

激光熔覆数值模拟过程中的热源模型

张 平, 马 琳, 赵军军, 原津萍, 胡家帅

(装甲兵工程学院 装备再制造系, 北京 100072)

摘 要: 综述了几种可用于激光熔覆过程中温度场和应力场数值模拟的热源计算模型, 并对其进行分析比较。指出采用有限元法, 利用计算机软件来实现熔覆过程中热源的添加是目前常用的优选方法。在此基础上考虑到粉末、基体、光源三者的相互作用提出了新的激光熔覆热源计算模型。关于激光熔覆热源模型的探讨为建立更加准确的激光熔覆计算模型, 深入研究熔覆过程中的应力场与变形场提供帮助。

关键词: 激光熔覆; 热源模型; 有限元法

中图分类号: 053225; 0242

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0161-04

The heat source model of the numerical simulation in the laser cladding

ZHANG Ping, MA lin, ZHAO Jun-jun, YUAN Jin-ping, HU Jia-shuai

(Department of Reproducing engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072 China)

Abstract: Several feasible heat source models of the numerical simulation which used to solve the temperature and stress field in the laser cladding are summarized and compared. The heat source can be put on by the finite element method and the process can be realized by numerical software. It is an excellent method to build a numerical model for the laser cladding. Considering the mutual effect of the powder, substrate and lamp-house, a new heat source model is put forward. The discuss on the heat source model of laser cladding helps to build more exact models and study the stress and stain field of the laser cladding deeply.

Key words: laser cladding; heat source model; finite element method

0 引 言

同焊接过程一样, 激光熔覆过程中依从于时间的集中热输入, 是引起残余应力和变形的根源。为此在对激光熔覆进行数值模拟的过程中, 热源模型的建立对整个熔覆过程的数值模拟起着重要作用, 它直接影响着温度场和应力变形场的计算结果和准确度, 因此对激光熔覆数值模拟过程中热源模型的建立加以探讨是十分必要的。

1 激光熔覆的热源特点

激光熔覆技术是指利用高能密度的激光束所产生的快速熔凝过程, 在基材表面形成与基材相互熔合的、且具有完全不同成分和性能的合金覆层, 从而获得特殊性能表面覆层的一种工艺方法。它是一

种新兴的激光表面改性技术, 以激光束为其熔覆热源, 熔覆设备通常采用 CO₂ 激光器和半导体激光器。

在激光熔覆的过程中, 激光束作为熔覆热源具有高能、集中、瞬时这三大显著特征。热源的特点主要是由其工艺特征决定的即指激光光源所产生的瞬时高能密度。用于激光熔覆的激光功率通常在几百到几千瓦之间, 而对于单道熔覆其熔覆直径只有几个毫米, 因此熔覆过程中的热输入功率密度高达 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/mm}^2$ 。这样高的功率密度除了会使熔覆粉末熔化形成熔覆层外, 还会导致金属气化, 这无疑加大了熔覆模型建立的难度。此外, 激光熔覆过程中, 激光的扫描速度通常是几个毫米每秒钟, 成形速度较快, 在激光经过熔覆层的前后较短时间段内熔覆层和基体表层升温 and 冷却速率极大可达到 $10^4 \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 可使熔覆层和热影响区上的金属组织将会发生非稳态相变。由上对激光熔覆过程进行数值模拟时, 热源模型的建立应该从空间和时间

收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-10

作者简介: 张平 (1958-), 男 (汉), 北京市人, 教授, 博士。

两个角度出发,既要考虑到激光能量在空间上域分布,又要考虑到光源的移动即时间域上的分布。

2 常见的热源模型

2.1 经典的解析热源模型

激光熔覆的过程类似于堆焊,在对熔覆过程进行数值模拟时,通常将焊接过程的模拟方法应用其中。经典的焊接热源模型是对焊接热源几何尺寸的简化,即是用无限扩展代替有限尺寸。通常用点状热源作用于半无限体或立方体表面层来模拟立方体或和厚板的表面堆焊。

在对激光熔覆进行数值模拟的过程中,由于激光能量的高度集中性将其热源按照作用于半无限体的点热源处理,研究其三维传热。根据经典的 Rosenthal 解析模式,热源附近温度场的解析式为:

$$T = \frac{2Q}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} e^{(-r^2/4\alpha t)} \quad (1)$$

式中, T 为温度, Q 为热量, c 为比热容, ρ 为密度, α 为传热系数, r 为距离点热源的距离, t 热源作用时间。

以集中热源为基础的计算方法,假定热物性参数不变,不考虑相变和结晶潜热,其结果对远离熔合线的低温区较为准确,但对熔合区和热影响区误差很大。经典的 Rosenthal 解析式为其它热源模型的研究打下了基础。在实际的焊接和熔覆过程中,光源以光斑的形式照射到熔覆基体表面形成熔覆层。加热斑点上的热量分布不均匀,中心多而边缘少,这是显而易见的。因此出现了加热斑点热源密度近似正态分布的高斯热源模型,其密度的表达式为:

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

式中 q_m 为热源密度的最大值, R 为高斯热源分布的外径。

但是高斯热源模型并没有考虑到热源的穿透作用,只是在表面施加正态分布的面热源。半球状热源分布模型,将表面热源扩展为三维分布的体热源。针对焊接过程中能量在垂直和平行于光源运动方向两个面上分布的差异,提出了椭球型热源分布模型。接下来发现椭圆前半部分比后半部分温度梯

度变化缓,提出了双椭圆热源模型。

半球模型、椭球模型和双椭圆热源模型都是在前一个模型的基础上逐步改进的,但是它们都是建立在高斯热源模型的基础上,能量分布密度分布表达式和计算出的等温线形状都有类似之处。国内外有很多学者利用上述热源模型对焊接过程进行了数值模拟,其过程主要是针对熔覆过程中的温度场和应力场进行的。有学者分别对不锈钢焊接和双丝焊的温度场进行了数值模拟,热源计算模型采用的是经典高斯热源模型和双椭圆热源模型。他们的计算结果表明,利用高斯热源模型计算得到的熔池呈圆形,熔池较小;而利用双椭圆热源模型计算得到的熔池呈双椭圆型且熔池较大。同时他们采用热电偶法对热影响区进行了测量,证实了双椭圆热源模型要比高斯热源模型更接近实际情况^[1, 2]。梁晓雁在对中厚板多道焊焊接过程中温度场和应力场进行三维数值模拟时,将高斯热源模型和双椭圆热源模型两种热源模型结合起来即将高斯热源模型作为面热源双椭球热源模型为体热源^[3],从而得到了与实测情况相符合的计算结果。

尽管焊接热过程都是由能量的集中热输入引起的,但是能量的分布是随着焊接热源和焊接方法的不同而不同的。绝不能简单的将应用于堆焊模拟的热源模型应用于激光熔覆的过程。目前,在对激光熔覆过程进行数值模拟时,热源模型大多还是采用能量呈正态分布的经典高斯热源模型。虽然能够得到宏观上温度和应力分布合理的结果,但是还存在一定的误差。若想得到更加准确的结果,应当建立针对激光熔覆热源自身特征的,符合熔覆实际情况的新的热源模型。

2.2 经典热源模型对移动光源的处理

无论是在激光熔覆还是其它焊接过程中,焊接热源都是随着时间而移动的,要想对焊接过程进行较为准确的模拟除了要考虑能量的空间分布外还要考虑到热源的移动。即在模拟过程中所施加的热源模型应当能够实现热源在不同时刻作用在基体表面的不同位置上。

通常在用经典的解析方法对激光熔覆热过程进行分析计算时,移动光源的表达式是通过固定热源进行叠加获得的。

根据 Rosenthal 解析式半无限体表面匀速直线运动的点状热源,距移动热源 R 处的温度升高为:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{\frac{-v(x+R)}{2\alpha}} \quad (3)$$

式中,光源以速度 v 沿 x 方向移动。

实际上,激光熔覆过程中激光热源是以面热源的形式作用在熔覆基体表面上的,根据高斯热源模型,作用于半无限体的高速移动圆形热源可变换为一等效的,提前 Δt_0 时间作用的线热源。其热量只在垂直于运动方向传播,其温度场的表达式(坐标轴 z 为深度方向,坐标轴 y 为表面上热源运动的方向)为:

$$T - T_0 = \frac{2q}{vc\rho} \frac{e^{-z^2/4at}}{(4\pi at)^{1/2}} \frac{e^{-y^2/4a(t+\Delta t_0)}}{[4\pi a(t+\Delta t_0)]^{1/2}} \quad (4)$$

以上的方程主要应用于传统的导热模型。而在对流控制的数学模型中,模型的建立根据是能量、动量方程和连续方程。对流控制模型中对移动光源可通过准稳态或非稳态方程进行处理,常用的有边界条件法和小扰动法^[6]。

2.3 有限元法建立热源模型

有限元法使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题,在对材料表面加工和热处理过程进行数值模拟时,有限元法已经被普遍采用,且能够得到合理的计算结果。

利用有限元法将熔覆层和基体都划分成细小的网格,可以实现熔覆热源在空间域和时间域上的分布和离散。空间上热源可以按照实际情况分布在每个具体的网格或节点上面。无论是点热源、面热源还是体热源都可以在网格和节点上施加,且所施加热源的大小和方式可以根据需要任意设定。时间上,每个网格和节点上所施加的热源可以根据激光照射的时间来设定热源添加的时间。激光扫描到该单元或节点时该单元和节点上存在热载荷,激光离开时,热载荷也可以随之消失。利用有限元法施加热源可以将熔覆的三维动态过程和外界影响因素更加准确的反映到计算模型当中去。

随着计算机技术的发展,通过计算机软件来实现热源模型和边界条件的施加不但能够节省计算时间同时计算结果也更加准确。常用的有限元通用计算机软件主要有 ANSYS, MARC, NASTRAN 等,在我国应用较多的是 ANSYS。ANSYS 进行热分析的基本原理是能量守恒方程和热平衡方程,它能够在实

体模型和单元上施加多种热载荷,并能够进行稳态和瞬态热分析,更加真实的模拟焊接和熔覆的物理过程,建立更加准确的热源模型。

此外计算软件能够实现计算过程中的移动热源和边界条件的参数化,对熔覆或是焊接材料的逐步填充也可以用“虚实”单元,“生死”单元的方法加以处理^[4]。比如在熔覆过程中,激光的能量有效利用率直接影响着热量的输入情况,而解析求解的过程中通常将其设为常数无法体现利用率的变化情况。利用软件可将其设为温度、熔覆速率的函数更能够反映熔覆过程的实际情况。

3 激光熔覆热源模型的探讨

激光熔覆是一个复杂的物理化学过程,在熔覆的过程中,光束、粉末与熔池间的相互影响相互作用。在这个动态过程中,熔覆粉末对能量的吸收、基体对能量的吸收以及粉末与基体表层的热作用都应该做为建立热源模型所需要考虑的内容。对于同步送粉式激光熔覆熔覆粉末的不断添加也是建立模型时应着重考虑的问题。

国内外部分学者对激光能量的分配与利用进行了深入研究。O.deO, Diniz Neto^[5]等的模型可以计算任意时刻粉末颗粒温度和粉末流衰减的激光能量。刘振侠^[6]建立了粉末遮光率和升温的数学模型并将能量方程源项进行离散。Kaplan, A.F.H, Weinberger^[7]等提出的激光表面处理模型可以对热力学现象进行过程分析,将激光熔覆粉末加热分布状况分为激光加热和随后熔池加热两部分。Picasso^[8]等人估算了到激光到达基体表面的能量,将基体吸收的光能分为直接吸收和粉末热传递两部分,而粉末传递的能量又分为直接和从基体反射中吸收两部分。王永峰对激光束与粉末流作用规律进行了分析,计算了能量的有效利用率^[9]。

目前,对激光熔覆热过程的数值模拟已普遍采用有限元法。对激光熔覆过程中热源模型的施加主要集中在熔覆层单元上施加体热源和熔覆表面施加面热源^[4, 9]。这样的处理方法能够正确反映熔覆过程中熔覆层和基体的温度分布规律和变化规律。但是笔者认为它对送粉式激光熔覆过程中激光对粉末的作用考虑欠缺,计算结果容易出现熔池温度异常升高或粉末无法完全熔化的现象,还需要进一步改进。

笔者在对送粉式激光熔覆过程进行热分析时,考虑到激光对熔覆粉末的作用,热源模型的建立主要分为基体和粉末两部分。在建立热源模型的过程中,激光束在粉末到达基体前对粉末的作用通过初始温度实现,即假设粉末飞行过程中吸收的有效能量全部用于升温。粉末到达基体表面后所吸收的能量以体热源的形式施加。根据 Picasso 的理论基体吸收的能量可分为直接吸收和粉末热传递两部分,基体直接吸收的热量同样通过体热源形式实现,而对于粉末传递给基体的热量笔者在粉末和基体连接处的热影响区添加一界面,通过在该界面施加传热系数实现粉末对基体的传热。

实际上熔池内的流体运动除了会对熔池表面形状产生影响外也会温度场和应力场产生影响。刘振侠的研究发现浮力对熔池流场和温度场的影响很小,表面张力的影响较大^[6]。因此建立热源模型时表面张力的影响因素应该考虑。但是在大多数导热控制的模型中,表面张力也是通常被忽略的。因此,在今后对激光熔覆过程温度场和应力场进行数值模拟时,应当将传热控制的模型和对流控制的模型更好的结合起来,这样才能得到更加准确的结果。此外,在施加热源模型时,热影响区的传热情况,熔池部分高温汽化产生的小孔效应也应当逐步考虑到热源模型中来。

4 结 论

文中综述了几种常见的焊接热源模型,指出采用有限法通过计算软件实现激光熔覆过程中热源模型的添加是对熔覆过程进行数值模拟的优选方法。激光熔覆是一个复杂的物理化学过程,不能简单的将经典焊接热源模型作为熔覆热源模型。文在主要考虑粉末、基体、光束三者相互作用的基础上

提出了新的热源模型,认为将熔池对流问题引入到热传导控制的热源模型中可以得到更加准确的结果。

参考文献:

- [1] 董志波,魏艳红,刘仁培,等. 不锈钢焊接温度场的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2004, 25 (2): 9-14.
- [2] 董克权,刘超英,肖奇军.双丝焊温度场仿真的热源模型研究 [J]. 热加工工艺, 2006, 33 (3): 45-90.
- [3] 梁晓燕. 中厚板多道焊焊接过程中温度场和应力场的三维数值模拟 [D]. 华中科技大学, 2004: 19-20.
- [4] 郝南海. 激光熔覆过程热力耦合有限元分析 [D]. 北京工业大学博士后研究报告, 2005 (1): 21-68.
- [5] deO O, Diniz Neto, daS R M C. Vilar. Interaction between the laser beam and power jet in blown powder laser alloying and cladding [J]. Processings of International Congress on the application of Lasers and Electro-Optics, 1998 (2): 180-187.
- [6] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析 [D]. 西北工业大学, 2003(7): 75-90.
- [8] Picasso M, Marsden C F, Wagniere J D. A simple but Realistic Model for Laser Cladding [J]. Metallurgical and materials transactions, 1994(25): 281-291.
- [7] A F H, Kaplan, Weinberger B, et al. Theoretical analysis of laser cladding and alloying [C]. Proceedings of the SPIE-the International Society for Optical Engineering, 1997, 3097: 499-506.
- [9] 王永峰. 激光束与流动金属粉材作用规律及粉材熔融行为研究 [D]. 北京理工大学, 2004(2): 10-22.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072

Tel: (010)66719249, 13581520678

E-mail: mmmmary@163.com