### 文章编号: 2095-4980(2014)03-0330-04

# 0.22 THz 折叠波导慢波结构微细 WEDM 加工技术

刘 俊,周亚军,戴晶怡,向 伟,王亚军,陈 虎

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要: 0.22 THz 折叠波导慢波结构具有尺寸小,刚度低,精确度与表面光洁度要求高,结构复杂的特点。若采用微数控铣削加工方式,加工产生的应力易造成零件变形。微细电火花线切割加工技术为无刚性电蚀加工,非常适合慢波结构的微细加工。本文从微能脉冲电源、微细电极丝、表面质量、表面残余应力等方面,介绍了 0.22 THz 折叠波导慢波结构微电火花线切割加工技术,实践证明:采用微电火花线切割加工工艺加工出的 0.22 THz 折叠波导慢波结构,经测试满足了设计要求。

**关键词:** 折叠波导慢波结构; 微细电火花线切割; 表面质量; 表面残余应力 中图分类号: TN124<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **doi**: 10.11805/TKYDA201403.0330

## Micro-WEDM technology of 0.22 THz folded waveguide slow wave structure

LIU Jun, ZHOU Ya-jun, DAI Jing-yi, XIANG Wei, WANG Ya-jun, CHEN Hu (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Manyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** The conventional mechanical processing couldn't be used in the manufacturing process of 0.22 THz folded waveguide slow wave structure due to its small-scale and low stiffness characteristics. The Micro-Wire cut Electrical Discharge Machining(WEDM) technology suits to the processing of such structure since the macro force between the electrode and workpiece is small in Micro-WEDM processing. The related issues of Micro-WEDM technology in fabricating the 0.22 THz folded waveguide slow wave structure are discussed, including pulse generator with micro energy, micro-electrode, surface quality and residual stress. The practice test indicates that the manufactured 0.22 THz folded waveguide slow wave structure by using Micro-WEDM technology can meet its design requirements.

**Key words:** folded waveguide slow wave structure; Micro-Wire cut Electrical Discharge Machining; surface quality; residual stress

在太赫兹通信系统和太赫兹雷达系统中,需要较大的输出功率以提高通信距离和雷达分辨力,太赫兹折叠波导行波管作为一种功率放大器件,具有高效率、宽带宽等优点,能够使信号提高 20 dB~30 dB,是超高速 THz 通信系统、高分辨力 THz 雷达系统中的关键器件之一。折叠波导是太赫兹折叠波导行波管中的关键部件,其主体结构为带贯通大长径比微孔的 S 型重复折叠腔体结构,由于其细微复杂结构,制造技术成为制约太赫兹波段行波管研制的瓶颈技术之一<sup>[1]</sup>。当前科技发达国家开发了多种微加工方法,用于微型折叠波导慢波电路的制造,例如光刻、电铸、注塑(Lithografie,Galvanoformung,Abformung,LIGA)、深紫外光光刻、电铸成型(Utlraviolet-LIGA,UV-LIGA)和深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)。美国空军支持的 CCR 公司正在研发以折叠波导作为慢波结构的行波管放大器,利用 LIGA 技术和电火花切割技术(Electrical Discharge Machining, EDM)加工折叠波导慢波结构。图 1 为 Teraphysics Corporation 公司加工的工作频率为 650 GHz 的折叠波导电路<sup>[2]</sup>。图 2 为威斯康星大学用 DRIE 和 UV-LIGA 加工的折叠波导慢波结构<sup>[3]</sup>。

0.22 THz 折叠波导慢波结构的特征尺寸只有几十至几百微米,属于介观尺度的范围(介观尺度指介于宏观和 微观之间的尺度,通常认为在纳米至毫米之间)。目前用于介观尺度零件加工的主要技术是微机电系统(MEMS) 加工技术和超精密加工技术,但针对 0.22 THz 折叠波导慢波结构的加工,这 2 种加工技术均难以达到设计要求

的尺寸及形位精确度。MEMS 技术加工难以加工复杂 3-D 形状产品,且对此类细长深窄缝(缝深比大于 8)结构, 腔壁垂直度效果不佳。而铣削等加工方式对深窄缝结构则难以达到零件要求的表面粗糙度。本文通过加工实验, 合理分解 0.22 THz 折叠波导慢波结构, 使之适合于微细电火花线切割 Micro-WEDM 加工, 制造出尺寸、形位精 确度及表面粗糙度均满足设计要求的零件。





Dimensions:71.5 µm long,86.5 µm wide,23.4 pitch Fig.1 Folded waveguide slow wave structure by LIGA technology Fig.2 Folded waveguide slow wave structure by UV-LIGA and DRIE technology 图 1 LIGA 加工的折叠波导慢波结构

图 2 UV-LIGA 和 DRIE 技术加工的折叠波导慢波结构

#### 折叠波导慢波结构的微细电火花线切割加工 1

微细电火花线切割加工采用直径为微米级的电极丝进行线切割加工,电极丝一般采用微细钢丝、铜丝(表面 覆锡)等材料,可加工结构复杂的微细零件。微细电火花线切割关键技术是适于微细电极丝的走丝机构以及微能 脉冲电源。

0.22 THz 折叠波导慢波结构的结构复杂,尺寸小,刚度低,精确度及光洁度要求极高。若采用微数控铣削等 加工方式,加工产生的内应力极易造成零件变形,而在电火花线切割加工中,电极丝与工件无直接接触,放电产 生的作用力极小,且加工效率比其他传统加工方法更高。因此,微细电火花工艺非常适合于慢波结构的微细加工。

#### 1.1 微能脉冲电源

微细电火花线切割加工是在电极丝和工件之间脉冲放电,使金属工件表面因高温而融化、气化。因电极丝非 常微细,脉冲电源必须能够精确进行微能放电(一般在 10<sup>-6</sup> J~10<sup>-7</sup> J 量级)。在微能脉冲电源技术上,日本三菱公 司研制出能够达到加工表面粗糙度 Ry(轮廓最大高度)1 μm、尺寸精确度±0.2 μm 的超精加工脉冲电源,且能在微 小放电能量下持续稳定工作<sup>[4]</sup>。哈尔滨工业大学特种加工研究所研制出新型晶体管可控 RC 微能脉冲电源,采用 此电源加工的表面粗糙度 Ra(轮廓的平均算术偏差)达到 0.098 μm<sup>[5]</sup>。

#### 1.2 微细电极丝

微细电极丝的材料与制造技术是提高加工精确度及 表面质量的关键技术之一, 而电极丝技术的突破往往会 引起电火花线切割机设计的革新。

0.22 THz 折叠波导慢波结构零件复杂,几何特征尺 寸为微米级,轮廓尺寸精确度高,S形腔体(窄槽)宽度仅 约100 µm,厚度约1 mm。电极丝直径必须不大于50 µm, 这样才能进行重复、微量的切割,且能提高零件S形"锯 齿"部分(厚度约 80 μm)表面质量,以达到零件要求的尺 寸、形状精确度及表面粗糙度。微细电极丝需有效传输 峰值超过数百安培的高频脉冲切割电流,同时还需具有



Fig.3 0.22 THz folded waveguide slow wave structure 图 3 0.22 THz 折叠波导慢波结构

良好抗拉强度。随着电极丝直径的减小,极易在加工中因机械力或高温引起断丝,使加工中断,影响加工质量, 不能进行正常加工。现在,微细电极丝的材料一般不采用钨或钼合金,而是采用表面镀覆黄铜等镀层的钢丝,其 拉伸强度高达2000 N/mm<sup>2</sup>以上,为普通电极丝的2倍以上,俗称"钢琴线"。德国的 MICRO CUT 及日本的 SPWIRE 具有代表性。

331

采用微细电极丝加工可获得优良的表面质量与加工精确度, 适用于折叠波导慢波结构这类处于介观尺度、窄缝的加工,见图 3,慢走丝设备电极丝直径为 50 μm,对 0.22 THz 折叠波导慢波 结构切割工艺参数进行了优化,加工出的尺寸精确度为±2 μm, 表面粗糙度 *R*a 达到 0.4 μm。

#### 1.3 表面质量

0.22 THz 折叠波导慢波结构波导壁的金属损耗对电波传播 特性的影响不容忽视。在 THz 频段,导体的趋肤深度为亚微米量 级,通过提高波导壁的表面粗糙度或者降低线切割电蚀层厚度, 都可以改善其传播特性。

理论上,折叠波导慢波结构 表面粗糙度越高,电波传播损耗 越小。但线切割加工的工件表面 因高温融化、气化而产生的放电 痕,见图 4,表面粗糙度由这些圆 滑的小凹坑决定。采用微细电火 花线切割加工,不多的切割次数 即可获得较好的表面粗糙度,若 进行多次微进给量的切割,能够 获得更加优良的表面粗糙度。图 5 显示了在粗割及修切 5 次后 1Cr18Ni9Ti 材料的表面三维效果 对比,修切 5 次后表面粗糙度 *R*a 为 0.4 μm。

几乎不受影响。图 6 显示了 1Cr18Ni9Ti 工件修切 5 次后 观察到的横切面电蚀层厚 度,粗割后平均电蚀层厚度 约 20 μm,经过 5 次修切后, 电蚀层仅有约 1.5 μm,且没 有明显的表面异常。以上表 面质量参数基本满足 0.22 THz 折叠波导慢波结构设计要 求,通过微电火花线切割加 工工艺优化及设备改进,尚 有进一步提高空间。

40 μm

Fig.4 Trace caused by surface discharge 图 4 表面放电痕



Fig.5 3-D picture of surface (rough and finishing machining) 图 5 粗割(Ra:3.5 µm)和精修(Ra:0.4 µm)后表面的三维图形

通过优化精加工工艺,如调整脉冲放电能量,改善工作液等,表面电蚀层几乎为零,材料机械及物理性能也



Fig.6 Section(1Cr18Ni9Ti) by rough and finishing machining 图 6 粗割和修切后的 1Cr18Ni9Ti 横切面图

#### 1.4 表面加工应力

应用微细电火花线切割加工,0.22 THz 折叠波导慢波结构这类长微孔一折叠结构腔体零件在加工过程中几乎 不产生形变。用剪切力去除材料的工艺(如铣削等)会在加工表面产生加工应力,从而导致零件变形,无法满足慢 波结构零件的形状及位置精确度。线切割加工靠熔化和气化效应,电极与工件无物理接触,材料的去除靠电腐蚀, 不会给零件带来附加的加工应力,所加工零件几乎无变形。如图 7 所示,Udimet 720 和 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 工 件在不同线切割次数下表面残余应力对比,随着切割次数的增加,表面残余应力迅速降低<sup>[6]</sup>。

0.22 THz 折叠波导慢波结构加工中及加工完成静置一段时间后,尺寸及形位精确度没有变化,可见线切割加工产生的表面残余应力值极低。

### 2 结论

对于介观尺度 THz 折叠波导慢波结构, 本文进行了微铣削等多种加工方法的试验,最 终确定采用微细电火花线切割加工工艺途径, 零件的尺寸、形位公差及表面粗糙度均达到设 计要求。而且,对于 0.1 THz~0.35 THz 的慢 波结构,均可采用类似的微细电火花线切割加 工工艺。

### 参考文献:

[1] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢 波结构设计与加工[J]. 太赫兹科学与电子 信息学报, 2011,9(3):299-302. (CHEN Zhang,

WANG Ya-jun. Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):299-302.)

- [2] Gerald T Mearini. High Power Miniature CVD Diamond-Based Submillimeter/Terahertz Signal Sources[EB/OL]. (2008-11-03) [2013-12-25]. https://mentor.ieee.org/.../15-08-0741-00-0thz-high-power-miniature-cvd-diamond-based-submillimeterterahertz-signal-sources.ppt.
- [3] Tucek J,Kreischer K,Gallagher D,et al. Development and Operation of a 650 GHz Folded Waveguide Source[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference 2007. Kitakyushu:[s.n.], 2007:1–2.
- [4] 狄士春,于滨,赵万生,等. 微细电火花线切割加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空精密制造技术, 2004,40(1):13-15.
  (DI Shi-chun,YU Bin,ZHAO Wan-sheng, et al. Research and Trends of Micro-WEDM[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2004,40(1):13-15.)
- [5] 迟关心,狄士春,黄瑞宁,等.复杂微小零件的微细电火花线切割加工技术研究[J].制造技术与机床, 2004(10):22-26.
  (CHI Guan-xin,DI Shi-chun,HUANG Rui-ning, et al. Study on Key Technology for Intricate Micro Parts on MWEDM[J].
  Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004(10):22-26.)
- [6] David Aspinwall, Leung Soo, Mohammad Antar, et al. 线切割放电加工助航空客户飞得更高[J]. 航空制造技术, 2010(14): 98-99. (David Aspinwall, Leung Soo, Mohammad Antar, et al. Flying High with Wire Cutting Electrical Discharge Machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(14):98-99.)

### 作者简介:



**刘 俊**(1974-),男,重庆市人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为太赫兹电真空 器件结构设计和工艺.email:ljun74@sina.com. **周亚军**(1963-),男,山东省烟台市人,技师, 主要从事电火花线切割加工及工艺研究.

**戴晶怡**(1964-),男,上海市人,博士,研究员,主要从事电真空器件研究.

**向 伟**(1967-),男,重庆市人,博士,研究员,主要 从事电真空器件研究.

**陈** 虎(1987-),男,重庆市人,硕士,助理工程师, 主要研究方向为电真空器件制造技术. **王亚军**(1984-),男,四川省绵阳市人,硕士,助理研究员,主要从事太赫兹微型电真空器件研究.



