

电解加工技术的现状与展望

Current Status and Prospect of Electrochemical Machining Technology

合肥工业大学 陈远龙 张正元



陈远龙

中国机械工程学会特种加工分会常务理事、电化学加工技术委员会主任。合肥工业大学特种加工研究所所长,研究员,博士。主要从事特种加工技术及装备的研发工作。

电解加工是利用金属在电解液中发生阳极溶解的原理将工件加工成形的一种特种加工方法,具有加工范围广、生产率高、表面质量好、工具阴极无损耗等显著优点,尤其适合于难加工材料和复杂形状零件的加工。

在经历大约 20 年的低潮后,从 20 世纪 90 年代后期起,电解加工又重新焕发了生机。其研究机构及人员逐渐壮大,应用领域(尤其在航天、航空、兵器领域)进一步扩展,研究

相对传统加工和其他优势特种加工技术而言,电解加工的基础理论较为薄弱,工艺技术尚未成熟。正因如此,其有待研究、开发的空間也更为广阔。近期,电解加工工艺技术研究涉及的方向主要集中在微秒级脉冲电流加工、微细加工、数控展成加工、加工间隙的检测与控制及磁场对电解加工的影响等重点领域。

成果及论著数量激增,工艺技术水平、设备性能及产业发展均达到了一个新的高度。

工艺技术研究

相对传统加工和其他优势特种加工技术而言,电解加工的基础理论较为薄弱,工艺技术尚未成熟。正因如此,其有待研究、开发的空間也更为广阔。近期,电解加工工艺技术研究涉及的方向主要集中在微秒级脉冲电流加工、微细加工、数控展成加工、加工间隙的检测与控制及磁场对电解加工的影响等重点领域。

1 微秒级脉冲电流加工

自 20 世纪 70 年代初起,前苏联、美国、日本、法国、波兰、瑞士、德国等国家相继开始了对脉冲电流电解加工的研究。在国内,多家单位也开展了毫秒级脉冲电流电解加工的研究

并成功用于工业生产。

随着近代功率电子技术的不断发展,新型快速功率电子开关元件如 MOSFET、IGBT 等出现,使得微秒级脉冲电流电解加工的实现成为可能。20 世纪 90 年代以来,微秒级脉冲电流电解加工基础工艺研究取得突破性进展。研究表明,此项新技术可以提高集中蚀除能力,并可实现 0.05mm 以下的微小间隙加工,从而可以较大幅度地提高加工精度和表面质量,型腔最高重复精度可达 0.05mm,最低表面粗糙度可达 $0.40 \mu\text{m}$ ^[1-2],有望将电解加工提高到精密加工的水平,而且可促进加工过程稳定并简化工艺,有利于电解加工的扩大应用。

国内外众多研究机构利用微秒级脉冲电流开展了模具型腔及叶片型面加工、型腔抛光、电解刻字、电解磨等工艺可行性试验以及气门模具

2010 年第 5 期·航空制造技术 47



生产加工试验。

2 微精加工

微细加工是当前电解加工研究中最热点的方向。从原理上而言,电化学加工技术可分为2类:一类是基于阳极溶解原理的减材技术,如电解加工、电解抛光等;另一类是基于阴极沉积原理的增材技术,如电镀、电铸、刷镀等。这2类技术有一个共同点,即材料的去除或增加过程都是以离子的形式进行的。由于金属离子的尺寸非常微小($1 \sim 10^{-1}$ nm级),因此,相对于其它“微团”去除材料方式(如微细电火花、微细机械磨削),这种以“离子”方式去除材料的微去除方式使得电化学加工技术在微细制造领域、以至于纳米制造领域存在着极大的研究探索空间。

从理论上讲,只要精细地控制电流密度和电化学发生区域,就能实现电化学微细溶解或电化学微细沉积。微细电铸技术是电化学微细沉积的典型实例,它已经在微细制造领域获得重要应用。微细电铸是LIGA技术一个重要的、不可替代的组成部分,已经涉足纳米尺寸的微细制造中,激光防伪商标模版和表面粗糙度样板是电铸的典型应用^[3]。

但电化学溶解(成形)加工的杂散腐蚀及间隙中电场、流场的多变性严重制约了其加工精度,其加工的微细程度目前还不能与电化学沉积的微细电铸相比。目前电化学微精成形加工还处于研究和试验阶段,其应用还局限于一些特殊的场合,如电子工业中微小零件的电化学蚀刻加工(美国IBM公司)、微米级浅槽加工(荷兰飞利浦公司)、微型轴电解抛光(日本东京大学)已取得了很好的加工效果,精度已可达微米级^[3]。微细直写加工、微细群缝加工及微孔电液束加工,以及电解与超声、电火花、机械等方式结合形成的复合微精工艺已显示出良好的应用前景^[3,4]。

近年来,基于毫秒、微秒、纳秒及

群脉冲电源,采用单纯电解、电解与超声复合、电解与电火花复合、电解与线切割复合等加工工艺,在蜂窝状微坑、微细槽、微细轴、微细群孔、微细群圆柱、微器件等加工中,投入了大量的研究。为此,还开发了多功能三维微细电解加工系统、电解微细加工监控系统、微螺旋电极等装置。研究内容涉及微细加工工艺条件、阴极设计制造、加工数学模型建立、运动学仿真、工件表面电场分布有限元分析、反向电流、压力波及电解产物的影响等诸多方面^[5-7]。

3 数控展成加工

传统的拷贝式电解加工的阴极设计制造困难,加工精度难以保证。尤其对整体叶轮上的扭曲叶片之类通道狭窄的零件表面,由于受工具阴极刚性及加工送进方式的限制,拷贝式电解加工更难以实现。

20世纪80年代初,以简单形状电极加工复杂型面的柔性电解加工——数控展成电解加工的思想开始形成,它以控制软件的编制代替复杂的成形阴极的设计、制造,以阴极相对工件的展成运动来加工出复杂型面。这种加工方法工具阴极形状简单,设计制造方便,应用范围广,具有很大的加工柔性,适用于小批量、多品种、甚至单件试制的生产中。

80年代中期,前苏联乌法航空学院特种加工工艺及设备研究所过程控制为突破口,设计了一种柔性电解加工单元,应用特殊的电流脉冲波形和高选择性的电解液,加工精度达0.02mm,表面粗糙度达 $0.2 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 。

波兰华沙工业大学的Kozak教授于1986年率先提出了电解铣削的思想,以棒状旋转阴极作类似于圆柱状侧铣刀的成形运动来形成加工表面,成功地应用于直升机旋翼座架型面的加工,加工中采用 NaNO_3 电解液,精度可达 $\pm 0.01 \sim 0.02\text{mm}$,表面粗糙度达 $0.16 \sim 0.63 \mu\text{m}$ 。

波兰Cracow金属切削学院的A.Ruszaj和J.Cekaj教授利用形似球头铣刀的工具阴极,进行了型面光整加工的试验研究,取得了形状误差小于0.01mm的加工效果,从而证明了该工艺在模具的光整加工方面具有很好的应用价值。

美国、英国、俄罗斯都高度重视数控电解加工技术的研究并已得到应用,在新型航空发动机及航天火箭发动机的研制中发挥了重要作用。美国GE公司和德国DORNER公司的五轴数控电解加工,美国、俄罗斯仿形电解加工带冠整体叶轮代表了数控电解加工整体叶轮的先进国际水平。

在国内,南京航空航天大学从20世纪80年代中期开始进行数控展成电解加工工艺技术的研究,已在电解加工设备研制、加工机理研究、控制软件编制及工艺试验等方面均取得了重要进展^[8-10]。具体研究内容包括以下几方面。

(1)设备研制。研制了五轴数控电解加工机床及配套的多轴联动数控系统。该机床具有3个直线运动坐标轴及2个旋转运动坐标轴,各轴均采用步进电机驱动。

(2)成形规律研究。研究了棒状外喷式阴极、三角形截面内喷式阴极、矩形截面内喷式阴极三种状况下展成电解加工间隙随一些主要工艺参数变化的规律。

(3)阴极设计。针对整体叶轮结构,设计制造出了新颖结构的组合式开槽阴极及矩形截面整体式型面精加工阴极,很好地解决了加工过程中易产生的阴极短路烧伤问题。

(4)加工软件开发。针对整体叶轮的开槽加工及型面精加工,开发了相应的数控展成电解加工软件,具有叶片型面的数据处理、数控加工的展成运动轨迹计算及整体叶轮的三维型面几何造型等功能。

(5)加工工艺试验。包括直纹面、



加工的质量。只有在叠加磁场方向垂直于电场方向且N极指向电场叠加磁场时,对电场均有较明显的作用^[16]。此外,采取切割流线的方向叠加磁场,洛仑兹力的作用有利于成股的束流展开;磁场可以减小电解液的粘度,改善其流动性能,有利于及时排走电解产物和热量,改善加工条件,提高加

非直纹面整体叶(涡)轮及带冠整体叶轮的展成电解加工、叶片型面电解抛光与五轴联动电解磨削等。

4 加工间隙的检测与控制

电解加工是一个复杂的非线性时变系统。由于加工间隙处于电场和流场的共同作用下,是时间和空间的变化函数,且空间极小,因而在加工过程中适时测量非常困难,特别是对于三维空间的间隙,至今尚无成熟的采样方案的实际应用。但是,随着计算机技术、传感器技术、测试技术、信号处理技术、电源技术等现代技术的发展,测控过程中存在的难题将逐一得到解决,并最终实现在线测控加工间隙。

近阶段,加工间隙的检测与控制的研究引起了众多关注,研究主要集中在以下方面。

(1) 采用循环迭代间隙控制方案,快速调整工具进给速度,使之近似等于工件去除速度,从而精确地维持恒定的小间隙,并利用虚拟仪器技术构建电解加工控制系统^[11]。

(2) 把加工电流或流体作用在阴极上的六维力作为研究参数,用最小二乘多元线性拟合法,分别建立平面、斜面阴极加工电流或六维力与加工间隙之间的关系式,用叶片型面加工数据对建立的关系式进行检验和修正,得到最终的修正关系式。所得关系式在 $\pm 15\%$ 的误差范围内可

用于在线检测加工间隙^[12-13]。

(3) 采集真实电解加工过程中阴极表面上的力信号,利用小波变换和BP神经网络,实现间隙的在线通报,并设计模糊控制器。把间隙的误差转化为力的误差及误差的变化信号,以此作为模糊控制器的输入,以加工电压的增量作为模糊控制器输出,实现对间隙的控制。在Matlab的simulink模块中建立了由神经网络、模糊控制器和电解加工系统联合组成的智能控制系统的仿真模型,进行仿真试验^[14]。

(4) 针对高频窄脉冲电解加工,对加工间隙进行建模分析,提出了间隙平均电流检测法。通过测量相邻一组平均电流及其方差这2个参数判断间隙状态,从而对进给速度、进给方向进行相应调整,精确地维持恒定的小间隙,实现快速稳定的加工^[15]。

5 磁场提高电解加工精度的研究

这项技术早期研究较多的是磁场对电解磨削、电解抛光的影响。近年来,国内开展了电解成型加工叠加磁场的研究。

西安工业大学进行了磁场影响电场的仿真试验及在电解加工装置上叠加磁场的加工工艺试验。试验表明,电解加工过程中叠加磁场会改变原有电场分布,进而改变间隙流场的分布,从而有利于解决以往电解加工过程中的杂散腐蚀现象,提高电解

加工稳定性^[17]。

近期又提出了将多极内封闭渐变磁路和多极外封闭渐变磁路组合后嵌入电解加工装置的方法,可消除分股束流、空穴,改善电解加工流场,改善工件表面粗糙度;提高集中蚀除的能力,有效减轻杂散腐蚀^[18]。

除了上述五大研究方向之外,叶片及整体叶轮加工、炮管膛线加工、周期循环电解加工、电解加工中管理系统的开发等工艺技术的研究均有所创新或突破。

设备研发及应用

电解加工是一种制造技术,常要求设备研发在工艺技术之前。甚至可以说,许多工艺技术必须建立在先有硬件的基础之上(如微秒级脉冲电流加工、振动进给加工等)。

电解加工的设备主要包括机床、电源和电解液系统3个主要实体以及相应的控制系统。

1 机床

(1) 成形加工机床。

由于受到数控机床、加工中心、高速加工机床等强力冲击,在民用工业领域,电解成形加工应用逐年萎缩,模具、叶片等传统优势领域基本失守。

但是,随着国防工业的蓬勃发展,由于具有高效率、高表面质量、无残余应力、无表面再铸层、阴极无损

耗等独特优势,电解加工在航空、航天、兵器等工业领域又重新焕发了生机。特别是在发动机机匣、叶片、整体叶轮、长筒零件、异型零件、炮管膛线等产品制造中,电解加工机床的需求较旺盛,针对上述零件的专用机床或主要用于特定零件的通用机床产量均出现了明显回升。

早期的电解加工机床,其控制系统多为采用分离元件的继电器系统或简易数控系统,其故障率高,稳定性差,使用寿命短,且控制柔性较差,自动化程度低。近年开发的电解加工机床,均采用了PLC或计算机控制系统,人机界面采用触摸屏。因而显著提高了设备的先进性能以及现场恶劣环境中运行的可靠性和稳定性^[19]。

(2) 去毛刺机床。

近年来,由于对产品高品质的追求和电解去毛刺工艺的显著优势,在发动机燃油喷射系统等领域,针对发动机缸体等零件内部交叉孔口去毛刺,以及喷油嘴内盛油槽、退刀槽的小余量加工等,电解去毛刺机床市场需求暴发性增长,国内重点电解去毛刺机床厂家产品供不应求,产销两旺。国外进口机床数量也显著增长。

目前,国内生产的电解去毛刺机床与进口机床相比,主要在配套附属产品如电解产物处理、电解液参数控制装置等方面存在明显差距,但在设备完整性、可靠性、易操作性以及美



观性等诸多环节均已取得长足进步。

2 电源

(1) 毫秒级脉冲电源。

由于制造成本与直流电源相差无几,近年开发的机床基本上配置了毫秒级脉冲与直流两用电源。旧设备改造时,除了针对特定产品的专用设备以外,也大多更换为脉冲电源。

(2) 微秒级脉冲电源。

目前,已开发了1000A、2000A的MOSFET脉冲电源工程化样机,主要性能指标如表1^[1]。

该电源解决了大电流快速换流所引发和派生的诸多技术难题,如:矩形波波形畸变,功率开关器件的过压击穿、过热烧损,快速短路保护等,有望用于实际生产。

此外,多家研究机构还开发了不同类型的小功率微秒级脉冲电源,主要用于电化学抛光、微细加工等领域。

(3) 高频群脉冲电源。

北京理工大学和合肥工业大学相继开展了高频群脉冲电源的研究。该电源可用于微细电解加工。群脉冲是经过主脉冲(高频)和调制脉冲(低频)相乘获得的特殊脉冲信号。高频群脉冲电源既能单独控制每一个脉冲的宽度,也可以控制一组内脉冲的个数,因而输出脉冲的波形灵活多变,特别适合于微细加工^[20]。

(4) 双向脉冲电源。

为了保持阴极工作表面的几何尺寸及物化性能的稳定,须利用双向脉冲电源的负半周电流来去除阴极表面的沉积。该类电源尤其适用于深小孔的加工。

展望

近阶段,电解加工的研究重点及应用领域会主要集中在以下几个方向。

表1 样机性能指标

额定峰值电流	1000 A (2000A)
额定电压	24 V (直流), 20 V (脉冲峰值)
最高脉冲频率	100Hz ~ 20kHz, 连续可调
脉冲宽度	25 μs ~ 5ms, 连续可调
短路保护关断时间	10 μs

1 电解微精加工的深入研究

电解加工技术具有加工机理的独特优势以及在微精甚至在纳米加工领域进一步研究探索的空间,但还必须在自身工艺规律认识和完善的基础上不断创新。具体应关注以下几点:

(1) 进一步完善硬件系统,如微进给系统及微控工作台的性能及可靠性的提升;加工过程自动检测与适应控制研发的深化。

(2) 微精加工机理的研究。尤其是中、高频率脉冲电流条件下,微精加工电解反应系统动力学等方面的深入研究。如:脉冲参数(脉冲宽度及占空比)对加工效果的影响,流场的影响,冲液加工的可行性及相应的参数选择。

2 脉冲电源的深化研发

微秒级脉冲电源的工程化完善以及在工业领域的大力推广应用。纳秒级脉冲电源、群脉冲电源、逆变式脉冲电源的性能完善。

3 电解加工机床

电解加工机床(包括其控制系统)及电解液系统性能的进一步改善。精密加工、微细加工等新技术对电解加工设备提出了更高的要求,如:机床的高定位精度及低速进给的稳定性、电解液系统的高清洁度及参数的稳定等,这些都需要引起足够重视。

本文共有参考文献20篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 阳光)