

机床

航空发动机制造的创新技术

飞机结构的发展正面临着巨大的压力，其中最突出的是来自立法对飞机的 CO₂ 排放越来越高的标准要求，以及市场对此标准关注度的迅速增加。因此飞机发动机理所当然地成为行业发展的焦点，在要求做到降低油耗的同时，还要保证更快速度的推进值。这就对发动机所使用的零部件提出了更高的要求，如必须选择具备高承受能力的特殊材料。如何保证其加工的速度、精度以及过程的完整性，是制造商面临的新挑战。

文 | EMAG 公司

航空发动机制造过程中存在一个重要的相互关系，即发动机产生的温度越高，效率就会越高。也就是说，在消耗相对较少燃料的情况下，发动机温度越高飞机就可以飞行的越远。这对应用于航空发动机内部的材料意味着必须选用那些在压力作用下表现得更好的极度

耐磨材料。但选择好的材料也仅仅只是“成功了一半”，因为与此同时，许多零部件会相应变得更为复杂，需要采用高度精密的工艺才能完成。因此，航空发动机部门想要在近十年内实现减少 20% 的 CO₂ 排放以及燃油消耗这一目标，就必须完成以上内容，相信这是唯一的途径。

航空发动机制造业发展的必然选择

当然，这与汽车领域的发展完全不同，飞机发动机的这一发展历程对于飞机制造业来说具有里程碑式的历史意义。如今，该行业已经走到了一个十字路口，据专家预测在未来的 20 年间，空中交通需求将会以每年 5% 的速度递增。空中客车公司也表示，未来每十年航空市场对新型发动机的市场需求量将达 7600 台。这为航空制造业提供了巨大的发展契机，但也为航空发动机制造商提出了新的要求。新型发动机在做到不断满足市场需求的同时，还要不断优化自身技术水平和产品质量。

埃马克电化学加工 (ECM) 和精密电化学加工 (PECM) 技术对高强度合金和类似材料加工生产出的复杂零部件，不仅可以使加工刀具达到最小磨损度，而且加工出的部件表面具有更为卓越的品质，如无毛刺、无微观结构变化 (材料晶间结构) 等。相比之下，切削工艺



图 1 埃马克 PO 900 BF 型机床
正在进行整体叶盘加工

则会产生很多的问题，如所产生的温度对材料的微观结构造成负面影响；应用于高强度材料机加工的刀具寿命短；高进给率机加工工艺虽然经济高效，但无法进行精密几何形状的加工等。这些问题都无疑间接地推动了航空发动机制造业对 ECM 技术需求的不断增加。自 2009 年，埃马克开始研究该技术以来，已为航空发动机制造商提供了大量的设备和技术，并主要应用于飞机发动机核心零部件的生产和制造（图 1），如高温镍基合金材料制造高精度整体叶盘、带燕尾槽盘以及单个叶片。

更为精密的 PECM 技术

ECM 工艺可以确保材料很好的被去除。加工时，工件作为阳极，刀具作为阴极，在这两种电极流动之间电解液可以溶解工件上的金属离子。阴极形面与工件相匹配，发生电荷交换，阳极工件被溶解，从而确保去除工件上所需部件的形状。不同的工件轮廓、环形通道、直槽以及环形槽都无需接触工件即可形成，且精度高，刀具磨损小。同时，埃马克对 ECM 技术进一步技术优化，研发出更为精密的 PECM 技术。在 PECM 技术工艺过程中，被加工工件与阴极之间的加工间隙非常小，为了使电解液在这样小的加工间隙下实现充分的交换，该工艺主要是通过机械振荡来优化电解液的流动，从而确保对材料进行有效、精微成型去除。如目前采用 PECM 进行整体叶盘的加工制造，便充分体现了精密电化学加工的技术优越性（图 2）。

对于涡轮叶盘 DISC 的机加工，埃马克的专家们研发出一套配有 11 个工位集钻孔、油孔轮廓加工、油口倒角成型加工以及抛光作业于一体的 ECM 加工系统。该加工系

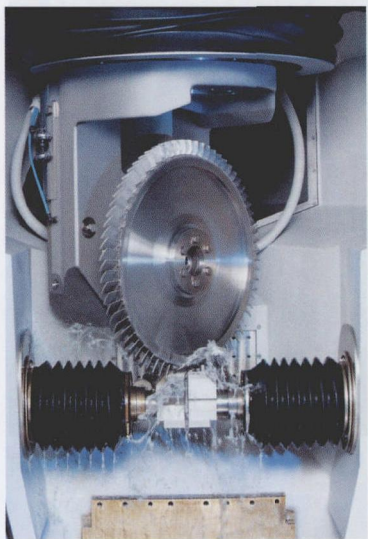


图 2 埃马克 PO 900 BF 加工区，采用精密电化学加工（PECM）技术进行整体叶盘的加工

统中，高温合金材料以 5 mm/min 的进给速度进行深孔钻孔加工，且无毛刺或无任何热应力影响，加工公差在 0.1 ~ 0.3 mm 之间。与切削工艺相比，ECM 工艺的刀具（电极）使用寿命更长，有效降低了刀具生产成本。

对工艺开发的可行性进行评估

埃马克旗下的 ECM 电化学金属加工有限公司可为客户提供全面、系统的 ECM 技术服务，并始终与客户保持着亲密的合作伙伴关系，与其共同发展。该公司拥有一个现代化的实验室，在这里可以进行多种可行性研究以及对单轴和多轴机器的初步学术研究。除此之外，该实验室还可提供全面的测量系统。

通过和该实验室的合作，埃马克不仅可以确立项目的可行性，而且还可以了解到特殊零部件由不同材料作为原料的工艺过程的成本效益比，以及工件的加工节拍可行性分析。

在埃马克看来，公司从一开始就要与客户形成紧密的合作关系，

这一理念被牢牢地根植于企业的发展战略中。其所有用户都可随时接受来自埃马克的指导和培训，从而确保了制造商能够紧跟市场需求，设计和制造出满足终端客户特殊需求的工件。这一企业理念对于航空发动机制造商来说，具有非常重要的意义。

与亚琛工业大学合作

埃马克公司 ECM 在技术方面的专业性还体现在他们与亚琛莱茵-威斯特法伦技术学院（亚琛工业大学）机床实验室一直保持着密切的合作关系。在这里，埃马克在电化学加工的材料多维场理论的实验分析基础上指导阴极夹具设计理论可行性，并成功对阴极设计的改进进行了模拟，使得综合目标得到了整合优化。不仅可以结合新的材料而且可任意变换零部件的几何形状，有效促进了电化学加工技术的发展。

批量生产、难以接受的可行性材料、对工件材料无负面影响、工件型面的高精度度以及最高表面光洁度——这为航空发动机制造商及航空发动机制造技术提供了难得的市场契机。埃马克模块化概念，更可快速调整加工模式以满足个别部件的生产需求。可以说，埃马克在机床制造和研发方面具备的先进技术让其用户受益匪浅，特别是在技术创新方面，如埃马克独有的高级矿物机床底座、智能软硬件接口以及高效自动化解决方案等，可极大提高用户的生产效率和质量。而且这些技术也为埃马克 ECM 技术的进一步升级奠定了技术基础，完全可根据客户的需求量身定制全套的 PECM 交钥匙解决方案。埃马克相信 ECM 技术经过市场的考验和证明，必将成为航空发动机制造业未来技术创新过程中必不可少的一部分。[MM]