

# 数控精密电解 (PECM)

## ——航空发动机创新制造技术不可或缺的一部分

### CNC Precision Electrochemical Machining (PECM)

埃马克

埃马克推出的多轴联动数控精密电解机床已被航空发动机制造商用来加工高温合金、钛合金、钛铝合金的发动机主要部件,为诸如整体叶盘、单个叶片、扩压器以及涡轮叶盘的燕尾槽等复杂 3D 曲面工件加工提供了最佳工艺解决方案。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.053

兼具优质高效与低成本的加工方法,是世界各航太制造强国矢志追求的目标,特别是对于难加工材料以及复杂的结构,加工方法的选择更成为了实现设计目标的保障。传统机械切削工艺及电火花加工工艺本身具有某些局限性,如所加工工件的切削残余应力变形问题,加工中产生的温度对材料的微观结构造成负面影响,刀具费用高等。埃马克推出的多轴联动数控精密电解机床已被航空发动机制造商用来加工高温合金、钛合金、钛铝合金的发动机主要部件,为诸如整体叶盘、单个叶片、扩压器以及涡轮叶盘的燕尾槽等复杂 3D 曲面工件加工提供了最佳工艺解决方案。既可以保证工件加工节拍大幅提高,又可以在无应力加工下达到高精度,并且基本不产生刀具费用,是航空发动机创新制造技术不可或缺的一部分。

#### 埃马克 ECM 技术让生产更趋完美

所谓电化学加工是一种以电解原理为基础的加工技术。加工时,刀具作为阴极和直流电源的负极连接,

工件则作为阳极和电源正极相连。阴极和工件之间在电解液中发生电荷交换,阳极工件被溶解,这样不用接触工件便可对其进行定点加工,精密制造出工件的不同轮廓,如环形通道、直槽和环形槽等。被电解的工件材料在电解液中沉淀形成金属氢氧化物。电化学加工不受工件金属组织结构的影响,不论是软金属材料还是热处理后的硬金属材料都能很好地被去除(电解)。采用电化学方法加工时,工件不需承受热负荷,也不会产生机械应力。

同时,埃马克旗下的 ECM 电化学金属加工有限公司对该技术进行了改进和优化,研发出更为精密可靠的精密电解加工技术(PECM)。PECM 技术的关键在于如何减小电解液流过的工件和刀具(阴极)之间的加工间隙,以及如何使电解液进行充分交换。为了在非常小的加工间隙下保证刀具(阴极)运动时电流的畅通,埃马克采用了可自由设置的脉冲电流,通过叠加的电极机械振荡以尽量提高电解质的交换率和再生率,从而有效保证了电解过程的高效和高精密度。

#### 高精、高效、高质和低成本

ECM 技术的优势在于可以在非接触式、不受热效应影响的情况下进行加工,且加工过程柔和,不会对工件产生具有负面影响的机械作用力和热应力,不会改变工件表面的组织结构,也不会影响材料的原始特性。而且采用 ECM 和 PECM 技术理论上对加工的工具(电极)没有磨损,重复定位精度非常高,表面质量达到最佳(可达  $R_a$  0.05  $\mu\text{m}$ ),不会形成毛刺,无需后续工艺。

#### 1 飞机发动机整体叶盘加工示例

整体叶盘是先进航空发动机设计中一种典型的整体结构部件,其材料多选用先进的复合高温镍基合金,传统的加工工艺很难应对这种叶型复杂、精度高、受切削力后变形大的零部件。因此,寻找更优质、高效、高精以及低成本的加工方式成为各国航空制造企业的目标。ECM 加工技术作为实现高温合金整体叶盘加工的重要途径,现已成为各主要航空发动机公司研发的重点技术。埃马克电化学加工机床有限公司凭借其在该领域内的多项专利技术,成为世界

上首家为航空发动机提供 ECM 电解机床加工整体叶盘的欧洲设备厂商。

整体叶盘进行全套加工时,一般分两步:第一步用电解法(ECM)进行多轴同动粗套料加工,第二步用精密成形电解法(PECM)进行多轴同动精加工。埃马克独有的模块化机床设计可完全根据用户的具体情况和需求提供独立或全套的机床设备,为用户提供最佳的电解加工解决方案,帮助用户实现利益最大化。正如埃马克最新开发的 PO 900 BF 多轴联动高频窄脉冲精密电解加工中心及全套交钥匙解决方案——从整体叶盘毛坯的初成形叶片套料加工(大

量去除材料),初步实现叶片扭曲角度以及叶片轮廓成形套料毛坯到最终叶片型面成形的完整工艺链交钥匙解决方案。其最终叶片型面轮廓精度  $\leq 0.06\text{mm}$ , 高温合金材料表面粗糙度  $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

## 2 飞机发动机单个叶片加工示例

为满足先进航空发动机设计要求,单个叶片材料多选用先进的复合高温镍基合金或钛合金及钛铝合金材料,传统加工工艺很难应对这种叶型复杂、精度高、受切削力后变形大的设计要求。因此,埃马克电化学加工机床有限公司推出了 PO 100 SF 精密数控单个叶片加工设备。

对比五轴高速铣削机械加工,埃马克精密数控电解单个叶片加工设备 PO 100 SF 的优势见表 1。

## 3 飞机发动机涡轮盘燕尾槽加工示例

涡轮盘的燕尾槽一般采用拉削工艺完成,该工艺需要的拉削机床成本昂贵,同时拉刀的磨损也会使生产成本显著提高。埃马克 PO 600 DM 加工技术却可以轻松胜任。

通过埃马克的模块化数控多轴联动电解加工机床以及先进的 ECM 工艺技术,可以达到与拉削工艺相同的加工节拍,但是其明显的工艺本身优势决定了埃马克电解工艺的生产成本大幅度降低。



埃马克 PO 900 BF 加工中心

## 模块化设计 满足未来发展

ECM 加工技术配合埃马克的模块化概念来配置每台机床,不仅可以单独进行特定的生产任务,而且还可以在批量或复杂的加工生产时,根据客户需求将每台机床进行互联,达到高度集成化的生产加工要求。可以说,先进的 ECM 技术结合灵活的模块化设计以及配合埃马克独有的各类技术创新,如高级矿物机床底座、智能软硬件接口以及简单自动化解决方案等,不仅解决了生产复杂零部件这一大难题,更让用户真正体验到什么是完美高效的生产模式。

如今,中国的航空、汽车制造业以及其他工业领域的发展可谓突飞猛进,产品质量也在逐渐和国际接轨,而且更多的企业开始进行自主研发和生产。埃马克先进的 ECM/PECM 技术和模块化设备,可以为用户提供量身定制的全套 ECM/PECM 交钥匙解决方案,可实现复杂工件的量产化,完美的表面质量、极低的刀具(阴极)磨损率以及高效低成本的加工。埃马克先进的 ECM/PECM 加工技术极大地迎合了中国制造业市场发展的需求,为其达到世界水平提供了重要的技术理论和加工设备。

(责编 谷雨)

表1 埃马克精密数控电解单个叶片加工设备 PO 100 SF 优势

加工工艺节拍分析	电解加工叶盆、叶背余量/mm 以及加工节拍
初加工: ECM 电解加工 ——叶盆、叶背余量 8mm	例如单边加工余量 8mm, 粗加工速率约 2mm/min, 节拍约为 5min
终成形加工: PECM 精密振动电解加工 单边精微成形加工余量在 1.5mm 左右	加工余量约 1.5mm, 精加工速率约 0.2mm/min, 节拍约为 10min, 同时进排气边 R 角也一并完成, 不需要抛光步骤, 因为表面质量业已达到要求
埃马克精密电解加工进行叶片加工的优势: (1) 叶片毛坯叶盆、叶背加工余量不一致, 机床双面进给轴具有对刀功能, 可以自动进行加工余量检测并自动进行加工速率计算, 当加工到双边余量相同时, 以相同速率进给达到最终成形; (2) 电极制造软件进行加工间隙自动计算以及建立模型 Cathode; (3) 对于 R 角小于 0.02 μm 的也可以通过双面电解电极专利耦合以及加工间隙补偿, 通过一步精密电解与型面一起加工完成; (4) 加工后无需抛光, 没有普通机械加工的热应力以及残余机械应力释放, 叶片不变形; (5) 没有道具消耗, 一套阴极可以加工近万个叶片	精密电解加工结果: 叶片型面精度 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ ; 一般高温合金材料表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ (随着单个叶片表面要求的提高, 五轴高速铣削加工节拍以及刀具成本呈几何级放大, 例如某型号叶片采用五轴高速铣, 达到 $R_a 0.3 \mu\text{m}$ 表面粗糙度, 那么铣削节拍约为 2h, 而如果只达到 $R_a 0.8 \mu\text{m}$ , 那么只需要 10min; 另外如果是薄叶片, 铣削残余机械应力变形问题也比较难解决)