

文章编号 1004-924X(2012)08-1811-13

飞秒激光切割与微细电阻滑焊组合 制备三维金属微结构

徐 斌¹, 伍晓宇^{1*}, 凌世全¹, 吴世云¹, 罗 烽¹, 杜晨林², 孙秀泉²

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060;

2. 深圳大学 电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要:提出了一种采用飞秒激光切割结合微细电阻滑焊制备 3D 金属微结构的工艺方法(微型化双工位金属箔叠层制造法, (Micro-DLOM)), 并通过制备具有复杂形状的 3D 微型腔模具验证了该工艺方法的可行性。首先, 以厚度为 10 μm 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔为基材, 在 110 mW 的飞秒激光功率、100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的切割速度和 0.75 μm 的切割补偿量下获得二维微结构, 并分析了激光功率和切割速度对切割精度的影响; 然后, 利用微细电阻滑焊对多层二维微结构进行热扩散焊接, 通过多层二维微结构的叠加拟合形成具有曲面特征的微型腔, 并对焊接区进行了 X 射线衍射 (XRD) 分析。分析发现: 微细电阻滑焊所产生的热量仅使焊接区主要物相的相对含量发生了变化, 而没有使该区域产生新的物相。与 UV-LIGA 工艺相比, 本工艺可以加工具有自由曲面特征的三维微结构, 并且单层箔越薄, 成形精度越高; 与飞秒激光分层平面扫描烧蚀工艺相比, 本工艺仅需切割每层二维结构的轮廓, 提高了成形效率; 与微细电火花加工工艺相比, 虽然所成形的微型腔表面粗糙度相对较差, 但却省去了制备微电极的工艺步骤, 并且不存在微电极工作过程中的损耗问题, 所以可以加工深宽比不受限制的微模具。

关键词:三维金属微结构; DLOM; 微细电阻焊; 飞秒激光切割

中图分类号: TG661 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1811

Fabrication of 3D metal micro-structure based on fs laser cutting and micro electric resistance slip welding

XU Bin¹, WU Xiao-yu^{1*}, LING Shi-quan¹, WU Shi-yun¹, LUO Feng¹, DU Chen-lin², SUN Xiu-quan²

(1. Shenzhen Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Mold & Die, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060 China)

* Corresponding author, E-mail: wuxy@szu.edu.cn

Abstract: On the basis of femtosecond laser cutting and micro electric resistance slip welding, a forming process named Micro Double-staged Laminated Object Manufacturing (Micro-DLOM) was proposed to fabricate a complex 3D micro-structure, and the feasibility of the forming process was demonstrated by fabrication of a complex 3D micro-cavity mold. Firstly, 0Cr18Ni9 stainless steel foils with

收稿日期: 2012-04-11; 修订日期: 2012-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175348); 深港创新圈计划资助项目 (No. ZYB200907090135A); 广东省教育厅重点实验室开放基金资助项目 (No. 201002)

the thickness of $10\ \mu\text{m}$ were cut by a femtosecond laser to get a 2D microstructure under a femtosecond laser power of $110\ \text{mW}$, a cutting speed of $0.1\ \text{mm/s}$ and the cutting compensation quantity of $0.75\ \mu\text{m}$. Then, the influence of laser power, cutting speed on cutting precision was analysed, and the foils were welded together to get the 3D microstructure. For further study, the weld-zone was analysed by X-ray Diffractometry (XRD) and it was found that the phase of weld zone has not been changed but the content of phase changed. Compared with UV-LIGA, the Micro-DLOM can fabricate the 3D micro-structure with a free-form surface and the unrestricted ratio of depth to width. Moreover, the thinner the stainless steel foils the, the higher the processing accuracy is. Compared with femtosecond laser ablation, the Micro-DLOM only needs to cut every layer's outline and has a higher forming efficiency. Compared with micro-EDM, the 3D micro-structure fabricated by Micro-DLOM has a large surface roughness, but it needs not fabricate different microelectrode faces and can fabricate the 3D micro-structure with unrestricted ratio of depth to width.

Key words: 3D metal micro-structure; Double-staged Laminated Object Manufacturing(DLOM); micro resistance welding; femtosecond laser cutting

1 引言

微型制件已在微电子、微机械、精密仪器及生物医学等领域得到成功应用。由于微型制件的结构尺寸微小,重量极轻,并且其尺寸精度在微米量级以上,因此很难用普通加工方法成形。随着各国学者对该领域的研究,出现了一系列面向微型制件的现代制造技术:UV-LIGA 技术^[1]、深反应离子蚀刻技术(DRIE)^[2]和 3D-UV 光刻技术^[3-4]。上述技术中以 UV-LIGA 技术最有代表性和应用前景^[5-13]。UV-LIGA 技术主要由曝光、显影、电铸和去胶组成,由于其特定的曝光方式使得该技术通常情况下只能制作含有直壁特征的二维半微结构,难以制作含有复杂结构特征的微结构。因此,突破 UV-LIGA 的技术瓶颈是近年来研究者努力的方向,文献[14-20]已做了大量有意义的工作。

为获得三维微结构, Y. K. Yoon 等对 UV-LIGA 工艺进行了部分改进,采用透明垫反向曝光、斜向曝光的多向曝光方式获得了三维微结构^[14]。由于该工艺中特定的曝光方向,使其仅能获得特定的三维微结构,难以制备具有任意形状的微结构。Manuel Pfeiffer 等人利用飞秒激光分层平面扫描烧蚀工艺,在硬质合金和不锈钢板上蚀刻出了深度为 $100\ \mu\text{m}$ 的三维微结构^[15]。在该工艺方法中,飞秒激光在硬质合金板上获得了较为理想的微结构,在不锈钢板上的加工效果则较

差。由于该工艺每层都进行大面积逐行扫描蚀刻来获得微结构,因此加工时间较长。文献[16]则采用 UV-LIGA 和微细电火花加工技术相结合制备出了局部为梯形凸台和锥形凹槽的三维金属微结构,其微结构的表面粗糙度达 $0.08\ \mu\text{m}$ 。

微细电火花加工技术对于解决 UV-LIGA 的技术瓶颈做出了贡献。为获取复杂的三维曲面微结构,哈尔滨工业大学的赵万生、王振龙等以快速成型制造中分层制造原理为基础,运用微细电火花放电加工技术制备出了具有三维曲面特征的微结构^[17-18];为提高微细电火花加工的效率,达到工业化运用的目的,清华大学的李勇等提出了三维微细电火花伺服扫描加工方法,并运用该方法在铜板上加工出了深度为 $300\ \mu\text{m}$ 的三维微结构^[19];为了获得大深径比的微孔结构,大连理工大学的贾振元等研发了一台用于快速加工大深径比微小孔的电火花机床,并通过该机床加工出了深径比超过 10,直径为 $60\sim 200\ \mu\text{m}$ 的微小孔^[20],但是该技术要针对不同尺寸的零件制作不同微细电极,而微细电极的制备较困难并且在电火花加工的过程中始终存在微细电极损耗,使得该技术不易获得大深宽比的微结构。

本文在上述研究基础上,提出了采用飞秒激光切割结合微细电阻滑焊来制备三维金属微结构^[21-22]。即先通过飞秒激光切割 0Cr18Ni9 不锈钢箔获得二维金属微结构,然后通过电阻滑焊将多层二维微结构叠加从而获得三维金属微结构。

2 制作工艺

2.1 制作工艺

飞秒激光切割结合微细电阻滑焊制备三维金属微结构的工艺过程主要包括:(1)通过三维建模软件对所需要的三维微结构进行建模,并通过切片软件将三维微结构模型进行逐层切片,获得每层二维结构的轮廓数据。(2)依照每层轮廓数据,

飞秒激光在 0Cr18Ni9 不锈钢箔上进行切割获得二维金属微结构。(3)通过微细电阻滑焊的多次放电将多层二维金属微结构进行热扩散焊接,最终获得三维金属微结构。该工艺是以分层实体制造工艺(LOM)为基础,分为飞秒激光切割和电阻滑焊两个工位,因此本文将其命名为微型化双工位金属箔叠层制造方法(Micro Double-staged Laminated Object Manufacturing, Micro-DLOM)。Micro-DLOM 的实验装置如图 1 所示。

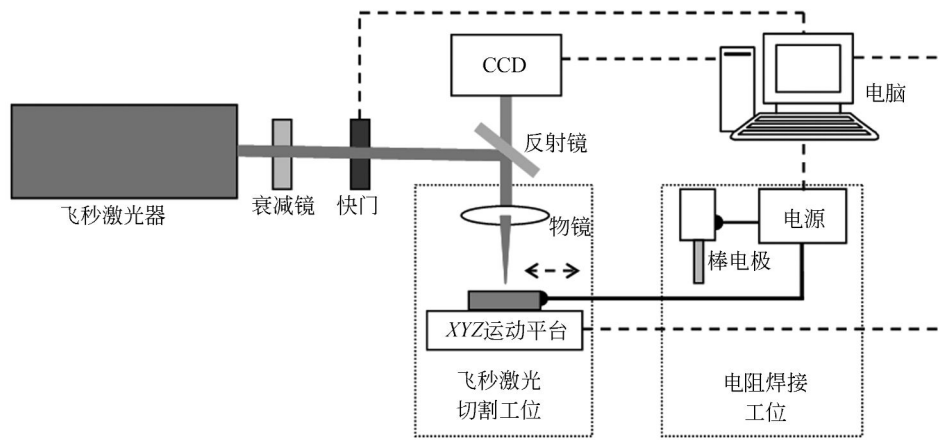


图 1 Micro-DLOM 实验装置
Fig.1 Schematic setup of Micro-DLOM

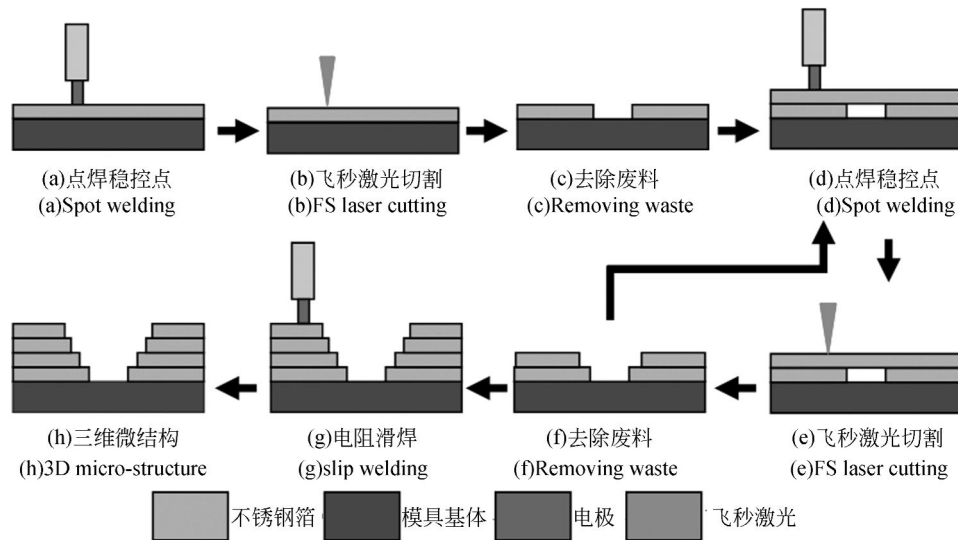


图 2 Micro-DLOM 工艺过程
Fig.2 Technological process of Micro-DLOM

Micro-DLOM 的具体工艺过程如图 2 所示:
(1)将模具基体安装于工作台夹具上,然后将工作

台移动至电阻焊工位。在电阻焊工位通过点焊 8 个稳控点将钢箔固定在模具基体上,稳控点应尽

量靠近飞秒激光切割的边缘,目的在于防止钢箔的水平窜动,提高水平尺寸精度(图 2(a));(2)将工作台移至飞秒激光工位,由聚焦后的飞秒激光束切割不锈钢箔,获得单层二维金属微结构(图 2(b))。(3)通过胶带将飞秒激光切割所产生的废料粘除,而后钢箔和模具基体下降一个步距(图 2(c))。该步距主要是由钢箔的厚度和钢箔之间的间隙所决定,考虑到钢箔的厚度为 $10\ \mu\text{m}$,各层钢箔之间的间隙均值为 $10\ \mu\text{m}$,因此该步距设为 $20\ \mu\text{m}$ 。(4)钢箔和模具基体移动至电阻焊工位并重复上述工艺过程(图 2(e)和图 2(f)),逐渐获得初步叠层的三维微结构。(5)将初步叠层获得的三维微结构再次移动至电阻焊工位(图 2(g)),利用微细电阻滑焊的多次放电将其进行焊接,最终实现钢箔之间的完全连接(图 2(h))。上述工艺将多层二维微结构进行近似叠加拟合,从而获得所需的三维金属微结构。与 UV-LIGA 工艺相比, Micro-DLOM 工艺可以加工出深宽比不受限制、具有复杂结构形式的微结构,并且单层钢箔越薄,成形精度也就越高;与用飞秒激光进行分层大面积逐行扫描烧蚀工艺相比,仅需切割每层二维结构的轮廓,成形效率大为提高。

2.2 Micro-DLOM 的原理误差分析

Micro-DLOM 是将多层二维微结构进行近似叠加拟合,从而获得所需的三维金属微结构,因此该工艺存在一个原理误差,也就是台阶效应。由于本文所制备的对象为微型腔模具,因此以图 3 所示的模型为例,对 Micro-DLOM 的原理误差进行计算。如图 3 所示, d 为相邻钢箔在水平方向上的尺寸差, h 为钢箔厚度, α 为微型腔相对于垂直方向的张角, δ 为 Micro-DLOM 原理误差。应用三角函数,可得到 δ 的数学表达式。对 δ 的数学表达式进行分析可以知道:在 $0\sim 90^\circ$ 内, α 越

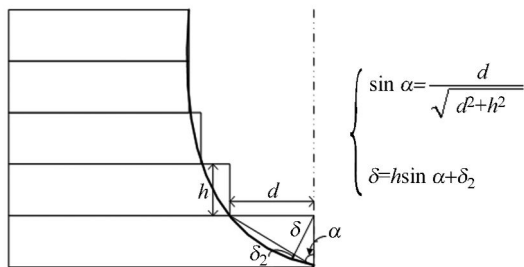


图 3 Micro-DLOM 的原理加工误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of principle error to Micro-DLOM

小, Micro-DLOM 的原理误差 δ 越小;钢箔的厚度越小,其原理误差 δ 也越小。以本文图 12 和 13 的制作实例中的圆形微型腔为例,计算其原理误差 δ ,计算发现:随着钢箔高度位置的不同,所计算出来的圆形微型腔最大原理误差为 $2.14\ \mu\text{m}$,最小原理误差为 $0.99\ \mu\text{m}$ 。如果使用厚度为 $5\ \mu\text{m}$ 甚至更薄的不锈钢箔来制备微型腔模具,则可将 Micro-DLOM 原理误差大幅减小,但这会以牺牲成形效率为代价。

3 实验与结果

3.1 实验设备

飞秒激光器采用的是美国 COHERENT 公司生产的掺钛蓝宝石飞秒激光器,振荡级型号为 Mira900,放大级型号为 RegA9000,飞秒激光器最大能量为 $4\ \mu\text{J}$,脉宽为 $200\ \text{fs}$,中心波长为 $800\ \text{nm}$,脉冲重复频率为 $250\ \text{kHz}$;微型电阻焊机采用深圳韦伯特光电设备有限公司生产的 UF25B 型逆变式直流电阻焊机,其焊接电压为 $0.2\sim 5\ \text{V}$;XYZ 运动平台为德国 PI 公司生产的高精密微纳米运动平台,型号为 M511. DD,其运动精度为 $0.2\ \mu\text{m}$;实验材料为德国 Pincog 公司生产的 0Cr18Ni9 不锈钢箔,其厚度为 $10\ \mu\text{m}$;采用日本 KEYENCE 公司生产的 VHX-1000 大景深体式显微镜扫描微结构的三维轮廓并测量微结构的高度尺寸,该显微镜的扫描精度为 $1\ \mu\text{m}$;采用日本 JEOL 公司生产的 JSM6490 扫描电子显微镜观察微结构的表面形貌并测量微结构的水平尺寸。

3.2 不锈钢箔的飞秒激光切割

图 4 展示了不锈钢箔被普通的 YAG 激光器、皮秒激光器以及飞秒激光器切割后的 SEM 图。从图 4 中可以清晰地看出:110 W 普通 YAG 激光器切割后的不锈钢箔边缘极不规则,有明显的热影响区,并且切割边缘附近有裂缝出现(图 4(a)),这种现象会极大地影响零件的尺寸精度和机械强度;2 W 皮秒激光切割后的不锈钢箔边缘较为规则,但是由于切割过程中热影响的作用,导致其切割边缘有凸起结构(图 4(b)),这种现象会影响到单层图形的切割精度;500 mW 飞秒激光切割后不锈钢箔的边缘形状较规则,并且切割边缘几乎看不到热影响区(图 4(c))。因此,和普通

的 YAG 激光器、皮秒激光器相比,飞秒激光切割不锈钢箔的效果最好。文献[23]中报道了 500 mW 飞秒激光切割 20 μm 厚的 0Cr18Ni9 不锈钢箔的过程中所产生的热量没有改变不锈钢箔的金

像组织和晶粒大小,从而很好地保证了原材料的机械性能。因此,考虑 Micro-DLOM 工艺中单层微结构机械性能以及切割精度,本文选用飞秒激光器作为切割工具。

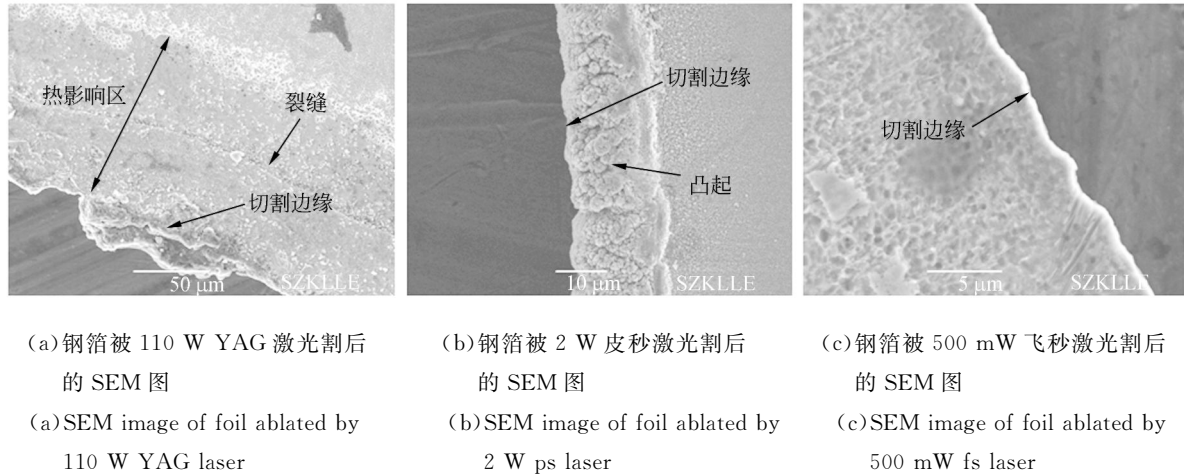
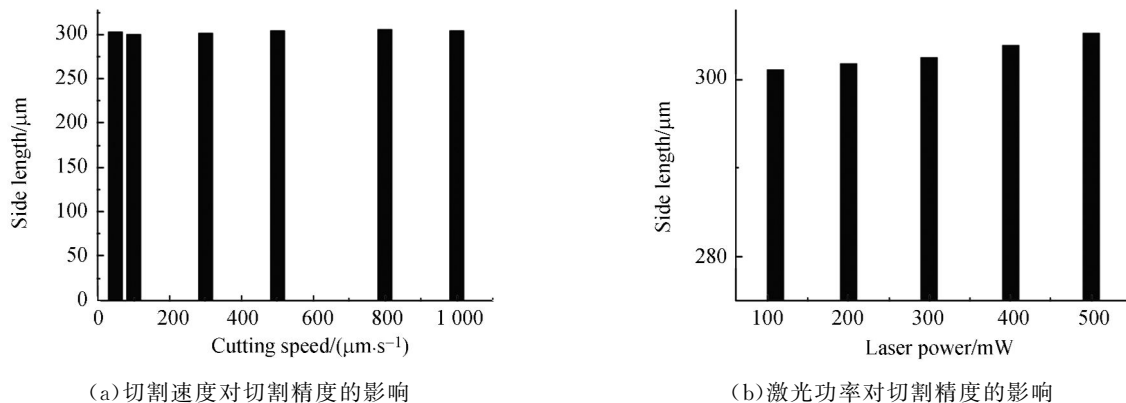


图 4 不同激光切割后不锈钢箔的微观组织观察

Fig. 4 Microstructure of stainless steel foils ablated by different lasers

在 Micro-DLOM 工艺中,单层二维微结构主要是通过机械平台的插补运动和飞秒激光的烧蚀获得。因此机械平台的运动误差和飞秒激光的切割误差对于单层微结构的切割精度具有重要的影响。由于机械平台的运动误差为 0.2 μm ,因此飞秒激光切割对单层微结构尺寸精度的影响是本文考虑的重点。影响飞秒激光切割精度的因素主要有两个:飞秒激光功率和切割速度。为考察切割速度对于飞秒激光切割精度的影响,本文采用 10 μm 厚的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行微切割实验。将飞秒激光功率设为 200 mW,切割 300 μm \times 300 μm 的方孔试样,切割速度分别为 1 000、800、

500、300、100 和 50 $\mu\text{m}/\text{s}$,切割后的试样通过光学显微镜观察其切割边缘形貌并测量其尺寸,测量结果如图 5(a)所示。由测量结果可以知道,切割速度从 1 000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 降至 50 $\mu\text{m}/\text{s}$,方孔的边长尺寸变化不大。但是,对其切割边缘的形貌进行观察可以发现:切割速度为 1 000、800、500 以及 300 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,切割边缘会出现锯齿形结构。对于这种现象分析认为,当切割速度过大时,机械平台会产生轻微的振动,这种振动会导致切割边缘的锯齿形结构。因此,考虑切割质量以及加工效率,本文将飞秒激光的切割速度设为 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。



(a) Relation between cutting precision and cutting speed (b) Relation between cutting precision and laser power

图 5 激光功率和切割速度对切割精度的影响

Fig. 5 Relation between cutting precision and laser power, cutting speed

为考察激光功率对于切割精度的影响,采用相同厚度的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行切割实验,切割速度为 $100 \mu\text{m}/\text{s}$,功率分别设置为 500、400、300、200 和 110 mW(当功率小于 110 mW 时,钢箔很难一次切透,因此将最小的实验功率设为 110 mW)的情况下切割 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的方孔,切割后的试样通过光学显微镜观察其切割边

缘形貌并测量其尺寸,测量结果如图 5(b)所示。通过测量结果发现,随着飞秒激光功率的增加,方孔的尺寸由 $301 \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $305.2 \mu\text{m}$ 。这说明随着激光功率的增加,激光光斑对钢箔的烧蚀逐渐加宽,从而导致切割精度逐渐降低。因此出于对切割精度的考虑,本文将飞秒激光的功率设为 110 mW。

表 1 补偿前后的切割精度对比

Tab.1 Cutting precision with/without compensation

(μm)

编号	补偿前				补偿后			
	边长 1	误差 1	边长 2	误差 2	边长 1	误差 1	边长 2	误差 2
1	301.7	1.7	300.3	0.3	301	1	301	1
2	301	1	302.4	2.4	300.3	0.3	300.3	0.3
3	301.7	1.7	301.7	1.7	299.6	0.4	301	1
4	299.7	0.3	301.7	1.7	300.4	0.4	300.4	0.1
5	302.5	2.5	302.6	2.6	300.3	0.3	301	1
6	298.9	1.1	299.6	0.4	300.3	0.3	299.6	0.4
7	301	1	301.7	1.7	301	1	300.3	0.3
8	303.1	3.1	302.4	2.4	301	1	300.3	0.3
9	301	1	301.7	1.7	301	1	301	1
10	301	1	302.4	2.4	300.3	0.3	300.7	0.7
平均值	301.16	1.44	301.65	1.73	300.52	0.6	300.56	0.64

为考察该激光切割参数的稳定性,本文使用该工艺参数切割了 10 个 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的方孔对方孔尺寸进行了测量,测量结果如表 1 所示。采用该工艺参数进行切割的方孔其最大误差为 $3.1 \mu\text{m}$,最小误差为 $0.3 \mu\text{m}$,平均误差近似为 $1.5 \mu\text{m}$,并且所获得的方孔尺寸基本上比设计尺寸大。造成上述误差的原因是:采用飞秒激光切割二维图形时,由于激光光斑也有一定的尺寸,因此造成了所获得的二维图形尺寸比设计尺寸要大。根据上述测量结果,方孔的平均误差近似为 $1.5 \mu\text{m}$,因此可以推断激光光斑的半径值为 $0.75 \mu\text{m}$ 。为了获取更高的切割精度,将切割光斑视为加工刀具,采用与数控切削加工中刀具半径补偿类似的方法对二维图形的尺寸进行补偿,切割补偿量为激光光斑的半径值。对补偿后切割的方孔进行测量发现,方孔的最大误差为 $1 \mu\text{m}$,最小误差为 $0.3 \mu\text{m}$,平均误差约为 $0.6 \mu\text{m}$ 。通过补偿前后的实验数据对比可以知道,在 110 mW 的激光功率、 $100 \mu\text{m}/\text{s}$ 的切割速度以及切割补偿量为 $0.75 \mu\text{m}$ 的工艺参数下,飞秒激光的切割精度可

达 $1 \mu\text{m}$ 。通过上述分析可以知道,飞秒激光的光斑直径为 $1.5 \mu\text{m}$,其加工效果相当于直径为 $1.5 \mu\text{m}$ 的微细电极,因此与使用直径相对较大的微电极相比,运用飞秒激光烧蚀微结构(特别存在尖角或较小圆角过渡的微结构)具有较高的尺寸精度。与微细电火花工艺相比,本工艺现阶段虽然表面粗糙度相对较差,但飞秒激光烧蚀不存在微细电极的损耗问题,Micro-DLOM 工艺可加工出深宽比不受限制的微结构。

3.3 微型腔的滑焊

采用 5 层 $10 \mu\text{m}$ 厚的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行实验,制备一组高度尺寸为 $50 \mu\text{m}$ 的微型腔。首先依前文图 2(a)至图 2(f)的工艺路线初步叠层出一组三维微型腔试样,然后进行高度测量,测量结果如图 6 所示。初步叠层的三维微型腔的最大高度为 $93.33 \mu\text{m}$,最小高度为 $65.79 \mu\text{m}$,远大于设计高度。造成上述误差的原因是:在飞秒激光切割之前仅对微型腔的各层钢箔点焊了 8 个稳控点(如图 7 所示),其目的是防止钢箔的水平窜动,以保证切割精度,但这 8 个稳控点不可能实现

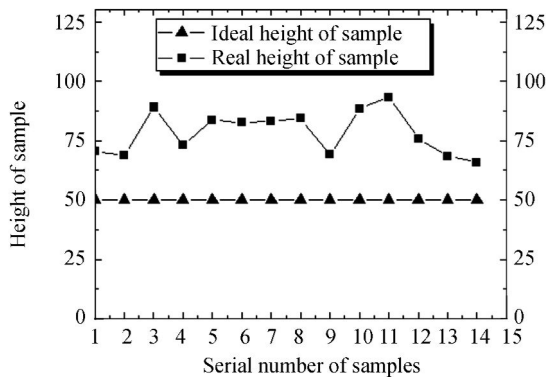


图 6 初步叠层获得的三维微型腔高度

Fig. 6 Height of initial laminated 3D micro-mould cavity

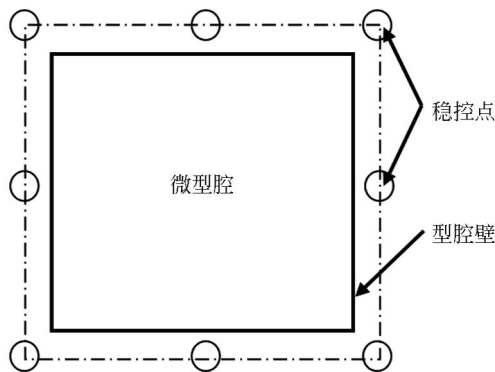


图 7 微型腔稳控点示意图

Fig. 7 Schematic diagram of stability control weld spots

整个微型腔实体区域范围内、不锈钢箔之间的完全连接,因此各层不锈钢箔之间不可避免地会存在间隙,而这种间隙是造成上述误差的主要原因。为了保证微型腔高度方向上的尺寸精度,需要继续依前文图 2(g)至图 2(h)的工艺路线将初步叠层的微型腔再次移至电阻焊工位,通过电阻滑焊的方式消除不锈钢箔之间的间隙。

本文所采用的滑焊工艺与传统的电阻焊工艺中的缝焊类似,缝焊工艺通过圆盘形电极的滚动以及数千安培的焊接电流作用下完成较厚钢板的焊接,而滑焊则是通过细微棒电极的滑动完成钢箔的连接。在滑焊过程中,当焊接电流过大时,焊接件之间会形成熔核,并且在熔核的周围会产生严重变形,这种变形会大大地影响焊接件高度方向上的尺寸精度。所以,在 Micro-DLOM 工艺中,为了保证微型腔高度方向上的尺寸精度,要避免熔核的产生。通过上述分析,本文所采用的焊接方式为:在尽量小的焊接电流作用下,通过细微棒电极的多次放电滑焊、以热扩散的方式完成不锈钢箔之间连接。滑焊实验的装置简图如图 8 所示。

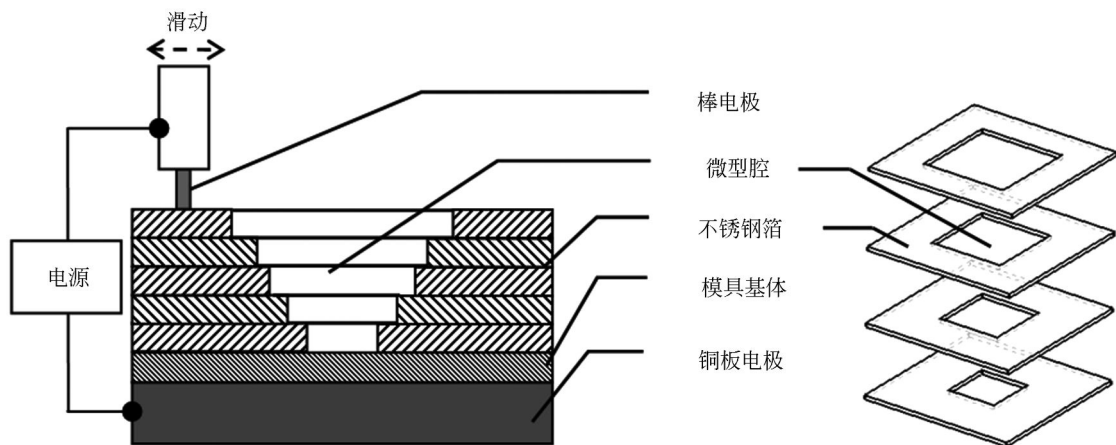


图 8 滑焊实验的装置简图

Fig. 8 Schematic diagram of slip welding

滑焊工艺参数包括焊接电压、焊接压强、预压时间、放电时间、冷却时间以及放电次数。焊接电压是指在焊接过程中,棒电极和铜板电极之间所施加的电压,焊接电压越大,焊接电流就越大,也就越容易形成熔核。因此,焊接电压应越小越好,

并将该值设为 0.21 V(低于这一电压很难形成牢固连接);焊接压强是棒电极压紧微型腔时的压强,过小的焊接压强会使焊接过程产生打火现象,而过大的焊接压强则会导致微型腔变形,通过实验将焊接压强确定为 0.2 MPa;放电时间为棒电

极放电一次的时间,放电时间越大,越容易形成熔核,通过实验将其确定为 10 ms;预压时间是指从棒电极压紧微型腔到棒电极开始放电的时间,而冷却时间则是棒电极放电的间隔时间,这两个参数对滑焊工艺的影响不大,因此分别将其设为 100 ms 和 10 ms;放电次数是棒电极焊接一次电阻焊机施加的电脉冲的个数,在上述参数设定的情况下,该值对滑焊的影响最大。为获得合适的放电次数,本文在其它工艺参数确定的前提下,采用不同的放电次数对微型腔进行了焊接,实验结果如图 9 所示。

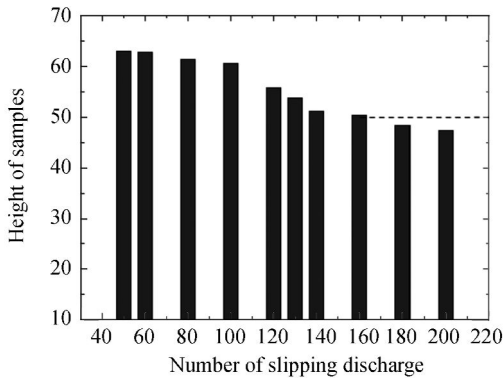


图 9 微型腔高度随滑焊放电次数的变化

Fig. 9 Variation of micro cavity heights with different numbers of slip welding discharge

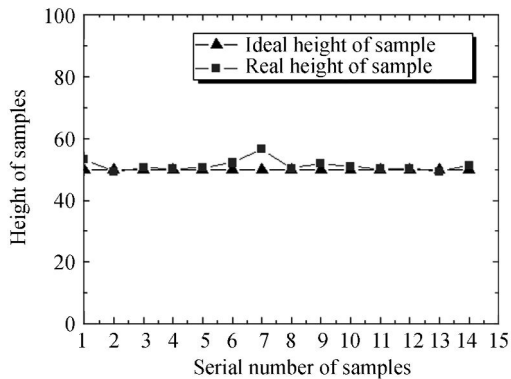


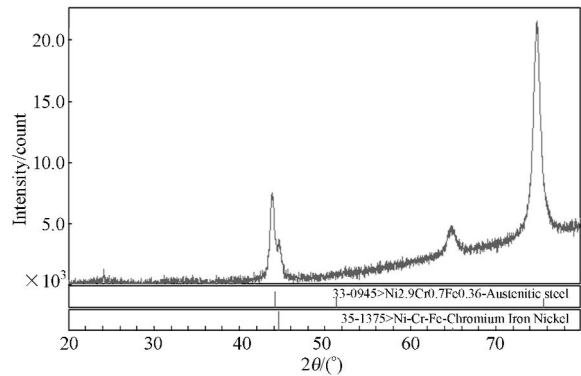
图 10 经 160 次的放电焊接后的微型腔高度

Fig. 10 Micro cavity heights after 160 slip welding discharge

通过实验结果可以知道,随着放电次数的增加,微型腔的高度由 50 次时的 $63.57 \mu\text{m}$ 逐渐变为 200 次时的 $47.34 \mu\text{m}$ 。对上述实验结果分析认为:在滑焊工艺中,由于焊接电压较小,焊接所产生的热量也较小。但随着放电次数的增加,焊接所产生的热量得到逐渐累积,并且逐渐累积的

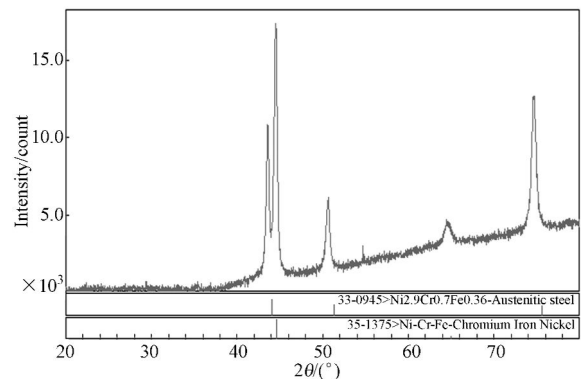
热量使不锈钢箔之间通过热扩散焊接方式进行连接,不锈钢箔之间的间隙也被逐渐消除。由图 9 还可以知道:放电次数约为 160 次时,可以获得最接近设计尺寸的微型腔垂直高度 ($50.41 \mu\text{m}$)。为了验证该焊接参数的稳定性,本文对 14 个初步叠层的微型腔试样进行 160 次的放电滑焊并对焊接后的微型腔高度进行测量,测量结果如图 10 所示。实验结果证明:除 1# 和 7# 试样的误差较大外,其余 12 个试样在 160 次的放电次数下均获得了较为理想的高度尺寸 ($49.33 \sim 52.22 \mu\text{m}$)。

材料的宏观机械性能主要是由其微观组织决定,为了考察滑焊工艺对微型腔微观组织的影响,对 0Cr18Ni9 不锈钢箔原材料和焊接后的微型腔试样的断面分别做 XRD 测试。如图 11(a)所示,原材料的主要物相为 $\text{Ni}_{12.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$ 奥氏体和 Ni-Cr-Fe 合金;焊接后,微型腔焊接区域的主要物相没有发生变化,如图 11(b)所示,仍为 $\text{Ni}_{12.9}$



(a) 原材料的 XRD 图谱

(a) XRD test of original materials



(b) 微型腔焊接断面的 XRD 图谱

(b) XRD test of micro cavity section

图 11 焊接区 XRD 分析

Fig. 11 XRD test of welded zone

Cr_{0.7}Fe_{0.36} 奥氏体和 Ni-Cr-Fe 合金。根据每种物相的 X 光衍射强度可以计算出物相的相对含量,计算结果如表 2 所示。由表 2 的数据可以知道,焊接前后各物相的相对含量发生了变化: Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36} 奥氏体含量由焊接前的 99.42% 变为焊接后的 92.8%; Ni-Cr-Fe 合金由焊接前的

0.58% 变为焊接后 7.2%。对于上述测试结果分析认为:滑焊的多次放电所产生的热量导致了试样主要物相含量发生了变化,但该热量没有使焊接区域有新的物相产生。因此可以推断:通过滑焊可以在保证微型腔机械性能的情况下以热扩散焊的方式实现各层不锈钢箔之间的有效连接。

表 2 焊接区 XRD 数据分析

Tab. 2 XRD data analysis of welded zone

	物相	PDF 卡号	RIR 值	光强	相对质量分数/(%)
焊接前	Ni _{2.9} Cr _{0.7} Fe _{0.36}	# 33-0945	8.89	17 458	99.42
	Ni-Cr-Fe	# 35-1375	10.76	2 266	0.58
焊接后	Ni _{2.9} Cr _{0.7} Fe _{0.36}	# 33-0945	8.89	8 600	92.8
	Ni-Cr-Fe	# 35-1375	10.76	14 836	7.2

3.4 微型腔的制备

为验证 Micro-DLOM 工艺的可行性,本文设计了水平图形为方形、圆形和半月形的微型腔模具作为加工对象,3 个试样在高度方向具有自由曲面特征,其中方形和圆形试样以其几何中心为基准向外均匀扩展,而半月形试样设计了不均匀的

扩展方式,其左侧相对右侧扩展较小,如图 12 所示。各试样沿微型腔高度方向,其水平设计尺寸逐渐扩大:方形试样底端边长为 200 μm,顶端边长为 256 μm;圆形试样底端半径为 150 μm,顶端半径为 166.5 μm;半月形试样则是以圆形试样为基础变化而来的。所有试样的设计高度均为 50 μm。

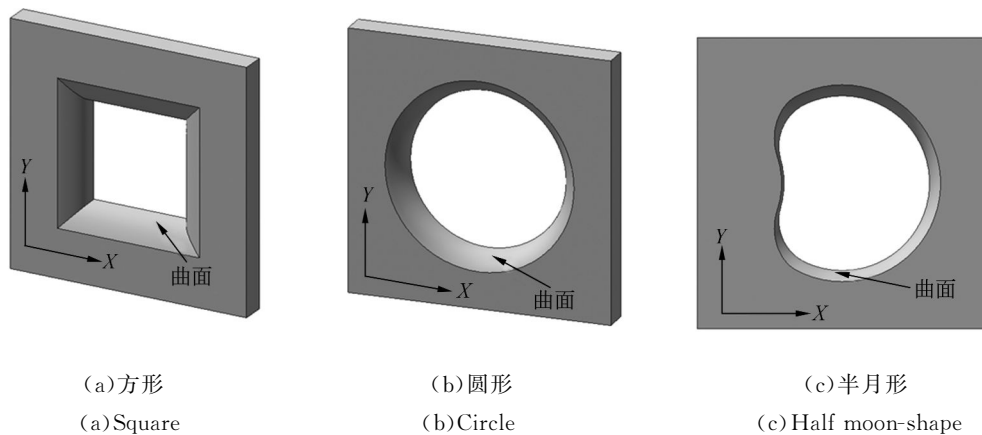
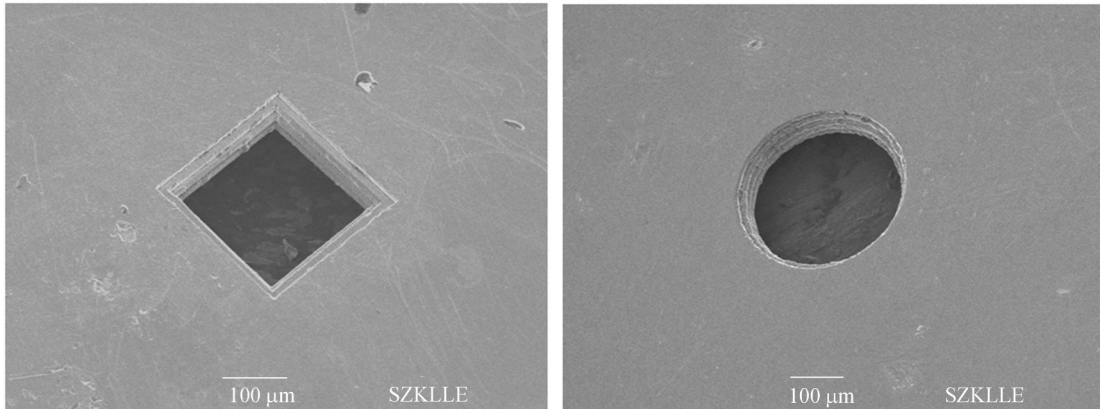


图 12 微型腔模具设计图

Fig. 12 Design drawing of micro-cavity mould

采用前述工艺过程和工艺参数,以 10 μm 厚的 0Cr18Ni9 不锈钢箔为基材制作了如图 13(a) (b)(c)所示的方形、圆形以及半月形微型腔模具。通过扫描电镜观测微型腔模具的表面形貌并测量其水平尺寸,通过大景深体视显微镜扫描其 3D

图像并测量其高度尺寸,由测量结果发现:微型腔具有较好的自由曲面特征(如图 13(d)所示),和设计的微型腔基本相符;除去 Micro-DLOM 的原理误差,微型腔的水平精度为 ±1 μm,垂直最高精度为 ±0.5 μm。

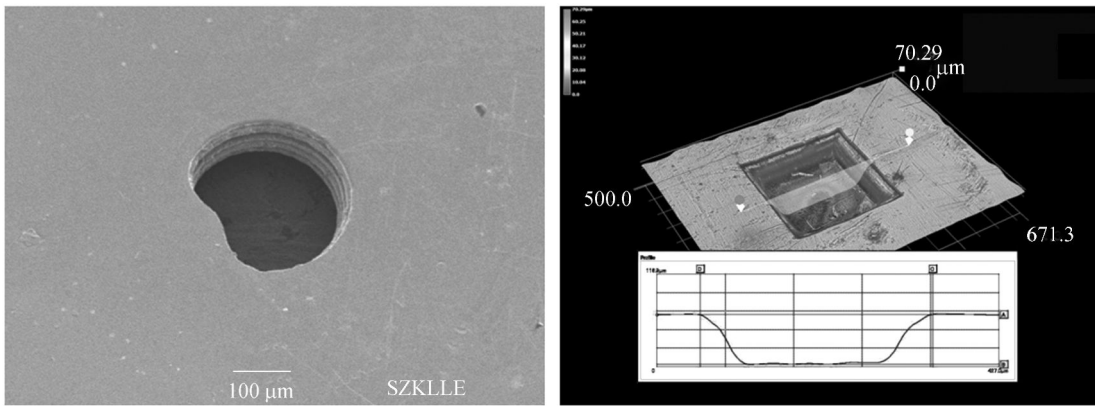


(a) 方形微型腔的 SEM 图

(b) 圆形微型腔的 SEM 图

(a) SEM photograph of micro-cavity mold with square

(b) SEM photograph of micro-cavity mold with circle



(c) 半月形微型腔的 SEM 图

(d) 方形微型腔的 3D 扫描图

(c) SEM photograph of micro-cavity mold with half moon-shape

(d) 3D scanning image of micro-cavity mold with square

图 13 通过 Micro-DLOM 获得的微型腔模具的 SEM 和 3D 扫描图

Fig. 13 SEM photograph and 3D scanning graph of micro-cavity mold

4 结 论

本文提出了采用 Micro-DLOM 新工艺来制作具有自由曲面特征的微型腔模具,并通过微型腔的制备验证了该工艺的可行性与先进性。在飞秒激光功率为 110 mW,切割速度为 100 μm/s,切割补偿量为 0.75 μm,焊接电压为 0.21 V,焊接压强为 0.2 MPa,预压时间为 100 ms,焊接时间为 10 ms,滑焊放电次数为 160 次的工艺参数下获得了具有自由曲面特征的微型腔模具。Micro-DLOM 工艺存在原理误差,通过对其原理误差的计算分析发现:微型腔相对于垂直方向的张角 α 和钢箔厚度 d 越小,其原理误差 δ 也就越小;通过使用更薄的钢箔可以有效减小 Micro-DLOM 的

原理误差,但这会降低 Micro-DLOM 的加工效率。因此 Micro-DLOM 工艺与三维微细电火花扫描加工方法一样存在着精度与效率的取舍问题。在排除原理误差的前提下,本文通过 Micro-DLOM 工艺制备的微型腔水平精度为 1 μm,垂直最高精度为 ±0.5 μm。提出了采用微细电阻滑焊的方法对三维微型腔各层不锈钢箔进行热扩散焊,并对微细电阻滑焊后的微型腔试样进行了 XRD 测试。测试结果显示,焊接区域的主要物相没有发生变化,仅物相的相对含量发生了变化,因此热扩散焊接的可以很好地保证微型腔机械性能。与 UV-LIGA 工艺相比, Micro-DLOM 工艺可以加工出具有自由曲面特征的三维微结构,并且单层钢箔越薄,成形精度也就越高;与飞秒激光分层平面扫描烧蚀工艺相比, Micro-DLOM 工艺

仅需切割每层二维结构的轮廓,成形效率大为提高。与微细电火花加工工艺相比,飞秒激光切割成形二维轮廓原理上相当于直径为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的微细电极的尺寸精度,虽然所成形的微型腔表面质

量相对粗糙,但 Micro-DLOM 工艺不需要针对不同尺度的微结构制备相应的微电极,并且不存在微电极工作过程中的损耗问题,所以可以制备出深宽比不受限制的微模具。

参考文献:

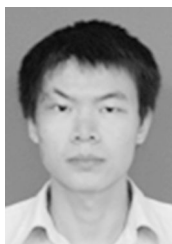
- [1] YOSHIHIRO H. LIGA process-micromachining technique using synchrotron radiation lithography and some industrial applications [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2003(208):21-26.
- [2] LERMER F, URBAN A. Challenges, developments and applications of silicon deep reactive ion etching [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003,67-68:349-355.
- [3] WENMIN Q. 3D-UV micro-forming: principles and application [J]. *Engineering Science and Education Journal*, 1999(2):13-19.
- [4] DONGKEON L, HARUTAKA M, HIROSHI H. 3D UV-microreplication using cylindrical PDMS mold [J]. *Microsyst Technol*, 2010(16):1399-1411.
- [5] SHIU P P, KNOFF G K, OSTOJIC M. Fabrication of metallic micro-molds by laser and electro-discharge micromachining [J]. *Microsyst Technol*, 2010(16):477-485.
- [6] THIAN S, TANG Y, FUH J Y H, *et al.*. Formation of micro-moulds via UV lithography of SU8 photoresist and nickel electrodeposition [J]. *J. Engineering Manufacture*, 2006(220):329-333.
- [7] WANG M W. Microceramic injection molding of a multilayer micropatterned micropart [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2010(51):145-153.
- [8] ATTIA U M, MARSON S, ALCOCK J R. Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2009(7):1-28.
- [9] TAKAYUKI S, YOICHI T, TAKAHIRO K, *et al.*. Micromachining of electroformed nickel mold using thick photoresist microstructure for imprint technology [J]. *Microsyst Technol*, 2008(14):1359-1365.
- [10] 黄新龙,熊瑛,陈光炎,等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. *光学精密工程*, 2010,18(5):1152-1157.
- [11] 胡洋洋,朱荻,李寒松,等. UV-LIGA 制作超高微细阵列电极技术[J]. *光学精密工程*, 2010,18(3):670-675.
- [12] 明平美,朱荻,周锋,等. 用 UV-LIGA 技术制造大通孔率镍网[J]. *光学精密工程*, 2009,17(6):1267-1273.
- [13] 庄俭,于同敏,王敏杰,等. UV-LIGA 技术在微型模具型腔加工中的应用研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009,41(5):106-109.
- [14] YUON Y K, PARK J H, ALLEN M G. Multidirectional UV lithography for complex 3-D MEMS structures[J]. *Journal of microelectromechanical systems*, 2006,15(5):1121-1130.
- [15] MANUEL P, ANDY E, STEFFEN W, *et al.*. Microstructuring of steel and hard metal using femtosecond laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2011,12:60-66.
- [16] 杜立群,莫顺培,张余升,等. UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构[J]. *光学精密工程*, 2010,18(5):1152-1157.
- [17] HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(5):1152-1157. (in Chinese)
- [18] HU Y Y, ZHU D, LI H S, *et al.*. Fabrication of ultra-high metal micro electrode array using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(3):670-675. (in Chinese)
- [19] MING P M, ZHU D, ZHOU F, *et al.*. Fabrication of metal micro-precision sieves with high open areas using UV-LIGA process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1267-1273. (in Chinese)
- [20] ZHUANG J, YU T M, WANG M J, *et al.*. Fabrication of micro-channel cavity using a modified UV-LIGA process[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009,41(5):106-109. (in Chinese)

- 精密工程, 2010, 18(2): 363-368.
- DU L Q, MO SH P, ZHANG Y SH, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 363-368. (in Chinese)
- [17] 赵万生, 李志勇, 王振龙, 等. 微三维结构电火花铣削关键技术研究[J]. *微细加工技术*, 2003, 9: 49-55.
- ZHAO W SH, LI ZH Y, WANG ZH L, *et al.*. Research on key techniques of 3D Micro-EDM milling[J]. *Micro-fabrication Technology*, 2003, 9: 49-55. (in Chinese)
- [18] 王振龙, 赵万生, 刘光壮. 基于分层制造原理的微细电火花加工技术研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 2(38): 22-26.
- WANG ZH L, ZHAO W SH, LIU G ZH. Research on laminated removal micro-EDM [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 2(38): 22-26. (in Chinese)
- [19] 李勇, 佟浩, 郝鼎文, 等. 三维微细电火花伺服扫描加工工艺[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 4(6): 307-311.
- LI Y, TONG H, YU D W, *et al.*. Servo scanning process of 3D micro EDM [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 4(6): 307-311. (in Chinese)
- [20] 贾振元, 任小涛, 刘巍, 等. 大深径比微小孔快速电火花加工系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 12(17): 3055-3061.
- JIA ZH Y, REN X T, LIU W, *et al.*. Rapid EDM systems for micro and small holes with high-aspect-ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 12(17): 3055-3061. (in Chinese)
- [21] XU B, WU X Y, LUO F, *et al.*. Research on the forming mechanism of micro-moulds based on laminated slip-welding of ultra stainless steel foils [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314-316: 1818-1822.
- [22] 伍晓宇, 阮双琛, 程蓉, 等. 一种金属叠层实体制造快速成形方法: 中国, 200910105056. 2 [P]. 2009-01-14.
- WU X Y, RUAN SH CH, CHENG R, *et al.*. A metal laminated object Manufacturing of rapid forming methods: China, 200910105056. 2 [P]. 2009-01-14. (in Chinese)
- [23] 徐斌, 伍晓宇, 罗烽, 等. 0Cr18Ni9 不锈钢箔的飞秒激光烧蚀[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 45-51.
- XU B, WU X Y, LUO F, *et al.*. Ablation of 0Cr18Ni9 stainless steel films by femtosecond laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 45-21. (in Chinese)

作者简介:



徐斌(1985—),男,山东临沂人,博士研究生,2010年于深圳大学机电与控制工程学院获得硕士学位,主要从事激光精密加工,微模具制造方面的研究。E-mail: xubin_szu@163.com



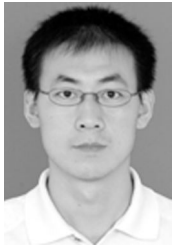
凌世全(1986—),男,广东深圳人,硕士研究生,主要从事激光快速成形,微细加工方面的研究。E-mail: lingshiquan@163.com



吴世云(1988—),男,广东惠来人,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: wsyszu@163.com



罗烽(1962—),男,副教授,1991年于浙江大学获得硕士学位,主要从事光学精密制造,精密测量方面的研究。E-mail: LLLF@szu.edu.cn



杜晨林(1976—),男,教授,2003年于山东大学晶体材料国家重点实验室获理学博士学位,主要从事新型激光晶体、非线性光学晶体及其激光和频率变换器件的研究。E-mail: cldu@szu.edu.cn



孙秀泉(1952—),男,教授,博士生导师,1994年于西北大学获得博士学位,主要从事光核反应理论与量子光学理论研究。E-mail: sunxq@szu.edu.cn

导师简介:



伍晓宇(1963—),男,四川仁寿人,教授,1995年于华中科技大学获博士学位,主要从事激光快速成形、微成形与微模具方面的研究。E-mail: wuxy@szu.edu.cn

(本栏目编辑:马 健)

●下期预告

超精密级二维工作台自标定算法

崔继文,刘雪明,谭久彬*

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

为了提高超精密级二维工作台的运动定位精度,提出了一种实现工作台系统误差分离的二维自标定算法。该算法基于工作台测量误差模型,利用辅助标记板的5个不同测量位姿,分别得到迭代模型和迭代初始值,最终建立完整的迭代二维自标定模型。应用该算法对系统误差为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的二维工作台进行仿真,当不存在随机测量噪声时标定精度为 $0.33\ \text{nm}$;引入随机测量噪声时标定精度与噪声同一量级。对 x 、 y 向给定测量精度为分别为 $2.98\ \mu\text{m}$ 和 $3.22\ \mu\text{m}$ 的二维工作台进行自标定实验,得 x 向、 y 向测量精度分别为 $2.59\ \mu\text{m}$ 和 $3.14\ \mu\text{m}$ 。此自标定算法对随机测量噪声有很好的鲁棒性,能够用于精密或超精密级二维工作台自标定。