

GE整体叶盘电化学加工工艺

GE Electrochemical Technology for Blisk

■ 戴淑波 刘雄飞 魏凯燕 / 中国航发西航

整体叶盘由于结构复杂、加工精度要求高，尤其是叶片工作表面为空间自由曲面、形状复杂，加之采用的是钛合金、高温合金等难切削材料，从而影响了整体叶盘的加工性。除五轴数控加工工艺外，GE航空集团在传统电解工艺的基础上，开发了分布式多弧电蚀刻加工、串列整体叶盘电解加工和环形电极工具粗加工等几项工艺。

分布式多弧电蚀刻加工工艺

GE航空集团的研究人员结合数控铣、电解、电火花加工的优点，研究提出多电弧电蚀刻加工整体叶盘新工艺，由于在加工过程中存放蓝色电解液的液槽呈现蓝色弧光，也被称为“蓝弧工艺”。该工艺加工效率高于传统的电火花、电解加工，电能消耗比数控铣减少25%，加工区域再铸层小。2009年，GE航空集团将这种技术用于一型发动机的第3级压气机整体叶盘的加工。

分布式多弧电蚀刻加工工艺采用数控铣削的加工机理，利用程序控制作为铣刀的电极做进给运动。在工件和电极之间施加较高的直流脉冲电压，在电解液的作用下，电极工作端整个表面爆发空间分布的多个电弧，产生的热量瞬间将材料从工件表面熔化掉，脉冲放电持续进行，电极按设定轨迹逐层去除叶盘通道材料，最终形成叶片（如图1所示）。

直流脉冲电压为20~60V，比常规电化学加工（ECM）采用的电压要高，比电火花加工（EDM）采用的电压低。波形为间歇方波，保证在电极工作端间歇性产生多个电

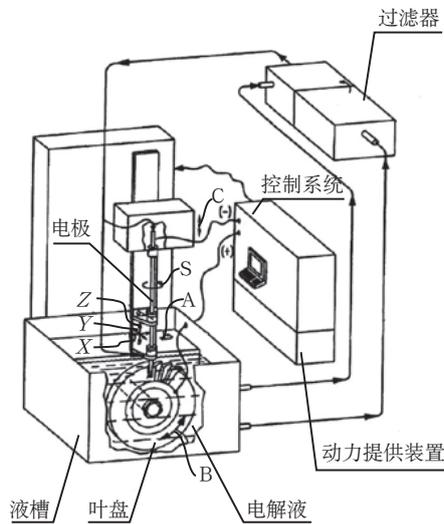


图1 分布式多弧电蚀刻工艺设备简图

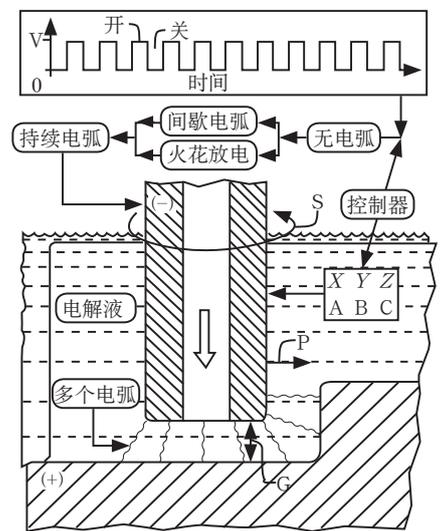


图2 分布式多弧电蚀刻工艺加工示意图

弧，避免持续不断地爆发电弧使工件过热引起材料损伤。脉冲的开关时间由数字控制系统确定，持续期为300~1500 μ s，间歇期为110~1000 μ s；电流为80~600A，平均电流密度为295~1860A/cm²，峰值电流密度约155A/cm²（如图2所示）。

此工艺采用了较高的电压及电流，工件表面承受相对较高的平均电流密度和较低的峰值密度，提高材料去除率的同时，降低了输入工件的热量，避免产生不必要的热影响损伤，减小了工件表面重铸层的生成。

工件及电极的工作端一直沉浸在流动的电解液中，电解液为空间分布的多个电弧的爆发提供了条件，同时，对加工区域进行冷却并带走残屑。

分布式多弧电蚀刻加工工艺只完成整体叶盘叶片粗加工，其后的精加工通过传统电解工艺完成。

串列整体叶盘电解加工工艺

此前的串列整体叶盘电解加工一般需要两次装夹。GE航空集团的研究人员通过对常规电解设备进行改进，在串列整体叶盘电解加工设备中增

加了一对电极工具（如图3所示），一次定位装夹即可完成对串列叶盘两级叶片的加工，不需要从电解设备上拆卸整体叶盘、工装及电极工具等，减少了多道工序，大大降低了电解工艺的复杂程度，减少了加工时间和制造成本。

串列整体叶盘安装在工作台上，可实现上下、左右直线运动及回转运动。向左靠近左侧电极时，逐个完成第1级盘上叶片的加工，向右靠近右侧电极，完成第2级盘叶片

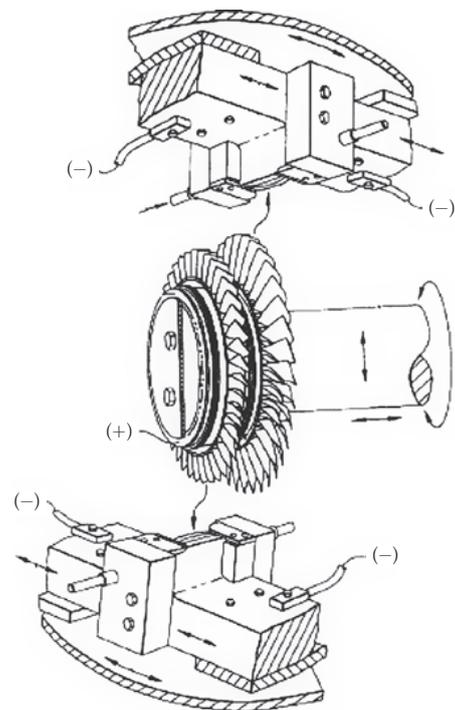


图3 串列整体叶盘及电解加工设备局部示意图

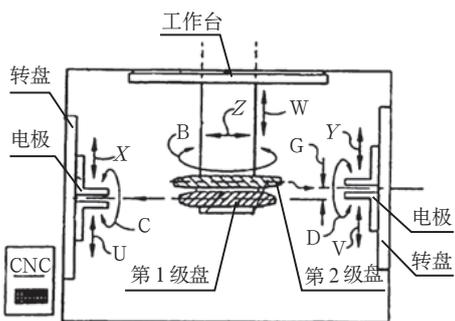


图4 串列整体叶盘电解加工工艺原理图

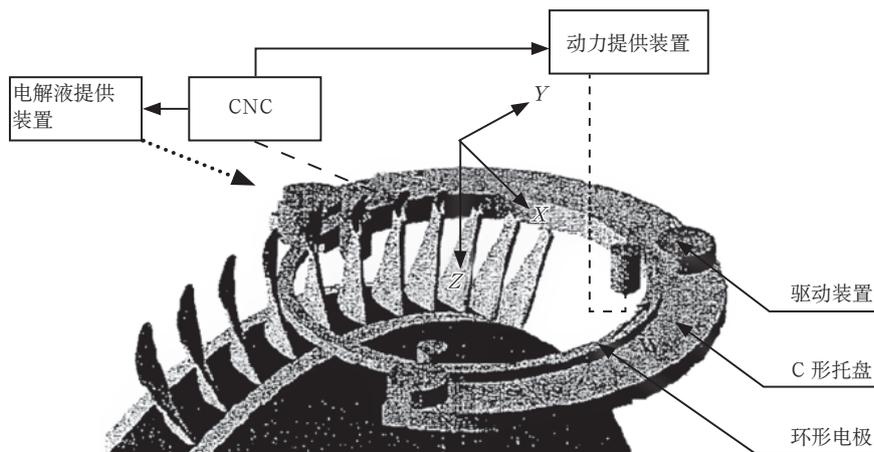


图5 环形电极工具电解设备示意图

的加工（如图4所示）。

电极组件安装在转盘上，可实现直线及回转复合运动，以匹配叶片型面要求。

环形电极工具粗加工工艺

在电解加工中，一般采用直线刃阴极工具进行数控展成运动。该工艺采用的设备为常规的多轴数控机床，与此前的工艺不同的是在设备上采用了新型的环形电极（如图5所示）。环形电极减少了工具与叶片之间干涉的概率，能够提高加工效率。

电极组件由环形电极（由导电材料制成，如低碳钢）、C形托盘、驱动装置和导向辊等构成。环形电极的厚度、宽度和直径的大小根据叶间通道的空间大小决定，其上线形浅槽可避免加工过程中产生电弧。C形托盘不进入加工区域，只起到托举环形电极的作用，内部的通道可以向电极提供切削液。驱动装置里配有回转运动驱动源及运动传输装置，驱动电极做回转运动。电能提供装置向环形电极提供电解所用的电能，采用刷式系统或导电滚结构向电极输送电能。

在计算机数控（CNC）系统的控制下，电极沿Z轴方向做进给运动，沿X轴和Y轴方向做复合运动，使刀具环的内径或外径接近叶片对叶片进行电解加工。由于电极是环形的，中间是圆形开放空间，能够根据零件形状机动定位。

结束语

整体叶盘电化学加工与数控铣削方法相比，具有效率高、电极无损耗、无残余应力和变形等优点。GE航空集团一直致力于在整体叶盘电化学加工领域的研究，开展了有益的探索，申请了多项专利，其理念和具体的工艺方法可供研究者参考借鉴。

（戴淑波，中国航发西航，技术员，从事科技情报研究）

参考文献

- [1] Scott L M. Distributed arc electroerosion : EP1593449B1[P]. 2005-11-9.
- [2] Scott L M. Tandem blisk electrochemical machining: EP1314507B1[P]. 2003-5-28.
- [3] Wei B. Apparatus for near net shape rapid rough machining for blisks: EP1433557 B1[P].2004-3-6.