

国际电火花加工技术发展的五大趋势

北京市电加工研究所 (北京 100083) 曹凤国 张勤俭 翟力军 杨大勇

编者按: 为了及时反映国际电火花加工技术的发展现状, 国际电加工学术会议 (ISEM) 每三年举办一次。第 14 届国际电加工学术会议 (ISEM - XIV) 于 2004 年 3 月 30 日至 4 月 1 日在英国爱丁堡大学召开。本届会议共有来自 20 多个国家和地区的近 200 名代表参加。

北京市电加工研究所曹凤国研究员、杨大勇博士、张勤俭博士和姜勇工程师参加了本次盛会。本刊记者向他们了解该会议的情况时, 他们经过分析认为, 可以将电加工技术的发展趋势归纳为五化: 精密微细化、智能化、个性化、绿色环保化和高效化。

1. 精密微细化

微细加工在近代加工技术中是一个新的加工领域。对于电火花微细加工而言, 主要指尺寸小于 $300\mu\text{m}$ 的轴孔、沟槽、型腔等的加工。

实现精密、微细加工的一个重要条件是加工单位 (即每次放电的蚀除量) 尽可能小。而在电火花加工过程中, 其加工单位只取决于单个放电脉冲的能量。瑞士阿奇夏米尔公司的高精度线切割机床具有双丝切割交换系统, 可进行全自动穿丝, 细丝直径为 $\phi 20\mu\text{m}$, 可实现轮廓精度 $1\sim 2\mu\text{m}$, $R_a < 0.05\mu\text{m}$ 的加工精度。

微细电火花加工的极限能力一直是研究工作者追求的目标之一。图 1 是日本东京大学生产技术研究所的增泽隆久教授加工出的 $\phi 5\mu\text{m}$ 的微细孔和 $\phi 2.5\mu\text{m}$ 的微细轴, 代表了当前这一领域的世界前沿水平。

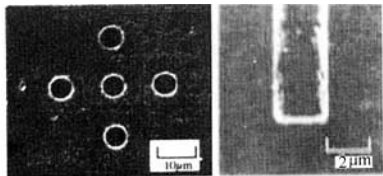


图 1 $\phi 5\mu\text{m}$ 的微细孔和 $\phi 2.5\mu\text{m}$ 的微细轴

图 2 是美国 Optimization 公司使用日本松下 ED82 型微细电火花加工机床加工出的光纤连接器, 共有 81 个

$\phi 120\mu\text{m}$ 的微细孔。

通过采用蠕动式微进给机构的微细电火花加工装置, 可以成功地加工出扫描电子显微镜用 $\phi 20\mu\text{m}$ 不锈钢微细轴、喷印打字机的 $\phi 10\sim \phi 100\mu\text{m}$ 喷嘴, 还可以加工电子枪和特殊的摄像管的狭缝件等结构。

微细电火花加工技术不仅可加工圆孔, 还可以加工各种异型孔。

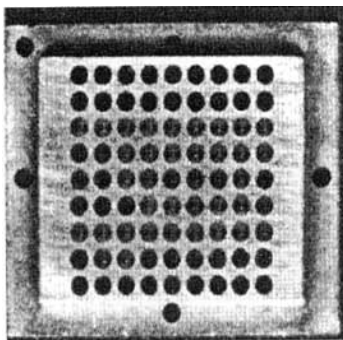


图 2 光纤连接器微细孔阵列

除了微细孔和微细轴的加工外, 微细电火花加工技术更深远的意义在于通过微细电火花铣削技术制造更小的微三维结构, 进而制造更小的

微型机械及微型机器人, 从而体现该技术更为广泛的潜在价值和前景。图 3 是美国林肯大学加工的 $1/8$ 微型球瓣, 其球径为 $\phi 150\mu\text{m}$ 。

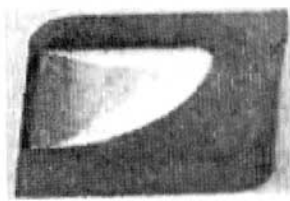


图 3 微方形孔

以微细电火花加工为主要技术手段, 日本东京大学增泽隆久教授利用简单形状的微细电极, 制作出了长 $500\mu\text{m}$ 、宽 $300\mu\text{m}$ 、深 $200\mu\text{m}$ 的微型汽车模具, 并用此模具制作出了微型汽车模型。

日本三菱电机利用微细电火花加工技术成功地制作

出了由齿顶圆直径为 $\phi 1.2\text{mm}$ 的大齿轮、齿顶圆直径为 $\phi 0.2\text{mm}$ 的小齿轮和直径为 $\phi 0.1\text{mm}$ 的内心轴构成的、最深部的加工尺寸为 $270\mu\text{m}$ 的齿轮铸模 (图 4)。

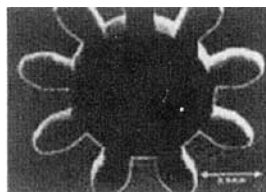


图 4 日本三菱电机

制作的微小齿轮模具

瑞士联邦工业学院的研究人员开发了精密 EDM 单元，它的工作区域为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 8\text{mm}$ ，该 EDM 单元分辨率为 5nm ，加工精度可达到 100nm 。德国卡尔斯鲁厄 (karlsruhe) 大学和日本

东京大学利用线电极电火花磨削 (WEDG) 技术联合开发了硬质合金微型铣刀的加工技术，并利用该铣刀进行了铣削加工试验 (图 5)。

2. 智能化

虽然智能控制系统在电火花成形加工中得到了大量应用，但仍有许多不完善之处，主要需解决以下问题：①根据不同加工要求确定工具电极与工件加工表面之间的合理间隙和合理加工参数。②开发能根据加工过程中间隙状态的变化而自适应变化的脉冲电源。③工作液的合理选用及其对加工过程的影响。④降低各种干扰对加工过程的影响。针对以上问题，电火花成形加工智能控制系统应重点研究和应用以下技术。



图 5 硬质合金微型铣刀及其加工形状

(1) 专家系统的应用 国外电火花成形机床在专家系统方面有了新的进展。例如夏米尔公司 ROBOFORM 2000L 机床配置了新的 PROGRAM EXPERT2 自动编程系统，加工时按照画面的提示只需输入少量数据，如电极损耗、表面粗糙度、加工工件及电极材料、加工面积、加工深度等，加工时可自动选取最优参数，自动监控加工过程，实现自动化最优控制。

(2) 人工神经网络技术的应用 人工神经网络是一种通过利用计算机对人类大脑功能进行抽象、简化和模拟而建立的高度非线性系统，它具有自组织、自学习、容错性和并行处理信息的能力，特别适合处理复杂问

题，与专家系统、模糊控制技术互相取长补短，提高对放电状态、加工效率、放电位置等的预测精度，提高在线实时控制效果，推动电火花成形加工过程控制向更高层次发展。

北京迪蒙巴克工控技术有限公司 B35、B50 系列电火花成形加工机床采用了人工神经网络控制技术，加工过程智能化程度大大提高，图 6 是该机床利用人工神经网络自动确定工艺参数的流程图。

(3) 模糊控制技术的应用 目前，国外电火花成形机几乎都应用了模糊控制 (FC) 技术。用模糊控制理论可以起到替代一个熟练操作人员的作用。即对检测到的间隙放电状态进行模糊推理，以识别加工是否高效、稳定，由此确定下阶段新的加工参数，来实现加工过程的最优化。采用该技术一般能提高加工速度 $20\% \sim 30\%$ ，特别是对深槽、筋肋、多腔多件加工以及加工中截面积变化较大的零件加工效果更为显著。

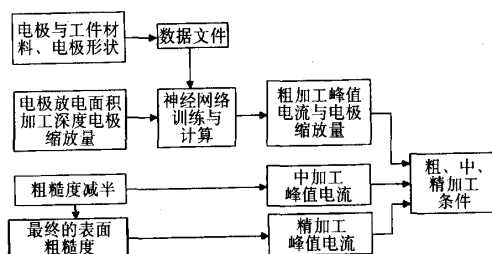


图 6 利用人工神经网络自动确定工艺参数的流程图

3. 个性化

随着生产的需要，各行各业出现了许多特殊的零件与结构，与之对应，为了适应零件多品种、小批量的特点，电火花加工机床的结构和功能也呈现个性化的发展趋势。

(1) 聚晶金刚石超硬材料的电火花加工专用机床 聚晶金刚石复合片是将人造金刚石微粉用铜、铁粉等导电材料作为粘结剂，在高温高压下与硬质合金基体烧结而成的复合材料。

北京市电加工研究所采用大幅度增加放电击穿爆炸力的电火花磨削工艺，成功地解决了聚晶金刚石刀具、模具及大面积聚晶金刚石复合片的高效精密加工问题。目前，采用增爆式脉冲电源的电火花专用机床是加工聚晶金刚石材料最有效的加工方法。有些导电的工程陶瓷及立方氮化硼材料也可用该类机床加工。

(3) 轮胎模具的电火花加工机床 摩托车轮胎模具

的特点是外形尺寸大,加工的型腔均布在圆周上,加工部位尺寸小,加工表面粗糙度值在 $R_a = 6 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内,模具的种类和数量多,因此,采用数控电火花专用加工机床是一种非常有效的方法。图7是加工轮胎模具的专用机床外形图,该设备除具有普通机床 X、Y、Z 三轴运动外,在工件安装夹具上还有绕中心轴的旋转运动 C 轴和夹具与 X 轴的旋转运动 A 轴;由于加工部位小,采用局部小油池,有两根进油管强力进油以满足加工对工作液的要求。电极材料一般采用石墨、紫铜。加工方法采用多电极更换法。加工规准的选择与普通模具一样。加工时采用定时抬刀。



图7 轮胎模具的电火花加工专用机床

(4) 航空蜂窝密封组件电火花加工机床 位于英国格拉斯哥的罗尔斯-罗伊斯(Rolls-Royce)公司是世界著名的航空发动机制造商,其航空发动机蜂窝密封件的加工便采用电火花加工技术。第14届国际电加工学术会议期间,北京市电加工研究所代表团访问了该公司,并与该公司技术人员进行了热烈讨论。图8a和8b分别是航空发动机蜂窝密封组件及其电火花加工专用机床。该机床有4个石墨电极头,单独伺服控制,油槽与工作台同步旋转,伺服电压为50~60V,电流值为8~10A。工作液采用硅藻土材料过滤。

(5) 330MW 汽轮机高压喷嘴组零件的电火花加工

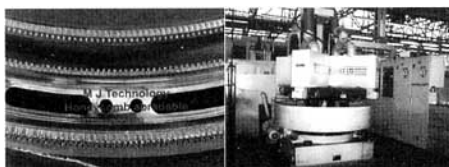


图8 航空发动机蜂窝密封组件及其电火花加工专用机床

机床 高压喷嘴组零件是我国引进法国阿尔斯通公司的产品330MW 汽轮机组的核心部件之一,该高压喷嘴组零件是由在节圆上均布的五种孔型40个三维空间曲面汽道组成,每一个汽道必须是内环、外环、叶片为一体而形成的整体式喷嘴组。汽道部分的结构和几何形状(图9)可分为A、B、C三部分,其中A、C两部分用普通的电火花成形加工方法就可解决,但B部分由于上下被叶片的背弧与内弧所封闭,前后被内外圆环所包围,形成一个封闭式型腔,用普通电火花成形方法难于加工,成为喷嘴组用电火花成形方法加工的关键。为此,北京市电加工研究所开发了专用数控电火花成形机床,并设计了一套柔性专用夹具,实现了空间曲面型腔的成形加工。

该产品
加工完成
后,经法国
专家检验
鉴定,各项
技术指标
达到

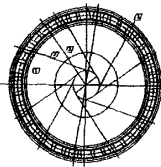
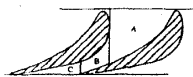


图9 标准汽道断面图

法国阿尔斯通公司标准要求。

4. 绿色环保

随着生态环境的日益恶化、环保意识的不断增强和环保法律的逐渐健全,绿色产品逐渐成为未来产品市场上的主旋律,绿色制造正在成为一种新的制造战略。绿色电火花加工的可持续发展战略就是开拓绿色电火花加工的新纪元。绿色电火花加工的研究内容包括:①高效节能脉冲电源的研制。②提高脉冲电源的电磁兼容性。③处理“三废”。

(1) 高效节能脉冲电源 采用全新主回路结构和全新控制方式的高效节能脉冲电源技术日益成熟,正逐步取代电源效率低于25%的传统脉冲电源。

北京市电加工研究所长期从事电火花加工技术的研究,最近开发了一种高效、节能、环保型电火花脉冲电源,其原理方框图如图10所示。与普通电火花脉冲电源相比,该电源具有加工效率高、电能利用率高等特点,电能利用率较普通电火花脉冲电源提高50%以上。表1列出了该电源加工PCD复合片与其他电源加工对比。此外,该电源加工PCD的表面质量也大大提高,是电火花加工尤其是大面积聚晶金刚石电火花加工的有效工具。图11a和图11b是两种电火花脉冲电源加工聚晶

金刚石的表面质量比较。

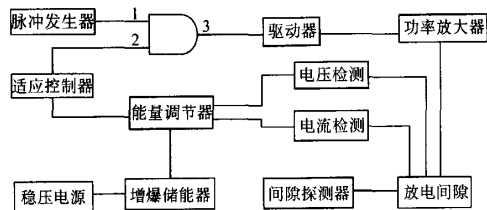


图 10 高效、节能、环保型电火花脉冲电源原理方框图

(2) 提高脉冲电源的电磁兼容性 电火花加工脉冲电源，不仅要有实用的技术性能，而且还要符合规定的电磁兼容性的指标。所以，脉冲电源的电磁骚扰和抗扰度的设计必须通盘考虑技术性能和电磁兼容性指标，且贯穿于产品制造全过程。

表 1 PCD 电火花加工效果对照表

电源类型	普通晶体	增加放电爆炸	PCD 复合片
电源参数	管电源	力晶体管电源*	高效节能电源
电源输出功率/W	3000	2400	1000
平均加工电流/A	30	16	8
加工速度/mm ³ ·h ⁻¹	80	211	528
电能利用率(%)	20	25	70

注*：在普通电火花电源上添加了增加放电爆炸装置，可大大提高加工 PCD 的效率。

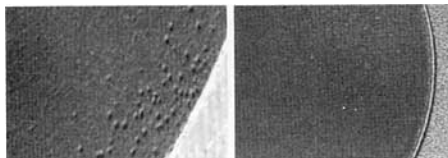


图 11 普通电源和高效、节能、环保型

电火花专用脉冲电源加工的大面积 PCD 表面质量对比

(3) 水基工作液的使用和气体介质的电火花加工 对于电火花加工中散发的气体，一方面采取通风或者排气处理等措施，保证操作环境清新；另一方面选用产生有害气体成分少、浓度低、工艺性能良好的介质作工作液，例如水介质和气体介质，其有害气体大大减少。

在第 14 届国际电加工学术会议上，英国诺丁汉大学所做的一篇关于绿色工作液的报告引起了与会学者的关注。目前，绿色工作液可分为两种类型，一种是水基工作液，另一种是气体介质。水基工作液主要分为两种，一种是自来水和去离子水，另一种是添加有有机物的水基工作液。

在某些场合采用自来水或去离子水作为工作液可以

获得较高的材料去除率。研究表明，当脉冲宽度为 800μs，采用黄铜电极为负极加工钢件时，材料去除率是采用煤油工作液的 2.5 倍；当用紫铜电极加工 Ti-6Al-4V，脉宽为 200μs 时，采用去离子水的材料去除率是煤油的 4 倍，电极损耗是其 1/3。

目前，以自来水作为工作液在高速电火花小孔加工中的应用非常广泛。慢走丝电火花线切割中大量采用去离子水作为工作液，对环境的污染大大减少。

为了提高材料的电火花加工性能，有些学者在自来水或去离子水中加入某些有机物（乙二醇、丙三醇、聚乙二醇、葡萄糖和蔗糖等）。研究表明，当工作液中加入浓度为 50%~60% 的丙三醇时，可以适用于粗、精加工，在大面积锻模加工中，其加工效率比采用普通工作液提高 1 倍。

以气体作为介质的电火花加工技术的研究以日本东京农工大学国枝正典教授为代表。国枝正典教授研究了采用氩气、氦气、空气和氧气为工作介质的电火花加工技术，当采用管状旋转薄壁电极、高速气体流为工作介质时，加工性能优于普通工作液。使用氧气为介质的材料去除率比空气介质提高 50%，比煤油工作液提高 21%。采用气体介质电火花加工的最大优势是电极损耗接近于 0，与脉冲宽度的大小无关。该工艺可应用于小型型腔的加工。

5. 高效化

近年来在提高电火花成型加工效率方面有了新突破。利用非燃性工作液或在工作液中加入添加剂的电火花成型加工机可成倍提高加工速度。如日本的三菱电机公司、Sodick 公司相继开发了利用水基工作液的电火花成型加工机，西德 AEG“艾洛特姆”公司也利用水进行电火花加工；在水基工作液中加工钢材，在相同的平均加工电流下，其加工速度比煤油工作液高出 2~3 倍。

瑞士阿奇夏米尔公司最新推出的线切割机床，最大切割速度为 500mm²/min。

以往直线电机主要用在加工中心上。目前，直线电机在沙迪克公司生产的 EDM 和 WEDM 机床上已广泛应用。直线电机的使用使传动机构简单，不用滚珠丝杠没有传动间隙，能实现高速度、高加速度移动，满足了 EDM 加工高速响应的特别要求。最大驱动力高达 3000N，快进速度可达 100m/min，最大加速度达到 1g

(下转第 44 页)

3. 冲模的刃磨

将冲模放在磨床的工作台电磁吸盘上,磨床工作台到达左右极限位置时,应该使砂轮至少离模具两端有30mm距离。调整好横向进给和工作台速度,然后使砂轮接触工件。刃磨模具时需连续大流量的切削液,切削液可以保护模具不受热变形引起损坏,延长金刚石砂轮寿命,以及清洗带走磨下的金属,减少振纹,表面粗糙度值小。切削液不应该含硫, pH 值不能超过9或低于7。因为无论哪一种情况都会腐蚀硬质合金中的粘结剂钻和砂轮粘结中的树脂。金刚石砂轮在磨削时最好听磨削的声音,当砂轮同工件接触时会发出轻微的咝咝声。在开始接触之后,砂轮应该升高约0.05mm,然后向下进给回复到切削位置,每次进给量为0.005mm。在整个粗磨过程中,每次砂轮向下进给量不超过0.005mm。对于精磨,进给量应该减少到0.0025mm,并允许砂轮在两次进给中间走几次空程。

刃磨无论任何时候暂停,在砂轮与工件接触之前,砂轮应该至少抬起0.05mm。这将允许工作台支承面存储的油膜引起工作台抬起而带来的任何变化。如果总的磨削量超过0.25mm,较好的做法是利用金刚石砂轮磨削之前先采用氧化铝砂轮磨削,用氧化铝砂轮尽可能地磨去大部分余量。因为切屑对金刚石砂轮的粘结料有修整作用,使得金刚石砂轮的磨损加剧,比磨削硬质合金时磨损要快得多。因此,应避免用金刚石砂轮磨削过量的钢料。

刃磨结束后,用压缩空气将所有切屑、磨粒和其他杂质从模具中清除干净,然后退磁。

(上接第36页)

以上。能消除由于电蚀产物未排除而发生的集中放电,二次放电间隙不均匀性等得到极大的抑制,从而改善了加工质量,提高了加工效率。

随着国际互联网的高速发展和普及,EDM机床的通信和控制也发生了巨大的变化。FANAC公司开发了集中管理软件包。公司的总监视器通过国际互联网可很便利地监控多台远程异地WEDM机床的工作状况,并能实时诊断分析每一台机床的工作故障,及时向用户提出解决措施。三菱电机公司也开发了远程操作监控系统。远程终端的显示器画面与机床旁的显示器画面完全

将所有的导柱、顶尖和其他装置镶在模具中,把卸料板放回原处,保证所有支承螺钉都在原位。必要时还得取下卸料板,将垫圈放在卸料板螺钉头下面,要注意每个螺钉头下面的垫圈厚度保持一致。如果卸料板是利用套筒型卸料板螺钉固定,所有套筒也应磨去和凸模相同的量。

当卸料板装回时,不要使卸料板弹簧过度压缩。因为过度压缩会使弹簧过早疲劳,可以插入较短的弹簧或者拿走弹簧之下的垫圈,导杆和顶尖也必须重新磨到正确的长度。

凹模中的抬料装置和条料导向机构磨损一定程度应更换,并在所有油杯中加上润滑油。润滑油的好坏和进给状态对模具有很大影响。特别在生产数量多、每分钟行程次数高、卸料板和导杆容易产生烧结现象时,必须使这些滑动面润滑状态良好。在导柱和导套内注入轻机油或轻主轴油。这时冲模就可以安放到冲床上了。

有时冲压件质量不好的原因是模具安装不当造成的,模具安装不当还可能使模具损坏。

因此,在冲压作业开始时,压力机应进行调整检查,把最初冲压件拿来作比较,以确认模具的安装是否正确。作业中根据冲压件形状、尺寸变化和毛刺的大小调整模具。

4. 结束语

刃磨比较复杂的精密冲模,应考虑采用什么方法更为合理,分析相关部件尺寸是否也磨掉相同的量,如何调整,应防止增加模具零件的负荷,降低了模具使用寿命。冷

(收稿日期:20041120)

一样。用户通过随机携带电话可与制造商讨论加工参数调整、机床故障诊断维修、订货等有关问题,实现了电火花加工过程的高效性。

此外,新型电源和机器人技术也已应用到了电火花加工机床中。例如夏米尔公司生产的某系列电火花线切割机床,不仅使用了十分先进的“Clean Cut”新型脉冲电源,还配备了小型HSR-5机器人,使电火花线切割机床的加工速度和其他性能有了大幅度提高,成为目前世界电火花线切割机床先进水平的代表之一。冷

(收稿日期:20041105)