

文章编号: 1001-3806(2002)03-0170-04

激光与熔覆粉末作用效率的计算及影响因素

张庆茂^{1,2} 刘文今¹ 杨 森¹ 钟敏霖¹

(¹清华大学机械系激光加工中心,北京,100084) (²解放军军需大学农副业生产系,长春,130062)

摘要: 在分析自动送粉式激光熔覆材料加入方式、粉末颗粒运动规律、吸热特性以及粉末云对激光束强度衰减规律的基础上,建立反映颗粒与激光相互作用效率的方程;利用金相法检测了熔覆层的宏观参数并结合相关材料的物理参数和工艺参数进行了理论计算。系统研究了影响激光作用效率的因素,对激光作用效率随扫描速度的变化出现最大值给出了合理的解释。

关键词: 激光熔覆;作用效率;衰减

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Calculation of the interaction efficiency between the laser beam and the cladding powder and effective factors

Zhang Qingmao^{1,2}, Liu Wenjin¹, Yang Sen¹, Zhong Minlin¹

(¹ Laser Processing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

(² The Quartermaster University of PLA, Changchun, 130062)

Abstract: On the basis of the analysis of the feeding pattern of the coating material, its behavior in the laser beam and the attenuation of laser beam by particle cloud during the process of laser coating with automatic powder feeding, the methods to calculate the interaction efficiency of laser and particle speed v_0 are presented. The equation of the interaction efficiency is established and expressions relating the parameters in the processes are obtained. The factors affecting the interaction efficiency is studied carefully. The interaction efficiency is calculated by means of metallography. A reasonable explanation about why a maximum interaction efficiency is observed with the scanning speed varies is presented.

Key words: laser cladding; interaction efficiency; attenuation

引 言

激光熔覆作为新型的表面强化技术,是拓宽和延伸传统材料应用领域的重要手段之一,在汽车工业、航空航天、电力电子、生物医学等领域和制备新材料如超导材料、功能梯度材料、节能环保材料、非晶材料等方面展示出美好的应用前景^[1~5]。

激光熔覆的工艺方法有两种:预置法和自动送粉法。随着送粉激光熔覆软硬件的开发与完善,送粉式激光熔覆已成为未来发展的主流^[6~8]。送粉式激光熔覆的显著特征是熔覆材料和基体材料同时加热。因此,熔覆材料颗粒尺寸的大小、热物理特性、进入激光束中的方式、运动状态、分布特征、停留

时间长短、吸热特性是影响熔覆效率、稀释率、冶金结合状态、几何形貌和组织、成分的关键因素。因此,研究激光束与粉末颗粒之间的相互作用,对理解激光熔覆的热物理过程、熔覆层几何形貌设计和组织、成分的控制具有十分重要的理论意义。同时也是熔覆工艺设计和正确理解激光熔覆规律的基础。因此,我们在分析熔覆材料与激光束相互作用规律的基础上,建立送粉式激光熔覆粉末颗粒与激光相互作用效率的方程,并进行了理论计算,系统分析了影响因素。

1 激光熔覆粉末颗粒运动的物理描述

激光熔覆的目的是在低等级的基体材料上获得具有规则几何外形、稀释率适宜、冶金结合,且具有优异性能的熔覆层,如图 1 所示。送粉式激光熔覆按结构不同可分为一体式和两体式;按粒子运动的驱动力不同又可分为重力送粉法和气动送粉法。目

作者简介:张庆茂,男,1966年8月出生。讲师,博士。主要从事激光熔覆和合金化的研究。

收稿日期:2001-04-28;收到修改稿日期:2001-06-29

前国内普遍采用的是两体式重力送粉法,如图 2 所示。粉末粒子由送粉器进入输料管,在重力作用下以 v_0 的速度离开喷嘴,然

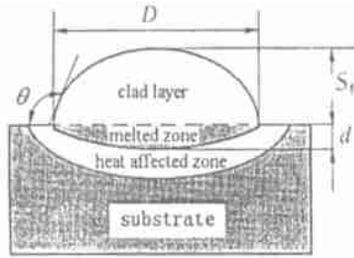


Fig. 1 Geometry of the laser clad layer

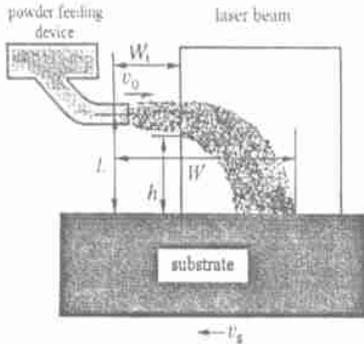


Fig. 2 Schematic drawing of the experimental device

后进入工件表面激光辐照区。粉末粒子到达熔区前先经过激光束,在光束内形成粉末颗粒云,通过调整粉末束流与激光束的相互作用位置、进入激光束的角度,保

证粉末粒子全部进入激光束中,且具有适宜的作用时间,从而控制熔覆材料和基体材料的加热状态,实现熔点相差悬殊的覆层材料和基体材料达到冶金结合、最佳的熔覆效率和适宜的稀释率,具有规则的几何形状。两体式送粉法粉末粒子流从送粉器喷嘴出来的速度 v_0 是非常关键的参数,它决定了粒子流在激光束中的运动时间和位置。考虑到激光能量的分布状态,理想的速度 v_0 应保证粒子流在光束中心部位运动,实现在动态下激光束直径与粒子流直径的良好匹配。为研究问题方便,将两体式送粉法粉末粒子的运动看作是平抛运动,且 v_0 为粒子流离开喷嘴时的平均速度。粉末粒子离开喷嘴的速度 v_0 既不能太大又不能太小。速度太大,一方面光束与粒子作用时间太短,不能使熔覆材料加热到冶金反应所需的温度,不能形成良好的熔覆层;另一方面可能使粒子束穿过激光束,落在光束之外,超出激光作用区,降低熔覆材料的利用率和熔覆效率。速度太小,粒子束不能进入光束或只进入光束的边缘,也不能使熔覆材料加热状态良好。因此, v_0 应具有一定的范围。本实验条件下的 v_0 可由下式计算^[9]:

$$v_0 = W/2L \cdot \sqrt{2Lg} \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度, L 为喷嘴与试样表面垂直的距离, W 为粉末粒子运动的最远距离。

2 激光作用效率 的表达式

激光熔覆的过程是激光束与熔覆材料粉末和基体材料相互作用的过程。由于熔覆材料是在极短的时间内加热,描述其过程的方程非常复杂,为简化计算,做如下物理简化。

(1) 熔覆材料固态与熔融状态的热物理参数保持不变;忽略由于基体材料的混入而引起的熔覆材料物理参数的变化。熔覆材料颗粒的形状为球形。

(2) 熔覆材料颗粒内部不存在温差,温度均匀分布,尽管粒子有向光面和背光面,温度肯定是有差别的,颗粒之间不存在能量的传递和光束遮蔽作用。

(3) 在激光熔覆过程中,由熔池内存在的温度、浓度梯度共同作用形成的表面张力梯度决定了熔池表面是曲面而不是平坦的,如图 1 所示。为研究问题方便,假设熔覆层的轮廓线是抛物线。忽略由于单道激光熔覆沿熔覆道的热积累而产生的熔覆层宽化现象。

激光作用效率 是指激光束与运动的粉末粒子流动态相互作用的强度。激光作用效率与熔覆颗粒的物理特性、进入激光束中的方式、在激光束中的分布状态、运动时间以及激光参数有关。为计算激光作用效率,必须分析激光束与粉末粒子云的相互作用关系。激光束照射到粉末云上,一部分被熔覆材料吸收,一部分被反射掉,一部分透过粉末云照射到基体上。设激光束的原始强度为 I_0 ,透过粉末云部分为 I_t ,其余部分为 I_{nt} ,则三者的关系为:

$$I_0 = I_t + I_{nt} \quad (2)$$

根据 Beer-Lambert 定律,粉末云对单色光的衰减依赖于激光束和粉末材料的特性、粉末粒子云的浓度 C_Z 以及粒子云沿光束方向上的长度 Z ,其方程为:

$$I_t/I_0 = \exp(-ZC_Z) \quad (3)$$

式中, μ 为光学因子,与材料本身的特性以及入射光束的特性有关。方程(3)也可以表示为微分方程的形式:

$$dI/I = -C_Z dZ \quad (4)$$

为求解(3)式,需要给出 C_Z 的具体表达式。对于两体式送粉激光熔覆,根据前面的物理假设,粉末粒子流进入激光束中的运动为平抛物体运动,图 2 显示出粒子流的运动轨迹。为简化计算,将抛物线轨迹的粒子束等效简化为垂直于试样表面的粒子束。设粒子束进入激光束时的半径即为喷嘴的半径 r_b ,粒子束发散角为 θ , Z 为粉末束流与激光束交汇点到基体表面的距离。粒子束的浓度沿 Z 方向变化,图 3

给出了粉末束流沿Z方向发散的示意图。假设粉末束流在激光束内所占据的空间体积内每个体积单元皆有质量存储,将发散的粒子束看作是圆柱,由质量守恒定理,激光束内粉末颗粒云浓度 C_Z 为:

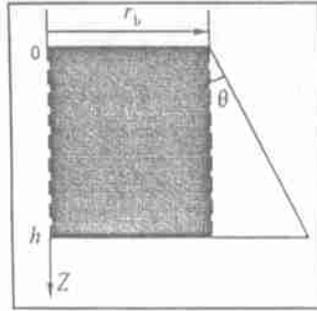


Fig. 3 Output powder spray profile

$$C_Z = \frac{v_f}{v_0(r_b + Z \tan \theta)^2} \quad (5)$$

v_f 为送粉速率,代入微分方程中,对 $Z=0$ 和 $Z=h$ 积分可得:

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp\left[-\frac{h v_f}{v_0(r_b^2 + r_b h \tan \theta)}\right] \quad (6)$$

激光的作用效率取决于未透过粉末云的光束所占的比例,即:

$$\eta = \frac{I_{tr}}{I_0} = 1 - \frac{I_t}{I_0} = 1 - \exp\left[-\frac{h v_f}{v_0(r_b^2 + r_b h \tan \theta)}\right] \quad (7)$$

按经验公式,在一定波长的激光作用下^[10], $\eta = 3(1-A)/2r_p$,其中 r_p 为熔覆材料颗粒的平均半径, A 为熔覆材料对激光的吸收系数,因此,激光作用效率可表示为:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{3(1-A)h v_f}{2 v_0 r_p (r_b^2 + r_b h \tan \theta)}\right] \quad (8)$$

3 激光作用效率的理论计算

3.1 的理论计算

在激光功率为 3.1kW,激光光斑直径为 8mm,基体材料为宽 60mm、厚 7.8mm 的 Q235 钢板,熔覆材料颗粒尺寸 $r_p = 0.08\text{mm}$ 的 Ni60A 自熔合金等条件下,调整工艺参数,进行单道激光熔覆试验。为计算激光作用效率,给出相关的参数:激光束半径 $d = 4\text{mm}$, $h = 10\text{mm}$, $P = 3.1\text{kW}$, $\rho = 8.522\text{mg/mm}^3$,材料的吸收系数 A 取接近熔点时的值^[11,12], $A = 0.9$,粉末粒子流离开喷嘴的速度 v_0 分别按(1)式计算得: $v_0 = 276.7\text{ mm/s}$ 。将相关的参数代入(8)式可得不同工艺条件下的结果,见表 1。计算结果表明,在激光功率和光斑尺寸一定的条件下,在扫描速度恒定时,激光作用效率随送粉速率的增加而增大。但在不同的扫描速度的条件下,激光作用效率具有相同的值,没有体现出扫描速度对激光作用效率的

影响,显然这是与客观事实是不吻合的。产生这一现象的根本原因是忽略了在动态条件下熔覆材料存在着由于温度过高引起的烧损和机械损失。因此,必须对送粉速率进行实际检测,以有效送粉速率代替理论送粉速率。

Table 1 Experimental results of related parameters obtained by metallographic method and the calculated results of v_{f1} , η_1 , S_f , D

No	v_s (mm s^{-2})	v_f (mg s^{-1})	v_{f1} (mg s^{-1})	η %	η_1 %	D mm	S_f mm
1		350	114	11.1	3.8	6.22	1.00
2	2.08	375	147	11.9	4.8	6.56	1.34
3		425	217	13.3	7.0	6.02	2.30
4		475	460	14.8	14.3	6.00	3.58
5		350	151	11.1	4.8	5.70	0.70
6	3.85	375	161	11.9	5.1	5.74	0.80
7		425	329	13.3	10.3	5.70	2.00
8		475	459	14.8	14.3	5.50	2.30
9		350	270	11.1	8.6	6.80	0.64
10	8.33	375	289	11.9	9.1	5.00	0.60
11		425	403	13.3	12.6	5.00	1.34
12		475	458	14.8	14.2	4.22	1.56
13		350	151	11.1	4.8	4.22	0.34
14	14.3	375	206	11.9	6.5	4.68	0.54
15		425	223	13.3	7.0	3.32	0.64
16		475	321	14.8	10.0	3.54	0.80

3.2 的修正

激光熔覆是复杂的物理冶金过程,工艺参数之间的相互匹配关系非常复杂。由于激光能量的分布不均,熔覆材料颗粒的尺寸参差不齐,必然造成熔覆材料颗粒加热状态的不同,存在着烧损,另外在光压和粉末粒子本身的冲击下,熔覆材料产生飞溅等机械损失。因此,按理论送粉速率计算的激光作用效率不能客观地反映熔覆材料与激光束的相互作用规律,必须采用有效送粉速率。设有效送粉速率为 v_{f1} ,可通过金相法检测出来,以单位长度为计算单元,沿熔覆道单位长度上熔覆层的重量 M_1 为:

$$M_1 = 2DS_f / 3 \quad (9)$$

因光束与试样的相对运动为匀速直线运动,则形成单位长度的熔覆层所需的时间为:

$$t_1 = 1 / v_s \quad (10)$$

因此,有效送粉速率 v_{f1} 可近似表示为:

$$v_{f1} = 2DS_f v_s / 3 \quad (11)$$

将检测到的熔覆层宏观参数及相关的工艺参数代入方程(11)中即可得出不同工艺条件下的有效送粉速

率 v_{f_1} , 有效送粉系数在将不同工艺条件下的有效送粉速率 v_{f_1} 代入方程 (8) 中, 计算出修正后的激光作用效率 η_1 , 见表 1。

3.3 的影响因素

影响激光作用效率的因素很多, 相互制约关系也很复杂。如熔覆材料的物理特性、激光参数(如输出功率、光束尺寸及形状)、送粉速率、扫描速度、基体材料表面状态和粉末粒子流的速度、基体材料和

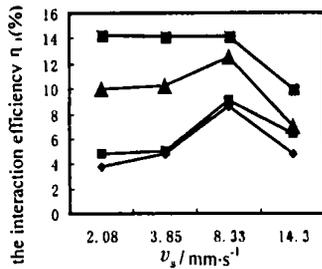


Fig. 4 The relation between the interaction efficiency η_1 and the processing parameters

熔覆材料之间的润湿情况、化学匹配性等。实际激光作用效率 η_1 是激光强度、材料特性、粉末粒子流的速度、粒子流在作用体积内的分布状态、作用时间长短以及其它工艺参数之间相互匹配

的结果。实际激光作用效率 η_1 , 在送粉速率恒定时, 随扫描速度的增加而增大, 超过一定的速度 ($v_s = 8.33 \text{ mm/s}$) 反而下降(图 4, 其中 350 mg/s , 375 mg/s , 425 mg/s , 475 mg/s); 当扫描速度保持不变时, 随送粉速率的增加而增大。实际激光作用效率 η_1 出现极值点是由于在动态条件下, 激光对熔覆材料的加热温度高而导致的烧损产生的。在扫描速度小于 8.33 mm/s 时, 随扫描速度的降低, 熔覆材料的加热温度高, 有效送粉速率减小, 烧损严重; 随扫描速度的增大, 熔覆材料颗粒的平均温度低, 有效送粉速率增加。当扫描速度大于 8.33 mm/s 时, 激

光束的动态直径小于粉末束流的直径, 熔覆材料可能由于散落与光束外而损失掉。因此, 按金相法检测计算的熔覆材与激光的作用效率在本实验中出现了极值点。

4 结论

在一定的物理假设基础上, 推导出激光作用效率的表达式, 利用金相法检测了熔覆层的宏观参数, 计算了不同工艺条件下的粉末有效送粉速率, 并结合相关材料的物理参数和工艺参数对激光作用效率进行了理论计算。系统研究了影响激光作用效率的因素。研究表明, 在激光参数保持不变的条件下, 激光作用效率随送粉速率的增加而增大, 随扫描速度的变化出现最大值。最大值的出现是由于熔覆材料的不同损失机制引起的。

参考文献

- [1] 李成功. 中国机械工程, 2000(2): 154 ~ 156.
- [2] 吴新伟, 曾晓雁, 朱蓓蒂 *et al.* 金属热处理, 1995(4): 40 ~ 44.
- [3] 蔡建平, 李波. 机械工程材料, 2000, 24(1): 5 ~ 7.
- [4] Lopez B, Gutierrez I, Urcola J J. Materials Science and Technology, 1996, 12(6): 45 ~ 55.
- [5] 陈传中, 王文中, 雷廷权 *et al.* 中国激光, 1999, A26(9): 841 ~ 846.
- [6] Lin J. Opt & Laser Technol, 1999, 31(8): 565 ~ 570.
- [7] Picasso M, Marsden C F, Wagniere J D *et al.* Metallurgical and Materials Transactions, 1994, 25B(2): 281 ~ 291.
- [8] Vetter P A, Engel Th, Fontaine J. SPIE, 1994, 2207: 452 ~ 462.
- [9] 刘喜明, 关振中. 中国激光, 1999, A26(5): 470 ~ 476.
- [10] Lemoine F, Grevey D F, Vannes A B. Cross-section Modelling Laser Cladding. ICAL EO, 1993: 203 ~ 212.
- [11] 杨永强, 宋永伦. 中国激光, 1998, A25(3): 280 ~ 284.
- [12] 谢长生, 胡木林, 胡军辉 *et al.* 材料热处理学报, 2001, 22(1): 20 ~ 23.

(上接第 179 页)

速度为 8000 mm/min , 0.21 Mpa 氩气保护, 螺距为 1.8 mm 时, 可获得 $\text{O}10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的 4Cr13 不锈钢表面较均匀的强化层, 强化层厚度达 $0.62 \text{ mm} \sim 0.82 \text{ mm}$, 硬度为 $42 \text{ HRC} \sim 45 \text{ HRC}$ 。(3) 激光强化后, 表层组织共分 3 层, 强化层晶粒细小, 组织为隐针状马氏体, 亚结构有较高密度的位错。

参考文献

- [1] 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [2] 关振中. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [3] 陈树林. 电加工, 1992(3): 35 ~ 36.
- [4] 徐恒钧. 北京工业大学学报, 1998, 24(3): 130 ~ 136.
- [5] 王明吉. 光电子激光, 1999, 10(3): 274 ~ 275.
- [6] 刘宁. 合肥工业大学学报, 1997, 20(2): 50 ~ 56.
- [7] 曲衍方. 天津理工学院学报, 1998, 14(3): 28 ~ 30.
- [8] 彭惠民. 国外科技, 1992(6): 5 ~ 9.
- [9] 安立宝. 航空工艺技术, 1995(4): 19 ~ 21.