谁将引领2014电加工技术新潮流

北京市电加工研究所　伏金娟　许　猛
北京机床研究所资深专家　沈　洪

第八届中国数控机床展览会（CCMT2014）已于2014年2月24～28日在上海新国际博览中心举办。纵观CCMT2014和CIMT2013展会，从机床结构、机型模式顺应了市场的需求，电火花加工机床（electro-discharge machines，简称EDM）的市场细分同样生机盎然，特别是在多轴联动、特殊材料（聚晶金刚石（PCD）、钛合金、高温耐热合金等）和微细复杂结构（航空航天闭式叶轮和空间位置精密小孔）电火花加工技术方面得到快速发展和应用，这将是2014年乃至未来一段时间电火花加工技术服务于航空航天、军工能源及汽车等领域的重点，与之开发的新技术和落地应用将引领电火花加工技术的新潮流。下面仅从以下几点与业内人士进行探讨，抛砖引玉，希望引起大家密切的关注。



北京市电加工研究所副总工程师伏金娟



北京市电加工研究所市场部许猛

1. 适应难加工材料、复杂曲面结构零部件加工要求的多轴联动电火花加工机床

从展会上看，航空航天发动机、能源发电等领域关键部件的需求受到了业内人士的重点关注。从加工方向看他们的特点主要体现在两点：一是难加工材料，如钛合金、钛铝合金、高温合金和连续纤维增强SiCf/SiC陶瓷基复合材料等；二是难加工结构，如复杂曲面结构件（带冠整体涡轮盘、三元整体闭式叶轮等）、弱刚性结构件（叶轮、叶片、细长轴等）、低刚性工艺系统结构件（小孔、深孔、窄槽等）、精密偶件（喷油嘴等）和复杂整体结构件（机匣等）。目前需要重点解决的工艺难点有：加工变形、加工振动、加工表面完整性、工具损耗、加工效率和加工成本，以及提供完整解决方案交钥匙工程。这给特种加工行业提供了很好的舞台，也是未来电火花成形机床市场应用的重要领域之一。

北京市电加工研究所通过对典型零件带冠整体涡轮盘、整体闭式叶轮电火花加工技术的深入研究，利用多轴联动精密数控电火花成形机床，为多家国家重点企业完成了透平压缩机、发动机用整体闭式叶轮和带冠整体涡轮盘的加工，解决了这些单位所承担的国家国防重大项目中关键部件加工的“瓶颈”问题。这里涉及和需要攻克的主要技术有：①4轴以上联动电火花加工数控系统与精度补偿技术。②钛合金、高温合金及复合材料等难加工材料电火花加工高效脉冲电源技术。③电火花加工专用精密数控转轴（*A*轴、*C*轴）的设计与制备技术。④不同工况下放电状态实时检测与智能化控制技术。⑤多轴联动数控电火花加工抗干扰与可靠性技术。⑥工具电极设计及加工轨迹优化技术。⑦复杂成形工具电极检测、预调与快速更换技术及系统集成技术。⑧直线轴、旋转轴的全闭

环控制技术。⑨复杂结构零件5轴联动电火花加工CAD/CAM技术和仿真技术。⑩基于多轴联动电火花加工装备的特殊材料（含钛合金、镍基高温合金及复合材料等）高效加工工艺技术与工艺数据库。

图1所示是北京迪蒙数控技术有限责任公司研制的AA50五轴联动精密数控电火花成形机床。图2所示是利用AA50机床为航天加工的钛合金材质的双极带冠整体式涡轮盘样件。图3所示是北京迪蒙卡特机电设备有限公司研制的CTM450—ABC6轴数控电火花成形机床。这类机床可满足各种复杂空间曲面的零件加工，具有多轴联动及在线检测功能，可实现空间任意角度的点位、沟槽及复杂曲线组成的空间位置加工，适用于各种钛合金、高低温合金、复合材料及陶瓷材料等机械加工难以加工材料的零件加工。



图1 AA50五轴联动数控电火花成形机床



图2 双极带冠整体式涡轮盘样件



图3 CTM450—ABC6轴数控电火花成形机床

2. 适应超硬材料刀具加工要求的数控电火花加工专用机床

随着聚晶金刚石（PCD）、立方氮化硼（PCBN）刀具从简单的车刀、直刃铣刀、铰刀向高精度和复杂刃口与结构方向的快速发展，以及这类超硬材料机械磨削的难点，电火花加工必将是超硬刀具的常用加工手段之一，电火花加工技术必将获得更广泛地应用。

北京凝华科技有限公司研制了MD25H电火花刀具磨削机床、北京迪蒙特佳工模具技术有限公司研制了BDM—903精密数控电火花超硬刀具磨床。这类设备可满足PCD多齿片形刀具、螺旋线多齿柱形刀具、复杂形状刃口刀具及木工刀具等精密复杂超硬刀具的电火花加工。BDM—903型超硬刀具磨床配备7个传动轴，可实现3轴数控三轴联动功能，满足多刃超硬刀具电火花加工的各项要求；变频调速主轴，配以X、Y数控轴及车刀架，可完成直径50～200 mm盘状紫铜（或石墨）电极的在线车削；专用CNC数控系统，内含放电参数专家数据库，并提供程序、手动等多种加工方式，方便用户使用，保证高效稳定放电加工过程；专用脉冲电源内置超精加工回路，可实现表面粗糙度值$R_a \leqslant 0.2\ \mu m$的PCD、PCBN刀具的刃磨；全封闭式结构，排烟装置，多级绝缘，多层防护，保证磨床安全可靠使用。MD25H型刀具磨削机床使用简单可靠的单片机系统，采用多模块协作的先进结构，实现低成本高性能设计，为客户提供高性价比的刀具电火花磨削；机床可依据用户不同的加工要求，提供各种智能加工模式，广泛用于传统方法难以加工的超硬、脆性、易变形等特殊材料和复杂形状的刀具加工。

3. 精密模具、精密零件加工对电火花加工技术的新要求

（1）SEDM表面纹理控制技术。SEDM最主要的优势之一就是精密复杂型腔的精加工，达到少抛光或不抛光的目标，故高质量加工表面是前题。这里有两点明确要求：一是易脱模，少粘接；二是获得塑压件外观的时尚美艳。这就涉及表面粗糙度以外的表面纹理结构，现在用HSM或激光加工都可以得到各具特色的树皮纹、皮革纹和拉丝纹，但在IC塑封模具上所要求的表面似乎只有SEDM能够解决问题。瑞士AGIE－CHARMILLES、日本MAKINO公司都推出了专用IC模具加工工艺，解决了采用绿色环保塑封材料后造成的大量粘接、严重影响注塑效率和模具寿命的大问题。他们对表面质量进行深入研究，认为仅仅是R_a指标不足以体现表面质量和用户要求，于是引入了一个R_{sm}——平均宽度的概念，也称平均距离，R_{sm}值是指表面粗糙度外形宽度的算术平均值，表面粗糙度

外形指测量时的波峰和波谷。波峰与波谷之间的平均距离大小决定了反光的效果，R_{sm}值越大，反光效果越好，表面越亮。换句话说，R_{sm}表示在相同R_a的情况下，表面不平度波峰波谷起伏的密度：如密度高、反光差和表面发乌，但容易抛光，此时R_{sm}值就小；如密度低，R_{sm}值就大，在光线照射下，反光效果好，有如点点繁星时尚漂亮，而且脱模阻力小。这样的型面不仅IC模具需要，而且知名品牌的手机模具亦大受欢迎。

图4给出了R_a相同、R_{sm}不同引起的反光效果不同的原因。R_{sm}值大的表面在1 000倍的显微镜下放电坑呈现似一朵朵喇叭花的样子，很好看。

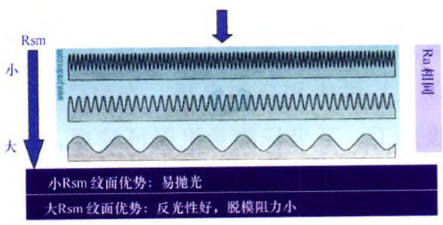
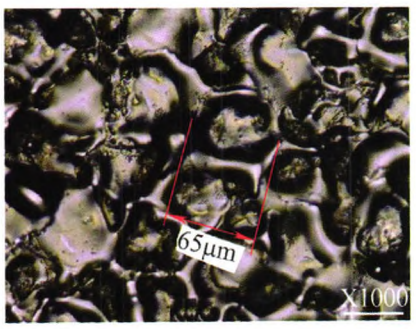


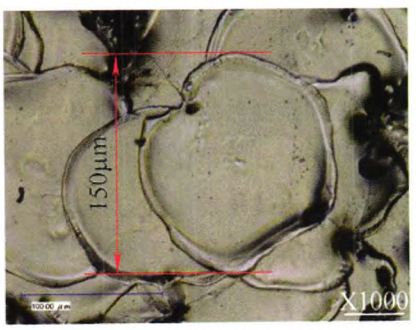
图4 R_a相同、R_{sm}不同引起的反光效果不同

为了满足市场对产品个性化的要求，如，有时需要反暗光的犁皮面、有时需要R_{sm}值较大的、高亮度的喇叭花面，这对EDM纹面加工也带来了新的挑战。图5所示是MAKINO公司给出的加工犁皮面（R_a=1.7 μm、R_{sm}=76 μm）与高亮度的喇叭花面（R_a=1.6 μm、R_{sm}=158 μm）表面形貌对比照片。

（2）高精度机械结构设计技术。到目前为止，电火花成形加工的机床结构已基本定型，各家制造商几乎一样，大都是工件不动，电极作3～6轴运动，牛头式滑枕短C形布局，滑枕截面尺寸有加大的趋势，以保证Y轴在悬伸情况下，随



（a）犁皮面



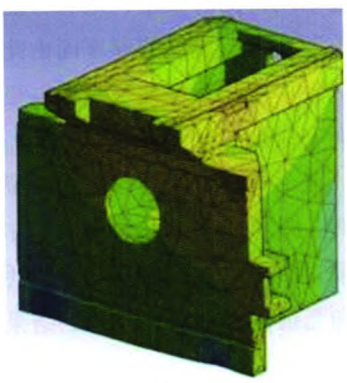
（b）高亮度喇叭花面

图5 犁皮面与高亮度喇叭花面表面形貌对比照片

着电极重量的变化而移动，直线性基本保持不变；再者，各轴普遍采用光栅全闭环控制，以提高定位精度。此外，对机床本身恒温系统、整机热平衡系统的设计也给予了高度重视，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；强调了精密位置防撞。瑞士GF阿奇夏米尔在机械设计中，采用了专利的Monobloc（整体）结构的铸铁床身，如图6所示，其特点有：结构紧凑，导轨接近加工区域，高刚性、独立的XY轴移动，工件承重在移动部件上，在机床移动时总是保持相同的承重，内置C轴，容易实现升降式工作液槽。这种结构为实现微米级加工提供了重要的基础。目前，由于采用的技术、功能部件不同，制作标准不同，可以分为±0.003 mm的高精度机床、±0.005 mm的精密机床和±0.01 mm的普通机床，而



（a）整体结构的铸铁床身



（b）有限元分析

图 6

±0.001 mm的超精密机床则在结构上就差别很大了。

（3）石墨和铜电极的“零损耗”技术。目前石墨电极的使用率在不断提高，理由如下：

一是石墨电极在制造过程中具有以下优势：低切削力；没有振动；没有毛刺；在材料中没有应力形成；可以高速干式铣削；比铜电极加工快，约5倍。

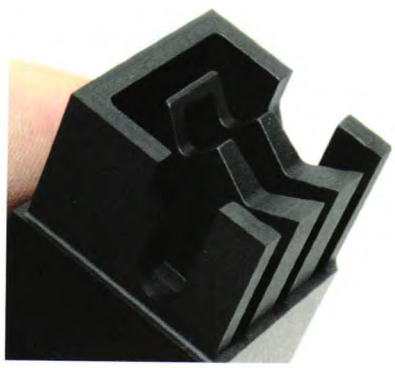
二是石墨电极在SEDM加工过程中，相比铜电极，材料去除效率高40%以上，加工过程稳定，成本相比铜低20%～30%（中等颗粒的石墨材料），热稳定性好，比铜轻（为8.9/1.88＝4.7倍），在大电极加工时显得更重要。

三是石墨还具有突出的电极损耗低的特性：石墨并不会熔化，但

是在3 470 ℃时气化，铜在1 083 ℃时熔化；石墨电极的损耗是由于颗粒从粘结剂上分离，尤其是焦油和沥青材料。

对石墨电极损耗的研究发现，石墨电极在3 100 ℉（1 700 ℃）时表面会产生热解石墨层，该层的密度是标准石墨密度的2.2倍，从而使石墨变为“零损耗”。这种现象被发现后就被研究者命名为“增压石墨层”以描述这个被形成的层。通过采用特殊的策略，是有可能有效控制这个形成层的厚度而由此形成一种平衡和获得几乎没有电极损耗而完成加工全部操作的效果。而且，这个所有过程是与石墨类型无关的。图7所示是瑞士阿奇夏米尔公司采用石墨电极使用新的零损耗模块和当前技术电极损耗加工结果对比照片。

（4）脉冲电源参数的精确控制技术。集中放电是EDM的属性，在粗加工到粗中加工时，伺服系统容易控制集中放电，而不产生异常放电。到中精加工，特别是精加工，就不容易控制了，如果伺服系统的加速度能达到0.1g，间隙扩大10 μm，需要4.5 ms；若达到1g，为1.4 ms，若达到2g那就很不容易了，还需要1 ms。可以说无论伺服系统多么先进，以毫秒级的反应速度，去控制微秒级的脉冲放电几乎是不可能的。故早在20世纪80年代就开始采用适用控制的方式来管理脉冲。但由于检测的手段跟不上，高速器件短缺，另外对策单一，只有0和1，即间隙状况不好就切，从而破坏了放电的连续性，放电安全和稳定加工随有一定效果，但效率降低。很明显异常放电不仅影响效率，使火花间隙难以控制，而且异常放电脉冲是一种破坏性的脉冲，使电极异常损耗，工件表面形成不均匀斑痕和针孔，即使还不到异常放电的程度，只是间隙过热，放电延迟缩短或消失。由于间隙内等离子柱耗能减少，到达工件表面的能量加大，打的坑会深些，异常放电和过热脉冲在工件表面留下的一片深坑，就必需下档规准多修，不但效率受影响，而且精修量加大，总的电极损耗就明显增加。SEDM加工工艺是相当复杂的，例如要得到R_a=0.1 μm的镜面要有约13档规准，要正确无误地输入200～300个数据，如果不事先做好，凭操作者自己去摸索是不可能的。这说明工艺数据库的重要性。可是，即使有精密的机床，而没有精密的脉冲电源，电参数有较大的离散性，也即生产的每一台脉冲电源参数不一致，而且使用中也不能保证性能的稳定，一年一个样，这种情况下也不能做工艺数据库。脉冲电源参数的精确控制是实现高精度最终加工的一种手段。



（a）新技术加的结果



（b）当前技术加工的结果

图7　电极损耗加工结果对比照片

4. SEDM作为零件加工的重要设备

2014年，在零件加工领域将有更大进展，这在先进工业国家已占EDM应用面的30%，而国内仅是起步阶段。首先从量大面广的小孔加工开始，在燃油喷嘴微小孔加工中其工序能力系数可以达到1.33以上，也即0.6‰的废品率，更为主要的是可以加工微细倒锥孔。再者，加工空心叶片冷却微孔的同时用NCEDM铣完成导形的扩展口。当小孔表面粗糙度达到R_a=1 μm以下，微观裂纹一般就不存在了，而加工航空航天发动机的带冠涡轮叶片就更加热门了，采用多轴联动（4轴以上）机床和分割电极，在MC电极加工，三坐标测量机保证精度，高精度快换夹头的支撑下，形成各类叶轮封闭的气流通道加工的可能性。在多轴联动中由于各轴性能的差异，选哪个轴为主更有利于加工稳定，形成不同的组合形方式，成为NCEDM工艺学的研究内容，它与MC走轨迹的加工方式不同，所以创新工艺的潜力更大。而且被加工材料为高耐热合金时，与用昂贵亦损耗巨大的切削刀具的MC机加工比较，EDM电极虽然也有损耗，但损耗是很有规律的，是可以补偿的。最重要的是电极制造成本与刀具费用比要低很多，这里MC让位于EDM并非不能，而是成本核算决定。此类加工中弹性零件、薄壁零件、微细零件优势更明显。2014年国家对航空航天发动机投入很大，可以成为EDM企业腾飞的契机，当

然还要抓紧EDM基础技术的研究，使这些专机在性能稳定和操作简便上更上一层楼，能更好地为国防现代化服务。

5. 低碳节能技术

低碳节能是未来SEDM关注的重点和发展方向，目前已体现在脉冲电源柜体积大为减少，因为电能利用率已从过去的30%提高到70%～80%，发热量减少就可采用间接风冷、全封闭电源柜。脉冲电源柜体积小也容易机床布局，使之更靠近放电区域，对精加工非常有利。在技术上最需要突破的关键技术是放弃限流电阻，采用电感等先进手段，这方面有许多需要研究的内容。

再者，在大型SEDM上采用免维护过滤系统，这种免维护过滤系统可有效消除二次放电，提供持续稳定的放电工况；而且为用户节省了大量成本，更为环保作出了贡献。

6. CAD/CAM技术

SEDM的自动化中，从模具CAD中引入3D数据，直接形成加工程序的CAM技术大受欢迎。这样可以大大减少人工，减少人为的输入差错。而且，这种机外编程和空运转检查，会大大增加SEDM的放电加工时间。再者，用SEDM的模具型腔预铣和电极的3D数据叠加，可以得出加工深度和放电面积的变化曲线，用以指导脉冲输出功率与被加工面积的适应，始终工作在最佳电流密度范围内稳定放电，而不出现因电流密度过大损坏电极和加工表面的现象，这在零件加工中非常实用。此外，组织生产时，处理好HSM和SEDM之间的衔接，流程安排的管理软件。型腔的预加工，电极制造，检测，这是一个非常复杂的操作，尤其在交货期非常短的情况下非常重要。

综上所述，在2014年中，EDM加工技术一定会是特种加工中非常活跃的成员参与到各个领域，而走在加工技术新潮流的前沿。**MW**

（收稿日期：20140321）

2014年重大技术装备进口税收政策调整

近日，国家财政部、国家发展改革委、工业和信息化部、海关总署、国家税务总局和国家能源局等联合发布了《关于调整重大技术装备进口税收政策的通知》，对包括船舶、海工装备在内的17大类重大技术装备和配套设备进口税收政策进行调整。

新制定的《重大技术装备进口税收政策规定》，对《国家支持发展的重大技术装备和产品目录》和《进口不予免税的重大技术装备和产品目录》进行了修改。自2014年3月1日起，废止《财政部发展改革委工业和信息化部海关总署国家税务总局国家能源局关于调整重大技术装备进口税收政策的通知》（财关税 [2009] 55号）、《财政部工业和信息化部海关总署国家税务总局关于调整重大技术装备进口税收政策有关目录的通知》（财关税 [2012] 14号）、《财政部工业和信息化部海关总署国家税务总局关于调整重大技术装备进口税收政策有关目录的通知》（财关税 [2013] 14号）3个文件。

通知规定对国内企业为生产国家支持发展的重大技术装备或产品而确有必要进口部分关键零部件及原材料，符合《国家支持发展的重大技术装备和产品目录》和《重大技术装备和产品进口关键零部件及原材料商品目录（2014年修订）》中规定条件的，免征关税和进口环节增值税。同时，对有关企业进口国内已能生产的重大技术装备和产品，按照《进口不予免税的重大技术装备和产品目录》和《进口不予免税的重大技术装备和产品目录》中自用设备，以及按照合同随上述设备进口的技术及配套件、备件征收进口税，自2014年3月1日起执行。

根据国内产业发展情况，自2014年3月1日起，将国家支持发展的油气钻探设备、半潜式钻井平台、液化天然气运输船、深水物探船、接触网多功能综合作业车及湿式电除尘器等装备纳入到重大技术装备进口税收政策支持范围。

自2014年3月1日起，取消直流供电牵引设备、火灾自动报警及气体灭火系统、联锁系统及燃煤电站烟气脱硝成套设备等装备进口免税政策；调整三代核电机组核岛设备、二代改进型核电机组核岛设备与常规岛设备、清筛机、混凝土泵车及城市轨道交通装备等装备的进口免税零部件及原材料目录。

（本刊讯）