

激光熔覆法的孔隙现象研究 (邀请论文)

郑凯宇 林震铭*

(成功大学机械工程学系, 台湾 台南)

摘要 探讨了加工参数对激光熔覆孔隙率的影响。在实验上运用激光熔覆法对烧结件进行堆栈加工, 探讨激光功率对熔覆后试件孔隙率的影响。在数值分析方面, 以自行编写的数值分析程序, 分析激光熔覆过程中因粉末温度产生的表面能差异对孔隙率的影响, 比较计算与实验测量结果, 发现具有一致性。旨在说明激光功率引发的表面能差异将对熔覆试件孔隙率造成影响, 所得到的实验及数值分析结果可为后续研究提供依据。

关键词 激光加工; 激光熔覆; 表面张力; 孔隙率

中图分类号 TN249; TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093612.3251

Study of the Porosity Phenomena in Laser Cladding (Invited Paper)

Kaiyu Cheng Jehnming Lin

(Department of Mechanical Engineering, Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, China)

Abstract This paper investigates the effects of porosity of the forming parts by laser cladding method. In the experiment, the laser cladding has been applied to build up the bulk clad on the thin layers formed by selective laser sintering, and the surface porosity with various laser powers has been characterized by imprint method. In the numerical analysis, a computation model was developed to analyze the porosity based on the surface tension and energy of cladding powders at various temperatures. The results show a good conformity between the numerical analysis and the experimental measurement.

Key words laser processing; laser cladding; surface tension; porosity

1 引言

激光熔覆为激光应用于金属材料加工中的重要技术之一, 适用于融合金属粉末于基底表面。近年来发展的激光辅助金属直接堆积制程, 其中大多采用激光熔覆法并整合激光系统及多轴数控(CNC)技术, 适于制作三维工件及少量多样化的生产方式, 例如直接堆积制作金属模具及相关修补等应用。

激光熔覆主要在基底表面加热后形成溶池, 使基底表面与粉末或线材以熔融的方式结合, 达到熔覆效果。激光熔覆虽然具有多项优点, 如熔覆层和基底间的稀释小、结合强度高、变形量小、热影响区小等^[1,2], 但在精微加工应用, 如特征表面的翻制, 直接成型薄小工件仍有困难, 故发展相关的加工项目为目前重要的研究课题。此外激光熔覆结果可能受到送粉速度、温度及其他因素而产生球化现象的影响。2006年C. Lalas等^[3]提出一个对于激光熔覆的分析模型, 该模

型利用几何概念分析激光熔覆层宽度、高度、深度等。分析模型考虑了表面张力的影响, 但都是较宏观的熔覆结果探讨, 缺少微观结构的探讨。2007年A. V. Gusarov等^[4]对于激光熔覆提出一个新的物理模型, 用能量守恒进行分析, 考虑粉末掉落的动能与表面能的平衡, 建立激光熔覆物理模型, 探讨不同粉末掉落速度对其孔隙率的影响, 但在其研究中并没有探讨温度对表面造成的影响。

本文探讨激光熔覆直接成型薄小工件的孔隙特性, 采用激光加热金属粉末熔覆在烧结的基底上。分析参数对于基底熔覆的可行性及其孔隙分布的影响, 根据能量守恒计算不同熔覆温度的孔隙率, 并与实验观察作一比较。

2 数值分析

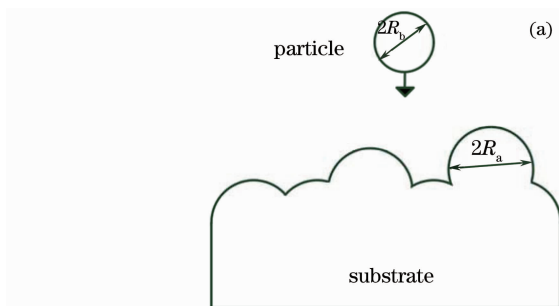
数值分析主要参考液滴掉落时所运用的能量守

恒的观点作为计算的理论基础^[5],对于粉末由同轴喷嘴出口到溶池中吸收激光所提供热量形成液态或固液状态后落于溶池内的过程,在不考虑粉末吸收激光热量间的传热问题,可将这个过程视为金属液滴滴落于金属表面的过程。依据 A. V. Gusarov 等^[4]提出的公式,修正表面张力系数为温度函数,探讨温度所造成表面能改变对激光熔覆的影响。

2.1 物理模型和假设

在进行激光熔覆分析时,为了简化起见针对计算模型提出下列假设:

1) 计算时不考虑流场变化,且将掉落粉末视为



球体;

2) 实际加工时虽然粉末在接触基底前可能为半固液状态或液态,为分析方便对粉末在接触基底前均视为完全熔化;

3) 根据第一点假设,研究中使用的能量方程仅考虑粉末掉落前后动能以及表面能,不考虑粉末内部流动的能量;

4) 将粉末的密度视为定值,根据质量守恒概念,粉末在掉落前后体积不变。

在计算上使用文献^[4]所提出的物理模型,如图 1 所示。

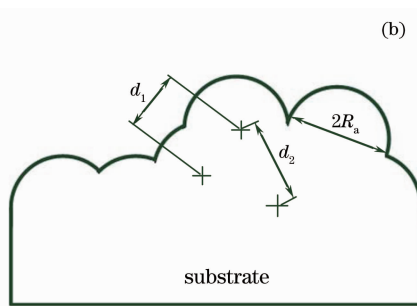


图 1 激光熔覆粉末示意图

Fig. 1 Illustration of the powder deposition in laser cladding

2.2 运算方程式

2.2.1 能量方程式

计算在液滴掉落外观尺寸时所运用的能量守恒方程^[5]为

$$E_{K1} + E_{S1} = E_{S2} + W + \Delta E_K, \quad (1)$$

式中 E_{K1} 为液滴初始动能, E_{S1} 为液滴初始表面能, E_{S2} 为液滴掉落后的表面能, W 为液滴变形抵抗黏性所需的能量, ΔE_K 为液滴变形的动能损失。

以能量守恒的概念探讨激光熔覆过程中粉末掉落黏结的情况, (1) 式作为计算的基本公式, 并根据假设中的第三点, 将(1)式中的液滴变形抵抗黏性所需的能量 (W) 和液滴变形的动能损失 (ΔE_K) 忽略, 将(1)式化简为

$$E_{K1} + E_{S1} = E_{S2}. \quad (2)$$

熔覆粉末初始动能 (E_{K1})、表面能 (E_{S1}) 及熔覆粉末掉落后的表面能 (E_{S2}) 分别可表示为

$$E_{K1} = \frac{\rho u^2}{2} V_b, \quad (3)$$

式中 ρ 为粉末密度, u 为粉末掉落速度, V_b 为粉末原始体积。

$$E_{S1} = \sigma \cdot S_b, \quad (4)$$

式中 σ 为表面张力, S_b 为粉末原始表面积。

$$E_{S2} = \sigma \cdot S_a, \quad (5)$$

式中 S_a 为粉末落下后平衡所需表面积。

当粉末温度改变时, 粉末的表面张力将会受到改变, 进而影响表面能, 因此将表面张力表示为温度函数。探讨的激光熔覆粉末为不锈钢 SUS 304, 其表面张力与温度关系为^[6]

$$\sigma(T) = 1840 - 0.4(T - 1823), \quad (6)$$

式中 T 为粉末温度。整理可得到能量方程

$$\frac{\rho u^2}{2} V_b = 1840 - 0.4(T - 1823)(S_a - S_b). \quad (7)$$

2.2.2 几何方程式

除能量守恒方程外的一个重要运算方程为粉末间的几何方程, 而落下粉末的体积与基底接触的粉末数目以及落下粉末与基底粉末间的距离关系^[4]为

$$V_a = (1 - n) \frac{4}{3} \pi R_a^3 + \pi R_a^2 \sum_{i=1}^n d_i - \frac{\pi}{12} \sum_{i=1}^n d_i^3, \quad (8)$$

式中 V_a 为粉末掉落与基底接触后的体积, n 为粉末掉落时与下方粉末的接触数目, d_i 为落下粉末与其相接触粉末的中心距离, 可表示为

$$d_i = \sqrt{(x_0 - x_{i'})^2 + (y_0 - y_{i'})^2 + (z_0 - z_{i'})^2}, \quad (9)$$

式中 $(x_{i'}, y_{i'}, z_{i'})$ 为与掉落的粉末相接触的粉末坐标。

根据能量守恒方程式及几何方程,用自行编写的程序计算,可求得粉末落下后的位置。以此了解粉末黏结的情况,分析粉末温度与孔隙率的关系。

2.3 模拟结果

考虑不同粉末温度对激光熔覆粉末堆积情况和孔隙率的影响,分别计算粉末粒径为 $100\ \mu\text{m}$,粉末

温度在 $1550\sim 2050\ ^\circ\text{C}$ 间,每间隔 $100\ ^\circ\text{C}$ 的结果,藉此了解粉末温度对粉末间距离及孔隙率的变化。

图 2 为粉末温度 $1550\ ^\circ\text{C}$ 的堆积情况及高度 $0.15\ \text{mm}$ 与 $0.25\ \text{mm}$ 下的截面图,图 3 为粉末温度 $2050\ ^\circ\text{C}$ 的堆积情况及高度 $0.15\ \text{mm}$ 与 $0.25\ \text{mm}$ 下的截面图。

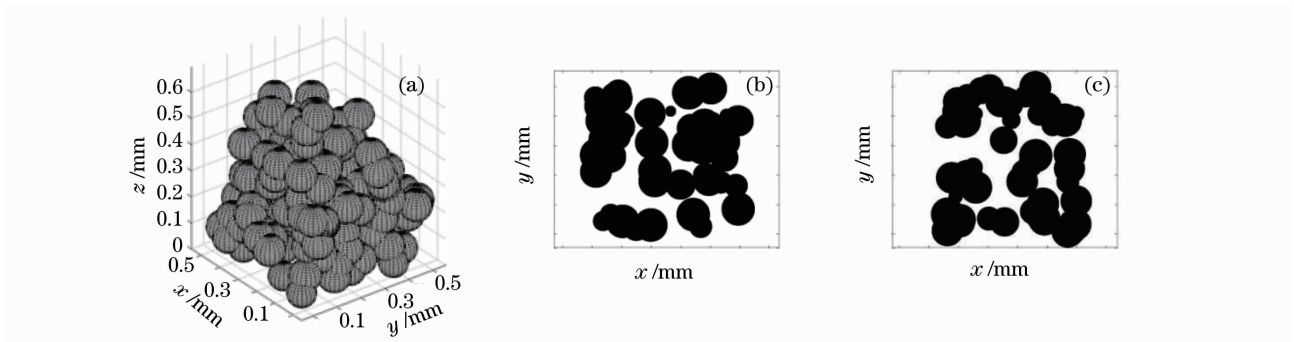


图 2 (a)粉末温度 $1550\ ^\circ\text{C}$ 的堆积情况;(b)取高度 $0.15\ \text{mm}$ 下的截面图;(c)高度 $0.25\ \text{mm}$ 下的截面图
Fig.2 Powder deposition at $1550\ ^\circ\text{C}$ (a) and cross-sectional view at $z=0.15\ \text{mm}$ (b), $z=0.25\ \text{mm}$ (c)

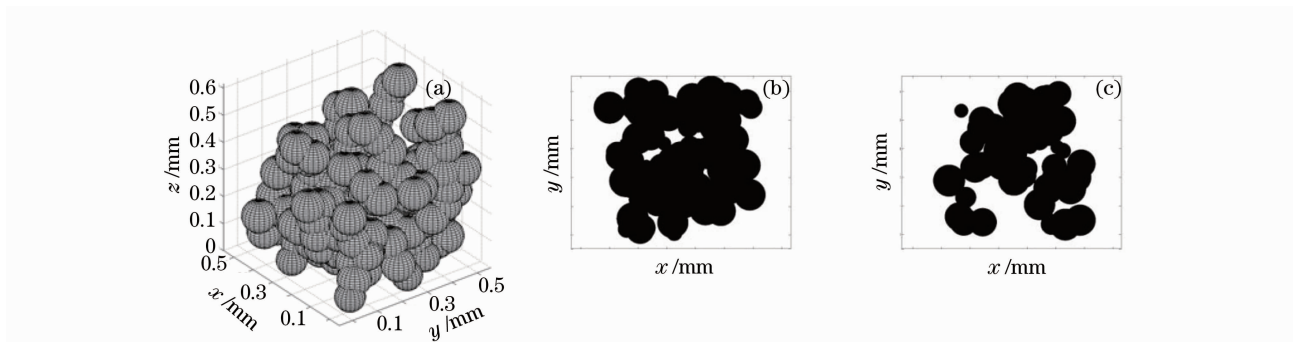


图 3 (a)粉末温度 $2050\ ^\circ\text{C}$ 的堆积情况;(b)取高度 $0.15\ \text{mm}$ 下的截面图;(c)高度 $0.25\ \text{mm}$ 下的截面图
Fig.3 Powder deposition at $2050\ ^\circ\text{C}$ (a) and cross-sectional view at $z=0.15\ \text{mm}$ (b), $z=0.25\ \text{mm}$ (c)

图 4 为粉末温度与孔隙率的关系图。可见当粉末温度提升时,熔覆的孔隙率下降,在粉末温度 $1550\ ^\circ\text{C}$ 情况下,孔隙率为 30.295% ,当温度为 $2050\ ^\circ\text{C}$ 时,孔隙率下降到 20.803% ,当粉末温度较高

时,堆积的情况会较紧密,孔洞也随之减小,孔隙率越来越小。主要因为当粉末温度提高时,造成粉末表面张力下降,而为平衡动能所需的表面能维持不变,故粉末所需的表面积则增大,造成粉末间的距离缩短,所以粉末堆积紧密,使得孔隙率变小。因此说明粉末温度的高低,会造成熔覆后孔隙情况改变,粉末温度越高,其孔隙率越低。

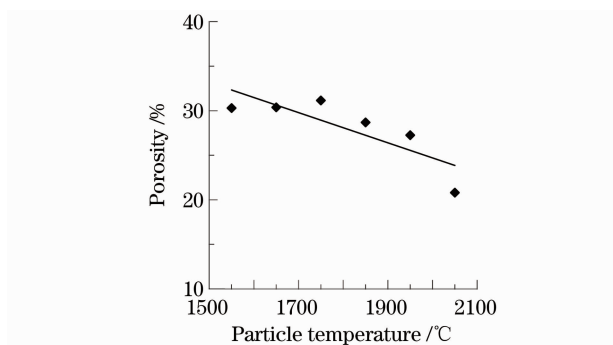


图 4 粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 时激光熔覆中粉末温度与孔隙率的关系

Fig.4 Relationship between the clad porosity and powder temperature for the powder diameter of $100\ \mu\text{m}$

3 激光熔覆实验

实验部分探讨不同的激光功率对激光熔覆加工的影响,进而了解激光功率对熔覆孔隙率的影响。

3.1 实验方法及条件

将送粉机、保护气体等设备进行架设与调整,得到稳定的送粉效果,最后将激光烧结的薄件置放于移动平台上,运用 CO_2 激光配合移动平台进行激光熔覆。完成后用立体显微镜观察试件表面的微观变

化,之后进行表面孔隙率的压印测量,取得试件的孔隙率并进行探讨。图 5 为激光熔覆设备配置示意图。实验中熔覆粉末采用不锈钢(SUS304)粉末,粉末尺寸集中在 $75 \sim 125 \mu\text{m}$ 范围内,送粉气体和保护气体均使用氩气(2 L/min)。

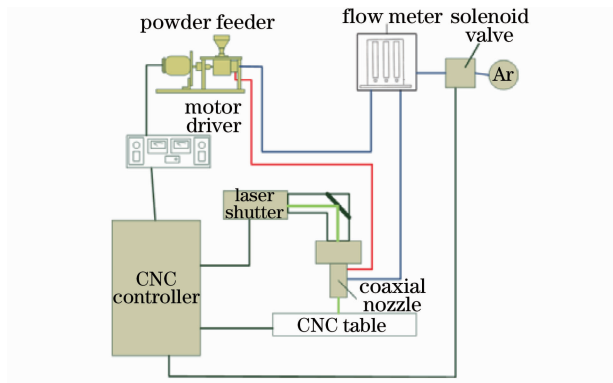


图 5 激光熔覆设备配置示意图

Fig. 5 Illustration of the laser cladding system

3.2 实验结果

使用立体显微镜分别观察熔覆后试件宏观形貌与微观情形。由熔覆的宏观情况观察可以发现在激光功率 15, 25, 40 W 功率下,针对激光烧结的薄件均能进行激光熔覆,但当功率到达 50 W 左右,外观上产生明显的缺陷,薄件产生严重的重熔现象,使薄件熔覆失败,在 75 与 100 W 下情况更加严重。图 6 为激光功率 15 W 的微观情形,图 7 为激光功率 40 W 的微观形貌,图 8 为激光功率 50 W 的微观形貌,可以观察到在任何激光功率条件下,试件表面均有重熔的情况产生,且随着激光功率的提高,重熔的情况更加明显。

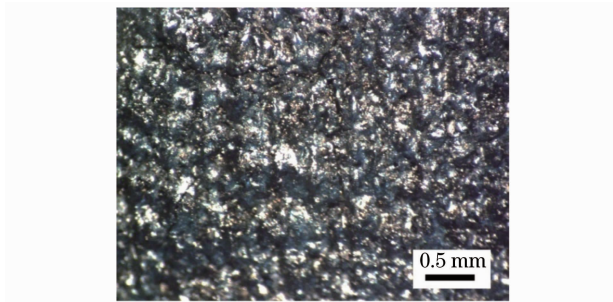


图 6 激光功率为 15 W 的熔覆情形

Fig. 6 Photograph of the clad surface at the laser power of 15 W

藉由熔覆表面之压印测量,图 9 为不同激光功率与试件孔隙率的关系。可知孔隙率随着激光功率的提升而降低,在激光功率为 40 W 时可得到最低的孔隙率 41.457%,但激光功率在 75 W 时孔隙率却大幅提升到 62.930%。主要原因是当激光功率达到 50 W

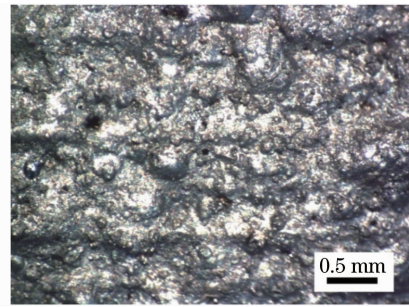


图 7 激光功率为 40 W 的熔覆情形

Fig. 7 Photograph of the clad surface at the laser power of 40 W

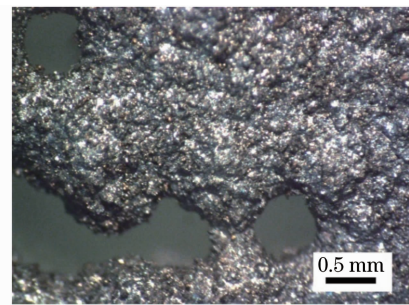


图 8 激光功率为 50 W 的熔覆情形

Fig. 8 Photograph of the clad surface at the laser power of 50 W

以上时试件受到过高的能量影响,有明显的粉末团重熔现象产生,所以测量表面孔隙率大幅提升,与真实的表面情况相差极远。根据发现熔覆试件在特定激光功率下,孔隙率会随激光功率提升而降低。但并非持续提高激光功率,即可持续降低试件的孔隙率,孔隙率具有极限,过高的激光功率反而造成试件表面熔覆层形成球化现象,导致熔覆试件失败。

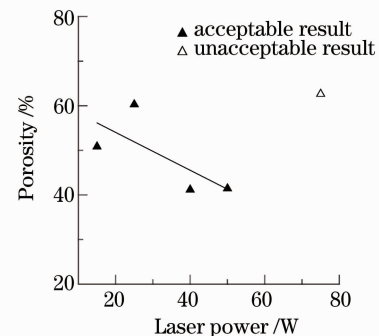


图 9 激光功率与孔隙率的关系

Fig. 9 Relationship between the clad porosity and the laser power

3.3 数值分析结果与实验结果比较

根据文献[7]得知在激光功率越高时,熔覆粉末温度越高。熔覆试件的孔隙率会随着激光能量密度增加而下降,对比图 4 与图 9 发现实验结果与数值

分析的结果具有一致性,因此可说明粉末温度的改变会造成表面能的改变,因而影响激光熔覆的孔隙率。

4 结 论

在数值分析上,以能量守恒的概念建立数值分析物理模型,进行分析后,发现粉末在固定尺寸下,当粉末温度越高时,粉末堆积的情况越紧密,造成孔隙率降低。其主要原因为当粉末温度提高时,会造成粉末表面张力下降,而为平衡动能所需的表面能一样,所以粉末所需的表面积则越大,粉末间的距离缩短,粉末堆积越紧凑,造成孔隙率越小的结果。

在激光参数对孔隙影响的实验上,发现激光功率越高时孔隙率越低,但到达一定功率时,孔隙率下降的现象消失。过高的激光功率反而会造成试件表面产生严重的球化现象,且对基底的烧结件产生破坏,造成加工失败。

比较实验与数值分析结果,实验结果中激光功率越高时,试件的孔隙率越低。在数值分析上具有

一样的趋势,当粉末的温度越高时,孔隙率越低。

参 考 文 献

- 1 W. M. Steen. Laser Material Processing (2nd ed)[M]. Springer Verlag, 1998
- 2 V. M. Weerasinghe, W. M. Steen. Computer simulation model for laser cladding[J]. *ASME H. T. D.*, 1983, **29**: 15~23
- 3 C. Lalas, K. Tsirbas, K. Salonitis *et al.*. An analytical model of the laser clad geometry[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, **32**(1-2): 34~41
- 4 A. V. Gusarov, I. Smurov. Direct laser manufacturing with coaxial powder injection: Modelling of structure of deposited layers [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253** (19): 8316~8321
- 5 M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra *et al.*. Deposition of tin droplets on a steel plate: simulations and experiments[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**: 2929~2945
- 6 S. Hartland. Surface and Interfacial Tension Measurement. Theory and Applications[M]. Marcel Dekker, 2004
- 7 Liu Changyi. Temperature analysis of laser cladding[D]. Tainan: Department of Mechanical Engineering, Cheng Kung University, Master dissertation, 2001
刘昶熠. 激光熔覆之温度分析[D]. 台南: 成功大学机械工程学系硕士论文, 2001