

文章编号 1004-924X(2015)04-0988-08

线切割与真空热扩散焊组合工艺制备微模具

钟金明^{1,2}, 伍晓宇^{1,2*}, 徐 斌¹, 罗 烽¹, 李积彬¹, 阮双琛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 广东省高校先进光学精密制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 采用线切割和真空压力热扩散焊组合工艺制备了高深宽比的三维微结构。分别研究了线切割与热扩散焊工艺并获得了较好的工艺参数用于制备微模具。首先, 在脉冲宽度为 $10\ \mu\text{s}$, 脉冲间隔为 $40\ \mu\text{s}$, 线切割电流为 $0.28\ \text{A}$, 电压为 $60\ \text{V}$ 的条件下, 对 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔进行线切割, 获得了多层二维微结构。然后, 在热扩散温度为 $850\ ^\circ\text{C}$, 热扩散时间为 $10\ \text{h}$, 压力为 $1.0\ \mu\text{Pa}$ 的工艺参数作用下, 对多层铜箔二维微结构进行真空压力热扩散焊接, 通过多层二维微结构的叠加形成微模具, 并制备了六棱台微型腔模具及微型级联齿轮模具。实验结果表明: 三维微模具表面形貌较好, 制作结果较理想, 与设计模型基本相符。最后, 通过超声模压成型分别获得了二阶和三阶的塑料级联齿轮。这些微塑件质量良好, 验证了该工艺方法的可行性。

关 键 词: 三维微结构; 微注塑模具; 线切割; 真空压力热扩散焊

中图分类号: TG76 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0988

Laminated fabrication of micro-mold based on WEDM and thermal diffusion welding

ZHONG Jin-ming^{1,2}, WU Xiao-yu^{1,2*}, XU Bin¹,
LUO Feng¹, LI Ji-bin¹, RUAN Shuang-chen²

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

2. Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of Guangdong Higher
Education Institutes, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

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

Abstract: A 3D micro-structure with a high aspect ratio was fabricated by combining Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) and vacuum pressure thermal diffusion welding. The WEDM and thermal diffusion welding were researched, and the better technological parameters were obtained to fabricate a micro-mold. Firstly, a copper foil with a thickness of $100\ \mu\text{m}$ was cut to obtain a multi-layer 2D micro-structure under the conditions of a pulse width of $10\ \mu\text{s}$, a pulse interval of $40\ \mu\text{s}$, a wire cutting current of $0.28\ \text{A}$ and a voltage of $60\ \text{V}$. Then, the 2D micro-structure of a multilayer copper foil was fabricated by vacuum pressure thermal diffusion welding under the technological

收稿日期: 2014-07-10; **修订日期:** 2014-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175348, No. 51375315, No. 51405306); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2014M552233); 深圳市科技研发资金基础研究项目 (No. JCYJ20130329143934356, No. JCYJ20140418095735629)

parameters in a thermal diffusion temperature of 850°C , a thermal diffusion time of 10 h and a pressure of $1.0\ \mu\text{Pa}$. The multilayer copper 2D microstructure was connected together by vacuum pressure thermal diffusion welding to fit into a six frustum pyramid mold and gear molds with two-stage steps and three-stage steps, respectively. Experimental results indicate that the 3D micro-mold with good surface quality is an ideal fabrication and fits to design models. Finally, based on ultrasonic powder molding, two-stage and three-stage plastic gears are respectively obtained. These micro plastic parts show good quality, which verifies the feasibility and usability of laminated micro molds.

Key words: 3D micro-structure; micro-injection mold; Wire Electrical Discharge Mechining(WEDM); vacuum pressure thermal diffusion welding

1 引言

微注塑成形是热塑性塑料成形的一种重要工艺方法,与目前在微机械领域广泛应用的硅基材料微小构件成形工艺相比,具有制造成本低、生产周期短、工艺简单、成形质量高、便于实现批量和自动化生产等优点。微模具作为微塑件的重要工艺装备,其制造水平直接影响着微塑件的成形质量。

微模具的制造依赖于微细加工技术。随着机电系统(Micro-Electronic-Mechanical System, MEMS)技术的发展,微制件的需求日益增加,微细加工技术也日新月异,从传统微细切削加工到微细特种加工,如电化学、电火花、激光、超声波、离子束等,再到 UV-LIGA 技术和深反应离子蚀刻技术(DRIE)。这些特种技术中,微细光加工技术在微模具制造中的应用更具优势^[1-2],而 UV-LIGA 技术最有代表性和应用前景^[3-6]。UV-LIGA 技术主要由曝光、显影、电铸和去胶组成,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 2.5D 微结构,而不易制作含有复杂结构特征的微结构。

为获得三维微结构,大连理工大学的杜立群等提出基于 UV-LIGA 技术的新工艺制备三维微结构^[7],并研究了 UV-LIGA 技术在制作细胞培养器微注塑模具型腔中的应用^[8]。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^[9]。江苏大学张朝阳等构建了纳秒脉冲激光电化学加工系统,实现了线宽在 $140\ \mu\text{m}$ 左右、深度较大的微细刻蚀加工,获得了较好的加工质量和成形精度^[10]。Li 等以微超声加工和微细电

火花加工为基础制备了球形微结构^[11]。Park 和 Chu 等提出了线切割和电解抛光相结合的方法,制备了表面质量较好的透镜样式模具^[12]。为了提高微结构的表面质量和加工精度,Nguyen 等提出通过微细电火花加工结合微细电解加工来制备微结构^[13]。大连理工大学的宋满仓等研究了利用常规电火花线切割技术加工薄镍板微小结构的方法,该技术可为电火花线切割加工其他材料的薄板微小零件提供支持^[14]。清华大学佟浩、李勇等以放电间隙伺服控制实时补偿电极损耗技术为基础,提出三维微细电火花伺服扫描加工方法,制备出了各种复杂的三维微结构^[15]。但是微细电火花加工所用的微细电极制作困难,加工后模具的表面粗糙度难以达到要求,需要进行后续研抛加工,从而降低了生产效率,并且由于在电火花加工的过程中始终存在微细电极损耗,因此该技术难以获得大深宽比的微结构。

近年来,为了制备三维微模具,徐斌等人提出了微型双工位叠层成形方法(Micro Double-staged Laminated Object Manufacturing, Micro-DLOM)^[16-17]。Micro-DLOM 以分层实体制造工艺(LOM)为基础,通过多层二维微结构的叠加拟合来获得三维微模具。凌世全等人采用飞秒激光切割结合微细电阻滑焊制备了 2 阶、3 阶级联齿轮微型腔模具,并通过铜箔对上述齿轮腔进行胀形复制得到了微成形件,从而验证了该工艺方法的可行性^[18]。但限于飞秒激光的功率,切割的单层不锈钢箔厚度不能超过 $20\ \mu\text{m}$,所以叠层成形的微模具深度受到一定的限制。

本文在上述研究的基础上,采用线切割结合热扩散焊制备了三维金属微结构。首先通过线切割铜箔获得二维金属微结构,然后利用真空压力热扩散焊叠加多层二维微结构从而获得三维金属

微模具。由于线切割可以切割不同厚度的铜箔,所以该方法可以制作有相当深度的微模具。这里之所以选择铜箔作为原材料,是因为其高温热扩散性好,易于保证真空压力热扩散焊的质量;当然,如果焊接质量控制适当,也可以采用不锈钢箔等其它原材料。

2 制备工艺

Micro-DLOM 制备三维微模具以及注塑的工艺过程包括:(1)采用电火花线切割工艺对铜箔进行切割获得二维微结构;(2)通过真空压力热扩散焊连接多层二维微结构从而叠加拟合出三维微模具。用于制备三维叠层微模具的 Micro-DLOM 工艺路线如图 1 所示。

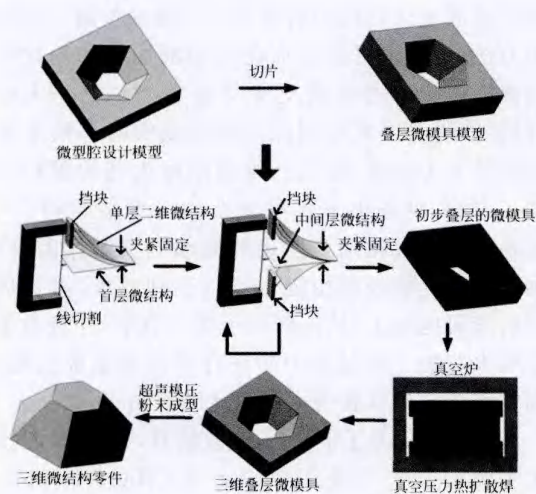


图 1 三维叠层微模具的制备以及模压工艺

Fig. 1 Fabrication process of 3D laminated micro molds and micro-UPM process

首先,通过 CAD 切片软件将微模具设计模型进行离散切片从而获得叠层微模具模型。切片软件还需对叠层微模具模型进行后处理,从而获得铜箔层数、层厚及每层铜箔二维微结构轨迹等数据。

然后将已确定的各层铜箔的一端夹紧固定。铜箔分已加工铜箔、正加工铜箔和待加工铜箔(见图 2)。待加工铜箔的另一端需要向上弹性弯曲并用挡块挡住,正加工铜箔的另一端通过钢块与

磁铁夹具固定,并由线切割加工该层的二维微结构,已加工铜箔需要向下弹性弯曲并用挡块挡住。重复上述过程,直至完成各层二维微结构的线切割加工,从而获得初步叠层的三维微模具。

然而初步叠层的三维微模具的各层二维微结构并没有真正连接,因此需其一端仍保持夹紧状态并放入真空炉中进行真空压力热扩散焊,从而完成各层铜箔二维微结构的完全连接,形成整体式微模具。

最后,运用超声模压粉末成型方法(Micro-UPM)^[19]就可获得三维微结构零件。

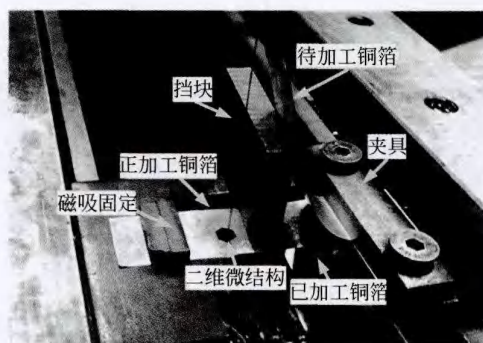


图 2 线切割加工各层二维微结构

Fig. 2 Wire cutting of multi-layer 2D microstructures

3 实验材料与设备

制备三维微模具的材料为 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔,线切割机为深圳联高精密机械有限公司生产的中走丝线切割机 H-CUT32F,真空炉为深圳中达强电炉厂生产的真空热处理炉(ZK1-12-1200)。采用日本 KEYENCE 公司生产的大景深体式显微镜 VHX-1000,观察三维微模具和微结构的轮廓并测量微结构尺寸;采用日本 KEYENCE 公司生产的激光共聚焦显微镜 VK-X100 测量三维微结构的表面粗糙度;采用深圳红日超声波设备有限公司生产的超声波塑料焊接机 RS2026PLC 进行模压成型实验,其最大输出功率为 $2\ 600\ \text{W}$,工作频率为 $20\ \text{kHz}$,超声波振动时间为 $0.1\sim 9\ \text{s}$ (可调)。塑料粉末材料分别为聚丙烯(PP)和乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA),其中 EVA 粉末颗粒的平均粒径约为 $500\ \mu\text{m}$,熔点为 $112\ ^\circ\text{C}$;PP 粉末颗粒的平均粒径约为 $400\ \mu\text{m}$,其熔点为 $164\ ^\circ\text{C}$ 。

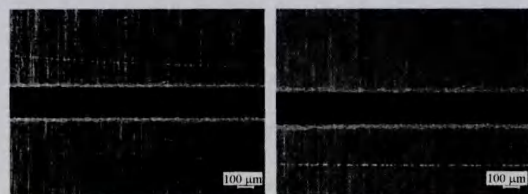
4 三维模具的制备

4.1 铜箔的电火花线切割

三维微模具是由多层二维微结构叠加焊接而成,因此每层二维微结构的切割质量对三维微模具的表面质量和尺寸精度具有重要影响。电火花线切割加工是一个多参数输入、输出的复杂过程,影响其加工指标的因素有很多。为了获得较佳的线切割工艺参数,本文通过单因素实验,重点研究线切割放电电压 V_c 、放电电流 I_c 以及脉冲宽度 T_{on} 对线切割切缝宽度及切缝表面粗糙度的影响规律。

4.1.1 线切割放电电压对切割质量的影响

为了获取合适的线切割放电电压 V_c ,本文在其它工艺参数确定的情况下,依次施加不同的放电电压 V_c 对铜箔进行切割。实验所采用的工艺参数为:脉冲宽度 $10\ \mu\text{s}$,脉冲间隔 $40\ \mu\text{s}$,线切割电流 $0.28\ \text{A}$;电极丝为钼丝(直径为 $180\ \mu\text{m}$),实验结果如图3所示。



(a) $V_c = 60\ \text{V}$ (b) $V_c = 90\ \text{V}$

图3 电压对线切割质量的影响

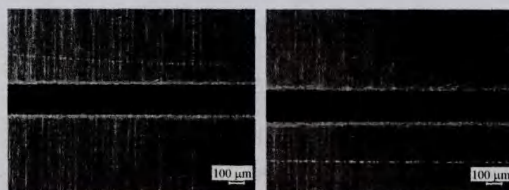
Fig. 3 Impact of voltage on WEDM quality

由图3可知,当 $V_c = 60\ \text{V}$ 时,铜箔的线切割边缘质量较好,随着放电电压 V_c 的增加,铜箔的线切割边缘出现不太明显的锯齿状结构,铜箔的切割边缘逐渐变粗糙。为了考察放电电压对二维微结构尺寸精度的影响,本文使用大景深显微镜测量线切割的切缝尺寸。测量结果显示:随着电压的逐渐升高,切缝尺寸由 $60\ \text{V}$ 时的 $201\ \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $90\ \text{V}$ 时的 $210\ \mu\text{m}$ 。上述实验结果表明,放电电压 V_c 会影响铜箔的切割边缘质量和二维微结构的尺寸精度。当放电电压逐渐增加时,会引起电极丝与工件之间平均放电能量的增加,进而增大放电间隙,铜箔材料的蚀除量逐渐加大,因此铜箔的线切割边缘质量逐渐变差,铜箔的切缝尺寸逐渐增加。因此,综合考虑三维微模具单

层微结构的边缘质量和尺寸精度,本文选用的放电电压 V_c 为 $60\ \text{V}$ 。

4.1.2 线切割电流对切割质量的影响

线切割电流是指在脉冲电源的作用下,电极丝切割铜箔时所施加的电流。为了获取合适的线切割电流,本文在其它工艺参数确定的情况下,依次施加不同的电流切割铜箔。根据线切割机的参数可调范围确定实验所采用的工艺参数为:线切割电流 $1\ \# \sim 6\ \#$ ($0.28\ \text{A} \sim 1.68\ \text{A}$),电压 $60\ \text{V}$,放电脉宽 $10\ \mu\text{s}$,脉冲间隔 $40\ \mu\text{s}$ 。实验结果如图4所示。



(a) $I_c = 0.28\ \text{A}$ (1#) (b) $I_c = 1.68\ \text{A}$ (6#)

图4 电流对线切割质量的影响

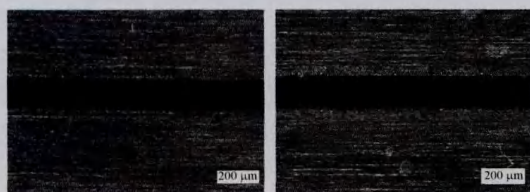
Fig. 4 Impact of current on WEDM quality

由图4可知,当电流为 $1\ \#$ ($0.28\ \text{A}$) 时,铜箔的线切割边缘质量较好;随着线切割电流的逐渐增大,铜箔的线切割边缘出现锯齿状结构,铜箔的线切割边缘质量逐渐变差。为了考察线切割电流对二维微结构尺寸精度的影响,本文使用大景深显微镜测量铜箔的切缝尺寸。由测量结果可知,随着线切割电流的逐渐增加,切缝尺寸由 $0.28\ \text{A}$ 时的 $201\ \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $1.68\ \text{A}$ 时的 $212\ \mu\text{m}$ 。上述实验结果表明,线切割电流不仅对铜箔切割边缘的切割质量有较大影响,也对二维微结构的尺寸精度产生了一定的影响。线切割电流的增大会增大平均放电能量,同时放电能量的增加也增大了单脉冲材料的去除量,使单脉冲电蚀坑变深、变大,而线切割加工表面由大量电蚀坑组成,因此加工表面粗糙度会大幅增加。在线切割电流较大时,铜箔的线切割边缘易出现锯齿状结构,铜箔的切缝尺寸也稍变大。因此,综合考虑三维微模具单层微结构的边缘质量和尺寸精度,本文选用的线切割电流为 $1\ \#$ ($0.28\ \text{A}$)。

4.1.3 脉冲宽度对切割质量的影响

为了获取合适的线切割脉冲宽度 T_{on} ,本文在其它工艺参数确定的情况下,依次施加不同的脉冲宽度 T_{on} 对铜箔进行切割。实验所采用的工

艺参数为:脉冲宽度 $10 \sim 60 \mu\text{s}$,线切割电压 80 V ,电流 0.42 A ,脉冲间隔 $40 \mu\text{s}$ 。实验结果如图 5 所示。由图可知 T_{on} 对切割质量的影响与 V_c 和 I_c 相同,因此本文选择 $T_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$ 。



(a) $T_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$ (b) $T_{\text{on}} = 60 \mu\text{s}$

图 5 脉冲宽度对线切割质量的影响

Fig. 5 Impact of pulse width on WEDM quality

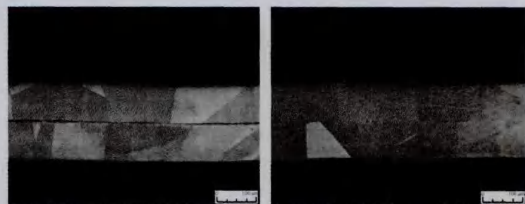
4.2 三维微模具的真空热扩散焊

通过上述工艺获得的多层铜箔二维微结构组成了初步叠层的三维微模具。但其各层二维结构之间并未真正连接,因此需要将初步叠层的三维微模具进行真空压力热扩散焊,从而完成各层二维结构的真正连接,形成一个整体式模具。各层二维微结构之间的焊接质量会对三维微模具整体的机械性能产生重要影响。

真空压力热扩散焊是指在真空条件以及一定的压力和温度作用下,通过原子扩散使焊接件相互联接的焊接方法。真空热扩散焊的温度一般设为材料熔点的 $0.5 \sim 0.8$ 倍,因铜的熔点为 1083°C ,所以其热扩散温度为 $542 \sim 867^\circ\text{C}$ 。在真空压力热扩散焊中,热扩散时间以及热扩散压力对三维微模具焊接质量的影响至关重要。

为了获得合适的热扩散时间,本文依次在不同的热扩散时间下对三维微模具进行了热扩散焊接。实验所采用的工艺参数如下:热扩散时间 t 为 $2 \sim 10 \text{ h}$,热扩散温度为 850°C ,压力为 $1.0 \mu\text{Pa}$ 。热扩散后的试样经过打磨抛光后,使用硝酸铁酒精溶液进行腐蚀,然后观测试样连接处的形貌,实验结果如图 6 所示。由实验结果可知:当热扩散时间 t 为 2 h 时,铜箔之间的缝隙较明显(图 6(a));随着热扩散时间 t 增加到 10 h ,铜箔之间的缝隙逐渐减小,直至消失(图 6(b))。

为了获得合适的热扩散压力,本文依次使用不同的热扩散压力对 10 层铜箔(每层厚为 $100 \mu\text{m}$)的三维叠层微模具进行热扩散焊接。实验所采用的工艺参数如下:热扩散压力 F 为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{Pa}$,热扩散温度为 850°C ,热扩散时间 t 为 10 h 。

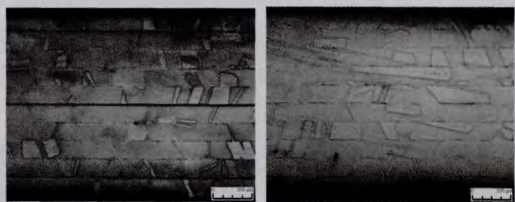


(a) $t = 2 \text{ h}$ (b) $t = 10 \text{ h}$

图 6 热扩散时间对焊接质量的影响

Fig. 6 Impact of thermal diffusion time on welding quality

热扩散后的试样经过打磨抛光后,使用硝酸铁酒精溶液进行腐蚀,观测试样连接处的形貌,实验结果如图 7 所示。由实验结果可知:当热扩散压力为 $0.5 \mu\text{Pa}$ 时,铜箔之间的缝隙较明显(图 7(a));随着热扩散压力的增加,铜箔之间的缝隙逐渐减小,直至消失(图 7(b))。



(a) $F = 0.5 \mu\text{Pa}$ (b) $F = 1.0 \mu\text{Pa}$

图 7 焊接压力对焊接质量的影响

Fig. 7 Impact of welding pressure on welding quality

三维微模具的尺寸精度主要包括每层二维微结构的尺寸精度和三维微模具在厚度方向上的尺寸精度。每层二维微结构的尺寸精度主要由线切割保证,而三维微模具在厚度方向上的尺寸精度则主要由真空热扩散保证。

为了考察热扩散时间对三维微模具在厚度方向上精度的影响,本文使用大景深显微镜测量了图 6 所示试样的厚度。由测量结果可知,随着热扩散时间的逐渐增加,试样在厚度方向上的尺寸由 2 h 时的 $209.7 \mu\text{m}$ 逐渐降低至 10 h 时的 $199.6 \mu\text{m}$,越来越接近理想尺寸。当热扩散时间较短时,各层铜箔在接触面上的原子扩散不够充分,此时铜箔之间存在缝隙,三维微模具在厚度方向上的尺寸精度较差;随着热扩散时间的增加,各层铜箔在接触面上的原子扩散越来越充分,铜箔之间的缝隙逐渐消失,直至近似消失,此时三维微模具在厚度方向上的尺寸精度较好。

为了考察热扩散压力对三维微模具在厚度方向上精度的影响,本文使用大景深显微镜测量了图7所示试样的厚度。由测量结果可知,随着热扩散压力的逐渐增加,试样在厚度方向上的尺寸由 $0.5\text{ }\mu\text{Pa}$ 时的 $1\,042\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐减低至 $1.0\text{ }\mu\text{Pa}$ 时的 $998\text{ }\mu\text{m}$,越来越接近理想尺寸。在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下,压力越大,铜箔结合面上的微观变形越大,表面贴合面积就越大,经过扩散和再结晶留下的界面孔洞就越小,于是焊合率得到了提高。因此,当热扩散压力较小时,铜箔之间存在较大缝隙,三维微模具在厚度方向上的尺寸精度较差;随着热扩散压力的增加,铜箔之间的缝隙逐渐消失,此时三维微模具在厚度方向上的尺寸精度较好。

因此,为了保证三维微模具的整体机械性能和尺寸精度,本文选用的真空热扩散焊参数如下:热扩散压力为 $1.0\text{ }\mu\text{Pa}$,热扩散炉内从室温经过 2 h 升温至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 10 h ,然后自然冷却至室温。

4.3 微型级联齿轮模具的制备

为了验证该工艺的可行性,本文分别设计了六棱台、二阶级联齿轮以及三阶级联齿轮微型腔模具。其中,六棱台正六边形外接圆的直径分别为 $2.5, 3, 3.5, 4\text{ mm}$;齿轮的第一级齿轮分度圆直径为 3 mm ,第二级齿轮分度圆直径为 5 mm ;三级阶梯齿轮的第一级齿轮分度圆直径为 3 mm ,第二级齿轮分度圆直径为 4 mm ;第三级齿轮分度圆直径为 5 mm 。上述两种齿轮的齿数均为 6 ,每一级齿轮的高度均为 0.5 mm 。根据上述三维微模具几何形状与尺寸构建微模具设计模型,使用CAD切片软件将微模具设计模型进行离散切片从而获得叠层微模具模型,并得到每层铜箔的二维微结构以及层厚等数据。

以 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的铜箔为原材料,使用线切割对铜箔进行切割从而获得各层的二维微结构。线切割的工艺参数如下:线切割电流为 0.28 A ,电压为 60 V ,放电脉宽为 $10\text{ }\mu\text{s}$,脉宽间隔为 $40\text{ }\mu\text{s}$,电极丝为钼丝(直径为 $180\text{ }\mu\text{m}$)。通过真空热扩散对上述各层二维微结构进行焊接从而获得三维微模具。使用大景深显微镜观测三维微模具,结果如图8所示。从观测结果可知,三维微模具表面形貌较好,制作结果较理想,与设计模型基本相符。

为了验证上述模具的使用性能,本文采用超声模压粉末成型方法(Micro-UPM)制备微成形



图8 三维微模具加工结果

Fig. 8 Results of 3D micro-mold processing

塑件。主要工艺参数包括超声波功率、超声波作用时间以及超声波压强。超声波功率是指实验中所施加的超声波能量,超声波作用时间是实验中保持施加超声波的时间,超声波压强则是实验中超声波焊接头的压强。本文使用PP塑料粉末,在 $2\,475\text{ W}$ 、 2 s 以及 0.1 MPa 的超声波作用下,制备了PP微型二阶级联齿轮塑件;使用EVA塑料粉末,在 $2\,475\text{ W}$ 、 0.6 s 以及 0.1 MPa 的超声

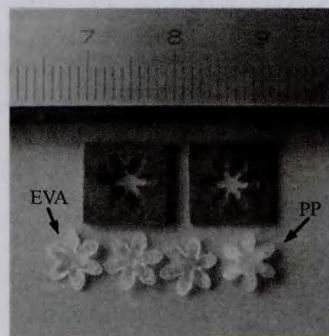


图9 微型二阶、三阶级联齿轮塑件及其微型腔模具

Fig. 9 Micro-stepped gear plastic parts and their micro cavity molds

波作用下,制备了 EVA 微型三阶级联齿轮塑件。如图 9 所示,PP 和 EVA 微型级联齿轮塑件的表面质量良好,与对应的微型腔一致,从而进一步验证了基于线切割与热扩散焊的三维微模具叠层制备工艺的可行性。

5 结 论

本文提出了采用线切割与热扩散焊组合工艺制备三维微模具的方法。首先,通过实验研究了线切割放电电压、放电电流以及脉冲宽度对线切割切缝宽度及切缝表面粗糙度的影响规律;并在真空压力热扩散焊中,研究了热扩散时间以及热扩散压力对三维微模具焊接质量的影响,从中获得了较好的线切割与热扩散焊工艺参数用于制备微模具。然后,在脉冲宽度为 $10\ \mu\text{s}$,脉冲间隔为 $40\ \mu\text{s}$,线切割电流为 $0.28\ \text{A}$,电压为 $60\ \text{V}$ 的条件

下,对 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔进行线切割,获得了多层二维微结构;接着,在热扩散温度为 $850\ ^\circ\text{C}$,热扩散时间为 $10\ \text{h}$,压力为 $1.0\ \mu\text{Pa}$ 的工艺参数下,对多层铜箔二维微结构进行真空压力热扩散焊接,通过多层二维微结构的叠加形成微模具,制备了六棱台微型腔模具及微型级联齿轮模具。实验结果表明:三维微模具表面形貌较好,制作结果较理想,与设计模型基本相符。最后,采用 Micro-UPM 方法制备了 PP 微塑二阶级联齿轮塑件以及 EVA 微塑三阶级联齿轮塑件。微塑件质量良好,验证了叠层微模具的使用性能。

与 UV-LIGA 工艺相比,本工艺可以叠层拟合制造具有自由曲面特征的三维微结构;与微细电火花加工工艺相比,省去了制备微电极的工艺步骤,而且不存在微电极加工过程中的损耗问题,所以可以加工深宽比不受限制的微模具。

参考文献:

- [1] BROUSSEAU B E, DIMOV S S, PHAM D T. Some recent advances in multi-material micro- and nano-manufacturing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47: 161-180.
- [2] 于同敏,宫德海.微型模具制造技术研究与发展[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(2): 179-183.
YU T M, GONG D H. Research and development of micromold manufacture technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(2): 179-183. (in Chinese)
- [3] LEE D, HARUTAKA M, HIROSHI H. 3D UV-micro replication using cylindrical PDMS mold [J]. *Microsyst. Technol.*, 2010, 16:1399-1411.
- [4] WANG M W. Microceramic injection molding of a multilayer micropatterned micropart [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51:145-153.
- [5] SHIU P P, KNOPF G K, OSTOJIC M. Fabrication of metallic micro-molds by laser and electro-discharge micromachining [J]. *Microsyst. Technol.*, 2010, 16:477-485.
- [6] YAN X X, LIU J Q, SHEN X C, *et al.*. Hollow metallic microneedles fabricated by combining bulk silicon micromachining and UV-LIGA technology [J]. *Microsyst. Technol.*, 2012, 18:37-42.
- [7] 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(2): 363-368.
DU L Q, MO SH P, ZHANG Y SH, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructures based on UV-LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 363-368. (in Chinese)
- [8] 马雅丽,刘文开,刘冲,等. UV-LIGA 技术在制作细胞培养器微注塑模具型腔中的应用[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1228-1233.
MA Y L, LIU W K, LIU CH, *et al.*. Application of UV-LIGA technology machining micro-injection mold cavity of cell culture device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1228-1233. (in Chinese)
- [9] PFEIFFER M, ENGELA A, SCHOLZE S W S, *et al.*. Microstructuring of steel and hard metal using femtosecond laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12:60-66.
- [10] 张朝阳,李中洋,王耀民,等. 激光冲击效应下的力学电化学微细刻蚀加工[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1310-1315.
ZHANG ZH Y, LI ZH Y, WANG Y M, *et al.*. Mechanical-electrochemical micro-etching under laser shock effect [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2012, 20(6): 1310-1315. (in Chinese)
- [11] LI T, VISVANATHAN K, GIANCHANDANI Y B. A batch-mode micromachining process for spherical structures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24: 1-8.
- [12] PARK J W, SONG K Y, CHUNG D K, *et al.*. Fabrication of micro-lenticular patterns using WEDM-grooving and electrolytic polishing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(12): 5034.
- [13] NGUYEN M D, RAHMAN M, WONG Y S. Transitions of micro-EDM/SEDCM/micro-ECM milling in low-resistivity deionized water [J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, 69:48-56.
- [14] 宋满仓,解廷利,杜立群,等.薄镍板上 Meso 尺度结构的电火花线切割[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1749-1754.
- SONG M C, XIE T L, DU L Q, *et al.*. WEDM of meso-scale structure on thin nickle plate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1749-1754. (in Chinese)
- [15] TONG H, ZHANG L, LI Y. Layer depth constrained servo scanning EDM for 3D microstructures [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 286-291.
- [16] 徐斌,伍晓宇,凌世全,等.飞秒激光切割与微细电阻滑焊组合制备三维金属微结构[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1811-1823.
- XU B, WU X Y, LING S H Q, *et al.*. Fabrication of 3D metal micro-structure based on fs laser cutting and micro electric resistance slip welding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1811-1823. (in Chinese)
- [17] 徐斌,伍晓宇,雷建国,等.逐层微细电阻滑焊工艺制备三维微结构[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1251-1259.
- XU B, WU X Y, LEI J G, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructure with layer-by-layer micro-electric resistance slip welding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1251-1259. (in Chinese)
- [18] LING S Q, WU X Y, XU B, *et al.*. Laminated fabrication of micro-stepped gear mold based on femtosecond laser cutting of stainless steel foil [J]. *Microsyst. Technol.*, 2013, 19:601-609.
- [19] ZENG K, WU X Y, LIANG X, *et al.*. Process and properties of micro-ultrasonic powder molding with polypropylene [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70: 515-522.

作者简介:



钟金明(1973—),男,广东兴宁人,副教授,博士研究生,2005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,微成形与微模具方面的研究。E-mail:zhongjm@szu.edu.cn

导师简介:



伍晓宇(1963—),男,四川仁寿人,教授,博士生导师,1995年于华中科技大学获得博士学位,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