

文章编号: 1001-3806(2006)06-0621-04

# 激光微沉积合金粉末制造薄壁零件的试验研究

张永忠<sup>1</sup>, MEACOCK Chris<sup>2</sup>, VILAR Rui<sup>2</sup>

(1. 北京有色金属研究总院 复合材料工程中心, 北京 100088; 2. Departamento de Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal)

**摘要:** 为了直接制备出壁厚均匀的精细薄壁零件, 试验研究了激光微沉积 StelliteF 合金粉末的工艺参数对壁厚均匀性及沉积过程稳定性的影响。通过对激光微沉积薄壁的截面组织及形貌的分析表明, 沉积过程的热散失条件影响壁厚的均匀性; 选择合适的工艺参数, 可沉积出表面粗糙度  $R_a$  低于  $10\mu\text{m}$ 、内部组织致密、厚度均匀 (壁厚约  $0.4\text{mm}$ ) 的薄壁零件。结果表明, 激光微沉积合金粉末技术在细小零件的激光表面改性及高精度小型零件的直接制备方面具有很好的应用开发前景。

**关键词:** 激光技术; 激光熔覆; 激光微沉积; StelliteF 合金; 薄壁; 微观组织; 表面光洁度

**中图分类号:** TF123.7+1; TG665 **文献标识码:** A

## Characterization of laser powder micro-deposition of thin StelliteF wall

ZHANG Yong-zhong<sup>1</sup>, MEACOCK Chris<sup>2</sup>, VILAR Rui<sup>2</sup>

(1. Research Center for Non-ferrous Metals Composites, General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China; 2. Departamento de Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal)

**Abstract** For laser powder micro-deposition process, the bonding between the deposited materials and the substrates is crucial to the quality of the deposited components. In order to fabricate fine thin parts with uniform thickness and good bonding strength directly, the effect of processing parameters on wall thickness uniformity and stability of the process during laser micro-deposition of metallic powder from StelliteF alloy is investigated experimentally. The observation and analysis of the cross-section and the microstructure of the deposited thin walls indicate that the change of heat dissipation condition during deposition influences the wall thickness uniformity. Under reasonable processing parameters, thin wall parts with surface roughness ( $R_a$ ) as low as  $10\mu\text{m}$ , the wall thickness as thin as  $0.4\text{mm}$  and metallurgically sound structure can be deposited directly. It indicates that laser micro-deposition of metallic powder has a bright prospect in laser surface modification of small parts and direct fabrication of fine and precise components.

**Key words** laser technique; laser cladding; laser micro-deposition; StelliteF alloy; thin wall microstructure; surface finish

### 引 言

激光粉末沉积是基于激光熔覆和快速成型的数字化成形技术, 其独特的逐层添加成形过程, 可以实现对零件外形、组织组成、微观结构和性能的柔性控制, 因而得到广泛的关注。激光粉末沉积技术已经在航空用先进钛合金结构件的制备、含内冷却通道模具的快速制造、以及能源及重工业中昂贵的转动部件的修复等方面显示出巨大的应用开发潜力<sup>[1~4]</sup>。对于激光粉末沉积的系统、工艺过程及控制、以及沉积材料的组织及性能已经有很多的研究<sup>[4~8]</sup>, 这些工作所得到的零件大多数需要进行后续加工以达到所要求的尺寸精度和

表面质量。

近年来, 有研究者通过使用低的激光功率、精确的工艺控制以及闭环控制, 采用激光粉末沉积工艺来直接制造尺寸小、表面质量高的零件<sup>[9~11]</sup>。研究表明, 对基体预热并对激光功率实施闭环控制, 可大大提高单熔覆道薄壁的厚度一致性<sup>[11]</sup>。最近有人通过激光微熔覆温度场模型的建立, 获得了激光布线线宽随激光功率及激光扫描速度的定量公式<sup>[12]</sup>。

激光粉末微沉积采用低的激光功率、送粉速率和更小的光斑, 可以在细小的零件表面沉积材料以改变其表面性能及直接成形要求高尺寸精度的小型零件如牙科植入物、颌面修复体等。本工作通过建立激光微沉积薄壁的厚度与工艺参数的关系, 以进一步提高壁厚的一致性和表面光洁度。

### 1 试验材料及方法

所建立的激光微沉积系统由 250W CO<sub>2</sub> 激光器、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50205005)

作者简介: 张永忠 (1970-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事金属材料的激光快速成形和激光表面熔覆的研究开发工作。

E-mail: yyzhang@mail.grim.com.cn

收稿日期: 2005-09-13; 收到修改稿日期: 2006-04-21

同轴送粉喷嘴、高精度送粉器、三轴运动平台及控制软件组成。聚焦镜焦距 63.5mm, 离焦量为 +2mm, 喷嘴下端面距基体表面 7mm, 基体采用经喷砂处理的 16mm 厚普通碳钢, 在沉积薄壁时, 每沉积一层后, 激光头向上移动一预设的距离, 基体表面激光光斑直径约 0.25mm, 沉积所用粉末为雾化制备的球形 StelliteF 钴基合金粉, 粉末的名义成分为 (质量分数):  $x(\text{C}): 0.018\%$ ,  $x(\text{Cr}): 0.25\%$ ,  $x(\text{W}): 0.12\%$ ,  $x(\text{Si}): 0.01\%$ ,  $x(\text{Ni}): 0.22\%$ ,  $x(\text{Fe}) < 0.03\%$ ,  $x(\text{Mn}) < 0.01\%$ ,  $x(\text{Mo}) < 0.01\%$ , 其余为 Co, 粉末粒度在  $22\mu\text{m} \sim 53\mu\text{m}$ , 粉末输送载气 (氩气) 流量为  $1.5\text{L}/\text{min}$ , 薄壁沉积的熔覆道长度为 20mm, 采用两种扫描沉积路径, 即单方向扫描沉积和往复扫描沉积。对所沉积薄壁的横截面及纵截面进行外形和微观组织分析, 金相腐蚀介质组成为: 15mL 水, 15mL 硝酸, 15mL 乙醇和 60mL 盐酸。采用金相显微镜和 S-2400 扫描电镜观察微观组织, 采用 HMV 2000 显微硬度计测量沉积材料的硬度, 硬度测试所用载荷为 300g, 加载时间 15s, 沉积薄壁的表面粗糙度在 RM 600-S 粗糙度测量仪上进行。

## 2 工艺试验

### 2.1 工艺参数的选择及其影响

激光粉末微沉积过程中, 首先需要通过单道熔覆实验确定合适的工艺参数, 参照单道熔覆层的截面形状确定沉积每一层后激光头上升的距离, 连续多层沉积就可得到薄壁零件。沉积层的形状取决于熔池的大小及其稳定性, 要获得壁厚均匀的薄壁零件必须保证在整个沉积过程中熔池大小的恒定, 熔池的大小取决于进入熔池的热流量、进入熔池的粉末量、及通过基体和周围环境的热散失情况, 在相同粉末量的情况下, 当热输入大于热散失时, 熔池尺寸将增大。

图 1a 为单道熔覆层的截面, 可见熔覆层与基体呈

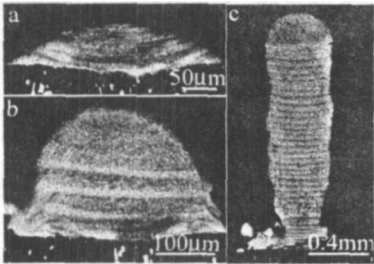


Fig 1 Cross-section micro-morphology of laser micro-deposited StelliteF at layer with power of 150W, scanning speed of 2.5mm/s, powder feed rate of 0.73g/min

a— one layer b— 4 layers c— 40 layers

完全冶金结合, 稀释率很低, 单道熔覆层的高度为  $70\mu\text{m}$ 。在沉积薄壁时, 已沉积层上表面的一薄层在沉积下一层时要熔化以保证层与层之间的冶金结合, 因而每沉积一层后激光头上升的距离要小于单道熔覆层

的高度。图 1b 是熔覆 4 层的截面组织, 由此可估算出每层之间激光头上升距离在  $40\mu\text{m}$ 。图 1c 是熔覆 40 层的截面, 薄壁的总高约 1.6mm。在薄壁的底部, 由于冷基体的热沉作用, 壁厚较小, 随着沉积层的增加, 基体温度迅速升高, 通过基体的热散失速度减慢, 熔池温度有所升高, 壁厚有所增加, 经过若干层后, 熔池的热输入和热散失基本达到平衡, 此时所沉积的薄壁壁厚基本保持不变, 最后沉积层由于没有经受重熔作用, 其组织较细。

基于以上基本工艺参数, 采用不同的运动速度和送粉速率沉积出多个薄壁, 每个薄壁样沉积 24 层, 所用激光功率为 150W, 最初的 4 层均采用较低的运动速度 ( $2\text{mm}/\text{s}$ ) 和较低的送粉量 ( $0.36\text{g}/\text{min}$ ) 以保证薄壁与基体的良好结合。通过对其截面的观察得到每层的沉积高度和壁厚及壁厚的均匀性, 结果列于表 1。壁的平均厚度  $W_a$  为沿高度方向均布的 10 个测量值的平均, 壁厚的偏差根据  $(W_{\max} - W_{\min})/W_a \times 100\%$  计算,  $W_{\max}$ ,  $W_{\min}$  分别对应于壁厚的最大值和最小值。可见, 沉积层的高度随运动速度的增加而减小。低的运动速度意味着激光与粉末的作用时间加长, 单位长度熔覆道所熔化的粉末量增加, 导致层高及壁厚增加。在激光粉末沉积时, 所沉积的零件内部由于高的温度梯度而形成热应力, 加上所沉积的材料与基体材料在热物理性能上存在差异, 当应力高到一定程度会导致所沉积材料与基体的脱离。由表 1 可知, 在上述实验条件下, 最小的壁厚偏差对应的运动速度为  $4.5\text{mm}/\text{s}$ , 送粉速率为  $0.61\text{g}/\text{min}$ 。

Table 1 Influence of processing parameters on layer height and wall width

| transverse speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | powder feed rate/(g·min <sup>-1</sup> ) | layer height/μm (average) | wall width $W_a$ /μm | width divergence/% |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------|
| 2.5                                    | 0.61                                    | 50                        | 390                  | 42                 |
| 3.5                                    | 0.61                                    | 40                        | 358                  | 23                 |
| 4.5                                    | 0.61                                    | 25                        | 331                  | 10                 |
| 5.0                                    | 0.61                                    | 23                        | 333                  | 35                 |
| 6.0                                    | 0.61                                    | 22                        | 290                  | 35                 |
| 6.0                                    | 0.73                                    | 21                        | 306                  | 25                 |
| 6.0                                    | 0.83                                    | 23                        | 302                  | 48                 |
| 6.0                                    | 0.94                                    | 24                        | 295                  | 39                 |

### 2.2 扫描方式的影响

扫描方式主要影响沉积的热过程、零件的残余应力及变形情况。图 2a 和图 2b 分别为往复扫描沉积和单方向扫描沉积所得的薄壁照片, 单方向扫描时, 待运动到沉积起始点时打开激光, 到沉积层终止点时切断光源, 并继续运动至轨迹终点, 如图 2b 所示。比较图

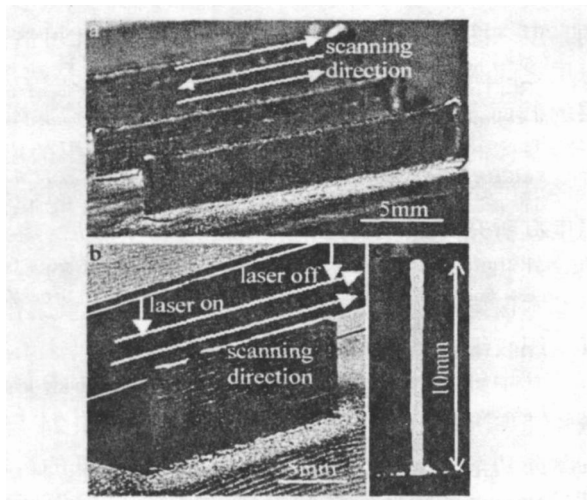


Fig 2 Thin walls prepared by laser powder micro-deposition  
a— for 100 layers with continuous scanning b— 200 layers with one scanning direction and movement delay c— cross-sectional morphology of the wall shown in Fig 2b

2a和图 2b可以发现, 往复扫描时由于在轨迹两端存在运动的加速和减速, 使得在两端激光的停留时间长, 改变方向时激光辐照的间隔时间短, 热累积严重, 导致在两端沉积层的厚度和壁厚较其它部位有所增加, 采用单方向扫描并延迟打开激光和提前关断激光可以完全克服上述差异。图 2c是图 2b薄壁的截面, 该薄壁的壁厚均匀, 壁厚约 0.4mm。

2.3 组织分析

激光粉末微沉积的主要目标是要得到具有良好尺寸精度和机械性能的全致密金属零件。图 3a是薄壁

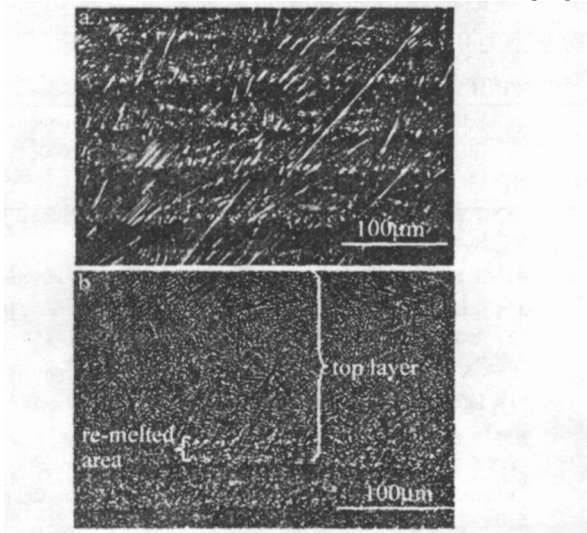


Fig 3 Cross-sectional microstructure of the thin wall with section parallel to the scanning direction  
a— optical microscopy b— SEM backscattering electron microscopy of the top two layers

沿运动方向截面的 OM 照片, 可见, 所沉积的薄壁 100% 致密, 没有任何气孔及裂纹等缺陷, 可清晰分辨出沉积的每一层, 其组织较传统处理方法得到的组织更为细小。少数细长枝晶穿过多个沉积层界面生长,

凝固组织表现出一致的方向性, 这是由所沉积材料的凝固特性和沉积时间/液凝固界面所决定的。图 3b是薄壁最后两层的 SEM 背散射电子像, 最后沉积层为细小杂乱的枝晶组成。在每一层中, 重熔区的组织稍微粗大一些, 枝晶间主要由金属间化合物相及碳化物组成, 如  $Cr_7C_3$ ,  $Co_3W$ ,  $Co_7W_6$  等。

所沉积薄壁的硬度值  $HV_{0.05}$  在 600~700 之间, 高于常规处理状态的硬度值 ( $HV_{400}$ ), 这归因于激光粉末沉积时高的凝固速率而形成的细小组织。跟组织相对应, 硬度值也存在周期性变化。

图 4a 为所沉积薄壁 SEM 表面形貌, 表面的圆

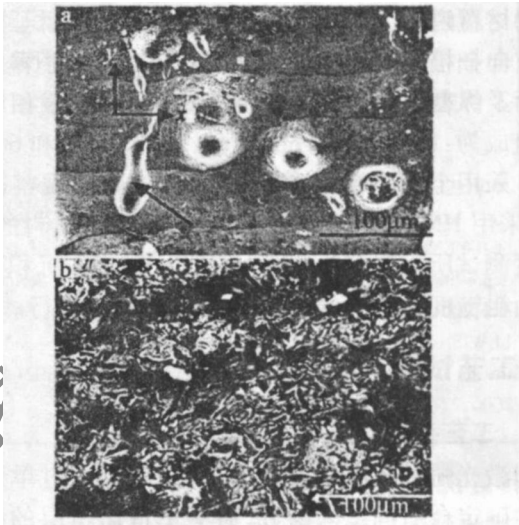


Fig 4 SEM surface morphology of the deposited wall  
a— as-deposited b— sand blasted

形白色突起为没有完全熔化的粉末颗粒, 表面泪滴状形貌 (如箭头所示) 是由于熔池温度过高, 导致的金属液从熔池中溢出所致, 从表面可清晰分辨出沉积的每一层。对沉积表面进行轻微喷砂处理后, 表面的突出物基本消失, 并在表面留下新鲜表面 (见图 4b)。所沉积薄壁表面的轮廓测量结果见表 2。可以看出, 所沉积薄壁的表面粗糙度值很低,  $R_a$  在  $10\mu m$  左右, 沿高度方向的粗糙度值略高于平行于扫描方向的值, 喷砂处理后, 沿不同方向的粗糙度值相近。

Table 2 Surface roughness of the deposited wall

| surface roughness/ $\mu m$ | as-deposited |        | sand blasted |       |
|----------------------------|--------------|--------|--------------|-------|
|                            | $x^*$        | $y^*$  | $x$          | $y$   |
| $R_a$                      | 5.04         | 8.93   | 4.70         | 5.21  |
| $R_z$                      | 39.03        | 83.41  | 36.78        | 43.29 |
| $R_{max}$                  | 47.87        | 122.56 | 43.12        | 55.07 |

\*  $x, y$  indicate that measuring direction on the surface of the wall as shown in Fig 4a

3 结 论

激光沉积粉末过程中基板的温度及热散失条件影

响熔覆道的宽度,在冷基板上沉积时,由于基板的热沉作用,熔覆道较窄;激光微沉积的工艺参数及热过程对所沉积薄壁的层高、厚壁及壁厚均匀性有显著影响,在合适的工艺条件下,沉积过程及熔池大小经过初始几层沉积后可达到稳定;为得到壁厚均匀一致的薄壁零件,在沉积初始几层要选择较低的扫描速度和送粉量;采用连续往复扫描沉积薄壁时,由于两端的热作用时间较长,所沉积层的高度和厚度较其它部位有所增加,采用单方向扫描和激光开关控制可克服这一差异;采用激光粉末微沉积工艺,可直接制备出壁厚在 0.4mm 的薄壁零件,沉积表面的粗糙度  $R_a$  约 10 $\mu$ m;所沉积的薄壁材料内部组织致密,晶粒细小,充分显示了激光微沉积合金粉末技术在直接成形高精度的细小零件及小尺寸零件表面激光熔覆方面独特的优势和发展潜力。

### 参 考 文 献

- [1] ABBOTT D H, ARCELLA F G. Laser forming titanium components [J]. *Advanced Materials& Processes* 1998, 152(5): 29~ 30.
- [2] SCHWENDNER K J, BANERJEE R, COLLINS P C *et al*. Direct laser deposition of alloys from elemental powder blends [J]. *Scripta Materialia* 2001, 45(10): 1123~ 1129.
- [3] LEWIS G K, SCHLINGER E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition [J]. *Materials& Design* 2000, 21(4): 417~ 423.

- [4] WU X, LIANG J, MEI J *et al*. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials& Design* 2004, 25(2): 137~ 144.
- [5] CHOI J, CHANG Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 2005, 45(4~ 5): 597~ 607.
- [6] KECH E D M, SMUGERESKY J E. The laser forming of metallic components using particulate materials [J]. *Journal of Metals* 1997, 49(5): 51~ 54.
- [7] ARCELLA F G, PROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming [J]. *Journal of Metals* 2000, 52(5): 28~ 30.
- [8] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMATIN S L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Scripta Materialia* 2000, 43(4): 299~ 305.
- [9] PINKERTON A J, LI L. The significance of deposition point standoff variations in multiple-layer coaxial laser cladding [J]. *International Journal of Machine Tool and Manufacturing* 2004, 44(6): 573~ 584.
- [10] MAZUMDER J, DUTTA D, KUKUCHIN *et al*. Closed loop direct metal deposition art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2000, 34(4~ 6): 397~ 414.
- [11] HU D M, KOVACEV R. Sensing modeling and control for laser-based additive manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 2003, 43(1): 51~ 60.
- [12] LIX Y, QI X J, ZENG X Y. Establishment and application of temperature field model in laser micro-cladding [J]. *Laser Technology* 2005, 29(6): 561~ 564 (in Chinese).

(上接第 620 页)

引头接收到的目标信息,近似等于目标辐射强度的干扰信号,已经可以实现干扰。

实战中使用较多的棋盘格式调制盘、放射形和螺旋线形调制盘等<sup>[10]</sup>,相比于旭日式调制盘,其优点在于具有更好的空间滤波能力和较小的盲区等,但它的目标方位识别的原理与旭日式调制盘相同,所以文中所述的干扰方式对它们同样有效。实战中还需要对来袭导弹实施侦察以获得敌方导引头工作方式、工作频率等信息以实施干扰。

### 参 考 文 献

- [1] WANG Y Zh. Modern military optical technology [M]. Beijing Science Press 2003, 224~ 257 (in Chinese).
- [2] YAO B Q, WANG Y Zh, WANG Q. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Laser Technology* 2002, 26(3): 217~ 220 (in Chinese).
- [3] WAN Y, LAN G, SU X Zh *et al*. High energy output complex cavity

pump optical parametric oscillator in the mid infrared [J]. *Laser Technology* 2005, 29(4): 340~ 342 (in Chinese).

- [4] YUAN Y H, LIU S H, SUN Ch W *et al*. The researches of laser disturbance effects in IR system processing circuit [J]. *Laser Technology* 2002, 26(6): 432~ 434 (in Chinese).
- [5] SUZUKI K. Analysis of rising-sun reticle [J]. *Opt Engng* 1979, 18(3): 350~ 351.
- [6] SZU H H, KOPRIVA J, PERSN A. Independent component analysis approach to resolve the multi-source limitation of the rotating rising-sun reticle based optical trackers [J]. *Opt Commun* 2000, 176: 77~ 89.
- [7] YANG Y H, YUE M. Infrared system [M]. Beijing National Defence Industry Press 1985, 45~ 60 (in Chinese).
- [8] WU Ch L, CHEN X, QIU X H. Research of the photo-electric jammer's jamming principle [J]. *Journal of Xidian University* 1995, 22(3): 290~ 294 (in Chinese).
- [9] LI Sh X, WEI J Y. Analysis of infrared jammer's jamming principle [J]. *Infrared and Laser Technology* 1994, 23(1): 10~ 13 (in Chinese).
- [10] YIN D R. Analysis of reticle for IR guidance missile homing [J]. *Infrared and Laser Technology* 1995, 24(4): 47~ 51 (in Chinese).