

一种三轴联动微细电火花加工装置的研制

哈尔滨工业大学 (黑龙江 150001) 赵万生 张 勇 王振龙

1. 微细电火花的加工原理及特点

微细电火花加工的原理与普通电火花加工并无本质区别。其加工的表面质量主要取决于电蚀凹坑的大小和深度,即单个放电脉冲的能量;而其加工精度则与放电间隙、工艺系统稳定性、电极损耗等因素密切相关。

微细电火花加工也是利用脉冲电源,将高频放电能量输向放电间隙,靠产生的高温热效应等综合效应实现对材料的去除,进而达到对工件尺寸加工的目的。但由于被加工的孔径细微,一般在 $\phi 5 \sim \phi 100 \mu\text{m}$ 之间,因此要达到加工的尺寸精度和表面质量要求,还应有一些特殊的要求。在查阅大量资料和经过大量反复实验的基础上,可以将微细电火花加工的特点归纳如下:

(1) 电火花加工的放电面积很小 假设所用为圆柱形电极,其火花放电面积 A 为:

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (1)$$

式中 A ——圆柱电极截面积

D ——圆柱电极直径

微细电火花加工的电极一般在 $\phi 5 \sim \phi 100 \mu\text{m}$ 之间,对于一个 $\phi 5 \mu\text{m}$ 的电极来说,放电面积不到 $20 \mu\text{m}^2$,在这样小的面积上放电,放电点的分散范围十分有限,极易造成放电位置和时间上的集中,增大了放电过程的不稳定,使得微细电火花加工变得困难。

(2) 单个脉冲放电能量很小 电火花加工的单个脉冲放电能量可用下式表示:

$$W_M = \int_0^{t_i} u(t) \cdot i(t) dt \quad (2)$$

式中 $i(t)$ ——放电电流

$u(t)$ ——极间电压

t_i ——放电时间

为适应放电极小的电火花放电状况要求,保证加工的尺寸精度和表面质量要求,每个电火花

放电的去除量应控制在 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 的范围内,因此必须控制每个放电脉冲的能量在 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{J}$ 之间,甚至更小。

(3) 电火花放电间隙很小 由于电火花加工是非接触加工,工具与工件之间有一定的加工间隙。电火花加工的放电间隙随着加工条件的变化而变化,数值从数微米到数百微米不等。电火花加工放电间隙的大小与变化规律直接影响到加工质量 加工稳定性和加工效率。特别是微细电火花加工中,微孔的加工占大部分,放电间隙的大小与稳定程度更是微孔加工得以实现的关键。

(4) 微细工具电极的制备困难 为了能加工出尺寸很小的微小孔和微细型腔,必须先获得尺寸更小的微细工具电极。在以往的微细电火花加工中,微细工具电极一般采用专门加工后,二次安装到机床主轴头上的方法,此时明显存在着微细电极的安装误差及变形误差等,难以保证工具电极与工作台面的垂直度以及电极与回转主轴的同轴度等。WEDG 出现以前,微细电极的制造与安装一直是制约微细电火花加工技术发展的瓶颈问题。由于微细电极安装过程中存在的问题,采用离线方式进行电极的检测显然是不可取的。从目前的应用情况来看,采用 WEDG 技术能很好地解决微细工具电极的制备问题。

为了获得极细的工具电极,要求具有高精度的 WEDG 系统,同时还要求电火花加工系统的主轴回转精度达到极高的水准,一般应控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内。

(5) 排屑困难,不易获得稳定火花放电状态 由于微孔加工时放电面积小,且放电间隙也很小,极易造成短路,因此欲获得稳定的火花放电状态,其进给伺服控制系统应有足够的灵敏度,在非正常放电时能快速地回退电极,消除间隙的异常状态,提高脉冲利用率,保护电极不受损坏,最终提高加工速度。

2. 微细电火花加工装置的设计

整个系统构成的原理图如图 1 所示, 整个装置的基座部分全都由花岗岩组成。 x 、 y 、 z 精密伺服机构构成了实现三维运动的基本部件, 每个方向运动部件由直流伺服电机驱动, 其行程范围为 $102\text{mm} \times 102\text{mm} \times 102\text{mm}$ 。精密旋转主轴直接安装在 z 轴运动部件上, 由 z 轴运动部件带动旋转主轴作上下进给运动。 x 、 y 轴运动部件带着旋转主轴分别作左右、前后运动, 以实现旋转主轴的 x 向和 y 向进给运动, 电极安装在旋转主轴头上, 其中精密旋转主轴由直流伺服电机驱动, 转速在 $1\,000 \sim 25\,000\text{r/min}$ 范围内连续可调。线电极磨削装置用于在线制作微细电极, RC 脉冲电源用于产生电火花加工用的高频脉冲。计算机用于对加工过程进行监控。下面就对装置各个组成部分进行分别介绍。

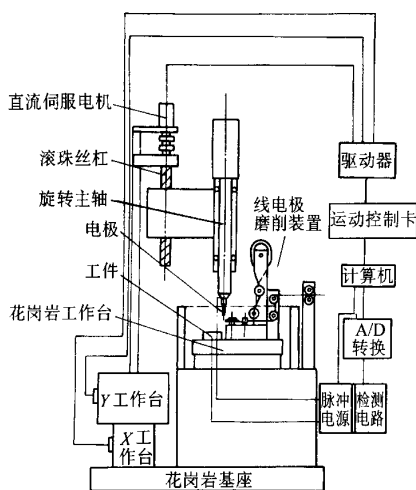


图 1 微细电火花加工装置原理图

(1) 花岗岩基座 由前面的分析可知, 微细电火花加工要求放电能量很小, 加工装置本身所产生的离散电容对微细电火花加工放电能量的影响也是一个不容忽视的因素。花岗岩由于具有绝缘性能好、无离散电容和电感产生的优点而适用于微细电火花加工。本装置在设计过程中采用花岗岩作为整个加工装置的工作台和基座, 进一步减少了离散电容对微细电火花加工放电能量的影响。并且花岗岩还具有导热系数和热膨胀系数小、对温度不敏感以及吸振性能好的优点, 在综合性能上比普通金属构件更适合于用作微细电火花加工装置的基座。

(2) RC 微能脉冲电源 从式 (2) 可以看出, 要减少单个脉冲放电的能量有三种途径: 降低放电电压和减少放电电流以及提高脉冲电源的频率, 但在进行电火花加工时放电电压不能过低, 因此比较理想的办法就是提高脉冲电源的频率。RC 电源具有加工性能稳定、容易得到高频脉冲的优点, 因此, 在微细电火花加工中使用 RC 电源不失为一种较为理想的选择。本文所设计的 RC 电源充放电电阻在 $50 \sim 3\,000\Omega$ 之间共分 8 挡并联, 通过不同的组合可调, 充放电电容在 $100 \sim 20\,000\text{pF}$ 之间共分 8 挡并联, 通过不同的组合可调, 电源电压在 $30 \sim 200\text{V}$ 之间连续可调。

(3) 线电极磨削装置 微细电极的在线制作技术是微细电火花加工中一项十分关键的技术, 自从微小线电极磨削方法研究成功以来, 解决了微细电极在线制作的难题, 这一关键技术的解决也大大促进了微细电火花加工技术的发展。为此, 我们专门设计了一套线电极磨削装置, 该装置结构新颖, 可以作为本微细电火花加工平台的一个组成部分, 也可以作为制作微细电极的专用工具而用在其他微细加工装置上。该装置的实物照片如图 2 所示。它主要包括走丝机构和张力调节机构两个部分。每分钟走丝长度在 $8 \sim 9\text{mm}$ 之间。

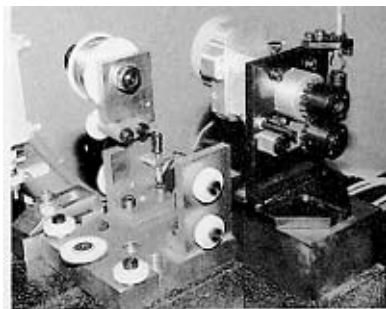


图 2 线电极磨削装置图片

(4) 检测及其控制系统 为了使加工过程能够持续稳定地进行下去, 微细电火花加工过程检测及其伺服控制系统也是不可缺少的部分。本装置采用了检测放电间隙的伺服平均电压来控制伺服机构的各种操作。检测到的间隙平均电压通过 A/D 转换后读入计算机, 然后由计算机判断放电加工的各种状态 (正常放电、开路和短路), 计算机根据放电状态来决定伺服机构的动作 (保持不动、前进和后退)。由于本装置的伺服机构是由直流伺服电机带



动精密滚珠丝杠来驱动工作台，这种机构在进行小位移进给时很容易产生爬行现象。为了减少这种爬行现象对加工过程的影响，本文采取了尽量保持电极小位移朝一个方向进给，而当需要回退时，就进行大位移回退的控制策略。工艺实验表明，基于这种控制策略，消除了爬行现象对微细电火花加工过程的影响。在这种控制策略下，先期实验已经加工出最小直径为 $\phi 12\mu\text{m}$ 的微细轴和 $\phi 25\mu\text{m}$ 的微细孔，长径比及深宽比分别超过 25 和 10，并在此平台上进行了初步的微三维结构的加工实验，在钢片上实现了微三维结构的加工。

3. 加工实验

(1) 微细轴、微细孔的加工实验 在本装置上进行了一系列的微细轴、微细孔的加工实验。在进行微细轴的制作时，先用反拷块进行粗加工，再用设计的线电极磨削装置进行精加工，并用制作出的微细轴分别在不锈钢片和半导体硅片上进行了微细孔的加工实验。先期实验已经制作出最小直径为 $\phi 12\mu\text{m}$ 的微细轴和 $\phi 25\mu\text{m}$ 的微细孔，图 3、图 4 分别是它们的 SEM 照片。

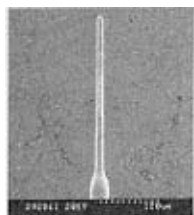


图 3 微细轴加工实例

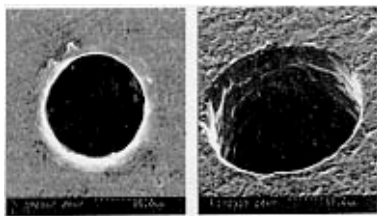


图 4 微细孔加工实例

(2) 微三维结构加工实例 用微细电火花加工实现微三维结构的加工是微细电火花加工的一大发展趋势。因此，本文所设计的微细电火花加工装置除了能实现微细轴、微细孔的加工外，还能进行微三维结构的加工。在进行微三维结构加工之前，利用微细电火花的分层铣削原理，先用 IGES 文件对微三维结构以及复杂微三维曲面进行分层处理，将

分层的轨迹生成 NC 代码，在自主开发的数控系统下进行成形加工。图 5a、5b、5c 是采用上述方法、用本装置在不锈钢上实现微三维结构加工的 SEM 照片。

以上的这些加工实验充分证实了本装置的广泛实用性。也充分验证了利用微细电火花方法进行微细加工的加工能力，随着各种微细电火花加工工艺和方法的不断完善，可以预言，微细电火花加工将在微机械加工领域发挥越来越大的作用。

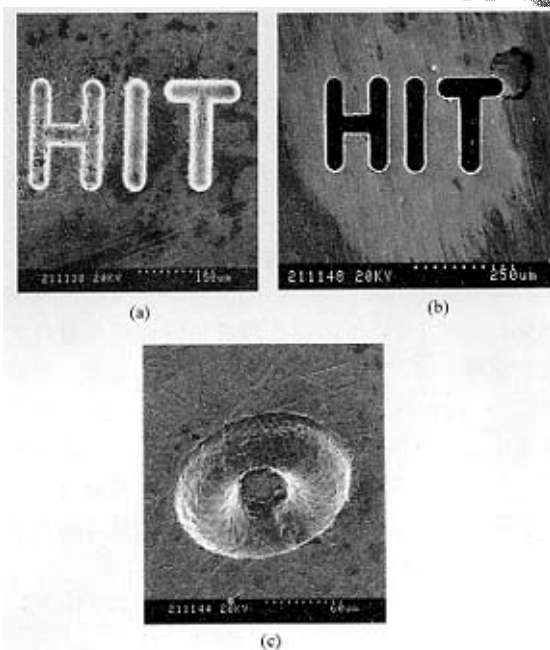


图 5 微三维结构加工实例

4. 结论

本文针对微电火花加工的特点，设计并研制了一套微细电火花加工装置。装置采用的花岗岩基座减少了离散电容对放电加工过程的影响。通过设计的线电极磨削装置与主轴的旋转进给相结合，解决了微细电极的在线制作问题。设计的 RC 微能电源以及检测和控制系統，解决了微细电火花加工放电能量小和伺服机构的爬行问题。使整个装置满足微细电火花加工的特殊要求。在该装置上进行了一系列的加工实验，先期实验已经能稳定地加工出 $\phi 12\mu\text{m}$ 的微细轴和 $\phi 25\mu\text{m}$ 的微细孔，并进行了微三维结构的加工实验，给出了微三维结构的加工实例，也充分证实了该装置具有广泛的实用性。

(收稿日期：20031114)