

超声—电解复合微细加工阴极制作工艺研究

朱永伟 徐玉明 齐金华

(扬州大学机械工程学院,扬州 225001)

文 摘 介绍超声—电解复合微细加工原理,分析微细阴极工作特点及制作难点,提出微细组合放电加工制作阴极的方法;利用精密电加工设备,通过“联动复合进给”、“内、外面转换”及“平动与拷贝”式微细放电,制作多种截形的微细阴极;进行超声—电解复合微细加工试验,阴极可满足使用要求。

关键词 超声, 电解, 复合微细加工, 微细阴极制作, 微细放电

Cathode Manufacturing of Combined Ultrasonic-Electrochemical Micro-Machining

Zhu Yongwei Xu Yuming Qi Jinghua

(Institute of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225001)

Abstract The combined ultrasonic electrochemical micro-machining is presented in this paper. Detailed analysis is made about the working characteristics of micro cathode. Combined electrical discharge machining is used to make cathodes. The micro cathodes with different section are designed. They can be made in the precision electrical discharge machine tools with the methods of "multi-axle linking feeds", "conversion of inner-outer surface" and "copy adding translate". A series of basic tests of the combined micro-machining are carried out with using the micro cathodes. This study is helpful to improve the process of micro cathode manufacturing.

Key words Ultrasonic, Electrochemical, Combined micro-machining, Micro cathode manufacturing, Micro-Electrical discharge

1 引言

在现代制造业中,精密微细零件的广泛应用对制造工艺提出了更高、更精的加工要求,各种精密微细加工方法因此得到了广泛重视和深入研究^[1~2]。超声—电解复合微细加工方法将电化学加工与超声加工技术有机结合,在保持电解加工效率高、阴极无损耗、表面质量好等技术优势的同时,利用超声频振动冲击及其产生的“雾化”作用改善电解过程,可稳定提高加工精度,对于难加工的硬脆金属材料(硬质合金等)的微精加工,有独特技术优势^[3~4]。微细加工阴极的制作技术是实现微细加工的关键问题与难点之一,传统的机械加工方法受切削力、刀具运动干涉及机床加工精度等因素限制,很难制作出尺寸微小且形状复杂的工具电极,利用微细电火花放电制作微细加工电极,成为解决这一问题的有效途径,因此本文对微细阴极的设计与制作工艺进行研究,重点探讨利

用微细放电、组合电加工方式制作超声—电解微细加工阴极的方法,并进行相关工艺试验,为超声—电解复合微细加工寻求一种有效、可靠的阴极制作工艺^[3]。

2 微细加工系统及阴极

图1为超声—电解复合微细加工系统的原理图,电解部分采用低压直流(或脉冲)电源,电解液采用低浓度(1%~5%)的钝化性硝酸钠水溶液,这可减小电解过程中的杂散腐蚀作用,提高加工定域性。微电流电解作用产生钝化膜,由于在加工区的微细阴极随变幅杆作超声频振动,电解液及微细磨料的超声频振动冲击及“负压雾化”效应可去除电解钝化膜及加工产物,保持加工过程持续进行,同时电解液可由“静液”方式供给。工作台在连通器压力油的作用下与工具阴极间保持一定微压力,大小可用微细砝码精密调节。工件加工深度由Z向测微仪指示。电解线

收稿日期:2007-02-27

基金项目:国家自然科学基金(50675192);中国博士后基金(2003034382)

作者简介:朱永伟,1966年出生,博士,主要从事微精特种加工方面的研究工作

路串入电流传感器,将加工中的电解电流参数通过数字存储示波器及PC机进行记录和分析,对加工参数进行在线调节,可保证超声—电解微细加工过程的稳定进行^[5]。

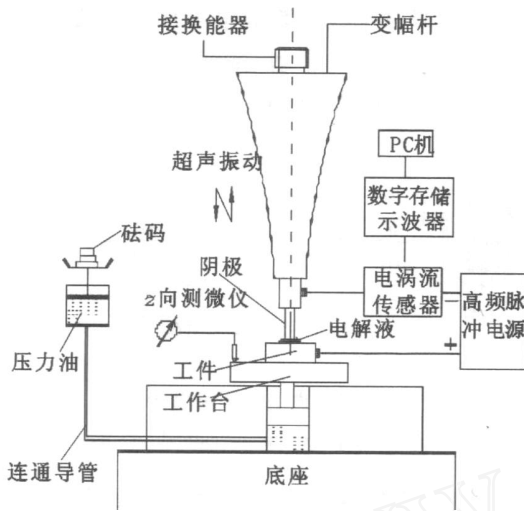


图1 超声—电解复合微细加工系统

Fig 1 System of combined ultrasonic-electrochemical micro machining

超声—电解复合微细加工材料去除量微小,零件精度、表面质量要求高。加工时,微小阴极与变幅杆作超声频振动,因此微细阴极制作工艺有其特殊性。

(1)为保证加工的精度及效率,必须有制作精度高、工作定可靠的微细阴极,传统机械加工难以实现此类微尺度阴极的制作,必须借助微细特种加工方式,本文中采用微细放电组合方式。

(2)加工是在电解质溶液中进行,电解液中含有超声微细磨料,因此阴极材料须具有好的耐腐蚀性及高耐磨性,最大限度减少阴极磨损。

(3)为保持加工过程连续,提高加工效率,阴极与工件间须保持微小恒定的工作压力;同时由于微细阴极尺寸微小且作超声频振动,为防止阴极弯曲、折断,阴极必须具有一定的强度与刚性。

(4)为达到加工精度要求,必须保证阴极安装后对工作台面的垂直度及与变幅杆的同轴度,这要求阴极体先初步加工,与变幅杆用螺纹联接紧固后,再进行整体精加工,变幅杆与阴极的联接精度应足够高,同时结构设计上须考虑整体加工的定位装夹、相互之间的拆装定位及阴极电源引入。加工中的变幅杆与阴极接合面须用高黏度植物油耦合,以减小超声能量损失,提高加工效率。

3 微细放电制作工具

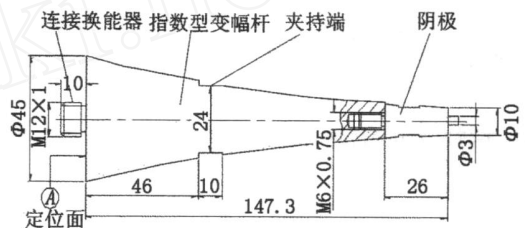
3.1 变幅杆与阴极本体的设计制作

变幅杆是传递超声波能量和扩大振幅的工具,本文选用共振响应频率范围较宽的指数型变幅杆,共振条件受加工参数漂移的影响小。

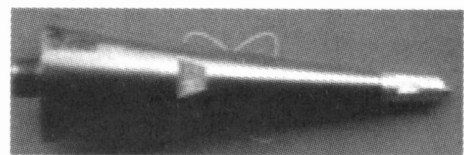
系统的工作频率预设 20 kHz,变幅杆所用的宇航材料工艺 2007年 第4期

材料为调质 45#钢,超声纵波在变幅杆中的声速: $c_1 = 5.17 \times 10^6$ mm/s,变幅杆大端直径 $D_1 = 45$ mm,小端直径 $D_2 = 10$ mm,变幅杆长度: $l = \frac{c_1}{2f} \left[1 + \left(\frac{\ln N}{l} \right)^2 \right]^{1/2} = 147.3$ mm,其中 $N = D_1/D_2 = 4.5$,验算频率限制条件: $f > 1.5 \frac{c_1}{2} = 10.5$ kHz,式中, $\frac{c_1}{2} = \frac{\ln N}{l}$,经验算满足条件。

变幅杆与阴极本体形状可用数控及线切割加工方式完成,图2(a)为变幅杆与阴极体设计的联接图,图2(b)为加工制作后的变幅杆与阴极整体联接实物照片,变幅杆与阴极整体联接并在精密放电加工机床上定位后,用组合微细放电加工微细阴极端部。



(a) 指数形变幅杆及阴极体设计图



(b) 指数形变幅杆与阴极体照片

图2 变幅杆与阴极整体设计

Fig 2 Design of amplitude transformer horn and cathode

3.2 阴极头的微细放电加工

3.2.1 组合电加工制作阴极

用组合放电加工方法可实现各种微细截面的阴极制作。利用微细电加工工艺设计、制作各种截面尺寸母电极,利用精密微细电火花“拷贝+平动”放电方式,通过改变平动头平动量 R ,可制作出与母电极截面形状相同、尺寸大小各异的微细阴极。此方法能很好地实现各种形状截形微细阴极的制作要求^[3],如图3所示。

对于细长轴类微细阴极的制作,为保证阴极形状及安装位置精度,用片状、线状电极进行多轴联动展成式进给,即合理利用微细电火花成形、微细电火花线切割等工艺组合方式精确制作微细加工阴极头端部。如图4(a),用片状电极 x, y 轴联合进给,配以主轴旋转,电极与阴极的放电间隙为 δ ,加工前阴极头直径为 D ,当电极轴线与阴极表面的间距为 H 时,阴极直径为 d ,此时 $d = 2(H - \delta)$,如图4(b)为制作出的微细轴,微细放电多轴联动方式理论上可加工出任意直径大小的微细轴类阴极。

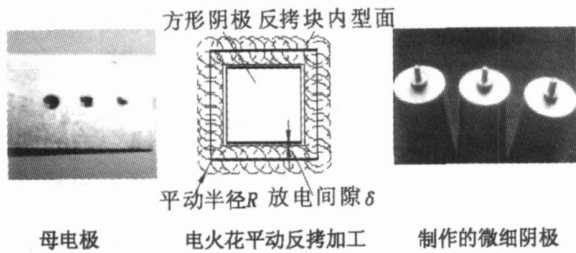
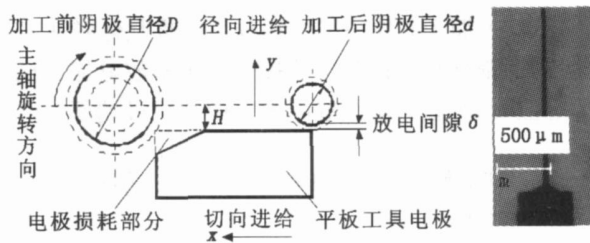


图3 “拷贝+平动”制作多种截形阴极

Fig 3 Making cathode by method of copy adding translate

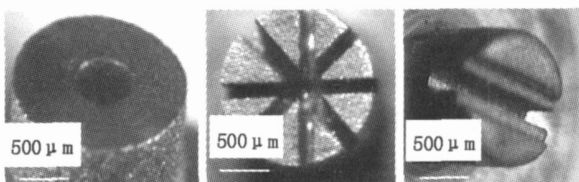


(a) 多轴联合进给微细放电制作阴极 (b) 制作的微细轴阴极

图4 微细电火花加工方法

Fig 4 Techniques of micro electrical discharge machining

微细阴极中的孔可用制作的微细轴为电极来放电加工,直线槽可用快(慢)走丝线切割方式加工,如图5为利用微细电火花成形、微细电火花线切割等工艺组合方式精确制作的阴极端部。



(a) 带内孔微轴 (b) 米字沟槽 (c) 台阶槽

图5 组合电加工制作的多种阴极

Fig 5 Cathodes made by combined electrical discharge

3.2.2 微凸起阴极头的设计及制作

微凸起阴极可在零件表面上加工出微凹坑,微凸起和微凹坑对改善表面摩擦学特性有重要作用。利用AGIECUT CHALLENGE ECUT 2F精密慢走丝线切割机床,可加工出图6所示的正方形微凸起。

加工微凸起时,先在一个方向进行“方波轨迹”微细线切割加工,图示切割的微凸起宽度:0.2 mm,深度:0.5 mm,间距:0.3 mm,一个方向加工完毕,将工件旋转90°继续进行“方波轨迹”线切割,正方形微凸起可加工完成。阴极与变幅杆的联接部分使用细牙螺纹连接。

在电极沟腔内,可能遗留加工过程中的放电残留产物,可将阴极置于超声清洗机中清洗。在体视测量

显微镜下对微凸起阴极进行观测,得到的显微图像如图7所示。由图7(a)可清晰地看出正方形微凸起的形貌,可以清晰地测得其深度,图7(b)是将阴极平放时截取的图像。

用慢走丝微细线切割放电可加工出微孔阵列母电极,再通过“套料+平动”微细放电加工可制作图7(c)所示圆柱状阵列微凸起阴极。

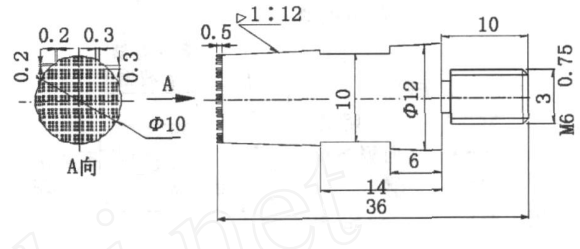
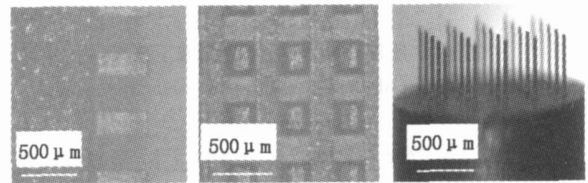


图6 微凸起阴极设计

Fig 6 Square flanges cathode design



(a) 正方形(侧视) (b) 正方形(正视) (c) 圆柱形

图7 微凸起阴极

Fig 7 Microprotrusion cathode

如以加工好的微凸起作为工具阴极,可在工件表面上加工出对应形状的“微坑”,“微坑”中可贮存润滑油及容纳摩擦副表面微细夹杂物,从而改善零件表面的摩擦学性能。

3.2.3 阴极的制作精度及表面质量

3.2.3.1 复制精度

利用前述组合电加工制作的微细阴极表面粗糙度可达到 $0.20 \mu\text{m}$,尺寸精度一般可达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

圆柱阴极制作过程中的放电损耗、电火花放电加工的圆角效应、超声—电解复合微细加工中的机械磨损在圆周方向均匀分布,不影响孔、轴类阴极形状精度,但影响尺寸精度;对于非圆阴极,在其制作及加工试验中,由于尖端放电损耗、圆角效应及复合加工中机械磨损的不均匀性,零件形状精度与尺寸精度均受影响,阴极设计、制作中应给予充分考虑,并给予补偿。

3.2.3.2 表面质量

实践中,需根据加工件表面的粗糙度要求来确定制作阴极的允许表面粗糙度值。选择愈小的微细组合电加工的电参数值,制作阴极的表面粗糙度值将愈小,尺寸精度愈高,但阴极制作效率将会显著降低,因此在保证阴极表面粗糙度及加工精度要求的基础上,尽量采用较高的电参数,以提高效率。

3.2.4 微细阴极制作方案分析

阴极几何形状根据加工对象设计,通常长度不超过波长的十分之一,横向尺寸不超过变幅杆小端尺寸。为保证加工精度,必须考虑磨料及阴极磨损对最终精度的影响,阴极尺寸需作合理的微小修正。阴极端部截面形状用组合微细电加工,如多轴联动微细放电、微细线切割、平动+拷贝等方法并灵活运用套料、电极转换、内外表面转换等工艺技巧进行组合式加工。对于形状复杂的零件可用照相制版的方式,进行复杂曲面阴极的制作。各类阴极截面的制作方法总结如下。

(1)回转体轴类外表面:采用片状(或线状)电极直线进给+主轴头旋转进给方式,加工出等截面或不等截面各种微小半径的轴类阴极。

(2)回转体孔类表面:先用片状(或线状)电极直线进给+主轴头旋转进给,加工出与内孔形状相应的微细轴(母电极),再用此微细轴通过微细火花放电加工出微细加工阴极上的微小孔。

(3)非回转体孔、轴类表面:先用微细组合放电方式进行母电极制作,再用“拷贝+平动”方式制作相同截形、各种所需尺寸的微细阴极。

(4)复合式形状:对可外包络的表面用微细线切割方式完成,对内部表面先制作用母电极,再用微细火花放电拷贝加工完成。

(5)对复杂形状表面:先用掩模光刻方式制作母电极,再用微细放电(或微细超声)方法反拷加工出微细阴极。

阴极材料可选用硬度高、耐磨性好的合金钢、轴承钢,基础试验时也可采用调质中碳钢。

4 阴极使用效果及分析

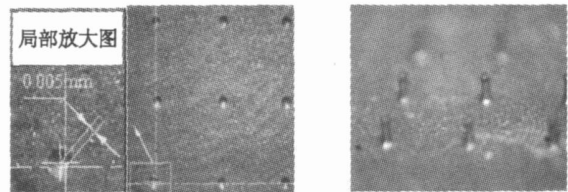
用组合电加工方法制作的微细阴极进行超声—电解微细加工试验,阴极各项要求能够可靠保证。加工过程中未出现阴极折断、过度磨损现象,能够在试件上完整地复制阴极端面的形状,并保持了较高的加工效率和复制精度^[5]。

实际加工硬质合金类试件(YT15、YG8)得到的工件形状精度较好,如加工的小孔、轴及十字筋尺寸一致性精度可达 $\pm 3 \sim \pm 5 \mu\text{m}$,尺寸精度可以通过阴极尺寸的补偿进一步提高;表面粗糙度可达 $0.50 \mu\text{m}$,加工效果较理想。

但在参数选择不当时,如阴极与工件之间压力较高、超声功率过大时,使用图7(c)(微凸起阴极)加工硬质合金试件时,阴极局部个别微小轴产生挠性弯曲,造成工件上对应微凹坑的偏斜,偏斜量约 $5 \mu\text{m}$,如图8(a)所示。提高试件表面与阴极的垂直度,减小接触压力,能够避免此类现象。

宇航材料工艺 2007年 第4期

在超声—电解复合微细加工过程中,电化学反应对阴极不产生损耗,但加工区域同时存在超声频振动,微细磨料对阴极有高频抛磨的作用,图8(b)为多次进行复合加工后的微细电极,可见阴极端面有磨损及产物粘接,试验中可以通过调整加工电参数,提高电化学反应效果、减小超声能量,选用粒度更细的磨料及硬度、耐磨性更高的阴极材料加以改善^[5],必要时可利用线切割方式切除磨损的阴极部分。



(a) 阴极端部弯曲加工的微坑 (b) 磨损的微凸起阴极端面

图8 微凸起电极加工效果

Fig 8 Machining result of micro protrusion

5 结论

(1)利用精密电加工设备,灵活运用“平动+拷贝”、“内、外面转换”及“多轴联动复合进给”等微细放电方式可制作出超声—电解复合微细加工所需各种截形阴极,尺寸精度与表面粗糙度均能满足微细加工对阴极制作精度要求。

(2)制作的微细阴极在加工装置上可有较高的安装精度和良好的工作稳定性,加工中有较好的刚性和耐用度。

选用强度、刚度、耐磨性及耐蚀性能好的材料,利用“组合微细放电方式”是制作超声—电解复合微细加工阴极的一种可行工艺,进一步精微化学微细阴极制作工艺,可实现精度要求更高、结构更微细的MEMS器件微细加工。

参考文献

- 1 赵万生,顾琳等.微细电加工的最近进展与应用前景.见:2005中国机械工程学会年会论文集,重庆,2005:4~9
- 2 曹凤国.超声加工技术.北京,化学工业出版社,2005:76~77
- 3 吴冰洁,云乃彰,朱永伟等.超声微细加工工具设计与制作研究.见:2005中国机械工程学会年会论文集,重庆,2005:43~45
- 4 Thoe T B, A spinwall D K, Killey N. Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy. Journal of Materials Processing Technology, 1999; (92~93): 323~328
- 5 Zhu Yongwe, Xu Yuming, Yun Naizhang. Test study of ultrasonic combined electrochemical micro-machining. In: 15th International Symposium on Electromachining (ISEM XV), Pittsburgh, USA, April(23-27), 2007: 493~498

(编辑 任涛)