

## 激光表面重熔、熔覆温度场的研究进展\*

雷俊鹏 王忠柯 叶和清 曾晓雁

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 介绍了激光重熔、熔覆温度场的研究现状,叙述了较为典型的二维、三维的稳态和非稳态传热模型,分析比较了从该模型出发所得到的结果与实际情况间的差异。根据已有研究所得到的结论,简要讨论了影响模型建立的几个主要因素。为激光与材料相互作用的强瞬态物理过程研究,零件表面裂纹等缺陷激光修复工艺措施的制定提供了理论指导。

**关键词** 激光重熔, 激光熔覆, 温度场分布, 传热模型

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

### The Status and Prospect Researching of Temperature Field for Laser Surface Remelting and Laser Cladding

LEI Jun-peng WANG Zhong-ke YE He-qing ZENG Xiao-yan

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The research prospect of temperature field of laser remelting and laser cladding were discussed. Two and three dimensional steady-state and unsteady-state heat transfer model were introduced. The results from these models and the experiments were compared. Some main factors that influence on the establishment of models were discussed. The research will be helpful to the research of physical process of laser-matter interaction and will supply the theoretical guidance for establishing measures of laser repairing cracks of components.

**Key words** laser remelting, laser cladding, distribution of temperature field, heat transfer models

## 1 引言

激光重熔、熔覆均属激光表面处理,都包括了极快速的动态熔化和凝固过程。熔池内的热物理过程较为复杂,不仅存在传热现象,而且还存在着对流、质量传递等,它们直接影响着熔池的宏观形貌、组织和成分的均匀性,从而影响了材料的各种性能,如硬度、强度、耐磨性及耐腐蚀性。因此,研究激光重熔、熔覆的热物理过程,搞清楚其中的传热、传质问题,对于理论研究和实际的工业应用都具有很重要的价值。到目前为止,国内外的研究者在温度场模型,以及分析热源模型、熔池中的金属流动、材料物理性质等对激光重熔、熔覆温度场造成的影响等方面都做了大量的研究工作,取得了许多有价值的成果<sup>[1,2]</sup>。

## 2 现有模型概述及分析

激光加工的物理基础是激光与物质相互作用,它包括许多短暂、复杂而强烈的现象。许多重要的数据及影响,如温度及流体分布等不可能直接用常规方法测得,同时,由于基材具有多种物理性能参数,使得如果没有特别的实验方法和设备便很难将某一参数分离出来研究。因此,国内外的研究人员提出了许多模型来近似模拟激光加工过程中的物理过程,尤其是在激光表面重熔和熔覆这两个方面,随着研究的不断深入和计算机技术的发展,已经建立了许多较为成熟的模型<sup>[1,3]</sup>。

### 2.1 激光表面重熔的模型

激光表面重熔是一个比较典型的激光加工工艺,但它所包含的物理过程却是相当复杂的。在形成的熔池内除了有热传导形式的传热外,还存在着对流形式的传热和传质,同时,熔池表面还有一小部分能量以辐射的形式传向四周。如果熔池内的温度

\* 国家自然科学基金(59906004)资助课题。

达到材料的气化温度时,还会产生气化现象。气化的材料不光带走能量,还对熔池表面产生一个反冲作用,影响到熔池表面的形状。

建立一个将所有物理现象都包括的模型是不现实的,合理的做法应当是针对具体的激光加工的特点对其物理过程进行简化。C. Chan 等<sup>[4]</sup>在考虑了热传导与溶质对流的情况下,提出了一种用于激光重熔的二维瞬态模型,认为导致溶质流动的主要原因是由温度梯度引起的气液表面的张力梯度所产生的力,并将气液表面看作平面,从而得出了结论:溶质对流在热传导中占有主导地位,它影响着熔池形貌和冷却速度。A. F. A. Hoadly 等<sup>[1]</sup>提出了一种三维瞬态模型,只考虑热传导所引起的传热,不考虑对流传热,也就是没有在边界处理上将表面张力的影响考虑进去。朱大庆等<sup>[2]</sup>提出了一种用于激光重熔的三维稳态模型,在该模型中,他们考虑了传热和对流以及相变潜热对温度分布的影响,而且还改变了以往的模型将气液界面看作平面的做法,采用有限元方法计算了自由表面,得到的熔池表面形貌与实验结果极其相似。

根据激光表面重熔的热物理过程,我们在建立模型时可以忽略一些次要因素,如熔池表面对流、辐射损耗,而应当考虑对熔池内的温度分布和表面形貌影响较大的因素,如热扩散、对流、固-液界面上的熔化潜热等。

## 2.2 激光熔覆的模型

激光熔覆是目前发展较为迅速的一种激光加工技术,它是用高功率密度激光束照射被覆在材料表面上的金属或合金涂层,使之熔化并与基体材料冶金结合的表面强化工艺。可见,对激光熔覆,由于预置涂层的存在,使得其不仅具有与上述重熔相似的物理过程,还存在着预置涂层的熔化和基体材料与预置涂层的熔合。

在激光熔覆方面的研究工作集中在热计算模型上,主要分为两个方向:一是对激光熔覆所需要的功率参数进行预测;其中较为典型的是 J. Powell<sup>[5]</sup> 计算模型以及李力钧-J. Mazumder<sup>[5]</sup> 计算模型,许多文献<sup>[5]</sup> 都对其优缺点进行了评述。二是激光加热温度场的计算模型。A. F. A. Hoadly 和 M. Rappaz<sup>[1]</sup> 提出了一种用于激光熔覆的二维模型,该模型只考虑了热扩散引起的传热,其熔池表面不再是一个平面,而是一个固定的曲面,他们求出了准稳态温度场。M. Picasso 等<sup>[6]</sup> 还建立了一种适合于激光熔覆的二维稳态模型。除了考虑到热传导,溶质

对流,表面张力等因素外,还将气液表面作为未知面求解,并用有限元法作数值计算。徐庆鸿等<sup>[3]</sup> 也给出了一种是用于激光熔覆的三维模型,除了考虑对流和辐射散热外,还将基材的物性视为随温度而变化的变量。但该模型中没有考虑溶质对流,并将熔池表面视为平面。杨洗陈等<sup>[7]</sup> 建立激光加热熔池的物理模型,对激光熔池内外的温度场和流场进行了计算模拟,利用其温度场和流场的情况,对激光熔覆过程中传热和传质情况进行了一定程度的分析,但该模型是针对激光加热单一材质进行模拟的,与实际加热情况相差较大。

在激光熔覆过程中,由于激光与材料的相互作用强烈,熔池的气液表面不会是平面,而会“起波”,也即会有凸凹不平,这样,熔池表面不会一直是平面,而是随着加工参数的变化而变化的复杂曲面,是未知的,在建立模型时应当考虑到这点。此外还应考虑到热传导、溶质对流、表面张力等因素的影响。

## 3 影响模型建立的主要因素

### 3.1 热源的影响

激光表面重熔、熔覆都是利用激光的能量产生热效应,使得物体的温度升高,并产生相变、熔化,来达到加工的目的,因而激光功率密度是一个很重要的加工工艺参数。在以往的热源模型中,很少考虑功率密度分布的影响,通常理想的把它视为均匀分布或呈高斯分布,但在实际加工中,由于谐振腔和导光系统等因素的影响,高功率激光束截面上的强度呈现比较复杂的分布状态。激光光束热源热量相同但功率密度分布不同,扫描时便会产生不同的表面温升,这与大多数模型中的假设有所不同。石娟等<sup>[8]</sup> 采用表面温升计算模型分别对均匀分布、对称非均匀分布、非对称分布的激光功率密度分布进行了讨论,得到了这样的结论:在激光功率、扫描速度及光斑尺寸不变的条件下功率密度分布不同,将得到不同的表面最大温升和不同的达到最大温升所需的时间,从而影响到实际生产中的加工质量。

激光束能量不仅存在着空间分布的不均匀,还存在着时间分布的不均匀,即有涨落。如图 1 所示。造成这种现象的原因是抽运噪声和量子噪声。魏学勤<sup>[9]</sup> 研究了激光器的功率涨落,并从均匀激光束加热半无限大物体和高斯光斑加热半无限大物体的热源模型出发,在热传导方程中引入噪声项,推导出了噪声影响下材料中温度场的分布,并通过与相应的稳态

热源所得到的温度场进行比较,得出了材料加工过程中存在着由激光功率涨落而引起的温度涨落现象。

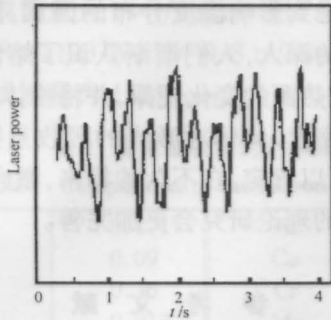


图1 二氧化碳激光器的功率随时间的波动现象

Fig.1 The phenomenon of the CO<sub>2</sub> laser power fluctuation with time

总而言之,在激光加工过程中,由于激光束存在

着时间和空间上的不均匀性,使得实际能量并不像人们假想的那样规则、稳定,与理论模型存在着各种缺陷,造成了计算结果与实测数据间的差异。

### 3.2 表面吸收系数的影响

在激光表面重熔、熔覆过程中,吸收系数是一个十分重要的物理量,它直接决定材料对激光能量吸收多少。吸收系数受到多种因素的影响,如:吸收系数随着温度的升高、波长的变短、表面粗糙度的增加、预置涂层的存在而增大,在整个加工过程中,它是一个在不停变化的量,在所有的这些影响因素中,温度的影响最大。赵光兴等<sup>[10]</sup>在原子能级分布和受激吸收理论的基础上,对金属材料的吸收系数与温度之间的关系进行了研究,提出了一个表示吸收系数  $\alpha$  与温度  $T$  之间关系的式子:

$$\alpha(\nu, T) = \frac{B_{12} N g_1 h \nu}{C} \sqrt{1 + \frac{\pi N e^2}{m_e \omega_0} \frac{\omega_0 - \omega}{(\omega_0 - \omega) + \xi^2/4} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) \right] \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)} \quad (1)$$

其中,  $\nu$  为激光频率,  $B_{12}$  为材料的受激吸收系数,  $m_e$  为电子的质量,  $g_1$  为材料的低能级简并度,  $N$  为全部原子总数密度,  $C$  为真空中的光速,  $h$  为普朗克常数,  $k_e$  为原子电偶极子的强弹性系数,  $k_B$  为玻耳兹曼常数。利用式(1)计算得出了吸收系数  $\alpha$  与温度  $T$  的关系<sup>[10]</sup> 如表1。

表1 材料吸收系数  $\alpha(\nu, T)$  随温度  $T$  的变化(室温至熔点)  
Table 1 Absorption coefficient of material  $\alpha(\nu, T)$  changed by the temperature  $T$  ( from room temperature to melting point)

$T$ /K	$\alpha(\nu, T)$	$T$ /K	$\alpha(\nu, T)$
293	0.010	1093	0.205
393	0.031	1193	0.218
493	0.060	1293	0.227
593	0.091	1393	0.235
693	0.121	1493	0.241
793	0.148	1593	0.245
893	0.171	1693	0.247
993	0.190		

从表中可以看出,在室温至熔点间,吸收系数从0.010变至0.247,变化量大于一个数量级,这说明,在进行有关的研究时不宜将其作为常数处理,应针对不同的温度取相应的值,这样才能更接近实际情况。

### 3.3 熔池中金属流动的影响

激光表面重熔、熔覆过程中都伴有金属材料的

熔化,研究表明,熔池中金属的流动对于传热过程来说有很大的影响<sup>[4]</sup>,导致等温线相对于纯热传导有很大的差异。为了准确的计算激光熔池的传热过程,必须考虑熔池内流体流动的影响,并认为熔池内是以对流为主的传热过程而熔池外是以导热为主的传热过程。基于这一点,国内外许多学者采用数值模拟技术,对激光熔池动力学过程进行了大量的研究,建立了众多的有价值的数学物理模型。然而,早期的模型是建立在一种比较理想的基础之上的,做了许多假设:工件尺寸无限大,静止热源,温度场和流场成对称分布,熔池形貌作为数值分析的前提条件预先确定下来。应用早期的数学物理模型进行数值分析,结果表明,流体流动在确定熔池中的传热过程和温度分布时起着重要的作用,且对熔池形状和随后的结晶过程有着明显的影响。早期的模型与实际熔池中的流体流动情况存在较大的差距,只能做一些定性分析。随着研究的深入,人们逐渐建立了一些与实际熔池流体流动和传热过程较为符合的模型。S. Kou等<sup>[11]</sup>建立了一个考虑到流体流动的三维传热模型,该模型,将浮力和表面张力梯度作为熔池流体流动的驱动力,熔池的形状通过计算得到,而不是事先给定的。

由上述可见,激光表面重熔、熔覆过程中,在浮力和 Marangoni 力的共同作用下,溶质将发生复杂的流动,加速熔池内部的热交换,它对传热过程有很大的影响。



### 3.4 相变潜热

激光表面重熔、熔覆过程中都伴随有熔化和凝固过程,熔池内存在一个位置和形状不断变化的相界面,形成随时间变化的两个活动部分,且在相界面上伴有相变焓的吸收和释放,使得界面两侧热流不连续。以往为了简化计算,忽略了固-液边界的相变潜热,然而,人们发现通过计算得到的熔池深度要比实际测量得到的深一些。从而说明了,相变潜热是影响模型准确性的一个不容忽视的因素,它直接影响着熔池的最终穿透深度,因而在建立模型时,只有将相变潜热的影响考虑进去才能得到较为准确的熔池形状。

针对以上几点,根据裂纹区激光重熔、堆焊(熔覆)的特点,利用能量方程,动量方程和质量方程,从焓平衡方程出发,建立了三维稳态模型。在模型中,考虑了溶质对流和相变潜热的影响,并因问题的特殊性将气-液界面当作考虑了表面张力影响的自由边界来处理。除此之外,在重熔过程中,针对裂纹区这个特殊的环境,我们考虑了裂纹尺寸对熔池形貌以及温度分布的影响,引入了一个表示因裂纹而使熔池表面陷落的量度系数。在堆焊过程中,考虑了粉末对气-液表面的冲击作用,使得熔池表面不再是沿水平面上下波动,而是沿一个斜面。

## 4 结束语

在激光表面重熔、熔覆过程中,由于激光功率密度大,激光与材料的相互作用强烈,物理过程十分复

杂,建立合适的物理模型来反映加工过程中温度的变化规律显得尤为重要,但在以往的许多模型中都未能充分考虑到影响温度分布的因素。随着时间的推移和研究的深入,人们渐渐认识了熔池中金属的流动特性,加热源的变化规律,并将物体的热传导系数、比热熔、密度、物体对激光的吸收系数考虑成温度的函数。可以肯定,在不久的将来,激光表面重熔、熔覆温度场的理论研究会更加完善。

### 参 考 文 献

- 1 A. F. A. Hoadley, M. Rappaz, Zimmermann. *Metal Trans. (B)*, 1991, **22B**:101 ~ 109
- 2 朱大庆,左都罗,李适民等. *华中理工大学学报*, 2000, **28**(1):68 ~ 69
- 3 徐庆鸿,郭伟,田锡唐等. *焊接学报*, 1997, **18**(2):58 ~ 62
- 4 C. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen. *Metal Trans. (A)*, 1984, **15A**:2175 ~ 2184
- 5 闫毓禾,钟敏霖. *高功率激光加工及其应用*. 天津:天津科学技术出版社, 1994. 94
- 6 M. Picasso, A. F. A. Hoadley. *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, 1994, **4**:61 ~ 83
- 7 杨洗陈. *金属学报*, 1992, **28**(2):84 ~ 87
- 8 石娟,吴钢,戴忠森. *上海海运学院学报*, 1999, **20**(1):16 ~ 24
- 9 魏学勤. *激光加工中的温度及温度涨落对工艺的影响*. 华中科技大学激光技术国家重点实验室博士学位论文, 1999
- 10 赵光兴,李绍明. *华东冶金学院学报*, 1999, **16**(1):34 ~ 36
- 11 S. Kou, Y. H. Wang. *Metal Trans. (A)*, 1986, **17A**:2265 ~ 2270