量是恒定的，并且激光光源采用近似高斯分布 (即取  $\eta=0$ )。

激光熔覆过程中，各种表面之间存在着复杂的相互作用，其中温度的变化是基础，热变形的同时引起显微组织的相变抗力，组织相变又产生了相变潜热作用于温度场，相互作用关系如图 2 所示。长期以来，激光能量的热作用理论研究多采用数学分析和数值模拟方法进行，并经历了从一维到三维，从导热控制的温度场到对流控制的温度场，从仅计算熔池到综合考虑粉末与激光、基体相互作用等一系列简单到复杂的过程。

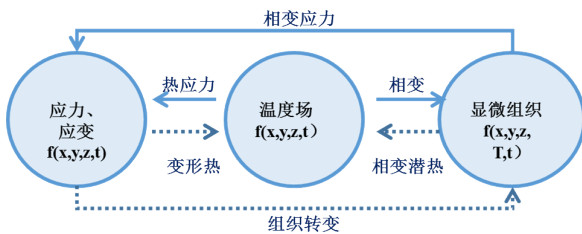


图 2 熔覆温度、应力应变及显微组织的关系  
Fig.2 Relationship among cladding temperature, stress strain and microstructure

### 1.2 激光熔覆温度场的数学分析

激光熔覆温度场的模拟与表征有利于推导涂层组织结构的演变规律，激光加热的数学模型，在研究初期多采用移动光源条件下的导热控制模型，即在基体内部能量方程只考虑扩散不考虑对流，主要是因为基体热物性参数是重要影响因素。早期模型受到计算手段所限，以二维的解析求解为主。

Jaeger<sup>[6]</sup> 推导了移动热源扫描无限大表面时的温度分布解析方程，Rosenthal<sup>[7]</sup>、Carslaw 和 Jaeger<sup>[8]</sup> 发展了该移动热源理论，对不同形状光斑在半无限大基体上的热作用给出了确定解。Cline 和 Anthony<sup>[9]</sup> 假设几何尺度无限大、热物性参数不随温度变化，将冷却速率、熔化深度、扫描速度和激光功率联系起来，用格林函数法求解了导热方程。但当熔池深度与基体厚度相当时，基体的半无限大假设就不再成立了。为解决这一问题，研究者们又开始发展有限厚度基体的求解方法。

Pittaway<sup>[10]</sup> 求解了绝热薄盘在静止和移动圆形高斯光束下的温度场，Kuang<sup>[11]</sup> 采用同种热源求解了有限深度、无限宽度绝热体的线性热影响的问题。虽然解析意义明确，但应用环境受到限制，且要多重假设甚至使结果偏离实际问题，而数值模拟在一定程度上可以有效的弥补上述的缺陷。

### 1.3 温度场的模型建立与数值模拟

Kar 和 Mazumder<sup>[12]</sup> 提出了一维传导模型来确定合金的组成和冷却过程。Hoadley 和 Rappaz<sup>[13]</sup> 提出了一个二维模型来计算激光熔覆过程中稳态温度，具有一定的代表性，给出了基体温度场的准稳态数值模型，计算中考虑了液态熔池的变化和气液自由表面的形状及位置，为了简化模型，认为基体熔化极少并采用激光的线能量形式，从而得到了激光功率、扫描速度和修复层厚度的近似线性关系。Han 等人<sup>[14]</sup> 求解了二维流体和能量方程，预测了激光熔覆过程中熔池的温度分布和几何形状。Cho 和 Pirch<sup>[15]</sup> 等人发表了同轴送粉的三维稳态有限元模型。采用自洽的方法对温度场和涂层形状进行了数值计算。利用得到的温度梯度和冷却速率对涂层凝固组织进行预测。Jendrzewski<sup>[16]</sup> 在基体 X10Cr13 上熔覆钴基合金，讨论了预热温度对修复层温度场和应力场的影响，对其温度特性采用线性近似，经预热后，基体修复层其热应力值由 1800MPa 降为 900MPa，且得到了无裂纹的修复层。Toyserkani<sup>[17]</sup> 等人提出了一种同轴送粉的三维瞬态有限元模型，涂层为多层结构，其宽度和高度由前一层面积和粉末质量决定，该模型忽略了表面张力和重力对涂层形状的影响。He<sup>[18,19]</sup> 等人研究了 H13 钢激光熔覆过程中熔池温度和流体流动的三维数值模型，采用水平集的方法模拟熔池。美国南方卫理公会大学激光辅助制造中心 Kovacevic<sup>[20]</sup> 等人用 ANSYS 建立了有限元模型，如图 3 所示。研究了正负离焦情况下，熔池温度分布和冷却速率的规律，通过与高斯激光束比较发现空心激光束 (离焦) 有效的防止熔池中心过热的情况，但该模型未考虑粉末输入到熔池时产生的影响。

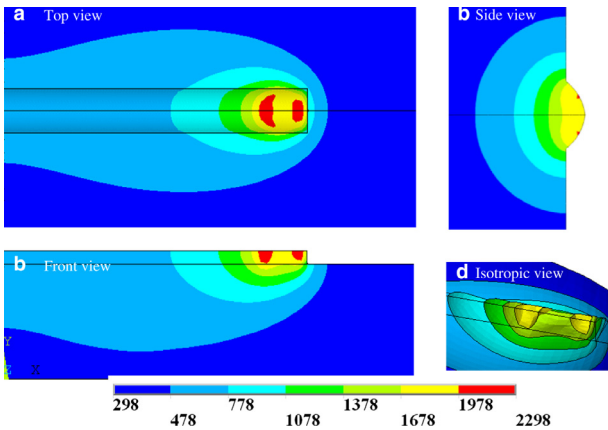


图 3 熔池温度分布 ANSYS 有限元模型<sup>[20]</sup>

Fig. 3 ANSYS finite element model of molten pool temperature distribution

加拿大航空航天制造中心 Dubourg<sup>[21]</sup> 等人研究了不锈钢上激光熔覆 Co-WC 的参数(扫描速度、送粉率、离焦率和搭接率)对涂层几何形状的影响及对 WC 含量的影响,如图 4 所示。该研究采用了田口实验方法,结果表明随着送粉率、扫描速度和离焦距离的减小导致涂层稀释率升高,致 WC 含量明显降低,且该研究还报道了单道与多道涂层的尺寸与 WC 含量之间没有直接关系,但该研究没有考虑 WC 的热力学转变和分解的情况。

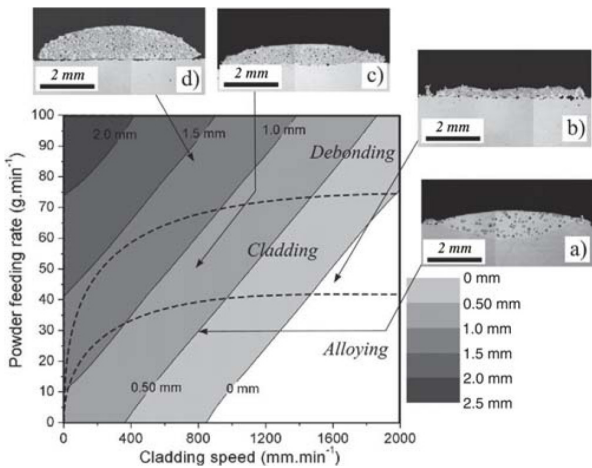


图 4 激光熔覆参数(扫描速度、送粉率、离焦率和搭接率)对涂层几何形状的影响<sup>[21]</sup>

Fig.4 Influence of laser cladding parameters (scanning speed, powder feedingrate, defocusing rate and overlap rate) on the coating geometry

### 1.4 工艺与涂层几何特征的表征

Ansari<sup>[22]</sup> 等人通过回归分析研究了单道熔覆

中主要工艺参数(扫描速度、送粉率、激光功率)与熔覆形貌(宽度、高度、深度、稀释率、润湿角)之间的关系。Safonov<sup>[23]</sup> 等人提出了一种熔体运动和表面形状的近似计算方法,以确定熔体的运动速度和表面张力的作用情况。对于铁合金熔池宽度×厚度为 2×0.2mm,熔体在表层以 1~3m/s 的速度移动,计算了中央和边缘部分的温度差为 500 。Nabhani<sup>[24]</sup> 等人将 Ti-6Al-4V 粉末合金用激光熔覆沉积在同质基体上,研究了工艺参数(扫描速度、送粉率、激光功率)对单道涂层几何特性的影响。Erfanmanesh<sup>[25]</sup> 等人采用回归法分析了单道激光熔覆参数与涂层几何特征之间的关系,得到在 AISI321 不锈钢表面激光熔覆 WC-12Co 的最佳工艺参数,制备出低孔隙率高质量的涂层,其中搭接率和激光功率对涂层宽度的影响规律如图 5 所示。

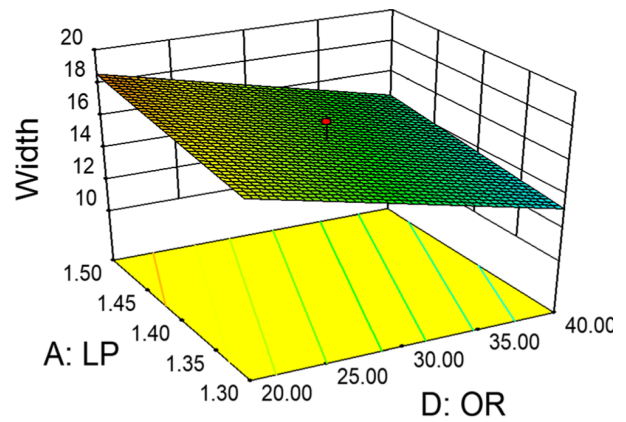


图 5 单层多道激光熔覆功率和搭接率与涂层宽度之间的关系<sup>[25]</sup>

Fig. 5 Relationship between laser cladding power, overlap rate and coating width in single-layer multi-channel coating

Shi<sup>[26]</sup> 等人利用能量和质量守恒定律,根据单位熔池体积能量密度,研究工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉率)和几何特征(宽度、高度和截面积)之间的关系,并通过实验结果验证模型。Ocelik<sup>[27]</sup> 等人提出了单层多道表面波形和涂层高度的关系模型,并对模型进行了验证,但未考虑送粉率对其产生的影响。Suryakumar<sup>[28]</sup> 等人建立了单层多道、单道多层熔覆模型,如图 6 所示,并针对不同工艺路径对该模型进行了验证和优化。

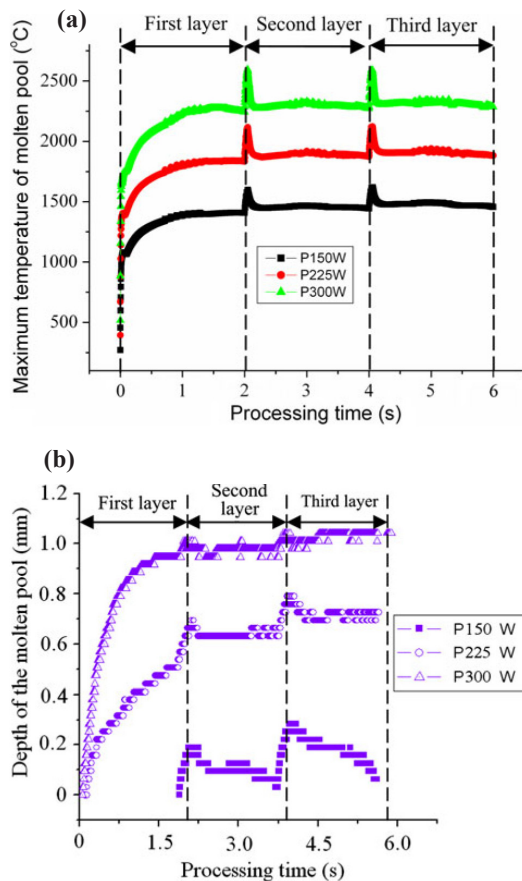


图6 单道多层熔覆时，熔池温度和深度随功率变化的曲线：(a) 熔池温度；(b) 熔池深度  
 Fig.6 The curve of the temperature and depth of the pool with the power change in the single-channel multilayer cladding: (a) temperature of the molten pool, (b) depth of the molten pool

## 2 结论

综上所述，国外众多学者在激光熔覆熔池温度场的数学物理模型中主要存在着如下共同点：首先，假设熔覆的过程为稳态或瞬态，工件为某一方向无限大或有限尺寸；其次，材料的热物性参数是温度的分段线性函数，而作用力仅考虑熔池的表面张力和浮力，在导热控制的温度场上加入了对流项，且对流项为层流；第三，熔池表面是平面或可变形的自由表面。应用这些比较符合实际的数学物理模型，不仅完成了熔池内传热、传质的计算机二维、三维数值模拟，而且还针对激光加工的工艺参数（热源模型、光斑尺寸、激光功率、扫描速度等）对熔池形貌、冷却速度、

温度梯度、组织结构之间的耦合性开展了大量的研究，得到了许多有价值的结论。但前人建立的模型仍存在以下有待探究的问题：

(1) 模型在湍流对熔池冶金动力学过程的影响方面有待于进一步探究，这种影响对于解释熔池流体流动复杂性是至关重要的；

(2) 对固-液共存的流场分析进行一定程度的简化，而当熔覆对象为凝固温度区间较宽的合金涂层时，需进一步研究流场的流动对温度场分布的影响；

(3) 符合激光熔覆熔池特点的边界条件被提前锁定，而流体流动的驱动力不仅仅有表面张力和浮力，还有气体的压力，在送粉法激光熔覆过程中还有粉末对熔池表面的冲击力，这方面的研究也不容忽视；

(4) 可以通过测定不同工艺条件下激光熔覆层中熔覆层枝晶二次臂间距，计算非平衡凝固过程的熔体温度梯度，并结合实验验证计算结果的准确性，可用于修正三维瞬态温度场、流场数学物理模型；

(5) 通过研究熔池气-液-固体界面冶金反应机理，计算熔池中合金元素烧损量，为激光熔覆质场数值模拟提供精确的边界条件和热物性参数；

(6) 随着大尺寸厚涂层零件的激光熔覆，以及快速激光熔覆的发展，往往用到多道多层的熔覆工艺，这一过程温度场的计算与模拟将变得异常复杂，这一方向的研究尤为重要。

## 参考文献

[1] Majumdar J D, Manna I. Laser-assisted fabrication of materials[M]. Berlin: Springer Heidelberg Press, 2013: 70-89.  
 [2] 李艳芳, 卫英慧, 胡兰青, 等. 金属材料表面激光热处理的研究与应用 [J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(2): 142-145.  
 [3] 陈静, 谭华, 杨海欧, 等. 激光快速成形过程熔池行为等实时观察研究 [J]. 应用激光, 2005, 25(2): 77-81.  
 [4] 雷剑波, 杨洗陈, 陈娟. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测 [J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1605-1608.  
 [5] 张可言. 金属材料在中强度激光辐照下的相变速度研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1815-1819.  
 [6] Jaeger J C. Moving sources of heat and temperature at sliding contacts[J]. Proceedings of Royal Society of New South

