

文章编号: 0258-7025(2003)06-0567-04

送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究

刘振侠, 黄卫东, 万柏涛

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 根据送粉式激光熔覆的物理过程,提出了送粉式激光熔覆数值模型必须考虑的基本问题。回顾了已报道的送粉式激光熔覆的数值模型在处理相关问题时所做的基本假设和处理方法。重点讨论和分析了激光与合金粉末及基体的相互作用的数值模型,合金粉末落入熔池的状态及熔池自由表面的形状等问题。

关键词 激光技术;送粉式激光熔覆;数值模型;自由表面

中图分类号 TG 665 **文献标识码** A

Investigation of Basic Problems of the Numerical Model for Powder-feed Laser Cladding

LIU Zhen-xia, HUANG Wei-dong, WAN Bai-tao

(State Key Laboratory of Solidification Processing,
North-west Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract According to the physics process of powder-feed laser cladding, the basic problems are brought up that must be considered in the numerical model for that process. The model of interaction among laser beam, alloy powder and basement, the states of alloy powder particles at reaching the melt pool and the mixing of the particles with liquid metal in the melt pool are especially discussed and analysed.

Key words laser technique; powder-feed laser cladding; numerical model; free interface

1 引言

与预置法相区别,送粉式激光熔覆是在激光束移动的同时,通过送粉器向熔池中喷射合金粉末的熔覆方法。因此,送粉式激光熔覆实际上是激光束、熔覆粉末颗粒以及基体相互作用的过程。另一方面,激光熔覆的工艺参数非常多,其中包括激光功率、光斑尺寸、扫描速度、送粉喷嘴几何尺寸、送粉角度及送粉量、粉末气流中颗粒所占的固相分数、粉末颗粒的速度、熔覆高度等等。所以,与激光重熔相比,送粉式激光熔覆是一个非常难以控制的过程。表现在理论研究上,建立描述这一复杂物理过程的数学模型就显得更为困难了。

迄今为止,有关激光熔覆的模型还比较少^[1~4]。

文献[2]的模型为二维准稳态模型,模型假设合金粉末进入熔池后瞬间熔化,文中所用功率为透过粉末对激光束的遮蔽后实际照射到熔敷层或熔池表面上的功率,文中没有讨论粉末的质量平衡。文献[3]考虑了能量平衡而且假设粉末完全在液态金属里熔化。文献[4]考虑了熔化区内的流动,认为粉末落入熔池中后瞬间熔化。文献[1]考虑了激光与粉末的相互作用,熔覆熔池用三维点光源的分析解代入,不考虑熔池内的流动,也不考虑熔池内的流态与熔池自由表面的影响。

本文旨在根据送粉式激光熔覆的物理过程,指出送粉式激光熔覆数值模型必须考虑的基本问题,综合以上模型在处理这些问题时所做的假设以及采用的方法,对送粉式激光熔覆特有的激光束与粉末

收稿日期:2002-01-21;收到修改稿日期:2002-05-24

基金项目:973国家重点研究发展规划(G2000067205-3)资助项目。

作者简介:刘振侠(1963—),男,陕西省西安市人,西北工业大学凝固技术国家重点实验室副教授,博士。主要从事材料的激光加工技术研究。E-mail:zxliu@nwpu.edu.cn

颗粒、基体的相互作用;粉末落入熔池的状态等问题重点进行讨论。

2 激光与粉末的相互作用

从图 1 可以看出,激光在到达基体之前首先与从送粉器喷射出来的合金粉末发生相互作用。激光穿过粉末射流时,粉末遮挡了部分激光束,衰减了到达熔覆层的激光能量;同时这些粉末颗粒吸收部分激光能量使自身温度升高。被粉末气流所衰减的能量占激光总能量的比与激光熔覆的工艺参数相关,一般在 10% 左右^[1],有时甚至更高。另一方面,由于粉末在落入熔池之前已经吸收了部分激光能量,其温度升高,有些情况下粉末还发生熔化,这就改变了到达熔池是粉末的状态,对熔覆合金的掺混产生影响。因此,激光与粉末的相互作用是熔覆模型必须考虑的一大因素。

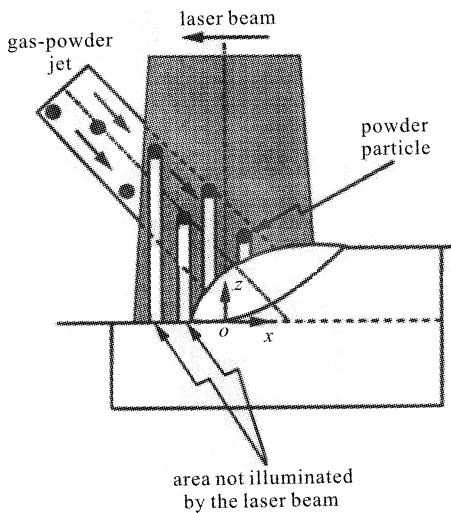


图 1 粉末颗粒的遮蔽造成激光功率的衰减示意图
Fig. 1 Attenuation of the laser power owing to the powder particles shadow

文献[1]分析了粉末颗粒、激光光束和熔池之间的相互作用,考虑了由于粉末颗粒的遮蔽造成的激光功率的衰减,特别考虑了熔覆层对激光的吸收率随熔池表面形状的变化规律。通过激光束、粉末流等在工件表面的投影面积,熔池面积以及熔覆层的质量平衡推导出了激光功率衰减率及工件吸收率公式。文献[5]在考虑激光束与粉末颗粒相互作用时,假设粉末颗粒为球状,通过球状颗粒的三维能量守恒方程推导出粉末颗粒穿过激光束后的升温。

综合以上文献可以看出,关于激光与粉末之间

的相互作用,可以归纳为要解决三个方面的问题:1) 粉末遮蔽激光使其衰减的衰减量,或称遮光率;2) 粉末吸收能量被加热后的升温;3) 由于以上两个原因,需要重新考虑熔覆层和基体实际得到的能量。下面对处理这些问题时目前所采用方法作一分析。

2.1 遮光率

如上所述,遮光率是指粉末遮挡的功率与激光原始辐照功率之比,如图 1 所示,其值对应于射出的粉末颗粒在激光照射方向上的遮挡面积或者说粉末颗粒与光束相交面在熔覆层和基体上的投影与激光束本身在基体和熔覆层上的投影面积之比。由于粉末在射流中的体积分数很小,一般的模型都假设一个颗粒在另一个颗粒上的阴影忽略不计,也就是说这些颗粒在遮蔽激光时全部展开毫不重叠,且激光束在透过熔覆材料颗粒空隙时不发生衍射、散射。

另外假设:1) 不考虑粉末反射掉的能量;2) 粉末颗粒为球形;3) 粉末在射流中的体积分数很小。

由此可以推出^[1]

$$\frac{P_m}{P_l} = \begin{cases} \frac{m_p}{2\rho r_l r_p v_p \cos(\theta_{jet})} & (r_{jet} \leq r_l) \\ \frac{m_p}{2\rho r_{jet} r_p v_p \cos(\theta_{jet})} & (r_{jet} > r_l) \end{cases} \quad (1)$$

P_m 为粉末遮挡功率, P_l 为激光输出功率, r_l 为激光光斑半径, r_p 为粉末的颗粒半径, v_p 为粉末颗粒在其载送气流中的速度, θ_{jet} 为粉末射流与水平方向的夹角,对于同轴送粉 $\theta_{jet} = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$ 成立, ρ 为金属粉末的密度, m_p 为送粉率, r_{jet} 为粉末射流柱达到基体时与基体平面相交圆面(近似为圆)的半径。

2.2 粉末吸收的能量及被加热后的升温

粉末在遮挡激光的同时,也吸收了部分激光能量,从而使自身的温度升高。对于一个完备的熔覆模型还必须考虑进入熔池自由表面(熔池的气-液界面)的粉末颗粒的温度。实际上,在不考虑等离子体影响(能量密度低于 10^5 W/cm^2 时^[5])的情况下,粒子直接吸收激光辐射能,并放出辐射能。在空气中粉末颗粒也会由于空气对流散失能量,粒子之间也会相互加热。这些能量在总能量中的比例很小,为了计算方便,在一般的模型中都假设^[1,3,5]:

1) 粉末颗粒在气-粉射流中的体积分数很低,可以忽略激光的反射、折射和粒离子之间的相互加热,忽略对流换热。

2) 粉末颗粒是半径为 r_p 的球体。由于粉末颗粒足够小,在能量计算时将其看成一个点,粒子的热导率为无限大,即认为粉末颗粒的温度是均匀一致

的,在迎光面和背光面没有差异^[5]。

3) 粉末颗粒只在迎光面吸收能量,但对外辐射则在整个球体表面发生^[1]。

4) 粉末不吸收来自基体的反光。

由以上假设,根据粒子的能量方程^[5]

$$\alpha_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{3}{4\pi r_p^3} (E_{\text{absorb}} - E_{\text{emit}}) \quad (2)$$

可以求出粉末粒子的升温

$$T_p - T_a = \frac{3l_p}{4\pi r_p^3 \rho_p c_p v_p} (E_{\text{absorb}} - E_{\text{emit}}) \quad (3)$$

其中

$$E_{\text{absorb}} = \pi r_p^2 \beta_p \sigma_x$$

$$E_{\text{emit}} = 4\pi r_p^2 \epsilon \sigma T^4$$

分别为单位体积粉末颗粒吸收与发射的功率(单位为 W), l_p 为粉末颗粒到达熔池表面前在激光束下运动的平均距离, β_p 为粉末颗粒对激光的吸收率, σ_x 为激光功率密度, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, ϵ 为全发射系数, c_p 为粉末颗粒的比热。

2.3 熔覆层和基体实际得到的激光辐照能量

激光透过粉末射流照在熔覆层和基体表面上,其部分能量被吸收。设吸收率为 β_w , 剩余的被表面反射掉。反射掉的能量中,又有一部分被粉末射流重新反射回基体和熔覆层,这称为二次反射量。假设^[5]二次及其以上反射量可以忽略,则熔覆层和基体实际得到的激光辐照功率为

$$P_w = \beta_w P_l \left(1 - \frac{P_m}{P_l}\right) \quad (4)$$

将(1)式代入即可求出 P_w 。

3 粉末落到熔覆熔池时的状态与混合

3.1 粉末落到熔覆层和基体表面时的状态

可能的情况有:1) 粉末已经完全熔化为液滴;2) 粉末没有熔化仍然为固相颗粒;3) 部分熔化,其他部分在与液态混合过程中吸热、升温然后熔化。

通过计算粉末到达熔覆层和基体表面时的温度可以知道其处于哪一种情况。对于不同的合金粉末以及不同的工艺参数上面三种情况都可能会出现。

一般地说,固体颗粒撞到固体表面就会反弹掉;液态颗粒撞到固体表面就会粘附其上;而不论固态还是液态颗粒撞入液态熔池表面就会被吸收。所以,粉末颗粒到达熔覆层和基体时的状态对于建立熔覆层的质量平衡有一定影响。不过,可以通过调整送粉器喷嘴,尽量减少射到熔池以外的粉末。

另一方面要着重考察粉末颗粒射入到熔池表面后的状态。其意义在于,如果考虑固体粉末颗粒进

入熔池与液态进行混合,则就计算来讲,熔池内出现两相流问题,而且由于固相颗粒的熔化潜热使得熔池流场和温度场的计算非常复杂。

3.2 过程的时间尺度

考察熔覆过程中质量和能量的传输一般是通过量纲分析进行的。以下定义几个时间尺度^[3]: t_d : 热量扩散相当于熔覆高度的距离所需要的时间; t_r : 粉末颗粒在熔池中的平均滞留时间; t_m : 混合时间或粉末在熔池中完全分散开所需要的时间; t_f : 熔化时间或熔化和溶解粉末所需要的时间。

表 1 为文献[3]中列出的两种特殊情况下的时间尺度。其中, V_0 为激光扫描速度, h_c 为熔覆高度, P_e 为贝克列数。可以看出:1) 在激光扫描速度较低时, P_e 贝克列数较小,故热量传递主要是热传导。粉末在熔池中的液态金属里滞留的时间远远大于混合及熔化所需要的时间,因此可以认为粉末大部分熔化并与液态混合。2) 在激光扫描速度较高的情况下, P_e 贝克列数较高,故热量传递既有热传导又有对流换热。几个时间尺度差别不如前者那么大,因而情况不甚明了,极有可能没有熔化的粉末被卷入液态金属而存在于熔覆层中。3) 有一点是相同的,就是在两种情况下,混合与熔化速率几乎相同。

表 1 激光熔覆时间尺度

Table 1 Time-scale of the laser cladding

V_0 /mm/s	h_c /mm	P_e	t_r /s	t_d /s	t_m /s	t_f /s
1.0	2.0	0.3	2.0	0.6	0.002	0.0005
100.0	0.2	3.0	0.002	0.006	0.0002	0.0005

3.3 假设

据上面的 3), 可以对粉末颗粒落到熔池时的状态及其与液态金属的混合问题作出两种不同的假设:其一,粉末落到熔池表面上以后立刻熔化。这一假设使得粉末颗粒进入熔池后的计算无需考虑两相流问题,及进一步的混合问题。其二,粉末进入熔池后在熔化前已经完全混合或已经完全分布在液态金属中。这两种假设对于整个熔覆模型来说,都不需要考虑熔池内的两相流问题,从而使计算简化了。

4 送粉时熔覆熔池自由表面的形状

熔覆熔池自由表面的形状,是熔覆模型中必须认真考虑的另一重大因素。从工艺上讲,激光加工后的表面形貌是其重要的品质之一,而激光加工后

的表面形貌与加工过程中的自由表面密切相关,它决定于激光加工的热物理过程;另一方面,自由表面的形状本身反映了作用于其上的各种力的相互平衡,它是熔池能量输入的界面,与表面张力梯度直接相关,而表面张力梯度又直接影响到熔池内部的流场和温度场。因此,熔覆模型中熔池自由表面的处理一直是整个模型中比较重要的问题。

熔覆熔池液态自由表面的形状由作用在其上的力相互平衡而定。在自由表面上某一点的法线方向写出方程^[3]

$$p_{\text{liq}} - p_{p,g} + \rho_{\text{liq}}gz = \left(2\mu_{\text{liq}} \frac{\partial v_{\text{liq}}}{\partial n} \cdot n\right) + \gamma K \quad (5)$$

其中, g 为重力加速度, γ 为表面张力, K 为自由表面曲率。方程左端第一项为作用在自由表面上的内压力(液态压力);第二项为外压力(粉末颗粒及其载流气体的冲击力);第三项为重力;方程右端第一项为液态剪切力;第二项为表面张力。

上述方程中含有 $p_{\text{liq}}, \partial v_{\text{liq}}/\partial n$ 等量,这些量是与熔池内邻近自由表面的流动直接相关的,因此,它将与自由表面上的流动边界和能量边界条件一起共同与熔池的流动与能量方程联立求解。其中,较难确定的是(5)式左端第二项即粉末颗粒及载流气体的冲击力,实际上此项正是送粉式熔覆熔池与熔凝熔池自由表面的区别所在。

上述方程中各量的确定是非常复杂的,具体求解方法还需根据熔池的动量和能量方程的形式选定。这里,为了简单了解自由表面的形貌,我们考察一种特殊的情况。假设:1)重力分布的影响不计(z 的差异不大);2)流体动量的效应不计;3)压力差 $p_{\text{liq}} - p_{p,g}$ 假设为常数。实际上,这种假设必须是在 $p_{p,g}$ 比较小的情况下才可能成立,当 $p_{p,g}$ 很大时,自由表面形状会发生很大变化;4)假设 γ 为常数(事实上 γ 是温度的函数)。

则方程(5)变为

$$K = (p_{\text{liq}} - p_{p-g})/\gamma$$

根据上述假设,从(5)式可以得出自由表面的曲率为常数的结论,也就是在上述假设条件下熔覆熔池的自由表面为一圆弧。熔覆熔池自由表面设为圆弧,是一般较为简化模型常采用的假设。而将(5)式和其他边界条件一起与动量和能量方程联立求解,才能得到自由表面的真实形状。

5 流场及温度场模型

流场及温度场模型是整个激光熔覆数值模型的

又一重要部分,其动量方程和能量方程形式的选择直接决定了整个数值模型的数值求解方法。如果采用温度形式的能量方程,则必须给出熔池液-固边界上的流动与温度边界条件^[6,7];而如果采用焓形式的能量方程^[8],则不必在求解过程中追踪液-固边界,省去了这一边界条件的处理。

除了守恒方程的形式外,方程所基于的坐标系也是一个重要的选择要素。一般地,将坐标系连在激光头上与之同作匀速运动,推导出的是准稳态方程^[9]。也可以在实验室坐标系下写出守恒方程,而激光头的移动(或工件的反向移动)通过边界条件反映出来^[8]。

流场与温度场模型还涉及到:流动的驱动力(如表面张力和表面张力梯度、浮升力、气体压力等);熔池内的流态(层流、湍流)等问题。这些问题在一般的激光熔凝数值模型中都有比较充分的讨论。

参 考 文 献

- 1 M. Picasso, C. F. Marsden, J. D. Wagniere *et al.*. A simple but realistic model for laser cladding [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1994, **25B**(4):281~291
- 2 Zeng Dawen, Xie Changsheng. Review of numerical simulation of the temperature field and fluid flow field in laser cladding melted pool [J]. *Materials Science & Engineering* (材料科学与工程), 1997, **15**(4):1~8 (in Chinese)
- 3 A. F. A. Hoadley, M. Rappaz. A thermal model of laser cladding by powder injection [J]. *Metall. Trans. B*, 1992, **23B**(10):631~642
- 4 V. M. Weerasinghe, W. M. Steen. Transport Phenomena in Materials Processing [M]. ASME, New York, NY, 1983. 15~23
- 5 Yang Yongqiang, Song Yonglun. Interaction of a laser beam and alloy powders in powder-feed laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(3):280~284 (in Chinese)
- 6 C. L. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen. Effect of surface tension gradient driven convection in a laser melt pool: Three-dimensional perturbation model [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(11):6166~6174
- 7 C. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen. A two-dimensional transient model for convection in laser melted pool [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1984, **15A**(12):2175~2184
- 8 S. Kou, H. Wang. Three-dimensional convection in laser melted pools [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, **17A**(12):2265~2269
- 9 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Yang Sen *et al.*. The numerical simulation of temperature fields of laser molten pool [J]. *Journal of Northwest University-Natural Science Edition* (西北大学学报), 2001, **31**(3):199~202 (in Chinese)