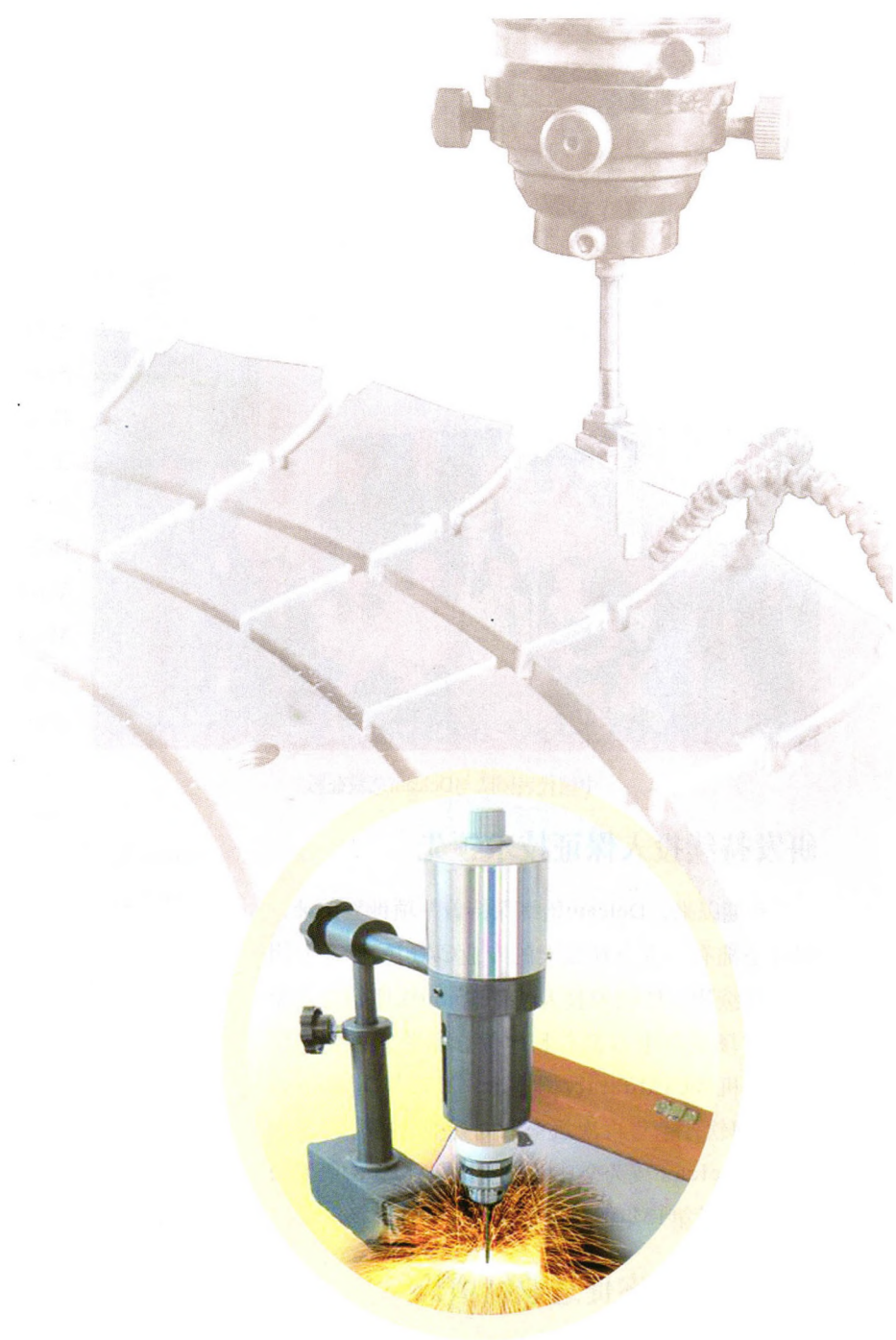


航空制造新技术新装备



随着对航空产品性能要求的不断提高以及材料技术的不断进步，大量新型航空难加工材料不断涌现，新型难加工材料的应用比例越来越高，因此，越来越多的新制造技术和装备应运而生。由于航空加工中难加工材料的不断出现，某些零部件用传统的切削加工方法难以甚至不能满足要求，故需采用电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工等特种加工中的一种或某几种复合技术加工才能制造出来。因此，特种加工在航空制造中具有越来越重要的地位，在某些领域中发挥着日益突出甚至不可替代的作用。

我国虽然在特种加工技术方面起步较早，但是由于我国在工业上存在重设备、轻工艺的问题，故与国外先进国家存在较大的差距，总体水平和装备状况比较落后。特别是缺少足够的重视和必要的支持，加上门户之见、行业壁垒，使得特种加工队伍力量经费不足，很多特种加工方法研究甚少，更谈不上广泛应用。

为了提高航空制造技术水平，本期特别策划“航空制造新技术及新装备”，邀请国内主要航空企业的专家、技术人员与机床工具供应商一起探讨航空加工新技术的发展与新装备的应用，从而共同促进航空事业的快速发展。

策划：杜春玲

电加工技术在航空制造中的应用及发展

沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司特种工艺研究所一级专家 王德新



随着航空工业的发展，电加工技术得到了极大的发展，电加工技术在航空制造中起到重要作用，正如一位航天业资深专家所说：“没有特种加工，就没有神舟的上天，就没有我国的航天、航空制造业的发展。”由此证明了这项技术的重要性。

电加工技术在航空制造中的应用

电加工技术与传统的切削加工的区别在于，它是直接利用电能、电化学能等对工件进行加工的方法，它的特点是：①加工过程不再主要依靠机械能，而是直接或复合利用其他能量完成工件的加工。②加工所用工具材料的硬度可以低于被加工材料的硬度，做到“以柔克刚”。③加工过程中工具与工件之间不存在显著的机械切削力。由于以上的特点，电加工技术被广泛地应用于航空发动机制造中，以解决难加工材料、复杂结构形状及高精度零件的

加工。

电加工在航空制造上的应用有以下几个方面：

(1) 复杂零件空间角度小孔、异形孔加工 航空发动机的涡轮叶片、火焰筒等零件中有大量的冷却气膜孔，这些小孔数量多，空间位置复杂，精度和质量要求高，传统的机械钻削根本无法加工，采用多轴数控电火花高速打孔可以实现高效加工。

电火花高速打孔的孔径范围为 $\phi 0.3 \sim \phi 3\text{mm}$ ，孔径精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，表面粗糙度值 $R_a=6.3\mu\text{m}$ ，孔内表面重熔层厚度一般为 0.03mm 左右，重熔层厚度与加工中的工艺参数有关，单个脉冲能量的大小对重熔层影响很大，因此打孔时要控制单个脉冲能量，获得小的重熔层。

(2) 蜂窝密封环件电火花磨削加工 发动机上的蜂窝密封环是由 0.05mm 厚的高温合金薄片制成，用机械加工方法很难加工，采用电火花磨削加工可以解决这类零件加工的难题。

电火花磨削加工精度可达到 0.1mm ，表面粗糙度值 $R_a=6.3\mu\text{m}$ ，加工效率较低，一般只有 $100 \sim 200\text{mm}^3/\text{min}$ 。

(3) 高效放电铣削加工 高效放电铣削加工是我国开发的具有自主知识产权的技术，它采用简单的空心铜管作电极，对航空难加工材料可实现高效加工，效率高达 $2000\text{mm}^3/\text{min}$ 以上，在整体叶盘开槽和机匣型面加工上得到应用，实现了难加工材料高效低成本加工，该方法适合用于去除大余量的粗加工。

(4) 带冠整体叶盘电火花加工技术 带冠整体叶盘几何形状复杂，材料难切削，其制造成为世界性的难题。航空发动机的带冠整体叶盘气流通道狭窄，刀具会出现干涉。加之高温合金切削性差，给加工带来极大的困难，需要一种新的加工方法，不仅能加工，而且要高质量、高效率 and 低成本。

多轴数控电火花成形加工是解决带冠整体叶盘加工的首选方法，采用五轴数控电火花加工带冠整体叶盘，经电火花加工其尺寸、形位精度均达到了设计图样要求。国内研制的五轴数控电火花成形机床的性能达到了国际水平，上海交通

大学开发的带冠整体叶盘数控电火花加工的CAD/CAM软件,经实践该软件功能强大,具有电极设计、加工程序自动生成等功能,是实用的软件工具。

(5) 整体叶盘电解加工技术 整体叶盘是先进航空发动机的重要零件,整体叶盘制造难度大。电解加工是整体叶盘诸多制造方法中优选方法之一。电解加工整体叶盘与数控铣削方法相比有着效率高、成本低等优点,在批量生产中电解加工是实现整体叶盘优质、高效、低成本的制造方法。

国内从20世纪80年代就开始整体叶盘电解加工工艺研究,但由于受计算机和数控技术的制约,一直没有工程化应用。随着对电解加工的深入研究及计算机数控技术的发展,整体叶盘电解加工技术的研究有了很大进展,南航采用电解加工透平机上的整体叶盘,625所用电解套料加工了钛合金的整体叶盘的流道,在电解加工整体叶盘上取得了可喜的成果。

(6) 叶片型面电解加工 叶片型面电解加工在国内应用较早,在20世纪60年代就已成功地应用于发动机叶片的生产,电解加工叶片型面加工效率高,尤其适合弱刚性薄叶片的加工,受到电解设备精度影响,国内叶片电解加工精度较低,电解加工后还需要进行机械精加工。国外已经开发了精密微细窄脉冲电解加工技术,实现了叶片无余量精密电解加工。

除了上述应用外,还有电火花线切割加工、电火花强化、电解去毛刺等均在航空制造业上得到广泛应用,但国内在设备性能、精度及工艺水平上与国外相比还存在差距,还需要航空工艺技术人员努力,赶超国际先进水平。

国外电加工技术的发展

国外对先进的电加工技术十分重视,尤其在航空制造上其技术发展迅速,如电射流技术、激光电火花复合加工技术、整体叶盘精密电解加工技术、电火花表面改性技术都率先在航空制造上得到应用。

(1) 电射流加工技术 电射流加工技术在国内也称作电液束加工技术,它采用玻璃管电极,酸性溶液通过高压输液泵压入导电密封头进入空芯的阴

极中,使电解液流束“阴极化”而带负电,形成持续液束流,射向工件的待加工部位,对阳极工件进行溶解加工,电射流加工中既有阳极金属溶解的过程,也有化学加工的作用,实际加工去除率远大于按法拉第定律的电化学作用的金属去除量。

电射流加工适用于加工 $\phi 0.15\text{mm} \sim \phi 1\text{mm}$ 的小孔加工,深径比可达50:1,电射流加工的表面无再铸层、无微裂纹、无热影响区,表面粗糙度值 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$,加工表面光滑,在进出口有倒圆,有利于气流的流动,提高航空发动机的性能,缺点是使用的玻璃管电极易碎。在此基础上国外开发了金属管加工工艺。美国GE公司和英国RR公司用该技术加工航空发动机的零部件,已实现工程应用。

(2) 整体叶盘的电加工技术 美国的F414发动机,共采用了5级整体叶盘,使零件减少了484件,推重比与原型机F404相比由7.5提高到9.1;欧洲发动机公司联合研制的EJ200发动机,由于风扇、压气机和涡轮采用整体叶盘结构,减重比达到了30%~50%;这些整体叶盘均是采用电解加工的。采用电解加工整体叶盘加工时间比原来用数控铣削减少约85%,避免了机械加工中容易产生的残余应力和变形,加工出的叶型面公差为0.1mm,数控电解加工在整体叶盘的制造中有着独特的作用。国外数控多轴电解加工设备已应用于生产,高频窄脉冲精密电解加工精度可以达到微米级,整体叶盘经精密电解加工后可以达到图样要求,加工效率高、成本低,该技术被称为“21世纪的先进制造技术”。

(3) 电加工新技术 电火花加工技术从零件的粗加工逐渐向零件的精加工转变,瑞士阿奇夏米尔公司推出用于航空发动机涡轮盘榫槽加工的精密慢走丝线切割机床,该设备的粗加工切割速度可达 $600\text{mm}^2/\text{min}$ 。线切割加工只需较少的切割遍数就可达到粗糙度值 $R_a=0.8 \mu\text{m}$ 。在对涡轮盘榫槽进行粗割和修切4遍后的工件表面损伤层情况:粗割已经可以达到小于 $10 \mu\text{m}$ 的平均变质层且没有明显的热变形,经过修切4遍后,变质层仅有约 $1.5 \mu\text{m}$,且没有明显的表面异常。采用该项技术可以代替现在的涡轮盘榫槽拉削工艺,缩短生产周期,降低制造成本。

利用脉冲放电的表面处理技术:这是一种基于电火花加工原理,在加工液中放电,从而获得表面

处理和表面附层的一种技术。通过脉冲放电,使得电极的材料渗入或镀覆到零件表面,与零件材料元素重新结合,使零件表面性能改变,提高零件的耐磨性和使用寿命。在国外航空发动机大修工艺中采用了大量的脉冲放电加工工艺技术,有效地提高了零件的使用寿命。

复合加工工艺技术:随着航空发动机性能的提高,许多新材料、新技术的应用,使加工难度加大,单一的加工方法很难达到,出现了许多复合加工技术。激光电火花复合加工技术有效地解决了带有绝缘高温涂层材料零件的打孔问题;电火花电解复合加工技术既提高了加工效率,又保证了零件的加工;电解磨削加工解决了薄壁弱刚性零件高效加工的问题。国外在激光电火花复合加工和电解磨削加工技术的应用越来越多。

差距分析

电加工技术对传统的机械加工技术起到了重要的补充作用,在航空制造业中占有重要的地位,应用越来越广泛。但是与国外相比还有很大的差距,要正确的认识这一点,使电加工技术快速发展。主要差距有以下几个方面:

(1) 电加工设备性能差 国内生产的电加工设备性能和精度还处于中低档水平,对于高档电加工设备主要依靠进口,航空制造业的电加工机床以国产机床为主,造成电加工精度不高,多数的电加工还只能作为粗加工。

(2) 电加工工艺水平低 设备是工艺的载体,设备性能影响了工艺水平的提高。目前,缺少对工艺技术应用开发的研究,尤其是缺少对电加工工艺的“二次开发”,由于对电加工设备的功能和工艺技术掌握不熟练,加工精度和加工效率不高,造成能用机械加工的就不用电加工,使电加工设备的利用率不高。工厂对引进电加工设备态度不积极。加上行业之间缺乏技术交流与沟通,电加工工艺技术水平难以提高。

(3) 电加工设备老化 技术改造投入少,航空制造业电加工设备严重老化,技术改造速度慢,跟不上技术发展,电加工质量不高。不能适应新机研制需求,电加工已经成为生产、技术的“瓶颈”。

(4) 缺乏电加工工艺人才 电加工在机械制造中还是从属于机械加工的范围,在工厂里是一个小专业,专业技术人才少,大多都是兼职的机械加工工艺员,对电加工工艺技术了解不深,很难把电加工工艺做精做好,这也是工艺技术落后的一个原因。电加工专业工艺人员匮乏,致使电加工技术发展乏力。

应对策略

在未来的航空工业的激烈竞争中,制造技术的综合能力将在很大程度上取决于特种加工技术的能力,在技术竞争中谁掌握了特种加工技术,谁就掌握了竞争的主动权。纵观国内外先进航空发动机制造企业,其强大的动因就在于掌握先进的核心技术,具有强大的技术研发能力。为此航空制造业要在电加工技术发展方面做好对策:

(1) 加强专业技术队伍建设 积极引进人才,重视人才,形成高、中、低的人才搭配的技术队伍。建立完备的科研技术体系,开展电加工技术的应用研究,突破航空制造中电加工的技术关键。

(2) 加强电加工技术研究工作 对于适合于航空制造的电加工技术开展深入研究,尤其是新技术、新工艺的应用研究。这样才能真正掌握核心技术,开发出具有自主知识产权的技术,实现技术创新,以满足航空制造的需求。

(3) 坚持引进、消化、吸收的创新道路 对先进的电加工技术及设备要积极引进,做好消化吸收工作,要做好二次开发,要充分发挥引进设备的作用,并自主开发专用设备,把技术转化为生产力。

(4) 积极开发国内的现有技术 对于高校、研究所开发出的先进制造技术要及时推广。如电液束加工技术,精密电解加工技术,高效放电铣削加工技术,这些技术具有先进性、实用性,适合国内航空制造的国情,做到量体裁衣,实现快速发展。

一个强大的先进航空制造业,对我国经济的持续发展,国家安全和人民福祉不可或缺。先进的充满创新活力的电加工技术能给航空制造业注入新的动力,促进航空制造业的快速发展,期待我国航空工业实现新的飞跃,跻身于世界先进行列。MW

(收稿日期:20131016)