

# 慢波结构微细内槽电火花加工 用工具电极的制作方法及应用\*

任连生<sup>1,2,3</sup>, 杨立光<sup>1,3</sup>, 郭妍<sup>1,2</sup>, 伏金娟<sup>1,2</sup>

(1. 电火花加工技术北京市重点实验室, 北京 100191;

2. 北京市电加工研究所, 北京 100191;

3. 北京迪蒙数控技术有限责任公司, 北京 100191)

**[摘要]** 针对微波真空电子器件中的关键零部件——慢波结构微细内槽的加工难题, 提出了一种电火花微细加工内槽的方法; 设计制作了片状叠式组合的工具电极, 通过这种电极的工艺试验, 确定了损耗低、加工稳定可靠的电火花加工参数与条件, 实现了对慢波结构微细内槽的加工。结果表明: 采用电火花加工工艺方法和所制作工具电极是解决慢波结构微细内槽加工的有效方法之一, 所加工零件满足了图纸要求。

**关键词:** 电火花加工(EDM); 慢波结构; 微细内槽; 工具电极; 加工工艺

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.04.043



任连生

副研究员, 北京迪蒙数控技术有限责任公司总经理, 电火花加工技术北京市重点实验室副主任, 北京市电加工研究所与首都航天机械有限公司共建“特种加工技术联合实验室”副主任。作为主要完成人参加了4项国家科技重大专项及1项国家“863计划”研发, 参与多项国家、省部级项目研究, 授权发明专利10余项, 荣获中国机械工业科学技术奖一等奖、北京市科学技术进步奖等10余项。

微波真空电子器件具有高工作频率、高峰值功率和高平均功率等特点, 已广泛应用于雷达、通信、电子对抗、电视广播、粒子加速器、可控热核聚变装置、微波遥感、微波能应用等军用和民用微波电子系统。慢波结构是微波真空电子器件实现微波信号的产生或放大的最核心部件, 随着现代技术的飞速发展, 对器件的工作频段要求越来越高, 功率越来越大, 这已成为真空电子器件追求的目标, 这就对如何实现慢波结构的精密加工提出了挑战<sup>[1-4]</sup>。

众所周知, 慢波结构具有尺寸小、精度高、内槽排布密集且微细、结构异型等特点<sup>[2]</sup>。鲁义凡等<sup>[5]</sup>采用微铣削的方式加工大赫兹慢波结构, 但依然存在加工微裂纹以及刀具制作困难的问题。在众多的精密加工

工艺技术中, 电火花加工技术以其无切削力、精密微细、以柔克刚等显著特点<sup>[6-7]</sup>成为这种结构加工的方法之一, 采用精密微细电火花加工技术不仅能够得到非常窄的槽, 而且能够达到高的尺寸精度和低的表面粗糙度要求<sup>[8-10]</sup>。

慢波结构一般在孔的内表面加工很多条宽度很窄、深度较浅、间距较小的微细槽。图1(a)所示为一种具有慢波结构的零件示意图, 图1(b)为结构局部放大示意图。这种零件需要加工的主要部位包括沟槽直径 $D$ 、基孔直径 $d$ 、沟槽宽度 $a$ 、沟槽间距 $b$ 等几个主要尺寸, 而且沟槽的外形、尺寸根据产生的波谱特性不同而有不同的要求。

图1所示慢波结构零件有27条内槽, 下面是内沟槽主要尺寸及精度

\* 基金项目: 北京市科技新星计划(z181100006218078)。

要求:

(1) 慢波结构沟槽底径  $D$ :  $(6.2 \pm 0.01) \text{ mm}$ ;

(2) 慢波结构基孔直径  $d$ :  $(6 \pm 0.01) \text{ mm}$ ;

(3) 沟槽宽度  $a$ :  $0.15^{+0.04}_0 \text{ mm}$ ;

(4) 沟槽间距  $b$ :  $(0.35 \pm 0.01) \text{ mm}$ ;

(5) 慢波结构总长度  $L$ :  $0.15 \times 27 + 0.2 \times 26 = 9.25 \text{ mm}$ ;

(6) 加工表面粗糙度  $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。

上述尺寸中,  $D$  和  $d$  尺寸相差很小, 其差值决定槽深尺寸, 该结构槽深为  $(D-d)/2 = (6.2-6)/2 = 0.1 \text{ mm}$ 。

通过对慢波结构、尺寸及精度分析, 如何方便而准确地制造出工具电极是实现这类零件电火花加工十分重要的问题, 由于工具电极的材料、类型、几何形状复杂程度及精度要求不同, 工具电极的加工方法也不同, 最常用的工具电极的制造方法有机械加工、电火花线切割加工等方法。工具电极的结构形式应根据型腔的尺寸大小、复杂程度及加工工艺性来确定, 常用的结构形式通常是整体式工具电极。但是, 对于图 1 所示的慢波结构, 由于尺寸小、结构复杂、精度要求高的特点, 采用机械方法加工整体式工具电极较难满足尺寸和精度要求<sup>[3]</sup>。

本文提出了一种用于慢波结构电火花加工用工具电极的结构和制作方法, 并用所制作的工具电极和优化的工艺参数实现了对图 1 所示慢波结构零件的电火花加工, 且达到了尺寸和精度要求, 下面分别进行介绍, 抛砖引玉, 希望对业内人士有所启迪和帮助。

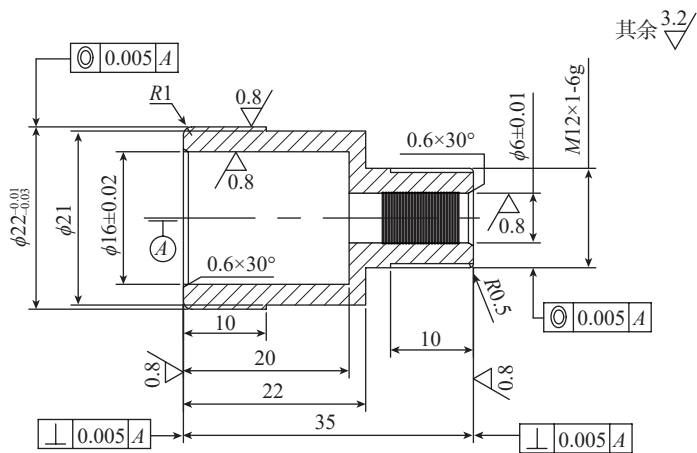
### 工具电极的结构设计与制作方法

图 2 是本文针对图 1 提出的能够加工结构复杂、精度要求高的慢波结构微细内槽电火花加工用叠式组合工具电极结构示意图。

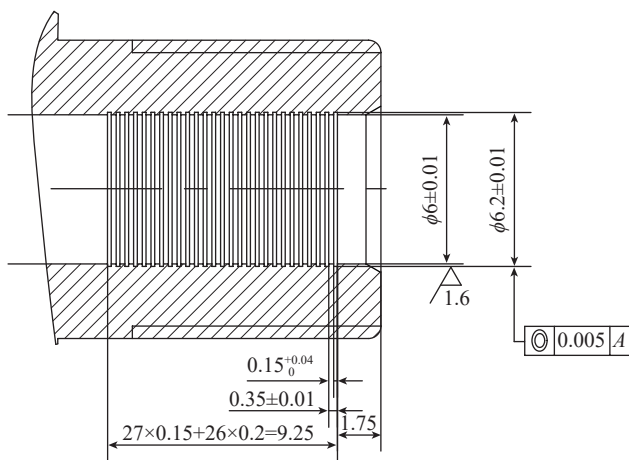
这种慢波结构微细内槽电火花加工用叠式组合工具电极由定位芯轴、电极片、间距垫片、定位轴套和

锁紧螺母组成。结构设计如下:

(1) 定位芯轴上间隔地套入工具电极直径较大的电极片和直径较



(a) 慢波结构的零件示意图



(b) 结构局部放大示意图

图1 慢波结构的零件示意图

Fig.1 Schematic diagram of slow wave components

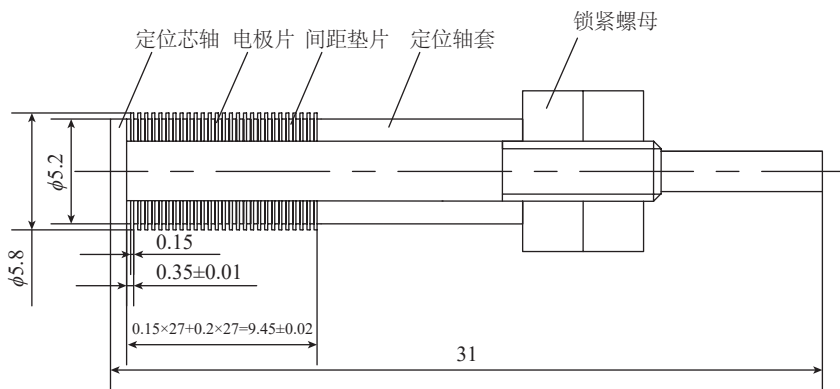


图2 电火花加工用叠式组合工具电极结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of stacked combination electrode tools for EDM

小的间距垫片,定位芯轴上设置轴向定位结构,使得电极片和间距垫片在定位芯轴上进行轴向定位,轴向定位结构再套入电极片和间隔垫片的轴段两侧,其中一侧利用定位芯轴直径较大的轴端面形成定位轴肩,该较大直径轴的直径小于电极片的外径,另一侧套入定位轴套,在定位轴套的外侧用锁紧螺母固定并压实。

(2) 定位芯轴与间距垫片和电极片内孔采用精密配合,以满足定位精度和接触的稳定性要求,定位芯轴的轴公差为  $h_6$ , 电极片和间距垫片的孔公差是  $P_7$ 。电极片和间距垫片在定位芯轴上的过盈程度不能太大,如果过大,在安装过程中就很难避免两者尤其是电极片的形变,由此则可能造成工具电极的精度降低,影响慢波结构的加工精度。但是,如果过盈程度较小,则不能保证电极片与定位芯轴的一体化程度,这样也会影响到加工慢波结构时候的加工精度。

(3) 电极片的厚度决定加工槽的宽度,间距垫片的厚度决定加工相邻内槽的间距,电极片和间距垫片优选相同的铜材质制作。

这种慢波结构微细内槽电火花加工用叠式组合工具电极的制作方法如下:

(1) 制作出定位芯轴、定位轴套和锁紧螺母,通常材料为45#调质钢。

(2) 根据慢波结构中内槽宽度和相邻内槽的间距选择设定电极片和间距垫片的厚度,依前述设定厚度选用同样厚度的铜片材或研磨铜片材达到设计厚度要求,然后用单向(低速)走丝电火花线切割机床或压制的方法制成电极片和间距垫片。

(3) 将定位芯轴冷却,再将电极片和间距垫片按设计的数量间隔地套在定位芯轴上,再套入定位轴套,通过定位结构轴向定位,通过锁紧螺

母固定并压实。

(4) 将组合好的工具电极安装在电火花成形机床的主轴上,利用电火花成形机床的在机反拷贝功能,对电极外径进行在机修正,完成所需尺寸的叠式组合电极的制作。这种在机反拷贝修正工具电极的方法既保证了工具电极外圆的圆柱度,又保证了工具电极在机床上的相对精确位置。

与传统的整体式工具电极相比,本文提出的慢波结构微细内槽电火花加工用叠式组合工具电极具有易于制造和保证加工精度的特点,易于调整组合成不同槽宽、槽间距并形成系列标准的特点。用机加工方式车削出整体式工具电极的制作方法,其精细度和细密度都受到加工刀具的限制,其形状尺寸精度又受到机加工精度限制,而这些问题采用本文提出的叠式组合工具电极,都是非常容易解决的。电极片和间距垫片可以通过选择符合要求厚度的片材,采用单向(低速)走丝电火花线切割机床或压制的方法制作,由此可以制作出更加精细的工具电极,慢波结构中微细内槽的细密性可以通过本组合电极方便地得到,制作的电极片和间距垫片可以容易地保证其形状和尺寸精度,因此,用本文提出的叠式组合工具电极加工慢波结构,其加工精度可以得到保障。另外,这种组合电极相较于整体式电极还具有损耗的电极片更换方便,从而实现电极重复使用,降低使用成本的优点。

## 慢波结构的电火花加工方法和结果

### 1 电火花加工方法

#### 1.1 加工机床选择

为解决慢波结构零件加工尺寸、精度和工艺参数选择等技术问题,采用北京迪蒙数控技术有限公司生产的ADV400精密数控电火花成形机床,如图3所示。该机床主要技术参数和功能: X、Y、Z行程  $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 272\text{mm}$ , 定位精度  $0.008\text{mm}$ , 重复定位精度  $0.003\text{mm}$ , 具有放电能量精确控制回路和低损耗回路,电极损耗  $\leq 0.05\%$ , 具有镜面加工PIKA回路,表面粗糙度  $R_a \leq 0.08\mu\text{m}$  (铜-钢), 可满足试验要求。

#### 1.2 加工试验条件

(1) 工具电极采用前文所制作的微细内槽电火花加工用叠式组合工具电极,表1是对叠式组合工具电极的检测结果。

(2) 慢波结构零件材料: 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,特征尺寸如图1



图3 ADV400精密数控电火花成形机床  
Fig.3 ADV400 precision CNC EDM

表1 叠式组合工具电极检测结果

Table 1 Test results of stacked combination electrode

序号	检验项目	公称值/mm	实测值/mm	检测结果	检测方法
1	槽宽尺寸	$0.12 \pm 0.01$	0.122	合格	测量显微镜型号: MF-B2010B 精确度: 0.0001
2	槽距尺寸	$0.35 \pm 0.01$	0.351	合格	
3	外径尺寸	$\phi 5.8 \pm 0.01$	$\phi 5.8$	合格	
4	加工表面粗糙度	$R_a \leq 1.6\mu\text{m}$	$R_a \leq 1.6\mu\text{m}$	合格	样板对比

所示,除 27 条内槽由电火花成形加工外,其余尺寸均由机械加工完成。

(3) 电火花成形加工选用参数: 此结构在电火花成形加工中,重点关注中精加工的电极损耗率、表面粗糙度、加工精度,而脉冲电源的极性、脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、加工深度、电极单边缩量等参数与加工效果有着密切的联系,是重要的工艺参数<sup>[6]</sup>。为此选用降低电极消耗回路 HP 和保护电极 PP 回路,PP 回路具有抑制电极表面的凹凸、由于尖角热影响而产生的弯曲等功能,同时只选用一档中精工艺参数进行加工,此参数需同时满足表面粗糙度  $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$  的要求,选用电火花成形加工参数见表 2。

(4) 工作液: 选用 DIC-302 型专用电火花加工液。该工作液挥发率低、气味小,闪点高( $>110^\circ\text{C}$ )、安全性好、黏度低、流动性好,有利于排屑加工。

## 2 加工结果与分析

加工后采用往复(高速)走丝电火花线切割机床对慢波结构零件进行剖切,然后对加工断面进行槽宽尺寸和间距检验;用表面粗糙度标准样板与加工表面质量进行比对,检验加工后槽的表面质量。图 4 是沿着中心剖切后慢波结构零件一半的照片;图 5 是用日本三丰测量显微镜(型号: MF-B2010B)截取的内沟槽正立像照片,放大倍数为 50X,从照片可看出加工后的内沟槽线条清晰、形状和表面质量均匀性好,与表面粗糙度标准样板比对表面粗糙度  $R_a$  介于  $1.6\mu\text{m}$  和  $0.8\mu\text{m}$  之间;表 3 是对慢波结构零件内沟槽的检测结果。

由图 4、5 和表 3 可知,实现了慢波结构零件内沟槽的加工,且内沟槽线条清晰,形状和表面质量均匀性好;检测沟槽宽度  $a$  为  $0.17\sim 0.18\text{mm}$ ,沟槽间距  $b$  为  $0.351\text{mm}$ ,沟槽直径  $D$  为  $6.19\text{mm}$ ,表面粗糙度与标准样板比对,  $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$ ,加工结果符合设计

表2 电火花成形加工参数  
Table 2 EDM process parameters

条件	脉冲宽度 ON/ $\mu\text{s}$	脉冲间隔 OFF/ $\mu\text{s}$	峰值 电流 $I_p/\text{A}$	伺服基 准电压 $S_v/\text{V}$	加工极性 PL	空载电压 $U/\text{V}$	HP回路	PP回路	伺服速度/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
C310	18	15	3.0	60	+	90	051	10	20

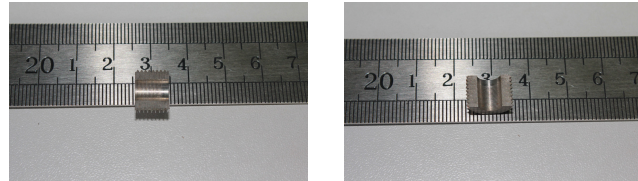


图4 从工件上取下试块后的照片

Fig.4 Photograph after removing test block from workpiece

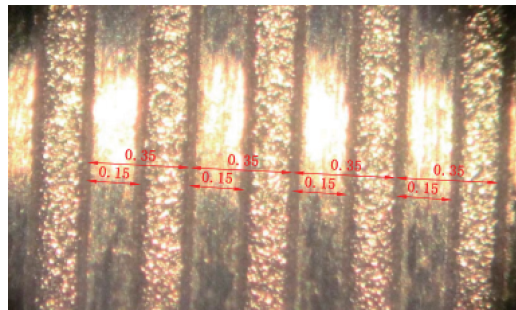


图5 内沟槽正立像照片

Fig.5 Normal photograph of internal groove

表3 慢波结构零件内沟槽检测结果

Table 3 Test results of internal grooves of slow-wave structural parts

序号	检验项目	公称值/mm	实测值/mm	检验结果	检验方法
1	沟槽宽度 $a$ 尺寸	$0.15_0^{+0.04}$	$0.17\sim 0.18$	合格	测量显微镜型号: MF-B2010B 精确度: 0.0001 检测3条内沟槽
2	沟槽间距 $b$ 尺寸	$0.35\pm 0.01$	0.351	合格	
3	沟槽直径 $D$ 尺寸	$6.2\pm 0.01$	6.19	合格	
4	加工面表面粗糙度	$R_a \leq 1.6\mu\text{m}$	$R_a \leq 1.6\mu\text{m}$	合格	样板对比

计要求。

## 结论

通过对试验方法的验证和结果分析,可得初步结论如下:

(1) 本文提出的一种慢波结构微细内槽电火花加工用叠式组合电极结构及制作方法,以及电火花加工工艺技术是实现这类零件加工的一种有效方法。

(2) 利用所制作电极,实现了慢波结构零件内沟槽的精密加工,所加工慢波结构零件满足了图纸尺寸和表面质量要求,对类似零件的电火花加工有很好的借鉴作用。

(3) 此工艺方法不仅能够完成圆柱形状的内、外沟槽电火花加工,而且利用同样原理也可以推广到异型孔沟槽的加工,如方形、花瓣形、三角形等形状的电火花加工。

## 参考文献

- [1] 段兆云,王新,唐先鋒,等.超材料微波真空电子器件的研究进展[C]//第十八届全国等离子体科学技术会议摘要集.西安,2017.
- DUAN Zhaoyun, WANG Xin, TANG Xianfeng, et al. Advances in microwave vacuum electronic devices for metamaterials[C]//Abstracts of the 18th National Conference on Plasma Science and Technology. Xi'an, 2017.
- [2] 张军,钟辉煌,舒挺.切伦柯夫相互作用中分段式慢波结构与均匀慢波结构的比较研究[J].强激光与粒子束,2004,16(3):345-348.
- ZHANG Jun, ZHONG Huihuang, SHU Ting. Comparative investigation between the uniform slow-wave structure and the sectional slow-wave structure in Cerenkov interaction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(3): 345-348.
- [3] 付成芳,赵波,杨玉东,等.面向太赫兹真空电子器件应用的基于微加工技术的矩形环-杆结构慢波特性研究[J].真空科学与技术学报,2018,38(8):719-726.
- FU Chengfang, ZHAO Bo, YANG Yudong, et al. Characteristics of micro-fabricated rectangular ring-bar slow wave structure for THz vacuum electron devices: A simulation and theoretical study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(8): 719-726.
- [4] 吴春亚,郭闯强,裴旭东,等.太赫兹段慢波结构的微细加工技术研究新进展[J].机械工程学报,2019,55(7):187-198.
- WU Chunya, GUO Chuangqiang, PEI Xudong, et al. New progress of microfabrication techniques for slow wave structures at THz frequencies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 187-198.
- [5] 鲁义凡,陈明君,王廷章,等.太赫兹慢波结构微铣削装置的优化设计及模态分析[J].航空精密制造技术,2019,55(4):5-9.
- LU Yifan, CHEN Mingjun, WANG Tingzhang, et al. Optimization design and modal analysis of micro-milling equipment with terahertz slow wave structure[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(4): 5-9.
- [6] 曹凤国.电火花加工技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- CAO Fengguo. Electric discharging machining technique[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] 王振龙.微细加工技术[M].北京:国防工业出版社,2005.
- WANG Zhenlong. Micro-fabrication technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [8] 崔晶,李勇,熊英.一种高深宽比微细槽的电火花加工工艺[J].北京工业大学学报,2010,36(3):289-294.
- CUI Jing, LI Yong, XIONG Ying. Processing approach of deep micro slit by micro EDM[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(3): 289-294.
- [9] 张扬,陈济轮,李森,等.典型微结构的微细电火花加工工艺研究及工程应用[J].航天制造技术,2013(5):1-5.
- ZHANG Yang, CHEN Jilun, LI Sen, et al. Technical research and engineering application of typical micro-structure produced by MEDM[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(5): 1-5.
- [10] 王元刚,王虎,吴蒙华,等.微细电火花加工圆柱电极的损耗研究[J].现代制造工程,2013(2):9-14.
- WANG Yuangang, WANG Hu, WU Menghua, et al. An investigation of rod electrode wear in micro-EDM[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(2): 9-14.

通讯作者:郭妍,硕士,副研究员,主要从事电火花加工技术的研究与项目管理,E-mail: guoyan@biem.com.cn.

## Fabrication Method and Application of EDM Tool Electrode for Machining Micro Internal Grooves of Slow Wave Structure

REN Liansheng<sup>1,2,3</sup>, YANG Liguang<sup>1,3</sup>, GUO Yan<sup>1,2</sup>, FU Jinjuan<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Electrical Discharge Machining Technology, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Electro-Machining, Beijing 100191, China;

3. Beijing Dimeng CNC Technology Co., Ltd., Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the problem of machining the micro-inner grooves of slow-wave structure, the key component of microwave vacuum electronic devices, a method of micro-electrical discharge machining the micro-inner grooves is proposed in this paper. The tool electrode was designed and fabricated by means of laminar combination. The EDM parameters with low loss and reliable processing were determined through the technological experiment of this electrode, and the machining of micro-inner groove of slow-wave structure was realized. The results show that the EDM technology and the combination tool electrode are one of the effective methods to solve the problem of slow-wave structure micro-groove machining, and the workpiece can meet the requirements of the drawing design.

**Keywords:** Electrical discharge machining (EDM); Slow wave structures; Micro internal grooves; Tool electrode; Techniques

(责编 阳光)