

文章编号 1004-924X(2019)07-1569-08

多工位尖角电极电火花成形微尖槽结构

宋满仓^{1,2}, 李 阳^{1,2}, 刘军山^{1,3*}

- (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;
3. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对加工某微小装置的局部微尖槽形状精度难以保证的问题,提出一种多工位尖角电极电火花成形的办法。以 304 不锈钢为工件材料,选择纯铜和铜钨合金(W75%)作为电极材料并进行试验比较。为减小电极损耗和重复定位误差对加工精度的影响,采用慢走丝电火花线切割加工多工位尖角电极,然后利用多工位尖角电极电火花成形夹角为 16°、深度为 0.36 mm 的微尖槽。结果表明:采用较低进给速度,恒速多次线切割的办法能制作出质量较好的多工位尖角电极;尖槽成形精度随着工位数的增加而提高,且相同工位数时由于铜钨合金电极的低损耗性能使尖槽成形精度更好。最终采用 6 工位的铜钨合金电极成形微尖槽角度为 16.3°,相对误差 1.9%;深度为 0.356 mm,相对误差 1.1%,形状精度也较好。该方法可以满足某微小装置中微尖槽部分的加工精度和使用要求。

关键词:尖槽;恒速多次电火花线切割;多工位尖角电极;电火花成形

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192707.1569

Micro sharp groove by EDM with multi-station shape-angle electrode

SONG Man-cang^{1,2}, LI Yang^{1,2}, LIU Jun-shan^{1,3*}

- (1. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of 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;*
3. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

* *Corresponding author, E-mail: liuj@sdlut.edu.cn*

Abstract: To solve the difficulty of ensuring the shape accuracy of micro grooves in a micro device, a new method of using multi-station shape-angle electrodes through Electrical Discharge Machining (EDM) was proposed. A total of 304 stainless steel samples were used as workpiece materials, and pure copper and copper-tungsten alloy (W75%) were selected and compared as electrode materials. To reduce the influence of electrode wear and installation error, multi-station shape-angle electrodes were machined by low-speed Wire-cut EDM (WEDM), and then a 16° and 0.36-mm-depth groove was

收稿日期:2019-01-28;修订日期:2019-03-22.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFC1202503);国家科技支撑计划资助项目(No. 2015BAI03B08)

formed by EDM. Results show that a multi-station shape-angle electrode having enhanced surface quality can be fabricated using a lower feed rate, a constant speed, and multiple cutting through WEDM. The forming accuracy of the grooves was improved with the increase in the number of stations, and the forming accuracy of the copper-tungsten alloy was improved as a result of its low loss at the same station number. Therefore, a six-station copper-tungsten electrode was used to machine the workpiece with a sharp angle of 16.3° (relative error of 1.9%), a 0.356-mm depth (relative error of 1.1%), and improved form accuracy. This method can meet the processing accuracy and application requirements of sharp grooves in a micro device.

Key words: sharp groove; constant speed and multiple cutting by WEDM; multi-station shape-angle electrode; Electrical Discharge Machining(EDM)

1 引言

随着科学技术和国防工业的发展,高新技术产品日益向功能集成化、尺寸精密化和外形微型化的方向发展,随之而来的就是对制造技术提出了新的要求。电火花成形在加工一些微细结构(如窄缝、尖槽)零件方面有独特的优势,同时也存在某些亟待解决的问题。

电火花成形加工过程中的极性效应使电极存在不同程度地损耗,电极损耗直接影响电火花成形加工的精度,因此,近年来关于如何降低电极损耗以及有利于电蚀产物排出的研究较多。Avdesh 等人^[1]研究加工 AISID3 材料时脉冲间隔、脉冲间隙、峰值电流和流体压力对电极损耗率的影响,基于信噪比对实验结果进行分析,发现电极损耗率主要受峰值电流和脉冲间隔的影响。Pandey 等^[2]用纯铜、黄铜和铜钨合金电极研究加工不锈钢 202 时的电极损耗率,选取脉冲电流、脉冲间隔和放电间隙作为影响参数分别测量 3 种电极的损耗率。Ashanira 等^[3]探究不同参数在加工 S316L 钢时对铜电极损耗率的影响,并采用灰色关联分析方法得出峰值电流的影响最大。Misbah 等^[4]探究不同介电液(专用煤油和蒸馏水)对材料去除率、电极损耗率和微观结构的影响,认为煤油中分解形成的碳保护层可减少电极损耗。Khan^[5]比较黄铜和纯铜电极在不同峰值电流和开路电压下加工铝和低碳钢时的电极损耗,得出电极损耗与电极和工件材料的热传导系数和熔点密切相关,并且在电极尺寸较小方向损耗更大。大连理工大学的宋满仓、李文明^[6]采用多工位组合电极加工出具有复杂微尺度凹槽结构

的模具镶块,凹槽形状尺寸精度可控制在 $3\ \mu\text{m}$ 以内。众多学者也对如何有效排出电蚀产物开展了大量研究。哈尔滨工业大学的赵万生^[7]、山东大学的张建华^[8]对超声振动辅助电火花开展了大量研究。大连理工大学的宋满仓、亓立^[9]提出超声振动工作液辅助电火花的试验方法,探究超声在介电液中的空化机理,试验证明该方法可有效改善电蚀产物的排出,提高工件的表面质量。

基于以上分析,本文选用铜钨合金和纯铜作为电极材料,提出一种多工位尖角电极电火花成形微尖槽的方法。依照某微小装置的实际加工需求,在确保微尖槽结构形位精度的前提下,合理设计尖角电极尺寸;探究慢走丝电火花线切割中多次切割和控制速度相结合的方法,以制作出质量较好的多工位铜钨合金和纯铜尖角电极;探究铜钨合金和纯铜电极电火花成形 16° 尖槽时电极工位数和电极材料对尖槽成形尺寸精度和形位误差的影响规律,并提出对策措施。该方法可为多工位组合电极电火花成形微细结构提供理论依据和试验参考。

2 试验方法

2.1 试验材料及设备

工件材料选择 304 不锈钢,综合考虑电极材料的放电加工性能、加工成形的难易程度和电极制作成本,选用铜钨合金(W75%)和纯铜作为电极材料。具有优良加工性能的纯铜在电加工领域应用最为广泛,纯铜电加工稳定性好,精加工中采用低损耗电规准可获得清晰轮廓,加工表面粗糙度低,非常适合精密模具的电加工。铜钨合金(W75%)具有密度大、硬度高、熔点高等特点,电

极损耗极低,加工表面质量更高,但是成本也较高。采用三菱电机 NA2400 精密慢走丝电火花线切割加工机床制作工具电极,在指定加工条件下,可保证 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的尺寸精度、最佳表面粗糙度 R_a 可达 $0.03 \mu\text{m}$,电极丝采用直径 0.2 mm 的黄铜丝,电介质为电阻率 $1 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{cm})$ 的去离子水。选用三菱电机的 EA8A 精密电火花成形加工机床开展微尖槽成形试验,机床加工精度可达 $\pm 2 \mu\text{m}$,加工介质为电火花专用煤油。测量设备选用 VTM-3020E 数字式影像工具显微镜。

2.2 蛇形弹簧端部微尖槽结构

某微小装置的蛇形弹簧端部要求在厚度 0.8 mm 的 304 钢上加工出深度 0.36 mm 、角度为 16° 的微尖槽结构,如图 1 所示,并保证其尺寸和位置精度。由于微尖槽在蛇形弹簧的端部并且与蛇形弹簧有固定的相对位置关系,因此考虑采用尖角电极电火花成形 16° 微尖槽。

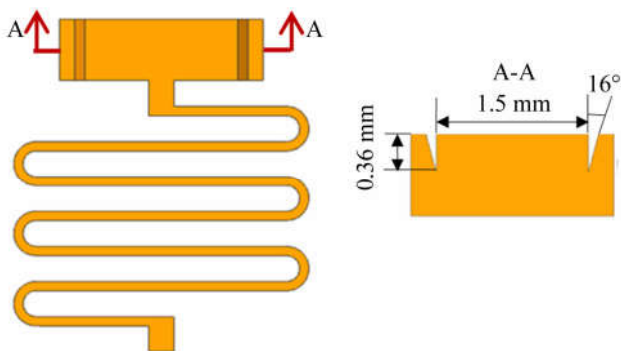


图 1 微尖槽结构

Fig. 1 Micro sharp groove

2.3 试验方法

电极材料直接决定材料去除率、电极损耗率、工件加工精度和表面粗糙度,使用高硬度、高熔点电极只能在一定程度上降低电极损耗;采用更换电极补偿法势必会引入重复定位误差;因此提出多工位组合电极电火花成形微尖槽的方法以减少电极损耗的影响和重复安装误差。

在 NA2400 三菱慢走丝电火花线切割机床上采用多次切割和匀速慢速相结合的方法制作多工位的铜钨合金和纯铜尖角电极,再在 EA8A 精密电火花成形机床上采用多工位组合电极成形微尖槽,通过开展 3,4,5 和 6 工位的试验研究探究不同工位对尖角成形的尺寸精度和形状精度的影响。由于铜钨合金电极的低损耗性能,达到相同的加工

形状精度下放电加工工位数必然比纯铜所需的要少。但从成本考虑,纯铜能否通过增加工位代替铜钨合金,纯铜和铜钨合金作为电极能否保证尖槽的加工精度都需进行进一步试验验证。

3 线切割多工位尖角电极

3.1 电极尺寸设计

成形电极的尺寸需考虑微尖槽设计尺寸和加工时的放电间隙,为了最大限度地保证尖槽形状和相对位置关系,将电火花加工时的放电间隙(单边缩小量)设定为机床的最小值 0.006 mm 。尖角电极的设计形状与微尖槽形状相似,且电极尖角角度仍为 16° ,为了避免连接底面发生放电,对连接面进行避空处理,将成形尖角电极高度设定为 3.5 mm 。

由于放电间隙的缘故,如果保证微尖槽侧边设计尺寸的要求,则加工深度无法保证,即放电区域底部(如图 2(a)所示阴影部分)无法加工到位,此时理论进给深度仅为 0.323 mm 。由于微尖槽的深度对该装置的性能影响尤为重要,因此采用图 2(b)的方案来满足深度加工的要求,即使放电区域正好接触到尖槽底端,此时理论的进给深度为 0.36 mm ,但尖槽侧边的范围会扩大。

为了保证微尖槽设计尺寸失真率较小,将左右侧 2 个电极的相对距离设定为 1.5 mm ,如图 3 所示;相应地,微尖槽入口尺寸由设计的 1.5 mm 和 1.706 mm 变为 1.488 mm 和 1.715 mm ,相对变化率分别为 0.8% 和 0.53% ,满足装置使用要求。

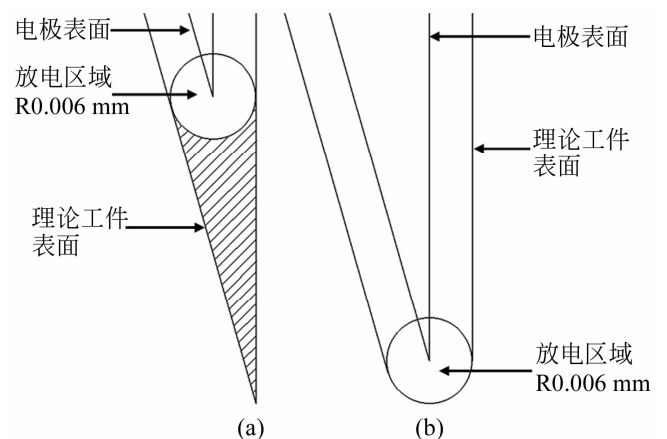


图 2 尖角电极尺寸设计

Fig. 2 Dimensional design of sharp-angle electrode



图 3 电极设计尺寸

Fig. 3 Design size of electrode

按照图 3 中设计的电极尺寸,采用机床默认的最佳进给模式下的参数进行一次切割纯铜和铜钨合金的初步试验。发现一次切割后电极表面有黏附物,且由于电极丝滞后效应,电极尖端存在塌角现象,如图 4 所示。因为电火花成形加工中电极的加工精度直接影响零件的加工精度,因此需提高电极表面质量和避免由电极丝滞后引起的外角塌角现象。

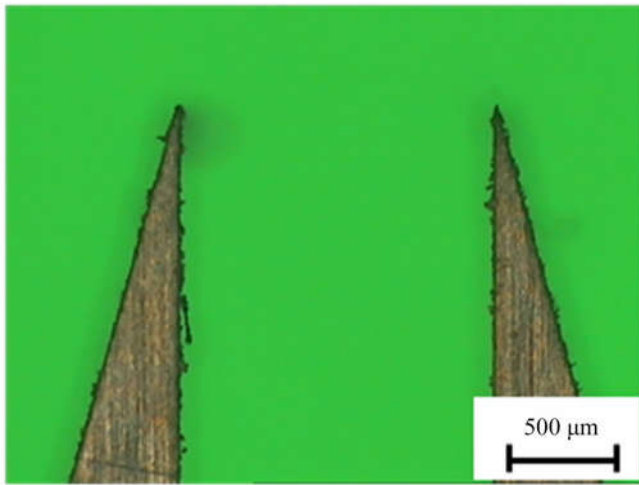


图 4 一次切割后的铜钨电极

Fig. 4 Copper-tungsten electrode after first cutting

3.2 多次和恒速慢速进给线切割

三菱 NA2400 慢走丝电火花线切割有 CM 控制模式,该模式主要适用于拐角加工,应用能量控制和轨迹补偿相结合的方法对拐角加工误差进行修正,减小在拐角处由于电极丝滞后、集中放电、二次放电等引起的外角塌角和内角圆弧现象。

轨迹补偿与能量控制策略是提高拐角加工精度的有效措施,多次切割是提高电极加工质量的有效方法,也是能量控制策略的重要体现,轨迹补偿可按照图 5 的切割轨迹进行补偿控制。走丝速度与切割表面质量完整性和电极丝滞后现象关系密切,走丝速度越快电极丝滞后现象会越明显,易

造成外角塌角。因此结合机床特性,采用匀速慢速和三次切割相结合的方法制作铜钨合金和纯铜电极来降低外角塌角现象和提高表面质量。电火花线切割主要参数见表 1,不同的加工工序对应不同的电规准,加工工序的设定与工件材料的物理性质、工件厚度等因素有关;随着切割次数的增加电极丝补偿量逐渐减小,第一次切割用于去除大部分加工余料,第二和第三次切割用于精加工修正,后两次的电极丝补偿量较为接近。

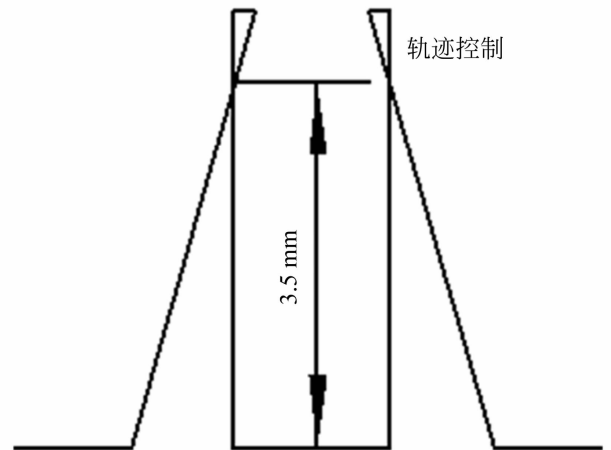


图 5 电极轨迹优化方案

Fig. 5 Optimization of electrode trajectory

表 1 电火花线切割尖角电极成形主要参数

Tab. 1 Main parameters for cutting sharp-angle electrode

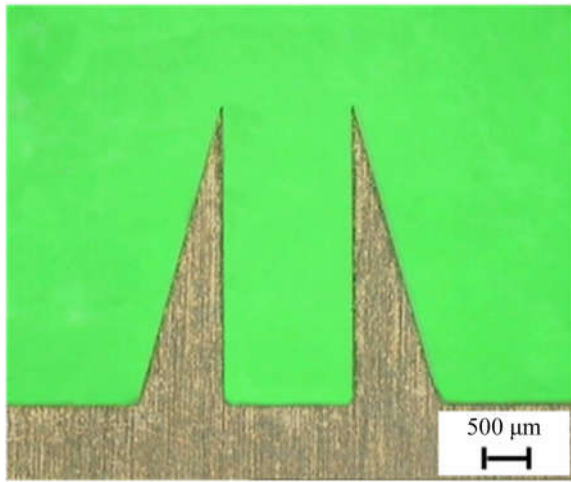
电极材料	电极丝补偿量/ μm	峰值电流 IP	基准电压 VG	切割速度 FA/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
铜钨	169	7	45	4
	119	6	95	3
	107	3	70	2
纯铜	200	10	80	4
	122	5	100	3
	112	3	96	2

注:未注明单位的为机床档位,非实际值。

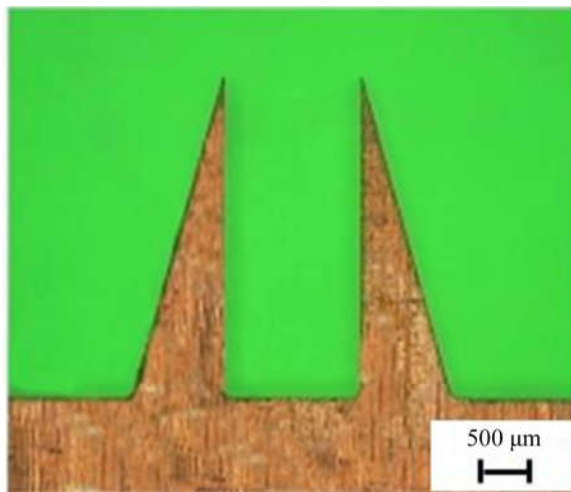
图 6 为 3 次切割后的铜钨合金和纯铜尖角电极,可以看出经 3 次切割后电极表面黏附物显著减少,表面质量较好,采用多次切割和匀速慢速相结合的方法可提高尖角电极尖端的拐角加工精度和表面质量。

初步采用铜钨尖角电极在 304 钢上成形尖角,在一个工位作用下,电火花成形尖槽的深度

0.32 mm(机床实际设定加工深度为 0.36 mm),微尖槽底部圆角较大,如图 7 所示,表明电极尖端极易损耗无法满足微尖槽的形状和尺寸精度要求。



(a) 铜钨合金电极
(a) Electrode of copper-tungsten alloy



(b) 纯铜电极
(b) Electrode of pure copper

图 6 3 次切割后的尖角电极

Fig. 6 Sharp-angle electrode after third times cutting

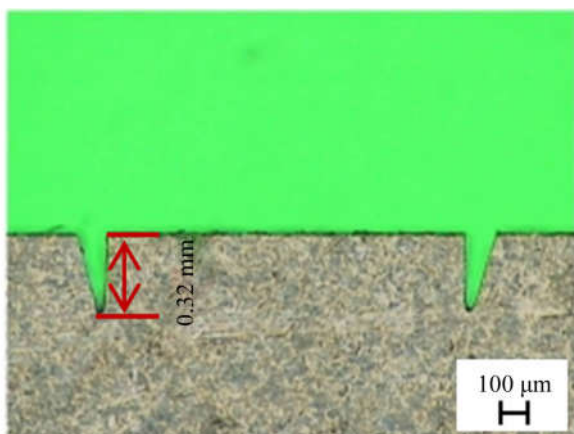


图 7 单工位成形微尖槽

Fig. 7 Sharp corner at first station cutting

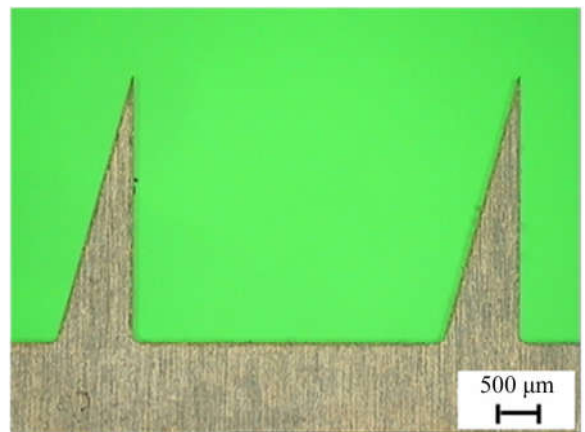
4 电火花成形尖槽试验

4.1 单尖角电极设计及制作

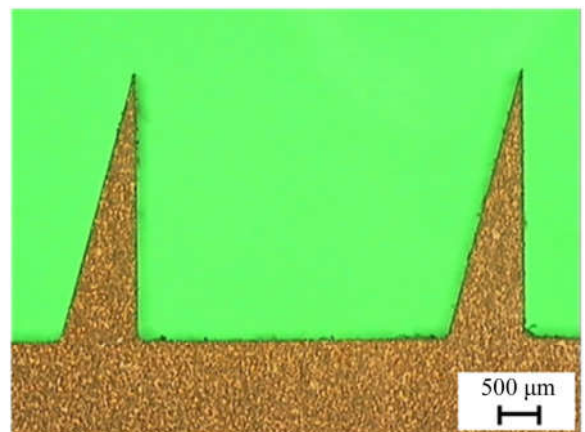
在加工微尖槽前,为提高电极利用率和节省材料成本,首先开展单尖角电极电火花成形微尖槽的初步试验,在获得较好的表面质量和形位精度后再使用双尖角电极电火花成形尖槽。

为节省材料,电极应在一次装夹时尽可能多地加工出更多工位,工位数设定从 3 工位、4 工位、5 工位直至 6 工位,各工位的相对距离为 5 mm。同时对电极进行避空处理并切割出垂直定位基准,通过千分表对垂直定位基准面找平保证电极与工件的相对位置关系。

基于前期研究,仍采用恒速慢速和三次切割相结合的方法电火花线切割加工铜钨合金和纯铜电极,如图 8 所示。



(a) 铜钨合金电极
(a) Electrode of copper-tungsten alloy



(b) 纯铜电极
(b) Electrode of pure copper

图 8 3 次切割后的单尖角电极

Fig. 8 Single sharp-angle electrode after third times cutting

4.2 电极装夹及工件定位

多工位组合电极需保证各工位间的相对位置以及电极和工件间的垂直关系,由 EROWA 快速装夹定位系统实现电极快速、准确地装夹定位。试验中 304 钢工件宽度应小于各工位的相对距离 5 mm,因此将工件横截面设计为 $3.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。

由于工件尺寸较小,工件装夹和定位难度较大,存在很大的人为误差,较难保证工件与电极的相对垂直关系。为此采用一定位块先将工件装配

夹紧,通过千分表对定位块找正来间接保证工件的位置度要求。工件形状设计成 L 形并与定位块底端的凹槽部分相配合,工件端部阶梯高度应略大于定位块的凹槽深度,高出部分用油石磨平,通过机床磁力工作台和定位块的凹槽将工件定位和夹紧。电火花成形中各工位的相对位置精度,均由高精度数控电加工机床保证,易于保证加工精度,提高加工效率。图 9 为工件、定位块和二者的整体装配图,图 10 为组合电极电火花成形尖槽的示意图。

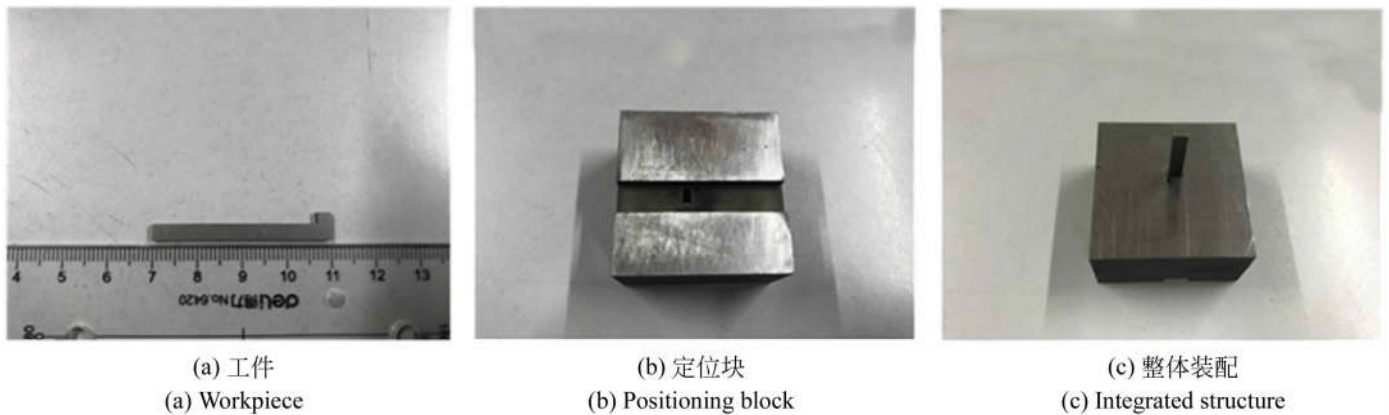


图 9 工件与定位块装配
Fig. 9 Assembly structure of workpiece and positioning block

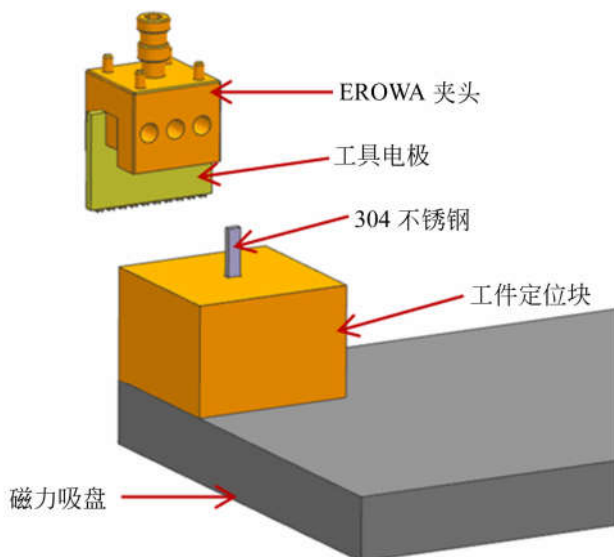


图 10 组合电极电火花成形尖槽示意图
Fig. 10 Schematic diagram of combined electrode by EDM

4.3 多工位单尖角电极电火花成形微尖槽试验

由于尖槽材料去除率很少(约 $0.36 \times 0.1 \times 2 = 0.072\text{ mm}^3$),因此不需要采用粗加工去除大部分加工余量,可将各个工位上的电规准直

接设置从半精加工到精加工,即选择较小的电规准和负极性加工方式。同时为了更有效地提高电极利用率,将各个不同工位上的加工深度和摇动形式都设置相同。

电火花加工中参数调整通过改变页面的粗糙度、加工底面积和单边电极缩小量等条件实现。试验中将各个工位的设置页面参数都设置相同,即每个工位的电参数和非电参数都保持一致,一个工位加工完毕后,只需改变电极的相对位置就可使下一工位移至上一工位处。

使用铜钨合金和纯铜电极加工微尖槽,工位从 3 工位逐渐增至 6 工位。鉴于尖角电极尖端损耗特性,微尖槽底部势必存在或大或小、无法避免的圆角,试验中将尖槽深度和成形角度作为主要评判指标。

从图 11 中可以看出,铜钨合金电极在成形微尖槽时,微尖槽的垂直段与工件平面的相对垂直度较好,由于工件的微尖槽部分是直通的,可通过测量前后面尖槽的深度间接判断电极和工件的相对垂直度关系,工件尖槽正反面的深度值相差不

大,证明电极和工件的相对垂直度关系良好;采用 3 和 4 工位时,铜钨合金电极由于尖端损耗不能较好成形,深度不能满足要求,底部有部分无法加工到位;采用 5 和 6 工位时,成形深度接近设定尺寸,且加工表面黏附物较少、表面粗糙度较低、有较好的形状精度,6 工位时成形深度为 0.356 mm,相对误差为 1.1%,成形角度为 16.3°,相对误差 1.9%。各工位下尖槽底端的圆角半径相差不大。

图 12 中,纯铜合金电极在成形微尖槽时,微尖槽的垂直段与工件平面的相对垂直度也较好;采用 3 和 4 工位时,纯铜电极由于尖端损耗不能较好成形,深度不能满足要求,底部有部分无法加

工到位;采用 5 和 6 工位时,成形深度接近设定尺寸,且加工表面黏附物较少,表面粗糙度较低,有较好的形状精度,微尖槽底端的圆角半径也相差不大。

比较铜钨合金和纯铜电极在相同工位下微尖槽的成形情况:微尖槽成形精度随着工位数的增加而增加;相同工位下,纯铜由于自身的物理性质不如铜钨合金,成形深度略低于铜钨合金加工的尖槽。因此从加工要求考虑选择 6 工位的铜钨合金电极加工微尖槽结构更为合理。

在此基础上,应用前述的左右成对电极放电加工的方法,最终获得满足设计和使用要求的零件。

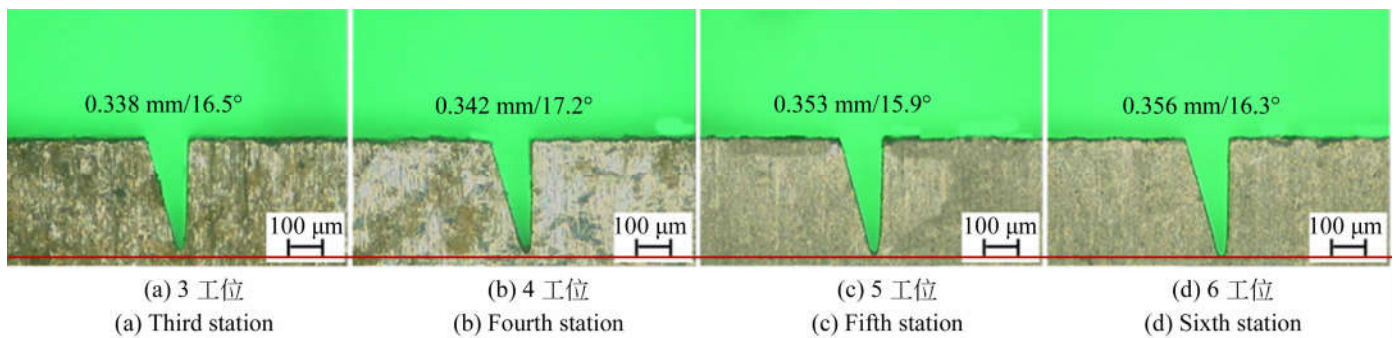


图 11 铜钨合金电极加工结果

Fig. 11 Machining phenomenon by copper-tungsten alloy electrode

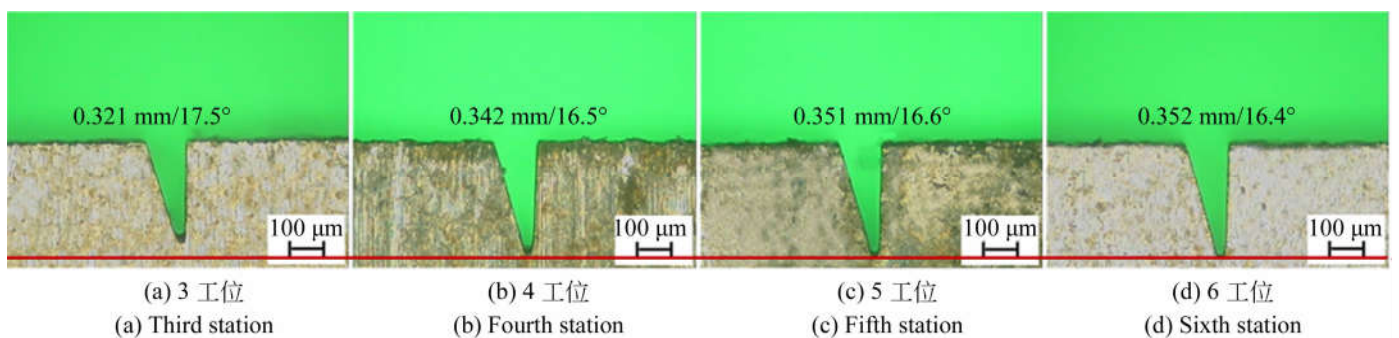


图 12 纯铜电极加工结果

Fig. 12 Machining phenomenon by pure copper electrode

5 结 论

针对加工某微小装置的局部微尖槽形状精度难以保证的问题,提出一种多工位尖角电极电火花成形的方法。

电火花线切割中采用较低进给速度,恒速多次切割的方法能制作出表面质量较优的多工位尖

角电极。

尖槽成形精度随着工位数的增加而提高,且相同工位数时由于铜钨合金电极的低损耗性能使尖槽成形精度更好。因此采用 6 工位的铜钨电极成形尖槽可获得较好的效果,尖槽成形角度为 16.3°、成形深度 0.356 mm、形状精度较好。该方法可以满足某微小装置中尖槽部分的加工精度和使用要求。

参考文献:

- [1] AVDESH C D, AMIT K, RAVINDRA K S, *et al.*. An experimental study of material removal rate and electrode wear rate of high carbon-high chromium steel (AISI D3) in EDM process using copper tool electrode[J]. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 2015, 1(2): 257-262.
- [2] PANDEY S N, ALAM S. An experimental investigation of electrode wear rate (EWR) on EDM of SS-202 using different electrodes [J]. *International Journal of Engineering Research and*, 2015, V4 (5): 2341-2347.
- [3] ASHANIRA M D, AZLAN M Z, ROSELINA S, *et al.*. Grey relational analysis of electrode wear rate in die sinking electric discharge machining[J]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, 12(7): 1799-1799.
- [4] NIAMAT M, SARFRAZ S, AZIZ H, *et al.*. Effect of different dielectrics on material removal rate, electrode wear rate and microstructures in EDM[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 60: 2-7.
- [5] KHAN A A. Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39(5/6): 482-487.
- [6] 宋满仓, 李文明, 刘莹, 等. 多工位组合电极电火花成形微凹槽结构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3371-3377.
- SONG M C, LI W M, LIU Y, *et al.*. Micro groove structure with multi-station combination electrode by EDM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3371-3377. (in Chinese)
- [7] 袁松梅, 赵万生, 刘维东, 等. 超声电火花复合加工的研究进展[J]. *航空精密制造技术*, 1998, 34(6): 18-21.
- YUAN S M, ZHAO W SH, LIU W D, *et al.*. Progress report of ultrasonically assisted EDM[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1998, 34(6): 18-21. (in Chinese)
- [8] 许家源. 超声振动辅助电火花放电表面改性技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- XU J Y. *Ultrasonic Vibration Assisted EDM Surface Modification*[D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- [9] 亓立. 超声振动工作液复合电火花加工基础工艺的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- QI L. *Basic Process Research on Electrical Discharge Machining with Ultrasonic Vibration of Dielectric Fluid* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (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



李阳(1993—),男,江苏淮安人,硕士研究生,2016年于南通大学获得学士学位,主要从事电火花加工技术的研究。E-mail: liyang300@163.com

(本栏目编辑:秦 思)