

基于精密电解工艺的叶片进排气边形状控制方法

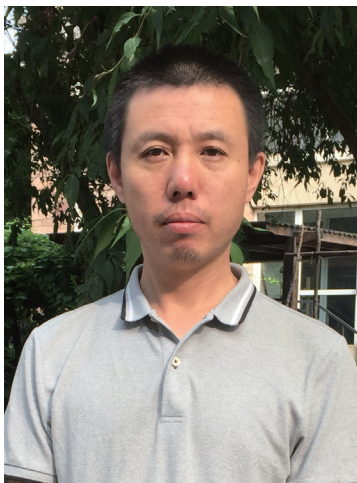
桓 恒, 郑 鑫, 刘海波, 赵文涛, 于 冰, 陈 东

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 针对高温合金复杂曲面叶片进排气边尺寸和形状的高精度要求,开展了精密电解加工试验研究。结果表明,利用振动进给电解机床与优化电极设计方法可以有效提高电解加工叶片进排气边尺寸形状精度。使用电导率 $85\sim 90\text{mS/cm}$,温度 25℃ 的 NaNO_3 电解液,叶盆和叶背电极振幅 0.4mm ,振频 40Hz 可加工出中心型面进气边形状满足设计要求,排气边接近设计要求的试件。在此基础上,探索采用振动光饰工艺作为精密电解加工技术的辅助手段解决叶片进排气边形状控制难题的方法。

关键词: 精密电解加工; 叶片; 进排气边; 形状控制; 电极设计

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.054



桓 恒

高级工程师,主要从事特种加工技术研究、技术管理、专业发展规划等工作。参与国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“航空发动机微孔冷加工超快激光数控机床”项目。获得集团科学技术三等奖1项,省级科技成果二等奖1项。

近年来,航空发动机已经越来越向微细、精密的方向发展,随着新型航空发动机不断增多,致使叶片需求量呈爆发式增长,除了传统的单个叶片结构外,整体构件中也越来越多地需要对叶片叶身进行高精度的加工。新型航空发动机叶片常采用宽弦、弯掠叶型等越来越复杂的结构形式,叶片数量多、型面曲率变化大、端弯、后掠,其几何精度水平、综合质量要求越来越高,尤其是对于叶片进排气边处的尺寸精度和几何形状要求日益严苛,成型加工和表面完整性保证变得越来越困难^[1-2],成为影响航空发动机制造的瓶颈。

精密电解工艺的出现,为高质量、高效率、高表面完整性、低成本制造提供了一种优异的工艺方法。精密电解加工技术是一种利用电极振动进给原理,配合高频窄脉冲电源实现高精度仿形的型面加工技术^[3-4]。它具有重复精度高、加工成本低、效

率高等优势,特别适用于复杂曲面零件的批量生产。但电解加工过程中电解液流场是一种固液气混合流场,同时需要考虑电场和温度场的综合影响^[5-8]。在叶片电解加工中,叶片进排气边处的电场和流场状态尤为复杂,因此该处的加工精度不易满足设计要求,这是制约叶片电解工艺发展的重要因素^[9]。为此需要进一步探究电解加工叶片进排气边形状控制方法。

利用精密电解加工提高叶片整体精度

针对航空发动机压气机静子叶片等宽弦、弯掠的单个叶片的精密电解加工时,需严格控制电极的尺寸和位置精度。加工过程中叶盆电极与叶背电极相向进给,在电场的作用下同时去除叶片毛坯叶盆和叶背两侧余量,最终两侧电极距离达到最小约 0.01mm ,完成叶片的高精度加工。

精密电解加工与传统脉冲电解加工相比可达到更小的平衡间隙。其原理是电极运动轴振动周期与电源脉冲周期耦合,在振动周期中设置给电的起始角和终止角,形成与振动频率相同的脉冲频率,如图1所示。这样可使单个脉冲周期中有效电解加工时的间隙达到0.1mm甚至更小,而电解加工后的产物和热量通过单个脉冲周期中最大0.5mm的加工间隙充分排出,最终达到型面精密电解加工的要求。

由 $\cos\theta$ 法可知,通过减小有效电解加工时的间隙,可使叶片型面获得更高的仿形精度。但这一法则的 θ 不能超过 55° ,否则有较大误差^[10]。叶片进排气边轮廓与电极进给方向之间的夹角 θ 一定存在超过 55° 的部分,因此为达到叶片进排气边处的电解精度提升,需要对叶片电解的电极设计进行进一步优化。

电极设计与优化

在较为稳定的流场环境及小间隙电解加工的基础上,叶片型面精密电解加工最核心的技术就是电场设计,尤其影响叶片进排气边处的加工精度。电场设计包括间隙设计、选取最佳分型点、选取最佳进给方向、电极型面设计等内容。

1 间隙设计

叶片型面各处与电极之间的间隙略有差别,通常将 $\theta=90^\circ$ 时叶片型面与电极之间的理论间隙称为进给方向设计间隙。在实际加工中,实际最终间隙越小,其仿形能力越高,因此可以考虑利用该原理提高型面电解加工精度,降低电极型面设计难度。

由于精密电解加工采用高频窄脉冲振动电解工艺,在保证流场的前提下。设计间隙通常可以选择0.08~0.15mm。

2 选取最佳分型点和分型线

叶片电解工艺在设计电极时通

过分形面将电极拆分成叶盆电极与叶背电极。分形面在电极各截面上的截线及截线与电极型面线的交点分别称为电极进排气边分形线和分形点,分型点和分型线影响着电解加工时叶片进排气边处电场和流场状态。

为了减弱电极进排气边电场集中状态,同时便于电极在该处的加工,应使叶盆电极和叶背电极在进排气边处无内凹区域。因此通常设计叶片电极时进排气边分型点选取电极截面线与电极进给方向平行线的切点(与进给方向垂直相交的最远点),这种分形方式的分形点称为传统分形点,如图2所示。由于航空发动机叶片型面通常是大扭曲结构,易出现一些截面的切点所分的电极叶

盆侧和叶背侧严重偏离中心。这种情况下,电解加工过程中的流场状态较为不均匀,易出现一侧流量超过另一侧流量很多,电解液冲刷不均而导致短路发生。

为充分考虑流场因素,电极进排气边分型点应选取电极截面线与电极截面线各内切圆圆心连结而成的拟合曲线的切向延长线的交点。此时的切向延长线就是电极进排气边分型线,如图3所示。当电解液按此分形方式流经电极与叶片进排气边时,该处叶盆流场与叶背流场相对均匀,因此将该分形点称为流场分形点。但其分出的叶背电极型面在进排气边处存在较大的内凹圆弧区域,不利于电极的高精密加工,且易形成电场集中。

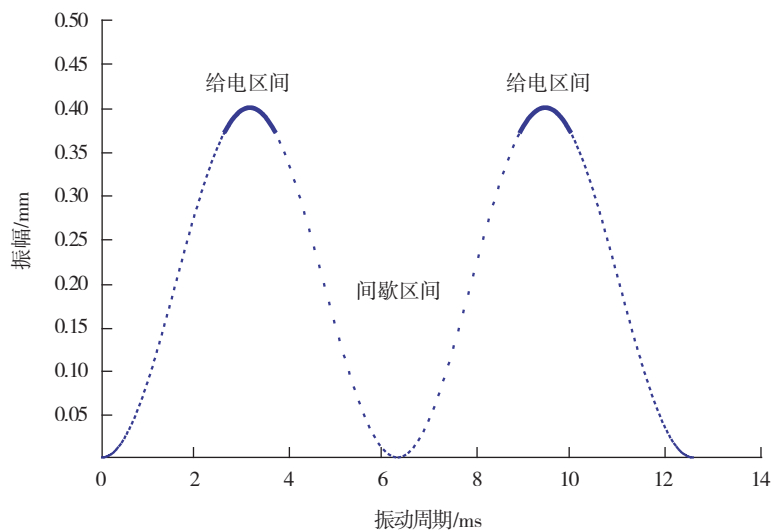


图1 电极振动周期示意图

Fig.1 Cathode vibration cycle diagram

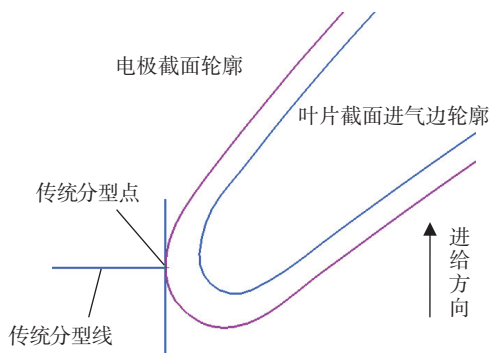


图2 传统分型点和分型线图

Fig.2 Traditional field fractal points and fractal lines

综合电场和流场考虑,选取传统分形点和流场分形点连线的中点作为优化分形点,如图4所示。

另外,在分型点的选择上应考虑电极精雕加工的难度,因此电极设计时尽量使进排气边处无内凹圆弧,或只存在微小的内凹圆弧,后续利用其他手段处理。

3 选取最佳进给方向

通过 $\cos\theta$ 法则可知,电极型面与叶片型面之间的法向角 θ 越小,电解仿形精度越高。因此可通过积分方式算得叶片全型面的平均法向角作为理论进给方向。

在实际设计过程中,进给角度可简化为各检测截面弦长的法线方向角度均值。但如果着重考虑叶片进排气边的仿形精度,则电极进给方向应选取电极各截面进排气边分型线角平均线的均值,如图5所示。

4 减弱电极进排气边电场强度

电解加工过程中叶片进排气边存在电场集中的情况,因此为达到较高的电解仿形精度,在叶片进排气边

圆弧处电极的最大设计间隙应大于进给方向设计间隙的2倍,如图6所示。具体数值应通过多轮试验反复迭代计算修正。

通过电极优化设计得到的电极模型如图7所示。

5 叶片进排气边电解加工试验

加工对象:一种超薄弯扭叶片,尺寸约为 $35\text{mm} \times 20\text{mm}$ (长 \times 宽),叶尖截面最厚处约 1mm ,各截面最小进排气边圆弧 R 约 0.1mm 。

试验使用精密振动电解机床,选用电导率 $85\sim 90\text{mS/cm}$,温度 25°C 的 NaNO_3 电解液,叶盆和叶背电极在加工过程中的振幅 0.4mm ,振频 40Hz 。

叶片电解加工后进排气边轮廓偏差如图8所示。

由图8可知,叶片在上下各两个截面的进排气边轮廓精度较低。这是由于叶片上下两个截面的进排气边分型线角度与进给方向的夹角较小,使电极进排气边处内凹部分较大。一方面增加了电极的加工难度使该处电极加工精度较低,另一方面

更易造成电场集中。因此不易控制该处的电解加工精度。

另外,进气边轮廓精度高于排气边轮廓精度,除个别截面外可满足 $\pm 0.03\text{mm}$ 的精度要求。试件的第8截面和第9截面进排气边几何形貌如图9所示,图中叶片进气边形状与理论轮廓的符合程度较高,而排气边叶背侧存在一定的削边情况。进气边形状对叶片气动性能的影响更为重要,因此在均衡进排气边分型线与进给方向之间的关系时,略微偏向于进气边。

进排气边形状进一步优化方法

使用优化设计的电极进行叶片电解试验后所得叶片可能在进排气边处存在最小曲率半径小于公差要求的情况。此时可以利用振动光饰工艺对叶片进排气边进行圆整,使其最小曲率半径符合公差要求。

振动光饰工艺需将一定配比的工件、磨料和磨液装入一定形状的容器中,当容器在特定的振幅和频率下

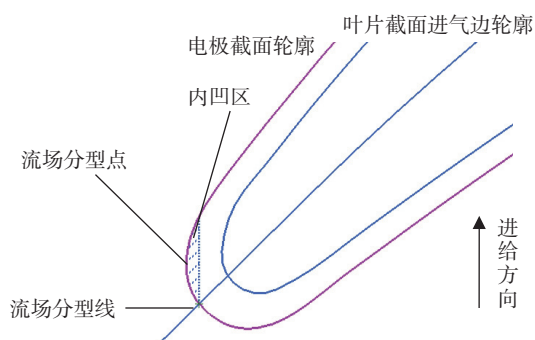


图3 流场分形点和分型线图
Fig.3 Flow field fractal points and fractal lines

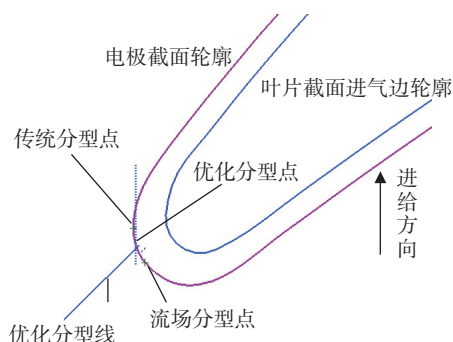


图4 优化分形点和分型线图
Fig.4 Optimized fractal points and fractal lines

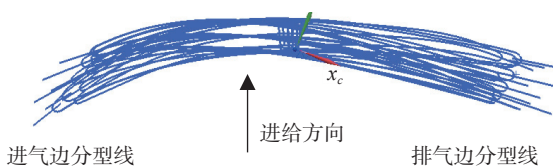


图5 各截面进排气边分型线和最终进给方向图
Fig.5 Leading and trailing edges fractal lines and final feed pattern of each section

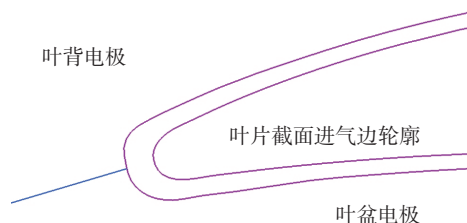


图6 叶片进气边电极轮廓线图
Fig.6 Leading edges cathode profile

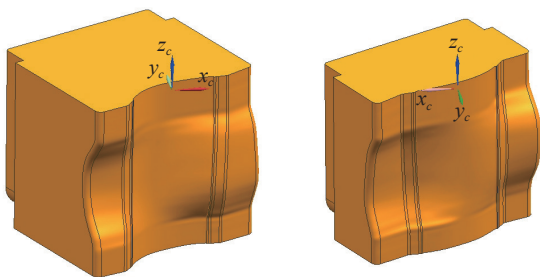


图7 叶背与叶盆电极模型图

Fig.7 Cathode models of pressure side and suction side

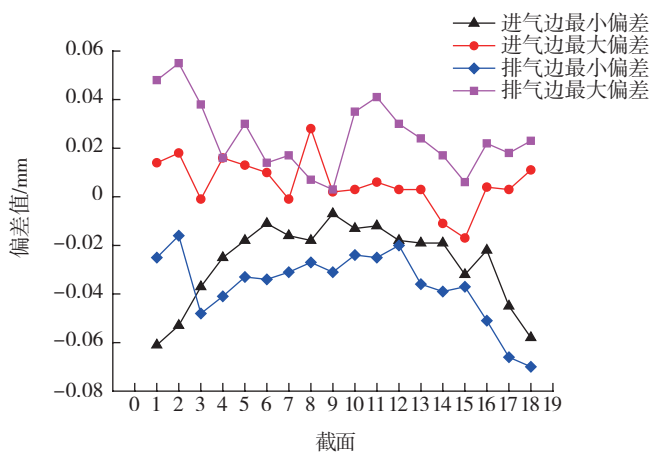


图8 叶片各截面轮廓度偏差图

Fig.8 Profile deviation of each section

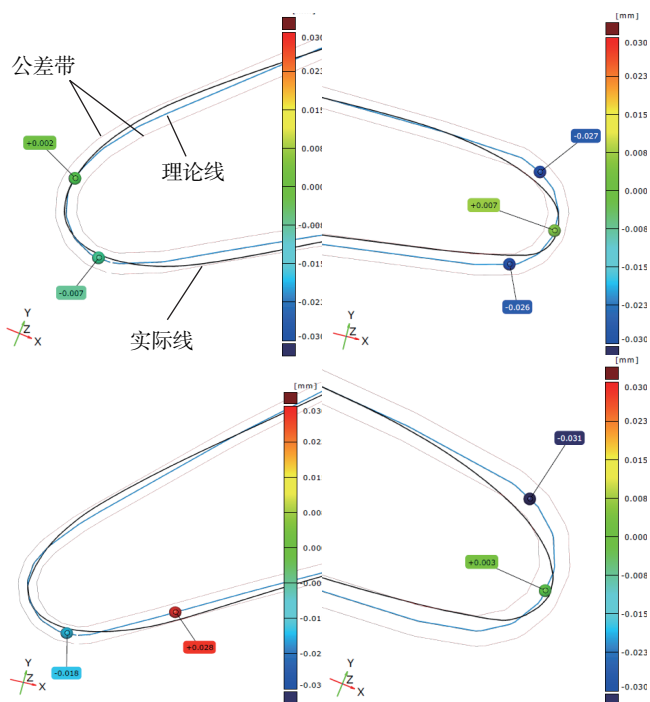


图9 叶片截面进排气边轮廓精度图

Fig.9 Measuring result and tolerance zone of leading and trailing edges

振动时,磨料按一定的轨迹运动。在运动过程中,由于工件和磨料的质量、形状、位置的差异,迫使磨料对工件产生碰撞、滚压和微观磨削、刻划作用。因此可实现对工件去毛刺、倒角、表面光整等加工。

传统的振动光饰工艺去除复杂型面尖点时,难以控制各截面的去除量同时满足轮廓度要求。但精密电解加工相比于使用数控机械加工或自适应抛光等工艺完成叶片进排气边加工,叶片的重复精度更高,其重复误差不超过 0.02mm。而叶片在进排气边的形状精度要求高于轮廓度要求,这使得精密电解加工与振动光饰工艺的结合成为可能。

为达到对叶片进排气边进行光整圆顺的目的,振动光饰工艺需使用不规则磨料,如陶瓷基的斜圆柱或三角料。该种磨料可达到仅去除进排气边尖点的效果。当叶片进排气边最小曲率半径仅略微超下差,且各截面弦长未接近下差时,振动光饰工艺可以作为保证叶片进排气边形状精度的手段。图 10 为通过振动光饰工艺光整的叶片横切面进气边形貌。

结论

(1) 精密电解加工技术能够实现小间隙的电解加工,是叶片进排气边尺寸和形状精确控制的基础。

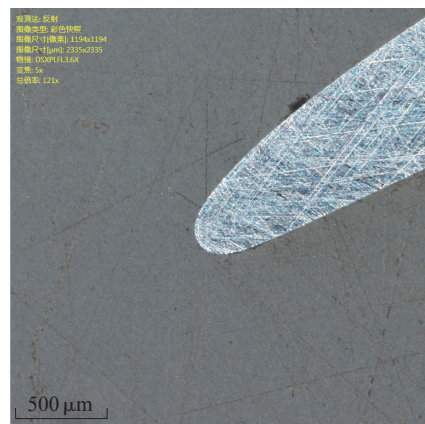


图10 振动光饰叶片横切面超景深显微照片

Fig.10 Ultra-deep photomicrographs of cross-sections after vibrated decorative blade

(2) 电极在进排气边的分型点和分型线应同时考虑电场效应、流场需求和制造难度。分型点可选取传统分型点和流场分型点的中点,分型线方向按照流线方向确定。为着重满足叶片进排气边的仿形精度,电极进给方向应选取进排气边分型线角平分线的均值方向。使用优化后的电极可加工出中心型面进气边形状满足设计要求,排气边接近设计要求的叶片试件。

(3) 由于精密电解加工可达到的重复精度高,使得振动光饰工艺可以作为叶片进排气边形状光整圆顺的可行方案,但直接应用需严格满足叶片进排气边最小曲率半径仅略微超下差,且各截面弦长未接近下差的条件。

参考文献

[1] 李勋,于建华,赵鹏.航空发动机叶片加工变形控制技术研究现状[J].航空制造技术,2016,59(21):41-62.
 LI Xun, YU Jianhua, ZHAO Peng. Research status of machining deformation control method and technology of aeroengine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 41-62.
 [2] 王秀枝,杨胜强,李文辉,等.薄壁片状试件贴壁式振动光饰实验研究[J].表面

技术,2017,46(10):261-267.

WANG Xiuzhi, YANG Shengqiang, LI Wenhui, et al. Experimental investigation of adherent vibratory finishing for sheet specimens[J]. Surface Technology, 2017, 46(10): 261-267.

[3] RAJURKAR K P, SUNDARAM M M, MALSHE A P. Review of electrochemical and electrodischarge machining[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 13-26.

[4] 李振兴,刘茂兴,赵潮,等.脉冲振动电解加工对圆柱型面复制精度的影响[J].电加工与模具,2017(1):30-34.

LI Zhenxing, LIU Maoxing, ZHAO Chao, et al. Influence of ECM with the combination of plus current and vibration motion on the accuracy of cylindrical surface[J]. Electromachining & Mould, 2017(1): 30-34.

[5] 朱顺康,刘嘉,朱荻.发动机叶片电解加工等入流角流场设计与试验研究[J].电加工与模具,2016(3):28-32.

ZHU Shunkang, LIU Jia, ZHU Di. Design and experimental investigation on flow field with equivalent inflow angles in ECM of turbine blades[J]. Electromachining & Mould, 2016(3): 28-32.

[6] 王蕾.叶片电解加工成形过程仿真与预测研究[J].机械设计与制造,2009,11:101-103.

WANG Lei. Study on simulation and prediction of blade's shape in electrochemical

machining[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 11: 101-103.

[7] SUN Chun, ZHU Di, LI Zhi, et al. Application of FEM to tool design for electrochemical machining freeform surface[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 43(2): 168-172.

[8] 方越,刘嘉,徐正扬.提高航空发动机叶片反拷法电解加工精度的实验研究[J].电加工与模具,2017(3):41-46.

FANG Yue, LIU Jia, XU Zhengyang. Experimental study on anti-copy ECM of aero-engine blades for higher machining accuracy[J]. Electromachining & Mould, 2017(3): 41-46.

[9] 朱栋,朱荻,徐正扬.航空发动机叶片电解加工阴极数字化修正模型及其试验研究[J].机械工程学报,2011,47(7):191-198.

ZHU Dong, ZHU Di, XU Zhengyang. Experimental study on the cathode digital modification of turbine blade in electrochemical machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 191-198.

[10] 王建业,徐家文.电解加工原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2001.

WANG Jianye. XU Jiawen. Electrochemical machining principle and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

通讯作者:桓恒, E-mail: 357814915@163.com.

Leading and Trailing Edges Shape Control Method of Blade Based on PECM

HUAN Heng, ZHENG Xin, LIU Haibo, ZHAO Wentao, YU Bing, CHEN Dong

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

[ABSTRACT] Aiming at the size and shape accuracy of edges of superalloy complex curved blades, an experimental study on precision electrolytic machining (PECM) was conducted. The results show that the use of vibration feed ECM machine tools and optimization of cathode design methods can improve the size of the leading and trailing edges accuracy by PECM processing. Using conductivity of 85-90mS/cm and 25°C electrolyte of NaNO₃, amplitude of 0.4mm and vibration frequency of 40Hz process the shape of leading edges of the center profile meet the design requirements, and trailing edges is close to the design requirements. On this basis, as a supplementary means of PECM, exploring to solve the problems of the shape control of blade edges by combining with vibration lighting process.

Keywords: PECM(Precision electrolytic machining); Blades; Leading and trailing edges; Shape control; Cathode design

(责编 大漠)