属加工（冷加工）》2013第4期杂志上笔者还进行了刀具的设想，其实对于该零件的加工，既然设计提出了该结构形式，作为工艺只能想办法满足要求，加工时采用图4中的刀具在数控铣床上进行拉削加工，在拉削时机床主轴必须将定向功能打开，吃刀量为0.03mm，机床的进给量可以相对给高一些，该参数需根据机床本身的参数进行设定。

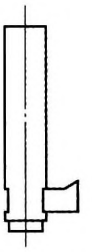

图4　7字拉刀示意图

采用该方法加工后，效率比常用加工方法要低，但是能满足设计要求，完成了二套预研的生产任务。

（3）孔的加工　图3中的孔的加工，由于该处结构孔的位置受限制，无法采用机械加工，在加工时只能采用电火花加工，同时该处位置度和相关联的尺寸如何保证，成了该零件的主要问题，由于该零件外形尺寸过大，现有电火花设备无法进行加工，针对该零件只有想办法加大电火花油箱的容器，通过制定工装来满足加工要求。

2. 结语

针对现有航空产品，并不是所有的产品都需要用到特种加工，在某些或个别航空产品中，个别工序要用到特种加工，同时由于航空产品的特殊性，零件的复杂程度及精度要求比同类产品要求高，因此航空领域的加工过程中，其特种加工的可能性更大一点，该文涉及到观点，只是个人观点，不对之处敬请提出，以期共同进步。

电加工技术在航空发动机上的应用

沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司技术中心
电加工四级技术专家　于 冰

电加工技术作为特种加工技术的一个重要分支，发挥着不可替代的作用。本文重点介绍电火花、电解等典型电加工技术在新型航空发动机涡轮叶片、整体叶盘等关键零部件中的应用，以及先进电加工技术的发展方向。

1. 电火花加工技术应用

电火花加工是一种利用电能和热能去除金属材料的特种加工技术。在难加工材料、复杂型面、精细表面、低刚度零件和模具等制造领域中占有极其重要的地位。

图1为多轴复杂型面电火花成形加工的实例。图中所示为带冠整体叶轮，由于其闭式的特殊结构造成了零件机加工过程中产生了刀具悬臂梁的障碍，数控铣加工难以完成，且选材多为不锈钢、高温耐热合金和钛合金等难切削材料，使其成为航空制造中的关键技术，而多轴联动电火花成形加工技术则显得尤为有效。图2为多轴联动电火花成形电极以及运动轨迹仿真示图。

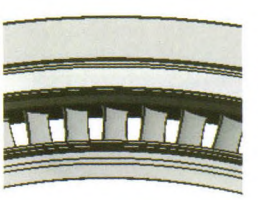

图　1

图　2

图3为慢走丝线切割技术的应用实例。该零件为航空发动机压气机圆盘纵树形和锲形叶片安装槽，其关键技术在于多次切割技术可实现无重熔层加工，同时又保证了工件的加工精度及表面质量。

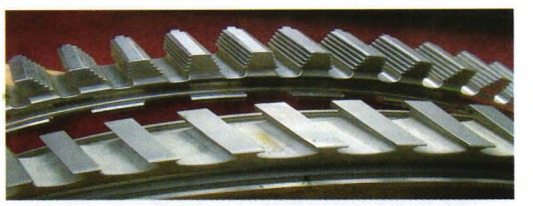

图　3

图4为高速电火花小孔加工技术实例。海量群孔加工为火焰筒加工中的一项关键技术，火焰筒壁薄、尺寸大，气膜孔数量多，孔呈空间角度分布，

加工方法受到空间限制。因此，气膜孔加工对加工设备和工艺提出了高的要求。

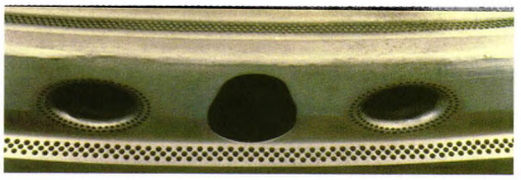

图 4

图5所示为电火花熔涂硬质合金强化叶片耐磨性的实例。电火花熔涂堆焊技术是在电火花强化的基础上发展而来的，进一步开发设备功能，开拓全新的工艺方法，进行机械零件表面损伤修复、微小尺寸超差修复等，填补了航空发动机制造领域缺陷修复工艺的空白，并被成功应用于工程。

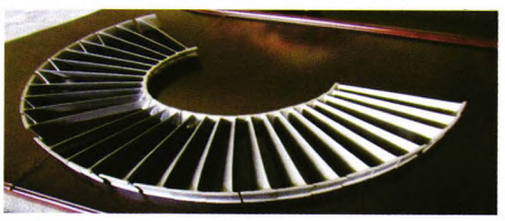

图 5

图6为电火花蜂窝磨加工内外层叠相对的蜂窝环实例。加工内外层叠相对蜂窝环时，先通过成形电极对外蜂窝表面进行磨加工，然后更换成形电极加工内蜂窝表面。这种内外层叠相对的蜂窝环加工在行业内是首次实现。

图 6

图7为应用电火花成形机床加工多层蜂窝环的实例。该实例加工方式不同于蜂窝磨床，主要采用成形加工设备，并设计成形电极。加工过程中工件固定，通过旋转成形电极，并进行差补运动来完成蜂窝环的加工。

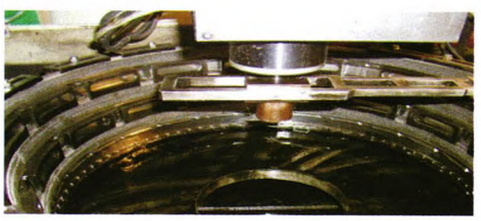

图 7

2. 电解加工技术

电解加工是利用阳极溶解的原理来去除材料，将零件加工成形的一种现代特种加工技术。可加工难加工材料，复杂结构零件等，其加工效率高、成本低。

图8为叶片精密电解加工实例。航空发动机中叶片数量多且难加工，随着叶片材料向高强、高硬、高韧性方向发展和钛合金、钴镍超级耐热合金的采用，以及超精密、超薄、大扭角等特殊结构叶片的出现，对电解加工又提出了更高的技术要求，使电解加工成为航空发动机叶片制造中主要的、不可缺少的优选工艺技术之一。

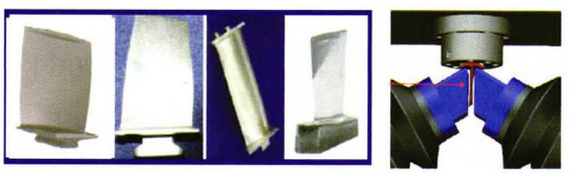

图8 叶片精密电解加工实例

图9为整体叶盘精密电解加工实例。高频窄脉冲振动电解加工设备实现了纳秒级快速短路保护技术、微米级精密过滤技术以及先进的环保处理系统，居于世界领先水平。从图中可见，图9a为DC-ECM工艺（直流电解）初成形工艺，一般采用套料电解完成叶型的粗加工，图9b为PECM工艺（高频窄脉冲振动电解）终成形工艺，通过成形阴极仿型加工完成无余量精密加工。

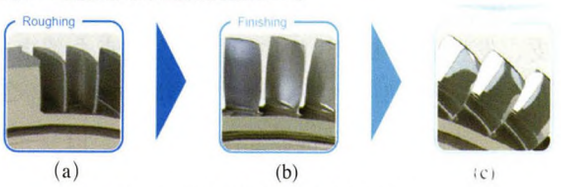

图9 整体叶盘精密电解加工实例

图10为机匣电解加工实例。根据机匣的结构特点，主要加工部位为外壁凸台型腔的半精加工。这些机匣采用常规的机械加工方法，制造成本高，加工周期长，生产效率低，而电解加工可有效地提高效率，降低成本。

图10 机匣电解加工实例

3. 电加工技术的发展

随着电源技术、控制技术和工艺技术的发展，

电加工技术也不断改进优化，高精度脉冲电源、高频窄脉冲电源、微过滤系统等都给电加工技术的发展提供了可靠保证，未来电加工技术将向高精度、超精细、高稳定性、数字化、自动化的方向发展，并在航空发动机领域得到广泛应用。

徐 敏

特种加工技术在航空精密偶件中的应用

西安航空动力控制公司　徐　敏　赵兴龙

本公司主要以电火花成形加工（EDM）设备与电火花线切割加工（WEDM）设备为主，用于加工金属材料及加工部位导电材料。结合实际产品的生产，现对两种特种加工方法进行综合性能的比较分析。

1. 电火花加工工艺与实例

公司某产品如图1所示，零件材料为1Cr18Ni9Ti，硬度38～45HRC，若使用机械加工的方法，在凹型腔加工时，由于这种材料硬度不高，但是塑性很好，加工硬化严重，同时产品凹型腔处尺寸及形位公差较严，使用球头铣刀铣削时，刀具磨损快，零件尺寸及型腔底部粗糙度无法保证。首次使用电火花加工时，选用GF阿奇夏米尔成形电火花机AQ/SF－100设备，电极为纯铜，按凹型腔的尺寸设计电极，加工出的产品型腔底部表面粗糙度值达到R_a=1.6μm，但是凹腔的深度与形状尺寸不合格，经分析发现这是由于在电火花加工过程中，工具和工件之间有一定放电间隙S，在保证“低损耗，高生产率”的前提下，放电间隙会取较大值，但是当ϕ30mm的电极棒接触零件后，由于最高点处的放电热蚀与消离抛出是最多的，此处电极的消耗也是最快的，导致了零件的加工不合格。在这种高精度复杂形状的工件加工时，放电间隙是瞬息变化的，它是随加工面积和形状复杂程度的变化随之改变的。因此，为确保成形面的加工质量，在加工中，应根据产品加工精度的不同对加工参数作适当调整，以获得稳定的加工间隙。通过加工试验得出了电极消耗的经验值，认为将电极的最高点在原设计的基础上放大0.2～0.3mm，原有R圆角不变；在加工过程中，加工电流设为8A，脉冲宽度200ms，脉冲间隔4ms，主轴抬刀比设为2/3，可以解决此类问题的发生，图2所示为损耗预测后对电极尺寸和形状进行了补偿修正的示意图。电火花加工中影响成形面加工质量的因素很多，且它们又是相互制约的，加工参数的合理选取与电极的正确设计都将直接影响到工件的各项工艺指标和放电的稳定进行。

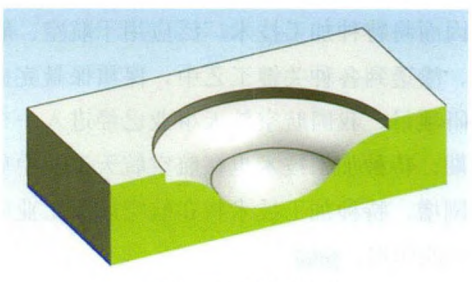

图1　加工零件模型

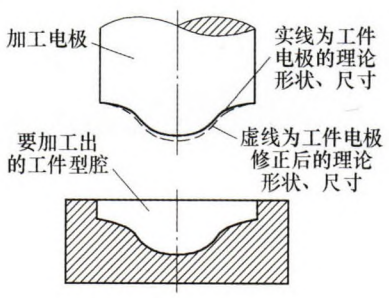

图2　电火花穿孔加工

公司的产品结构以单件小批量为主，为了提高产品的加工效率与快速调整性，采用瑞士EROWA高精度柔性快速装夹工具（见图3），提高装夹效率，进而实现提高生产率的目的。某轴类产品（见