




电加工技术：抓住机遇 创新突破展风采

——访中航工业北京航空制造工程研究所
航空发动机工艺研究室主任兼书记傅军英

Electro-Machining Technology: Seizing Opportunity
to Realize Breakthrough by Innovation

本刊记者 谷雨

：电加工作为一种特种加工技术，已广泛应用于多个制造领域，请您结合实例，重点介绍一下该技术在国内外航空制造领域的应用及发展前景。

傅军英：电加工技术是利用电能对材料进行加工的一种方法，包括电化学加工与电火花加工，这两类加工方法又分为多个技术分支。如电化学加工包括电解加工、电液束加工、电镀、电铸等，电火花加工包括放电成形加工、线切割加工、表面强化加工等。这里主要从军工产品的应用角度介绍电解加工及电火花加工技术。

电解加工工艺成形于20世纪50年代，一开始便以其非常高的加工效率、适合大批量重复加工的特点成为机械制造学科中一个重要的技术分支。随着工艺及设备技术的不断发展，电解加工得到了广泛的应用，尤其在军、民品大批量生产以及对加工表面质量要求苛刻的军用装备零件加工中，取得了绝对优势地位，成为军工制造业中不可缺少的重要工艺

方法。

(1) 电解加工技术。

随着军工产品的更新换代和持续发展，大量难加工材料、复杂薄壁结构的零件以及整体结构的加工成为传统机械加工的瓶颈，而电解加工具有的加工无应力、加工效率与材料硬度无关、电极无损耗等技术优势凸显，出现了前所未有的发展机遇，同时也面临着严峻的技术挑战。

近年来，国外电解加工技术发展迅猛，尤其以美国、德国、俄罗斯等为代表，在军、民产品上不断扩大应用，这些先进国家在电解加工技术上形成了基础研究与推广应用的良好连接，推出的商品化设备具有很好的先进性、稳定性、通用性。例如先进的精密振动电解加工技术就是在高频窄脉冲电解加工技术的基础上，通过阴极振动与电源供电的匹配，实现了非连续的小间隙加工状态维持，获得了微米级的加工精度，被认为是具有革命性的新技术，目前已开始应用于航空航天发动机高温合金整体叶盘、涡轮盘榫槽以及叶片型面的精加工。

国内电解加工技术主要立足于自研，经过数十年的积淀，逐步缩小了与国外的差距，应用领域也在持续扩大。北京航空制造工程研究所已为多家军工单位提供了近百台电解加工设备，应用领域涉及航空发动机叶片加工、大型机匣高效加工、薄壁机匣复杂凸台无变形加工、涡轮叶片气膜孔高品质加工，以及航天整体叶轮、导弹翼型面、飞机起落架、兵器火炮内膛线加工(图1)等多个领域，有力支撑了国内军工产品制造。近年来，紧跟国际技术发展步伐，通过引进国外精密振动电解加工设备，掌握了微米级精密振动电解加工技术，研制出了国内首个精密电解整体叶盘结构，并持续拓展该技术应用于扩压器复杂通道、薄壁机匣复杂表面形状等高精度加工(图2)。

(2) 电火花加工技术。

电火花加工技术相对较为成熟，该工艺具有可加工任意导电材料，不受材料硬度、熔点等的限制，加工时无机械切削力，适用于结构特殊、形状复杂及薄壁等结构件的加工，在

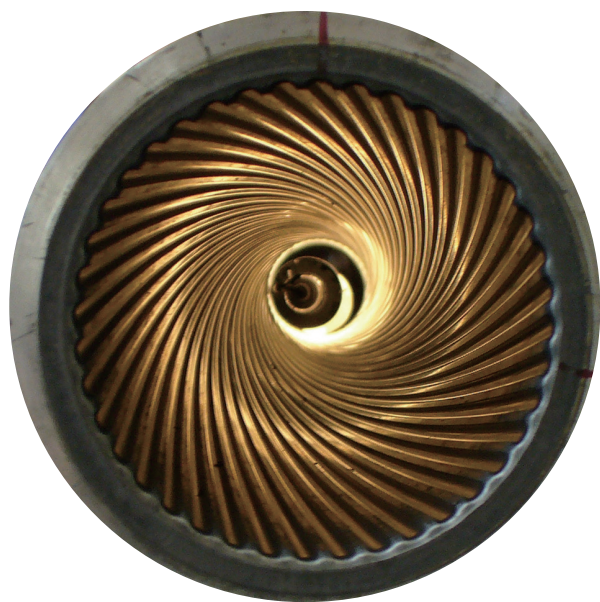



图1 北京航空制造工程研究所研制的兵器膛线电解加工设备



图2 北京航空制造工程研究所研制的航空发动机机匣电解加工设备

国防工业领域中的应用极广,据美国《机械工程师》介绍,全美加工行业中,电加工占11%左右的份额。电火花加工精度高,工艺实现过程简单,在航空发动机制造领域中,电火花加工适用于各种孔、槽、腔、面的精密成形加工,发动机燃烧室火焰筒、隔热屏、压气机机匣、燃油喷嘴、前后挡板、导向叶片、风扇叶片内环、支撑组件等零部件的制孔、成形。随着航空、航天等高新技术的推动及市场牵引下,电火花加工技术也向更新和更广的领域发展,包括微细电火花加工技术、电火花镜面加工技术以及C/C类的非导电材料的电火花加工技术等。

电加工技术在难切削材料、复杂形状结构制造领域已成为必不可少的加工方法,在各个军工制造大国,均已列入重点发展技术体系规划中。在先进高性能航空发动机中,由于大量难切削材料整体结构的出现,电加工将成为攻克难题的主力军。

: 制孔工艺已成为现代制造技术的重要分支,而在小孔数量多、结构复杂、加工要求高的航空发动机中,电化学加工为一种优良的制孔方法。在该领域,中航工业北京航空制造工程研究所进行了哪些深入研究和应用?

傅军英: 航空发动机的很多部件中分布着数量众多、形状各异、排布复杂的小孔,或起到冷却作用或作为油路通道。这些小孔直径尺寸小,深径比高,加工的精度、一致性、表面品质要求极高,加工难度极大。因此,高效率、高精度、高品质的微小群孔加工成为现代制造业重要的一个技术分支。

目前传统制造技术难以满足超硬、低导热性的特殊材料制孔需求,具有独特技术优势的电化学加工制孔技术成为重要的解决途径。北京航空制造工程研究所在群孔、深细孔、超深孔加工方面进行了深入研究,并依据加工对象的结构特点和技

术要求,自主研发了多种电化学加工解决方案。

针对航空发动机涡轮工作叶片尤其是单晶材料叶片小孔加工无再铸层、无微裂纹、无热影响区的高品质要求,本项目团队在国外技术严密封锁的条件下,自20世纪80年代起进行电液束制孔技术的研究,解决了毛细玻璃管电极的制备、电极封装、设备研制、参数控制等一系列技术关键,成功实现了工作叶片直径在 $\phi 0.2\text{mm}\sim\phi 0.8\text{mm}$ 范围气膜孔的高品质、高精度加工。在电液束技术的研究方面先后获得发明专利3项、国防科技进步二等奖2次。电液束加工技术冷态加工的特性从原理上保证了加工小孔表面的高品质,从根本上避免了热加工带来的技术风险。同时,电液束加工的叶片气冷小孔进出口光滑、无毛刺,加工表面粗糙度低,具备气膜孔所追求的品质。在某种程度上更利于冷却效能的提高。目前,该技术解决了在研在役多种型号的单晶合金工作叶片气膜冷却孔加工难题,开始承担多种型号发动机单晶工作叶片的制孔加工任务,同时也为未来高推比发动机提供了关键技术支撑。近年来,本项目团队又研发了金属型管电液束加工技术,将电液束加工孔径范围进一步拓展到 $\phi 0.2\text{mm}\sim\phi 6\text{mm}$ 的范围,同时使异型孔以及大深径比小孔的电液束加工成为可能,相信在新一代发动机和未来机型的研制中,电液束加工技术会有更为广阔的应用前景(图3和图4)。

针对发动机燃烧室薄板群孔类构件的加工需求,项目团队创造性地将图形膜制备与电解加工技术有机结合,采用照相、贴膜、曝光技术对金属工件表面非加工部位进行保护后,利用电化学阳极“溶解”的原理实现加工部位的去除,形成了包括群孔在内的复杂图形结构的独特的照相电解加工技术,该项技术荣获国家发明

三等奖(图5)。

照相电解加工技术可用于高温合金、不锈钢、钛合金等材料的加工,加工零件板面无毛刺无变形,可实现薄板(板厚 $\leq 1.2\text{mm}$)任意形状的孔和槽大面积一次成形加工,加工效率

高,现已稳定应用于某批产型号发动机冷气管类群孔、燃油滤网群孔的高效加工。

目前,航空发动机整体叶盘加工技术倍受关注,电解加工方法被认为是重要的解决途径之一,您认



图3 电液束加工设备

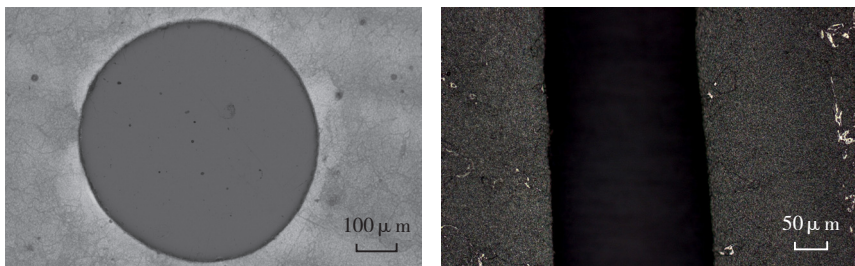


图4 电液束制孔组织(无再铸层、无微裂纹、无热影响区)

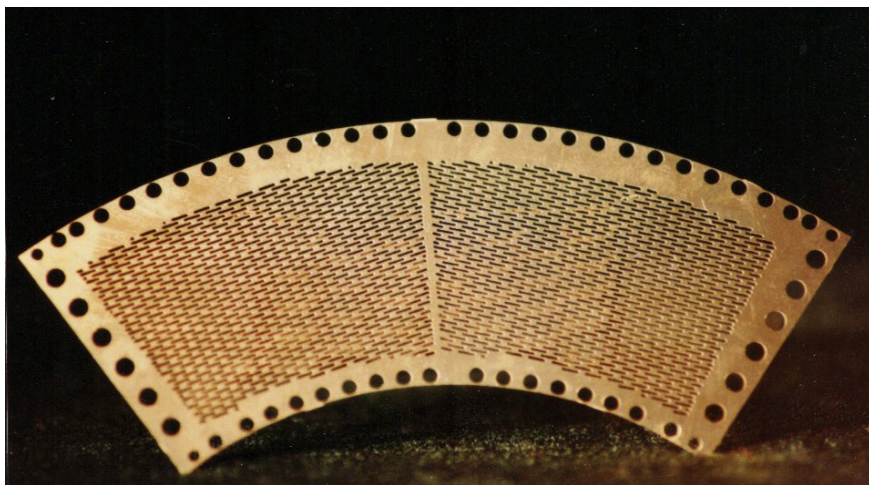


图5 照相电解技术


为该项技术在整体叶盘加工方面有哪些优势？

傅军英：整体叶盘结构作为第4代以上高推比发动机的核心技术之一，在新一代发动机的压气机、风扇等部件中得到广泛应用。国内外几乎同时认识到依靠单一技术解决钛合金和镍基高温合金材料的整体叶盘加工是不可想象的，多种制造技术并用是发动机整体结构制造的技术趋势。国外在航空发动机整体叶盘制造技术上，形成了以线性摩擦焊接、数控铣削加工及电解加工为主的制造体系。一些知名制造公司如德国 MTU、Leistritz 公司，美国 GE、Teleflex 公司等已配备了整体叶盘电解加工生产线。

电解加工方法适用于高效大余量去除及轻薄结构的无应力精密加工，可有效解决传统加工方法存在的不足。比如风扇以及压气机前几级钛合金整体叶盘加工，材料的去除量大，采用机械加工时，由于钛合金导热系数小，导致加工时局部升温快，降低了刀具耐用度；同时钛合金的弹性模量低，加工过程中局部变形较大，因此只能采用较低的切削参数，从而限制了加工效率。采用电解加工则不受材料力学性能限制，可获得很高的加工效率，将电解加工作为钛合金整体叶盘粗加工初成型的方法，具有很大的技术优势。再如压气机后几级高温合金整体叶盘往往呈现出叶栅密集、叶片数量多且轻薄、型面复杂的特点，采用机械加工的主要问题是高温合金的硬度高，切削力小则效率低下，切削力大则会引发变形且难于控制，国内外均认为精密振动电解加工是实现高温合金叶型终成型的理想解决方案。

鉴于电解加工在大余量去除以及轻薄结构无应力精密加工方面的优势，近年来国内对高效精密电解加工技术研究的力度不断加大，开展了以电解加工技术为核心的整体叶

盘技术攻关，目的是建立高效率、低成本加工工艺路线，满足新型发动机研发及生产需求。北京航空制造工程研究所在提高电解加工精度上始终进行着不懈努力，在 20 世纪 80 年代就研制出了国内第一代振动电解加工设备，达到了微米级的加工精度，但受限于当时的电气元器件水平，其可靠性未能达到工程化要求。近年来通过引进消化，进一步提高国内精密振动电解加工装备的技术水平，在精密振动电解加工工艺上有了实质性的进展，突破了大型钛合金整体叶盘叶型高效扭转套料电解加工、高温合金密集叶栅叶片精密振动电解终成型等多项关键技术，实现了发动机压气机五级整体叶盘的加工，加工表面质量良好，无传统电解易产生的晶间腐蚀等缺陷，叶片型面加工精度达到了 $\pm 0.03\text{mm}$ ，表面粗糙度 $R_a 0.6\mu\text{m}$ ，且叶型加工一致性好，尺寸精度满足设计要求，加工效率较机械加工提高 3 倍以上，经过了初步的超转考核试验，为实际工程应用奠定了坚实的技术基础。

：作为一名技术研发团队的领导，请简要谈谈您在电加工技术研究与创新方面的经验与体会。

傅军英：对从事科研工作的个人和团队来说，创新的重要性不言而喻。以电解加工技术为例，技术本身比较复杂，涉及到电化学、材料、电力、流体流场、复杂电极和工装机械设计制造等多学科，而且电解加工不是通用性的技术，大学没有此专业的设置，因此对从事电解加工技术研究的团队来说，学习创新的重要性更加突出。

北京航空制造工程研究所是国内最早从事电化学加工技术研究的单位之一，始终把技术创新作为生存之本。20 世纪 50 年代北京航空制造工程研究所就开展了电化学沉积制备铜波纹管的研究，随后又紧跟国外的发展情况以及国内航空制造技

术的需要，开发了照相电解加工技术，成为国内唯一具有此项技术的研究单位，并获得了国家发明三等奖；同时在国外技术封锁情况下，独立研发了成套的电液束加工装备和工艺，为多种型号的研制提供了技术支持。在技术研究和创新方面主要有以下几点感受和体会：

一是培育科研创新文化。科研创新能力不但取决于研究者自身的因素，而且和环境文化密切相关。创新是一件苦差事，因而需要摒弃急功近利的思想，不断强化化学者心理，培育宽容失败、激励成功、开放包容以及崇尚竞争的创新文化氛围，使科研人员富有团队精神、合作精神，敢于冒险，敢问善问，建立一种崇尚个性表达的团队风气，激发科研人员的独创性潜力，营造特别优良的创新环境。

二是坚持学习与工作有机结合。团队始终把学习、认识和总结贯穿于整个工艺攻关工作中，注重理论结合实际，不断拓宽知识面。不定期举办总结汇报会、问题研讨会等，营造良好的学习氛围，邀请国内外知名专家进行专题讲座，紧跟国际技术发展的新方向。

三是重视人才梯队建设。充分发挥技术带头人的作用，让他们在技术创新和人才培养上施展才华，为他们提供足够的空间，使团队实现技术创新以促进专业发展。作为一名技术研发团队的领导，要在最大程度上为人才队伍建设提供施展能力的平台，完善制度机制的激励和保障，为专业持续发展创建一支富有创新精神并且敢于承担风险的创新型人才队伍。

中国制造 2025 的号角已经吹响，电加工技术人员应以时不我待的精神迎接新的发展机遇，自强不息、开拓创新，赶超国际先进技术，提升我国航空装备制造水平。

(责编 古京)