

# 不锈钢微流道模具的激光熔覆成形

王续跃<sup>1</sup> 郭会茹<sup>1</sup> 吴勇波<sup>2</sup> 徐文骥<sup>1</sup> 郭东明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024  
<sup>2</sup> 秋田县立大学机械智能系统学部, 日本 秋田 015-0055)

**摘要** 采用 JK1002 型 Nd:YAG 激光器、同步送粉系统, 在塑胶模具钢 HPM75 基体上, 熔覆 316L 不锈钢粉末, 直接成形微流道模具。研究送粉量对熔覆道几何尺寸的影响, 研究稳定送粉状态下送粉量与激光功率组合对熔覆质量的影响。结果表明, 送粉量 1.5~2.5 g/min, 获得满足微流道模具几何尺寸要求的微细熔覆道; 激光功率 400 W 和送粉量 2.0 g/min 组合, 获得具有较好熔覆质量的微细熔覆道。采用 CAD-Mastercam 软件, 规划特定形状微流道模具的激光扫描成形路径, 采用优化的参数组合进行多层熔覆成形实验, 成形出致密、硬度 580 HV 的微细熔覆道, 经后续磨、铣削及少量抛光, 制作出高 0.1 mm, 宽 0.3 mm 的熔覆道, 满足工作技术要求的微流道模具样件, 制作 1 件模具总耗时 60~75 min。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆成形; 微流道模具; 熔覆质量; 制作效率

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0303001

## Laser Cladding Fabrication of Micro-Fluidic Channel Mold of Stainless Steel

Wang Xuyue<sup>1</sup> Guo Huiru<sup>1</sup> Wu Yongbo<sup>2</sup> Xu Wenji<sup>1</sup> Guo Dongming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechanical and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

<sup>2</sup> Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Akita Prefectural University,  
Akita 015-0055, Japan

**Abstract** Laser cladding on JK1002 Nd:YAG laser and the synchronous powder feeder are performed to fabricate micro-fluidic channels mold. Substrate material is HPM75 steel and clad powder is 316L stainless steel. Influences of the powder feed rate on clad layer geometrical dimensions and the combination of laser power and powder feed rate with stable state of powder feeding on clad quality are investigated. Results show that the range of 1.5~2.5 g/min of powder feed rate obtains micro clad layers which meet geometrical dimensions' requirement of micro-fluidic channel mold and combination parameters of laser power of 400 W and powder feed rate of 2.0 g/min make micro clad layer with good clad quality. Scanning paths of micro-fluidic channel mold with specific shape are planned by CAD-Mastercam software. Using optimum parameters combination, multilayer laser cladding experiment is carried out and a sample of micro-fluidic channels mold is fabricated with dense structure and hardness of 580 HV. A little milling and polishing makes the sample meet the requirement of mold. Sizes of the final sample are 0.1 mm in height and 0.3 mm in width. The mold fabricating time is 60~75 min totally.

**Key words** laser technique; laser cladding fabrication; micro-fluidic channel mold; clad quality; fabricating efficiency

**OCIS codes** 140.3390; 140.3530; 140.3580

## 1 引 言

微流控芯片以其高效、低耗、便携和集成等优点, 在生物化学、医疗和微机电系统(MEMS)等领域有着广阔的应用前景。现多采用聚合物, 使用微流道模具

通过模塑和热压等方法来实现大批量复制微流控芯片表面的关键结构——微流道, 以提高芯片制作效率, 降低制作成本。因此, 快速制作出高质量的微流道模具成为研究热点。目前制作微流道模具主要有

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(50975041)资助课题。

作者简介: 王续跃(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种加工和精密加工等方面的研究。

E-mail: wbzdd@dlut.edu.cn

MEMS 领域的硅干和湿法刻蚀等技术、光刻胶技术及金属 Ni 模具的光刻电铸注塑(LIGA)或紫外光刻电铸注塑(UV-LIGA)<sup>[1~3]</sup>工艺。这些方法可以制作出表面粗糙度值 0.051 μm,与目标图案偏差小于 3% 的模具,但总体上对仪器设备要求很高,制作工艺复杂,周期较长(大于 10 h)且成本较高。

激光熔覆成形技术是一种新型的材料成形工艺,可以快速成形出高致密和直接满足精度要求的复杂形状金属零件<sup>[4]</sup>。主要特点是:成形效率高、工艺过程简单、清洁环保。这为微流道模具的成形提供了技术基础<sup>[5]</sup>。目前大、中型尺寸零件较高质量直接熔覆成形的研究较多,Zhong 等<sup>[6]</sup>在保证 CO<sub>2</sub> 激光功率、送粉量和熔池温度等指标的稳定性满足制造要求条件下,直接成形出壁厚 3 mm 的太空望远镜准直器;王华明等<sup>[7]</sup>采用自主研发的“自由平面接触/动态密封/惰性气氛保护”激光快速成形成套工艺装备系统,直接成形出大型钛合金结构件。另外,刘继常等<sup>[8]</sup>采用 CO<sub>2</sub> 激光功率 300 W、光斑直径 0.2 mm 等较小工艺参数的配合,熔覆获得壁厚最小 0.4 mm 的薄壁结构,但一般激光器光斑都不小于 1 mm;Cai 等<sup>[9]</sup>采用最小光斑 20 μm 的光纤激光微细熔覆电子浆料成形出微加热器,但无法成形出较高性能的金属零件;郑凯宇等<sup>[10]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 小功率(小于 100 W)激光熔覆成形不锈钢(SU S304)薄小工件的孔隙现象。因此,利用现有激光熔覆成形系统(激光输出光斑较大,开环控制系统等),直接成形出几何尺寸较小(小于 1 mm)的高性能微流道模具成为重要研究课题。

为提高直接成形件质量,有论文介绍对激光熔覆与磨、铣等的复合成形技术研究,实现在每层截面沉积完后即用磨头或铣刀将其加工到所需精度,但仅用于一些较大尺寸模具件的直接成形<sup>[11~13]</sup>,小尺寸模具则因每层熔覆量偏小难以采用该方法成形。本课题组在激光加工微流道凹模<sup>[14,15]</sup>及激光熔覆成形制作微流道凸模的基础上,深入研究粉末颗粒以恒定速率均匀熔化成形,获得具有较好熔覆质量的小尺寸微流道模具,增加磨、铣削及少量抛光后处理,制作出满足工作技术要求的微流道模具样件。

## 2 实验原理

### 2.1 实验条件

激光熔覆成形系统由 1200 W 连续 Nd:YAG 激光器,3 轴数控(CNC)工作台,DSPF-3 型同步送粉器和同轴喷嘴组成,激光输出光斑直径 0.6~1 mm,载粉气体和保护气体均为高纯(99.999%) Ar 气。铣床是数控加工中心 Mazak VTC-160A。微流道模具基体材料为预硬高硬度镜面塑胶模具钢 HPM75,尺寸为 φ40 mm×5 mm,该模具钢具有热膨胀系数小、无磁性、高耐磨性、优异的镜面加工性能、良好的力学和材料性能。熔覆材料选用与基体材料性质较接近的 316L 不锈钢粉末,粒度大小为 60~90 μm。表 1 和表 2 分别是基体和熔覆材料的化学成分。图 1 为目标形状微流道模具图样,即模具工作技术要求,两端圆形凸起流道高 0.4 mm,直径 2 mm,其余流道高 0.1 mm,宽 0.3 mm,尺寸误差为±0.02 mm。

表 1 模具钢 HPM75 化学成分

Table 1 Chemical composition of HPM75 plastic mould steel %

| C         | Si   | Mn        | P    | S    | Cr      | Mo      | W       | V       | Al      |
|-----------|------|-----------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.65~0.75 | 0.80 | 14.5~16.0 | 0.04 | 0.03 | 2.0~2.5 | 0.5~0.8 | 0.5~0.8 | 1.5~2.0 | 2.7~3.3 |

表 2 316L 不锈钢粉末化学成分

Table 2 Chemical composition of 316L stainless steel powder %

| C    | Si  | Mn  | P     | S    | Cr        | Ni        | Mo      | Fe      |
|------|-----|-----|-------|------|-----------|-----------|---------|---------|
| 0.03 | 1.0 | 2.0 | 0.045 | 0.03 | 16.0~18.0 | 12.0~15.0 | 2.0~3.0 | Balance |

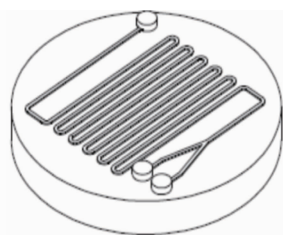


图 1 微流道模具图样

Fig. 1 Drawing of micro-fluidic channels mold

### 2.2 实验方案

微流道模具熔覆成形质量取决于激光与粉末材料相互作用的深入研究。激光功率和送粉量对熔覆道几何尺寸和熔覆质量影响较大。保持激光功率 400 W,在 1.5~3.5 g/min 范围内改变送粉量成形,获得满足微流道模具几何尺寸要求的微细熔覆道;激光功率 400~500 W 与送粉量 1.5~3.0 g/min 优化组合成形,获得熔覆质量较好的微细熔覆道。在一定

送粉量范围内,粉末颗粒需满足在各送粉环节均匀、稳定流动,并被激光均匀作用、稳定熔化,以获得满足几何尺寸要求的微细熔覆道。因此,确定粉末粒度为 $60\sim 90\ \mu\text{m}$ 。载粉气体、保护气体和激光扫描速度对熔覆道几何尺寸影响较小。试验时,载粉气体和保护气体压力及流量分别为 $0.2\ \text{MPa}$ , $5\ \text{L/min}$ 和 $0.1\ \text{MPa}$ , $15\ \text{L/min}$ ;扫描速度为 $500\ \text{mm/min}$ ;激光光斑直径为 $0.6\sim 1\ \text{mm}$ 。

激光与微流道模具材料相互作用,送粉量与激光功率搭配良好,在 $\text{Ar}$ 气气压充足可保证气体流量较稳定的情况下实验,即送粉状态稳定,保证单位时间内相同数量的粉末颗粒流入熔池;基础正交试验获得的优化参数组合激光功率 $400\ \text{W}$ 和扫描速度 $500\ \text{mm/min}$ ,保证相邻熔池间距合适,以获得尺寸均匀、温度稳定变化的熔池,均匀熔化的粉末颗粒紧密地填充熔池,最终获得具有致密组织的微细熔覆道。采用激光头电荷耦合器件(CCD)图像传感器检测熔覆道几何尺寸和VHX-600型超景深三维显微镜检测熔覆道表面形貌。

通过CAD-Mastercam软件生成图1所示微流道模具的激光扫描路径,采用优化的激光功率和送粉量组合直接熔覆成形该模具,模具两端圆形凸起流道以螺旋形扫描路径填充熔覆4层,其余流道熔覆2层,Z轴每层提升量 $0.21\ \text{mm}$ 与单层熔覆道高度精确相等,半径为 $0.7\ \text{mm}$ 的圆弧流道均采用圆弧插补扫描路径, $30^\circ$ 夹角Y型流道分叉处100%搭接。熔覆成形实验完成后,首先在平面磨床上将熔覆层厚度磨至 $0.1\ \text{mm}$ ;然后在铣床上对熔覆流道的两侧从上向下将横截面呈弧形的流道修正为矩形

流道,Z轴每次进给 $0.01\ \text{mm}$ ;最后对流道侧面进行形状修正,铣刀从侧面靠近流道,宽度方向(Y轴)每次进给 $0.01\ \text{mm}$ ,直到流道宽度达到要求。铣刀直径 $1\ \text{mm}$ ,主轴转速 $9000\ \text{r/min}$ 。用HV-50 A型显微硬度测量仪检测直接熔覆成形模具样件平行和垂直扫描速度方向的硬度值,用Zygo表面轮廓仪检测铣削后的模具表面质量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 送粉量对熔覆道几何尺寸的影响

表3为实验所得的送粉量对应的熔覆道几何尺寸,图2为相应的熔覆道表面形貌。由表3和图2可知,保持激光功率和扫描速度不变,即保持激光能量时空密度不变,熔覆道高度随送粉量增大,从 $0.13\sim 0.54\ \text{mm}$ 近线性增大;送粉量不大于 $2.5\ \text{g/min}$ ,熔覆质量较好,熔覆道宽度保持 $0.74\ \text{mm}$ ,送粉量小于 $2.5\ \text{g/min}$ ,高宽比较小;送粉量为 $1.5\sim 2.5\ \text{g/min}$ ,熔覆道几何尺寸与微流道模具要求的尺寸(高 $0.1\ \text{mm}$ ,宽 $0.3\ \text{mm}$ )相近,后续处理量较小,可用于作为制作模具的微细流道;送粉量大于 $2.5\ \text{g/min}$ ,高宽比都较大,不利于保证微流道模具尺寸。结果表明,送粉量不大于 $2.5\ \text{g/min}$ ,粉末颗粒都可以均匀被熔化,获得具有较好熔覆质量、几何尺寸均匀一致的微细熔覆道[如图2(a)~(c)所示],可用于直接成形微流道模具;当送粉量大于 $2.5\ \text{g/min}$ ,出现许多未熔颗粒[图2(d),(e)],将导致熔覆道生成气孔等缺陷,不利于多层熔覆成形。

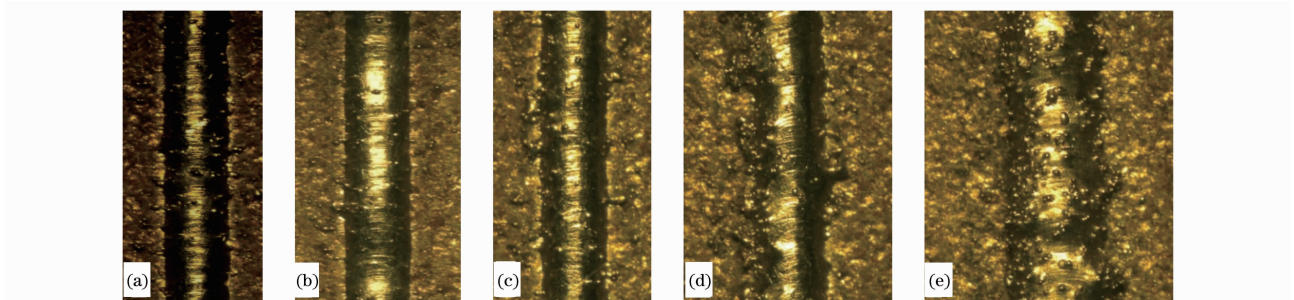


图2 送粉量对熔覆道表面的影响(25 $\times$ )

Fig. 2 Surface appearance of clad layers with different powder feed rates (25 $\times$ )

表3 送粉量对熔覆道几何尺寸的影响

Table 3 Geometrical dimensions of clad layers with different powder feed rates

| Fig. 2                    | (a)   | (b)   | (c)   | (d)   | (e)   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Powder feed rate /(g/min) | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   |
| Height /mm                | 0.18  | 0.21  | 0.42  | 0.46  | 0.54  |
| Width /mm                 | 0.73  | 0.74  | 0.75  | 0.79  | 0.84  |
| Height-width ratio        | 0.260 | 0.287 | 0.560 | 0.582 | 0.643 |

熔覆道的几何尺寸取决于平均单个粉末颗粒所吸收的能量,而平均单个粉末颗粒所吸收的能量反比于送粉量大小。假设单个粉末颗粒熔化所需要的激光能量为  $E_0$ , 分配到每个粉末颗粒上的平均能量为  $E_1$ 。送粉量较小时, 进入熔池内的粉末数量较少, 则  $E_1 \geq E_0$ , 进入熔池的粉末全部熔化, 形成质量均匀的熔覆道; 送粉量逐渐增大时, 进入熔池内的粉末逐渐增多,  $E_1$  逐渐减小, 当  $E_1 < E_0$  时, 多余的粉末不会再熔化, 而覆盖在已熔覆好的表面上, 此后, 熔覆道的几何尺寸基本保持不变。因此, 送粉量  $1.5 \sim 2.5 \text{ g/min}$ ,  $E_1 \geq E_0$  时, 粉末颗粒可被均匀地熔覆, 单层熔覆道的熔覆质量好、几何尺寸均匀一致且与微流道模具要求

的尺寸相近; 而送粉量大于  $2.5 \text{ g/min}$ ,  $E_1 < E_0$  时, 有未熔颗粒, 不能满足熔覆道要求。

### 3.2 送粉量与激光功率组合对熔覆质量的影响

保证单位时间内相同数量的粉末颗粒流入熔池, 即送粉状态稳定, 设计激光功率和送粉量的不同组合试验如表 4 所示。图 3 为各参数组合对应的熔覆道表面形貌。分析表明, 图 3 清楚显示熔覆道表面上有明显的波浪条纹, 每个熔覆道上的波浪条纹形状规整, 呈一定周期均匀分布, 这是移动的熔池在冷却过程中留下的痕迹, 说明熔池内粉末的熔化与流动过程呈稳定周期性变化。

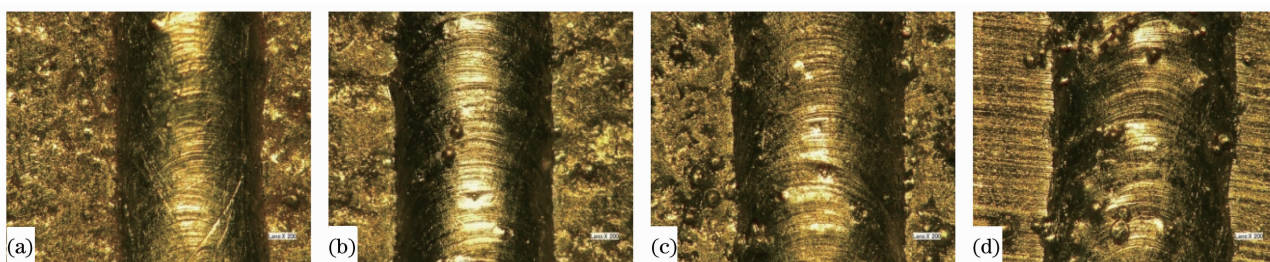


图 3 送粉量与激光功率组合对熔覆道表面的影响(50×)

Fig. 3 Surface appearance of clad layers with different combinations of laser power and powder feed rate (50×)

表 4 激光功率与送粉量组合试验及结果

Table 4 Experiments with combination of laser power and powder feed rate and results

| Fig. 3                    | (a)   | (b)   | (c)   | (d)   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Laser power /W            | 400   | 400   | 450   | 500   |
| Powder feed rate /(g/min) | 1.5   | 2.0   | 2.0   | 3.0   |
| Height /mm                | 0.18  | 0.21  | 0.34  | 0.50  |
| Width /mm                 | 0.73  | 0.74  | 0.79  | 0.85  |
| Height-width ratio        | 0.260 | 0.287 | 0.430 | 0.588 |

图 3(a)与(b)相比, 送粉量偏小, 粉末颗粒几乎全部熔化, 但由于送粉量不足, 熔池填充不完全, 几何尺寸整体均匀性不如图 3(b); 图 3(c)与(b)相比, 激光功率增大, 增加了熔化液相和可熔粉末颗粒的数量, 熔宽和熔高均稍有增大, 高宽比增大不明显, 且有熔化不完全的颗粒出现; 图 3(d)与(b)相比, 激光功率和送粉量都偏大, 熔覆道几何尺寸、高宽比都明显增大, 但由于熔化液相和可熔粉末颗粒数量过多, 熔池尺寸及熔池内的熔化过程不易控制, 出现许多未熔颗粒, 使熔覆道几何尺寸变得很不规整, 且可能生成气孔。图 3(b)中, 粉末颗粒基本全部均匀熔

化, 波纹状熔池被紧密地填充, 波纹间距适中、分布均匀, 熔覆道表面光整, 几何尺寸保持性较好, 熔覆质量较好, 为进行多层堆积熔覆成形打好基础。因此, 获得较好熔覆质量微细熔覆道的参数组合为: 激光功率  $400 \text{ W}$ , 送粉量  $2.0 \text{ g/min}$ 。

### 3.3 微流道模具制作

图 4(a)是总耗时  $3 \sim 5 \text{ min}$ (准备工作及成形试验)激光直接多层熔覆成形出的微流道模具样件, 其表面较光整, 整体尺寸均匀性较好。经测量, 圆形凸起流道高  $0.84 \text{ mm}$ , 其余流道平均尺寸高  $0.42 \text{ mm}$ , 宽  $0.75 \text{ mm}$ 。激光熔覆成形效率  $48 \sim 53 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。图 5 显示了样件的硬度分布, 熔覆层硬度在垂直和平行于扫描速度方向都均匀分布, 为  $580 \text{ HV}$ , 致密度有着很好的一致性, 与经热处理的基体模具钢成品硬度约小  $100 \text{ HV}$ , 与基体力学性能基本相近, 可满足模具工作性能的要求。图 4(b)为总耗时  $50 \sim 60 \text{ min}$ (装夹及实际加工)磨、铣削的微流道模具样件, 微流道几何尺寸均为高  $0.1 \text{ mm}$ , 宽  $0.3 \text{ mm}$ , 样件表面更加光整, 尺寸及形状精度都提高, 可满足微流道模具工作技术的要求。

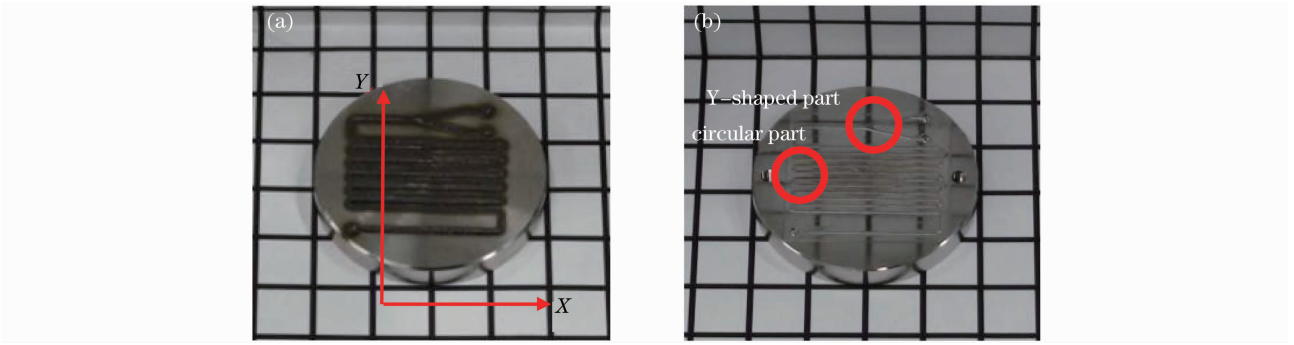


图 4 微流道模具样品实物照片。(a)激光直接熔覆成形,(b)铣削处理后

Fig. 4 Photos showing a sample of micro-fluidic channel mold. (a) direct fabricated by laser cladding forming, (b) after milling

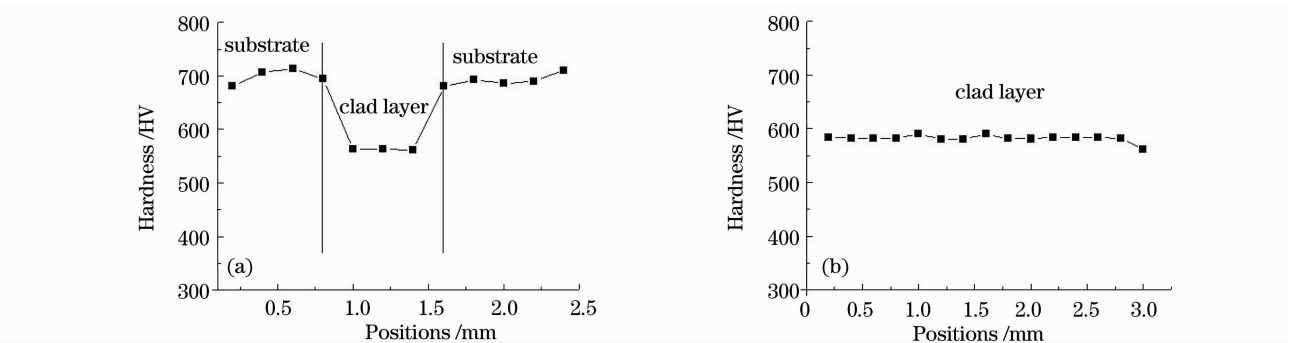


图 5 微流道模具样品硬度分布。(a)垂直于扫描速度方向(Y轴),(b)平行于扫描速度方向(X轴)

Fig. 5 Hardness distribution of the sample direct fabricated by laser cladding. (a) perpendicular (Y-axis), (b) parallel (X-axis) to scanning speed direction

### 3.4 样品评价

图 6 为成形模具样品磨、铣削后 Y 型和圆弧流道[如图 4(b)中所标]的表面质量检测图。30° 夹角 Y 型流道,因熔覆成形时分叉处 100% 搭接,直接成形表面高度略大,磨、铣削处理后,如图 6(a)显示 Y 型流道分叉处及其周围上表面质量均匀、一致,高 0.1 mm,宽 0.3 mm,边缘上毛刺经少许抛光即可去

掉。图 6(b)所示半径 0.7 mm 圆弧流道,虽以圆弧插补路径直接扫描成形,圆弧流道上表面质量亦均匀、一致,形状很规整,但边缘上毛刺较大。因此,采用较好的参数组合多层激光熔覆成形,可获得质量均匀、致密的特定形状微细熔覆道,经后续磨、铣削及少量抛光可提高熔覆道尺寸及形状精度,使其满足微流道模具工作要求。

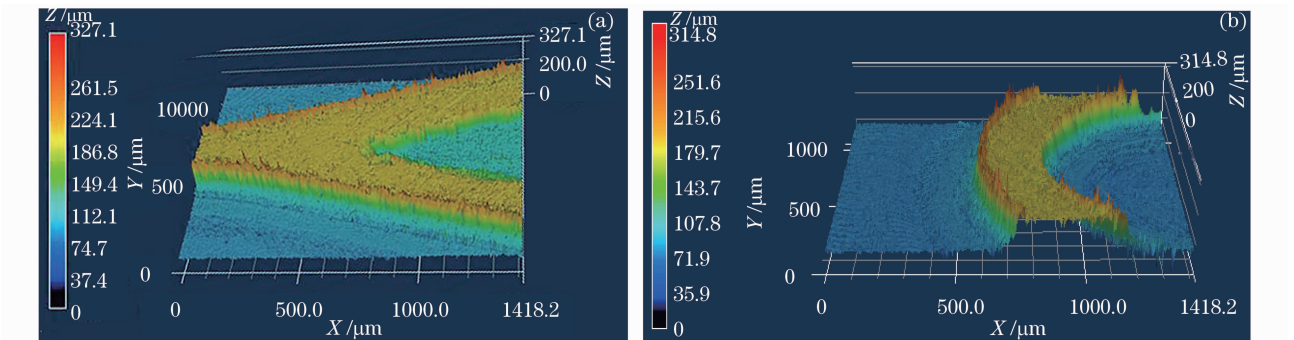


图 6 微流道模具样品磨、铣削后表面质量检测。(a) Y 型流道,(b)圆弧流道

Fig. 6 Surface quality detection of the sample after milling. (a) Y-shaped part, (b) circular part

## 4 结 论

1) 保持激光能量密度不变,选择送粉量 1.5~

2.5 g/min,制作出满足质量要求的微细熔覆道;实验研究得到较高质量微细熔覆道的参数组合为:激

光功率 400 W 和送粉量 2.0 g/min。

2) 稳定送粉状态下,激光多层熔覆,直接成形出致密、硬度 580 HV 的特定形状微流道模具样件,其平均几何尺寸为:圆形凸起流道高 0.84 mm,其余流道高 0.42 mm,宽 0.75 mm,满足微流道模具图样技术要求。

3) 经后续磨、铣削及少量抛光,微流道模具样件满足微流道高 0.1 mm,宽 0.3 mm 的尺寸及形状精度要求,制作 1 件模具总耗时 60~75 min,大大提高微流道模具的制作效率。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Feng, Zhang Hongyi, Zhou Yongliang. Fabrication of PDMS microfluidic chip by wet etching silicon[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(11): 194~198  
张 峰, 张宏毅, 周勇亮. 湿法腐蚀硅制作 PDMS 微流控芯片[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(11): 194~198
- 2 Luo Yi, Wang Xiaodong, Liu Chong *et al.*. A new method to fabricate metal hot embossing mould for microfluidic chip[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(17): 1505~1507  
罗 怡, 王晓东, 刘 冲等. 一种新型微流控芯片金属热压模具的制作工艺研究[J]. *中国机械工程*, 2005, **16**(17): 1505~1507
- 3 Xu Shujie, Duan Yugang, Ding Yucheng *et al.*. New method for rapid fabricating masters of PDMS-based microfluidic devices[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(6): 105~109  
徐书洁, 段玉岗, 丁玉成等. PDMS 微流控芯片复型模具的新型快速制作方法[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(6): 105~109
- 4 M. Zhong, W. Liu. Laser surface cladding: the state of the art and challenges[J]. *J. Mechanical Engineering Science*, 2010, **224**(5): 1041~1060
- 5 Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2010, **46**(14): 29~39  
宋建丽, 李永堂, 邓琦林等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, **46**(14): 29~39
- 6 Zhong Minlin, Liu Wenjin, Ning Guoqing *et al.*. Laser direct manufacturing of tungsten nickel collimation component[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2004, **147**(2): 167~173
- 7 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3204~3209  
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- 8 Liu Jichang, Li Lijun. Experimental study on fabrication of thin-wall metallic features by laser cladding [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(10): 185~188  
刘继常, 李力钧. 激光熔覆成形金属薄壁结构的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(10): 185~188
- 9 Cai Zhixiang, Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Fabrication of microheater by laser micro cladding electronic paste[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2009, **157**(1-3): 15~19
- 10 Kaiyu Cheng, Jehnming Lin. Study of the porosity phenomena in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3251~3255  
郑凯宇, 林震铭. 激光熔覆法的孔隙现象研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3251~3255
- 11 Jeng Jengywan, Lin Mingching. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2001, **110**(1): 98~103
- 12 Thomas Himmer, Eckhard Beyer. New development in surface technology and prototyping[C]. *SPIE*, 2002, **4831**: 468~474
- 13 Steffen Nowotny, Robert Muenster, Siegfried Scharek *et al.*. Integrated laser cell for combined laser cladding and milling[J]. *Assembly Automation*, 2010, **30**(1): 36~38
- 14 Wang Xuyue, Li Jianli, Hu Yafeng *et al.*. Laser milling of microfluidic grooves under vacuum condition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1138~1142  
王续跃, 李建丽, 胡亚峰等. 真空环境下微流道沟槽的激光铣削试验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1138~1142
- 15 Wang Xuyue, Lü Shusen, Hu Yafeng *et al.*. Experimental study on laser milling of micro channel groove[J]. *Acta Armamentaria*, 2010, **31**(5): 592~597  
王续跃, 吕书森, 胡亚峰等. 模具钢微流道沟槽的激光铣削试验研究[J]. *兵工学报*, 2010, **31**(5): 592~597