

文章编号 1004-924X(2015)12-3371-07

多工位组合电极电火花成形微凹槽结构

宋满仓^{1,2*}, 李文明^{1,2}, 刘莹¹, 刘冲¹

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 三菱电机 大连理工大学 电加工技术中心, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对具有复杂微尺度凹槽结构的高硬度模具钢型腔难以加工的难题,提出了一种多工位组合电极电火花成形的新方法。以某种聚合物微流控芯片模具型腔为研究对象,选用 NAK80 模具钢为型腔材料,铜钨合金(W75%)为相应的微凸起结构电极材料并经由高速铣削加工。为降低加工难度及保障加工质量,对复杂微凸起结构进行分解,形成 2 组 4 工位组合电极;采用周铣、端铣交替进行的工艺使微凸起上表面的毛刺连续发生塑性变形从而减小和去除微凸起结构顶端的加工毛刺。最后,利用制备好的多工位组合电极,采用变换工位代替更换电极的加工方式,通过精密电火花成形,依次完成粗、半精与精加工。结果表明:加工的凹槽侧壁与底面垂直度较好,宽度、高度误差在 3 μm 以内,根部圆角在 15 μm 以内,可以满足成型聚合物微流控芯片的使用要求。

关键词:微凹槽结构;微尺度型腔;多工位组合电极;高速铣削;去毛刺;电火花成形

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3371

Micro groove structure with multi-station combination electrode by EDM

SONG Man-cang^{1,2*}, LI Wen-ming^{1,2}, LIU Ying¹, LIU Chong¹

(1. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *MITSUBISHI-DUT, Electrical Discharge Machining Technology Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

** Corresponding author, E-mail: mcsong@dlut.edu.cn*

Abstract: As a complex micro groove cavity made of mold steel with high hardness is difficult to be machined, a kind of electrical discharge machining method by use of a multi-station combination electrode is proposed. The cavity for micro fluidic chip molding is selected as researched object, NAK80 as the cavity material, and copper-tungsten alloy (75%W) as the material of the corresponding electrode with a micro convex structure manufactured by High Speed Milling(HSM). To reduce processing difficulty and ensure processing quality, the complex micro convex structure is decomposed into two groups of four-station combination electrodes. By alternating peripheral milling and end milling, the surface of the micro convex structure generates continuous plastic deformation, which reduces and removes the top processing burr of the micro convex structure and the burr can be reduced and re-

收稿日期:2015-05-21;修订日期:2015-06-24.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA040406);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. DUT13JB05);辽宁省自然科学基金资助项目(No. 201202036)

moved. Finally, based on the qualified multi-station combination electrode, the rough, semi-finishing and finish machinings are completed successively by using precision Electrical Discharge Machining (EDM) and transforming the electrode station instead of changing electrodes. Experimental results show that the verticality of the groove sidewall is good enough, the height and width errors are within $3\ \mu\text{m}$, the root radius is within $15\ \mu\text{m}$, and all this satisfies the demand of micro fluidic chip molding.

Key words: micro groove structure; micro cavity; multi-station combination electrode; High Speed Machining(HSM); deburring; Electrical Discharge Machining(EDM)

1 引言

微流控芯片是把生物和化学等领域中所涉及的样品制备、反应、分离和检测等基本操作单元集成到一块数十平方厘米(甚至更小)的芯片上,由微通道形成网络,以可控流体贯穿整个系统,用以替代常规试验室的各种功能,已被广泛应用于生物化学、临床、医药和环境等领域。目前用来成型聚合物材料微流控芯片较为成熟的技术为热压成型与注塑成型,其中不可或缺的就是成型微通道的具有微结构的模具型腔制作^[1]。微流控芯片上的功能结构尺寸一般为数十至数百微米^[2],尺寸精度和表面质量要求较高;因此,用于成型聚合物微流控芯片功能结构的模具型腔的加工制造成为关键,其加工质量直接影响到制品的成型精度、脱模以及熔体充模过程中的型腔排气等。

近年来,开展了许多针对微结构加工方法的研究。LIGA 或 UV-LIGA 技术制作的微结构尺寸精度高,表面质量好,在微结构的加工中应用广泛^[3],但加工材料仅限于镍及镍合金、铜等,这些材料加工的微型腔在注塑成型较高的注射压力作用下,易变形甚至脱落;且很难加工出三维形状的微结构。一些学者将各种微细加工技术组合起来,使其发挥各自的优势^[4]。杜立群首先使用 UV-LIGA 技术制作准三维镍金属微结构,然后对该微结构进行微细电火花加工制作出局部为梯形凸台和锥形凹槽的三维镍金属微结构^[5];Fon-da 将电火花成形技术、化学刻蚀技术组合起来,在硅材料上加工出半球形微型腔^[6];徐斌运用飞秒激光切割技术在不锈钢箔上切割出二维微结构,又利用微细电阻焊对切割出的多层二维微结构进行热扩散焊接,制作出具有曲面特征微型腔^[7];Wang 结合微细电火花铣削、线切割、成形等加工方法的特点,对微结构进行了分类,提出

一种电火花集成加工技术的方法,并加工出一套微型减速器机构^[8]。但目前可用于微结构模具钢型腔加工的成熟技术未见报道。

结合高速铣削(HSM)加工效率高,工艺相对简单,适合加工凸起形状的特点以及电火花成形(EDM)的复杂、精密、微细型腔与完成尖角、沟槽加工及去除刀痕等特有优势^[9],本文在已加工出符合使用要求的微凸起结构模具钢型芯的基础上^[10],结合微凹槽结构的特点,提出了高速铣削与电火花成形复合加工的方案。设计了新型多工位微凸起组合电极,采用高速铣削加工出铜钨合金材料的组合电极,通过精密电火花成形在高硬度模具钢上加工出微凹槽型腔。这种方法避免了以往采用镍基模具型腔表面质软、使用寿命短等缺陷,在复杂微凹槽结构模具钢型腔的加工方面形成了突破,为微流控芯片等产品实用化、批量化的生产提供了技术保证。

2 试验方法

2.1 试验材料与设备

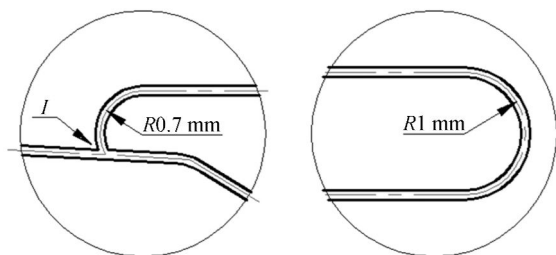
型腔材料选用 NAK80 模具钢,电极材料选用铜钨(W75%)合金。电极的制备是在日本大隈公司的 MB-56VA 立式高速铣削加工中心进行的,其主轴最高转速为 $25\ 000\ \text{r}/\text{min}$,最大铣削进给速度为 $30\ \text{m}/\text{min}$,机床重复定位精度为 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 。模具型腔的成形加工选用日本三菱电机公司的 EA8A 精密电火花成形加工机床,其加工精度可达到 $\pm 2\ \mu\text{m}$,最佳表面粗糙度 R_a 为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

试验结果测量采用 VTM-3020F 数字式影像工具显微镜。

2.2 模具型腔上的微凹槽结构

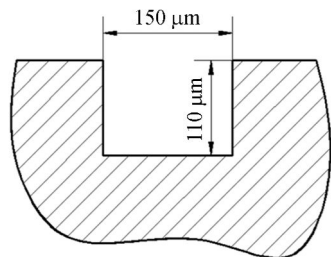
具有微凹槽结构的模具型腔用来注塑成型一种微流控芯片中的盖片,盖片上微凸起结构与基片上微凹槽结构精密配合后,才能确保后续良好

的键合,形成一个具有完整功能的微流控芯片。微凹槽具有代表性的结构如图 1(a)所示,其中要求 I 衔接处圆角半径小于 $10\ \mu\text{m}$;微凹槽的截面形状及尺寸如图 1(b)所示,要求侧壁垂直且顶端、根部圆角半径都小于 $20\ \mu\text{m}$ 。



(a) 微凹槽典型局部结构

(a) Typical local structures of micro groove



(b) 微凹槽截面

(b) Micro groove section

图 1 微凹槽典型局部结构及其截面

Fig.1 Typical local structures and section of micro groove

2.3 多工位组合电极的设计

高速铣削加工图 1(a)相对应结构微凸起电极, I 衔接位置处设计有 R 为 $0.7\ \text{mm}$ 的圆角;倘若将这部分电极整体加工出来, I 位置处便需要很小的清根加工,由于加工刀具的半径必须等于或小于过渡圆弧半径,故需要直径更小的刀具,不过这又会增加刀具昂贵的费用和加工难度,且容易断刀。为此,本文将一体式结构电极拆分成组合式,结构分解如图 2 所示。A、B 两组电极保证一定相对位置 L_3 ,如图 3(a)所示;其中 A 结构两端处按照圆弧式、直线式形状各自延伸 $50\ \mu\text{m}$,用以补偿找正误差、铣削误差、电火花加工电极损耗等误差,使两组电极放电加工的图案局部重合,确保电火花最终成形出完整结构的微凹槽型腔。

前期试验表明,电极顶端参与多次放电,尤其顶端拐角处损耗最为严重,需要使用多个粗精电

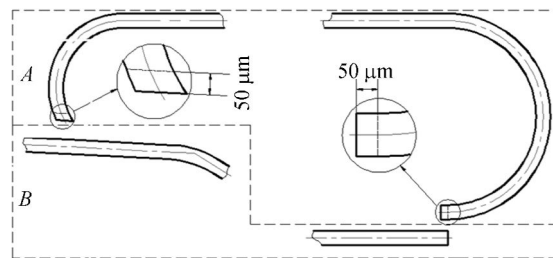
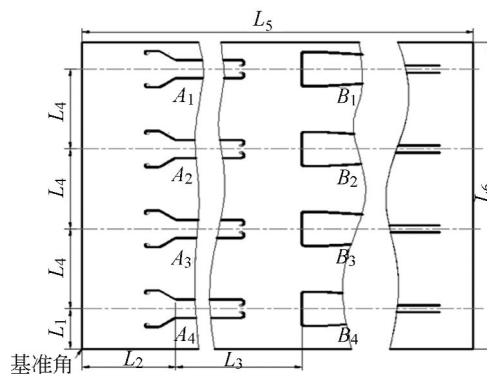


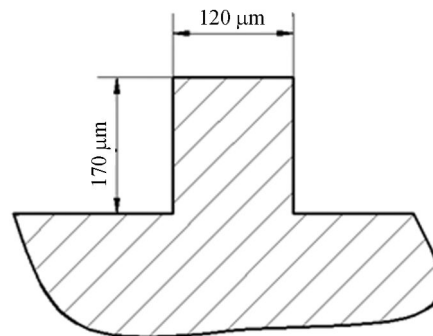
图 2 组合式电极 A、B 结构

Fig.2 A、B structures of combination electrode



(a) 多工位组合电极设计

(a) Design of integral combination electrode



(b) 微凸起电极截面

(b) Micro convex electrode section

图 3 电极整体布局及微凸起截面

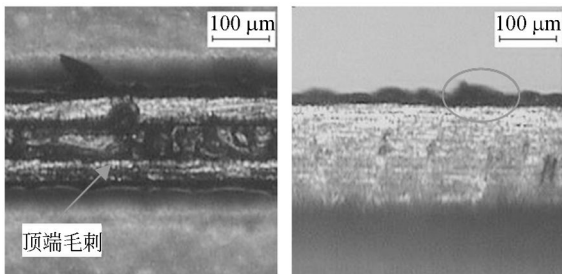
Fig.3 Electrode overall layout and its micro convex section

极补偿电极损耗,达到提高微凹槽结构加工精度的目的。更换电极会引入重复定位误差且工作量增加,鉴于使用的立式高速加工中心与精密电火花成形加工机 x 、 y 、 z 轴均具备较高的运动精度,这里将多个电极做成 1 个多工位电极,通过多工位电极上变换工位代替传统的电极更换,完成相应成形加工。为了保证每组工位电极的通用

性,每组工位电极截面都设计成一致形状,其中宽度尺寸的确定原则:微凹槽宽度为微凸起电极宽度、电极缩放量与加工余量之和,结合最终要成形的尺寸精度,将微凸起电极宽度设计为 $120\ \mu\text{m}$;为防止微凸起底面在加工中可能带来的干涉,高度方向尺寸要大于微凹槽深度与电极放电间隙之和,设计为安全尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 。利用此多工位组合电极,便可实现一次装夹找正,依次按照 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 、 A_4 、 B_4 的顺序完成粗、半精、精加工。

3 多工位组合电极的制备

电火花成形加工,电极结构的精度直接影响加工产品的精度。然而用常规及微铣削加工得到的工件上都会形成毛刺,尽管留在小尺寸工件上的毛刺很小,但这也带来后续使用的难题,同时在微构件上去除毛刺比在常规构件上困难很多^[11]。铣削后的电极如图 4 所示,在微结构顶端附带了一层毛刺,在后续电火花成形微凹槽试验中,应当先去除这层毛刺。



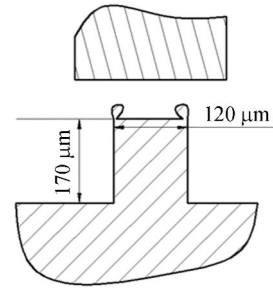
(a) 微凸起俯视图 (b) 微凸起主视图
(a) Top view of micro convex (b) Front view of micro convex

图 4 高速铣削后带有顶端毛刺的微凸起
Fig. 4 Micro convex with top burrs after HSM

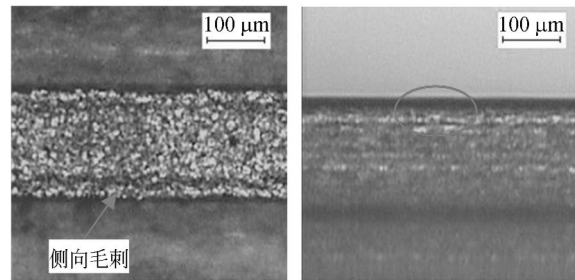
3.1 电火花加工去毛刺

首先尝试了电火花加工去除毛刺方法。选用抗侵蚀指数高于铜钨合金的硬质合金作为工具电极,具体方法如图 5(a)所示。

电火花加工去除毛刺效果如图 5(b)所示,去除了一部分较大的毛刺,但是部分毛刺转化成了侧向毛刺。测量其总体宽度为 $185.8\ \mu\text{m}$,没有达到预期去除效果。



(a) 电火花加工去除毛刺示意图
(a) Schematic diagram of deburring by EDM



(b) 电火花加工去除微凸起上表面毛刺效果
(b) Effects of deburring by EDM on micro convex upper surface

图 5 电火花加工去除毛刺
Fig. 5 EDM deburring

3.2 高速铣削去毛刺

电极是由一系列等高的微凸起结构组成的。在高速铣削中,周铣微凸起侧壁时,在微凸起顶端会产生毛刺,此时采用端铣,顶端的毛刺则会倒向水平方向;因此,这里采用周铣、端铣交替进行,使微凸起上的毛刺连续发生塑性变形直至脱落。根据实际工艺安排,周铣、端铣交替进行 5 次加工即可完成该多工位组合电极的制备。该方法去除毛刺后的效果如图 6 所示,测量微凸起宽度为 $126.3\ \mu\text{m}$,高度为 $172.4\ \mu\text{m}$,基本达到了设计要求。

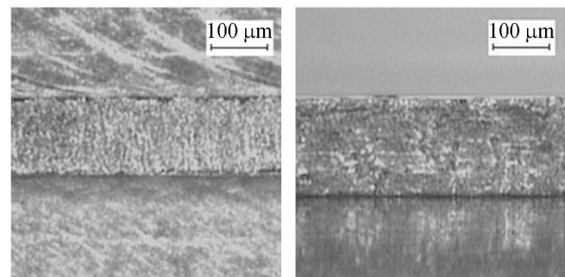


图 6 周铣、端铣相结合去除微凸起上表面毛刺效果
Fig. 6 Effects of deburring by combination of peripheral milling and end milling on micro convex upper surface

4 电火花成形微凹槽结构型腔

4.1 加工参数选择

一般电火花成形加工时,电极装夹在主轴上,工件装夹在工作台上。本试验中,电极整体尺寸长宽高分别为 200、110 和 10 mm,型腔镶块长宽高尺寸分别为 103.5、40 和 20 mm;电极尺寸大于镶块尺寸且电极质量更是大于工件质量(CuW75 合金密度为 $14.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,钢的密度为 $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)。对于该电极,一是没有专用的夹具装夹在主轴上,二是若装夹在主轴上,相对会增大电火花加工中主轴反复抬刀的惯性力及电火花油的流体动力,影响型腔的加工质量。所以,为了便于加工前电极与型腔的找正、定位,所以装夹时将电极固定在工作台上,型腔镶块固定在主轴上,这样打开机床自带的极性反转功能,即能实现正常加工。

设计了 4 组工位分别为 $A_1 B_1$ 、 $A_2 B_2$ 、 $A_3 B_3$ 、 $A_4 B_4$ 。 $A_1 B_1$ 工位用作粗加工,以较高的加工效率为主; $A_2 B_2$ 工位用作半精加工, $A_3 B_3$ 工位用作精加工,都以较高的加工精度为主; $A_4 B_4$ 工位无加工余量,主要用来补偿之前电极的损耗,进一步提高加工精度。非电参数的设置如表 1 所示。

表 1 各工位对应的主要非电参数

Tab. 1 Main non-electrical parameters of each station

工位	加工深度 $Z/\mu\text{m}$	摇动量 $R/\mu\text{m}$	优先度	摇动方式
A	-90	8	重视速度	方形摇动
B	-100	10	重视消耗	方形摇动
C	-110	12	重视消耗	方形摇动
D	-110	12	重视消耗	方形摇动

试验采用的精密电火花成形机床 EA8A 放电加工时,每一组工位的电参数又会按照粗、半精、精加工自动分为几段。所以试验中,根据每组工位电极的用途, $A_1 B_1$ 工位只保留粗加工阶段参数, $A_2 B_2$ 工位只保留半精加工阶段参数, $A_3 B_3$ 、 $A_4 B_4$ 工位只保留精加工阶段参数,这种加工阶段参数的划分,不仅保证了加工质量,也提高了加工效率。电参数的设置如表 2 所示, $A_1 B_1$ 工位选择低损耗粗加工电源 SC,大脉宽大电流负极性加工; $A_2 B_2$ 工位、 $A_3 B_3$ 与 $A_4 B_4$ 工位第一段的加工

选择毛面精加工电源 PS,小脉宽小电流正极性加工,逐次降低电容档位,单脉冲平均放电能量减弱,可逐渐提高成形件的表面质量; $A_3 B_3$ 与 $A_4 B_4$ 工位第二段的加工选择光滑精细表面加工电源 NP,进一步提高成型件的表面质量。

表 2 各组工位对应的主要电参数

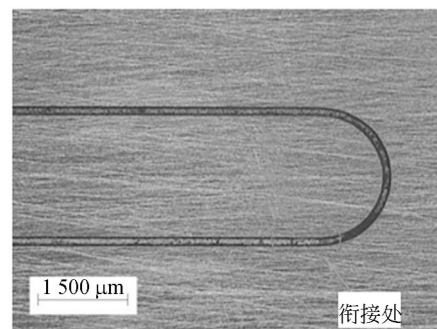
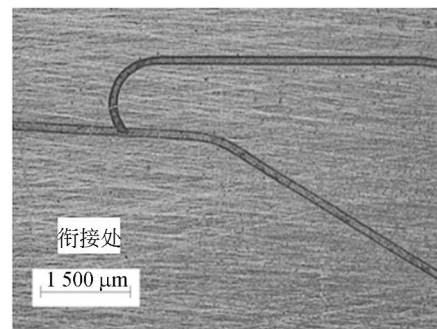
Tab. 2 Main electrical parameters of each station

工位	电源回路	工件极性	峰值电流	脉冲宽度	脉冲间隔	放电电压	电容切换
A	SC	-	1.1	2.7	5.5	32	0
B	PS	+	0.2	1.0	3.0	12	2
C	PS	+	0.1	1.0	3.0	12	1
	NP	+	0.1	1.0	3.0	11	0
D	PS	+	0.1	1.0	3.0	12	1
	NP	+	0.1	1.0	3.0	11	0

注:表中各数值均代表相应的档位,并非实际值

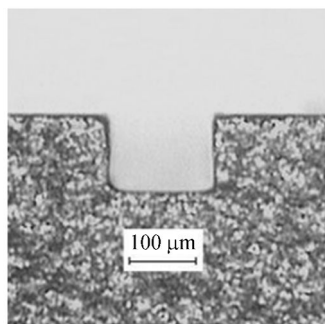
4.2 试验结果

运用该多工位组合电极成形的微凹槽结构如图 7 所示。由图 7(a)可看出,组合电极衔接处对应成形的型腔位置精度较高,微凹槽整体形状精度较高。成型出的微凹槽截面如图 7(b)所示,微凹槽两侧壁垂直于底面,测量宽度方向尺寸 $148 \mu\text{m}$,高度方向尺寸 $109 \mu\text{m}$,左侧根部圆角 $15 \mu\text{m}$,右侧根部圆角 $8 \mu\text{m}$,基本达到了加工精度的要求。



(a) 成形后微凹槽局部结构

(a) Local structures of micro groove after EDM



(b)微凹槽截面图

(b) Micro groove section after EDM

图 7 成形后的微凹槽

Fig. 7 Micro groove after EDM

5 结 论

本文设计制造了一种多工位组合电极,在电火花成形机床上,合理设定每组工位的加工参数

参考文献:

- [1] 宋满仓,刘莹,祝铁丽,等.微流控芯片注塑成型缺陷的成因与对策[J].机械工程学报,2011,47(6):33-38.
SONG M C, LIU Y, ZHU T L, *et al.*. Analysis of injection molding defects for microfluidic chip [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(6): 33-38. (in Chinese)
- [2] 王桐.干细胞微流控芯片的设计、制备、检测与应用研究[D].北京:北京工业大学,2013.
WANG T. *Reseach on design, fabrication, detection and application of microfluidic biochips for stem cells* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] KUMAR S, JERALD J, KUMANANA S, *et al.*. Review on current research aspects in tool-based micromachining processes[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29: 1291-1337.
- [4] LAUWERS B, KLOCHE F, KLINK A, *et al.*. Hybrid processes in manufacturing[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, 63: 561-583.
- [5] 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 microstructure based on UV-LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 363-368. (in Chinese)
- [6] FONDA P, NAKAMOTO K, HEIDARI A, *et al.*. A study on the optimal fabrication method for micro-scale gyroscopes using a hybrid process consisting of electric discharge machining, chemical etching or micro-mechanical milling [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62: 183-186.
- [7] 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 SH 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)
- [8] WANG CH M, CHU X Y, LIU G, *et al.*. The design of integrated route in micro-EDM[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28: 1348-1355.
- [9] MOGNOL P, RIVETTE M, FEGOU L, *et al.*. A first approach to choose between HSM, EDM and DMLS processes in hybrid rapid tooling [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2007, 13(1): 7-16.

及加工内容,采用变换工位代替更换电极的加工方式,既保证成形件的完整性又补偿电极损耗、减少重复定位误差、提高加工效率。该方法加工出的复杂微尺度凹槽结构具有较好的位置精度和形状精度,凹槽形状尺寸精度可控制在 $3\ \mu\text{m}$ 以内,达到了成型聚合物微流控芯片模具钢型腔的使用要求。

电火花加工在一定程度上可去除较大的毛刺,但是由于电极与复杂、微小零件上毛刺间的放电距离不易调整,去除毛刺效果较差。高速铣削微凸起结构电极,采用周铣、端铣相间进行的工艺方法,使微凸起上表面的毛刺连续发生塑性变形直至脱落,既完成了电极的加工,又实现了毛刺的去除。

对于微凹槽、型腔的加工,由于刀具半径的限制,无法清角,可将高速切削与电火花加工组合起来,各自发挥出独特的优势,不仅可以加工出要求的产品,而且降低生产成本。

- [10] 宋满仓,于超,张建磊,等.多工位组合电极电火花成形微结构镶块试验研究[J].机械工程学报,2013,49(15):186-191.
SONG M C, YU CH, ZHANG J L, *et al.*. Experimental research on electrical discharge machining of microstructure mold insert with multi-station combination electrode [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49 (15): 186 -191. (in Chinese)
- [11] 陈明君,陈妮,何宁,等.微铣削加工机理研究新进展[J].机械工程学报,2014,50(5):161-172.
CHEN M J, CHEN N, HE N, *et al.*. The research progress of micromilling in machining mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5):161-172. (in Chinese)

作者简介:



宋满仓(1964—),男,辽宁本溪人,博士,副教授,1989年于清华大学获得硕士学位,2005年于大连理工大学获得博士学位,主要从事模具设计与制造技术及电火花加工工艺的研究。E-mail: mcsong@dlut.edu.cn.



刘冲(1963—),男,湖北武汉人,工学博士,教授,博士生导师,1993年于华中科技大学获得博士学位,主要从事微机电系统(MEMS)、生化微传感器、物联网技术和精密仪器与测试技术的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)