

# 精密电解套料阴极设计与优化

于 冰

(中国航发沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 沈阳 110043)

**[摘要]** 通过对整体叶盘的结构特点、技术要求和材料特性等分析,确定了电解加工技术方案,分析了电解加工套料阴极设计及轨迹计算、成型阴极设计、参数优化等3大关键技术,重点针对套料加工阴极型面设计、流场设计、轨迹计算、间隙计算等关键步骤进行了详细论述,并通过试验进一步反复优化,解决了流场不均、火花短路等问题,最终验证了工艺可行性,且套料电解加工的叶盘余量较为均匀,能够满足后续精电解加工要求,取得了良好效果。

**关键词:** 电解; 整体叶盘; 高温合金; 套料电解; 阴极设计

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.22.048



于 冰

沈阳黎明公司技术中心特种工艺技术专家,主要从事电加工技术研究工作。近年来,参与了国家“863”计划项目“特殊材料复杂型面电解加工技术与装备”、国家重大科学仪器专项“用于航空发动机技术提升的飞秒激光加工设备研发”、省级项目“整体叶盘电解加工工程化研究及设备研制”等项目研究工作。获得或申请专利7项、科技成果2项。

新型军民航空发动机已经开始广泛采用整体结构,以提高发动机的使用性能与寿命。整体叶盘是先进航空发动机设计中的一种典型的整体结构部件,它将叶片和叶盘做成一体,省去常规叶盘连接的榫头、榫槽和锁紧装置,避免了榫头气流损失、减少了结构质量和零件数量,大幅提高了发动机的工作效率、推重比和可靠性。近年来,随着航空制造技术的不断发展,整体叶盘结构在国外新研制的航空发动机上已得到广泛应用,不仅是在军用发动机,在民用大涵道比发动机中也开始出现<sup>[1]</sup>。

整体叶盘由于其几何构形复杂,材料特别难加工,其制造已成为世界级制造技术难题。目前,整体叶盘制造有以下几种技术途径:数控铣削,最早被采用且应用最广的加工方法;电子束焊接法,EJ200即采用此法制造;锻接法,即用锻压植入叶片+扩散连接,普惠公司试用锻接法制造整体涡轮转子;多轴数控电解加工技术,德国MTU采用精微电解加工整体叶盘<sup>[2]</sup>。

多轴数控电解加工技术对于模

锻的高温合金或钛合金实体整体叶盘毛坯切掉大量金属材料,价格低廉,加工时间短,制造周期大大缩短,是整体叶盘制造的优选方法。国外企业已采用电解加工方法制造整体叶盘,加工精度可实现 $\leq 0.06\text{mm}$ 、高温合金材料粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ ,技术成熟度已经达到8级以上<sup>[3]</sup>。欧洲航空发动机制造商MTU公司已将高频窄脉冲精微电解加工技术应用用于钛合金、高温合金整体叶盘加工(如图1所示),较数控铣削加工可提高加工效率3~5倍以上,取得了较好效果。

电解加工的原理是利用金属在电解液中可以发生阳极溶解的原理而去除材料,将工件加工成形的一种非传统切削加工方法。电解加工具有以下优点:(1)表面质量好,可获得一定的加工精度和较低的表面粗糙度;(2)生产效率高,且加工生产率不直接受加工精度和表面粗糙度的限制,电解加工能以简单的直线进给运动一次加工出复杂的型腔、型面和型孔,而且加工速度可以和电流密度成比例地增加;(3)无工具损耗;

(4) 无切削应力,可用于加工薄壁和易变形零件。电解加工过程中工具和工件不接触,不存在机械切削力,不产生残余应力和变形,没有飞边毛刺。<sup>[4-6]</sup>。电解加工核心技术在于突破阴极设计、流场计算和工艺参数选择优化等 3 大关键技术。

整体叶盘电解加工一般分粗加工和精加工 2 道工序,粗加工采用套料电解方式,其难点在于套料阴极形状设计、间隙计算以及轨迹计算;型面电解主要难点是型面间隙计算、流场设计和阴极优化。套料电解虽然属于粗加工,但其需要多轴联动、加工余量趋于均匀,才能保证最终加工的精度,因此难度更大。

本文以某型压气机高温合金整体叶盘为研究对象,着重论述套料电解开槽阴极的设计方法及其优化。



图1 电解加工的压气机整体叶盘  
Fig.1 Compressor blisk by ECM

## 技术方案

### 1 零件类型及材料

整体叶盘是在压气机中高速旋转的部件,工作时处于高压、高温状态,叶片承受负荷高,要求零件具有高的强度,高的耐热性能,能够在恶劣的工作环境中保持正常工作,根据零件的使用要求,某型压气机整体叶盘设计上选用了高温镍基合金材料,该材料在 600℃ 工作温度下可保持较高的机械性能,能在高温、高压下正常工作。

### 2 工艺方案确定

该叶盘属于高铬镍含量的高温合金,其材料的强度高、塑性好、韧性

大、切削性能差、刀具磨损严重。但该材料电导率好、耐腐蚀,适宜电解加工。叶盘毛坯状态为模锻成型,固溶处理,毛坯余量较大,适于发挥电解优势。

叶盘的加工主要包括叶型加工和轮盘加工。电解工艺主要针对叶盘的叶身型面进行电解粗开槽和电解终成型加工。电解开槽后的叶型余量其均匀性是决定叶身型面电解终成型加工成败至关重要的因素。因此,套料阴极设计方法及优化是电解开槽工艺的关键技术之一。与原数控铣工艺路线相比,以电解工艺代替了粗铣、精铣叶身型面,并减少了后续的手工抛光加工,同时还避免了在叶片加工中产生的残余应力,更有利于保证叶型精度<sup>[7]</sup>。

## 套料阴极设计方法

用于整体叶盘零件叶型电解加工的工装包括套料阴极、终成型阴极和装夹定位夹具。对于叶型曲度较小的叶盘一般采用套料开槽方式进行粗加工,然后进行精密终成型电解加工,实现叶盘无余量加工。然而对于大型叶盘,尤其是叶型扭曲较大时,为了使终成型余量均匀,通常在套料电解加工后还要进行半精加工,最后进行无余量电解加工<sup>[8]</sup>。

虽然整体叶盘套料电解开槽属于粗加工,只是在整体叶盘上加工出叶型锥形,但是其技术难度大,阴极结构复杂,设计难度大。套料阴极设计步骤主要包括阴极总体结构设计、工作阴极型面设计以及轨迹计算、间隙计算,经试验验证,再优化改进等。

### 1 工作阴极型面设计

工作阴极型面设计主要是根据叶型及流道参数,对各设计截面数据进行投影、旋转、移动以及求取最小包络等处理,完成工作阴极型面的计算。具体计算方法如下:

(1) 首先需根据叶盘零件结构特点和叶型参数确定投影截面。若

该叶盘零件流道倾斜角度不大,叶型扭角较小,则选择靠近流道上方的设计截面线所在的平面为投影截面;若流道倾斜角度比较大,且叶型扭角也比较大,则要对投影截面进行一定修正,可以选择和流道斜面平行的截面作为投影平面。

(2) 确定投影平面后,应对各设计截面的弦线和叶盆中点进行标记,并建立投影基准坐标系。通常叶片型面共有  $N$  个设计截面,排除流道下方的 0 截面和叶尖上方的  $N-1$  截面,有效截面为  $I \sim N-2$  截面,分别做  $N-2$  个截面线的弦线,并取出各个截面线叶盆曲线中点。选取截面  $I$  为基准截面,并以截面  $I$  叶盆曲线中点为原点(记作  $O$ ) 建立投影基准坐标系。

(3) 以  $I$  截面为基准截面,将其余  $N-3$  个截面投影到基准截面,并将每个投影截面叶盆曲线中点投影到基准截面叶盆曲线中点  $O$  上,使所有截面投影到基准截面,且叶盆曲线中点重合。这样做的优势是叶型关于  $O$  点是相对对称的,两侧的余量较均匀,有利于求取最小包络曲线。

(4) 完成设计截面投影后,通过旋转、平移截面线等处理,求取最小包络曲线。首先通过 UG 测量各截面的弦线和基准截面弦线之间的角度  $\alpha$ ,并将各个截面线以投影坐标系  $Z$  轴为旋转中心,按测量角度  $\alpha$  旋转到和基准截面弦线平行的位置;其次求取基准截面弦线的中垂线;再依次将各旋转后截面线沿中垂线向基准截面线内移动一定的距离,各旋转后截面线移动距离根据基准截面线的包容度决定。这样做的目的是使所有叶型尽量包容于基准截面线内,以便求取最小包络曲线;然后连接盆、背两侧最外侧截面曲线作为阴极的叶盆、叶背,对于叶型包络线中交叉处可根据经验值导圆处理。进、排气边圆弧可通过桥接曲线的方法

补全包络线。

(5)最后进行工作阴极内型孔曲线、圆角及厚度的计算。在提出扩散算法前,首先引入加工间隙的概念。加工间隙与电解液构成了电解加工的核心工艺因素,决定着电解加工工艺指标——加工精度、材料去除率、表面质量等,也是阴极设计及工艺参数选择的首要基本依据<sup>[9]</sup>。电解加工间隙:

$$\Delta = \frac{\eta\omega(U - \delta E)\sigma}{v_a}$$

其中,  $\eta$  为电流效率;  $\omega$  为体积电化当量( $\text{mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$ );  $\delta E$  为阴、阳极极化电位值总和;  $\sigma$  为电解液电导率( $1/\Omega \cdot \text{mm}$ );  $v_a$  为工件的法向电解速度( $\text{mm}/\text{min}$ );  $\Delta$  为法向平衡加工间隙( $\text{mm}$ );  $U$  为阴、阳极之间的电压( $\text{V}$ )。

所谓扩散算法,即  $\cos$  间隙计算法则:

$$\Delta n = \eta\omega\sigma U_R / (v_c \cos\theta) = \Delta b / \cos\theta$$

其中,  $\Delta n$  为法向平衡间隙;  $v_c$  为阴极进给速度( $\text{mm}/\text{min}$ );  $\theta$  为进给速度与法向的夹角;  $\Delta b$  为阴、阳两级间的法向间隙。

通过扩散算法,可预先计算出阴极片内型孔的规律延伸量、倒圆  $R$  值,以及阴极片的厚度值。规律延伸量为  $\alpha$  (即套料加工后余量),  $R_c$  (即叶身根部与流道转接  $R$ ), 阴极片厚度  $b$ 。

以上是套料电解阴极设计的关键技术和计算方法,通过上述设计方法可以加工出理想的零件型面,然而合理实用的流场方式及稳流结构也是阴极设计的关键所在,它可以实现过程稳定的加工工艺。

## 2 流场方式及稳流密封结构设计

整体叶盘电解加工的关键技术在于阴极的设计,而阴极设计的关键在于流场的设计和计算。阴极的电解液流场对叶片能够稳定加工起着决定性作用。因此,必须有效地控制和设计电解液的流场。为了保证流

道的加工精度,采用正流式加工,即电解液由叶尖流进,叶根流出,阴极的左右两侧(即叶片的进排气边处)进行补水装置设计,并同零件叶根部共同构成密封,保证电解液从加工区流过,并且加工区电解液流场流畅、均匀和稳定。

## 3 轨迹计算规划

在完成套料阴极结构设计之后,可以按照工作阴极各层面上的设计截面平移距离和旋转角度  $\alpha$ ,从而有规律地形成阴极与整体叶盘零件的运动轨迹。这样就可以按照一定的规律测算出每一个层面的工作阴极所在的位置值( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $C$  值)。具体测算方法如下:

(1) 测算投影截面工作阴极位置坐标(确定最终加工位置)。

以工作阴极导电圆柱端面为  $z$  方向基面  $A$ , 测量  $A$  面至 HSK 夹头中心线的距离为  $Z1$ , 测量  $A$  面至盘体中心距离为  $Z2$ , 则  $Z1+Z2$  即为工作阴极  $Z$  的坐标值, 盘体的积叠轴线和 HSK 夹头中心线之间的  $y$  轴方向距离即为工作阴极的  $Y$  值, HSK 夹头定位端面距离积叠轴的  $x$  向的距离为  $X$  值。盘体面与  $y$  轴成角度(锐角), 则该角度即为  $C$  值。

(2) 依次测算各截面层工作阴极与投影面工作阴极坐标值的变换值(确定各个步骤的加工位置)。

工作阴极按规律行程时,其对应的积叠轴也是跟随规律而形成的,所以在求  $X$  值变化值时,以法向投影测量两个积叠轴线之间的投影距离即为变化值。根据具体的变化方向求取  $X$  的坐标值。

在求  $Y$  值变化值时,以法向投影方向测量两个积叠轴线之间的投影距离即为变化值。根据具体的变化方向求取  $Y$  的坐标值。

在求  $Z$  值变化值时,测量两个  $A$  面之间的差值即为变化值。根据具体的变化方向求取  $Z$  的坐标值。

在求  $C$  值时,求取两个  $C$  面之

间的角度差,根据实际位置方向确定差值的变换符号以确定  $C$  的坐标值。

依次类推,便可以求出所有层面的阴极片位置坐标值,根据每个层面与初始层面的相对位置原则,计算出每一个步骤的对应值便可以编写出机床程序中的对应值。

## 工艺试验及优化

采用上述设计的套料阴极经过多轮试验,初步确定并固化了工艺参数,然后对阴极进行优化。在首次试验时,采用直线形阴极。通过试验,发现加工过程中该结构的型面阴极会产生死水区,导致流场不均匀,使加工由于火花短路而无法持续进行,并且加工后流道表面凹凸不平,加工质量较差。

在电解加工过程中,应使加工间隙中加工面上各处的电解液流量充足、均匀,不发生流线相交及其他流场缺陷,否则可能会在加工表面上产生流纹等疵病,影响加工精度及表面质量,严重的可能发生短路,使阴极和工件损坏<sup>[10]</sup>。

为了解决火花短路问题,针对阴极结构进行优化,以改善流场的均匀性。分析认为两尖角处电解液流程过长,且叶型叶身位置两侧有相邻叶片封水,因此导致尖角处流场不平稳。为此采取如下措施:

(1) 将阴极改为“S”形结构,缩短了加工区域距离出液口处电解液的流程,改善了整个加工区域的流场,使得电解液的流场分布趋于均匀。

(2) 在阴极两端增加补液结构,采用不同压力的电解液对端面“以水封水”,使流程更加均匀,避免了死水区的现象。

采用优化后的阴极重新试验,避免了加工过程中的火花短路现象,提高了工艺过程稳定性,并验证了工艺可行性和稳定性。

经采用三坐标检测,套料电解加

工的整体叶盘叶身型面余量较为均匀,基本控制在1.0~1.2mm,能够满足后续精密电解终成型加工要求。特别对于精密电解加工来说,余量的均匀性对于复制精度尤为重要,余量越均匀,其最终加工精度愈高。

## 结束语

通过试验验证,套料电解加工的整体叶盘叶型一致性好,余量接近均匀,效率高,能够满足后续精密电解加工要求。

电解工艺优化,每次都要对阴极进行优化,然后重新制造,再进行试验验证,反复迭代试验。因此,电解工艺研发非常耗时,但工艺一旦成型,加工效率则非常高,工艺稳定。

精密电解加工整体叶盘具有其独特的优势,生产效率高,表面质量好,阴极无损耗,可加工任何难切削导电材料,加工中无机械切削力,可加工薄叶型,无变形且加工过程稳定。因此,精密电解加工技术在整体叶盘加工领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献

[1] 张明岐,傅军英.高温合金整体叶盘精密振动电解加工方法的应用分析[J].航空制造技术,2009(22):26-29.

ZHANG Mingqi, FU Junying. Application

and analysis of precise vibration electrochemical machining method for integral blades of superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(22): 26-29.

[2] 徐家文.航空发动机整体构件特种加工新技术[M].北京:国防工业出版社,2011.

XU Jiazwen. New special machining technology of aeroengine integral component[M].Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[3] 姜云龙.埃马克电化学公司关于整体叶盘精密电解加工工艺综述——面向未来的技术[C]//中国机械工程学会特种加工分会.2014年全国电化学加工技术研讨会论文集.北京:中国机械工程学会,2014.

JIANG Yunlong. A review of EMAG 's precision electrochemical machining process for blisk——future-oriented technology[C]// Non-Traditional Machining Institution of the Chinese Mechanical Engineering Society. Proceedings of 2014 National Electrochemical Processing Technology Symposium. Beijing: China Mechanical Engineering Society, 2014.

[4] 卡尔.H.哈曼,安德鲁.哈姆内特,沃尔夫.菲尔施蒂希.电化学[M].陈艳霞,夏兴华,蔡俊.译.2版.北京:化学工业出版社,2010.

HAMANN C H, HAMNETT A, VIELSTICH W. Electrochemistry[M]. CHEN Yanxia, XIA xinghua, CAI Jun. Tran, 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[5] 阿伦.J.巴德,拉里.R.福克纳.电化学方法.原理和应用[M].邵元华.译.2版.北京:化学工业出版社,2005.

BARD A J, FAULKNER L R. Electrochemical methods, principles and applications[M]. SHAO Yuanhua. Tran, 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

[6] 于冰.电加工技术在航空发动机上的应用[J].金属加工(冷加工),2013(22):19-21.

YU Bing. Application of electrical machining technology in aeroengine[J]. Metal Working(Metal Cutting), 2013(22):19-21.

[7] 王聪梅.航空发动机典型零件机械加工[M].北京:航空工业出版社,2014.

WANG Congmei. Machining of typical parts of aeroengine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.

[8] 于冰.电加工技术发展应用实例[J].航空宇航科学与技术,2016,5(1):8-12.

YU Bing. Development and application of electric machining technology[J]. Aerospace Science and Technology, 2016,5(1):8-12.

[9] 徐家文,云乃彰,王建业.电化学加工技术:原理.工艺及应用[M].北京:国防工业出版社,2008.

XU Jiawen, YUN Naizhang, WANG Jianye. Electrochemical processing technology: principle, technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[10] 吴建民,徐家文.数控电解加工整体叶轮阴极三维流场数值模拟[J].中国机械工程,2009,20(7):780-783.

WU Jianmin, XU Jiawen. Numerical simulation of three-dimensional flow field in numerical control electrolytic processing of compressed impeller[J]. China Mechanical Engineering, 2009,20(7):780-783.

# Design and Optimization of Precision ECM Cathode

YU Bing

(AECC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** Based on analysis of structural characteristics of blisk, technical requirements and characteristics of the material, the technical scheme of electrochemical machining is determined. Three key technologies such as cathodic design and trajectory calculation, forming cathode design and parameter optimization techniques are analyzed. The key steps such as design of cathode face, design of flow field, calculation of trajectory and calculation of gap are mainly discussed in detail and further optimized by repeating experiments to solve problems of uneven flow field and sparking short circuit. Finally, the feasibility of the process is verified, and the leaf disc of the nested electrolysis is more uniform. It can meet the subsequent fine electrolytic processing requirements, and achieve good result.

**Keywords:** ECM; Blisk; Superalloy; Nesting electrolysis; Cathode design

(责编 玲犀)