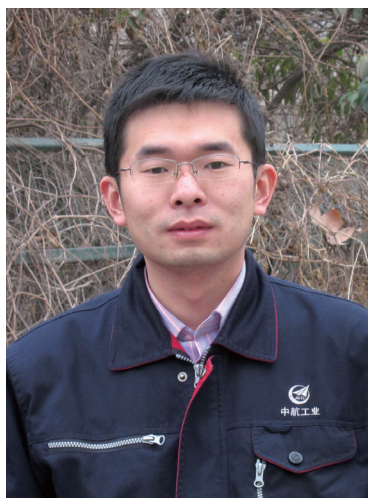


微细电火花成形加工关键技术

Key Technology of Micro-EDM Forming Machining

西安航空动力控制公司工艺处 胡磊 张晓东
西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 吴宝海 罗明



胡磊

硕士,助理工程师,主要从事数控及特种加工技术研究。

电火花加工技术是实现难加工材料、复杂零件、模具精密加工和特殊零件加工的有效手段,在机械制造领域中起着越来越重要的作用。电火花加工由于其非机械接触加工的特点,适应于微型机械制造的要求。国内外对微细电火花加工技术的不断研究探索^[1-2],已使微细电火花加工在与微型机械制造结合及实用化方面取得了较大的进展。

早在 20 世纪 60 年代末,荷兰 Philips 研究所 Dsenbruggen 等人利

随着未来微型机械的发展壮大,作为一种经济实用的微细加工技术,微细电火花加工受到世界上各国学者的普遍关注和重视。微细电火花加工技术以其独特的技术优势经几十年的发展已经在微细加工领域取得了较为广泛的应用。

用微细电火花成形加工技术成功地加工出了直径 $30\mu\text{m}$,精度为 $0.5\mu\text{m}$ 的微孔。由于当时条件无法解决微细电极的在线制作问题,使得加工效率偏低,加工精度一致性较差,这一成果当时并未引起人们足够的重视。

到了 20 世纪 90 年代后,随着现代电力电子技术的发展,尤其是线电极电火花磨削(Wire Electrode Discharge Grinding, WEDG)技术的逐步成熟与应用,成功地解决了微细电极的在线制作这一瓶颈问题,使得微细电火花成形加工技术进入了实用化阶段,并成为微细加工领域的热点研究内容之一。

微细电火花成形加工的原理与普通电火花成形加工无本质区别,但也有其特殊性,具有以下 5 项加工关键技术。

微小能量脉冲电源

由于被加工对象微小,而且要达

到亚微米级的加工精度及表面粗糙度,因此,必须使单个脉冲的放电能量控制在 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{J}$ 数量级之间^[3-4]。由于放电过程中,极间电压一般可视作常数,因此可调整的参数只有放电电流和脉冲宽度。为满足微细电火花成形加工要求,放电电流一般应不小于数百毫安,而脉冲宽度则应减小到 $1\mu\text{s}$ 左右。为满足此要求,目前实用的微细电火花成形加工系统一般均采用 RC 弛张式脉冲电源形式。在此方面的研究中,目前的主要工作集中在如何有效地减小极间杂散电容上,比如采用非金属材料床身结构、使用尽可能短的屏蔽电缆等。但是 RC 电源存在可控性差、电极损耗较大等缺陷。

针对精密微细电火花成形加工发展的需要,国内外已经开展了有关微能电源方面卓有成效的研究工作,并已经形成工业产品。如山东工业大学开发的可控 RC 微能电源;瑞

士阿奇夏米尔公司研发的 HSS 节能脉冲电源、日本三菱电机公司和沙迪克公司分别研发的 FS 型和 SQ 型超精加工脉冲电源等。清华大学的李勇等人研制出的 RC 脉冲电源电压为 60~120 V 无级可调,放电电容为 100~2700 pF 分为 6 级,加工出最小直径为 25 μm ,最大深宽比超过 20 的轴。但 RC 脉冲放电电源的可控性和加工效率较差,所以高频数控脉冲电源的研制是微细电火花加工电源发展的方向之一。同时,吸收和利用电力电子技术、计算机控制技术和现代控制理论等学科发展的成果,结合微细电火花成形加工发展趋势,节能化、智能化、皮秒纳秒量级超窄脉宽是微能脉冲电源努力研发方向。

在采用 RC 弛张式脉冲电源时,脉冲宽度和峰值电流一定,随着加工面积的改变,加工条件自然会发生相应变化,从而影响到电极损耗和加工速度的变化。理论上讲,随着加工面积的减小,电极损耗将增大,加工速度也会减小。下面从理论上证明面积效应对电极损耗和加工速度的影响。

电极损耗与放电电流密度有密切关系。理论上讲,电流密度越大,电极损耗越大。平均放电电流密度的计算公式如下:

$$J_m = \frac{I_m}{S}, \quad (1)$$

式中 J_m 为平均加工电流密度(A/ cm^2); I_m 为平均加工电流(A); S 为加工面积(cm^2),与电极方向相互垂直的加工面。其中,

$$I_m = \frac{Q_m}{t_o + t_i}, \quad (2)$$

式中 Q_m 为平均放电电量(C); t_i 、 t_o 为放电时间,放电间隙时间(μs)。而

$$Q_m = I_p \times t_i \quad (3)$$

式中 I_p 为放电峰值电流(A)。将公式(2),公式(3)带入公式(1)可得

$$J_m = \frac{t_i \times I_p}{S \times (t_i + t_o)}, \quad (4)$$

从公式(4)看出,在脉冲宽度和峰值

电流一定的情况下,平均电流密度和加工面积成反比关系,因此可以得出随着加工面积的减小,平均电流在逐渐增大,电极损耗也就逐渐增大。电极损耗和加工面积存在反比关系。虽然平均电流大小是影响电极损耗的主要因素,但是影响电极损耗不仅仅是平均电流的大小,存在排屑、放电介质等众多因素的影响,具体存在如何非线性反比关系需要通过众多试验进行研究。因此,电极损耗是制约微细电火花成形加工技术应用的一个主要问题,李勇等人对三维微细结构电火花伺服扫描加工技术进行了研究,开发出三维微细结构的电火花伺服扫描加工工艺,解决了微细电火花成形加工的精度问题。

高精度微小进给装置

由于微细电火花成形加工要求单个脉冲的放电能量很小,放电蚀除凹坑深度在 1 μm 左右。因此,为使火花放电正常进行,伺服进给系统的进给量必须在微米级的范围内。这就要求微细电火花成形加工的伺服系统和执行机构具有足够高的响应速度和控制灵敏度。

传统的电机丝杠进给伺服系统传动链偏长,传动装置存在一定间隙(特别是使用一段时间之后),因此,无论传动精度还是系统的频率响应都较差,很难满足微细电火花成形加工技术的要求。

20 世纪 90 年代开始出现了电极直接驱动技术,并研制了多种电极直接驱动的微型电火花成形加工装置,其典型进给形式有:蠕动式、冲击式、椭圆式和超声式,这些装置不存在传动中间环节,大大提高了传动精度和响应频率。目前,该类加工装置的进给精度一般可达数十纳米级,响应频率在几赫兹至 1000Hz。

微细工具电极制作

要实现微细轴、孔及微三维结构

的电火花成形加工,首先是必须使用极为微细的工具电极。在以往的微细电火花成形加工中,微细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,难以保证电极轴线与工作台面的垂直度以及电极与回转主轴的同轴度等。

目前,以简单形状电极进行微细电火花成形加工时的微细电极一般均采用在线制作方式,常用的方法有反拷块加工和线电极电火花磨削。日本东京大学生产技术研究所增沢隆久教授研制出线电极电火花磨削这一微细电极制作技术^[5],成功解决了微细电极在线制作这一瓶颈问题。WEDG 技术出现以前,微细电极的制造与正确安装,一直是制约微细电火花成形加工技术发展的瓶颈问题。故为实现微细零部件的精密微细电火花成形加工,就必须研究出有效实用的微细电极在线或在位制造、安装和检测方法。

除 WEDG 外 4 种常见微细电极在线制作技术如下。

1 单发放电微细电极成形法

日本的 Hideki Takezawa 等人在试验中发现了用单脉冲放电可以形成针状电极的现象^[6]。在放电电流为 30~50A,单脉冲放电时间为几百微秒的加工条件下,单脉冲放电能够瞬间把直径 100 μm 的钨电极加工成 20~40 μm 的针状电极。

2 加工阵列电极的反拷法

日本京都工业大学的江豆页快等人与松下电器分别研究了利用反拷法来制作阵列微细电极的方法。其原理是首先利用 WEDG 法制作出单根微细,然后在中间工具电极板上加工出阵列孔,再利用具有阵列孔的中间工具电极对最终电极进行反拷加工,得出高质量的微细阵列电极。

3 原位孔微细电火花磨削法

日本的 Minoru Yamazaki 等人提出了利用圆柱形电极自钻的原位孔

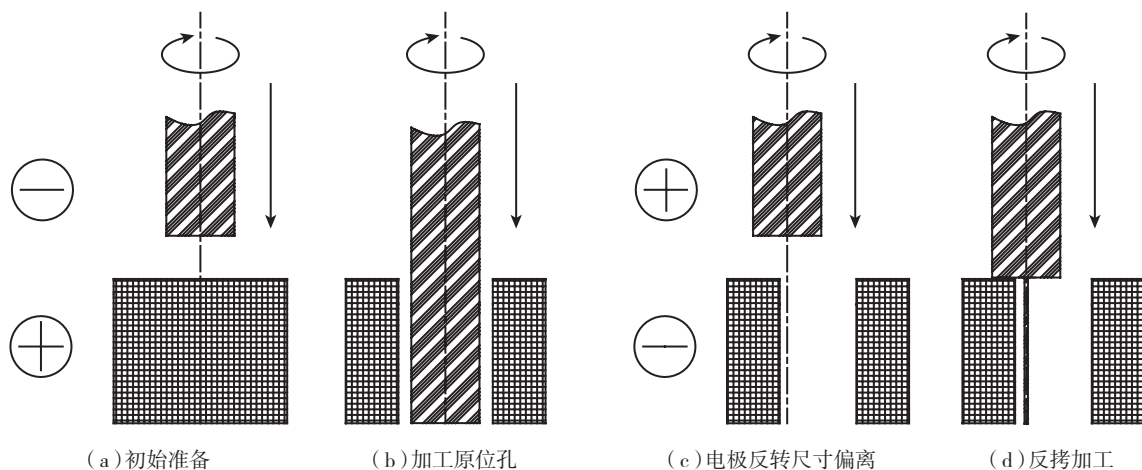


图1 用原位孔制作圆柱电极原理图

制作微细圆柱电极的加工方法,其原理如图所示。首先,将圆柱电极作为电火花加工的负极,在板状工件上利用火花放电加工出一个孔,然后电极返回到加工前的初始位置,将电极轴线相对于已加工出的孔的中心偏离一定距离。改变圆柱电极和工件的极性,对回转的圆柱工具电极进行电火花反拷加工。图1为用电火花自钻原位孔制作圆柱电极原理图。

4 LIGA 法

松下电器的 Takahata 与美国威斯康星大学的 Gianchandani 研究利用 LIGA 技术制造复杂微细结构电极方法。LIGA 法(X 射线刻蚀电铸模法)由德国卡尔斯鲁厄原子核研究所提出,它是德文的照相制掩膜、电铸制模和注射成形 3 个词的缩写(Lithographic Galvanoformung Abformung)。采用这一方法可以获得极其精细的微细结构和极高加工精度的电极,并且可以一次制作出大量重复高精度微细电极。

排屑控制

通常情况下电火花加工机床主轴是立式的,因而在加工孔时,蚀除物的排除比较困难,通过放电间隙从孔的底部克服重力移至孔的顶部排出,在微细深孔加工时情况则更加严

重。因为微细电火花加工时,放电能量小,火花的爆炸力小,放电间隙也小(间隙可以控制在 $1\mu\text{m}$ 以下),放电自身的动力难以将放电蚀除产物排出。由于排屑困难,放电不易稳定,短路增加,从而导致加工效率下降,加工质量恶化。

为增强微细电火花加工排屑,日本东京大学增沢隆久教授等人的横轴布局方案,即主轴水平布局的卧式加工方法,蚀除物不必克服重力,甚至可利用其自重排出,排屑效果好。

此外,还有一种排屑控制方式为超声电火花复合技术,超声电火花复合加工技术是在电火花加工的基础上增加了超声换能器和变幅杆,使电极沿轴向产生超声振动,这种振动通过以下两方面的作用机理改善了电火花加工的间隙状态^[7]。一方面由于超声波的空化和声场辐射力的作用,增大了放电区蚀除颗粒的碰撞和摩擦,使蚀除量增大,提高了加工效率。另一方面,放电区域声流场交替变化,能加速加工液的循环和扰动,阻止微粒的聚积,电极的振动还起到了泵吸的作用,利于蚀除物的排出。

当然,现在还有很多增强排屑控制的措施,比如采用粘度偏低的工作液,并采用强迫排屑的冲、吸供液措施来加强工作液的循环。

对于微细电火花加工而言,因为被加工对象微细,所以很有必要对加工过程中的排屑控制进行深入研究,以精确地进行微细加工。故将排屑控制列为微细电火花成形加工的关键技术是十分必要的。

微细加工过程控制技术

因为微细电火花成形加工属于微能放电加工,电极和被加工工件都比较微小,加工区域和加工间隙也十分微小,加工过程不够稳定,所以对加工状态的监测提出了更高的要求。目前,放电间隙信号检测采用的方法主要有击穿延时检测方法、间隙脉冲放电状态分类统计法、适时采样与门槛电压的比较法、脉冲电压的积分法等检测方法。

由于人们对电火花间隙放电的机理认识还不是很清楚,所以基于模糊控制逻辑理论、神经网络乃至模糊神经网络等的利用人工智能的加工状态识别技术,为微细电火花加工状态的检测提供了新的可行途径。其关键硬件主要是检测电路的设计,以便提供微细电火花加工放电间隙的电压和电流的瞬时信息,用于加工状态识别判断。图2是一种基于多传感器信息融合技术的微细电火花模糊控制系统的硬件构成系统。

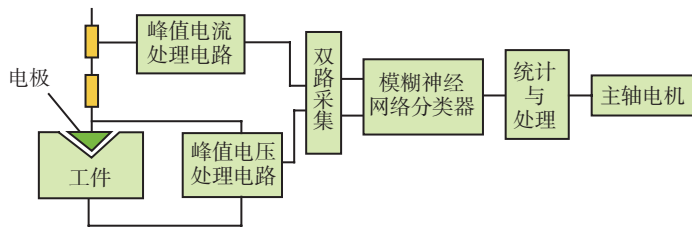


图2 多传感器信息融合的模糊控制系统

在放电状态检测系统中有两路传感器，一路用来检测峰值电压，一路用来检测峰值电流。这两路传感器的信息是互补的，通过双路采集，控制系统根据一段时间内采集的数据进行分类统计，以决定主轴下一步的运动方向及速度。在该系统中，利用峰值电压传感器和峰值电流传感器得到电火花放电所属各类的隶属度值作为BP网络的输入，而其输出为融合两个传感器后属于各类的隶属度。如此可分别得到这 2×4 个数据作为网络的输入，该网络的输出有4个，分别代表了被测物体属于4种放电状态的隶属度，它综合了2种传

感器信息，得到了模型^[8]。

结束语

随着未来微型机械的发展壮大，作为一种经济实用的微细加工技术，微细电火花加工受到世界上各国学者的普遍关注和重视。微细电火花加工技术以其独特的技术优势经几十年的发展已经在微细加工领域取得了较为广泛的应用，虽然这项技术发展时间短暂，但是日益显现出丰富广阔的应用前景，并且在微细加工领域的发展潜力是不可估量的。因此，深入开展此项技术的研究具有十分重要的现实及国防意义。

参考文献

- [1] Masuzawa T, Tsukamoto J, Fujino M. Drilling of deep microholes by EDM. Annals of the CIRP, 1989, 38(1): 195-198.
- [2]. Masaki T, Kawata K, Masuzawa T. Micro electro-discharge machining and its applications. Proceedings of 3rd IEEE Micro electro mechanical. Systems Workshop. Napa Valley, California, USA,1990: 21-26.
- [3] 赵万生, 韦红雨, 狄士春, 等. 微细电火花加工的新进展, 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 65-69.
- [4] 赵万生. 先进电火花加工技术, 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [5] 李勇, 王显军. 微细电火花加工关键技术研究. 清华大学学报, 1999(8): 45-48.
- [6] 陈远龙, 任中根, 徐家文, 等. 电解加工技术现状与展望. 第11届全国特种加工学术会议专辑, 2005.
- [7] 袁松梅, 赵万生. 超声电火花复合加工的研究进展航空精密制造技术, 1998, 34(6): 17-20.
- [8] 裴景玉, 高长水. 多传感数据融合技术在微细电火花加工放电状态检测中的应用. 电加工与模具, 2000(3): 6-9.

(责编 小城)





手柄类



水平调整件



合金拉手



手轮



把手



铰链

唯有更专业



● 压紧把手 ●

才有高品质



● 拉紧把手 ●



● 顶紧把手 ●



扬州芬尔机械配件有限公司
YANGZHOU FAIERR MECHANICAL FITTING CO., LTD.

地址: 江苏省扬州市沙头镇施沙路8号 邮编: 225105
电话: 0514-87533188 87533288 传真: 0514-87533288 87533088
http: //www.faierr.com E-mail: sale@faierr.com.cn

广告索引号 11-086