

# A型精密数控电火花成形加工机床及其应用\*

## A-Type Precision CNC EDM Machine and Its Applications

北京市电加工研究所 杨大勇 付伟 伏金娟 任连生 杨立光 刘萍



杨大勇

博士,研究员。现任北京市电加工研究所常务副所长;北京市迪蒙数控技术有限公司总经理。主持完成了北京市自然科学基金项目“智能技术在电火花加工中的应用研究”,主持新星计划项目“电火花加工放电状态监测与控制中混沌理论的应用研究”,北京市科学技术研究院的重大项目“精密数控电火花成形机床控制系统的研制”,北京市自然科学基金重点项目“电火花加工中智能化柔性化开放式数控系统的研究”。

精密数控电火花成形加工机床是精密特种加工技术的重要设备之一,对航空航天、军工、精密机械、汽

\*北京市自然科学基金项目(3092011)资助。

精密数控电火花成形加工机床是精密特种加工技术的重要设备之一,对航空航天、军工、精密机械、汽车、微电子等行业的精密零件和精密工模具制造具有重要意义。

车、微电子等行业的精密零件和精密工模具制造具有重要意义。本文介绍了我所科技人员经过10多年拼搏,完全掌握了核心技术、拥有自主知识产权的高新技术产品——A型精密数控电火花成形加工机床与典型应用,愿与各位专家和使用进行交流 and 探讨,共同为我国国防科技工业、特种加工行业做出贡献。

### 精密数控电火花成形机床主机

主机是用于支承、固定工具电极及工件,实现电极在加工过程中稳定的伺服进给运动和高精度加工的硬件系统。本文研制的A型精密数控电火花成形机床主机采用“C”形结构,中心负重形式,形成左右对称的合理楔形结构,具有较好的刚性,导轨受压均匀,精度高。主机床身、立柱采用优质铸铁树脂砂铸造技术制造,经过两次时效处理,保证了机床具有较高的静态、动态刚性和减振性能,是精密数控机床精度得以保证的

前提。主机工作台采用优质花岗岩材质制成的00级平板,这种材质热变形小,能确保机床长久保持精度,绝缘性好,可大幅度降低放电加工时两极间存在的寄生电容,是进行高精度镜面加工的保障。X、Y、Z 3轴传动丝杠、导轨副均采用进口研磨级(C2级)高精度滚珠丝杠、超精密级(SP级)直线滚动导轨以及高精度(P4级)双向无间隙背推球轴承,其优点



A35 精密数控电火花成形机床

2009年第5期·航空制造技术 57

是摩擦力小、运动精度高、精度保持性好。另外,其刚性和灵敏度较高,机电控制性能较好。

上述措施极大地提高了机床的精度,定位精度 $\leq 4\mu\text{m}$ ,重复定位精度 $\leq 2\mu\text{m}$ 。主轴头采用高性能交流伺服电机的直拖结构,配置高精度的编码器,可实现单脉冲的驱动当量 $\leq 0.1\mu\text{m}$ 和最大移动速度 $10\text{m}/\text{min}$ 的运动,实现了高刚性的连接和高灵敏度的运动控制,具有摩擦力和反向间隙小、避免低速爬行等优点,提高了主轴的伺服性能。

### 智能化高精度数控电火花成形加工脉冲电源

脉冲电源是电火花成形加工机床的一个重要组成部分,几乎所有的加工性能,如加工稳定性、加工速度、电极损耗、工件的表面粗糙度、表面变质层等都与脉冲电源有关。

#### 1 电火花加工控制系统及主回路

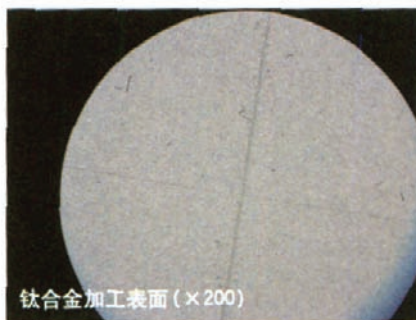
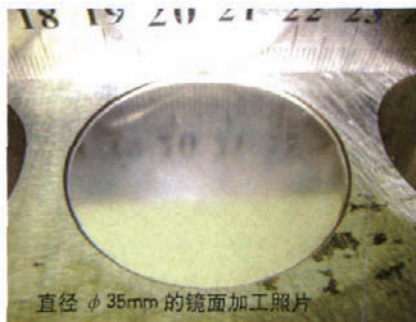
电火花加工控制系统包括时钟控制与放电脉冲信号发生、电流电压等参数设定、特殊加工波形控制、抬刀控制、伺服间隙与放电状态检测、异常放电处理等部分。主回路单元包括低压加工回路、高压加工回路、高低压复合回路、低损耗回路、超精加工回路和电容回路。加工时,可根据脉冲电源提供的主要回路和附加回路得到多种波形的组合,针对不同的加工工艺要求任意选用,叠加到放电间隙,使加工对象得到最佳加工效果。功率放大单元完成对加工脉冲电压、电流的功率放大,它由IGBT功率开关元件和前置驱动放大电路组成。

只有精确地控制放电能量才能实现加工材料进行精确蚀除,才能获得高的精度和表面质量。

#### 2 精确快速的放电状态检测与控制

高精度、高效率电火花成形加工对加工状态的实时监测有着极高的要求,反馈环节的精度和稳定性直接

影响放电能量和加工效果。利用高速采集手段快速检测到拉弧状态,并迅速做出反应是保证高精度和良好粗糙度加工的必要条件。本文采用



12bit 的高速数字模拟信号转换器件来监测异常放电状态,高速的转换时间和高精度的采样结果能够更加快速地反映放电加工间隙的状态。一方面在放电控制上采用改变脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流等参数的方法来控制加工过程,消除拉弧状态;另一方面能够快速控制高精度高响应电机驱动系统,精确控制放电间隙,从而更好地控制放电能量,加工出高质量的镜面。

(1) 电流波形上升沿检测。

电流波形上升沿检测是防止在间隙产生积碳、拉弧的检测回路。通过检测电路送出时间间隔固定的两组探测脉冲,共同对间隙电流波形上升沿进行检查、判断。如果探测到电流脉冲过大或过小,即发现有害脉冲,则将脉冲间隔拉大10倍,以利

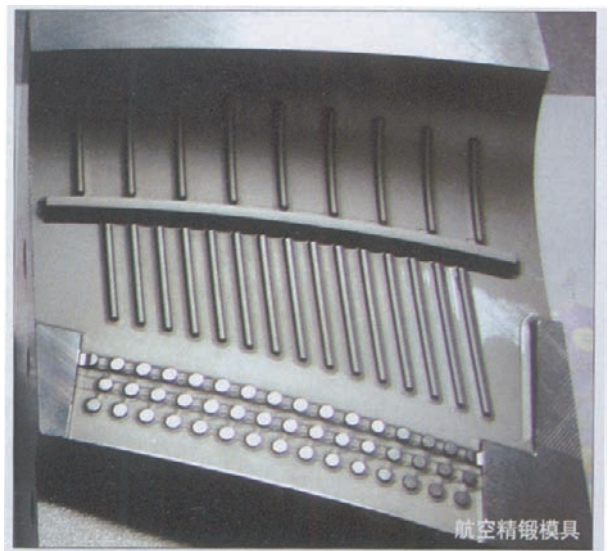
于排屑和消电离,改善间隙状态,提高加工稳定性。

(2) 切断控制。

放电间隙发生拉弧或短路等异常现象后,根据检测环节获得的信号,切断脉冲电源输向放电间隙的局部或全部脉冲,使放电间隙充分消电离,然后恢复稳定加工。这也是间隙预防积碳、拉弧的有效措施。当击穿延时比设定时间短时,间隙状况恶化,极易产生短路、拉弧,对工件造成烧伤。此时,将振荡脉冲关断即切断功率管门控脉冲输出,降低加工电流。这种措施在石墨电极加工和工作液处理困难时,效果更加明显。

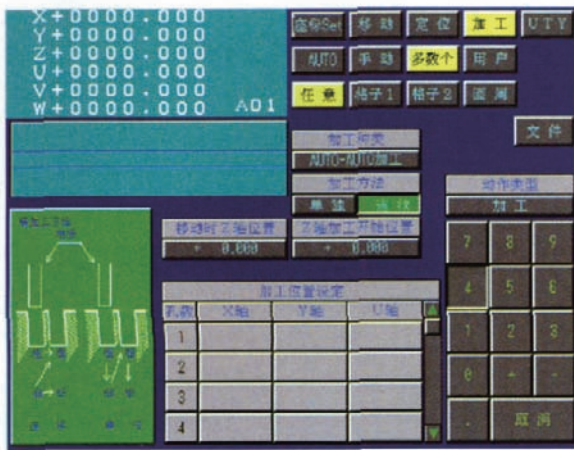
(3) 电极损耗控制。

最大限度地降低电极损耗是提高加工精度的必要手段之一。电火花加工时,两极连接脉冲电压的极性不同,所造成的蚀除量也会不同,在脉冲放电的前一阶段时间,呈负极性的电子因其质量小,容易获得动能,电子不断轰击阳极,而与电子呈相反极性的正离子因其质量大,获得动能的时间较长,此时,电子传递给阳极的能量高于正离子传递给阴极的能量。而随着放电时间的增加,正离子逐渐获得较高的运动速度,它的质量



大,轰击阴极时的动能较大,故传递给阴极的能量显著增加,此时,阴极的蚀除量大于阳极。因此,合理利用

放电加工中产生的极性效应,能够最大限度地增加放电加工效率,减小电极损耗。此外,合理地控制电流上升沿与减少负波也是减小电极损耗的必要手段。本文研制的脉冲电源充分考虑了以上因素来降低电极损耗,



五轴五联动加工界面

其最低电极损耗 $\leq 0.05\%$ 。

#### (4) 精确稳定的放电电压控制。

低压稳压电源系统采用全桥全控全闭环晶闸管自动稳压系统,是功率输出的主回路,用来为放电间隙提供加工能量。为满足不同材料加工要求,提供了多档电压选择,工作电压从 60V 到 120V,共分为 10 档。主电源采用全控全桥可控硅整流电路,具有闭环自动稳压功能,同时设计了短路、过流、过压、缺相等多项保护功能。

高压稳压电源系统采用高速 PWM 调制原理,实现高压 (280V) 大功率的稳压电源,其波纹系数 $< 1\%$ ,稳压精度达到 $\pm 1\%$ 。高压辅助放电回路能够起到拉大放电间隙、稳定放电过程的作用,因此其电源的精确稳定非常重要。

## 多轴联动数控系统

### 1 多轴联动插补方法

该多轴联动数控系统联动轴数可达到五轴,同时又涉及回转运动,插补算法复杂。本系统采用二次插补法,将插补分为粗插补和精插补两

部分完成。粗插补在每个插补周期内输出的不是单个脉冲,而是坐标轴的位置增量数(一段微线段);精插补对粗插补计算出的每一条微小线段进行脉冲增量插补,即在插补周期内产生进给脉冲。二次插补法是实现高速复杂多轴联动控制较好的插补策略。

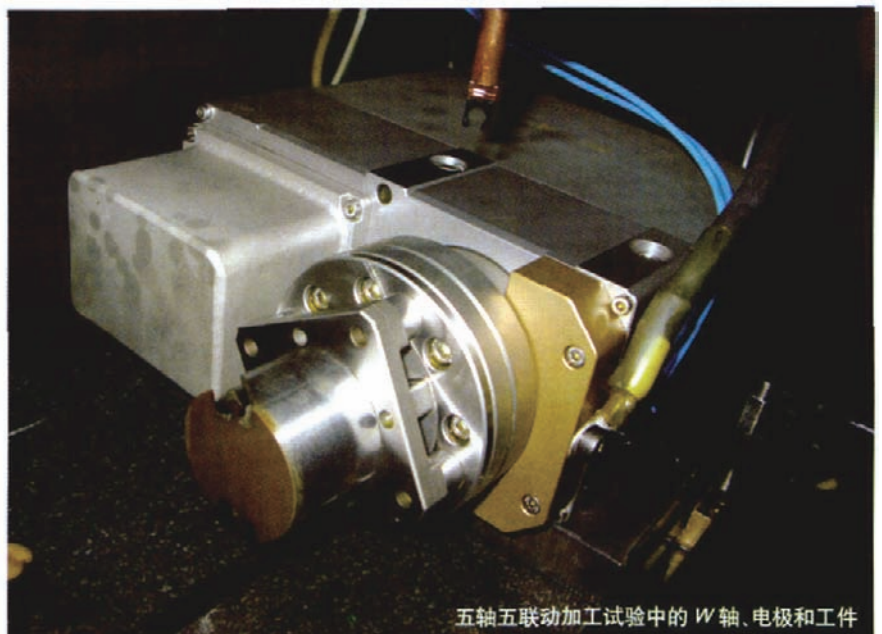
电火花加工过程是一个对放电间隙的动态跟踪过程,在跟踪过程中,必然有放电状态不佳的时候,在这种情况下,要求电极能迅速地进行伺服回退,这就涉及到反向插补的问题。反向插补是电火花加工数控系统的加工过程中频繁出现的一个行为。为了避免反向回退时对加工表面产生影响及出现多次回退后插补轨迹的发散现象,就需要反向插补的算法能够做到严格按原轨迹回退。

### 2 高速、高精与全闭环控制

电火花成形加工机床的数控系统比普通切削加工机床的数控系统对伺服进给控制有更高的要求,因为电火花放电过程实质上是一个间隙

维持过程(既有进给又有回退)。间隙过大时,间隙介质不易被击穿,有效脉冲放电率低;间隙过小时,蚀除产物无法排除,且易相对集中在间隙中某一区域,微短路的发生较频繁。也就是说,可能造成起弧的各种因素在间隙过小时发生的概率相对较高。只有精心调节伺服进给,间隙大小适当,才能维持较佳的放电状态,具有较高的加工效率和更强的加工能力。电火花成形加工数控系统的伺服进给控制是一个很精细的闭环控制,所以在硬件上采用高速 I/O 通道设计,在软件上采用高效的汇编代码和 32 位 CPU 指令代码嵌入式设计,保证软硬件运行的高效性;检测部分采用精密的数字硬件电路设计以确保检测的准确;采用高分辨率的反馈器件保证系统控制精度。这样便能保证检测系统精确、稳定可靠,进给伺服电机与机械系统响应灵敏、控制准确、精度高并且稳定,实现放电伺服进给系统的高性能控制。

数控系统可实现全闭环控制。数控系统的检测部分采用精密的数字硬件电路设计以确保检测的准确;采用直线光栅尺和高分辨率的脉冲编码器双位置测量反馈伺服系统,各轴在运动时独立检测实际位置, X、



五轴五联动加工试验中的 W 轴、电极和工件

Y、Z各轴达到最小机械驱动精度 $0.1\mu\text{m}$ 的位置检测控制精度。借助机床的刚度与精确的伺服控制,实现超精密的定位精度和重复定位精度。

高速的主轴拾刀控制促进放电加工屑的排出,特别适用于窄槽、窄缝和加强筋的加工。本文研制的数控系统采用高分辨率的全数字交流伺服驱动方式,可实现主轴(Z轴) $10\text{m}/\text{min}$ 的移动速度。



四轴四联动加工样件

### 典型加工应用实例

#### 1 高效高精度镜面电火花加工

利用高性能镜面加工回路,在普通加工液中不添加任何粉末的条件下实现了较大面积的电火花镜面加工。利用该项加工技术在直径为 $\phi 35\text{mm}$ 的加工面积上,表面粗糙度达到 $R_a=0.08\mu\text{m}$ ,像镜子一样清晰。该镜面加工回路有效克服了分布电容、分布电感等寄生参数对镜面加工的不利影响,精确控制了微小放电能量的恒量输出,并在工具电极表面形成一层炭黑膜,其作用是有效保护电极表面不被损耗,提高了加工精度和工件表面质量,所以,可以方便地选择电火花加工作为诸如手机、个人掌上电脑(PDA)等中小型模具表面最终精加工的手段,有效解决了深槽、窄缝等不易抛光和加工精度差的问题,进一步拓展了电火花加工技术的应用范围。

#### 2 钛合金材料及航空用精锻模具电火花加工

加工钛合金时,加工速度可达 $89\text{mm}^3/\text{min}$ ,加工表面粗糙度达 $R_a=0.2\mu\text{m}$ 。加工航空用精锻模具时,加工面积超过了 $5600\text{mm}^2$ ,加工深度 $16\text{mm}$ ,加工精度 $0.015\text{mm}$ ,表面粗糙度达到了 $R_a=0.4\mu\text{m}$ 。

#### 3 飞机发动机连杆精锻模具电火花加工

采用我所精密数控电火花成形机床加工的飞机发动机连杆精锻模具,材料为 $9\text{CrSi}$ ,加工部位尺寸 $167\text{mm}\times 55\text{mm}$ ,加工深度 $(13.0\pm 0.05)\text{mm}$ ,加工表面粗糙度为 $R_a=1.0\mu\text{m}$ ,有预加工。电极采用日本ISO-61石墨,单边缩放量为 $400\mu\text{m}$ ,加工面积约为 $8000\text{mm}^2$ ,在型腔 $55\text{mm}\times 100\text{mm}$ 处加工 $7-\phi 2$ 排气孔。加工方法采用单电极摇动法。加工时采用

定时拾刀,粗加工时UP02, DN05;精加工时UP03, DN03。伺服基准电压粗加工时SV03(35V),精加工时SV05(60V)。摇动方式因工件均为圆弧曲面,采用圆轨迹。加工时,由于有预加工,虽然模具的放电面积较大,但开始加工时电极与工件只是局部接触,加工电流不宜过大,否则会因局部电流密度过大而造成烧伤,待放电面积逐渐增大后,再相应增加加工电流。

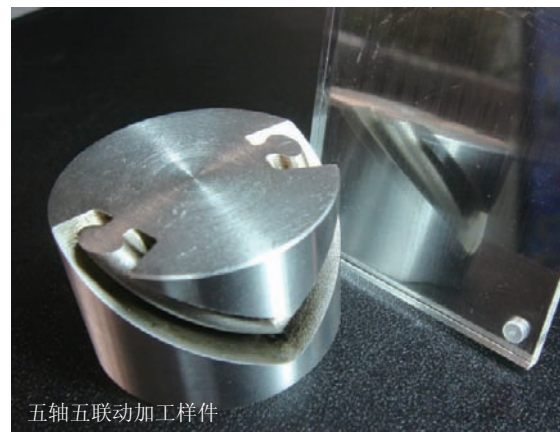
#### 4 多轴联动加工试验与加工

在机床上装备精密分度旋转轴U轴(C轴)、W轴(A轴),配合其他3个直线轴实现四轴四联动、五轴五联动加工。加工样件为空间曲线的汽车密封件成型模具,它采用与端面形状相同的片状紫铜电极,通过X、Y、Z、U四轴的伺服联动完成空间内藏式曲面的型腔加工,这种形状模具用机械加工方法是很难实现的。加工样件为五轴五联动加工的圆柱面上空间曲线样件,同样用一个与端

面形状相同的片状紫铜电极,通过X、Y、Z、U、W五轴的伺服联动完成空间曲面内藏式型腔加工。

#### 5 电火花加工后表面层状态加工测试结果

电火花加工后的表面层状态是众多航空航天、军工制造企业最为关注的问题。它不仅影响零件的质量和使用寿命,更重要的是用于航空航天零件加工时,显微裂纹的大小有时会引出非常严重的后果。为此,我们进行了航空常用材料3J33高弹性合金钢、9Cr18不锈钢等的表面层状态加工试验并进行检测。3J33高弹性合金钢精加工后测试结果(测试仪器JSM-6400扫描电镜):表面重熔层 $< 2\mu\text{m}$ ;9Cr18不锈钢精加工后测试结果(依据航空技术要求S10JT.247的2类):均未见重熔层,未见断续小珠、重熔层气孔、重熔层脱离、基体金属裂纹以及镍基、钴基合金的碳化物范围内的裂纹、起弧。



五轴五联动加工样件

### 结束语

本文叙述了A型精密数控电火花成形加工机床的主要特性、典型应用和电火花加工后的表面层状态测试结果,供各位专家 and 用户参考。天道酬勤,我们将一如既往地致力于特种加工领域的技术创新和产品应用,用心打造产品,用心服务社会,让更多的行业、更多的用户感受到我们产品与服务的魅力,共同创造美好的明天。(责编 金卯)