

文章编号: 1001-3806(2002)05-0321-03

## 送粉式激光熔覆过程中激光有效能量的描述<sup>\*</sup>

张庆茂<sup>1,2</sup> 杨 森<sup>1</sup> 钟敏霖<sup>1</sup> 刘文今<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>清华大学机械系激光加工研究中心,北京,100084) (<sup>2</sup>解放军军需大学,长春,130062)

**摘要:** 为描述激光熔覆层质量与工艺参数之间的相互关系,在研究自动送粉激光熔覆过程能量分配规律的基础上,利用金相法检测的不同工艺条件下单道熔覆层的宏观参数,定量计算了 L. C. Lim 提出的单位质量熔覆材料的比能和单位时间实际输入的比能两个重要参数,并系统地分析了影响因素。在激光参数恒定的条件下,单位质量熔覆材料的比能随送粉速率的增大而减小;单位时间实际输入的比能随扫描速度的增加而减小。对单位质量熔覆材料的比能随扫描速度的变化出现最小值的现象给出了合理的解释。为进一步研究熔覆层的凝固行为、显微组织与工艺参数的关系奠定了理论基础。

**关键词:** 激光熔覆;金相检测法;显微组织

**中图分类号:** TG665;TG156.99 **文献标识码:** A

## Description of the efficient laser energy in the process of powder feeding laser cladding

Zhang Qingmao<sup>1,2</sup>, Yang Sen<sup>1</sup>, Zhong Minlin<sup>1</sup>, Liu Wenjin<sup>1</sup>

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

(<sup>2</sup> The Quartermaster University of PLA, Changchun, 130062)

**Abstract:** In order to explain the relationship among the powder feeding rate, scanning speed and the qualities of the clad coatings, the concepts of the specific energy input  $E_r$  and the specific energy  $E_h$  formulated by L. C. Lim have been introduced with their experimental measuring methods which have been proved be successful. Based on metallographical measurement, the equations expressing the relationship between the specific energy input  $E_r$ , the specific energy  $E_h$  and the parameters of the laser coated layer and the processing parameters has been derived. The factors effecting the specific energy input  $E_r$  and the specific energy  $E_h$  have been studied carefully. When the powder feeding rate  $v_f$  and scanning speed  $v_s$  increase, the specific energy  $E_r$  and the specific energy  $E_h$  decrease under definite laser power  $P$  and beam spot dimension. A reasonable explanation why a minimum is observed in the relationship between the scanning speed and the specific energy  $E_r$  is presented. In the meantime, it is the theoretical foundation for further study the microstructure, mechanism of solidification and processing parameters.

**Key words:** laser cladding; metallographical measurement; microstructure

## 引 言

目前,主要采用比能、功率密度、线能量、绝对送粉率和激光作用时间等参数综合描述和表征送粉激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响规律<sup>[1~4]</sup>。但由于激光熔覆是一个极其复杂的物理冶金过程,人们还没有达到深刻揭示激光熔覆本质的程度,没

有建立完整、系统的量化理论来指导工艺的実施和熔覆层质量的预测和评估,因此,迫切需要建立简洁的适于现场工艺控制和质量预测的解析模型及其相应的设备配套系统。这些问题还需要在今后的研究中不断的探索和完善。另一个思路是利用金相检测的熔覆层宏微观参数,建立熔覆层参数和工艺参数之间的解析表达式,模拟状态函数的分析方法,分析工艺过程的起始和终了状态之间的关系,建立工艺参数与工艺结果之间的定量表达式,定量解释激光熔覆的复杂过程,揭示其内在的规律。笔者在成功检测激光热有效利用率和粉末有效利用系数的基础上<sup>[5,6]</sup>,定量计算了 Lim 提出的单位质量熔覆材料的比能和单位时间实际输入的比能两个重要参

<sup>\*</sup> 清华大学 985 重点项目及清华大学实验室开放基金资助项目。

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:2001-10-22

数<sup>[7]</sup>,并系统地分析了影响因素。期望能够在动态条件下探讨激光有效能量的表征方式,为进一步解释熔覆层组织的演变规律、几何形貌的设计和在现场工艺的控制提供理论依据。

## 1 实验材料和方法

熔覆材料为颗粒平均尺寸  $r = 0.08\text{mm}$  的 Ni60A 自熔合金,成分见表 1;基体材料为 Q235,试样尺寸为  $60\text{mm} \times 8\text{mm} \times 600\text{mm}$ 。

Table 1 Nominal composition of Ni60A (%)

	Cr	Si	C	B	Fe	Ni
Ni60A	17.5	4.0	1.0	3.5	<5	bal.

采用激光功率为  $3.1\text{kW}$ ,光束直径为  $8\text{mm}$  的连续  $\text{CO}_2$  激光,调整工艺参数如扫描速度、送粉速率等,使光、粉具有良好的匹配性,进行单道激光熔覆。熔覆工艺见表 2。将不同工艺获得的试样沿垂直于扫描的方向,在始、末端切开,熔覆层横截面示意图见图 1。采用金相法测量试样横断面始、末端上熔覆层的高度  $S_f$ 、宽度  $D$  和基体的熔化深度  $d$ 。

Table 2 Processing parameters of the cladding experiment

processes	scan speed	powder feeding rate
	$v_s / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_f / (\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$
1	2.08	350, 375, 425, 475
2	3.85	350, 375, 425, 475
3	8.33	350, 375, 425, 475
4	14.29	350, 375, 425, 475

## 2 单位质量熔覆材料的比能 $E_r$ 和单位时间实际输入比能 $E_h$ 表达式的推导

在光学系统和送粉系统、熔覆材料和基体材料的化学成分、预处理方式、激光束的输出功率一定的前提下,可调节、匹配的参数主要是扫描速度和送粉速率。Lim 引入单位质量熔覆材料的比能  $E_r$  和单位时间实际输入比能  $E_h$  两个能量参数来定性描述扫描速度和送粉速率各自独立地对熔覆层质量的影响规律。但由于激光熔覆是非常复杂的物理冶金过程,必须综合地分析激光功率、扫描速度和送粉速率相互匹配关系。在激光熔覆过程中,激光的能量只有少部分被材料吸收,大部分能量通过各种形式损失掉。因此,探讨如何表征激光的有效能量具有重要的理论意义。在成功进行粉末有效利用系数和激光热有效利用率实际金相检测的基础上,重新定义了单位质量熔覆材料的比能  $E_r$  和单位时间实际输

入比能  $E_h$  两个能量参数,并进行了定量计算。

单位质量熔覆材料的比能是指单位时间内激光输出能量和有效送粉速率之比:  $E_r = P / v_f$  (1)

式中,  $v_f$  为理论送粉速率, 为粉末有效利用系数。单位时间实际输入比能是指单位时间内激光有效能

量与扫描速度和光斑直径积的比:  $E_h = \frac{P}{2 r_b v_s}$  (2)

式中, 是激光热有效利用率,  $v_s$  为扫描速度,  $r_b$  为光斑半径。为求解方程 (1) 和 (2), 首先必须给出粉末有效利用系数 和激光热有效利用率 的计算方法。

### 2.1 粉末有效利用系数的表达式

激光熔覆是一个非常复杂的快速加热、冷却的物理冶金过程。为研究问题方便,做如下的简化和假设: (1) 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,假设熔覆层的轮廓线是抛物线; (2) 忽略由于单道激光熔覆过程中沿扫描方向熔覆道的热积累而产生的熔覆层宽化现象; (3) 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。

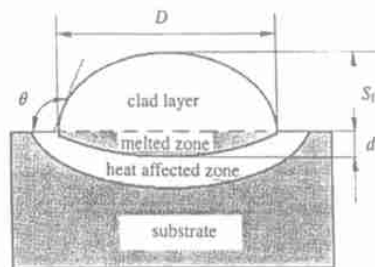


Fig. 1 Geometry of the laser clad layer

设熔覆材料的密度为  $\rho$ , 则单位时间内沿扫描方向熔覆层的质量为:  $M_1 = 2 D S_f \rho v_s / 3$  (3)

设送粉速率为  $v_f$ , 则单位时间内送粉系统输出的熔覆材料的质量为:  $M = v_f$  (4)

粉末有效利用系数 是单位时间内熔覆层的质量与送粉装置输出粉末质量的比:  $\eta = \frac{2}{3} D S_f \rho \frac{v_s}{v_f}$  (5)

### 2.2 激光热有效利用率的表达式

在激光熔覆过程中,激光输出的能量可分为两部分:一部分是指用来加热熔覆材料和基体材料,使之达到冶金结合的能量  $Q_1$ ,称之为有效能量。另一部分是指工艺实施过程中损失的能量  $Q_2$ ,忽略热影响区吸收的能量。设激光输出功率为  $P$ ,在单位时间内,根据能量平衡关系可得:  $P = Q_1 + Q_2$  (6)

激光热有效利用率 是指单位时间熔覆材料和基体材

料吸收的能量与激光输出能量的比:  $= \frac{Q_1}{P}$  (7)

激光熔覆过程中熔覆材料和基体材料同时加热,从室温  $T_0$  加热到满足冶金结合所需的温度  $T$  ( $T > T_m$ ),  $T_m$  为熔覆材料的熔点,熔覆材料、基体材料吸收的能量  $E_1, E_2$  分别表示为:

$$E_1 = C_1 M_1 (T_m - T_0) + C_1 M_1 (T - T_m) + M_1 H_{f1} = M_1 (C_1 T + H_{f1}) \quad (8)$$

$$E_2 = C_2 M_2 (T_m - T_0) + C_2 M_2 (T - T_m) + M_2 H_{f2} = M_2 (C_2 T + H_{f2}) \quad (9)$$

式中,  $C_1, C_2$  分别为熔覆材料和基体材料的比热容;  $H_{f1}, H_{f2}$  为熔化潜热。基体熔化的质量  $M_2$  可以按照(3)式类似求得。综合(7)~(9)式,解出激光热有效利用率的具体表达式:

$$= \frac{E_1 + E_2}{P} = \frac{D v_s (S_f K_1 + d K_2)}{P} \quad (10)$$

式中,  $K_1 = C_1 T + H_{f1}, K_2 = C_2 T + H_{f2}$ ,  $\rho$  为基体材料的密度,只要设定熔池内平均温度值  $T$ ,  $K_1$  和  $K_2$  就为常数。

### 3 单位质量熔覆材料的比能 $E_r$ 和单位时间实际输入比能 $E_h$ 的计算

将通过金相法检测出的熔覆层起始高度  $S_f$ 、宽度  $D$  和熔池的深度  $d$ ,熔覆材料和基体的相关物理参数代入(5)式、(10)式,分别计算得出对应于各个熔覆工

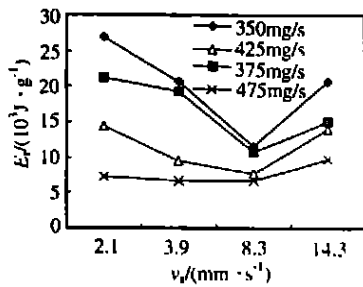


Fig. 2 The relation between the specific energy input  $E_r$  and the processing parameters

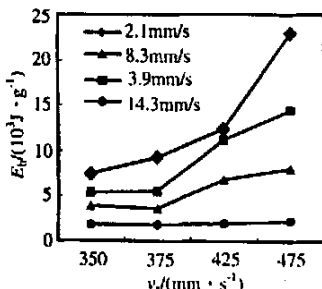


Fig. 3 The relation between the specific energy  $E_h$  and the processing parameters

艺的粉末有效利用率  $\eta$  和激光热有效利用率  $\eta_r$  的值代入(1)式和(2)式,计算得出不同工艺条件下的单位质量熔覆材料的比能  $E_r$  和单位时间实际输入比能  $E_h$ 。单位质量

熔覆材料的比能  $E_r$  和单位时间实际输入比能  $E_h$  与工艺参数之间的关系见图 2 和图 3。

### 4 分析和讨论

单位质量熔覆材料的比能和单位时间实际输入比能分别揭示了在动态条件下单位质量熔覆材料平均占有的能量、单位时间激光作用区实际拥有的能量。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。激光输出的能量一部分是保证熔覆材料和基体材料加热到一定的温度,使它们能够在界面形成良好的冶金结合,形成具有规则几何形状的熔覆层;另一部分则是通过反射、材料飞溅和加热保护气体而损失的能量。激光能量过高,熔覆材料和基体材料烧损增大;能量过低,则不能形成冶金结合的熔覆层。在激光参数和扫描速度一定的条件下,单位质量熔覆材料的比能随送粉速率的增加而减小,而且随着扫描速度的增加,减小的程度更加明显;当超过一定的扫描速度 ( $v_s = 8.33\text{mm/s}$ ),单位质量熔覆材料的比能反而上升,即单位质量熔覆材料的比能存在着最小值。在送粉激光熔覆的条件下,激光束的直径随扫描速度的变化而发生变化,存在着动态直径,当激光束的直径与粉末束流的大小匹配时,则粉末有效利用系数最大,单位质量熔覆材料的比能最小。从熔覆材料的粉末有效利用系数的变化规律看,单位质量熔覆材料的比能大,熔覆材料颗粒的平均温度高,烧损大,基体熔化温度高,稀释率大;反之,熔覆材料颗粒的平均温度低,稀释率小。当单位质量熔覆材料的比能减小到一定的程度,则激光能量全部用于加热熔覆材料,基体几乎不熔化,熔覆材料和基体不能形成冶金结合,表现在熔覆层易于剥落,此时对应的送粉速率称为临界送粉速率;当送粉速率超过临界送粉速率时,熔覆过程不能进行。

在实际激光熔覆过程中,扫描速度和送粉速率必须匹配,才能实现良好的激光熔覆。在满足激光熔覆要求的前提下,当送粉速率和激光参数一定的条件下,实际输入比能随扫描速度的增加而减小,减小的程度随送粉速率的增加而增大,熔覆材料和基体同激光束的作用强度减弱,作用时间变短,激光透过粉末颗粒云照射到基体表面的能量减少。从另一方面看,在高送粉速率条件下的单位时间实际输入比能大于低送粉速率条件下的单位时间实际输入比能,增加的这部分能量主要用于加热熔覆材料,而加

(下转第 333 页)

Table 2 Permeability of a sample at different area

measuring points	1	2	3	4	5	max	min	mean	S. D	C. OF. V
permeability/ C	655. 6	688. 6	652. 5	691. 7	664. 8	691. 7	652. 5	670. 64	16. 465	2. 46 %

3.4 聚焦透镜焦距及激光束聚焦后焦点位置的影响

聚焦透镜焦距对打孔水松纸透气度的影响主要通过影响投射到水松纸上的激光焦斑大小来影响打孔结果。在激光束发散角一定的情况下,聚焦透镜焦距越大,聚焦后的焦斑半径越大,投射到水松纸上后打孔半径越大,从而打孔后水松纸透气度越大。当聚焦透镜焦距确定后,聚焦焦点位置对打孔结果也有较大影响。离焦量不同,作用于水松纸上的光斑大小不同,打出的孔孔径不同,从而打孔水松纸的透气度不同。由于实验装置中聚焦透镜已经选定,聚焦透镜和水松纸的相对位置固定,这里不再列举数据来进行说明。

除了以上讨论的各种影响因素外,还有其它的因素,如电源波动,透镜污染等,这些因素对打孔结果的影响相对较弱,这里就不一一讨论。

4 激光打孔水松纸技术的特点

除了激光打孔技术外,目前,市场上存在的对水松纸打孔的技术还有静电打孔、机械打孔等,和这些技术相比,激光打孔水松纸具有其它工艺打孔水松纸无法比拟的优点,主要表现在:(1)打孔过程产生纸屑被汽化,孔眼非常清洁和规范,而且不会产生任

何异味;而静电打孔会发生焦化现象,难免会有焦味;采用机械打孔对水松纸(对基纸)采用原料配比和涂料有更苛刻的要求,激光打孔技术则没有很严格要求;(2)透气度和孔眼密度范围比静电打孔、机械打孔范围大得多,可满足不同客户最大需求;(3)在低透气情况下,所打孔眼几乎不为肉眼所见;(4)透气度偏差系数极低,最大公差低于 5%,而机械、静电打孔工艺偏差则要大得多;(5)较窄孔带能减少粘合剂渗漏,使卷烟机运作更为顺畅;(6)与其它打孔方式相比,盘纸接头大为减少,也给生产带来便利。

5 结 论

水松纸激光打孔技术是一种先进、可靠的技术,是生产优质稳定打孔水松纸的有力保证,激光打孔水松纸的优点决定了其有良好的发展前景,势必要代替其它打孔方法,成为水松纸打孔技术的主流发展方向。

参 考 文 献

[1] 郑启光,辜建辉. 激光与物质相互作用. 武汉:华中理工大学出版社,1996.  
[2] 水金城,陈武军. 应用激光,1994,6(3): 124~126.  
[3] 陈可心,廖健宏,陈 强 *et al.* 应用激光,1995,2(1): 36~38.

(上接第 323 页)

热基体材料的能量减小<sup>[7]</sup>。表现在熔覆层的厚度增加,宽度变窄,接触角变大,基体熔化量减小。同理,扫描速度也同样存在着临界值。超过该临界值,则不能形成成型性良好的熔覆层。

5 结 论

(1)在激光参数和扫描速度一定的条件下,单位质量熔覆材料的比能随送粉速率的增加而减小,其减小的程度随着扫描速度的增加而更加明显;当超过一定的扫描速度( $v_s = 8.33\text{mm/s}$ ),单位质量熔覆材料的比能反而上升。

(2)当送粉速率和激光参数一定的条件下,实际输入比能随扫描速度的增加而减小,其减小的程度

随送粉速率的增加而增大。

(3)单位质量熔覆材料的比能和单位时间实际输入比能随工艺参数的变化规律为进一步解释熔覆层质量随工艺参数的变化奠定了理论基础。

参 考 文 献

[1] Pelletier J M, Sahour M C. J Mater Sci, 1993, 28: 5184~5188.  
[2] 李 强, 欧阳加虎, 雷廷权. 材料科学与工艺, 1996, 4(4): 22~36.  
[3] Zeng X Y, Tao Z Y, Zhu B D. Elsevier Surface and Coatings Technology, 1996, 79(2): 209~217.  
[4] 张庆茂, 刘喜明, 关振中. 应用激光, 2000, 20(5): 209~212.  
[5] 刘喜明, 关振中. 中国激光, 1999, A26(5): 470~476.  
[6] 张庆茂, 刘喜明, 关振中. 金属热处理, 2000, 8: 1~3.  
[7] Lim L C, Ming Q, Chen Z D. Elsevier Surface and Coatings Technology, 1998, 106(6): 183~192.