整体叶盘多轴联动数控精密电解加工技术

EMAG EMC亚洲市场销售经理　姜云龙

兼具优质高效与低成本的加工方法，是世界各航空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。德国埃马克电化学公司的多轴联动数控精密电解加工技术完全取代了高速铣削及五轴电火花加工工艺来进行整体叶盘的加工，非传统切削加工的优势非常明显。

应对航空业的发展需求

据空中客车公司于2012年发布的最新全球民用航空市场预测：从2012年到2031年，全球市场对新增客机和货机的需求量将达到28 200架，总价值将近4万亿美元，全球新飞机需求量呈上升趋势。想要赢得这个巨大的市场份额，全球的飞机制造商都必须全面投入新的革新技术。

值得注意的是，世界民用飞机发展更加关注绿色环保和更好的经济性指标，紧紧围绕进一步提高气动效率、结构效率、动力系统效率和设备可靠性以形成突破。不断提高推重比、延长使用寿命及降低能耗一直是现代航空发动机发展的主导方向，这使得在先进航空发动机设计中，出现了并将继续涌现大量新材料、新结构。

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，它将叶片和叶盘做成一体，省去常规叶盘联接的榫头、榫槽和锁紧装置，避免了榫头气流损失、减少了结构重量和零件数量，大幅提高了发动机的工作效率、推重比和可靠性。风扇、高压压气机转子，甚至低压涡轮转子等，更多的采用整体结构已经成为先进航空发动机的发展趋势。

在设计中，除了采用整体结构外，在材料上，更多地采用先进复合材料、钛合金和镍基高温合金。对应于难加工材料与复杂结构，现有的制造技术往往滞后，所以优质、高效、低成本与具有快速响应能力的加工方法是各国航空制造企业不断追求的目标，也是实现设计目标的保障。

优势明显的多轴联动数控精密电解加工工艺

整体叶盘叶型复杂、精度要求高、叶型薄、受力后变形大，其制造技术成为许多发达国家研究的重点。整体叶盘加工工艺主要包括：高效整体铣削和多轴联动数控精密电解。

与数控铣削方法相比，整体叶盘电解加工效率高、电极（刀具）无损耗、加工薄型结构无残余应力和变形，在批量生产中电解加工优质、高效优势更加突出。作为电化学加工领域的技术领先者，埃马克电化学加工机床有限公司凭借其在领域里的多项专利技术，成为世界上首家为航空发动机提供七轴数控高频窄脉冲精密振动电解机床加工整体叶盘的欧洲设备厂商。

精密电解加工工艺（PECM）是源自于普通电解加工（ECM），在加工阴极与被加工工件之间的加工间隙较后者小很多倍，也因此可以达到良好的从阴极到工件复印的效果。需要强调的是，埃马克电化学公司开发了自己独立的阴极设计软件，此软件可以在精密电解工艺过程中对叶片的进排气R角以及相对型面区域进行自动补偿。另外，电解工艺本身与传统的数控铣削工艺相比，即使加工镍基



航空发动机及关键零部件先进加工技术及装备

合金等超硬材料的整体叶盘也不会产生任何阴极消耗。与高效整体铣削的计算复杂，整体加工成本高相比，埃马克多轴联动数控精密电解加工技术加工效率比机械加工提高数倍，但成本却可以降低几个数量级。

高温合金材料整体叶盘最佳加工工艺

高效精密电解加工是实现高温合金整体叶盘加工的重要途径，高温合金整体叶盘的精密振动电解加工，已成为各主要航空发动机公司极力研究与应用的重要技术，是实现高温合金整体叶盘加工可行性最大，而且有国外成功范例的有效工艺方法。

德国埃马克电化学公司多轴联动数控精密电解加工技术，综合了多轴联动CNC数控加工中心和精密电解加工的两者技术特点，工具阴极无损耗，无宏观切削力，特别适宜加工压气机末端高温区高温合金或钛合金的变截面扭曲叶片的高难度整体叶盘。

现在，中国部分先进飞机在高推重比发动机设计中，已开始将难加工的镍基高温合金材料应用于压气机整体叶盘。高温合金整体叶盘的特殊性在于材料的机械加工性能很差，加工变形与刀具的严重消耗，导致其在加工效率和加工成本上大受影响。现代制造技术既要考虑发动机研制阶段的单件制造，更要考虑批量生产中的效率与技术经济性的需要。埃马克多轴联动数控精密电解加工技术，可有效解决我国高性能发动机中高温合金整体叶盘的高效率加工难题，埃马克电化学最新开发的PO 900 BF多轴联动高频窄脉冲精密电解加工中心，可以最终达到叶片型面轮廓精度≤0.06mm，一般高温合金材料表面粗糙度值R_a≤0.2μm。

完整的工艺链——交钥匙解决方案

埃马克电解加工技术提供了独立且经济的制造工艺，为客户量身订制缩短工艺路径的全套方案，为客户实现了利益最大化。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，初步选择性地实现叶片扭曲角度以及叶片轮廓成形）直到最终叶片型面成形完整的工艺链交钥匙解决方案。

埃马克多轴联动数控精密电解整体叶盘加工技术采用数控多轴联动电解工艺进行叶片套料加工，其进刀速度≤2mm/min，采用数控多轴联动精密电解加工工艺，其进刀速度约为0.1～0.2mm/min（叶片套料加工余量1mm），并不会因为叶片面积、材料及几何尺寸的变化，对进刀速度产生显著影响。另外，该电解工艺是完整工艺，不需要之后抛光及对于叶片进排气边缘进行再次加工，是刀具无损耗工艺，在同一型号叶盘下的所有叶片可以使用同一套阴极制具完成加工，并多次使用。它在加工成本和加工效率方面的优势，将会极大地促进航空发动机高温合金整体叶盘的发展与应用。另外，埃马克多轴联动数控精密电解机床的投资，可以视客户具体加工整体叶盘的尺寸以及电流配备、电解液系统配备进行量身订制的投资。

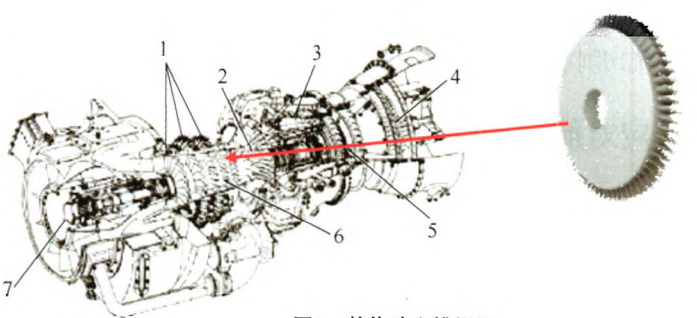


图1　整体叶盘模拟图

1.可变定子叶片 2.压缩机叶轮 3.燃烧室 4.动力涡轮 5.燃气涡轮 6.压缩机

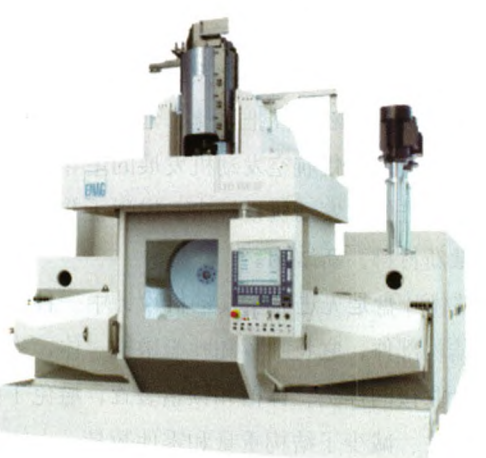


图2　EMAG PECM PO 900 BF 精密五轴电解加工中心

MW（收稿日期：20130612）