

迎接电火花成形加工的第二次腾飞

北京市电加工研究所 （100191） 杨大勇 伏金娟

当我们还在争论高速铣削加工大发展下电火花成形加工的生存问题时，国外的情况已经发生了变化。高速铣削加工非但没有取代电火花成形加工，而是将电火花成形加工推向精加工的新高度。市场上，高速铣削加工和电火花成形加工机床捆绑销售已成为大趋势。凡同时可提供两种产品的厂商大行其道，市场份额越来越大。很久没有露面的大中型电火花成形加工机床又精彩亮相，最为耀眼的当属±0.003～±0.001mm的超精电火花成形加工机床。采用高速铣削加工作型腔精确预加工和石墨电极的高精度制造，用电火花成形加工作为精加工最终工序已成为高质量模具的常规流程。甚至一个型腔的型面分别由高速铣削加工和电火花成形加工，两者衔接处接刀差可控制在±0.002mm以内。在2011年中国国际机床展览会（CCMT 2011）上，电火花成形加工将肯定会有让人眼前一亮的新机型，这将预示着电火花成形加工的“第二次腾飞”到来了。

电火花成形加工的“东山再起”是由于市场的需要和从业者的努力，使电火花成形加工有了大幅度的进步。目前，用户选择什么工艺路线并不单纯依据技术的先进性，而是经济性起着重要作用。高速铣削加工的高效率是以昂贵的刀具消耗为前提的，而刀花和接刀痕的抛光，还是要比电火花成形精加工表面的抛光要困难得多。抛光占高档模具制作工时的1/4，已成为提高经济效益最重要的环节。在硬切削中，复杂、深窄、微细型面的加工中上述矛盾更加尖锐。此外，对于航空航天的带叶冠整体式涡轮盘（见图1a）、轴承动态预紧系统环（见图1b）和大量的钛合金零件加工，电火花成形加工几乎成为了唯一的选择。



(a) 带叶冠整体式涡轮盘



(b) 轴承动态预紧系统环

图 1

这世纪之交的十几年是高速铣削加工大发展与广泛应用推广之年，亦是电火花成形加工迷茫摸索的过程。自数控技术成熟和刀具涂层技术推广以来，型腔的大部分粗加工、半精加工就已无采用电火花成形加工的必要了，要存在就只有向精加工方向发展。首要解决的问题当然是开发各种各样的微精加工回路，但结果并不理想。镜面加工面积仅有4cm^2，尺寸精度只能控制在±0.01mm，效率低，操作不容易，可靠性让人不踏实。这样的精加工水平显然不能满足用户的要求。此时，混粉电火花成形加工掀起一个高潮，吸引了大量的眼球，但混粉的机理在于扩大精加工的间隙，对控制尺寸精度和达到型腔的清晰度会有一定影响，所以它还不能成为电火花成形加工的主流技术。那么，电火花成形加工的精加工应向何处发展呢？

直到20世纪90年代，电火花成形加工的低损耗和数控化等技术的研发都很顺利，但在精加工方面停滞不前，说明延续原来的思路走下去是行不通的。比如，用现代的功率器件实现高频超窄脉冲并不困难，用示波器

观察输出波形也很好，但实际应用效果就是不好。所以说进入电火花成形精加工领域，重要的是研究的思路要更新，那就是工作要细致，要深入到机理层面去研究，要对电火花成形加工的工艺过程有透彻的理解。

我们认为，当前电火花成形加工的精加工核心技术主要表现在以下几个方面，在此分别进行简述，与业内人士进行一些探讨，抛砖引玉，希望引起业内人士越来越广泛、密切的关注。

高精度的放电能量控制

如何保证小脉冲真实地到达放电间隙而没有额外的附加能量，这是相当困难的。放电回路上的寄生参数，电极和工件之间形成的电容在连续空载下不断累积充电，这些能量会在后续的放电中全盘输出，对精加工影响很大，轻则打出一批大坑，表面粗糙度不均匀；重则打出很麻烦的针孔，甚至造成局部损伤。所以，对于微精放电回路要求输出能量尽可能小。其措施之一是抬刀时电极和工件两极之间不带电，此时以及脉冲停歇时间将两极短路，以扫清寄生电荷。其措施之二是将微精线路板从电气柜内移到立柱侧面或移到主轴箱侧面，最近已安装到主轴滑枕的前面，它到两极之间距离已达到最短。这样一来效果很明显，镜面加工面积有很大增加，一般小家电模具都可以满足要求。

图2所示是GF阿奇夏米尔配置快速精加工模块进行的型腔面积与表面粗糙度值的对比试验。图3所示是北京市电加工研究所利用高性能精加工脉冲控制回路，在不添加任何粉末的普通工作液中实现了较大面积的电火花镜面加工实例。图3a所示是直径为25mm（面积为490mm^2）的镜面加工照片，其表面粗糙度值达到R_a=0.05μm，可清晰地像镜子一样映照出钢板尺的刻线和数字；图3b所示是直径为40mm（面积为1 256mm^2）的镜面加工照片，表面粗糙度值R_a<0.10μm，并实现了工程化稳定加工。该镜面加工回路精确控制了微小放

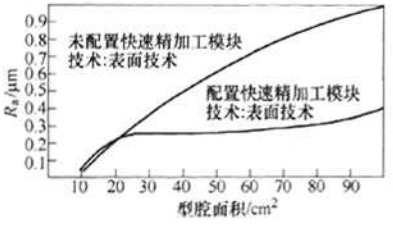


图2 配置快速精加工模块进行的型腔面积与表面粗糙度值的对比试验

电能量的恒量输出，并有效利用极性效应来保护电极表面不被损耗，提高了加工精度和工件表面质量，实现了像手机、个人掌上电脑（PDA）等中小型模具表面用电火花加工作为最终精加工工序的目的，有效地解决了深槽、窄缝等不易抛光和加工精度差的问题。图4所示是采用该项技术加工的手机后盖模具照片，其加工条件是：电极为纯铜，工件为SKD61热作模具钢，在普通工作液中一次加工完成的，加工后表面粗糙度值R_a≤0.2μm。



(a) 直径25mm的镜面加工



(b) 直径40mm的批量镜面加工

图 3

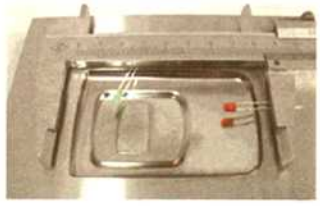


图4 手机后盖模具的镜面加工

在有预铣的型腔精加工中，电极沿主伺服轴方向的放电面积的变化是多样而复杂的，由于规准匹配不当，电流密度超限，造成异常损耗、积炭，甚至烧伤等不良现象。现在有了能量控制技术，能有效解决这些问题。能量控制技术有两种：①在精密机床与精密脉冲电源及精密工艺软件的基础上，每个放电规准都有适宜的进给速度，过快表示面积小了，就要减小规准，降低能量；过慢表示面积大了，就要换规准，增加能量。②采用CAD和CAE技术，预加工型面和电极型面的啮合过程是可以精确计算的，所以它和规准的设定可以拟合得很准确。

积极的集中放电控制技术

集中放电是电火花成形加工的一种伴随现象，是由于放电局瞬间的堆积造成局部连续放电的现象，对

粗、半精加工来说较容易自行转移，而在精加工中因为间隙太小不容易实现放电通道的转移，此时就必须采取措施。过去的方法就是适当控制，当间隙污染到一定程度后，加大脉冲停歇时间而等待间隙状态改善。这样精加工放电的连续性变差，故对加工效率的负面作用比粗、半精加工时更大。目前，采用的新技术有两种：①把抬刀分为高抬刀和微抬刀，高抬刀可以将电极拉出型腔充分排屑，而微抬刀起到均匀整个型面的屑子浓度、强制中断集中放电的作用，现代的伺服控制可以做到频率更高的抬刀，而放电时间并未明显减少。②将电流、电压细分，用脉冲能量的梯度变化抵消集中放电能量正反馈的趋势，从而降低了集中放电的几率。对集中放电的有效控制，可使精加工过程更稳定，放电凹坑的一致性更好，表面粗糙度更均匀。例如，加工26mm×26mm×3mm、R_a=1.6μm的IC集成电路封装模具，其表面平面度可以小于2μm。

石墨电极的大面积推广应用

电火花成形加工的精度是建立在“电极制作”的基础上的，石墨电极的广泛普及，尤其是在精加工上的应用，使电火花成形加工工艺的“钱”景看好。石墨材料的主要特点有：①由于石墨材料切削抗力小，无振动、无毛刺、无内应力，用高速铣削加工石墨材料比加工铜材料快5倍。②石墨材料的线膨胀系数小、质量轻、刚性好，做精加工电极非常合适；而铜材料相对较软、铜钨合金材料较易变形。③中等粒度的石墨价格比铜还要便宜20%～30%。④石墨电极的电火花成形加工效率比铜快40%。此外，石墨电极若本身加工的表面粗糙度值R_a=0.49μm，而加工后的工件表面粗糙度值可达R_a=0.11μm，这是电火花成形加工摇动功能的作用，也是高速铣削加工无法比拟的，在解决接刀痕和降低表面粗糙度方面具有相当高的实用价值。

石墨电极之所以能在今天才大放异彩是因为上述电火花成形加工技术的逐步成熟，使石墨电极容易积炭烧伤的问题得到圆满解决。如采用细粒度石墨电极的点浇口加工，出口直径为（0.15+0.002）mm，孔深10mm，表面粗糙度值R_a=0.14μm，用6个电极。又如，用石墨薄片电极加工厚（0.05+0.003）mm、深0.5mm的窄槽，用14个电极，表面粗糙度值R_a=0.48μm。上述实例是微细加工，故电极数量多一些，常规有高速铣削预加工的型腔也就需要1～2个电极，与铜电极没有太大区别。当然，与铜电极比较，石墨电极镜面加工性能稍有差距。

电火花成形加工机床的高精度化

电火花成形加工机床用途之一是与高速铣削加工机床配合加工模具或零件，用以清除高速铣削加工刀花和接刀痕的进一步加工，相当于自动抛光机，同时完成高速铣削加工不擅长的清角与窄槽的加工，当然高速铣削加工留给电火花成形加工的余量越少越好。所以，要求电火花成形加工机床的精度至少达到与高速铣削加工机床同一水平。如上所述，采用14个电极加工一个0.05mm宽的窄槽达到±0.003mm的精度。可想而知，电火花成形加工机床的定位精度要求非常高。同时，精度的提高给加工效率、电极损耗都会带来诸多的好处。

到目前为止，电火花成形加工的机床结构已经定型，各企业几乎一样，大都是工件不动，电极作3～4轴运动，牛头式滑枕短C型布局，滑枕截面尺寸有加大的趋势，以保证Y轴在悬伸情况下，随着电极重量的变化，但移动直线性基本保持不变；各轴普遍采用光栅全闭环控制，以提高定位精度。近来，大家都对整机热平衡给予高度重视，重点要求Y轴滑枕相对于浸泡在恒温工作液里的工作台面有最少的温差，并对室温和电气箱温升采取必要的控制措施，如图5所示为GF阿奇夏米尔采用的双热稳定系统的原理示意图，它是由两个不同的温度探头测量工作液温度，实时地冷却电气箱里的循环空气温度，以此来保证X、Y、Z轴的整个结构控制在相同的温度水平上，这是实现微米级加工的最重要手段。再者，由于抬刀速度与频率的提高，Z轴的丝杠螺母成为新的发热源，它们所在位置又很敏感，会直接导致主轴精度的漂移，故亦采用循环工作液冷却方式，这种措施是非常有效的。图6是日本牧

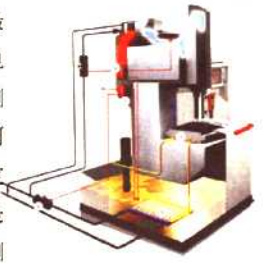


图5 双热稳定系统原理

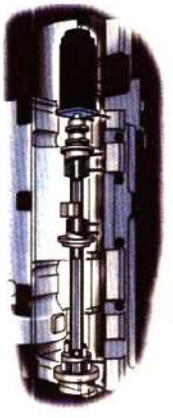


图6 Z轴稳定器消除抬刀加工产生热量的结构

野公司通过Z轴稳定器来消除抬刀加工所产生热量的结构示意图，它将长时间加工导致的精度变化抑制到最低限度。目前，机床结构形式基本相同，但由于采用的技术、任选件不同，制作标准不同，可以分成±0.003mm的高精度机床、±0.005mm的精密机床和±0.01mm的普通机床，而±0.001mm的超精密机床则在结构上就差别很大了。电火花成形加工机床的完整系列已逐渐形成。

不断完善的工艺数据库

众所周知，国内外各设备制造商就电火花成形加工推出了一批批新的放电回路和新的控制方法，其名目繁多，令人目不暇接，但要让用户完全理解和相信它好在哪里是很难的。要让用户得心应手地使用起来达到好的效果就需要依靠工艺软件的支持。这些新技术从实验室数据到工厂实践有很长的路要走，需要大量的生产验证工作，以确定其实用范围和与之相配套的其他技术，最后才能进入工艺数据库，成为可供操作的工艺软件。工艺数据库是在特定的电火花成形加工工艺的基础上长期积累的产物。在电火花成形加工向精加工方向发展过程中，做了大量细致的工作，使软件包更具有明确的工艺针对性，而且实施起来还有一定的柔性，用户可以在加工效率、电极损耗和加工表面粗糙度之间有一定范围的权衡和选择。这就是将所有的新技术和成千上万套参数优化后，成为简单的工艺专家系统，这是操作者的贴身导师，加工成功的保证。令人印象深刻的如Surface专家系统，可以达到表面粗糙度的高度均匀性，表面平整，可有效用于IC集成电路塑封模具的加工；Subgat专家系统则专门用于点浇口之类，带尖电极的型腔加工。此类可供选择的专家系统还有8～9个之多。

微细加工工艺的研发

今天的电火花成形加工质量和效率的提升，在很大程度上是与高速铣削加工的衔接做到了优势互补，体现一种综合的工艺效果，这对模具加工是实实在在的受益。最近一段时间，电火花成形加工在微细加工领域有了很大的进展，如模具底角可做到$R<0.01$mm，甚至达到0.006mm，这是由微细火花间隙控制与良好的电极尖角完成的，如此微小的放电要能实施确实很不容易，同时要保持如此尖锐的电极外角，这就要在严格控制电极损耗上做足工作。图7所示为日本牧野公司加工的窄间距连接器，材料为SKD11，加工深度0.3mm，这个尖底角要用6～7个电极，此期间只要有几个异常脉冲就会导致工件报废，说明控制技术的高明。图8所示是北京市电加工研究所采用A30精密数控电火花成形加工机床为美国泰科电子加工的超精密的电子接插件模具微细加工照片，该模具采用5个纯铜电极，加工深度为0.2mm，加工表面粗糙度值R_a=0.6μm，其底角$R\leqslant0.008$mm。

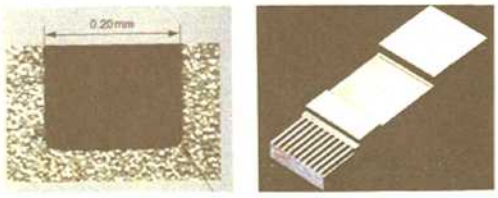


图7 窄间距连接器微细加工

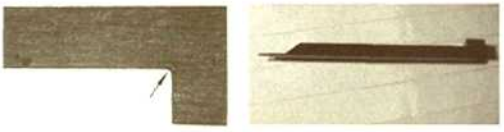


图8 超精密的电子接插件模具微细加工

先进表面纹理技术

由于电火花成形加工实现了极低损耗，而且加工中电极表面粗糙度会随着精加工放电而得到提高，所以表面比较粗糙有波纹的电极和表面平整光洁的电极同样可以加工出相同质量的表面，但前者的波纹可以逼真地复制到被加工表面，有一定波纹度的表面有一种无光镀铬的视觉，并可防划伤，有利于喷镀和粘贴，甚至可以制作出稳格暗花，是电火花成形加工对人类视觉、触觉及美感的一种特殊贡献，现已在许多行业得到了应用。

结语

总之，国内从业者早已动手向电火花成形精加工方向努力，并取得了一定的成绩。现在，我们对电火花成形精加工的机理研究已有了更清楚的认识，前景亦是如此光明。我们坚信，只要加大科研投入，业界同仁继续努力，国内从事电火花成形加工的企业定会在这块大“蛋糕”中争取更多的份额。**MW**

（收稿日期：20101230）

*该项目分别为863计划重点项目课题，编号：2009AA044201；科技重大专项课题，编号：2009ZX04003-022；北京市自然基金项目，编号：3092011