

工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响

张庆茂，王忠东

(解放军军需大学，长春 130062)

刘喜明

(吉林工学院，长春)

关振中

(中国科学院长春光学精密机械研究所，长春)

摘要：系统地研究了 Ni 基合金自动送粉激光熔覆工艺参数对熔覆层几何形貌的影响。重点讨论了一些参数如激光作用能量密度(P_w)、作用时间(t)、送粉速率(V_f)、扫描速度(V_s)等对熔覆层宏观质量的影响规律。利用金相法检测了熔覆层的几何参数。为解释工艺参数对熔覆层宏观质量的影响提出了送粉激光熔覆覆盖率的概念，并利用检测的熔覆层宏观参数计算了覆盖率。覆盖率随扫描速度增加而减小，随送粉速率的增加而增大。在本试验条件下，研究结果表明，随激光作用能量密度和作用时间的增加，熔覆层的横截面面积呈线形规律增加，熔覆层宽化量增加，接触角增大，而且这种现象随送粉速率的增加更加显著。

关键词：金相检测法；激光作用能量密度；覆盖率

中图分类号：TG159.99 文献标识码：A 文章编号：0253—360X(2000)02—43—04

张庆茂



0 序 言

激光熔覆是最近几十年来发展起来的高功率激光表面强化技术之一。激光熔覆的主要工艺方法有两种：预置熔覆法和同步送粉熔覆法。随着激光熔覆软件、硬件的开发与应用，自动送粉激光熔覆成为当今发展的主流。自动送粉激光熔覆克服了预置熔覆法的许多缺点，具有工艺参数可控，对激光能量吸收率高，无内部气孔，覆层抗开裂能力强，生产效率高等特点；熔覆材料和基体材料同时加热，实现了熔化的熔覆材料与基体材料表面间的液体交融，简化了工艺过程，展示出极强的研究开发价值^[1~4]。激光熔覆过程的参数可分为两大类：材料和激光的参数。材料和激光的参数主要包括：材料的颗粒度、扩散系数、热传导系数、熔点、比热、熔化潜热、密度、吸收系数；激光的模式和波长。材料和激光的种类一旦选定，在非精确计算的情况下，可以认为保持不变。工艺参数主要是指：激光的输出功率、光束作用试样表面的半径、送粉速率、扫描速度等。工艺参数的调整，是获得良好熔覆层的关键。目前，围绕着提高激光熔覆层的质量（熔覆层厚度、稀释率、熔覆层的合金成分、界面结合状况、组织特征等），人们在激光参数、加工工艺参数的优化，熔覆材料的选择、设计和开发，熔池中的对流、传质、传热机制，各种数理模型的建立和模拟，熔覆层质量的评定

和检测，激光束与粉末粒子的交互作用，粉末粒子在激光束中的加热、运动规律，激光热有效利用率、透光率、稀释率的理论分析和实际检测等方面取得了可喜的进展^[5~7]。研究的重点是如何在低成本基材上获得优异的耐磨、耐蚀、高温和光电性能；到目前为止，系统论述工艺参数对熔覆层几何形貌特征影响的研究成果，还未见报道。作者利用金相检测法，研究了工艺参数对熔覆层几何特征的影响。

1 试验材料及方法

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 $60 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。

表 1 熔覆材料的化学成分(质量分数%)

Table 1 Nominal composition of Ni60A

	Cr	Si	C	B	Fe	Ni
Ni60A	$\leqslant 17.5$	4.0	1.0	3.5	< 5	Bal.

采用激光功率为 3.1 kW ，光束直径为 8 mm 的连续 CO_2 激光，进行单道激光熔覆，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。将获得的试样沿垂直于扫描方向，在始、末端切开。采用金相检测法，分别测量试样横断面始、末端上合金熔覆层的高度、宽度和接触角，考察熔覆层质量与工艺参数之间的相互依赖关系。

2 试验结果及分析

2.1 工艺条件的优化

激光熔覆是一个非常复杂的快速加热、快速凝固的物理冶金过程。良好的熔覆层应该是表面光滑、无裂纹; 合金层的成分均匀; 界面为冶金结合; 较小的稀释率和比较高的熔覆效率。因此, 需要光、粉在动态下具有良好的匹配性。激光作用能量密度、扫描速度、送粉速率; 喷嘴的形状、大小以及距试样表面的距离; 光束和粉末粒子流的位相关系, 都将影响粉末粒子的加热状态(粉末粒子不能过热、蒸发、离子化及形成等离子体), 进而影响熔覆层的宏观、微观质量。通过大量的试验, 达到光、粉的良好匹配。在激光功率为 $P=3.1\text{ kW}$ 的条件下, 确定扫描速度的范围为 $2 \leq V_s \leq 15\text{ mm/s}$, 送粉速率为 $300 \leq V_f \leq 500\text{ mg/s}$, 喷嘴距试样表面实测距离为 $h=40\text{ mm}$ 。典型的熔覆层横断面示于图 1, 熔覆层可以用宽度(W)、厚度(H)、接触角(θ)、横截面面积($S=W \times H$)等参数来描述。

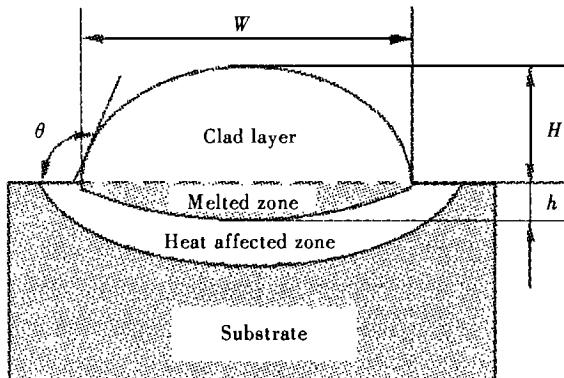


图 1 激光熔覆层的几何形状

Fig. 1 Geometry of laser clad layer

2.2 激光作用能量密度和作用时间的影响

激光熔覆层的尺寸参数主要受工艺参数控制, 为描述工艺参数对熔覆层几何参数的影响, 引入激光作用能量密度 $P_w = P / (V_s \times 2d)$ 和作用时间 $t = 2d / V_s$ 。式中 P 为激光输出功率; V_s 为扫描速度; d 为光束半径。它们对熔覆层宽化、横截面面积、接触角的影响分述如下。

(1) 图 2 和图 3 示出激光作用能量密度和作用时间对熔覆层横截面面积变化的影响规律。随着激光作用能量密度和作用时间的增加, 熔覆层的横截面面积也随着增加, 表现出线性的依赖关系; 而且熔覆层横截面面积变化的规律, 随激光作用能量密度和作用时间的变化, 在不同的送粉速率条件下, 表现出不同的特征: 在低的送粉速率下, 曲线的斜率小, 熔覆层的横截面面积随激光作用能量密度和作用时

间增加, 变化的幅度小; 在高的送粉速率情况下, 则曲线的斜率大, 横截面面积在低的激光作用能量密度和比较短的作用时间区域, 变化不大; 而在高激光作用能量密度和比较长的作用时间区域, 横截面面积增长的幅度大。激光作用能量密度和作用时间是获得最佳熔覆层质量的两个非常重要的参数, 它们直接反映激光和粉、基体相互作用的有效强度, 因为横截面面积代表的是单位时间内形成熔覆层所需的最小数量的熔覆材料, 也就是说横截面面积是表征熔覆层中粉末质量的物理量。三者的相互关系, 是制定工艺流程的理论依据。

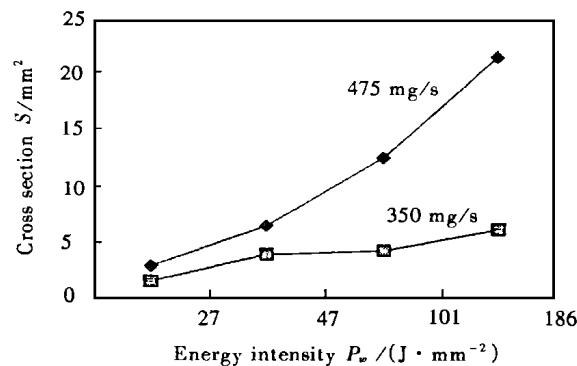


图 2 激光作用能量密度与横截面面积的关系

Fig. 2 Relationship between energy intensity and S

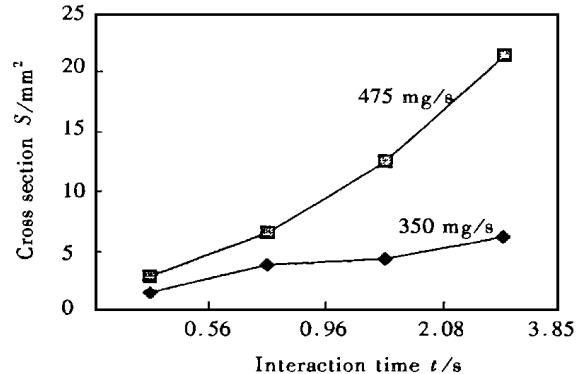


图 3 作用时间与横截面面积的关系

Fig. 3 Relationship between interaction time and S

(2) 图 4 和图 5 示出激光作用能量密度和作用时间对熔覆层宽化的影响规律。可以得出随激光作用能量密度和作用时间的增加, 熔覆层显著宽化, 而且低送粉速率条件下宽化的程度明显小于高送粉速率; 在低能量密度和短作用时间范围内, 宽化的差别不大。图 6 显示了接触角随激光作用能量密度变化的情况, 高送粉速率条件下的接触角与低送粉速率条件下的接触角相比, 显著增大; 而且随激光作用能量密度的增加, 接触角均增大, 但增加的幅度不同。形成上述结果的原因是: 在激光熔覆过程中, 熔覆材料和基体同时加热, 在相同的能量密度和作用时间条件下, 送粉速率增加, 意味着单位时间进入熔池的熔覆材料增多。透过熔覆材料辐射基体的光束, 一

部分被基体吸收,一部分反射,反射到熔覆材料,经粉末材料的多次反射,又被基体吸收,这样增加了基体的吸热,有助于熔覆层的宽化。但激光作用能量密度低,激光、粉末和基体的有效作用强度显著降低,则熔覆层的宽化必然减少,表现在接触角的变小。上述结论对确定大面积搭接的工艺参数是非常有指导意义的。

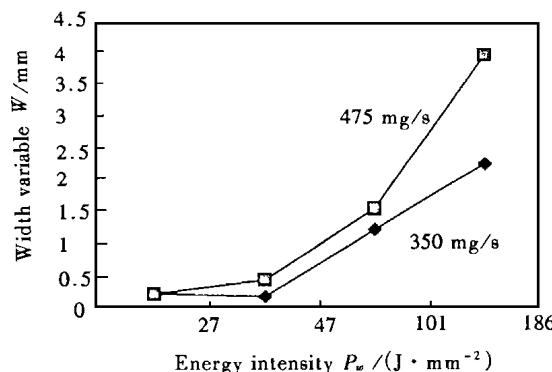


图4 激光作用能量密度与熔覆层宽化的关系

Fig. 4 Relationship between energy intensity and width variable of cladding

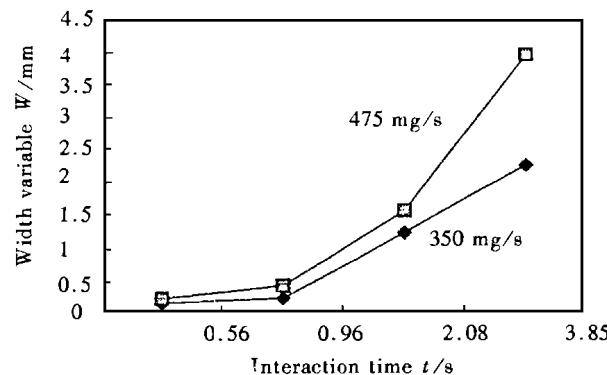


图5 作用时间与熔覆层宽化的关系

Fig. 5 Relationship between interaction time and width variable

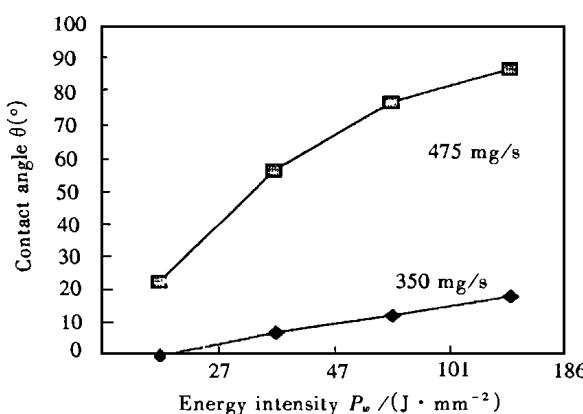


图6 激光作用能量密度与接触角的关系

Fig. 6 Relationship between the energy intensity and contact angle

2.3 覆盖率的计算及影响因素

为进一步解释工艺参数与熔覆层横截面面积的关系,引入覆盖率的概念。覆盖率 R 是指作用时间内进入激光束作用面积的熔覆材料颗粒数与完全充满激光束作用面积所需颗粒数之比。为计算覆盖率,假定熔覆材料颗粒为球形,其平均半径为 r ; ρ 为熔覆材料的密度;激光束半径为 d ; N_1 为作用时间内进入光束中的颗粒数; N_2 为充满激光束作用面积所需的颗粒数; ϵ 为作用时间内的有效送粉系数,可通过金相法检测。根据定义可求出覆盖率为

$$R = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

作用时间可以用激光束通过试样表面上一点所需时间近似表示为

$$t = \frac{2d}{V_s} \quad (2)$$

引入有效送粉系数 ϵ ,则在作用时间内进入激光束的熔覆材料颗粒数为

$$N_1 = \frac{3\epsilon V_f}{4\pi r^3 \rho} \quad (3)$$

理论上充满激光束作用面积所需的熔覆材料数为

$$N_2 = \frac{d^2}{r^2} \quad (4)$$

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)中,可得覆盖率的表达式为

$$R = \frac{3\epsilon V_f}{2rd^3 \rho} \quad (5)$$

从式(5)可以归纳出:激光熔覆过程的有效送粉速率和扫描速度均对覆盖率产生影响。将有效送粉系数与送粉速率之积称为有效送粉速率。因此,覆盖率与有效送粉速率成正比,与扫描速度成反比,与粉末颗粒的半径成反比。图7、图8揭示了送粉速率和扫描速度对覆盖率的影响规律,从图中可以看出:随送粉速率的增加,覆盖率也成一定的比例增加,这种现象随扫描速度的降低,表现的更加显著。覆盖率随扫描速度的增加逐渐减小,而且在送粉速率增加的条件下,减小的程度更大。有效送粉速率在激光熔覆过程中是非常关键的参数,这是因为工艺实施过程中,送粉系统本身效率不能达到100%;由于粉末粒子流的发散、定位的困难,粉末粒子不可能完全进入激光作用面积,必然有一部分因温度达不到熔点,而不能进入熔覆层,在高扫描速度的条件下,这种现象表现的更加突出。图9示出送粉速率对熔覆层横截面面积的影响规律。在给定的激光作用能量密度和扫描速度条件下,熔覆层的横截面面积随送粉速率的增加成正比例的增加;增加的幅度随扫

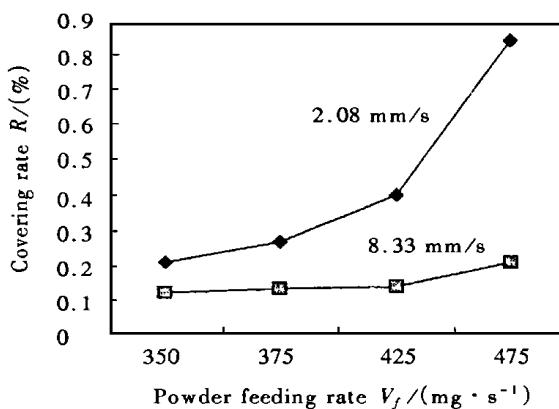


图 7 送粉速率与覆盖率的关系

Fig. 7 Relationship between powder feeding rate and covering rate

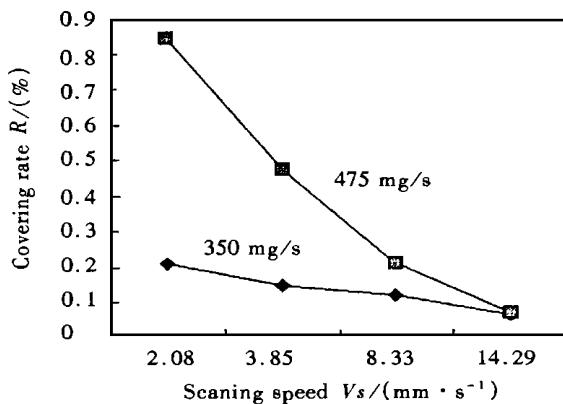


图 8 扫描速度与覆盖率的关系

Fig. 8 Relationship between scanning speed and covering rate

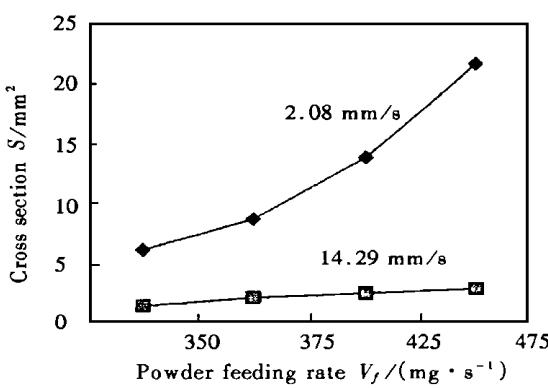


图 9 送粉速率与横截面面积的关系

Fig. 9 Relationship between powder feeding rate and S

描速度的大小而变化, 高扫描速度情况下, 熔覆层横截面面积增长的幅度小于低扫描速度条件下的变化

程度。通过金相观察, 基体的熔化量随送粉速率的增加变得越来越小。这是因为送粉速率增大到一定的程度, 粉末粒子必然形成屏蔽面, 透光率急剧降低, 基体的熔化量减少, 表现在熔覆层的厚度增加, 接触角变大, 有效送粉系数变大, 熔覆层宽化量减少。上述结果与激光作用能量密度和作用时间作用效果是一致的。

3 结 论

(1) 在激光功率和送粉速率一定的条件下, 熔覆层横截面面积随激光作用能量密度和作用时间的增加而增大, 而且随送粉速率的增加, 熔覆层横截面面积增加的幅度明显增大。

(2) 熔覆层宽化量、接触角随激光作用能量密度和作用时间的增加而增加, 随送粉速率的增加这种现象更加显著。

(3) 熔覆材料的覆盖率与有效送粉速率成正比, 而且在扫描速度比较小的条件下, 效果更加显著; 与扫描速度成反比, 随送粉速率的增加扫描速度作用的程度增大。

参考文献:

- [1] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [2] 李强, 欧阳加虎, 雷廷权. 激光表面熔覆的进展[J]. 材料科学与工艺, 1996, 4(4): 22~36.
- [3] Xiaoyan Zeng, Zengyi Tao, Beidi Zhu. Investigation of laser cladding ceramic metal composite coatings processing modes and mechanisms [J]. ELSEVIER Surface and Coatings Technology, 1996, 79(2): 209~217.
- [4] Vetter P A, Th. Engel, Fontaine J. Laser cladding: the relevant parameters for process control[C]. SPIE, 1997, 2207: 452~462.
- [5] 刘喜明, 关振中. 送粉式激光熔覆获得最佳熔覆层的必要条件及其影响因素[J]. 中国激光, 1999, A26(5): 470~476.
- [6] 刘喜明, 关振中. 送粉式激光熔覆过程中透光率的理论推算、测试方法及其影响因素[J]. 中国激光, 1999, A26(6): 565~570.
- [7] 扬永强, 宋永伦. 送粉激光熔覆时激光与粉末的交互作用[J]. 中国激光, 1998 A25(3): 280~284.

作者简介: 张庆茂, 男, 1966 年 8 月出生, 硕士学位, 讲师。目前在中国科学院长春光学精密机械研究所攻读博士学位。研究方向为激光熔覆表面改性技术。已发表论文 10 余篇。