

文章编号: 1001-3806(2004)02-0113-03

# 送粉式激光熔覆能量有效利用率分析

王永峰<sup>1</sup>, 薛春芳<sup>2</sup>, 田欣利<sup>2</sup>, 周兰英<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072)

**摘要:** 通过分析熔覆过程中光束、粉末和熔池间的相互作用, 提出了送粉式激光熔覆能量利用率的数学模型, 并结合相关参数进行了计算。结果表明, 整个熔覆过程中能量有效利用率较低。该模型客观地反映了熔覆工艺参数和工艺结果的关系, 为熔覆工艺参数优化、熔覆质量的预测、评定, 提供了理论依据。

**关键词:** 送粉; 激光熔覆; 能量利用率; 粉末效率

中图分类号: TG156.99 文献标识码: A

## Analysis of effective utility of laser power in process of powder feeding laser cladding

WANG Yong-feng<sup>1</sup>, XUE Chun-fang<sup>2</sup>, TIAN Xin-li<sup>2</sup>, ZHOU Lan-ying<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Amored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** According to the analysis of the interaction of laser, powder and melting pool, a model of effective utility of laser power in process of powder feeding laser cladding is presented, and then calculation is performed with the parameters in process. It can be seen from the result that the amount of effective utility of laser power is small. The model objectively reflects the major relationship between the parameters and the results of process. It also provides a theoretical foundation for optimizing the process parameters, predicting and evaluating the quality of clad coating.

**Key words:** powder feeding; laser cladding; effective utility of laser power; powder efficient utilization

### 引 言

在送粉式激光熔覆技术中, 能量利用率是熔覆过程中最为根本的一项参数, 利用率的大小直接影响熔覆层的质量以及熔覆过程的效率, 因而对于它的分析研究则成为熔覆理论研究中必不可少的一部分<sup>[1-3]</sup>。作者通过分析熔覆过程中光束、粉末和熔池间的相互作用, 提出送粉式激光熔覆能量利用率的数学模型, 并结合相关参数进行了计算。

### 1 数学模型

有效能量利用率即激光熔覆形成熔覆层所需能量与激光发出的总能量之比, 因此, 求解熔覆过程所需能量是该分析关键所在。而送粉式激光熔覆的过程较为复杂(如图 1 所示), 因而能量分布也比较复

杂, 但从光束分布的角度来考虑能量分布。激

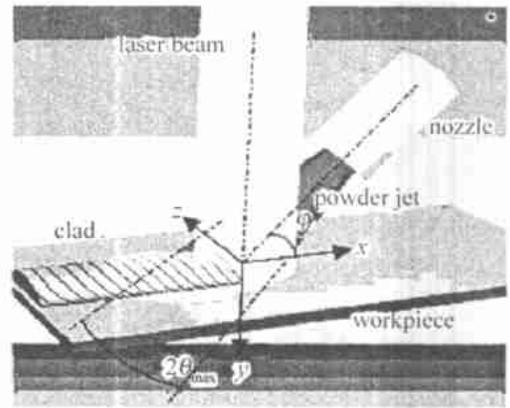


Fig. 1 Schematic of powder feeding laser cladding

光经过气体粉末流而后到达基体表面, 在光束经过粉末流时部分透过粉末流, 部分被吸收, 部分发生散射; 而照射到熔池和基体表面时仍然会发生吸收和反射; 被反射的激光在通过粉末流时又发生吸收和散射, 该过程反复进行。对于粉末颗粒而言, 也并不能被完全利用, 只有撞入熔池的粉末颗粒才能附着到基体上, 而与固体区域碰撞的颗粒被反弹掉从而产生损失。

熔覆过程中有效的能量可分为以下几个部分。

基金项目: 总装武器装备预研基金资助项目 (51461010101 JB 3501)

作者简介: 王永峰(1978), 男, 硕士, 从事机械制造及其自动化研究工作。

E-mail: wangyofeng@bit.edu.cn

收稿日期: 2003-09-19; 收到修改稿日期: 2003-10-23

(1) 基体直接吸收的能量。光束到达基体之前,要通过气体粉末流,这个过程减弱了激光能量,可用透光率  $\mu$  表示透过粉末流的光束与全部光束之比,到达工件的激光能量也只有部分被吸收利用,设工件基体吸收率为  $\beta_w$ 。用  $P_1$  表示激光初始能量,可得基体直接吸收的光能  $P_w$ :

$$P_w = \beta_w P_1 \mu \quad (1)$$

(2) 粉末颗粒直接吸收的能量。光束通过气体粉末流时,粉末颗粒直接吸收了部分的能量,设  $\beta_p$  为气体粉末流能量吸收率;这部分能量随着粉末传入基体,但只有进入熔池的颗粒才能将能量利用,设  $\eta_p$  为粉末效率,即最终形成熔覆层的粉末与实验所用粉末之比,因而可得出粉末颗粒直接吸收的能量  $P_p$ :

$$P_p = \eta_p \beta_p P_1 (1 - \mu) \quad (2)$$

(3) 最后,当使用  $\text{CO}_2$  激光时,透过粉末流直接照射到基体表面的激光部分被吸收,部分被反射,反射掉的激光经过粉末流时部分透过粉末流,其余的又被粉末流吸收或是再次反射到基体表面,此过程反复进行; $\Delta P_{pn}$  表示第  $n$  次反射粉末流吸收的能量, $\Delta P_{wn}$  表示第  $n$  次反射工件基体吸收的能量:

$$\Delta P_{p1} = P_1 \eta_p \beta_p \mu (1 - \mu) (1 - \beta_w),$$

$$\Delta P_{w1} = P_1 \mu \beta_w (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu),$$

$$\Delta P_{p2} = P_1 \eta_p \beta_p \mu (1 - \mu) (1 - \beta_w) \cdot (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu),$$

$$\Delta P_{w2} = P_1 \mu \beta_w \cdot [(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)]^2,$$

$$\Delta P_{p3} = P_1 \eta_p \beta_p \mu (1 - \mu) (1 - \beta_w) \cdot [(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)]^2,$$

$$\Delta P_{w3} = P_1 \mu \beta_w \cdot [(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)]^3,$$

$$\Delta P_{pn} = P_1 \eta_p \beta_p \mu (1 - \beta_w) (1 - \mu) \cdot$$

$$[(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)]^{n-1},$$

$$\Delta P_{wn} = P_1 \mu \beta_w \cdot [(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)]^n.$$

可以得出,  $\sum \Delta P_{pn}$ ,  $\sum \Delta P_{wn}$  是以  $(1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)$  为公比的等比序列,并且收敛,所以有:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{pn} = \frac{\eta_p \beta_p \mu (1 - \beta_w) (1 - \mu)}{1 - (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)} \cdot P_1 \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{wn} = \frac{\mu \beta_w (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)}{1 - (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)} \cdot P_1 \quad (4)$$

(4) 因此,相对于总的激光能量,熔覆过程中有效的能量  $\Delta P$  和能量利用率  $\beta$  为:

$$\Delta P = P_w + P_p + \sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{wn} + \sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{pn}, \text{ 整理可}$$

得:

$$\Delta P = \frac{(\eta_p \beta_p + \beta_w - \eta_p \beta_p \beta_w) (1 - \beta_w) \mu (1 - \mu)}{1 - (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)} \cdot P_1 + \mu \beta_w P_1 + \eta_p \beta_p (1 - \mu) P_1 \quad (5)$$

$\beta = \Delta P / P_1$ , 整理可得:

$$\beta = \frac{(\eta_p \beta_p + \beta_w - \eta_p \beta_p \beta_w) (1 - \beta_w) \mu (1 - \mu)}{1 - (1 - \eta_p \beta_p) (1 - \beta_w) (1 - \mu)} + \beta_w \mu + \eta_p \beta_p (1 - \mu) \quad (6)$$

式中,粉末效率:

$$\eta_p = \frac{2DS_1 v_s \rho_p}{3m_p} \quad (7)$$

根据文献[1],可得透光率:

$$\mu = 1 - \frac{3m_p}{2\pi r_l r_p \rho_p v_p \cos(\theta_{jet})} \quad (8)$$

式中,  $D$  为熔覆层宽度,  $S_1$  为熔覆层高度,  $v_s$  为激光扫描速度,  $\rho_p$  为粉末颗粒密度,  $m_p$  为送粉率;  $r_l$  为激光束半径,  $r_p$  为粉末颗粒半径,  $v_p$  为粉末粒子离开喷嘴时的初始速度,  $\theta_{jet}$  为粉末流与水平方向夹角。将各参数分别代入,即可求得能量利用率  $\beta$ 。

## 2 利用率计算及实测结果

### 2.1 理论利用率

实验采用单道激光熔覆。采用 5kW 的 HLJ-4 工业用横流  $\text{CO}_2$  激光器为能量源, JGJK-1 型激光功率显示控制仪控制激光功率, 离焦量可调; 送粉系统为 DPSF-3 型送粉器, 侧向送粉, 倾斜角度约为  $40^\circ$ , 喷嘴内径  $\varnothing 2.2\text{mm}$ , 送粉率可调; 所用工件基体材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 金属粉末为 Ni 基自熔性合金粉末, Ni 基合金粉末粒度为 150 目, 熔点为  $1027^\circ\text{C}$ ; 其主要成分如表 1 所示。

Table 1 Topical composition of powder in experiment/%

powder	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	Co	W	Mn	O
Ni60A	surplus	16	3.5	4.5	$\leq 15$	0.8	—	—	—	—

为计算能量利用率给出以下相关参数: 光斑直径  $d_l = 8\text{mm}$ , 激光功率  $P_l = 3\text{kW}$ , 粉末颗粒熔化潜热  $\Delta H_p = 0.26\text{J/mg}$ , 粉末密度  $\rho_p = 8.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ , 粉末比热容 ( $20^\circ\text{C}$ )  $c_p = 0.46 \times 10^3\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ , 工件基体熔化潜热  $\Delta H_w = 0.27\text{J/mg}$ , 基体密度  $\rho_w = 7.9 \times 10^3\text{kg/m}^3$ , 基体比热容 ( $20^\circ\text{C}$ )  $c_w = 0.5 \times 10^3\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ , 粉末粒子离开喷嘴时的初始速度<sup>[4]</sup>  $v_p = 276.7\text{mm/s}$ , 粉末流吸收率<sup>[1]</sup>  $\beta_p = 0.11$ , 基体吸收率<sup>[2]</sup>  $\beta_w = 0.11$ 。

将检测到的熔覆层宏观参数及相关的工艺参数代入(7)式和(8)式, 计算出不同工艺条件下的粉末

效率和透光率,见表 2;再将两值代入(6)式,计算出激光作用效率,见表 2。

Table 2 Experimental results of related parameters and calculated result of effective utility of laser power

$v_s/l$ (mm s <sup>-1</sup> )	$\dot{m}_p/l$ (mm s <sup>-1</sup> )	$D/l$ mm	$S_1/l$ mm	$S_2/l$ mm	$\mu$	$\eta_p$	$\beta$	$\beta'$
2	350	6.20	1.00	0.50	0.73	0.20	0.12	0.03
2	425	6.00	2.30	0.30	0.67	0.37	0.13	0.05
2	475	6.00	3.60	0.15	0.63	0.52	0.14	0.08
4	350	5.70	0.70	0.45	0.73	0.26	0.12	0.05
4	425	5.70	2.00	0.10	0.67	0.61	0.14	0.08
4	475	5.50	2.30	0.10	0.63	0.60	0.14	0.09
8	350	6.80	0.65	0.30	0.73	0.57	0.13	0.09
8	425	5.00	1.35	0.06	0.67	0.72	0.15	0.10
8	475	4.20	1.60	0.01	0.63	0.64	0.15	0.09
14	350	4.50	0.35	0.20	0.73	0.36	0.12	0.06
14	425	3.30	0.65	0.05	0.67	0.40	0.13	0.06
14	475	3.50	0.80	0.01	0.63	0.47	0.14	0.07

## 2.2 实测利用率

通过测量熔覆层和基体熔化区的尺寸,可计算出熔覆过程中有效的能量,从而得出实测的有效能量与总能量之比,即实测利用率  $\beta'$ :

$$\beta' = \left\{ \frac{2}{3} DS_1 \rho_p v_s [(T_f - T_0) c_p + \Delta H_p] + \frac{2}{3} DS_2 \rho_w v_s [(T_f - T_0) c_w + \Delta H_w] \right\} / P_1 \quad (9)$$

式中,  $S_2$  为基体熔覆深度,室温  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , 根据文献 [3], 熔池最高温度  $T_f = 1500^\circ\text{C}$ 。

## 3 分析和讨论

### 3.1 误差分析

根据表 2 可知,能量利用率理论值和实测值具

有相同的分布趋势,在相同送粉率的条件下,利用率随着扫描速度先增大后减小,存在一个极大值;在相同扫描速度的条件下,利用率随着送粉率的增大而提高。但理论值和实测值存在一定误差,其因素可归纳为:(1)理论值计算未考虑空气对流散热的影响;(2)  $T_f$  取值会直接影响计算结果,若采取实际监测将会减小误差;(3)理论值计算未考虑基体热影响区吸热;(4)材料的热物理性质随着温度升高会发生变化,取定值计算会产生一定误差。

### 3.2 影响利用率的因素

由(6)式可知,能量利用率主要受  $\beta_p$ ,  $\beta_w$ ,  $\eta_p$ ,  $\mu$  影响,其中  $\beta_p$ ,  $\beta_w$ ,  $\eta_p$  3 个参数的增大都会使利用率升高;而透光率则与利用率的大小呈相反的变化趋势,其主要原因为透光率的大小取决于送粉率,当送粉率提高时,透光率减小,并且粉末效率升高,使粉末流能够利用更多的能量,从而使能量利用率升高。

## 4 结论

(1)整个熔覆过程中有效的能量利用率较低,但在一定的扫描速度条件下,能量利用率随着送粉率的增大而增大;在恒定的送粉率下,利用率随着扫描速度先增大后减小,存在一个极大值。

(2)粉末效率随着送粉率的提高而提高,但仍有很大一部分未被利用,其原因为烧损、飞溅,但其数值变化对能量利用率影响不大。

(3)与用金相实测的利用率相比,理论能量利用率高于实测值,但两者具有相同的变化趋势。

### 参 考 文 献

- [1] PICASSO M, MARSDEN C F, WANGNIERE J D. Metallurgical and Materials Transactions, 1994, B25: 281~ 291.
- [2] 刘喜明. 送粉式激光熔覆基础理论研究. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1998. 41~ 42.
- [3] 张庆茂, 刘文今, 杨 森. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 11~ 15.
- [4] 刘喜明, 关振中. 中国激光, 1999, A26(5): 470~ 476.