

电化学加工在汽车涡轮叶片加工方面的应用

刘海娟¹, 彭保林², 韩丽¹, 刘红艳¹

(1.安徽文达信息工程学院,合肥 231201;2.合肥海德数控液压设备有限公司,合肥 230601)

摘要:叶片电化学加工过程十分复杂,涉及多种物理场的耦合,包括流场、电场和热场等,所以其加工过程很难被预测。COMSOL是主流的电化学加工模拟仿真软件,通过计算机仿真的方式可预先模拟和预知叶片加工的过程,然后再做实验进行验证对比。电化学加工的高效率、无残余应力等优点,将会使其在叶片加工方面的应用更为广泛。

关键词:电化学加工;叶片;COMSOL;物理场;计算机仿真

中图分类号:U464.135;TQ151 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2018)02-0047-04

The Application of ECM in Turbine Blade

LIU Hai-juan¹, PENG Bao-lin², HAN Li¹, LIU Hong-yan¹

(1. Anhui Wenda University of Information Engineering, Hefei 231201, China;

2. Hefei Haide Hydraulic Press Co. Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The machining process of ECM is very complex, and involves various physical fields, such as flow, electric and thermal field. Thus the machining process is very difficult to forecast. The mainstream computer simulation software is COMSOL. According to the simulation results, it is obvious to get the machining process in advance, and conduct the experiment for proofing the simulation results. The merits, such as high efficiency and non-residual stress will make the application of ECM in turbine blade be more extensive.

Keywords: ECM; blade; COMSOL; physical field; computer simulation

0 引言

电化学加工(ECM)也叫电解加工,加工原理是在电化学反应条件下使阳极金属溶解,从而去除阳极材料,实现工件加工成形^[1]。发动机的涡轮和压机可提高发动机引擎的性能,叶片是涡轮组件中的重要组成部分^[2]。涡轮增压器具有高效率、高技术含量和低耗能等特点,是一种环境友好型的装置,具有一定节能减排作用。涡轮增压通过压气机端进行空气压缩动作,使得压缩腔里的气体密度增大,提高发动机动力。大多数增压器应用在柴油机的动力装置上,进入气缸中的气体增多,会导致喷入气缸的柴油也相应增多,进而导致发动机的动力性能也有所提高。气体的增多也使柴油获得更加充分的燃烧,从而使燃烧后排放的污染气体减少。因此,增压发动机既具有良好的动力性能,同时也在经济性以及排放污染指标上都有较好的作用,现已成为现代汽车和工程机械的标准配置^[3]。

1 电化学加工原理与特点

1.1 加工原理

电化学加工是利用金属在通电电解液中的电化学反应使阳极工件溶解来进行成型加工的,如图1所示。1958年诺卡特公司研制出世界上第一台应用于叶片加工的电解加工机床。国内电化学加工的研究最早始于20世纪60年代,并将研究应用于加工许多难加工零件,如发动机叶片、火炮膛线等。

电化学加工的工件与电源(直流电源、脉冲电源等)的正极相连成为阳极,工具为阴极,与电源的负极相连,工具按待加工的工件形状制成,即溶解阳极的模具。在电化学加工过程中,随着电化学反应的进行,逐渐将工具形状复制到阳极工件。阳极工件表面每个铁原子在外电源作用下释放出两个电子,成为二价铁离子进入电解液中,其反应为: $\text{Fe}-2\text{e}=\text{Fe}^{+2}$ 。溶入电解液中的 Fe^{+2} 又与 OH^{-} 离子结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀,并而随着流动的电解液而被

带走。 $Fe(OH)_2$ 逐渐被电解液和空气中的氧气氧化为 $Fe(OH)_3$ 。氢离子被移动至阴极表面,从电源得到电子而析出氢气,其反应为 $2H^+ + 2e = H_2 \uparrow$ 。电解液从阴阳两极间隙(间隙大小一般为 $0.1 \sim 1mm$)中以一定速度,一般为 $5 \sim 30 m/s^{[4]}$ 流动,工具阴极向工件(阳极)进给,在阴阳两极的距离到达一定数值(两极间隙)时就会产生电化学反应,工件(阳极)被通电电解液电解。工件(阳极)金属材料按阴极型面的形状在电化学反应过程中不断地溶解到电解液中,随着工件(阳极)材料的不断溶解,阴极不断地向阳极进给,电解产物随着电解液不断被冲走,随着电解加工的过程进行,工件表面也就逐渐被加工成接近于阴极工具的形状。

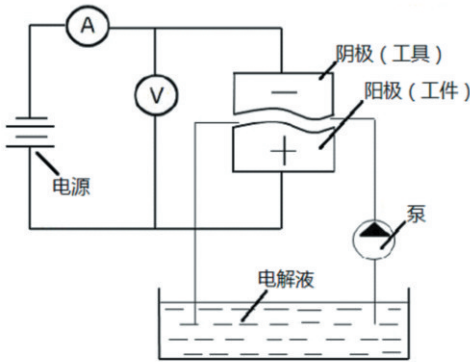


图 1 电化学加工简图

电解液在阴极与阳极的间隙间高速流动,在外加电场(电源作用)作用下,正离子向阴极移动,负离子向阳极移动,这样离子的移动就形成电流场,电源可以维持持续不断的电流,或脉冲电流(由脉冲电源提供),考虑加工间隙间的电场为恒稳的电流场,并对电解液进行各向同性假设^[5],由电场理论可得阴极和阳极表面的边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} \phi_c &= 0 \\ \phi_a &= U \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= \frac{\eta_0 i_0}{\eta \gamma} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, ϕ : 电场中各点电位 ($\phi = \phi(x, y, z)$); U : 阳极表面电位值; n : 阳极表面各点处法向坐标; η : 电流效率; θ : 阳极表面法向与阴极进给速度方向夹角; η_0 : $\theta=0$ 时的电流效率; γ : 电解液电导率; i_0 : $\theta=0$ 时阳极表面法向电流密度。

由电流守恒方程,有:

$$-\nabla \left[\left(\gamma + \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla U \right] = Q \quad (2)$$

式中, Q : 电量; ϵ_0 : 真空介电常数; ∇ : 哈密顿算子; ϵ_r : 相对介电常数。

电化学加工的电解液可分为:中性盐溶液、酸性盐溶液和碱性盐溶液。常用的电解液有 $NaCl$ 、 $NaNO_3$ 和 $NaClO_3$ 。由所述电化学加工原理可知,电化学加工需要大量的电解液,因此对电解液的要求也较高,如要求电解液无毒、价廉、性能稳定等。

1.2 加工特点

电化学加工是目前发展较迅速的特种加工方法之一,主要原因就是电化学加工在对高强度、硬度和难切削材料等的加工具有很大的优势,与传统的机加工方法作对比,电化学加工有以下优势^[6-7]:

(1)加工范围广。可加工各种难切削材料工件,并且不受加工材料的限制,只要材料能够在通电解液中产生电化学反应溶解。同时也可以加工异形孔以及深小孔等难加工机械形状。

(2)表面质量好。由阳极溶解来去除材料,故加工后的工件不会出现冷作硬化、残余应力和裂纹等缺陷,电化学加工成型后的表面粗糙度可达到 $Ra=0.8 \sim 1.25 \mu m$ 。

(3)效率高。对于复杂型面的一次性加工成型工件,电化学加工效率远高于一般的机械加工。

(4)工具阴极在理论上无损耗。工具阴极可在一定条件下重复使用,不会发生溶解,在加工时也无火花和短路现象,可长时间使用。

2 叶片的电化学加工

叶片是喷气发动机以及汽轮机中增压器的重要零件,如图2所示,其型面形状复杂且精度要求高。常规的叶片加工方法,须先经过精密铸造后再进行机加工,抛光后镶嵌至叶轮的榫槽中,最后再焊接而成。普通的叶片加工方法的加工工作量大,加工周期长,效率低,且加工质量不容易得到保证,很难达到叶片的形位要求。

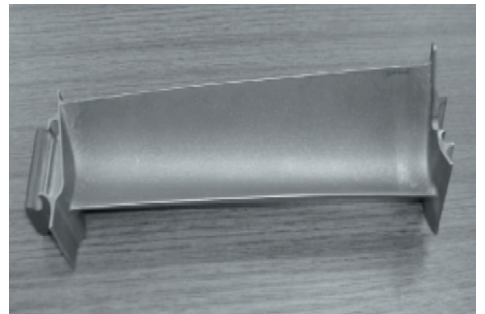


图 2 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金铸造低压涡轮叶片

发动机叶片的加工设计过程比较复杂,需要考虑包括流体动力学、传热学、材料强度和疲劳寿命等方面的问题。随着发动机技术的发展,叶片的结构向着轻型、复杂型面、超薄、动力学性能更好等方

向发展,叶片所用的材质向钛合金^[8]、钴基超耐热合金等难加工材料的方向发展,所以普通的机加工很难满足叶片加工的形位要求,而电化学加工对各种复杂形状的零件和难切削材料具有高效加工的优势,因此电化学加工方法也被广泛应用于发动机叶片的加工中。

2.1 叶片加工的多场耦合

电化学加工涉及电场、流场、温度场等多个物理场的耦合,所以电化学加工过程难以被准确预测和评估,工具阴极也无法被精确设计。针对这一问题,国内外学者进行了大量的仿真研究,主要是仿真预测在加工进入平衡状态下阴极型面状态和通过仿真能够较为精确地进行阴极设计。

(1) 流体运动方程

在电化学加工过程中,流道中的流体处于湍流状态,以便有效地带走加工产物和热量。RNS k- ϵ 模型能够更好地满足工程实际的需求,方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + Pk - \rho \epsilon \\ \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla)\epsilon &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1s} \frac{\epsilon}{k} \rho k - C_{2s} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, ϵ :湍流耗散率; pk :平均速度梯度产生的湍流动能; σ_k 、 σ_ϵ 、 C_{1s} 、 C_{2s} :模型常数。

(2) 热传递过程

热传递过程即热量的传递过程,热力学第二定律表明:热量总是自发地、不可逆地从高温物体流向低温物体,即只要有温差存在,就会出现热量的传递。根据传热的机理不同,热传递过程可以分为三种形式:热传导、对流和辐射。

根据热力学第一定律和傅里叶定律可建立三维非稳态导热微分方程如下:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \phi \quad (4)$$

式中, ρ :物体的密度(kg/m^3), λ :导热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), ϕ :单位体积的发热率(W/m^3)。

电解液的温度场分布可由对流-扩散方程进行描述如下:

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla \theta = \nabla \cdot (k_t \nabla \theta) + Q_b \quad (5)$$

式中, Q_b :加工中产生的热量; k_t :电解液热导率; c_p :电解液质量定压热容。

电化学加工过程所产生的热量来源主要有两个:电解液的焦耳热;电极-电解液边界的反应热。

由于绝大多数反应热通过电极的热传导作用

传入电极中,所以反应热对温度场的影响很小。

(3) 电场特性

阴极和阳极材均是金属材料,其导电性能都较好,因此阴极表面和阳极表面均可视作等势面。基于电解液各向同性假设,可知电位分布满足拉普拉斯方程^[9]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

电化学加工的两极表面的边界条件满足式(1),由电荷守恒可知:

$$\nabla \cdot (k \nabla U) = 0 \quad (7)$$

式中 k 表示电解液的电导率。

由法拉第定律可知,工件(阳极)溶解的速度取决于两极加工间隙内的电场分布,而极间的电场分布又受电解液的电导率和两极形状结构的影响,电导率又跟极间温度场分布有关。正是由于电化学加工受多种物理场的影响,所以其加工过程的预测也变得极其复杂。研究人员通常是通过计算机仿真的方法来研究电化学加工的多场耦合过程,并加以实验验证。

2.2 电化学加工仿真平台

目前主流的电化学加工仿真平台是COMSOL Multiphysics。COMSOL集成了建模、算法、和求解等模块为一体,由于它强大的多场耦合仿真功能,现已广泛地应用在工程中面临的电场、流场、以及多场耦合分析等方面。COMSOL可与如MATLAB、Excel、CAD等软件建立无缝连接,为用户提供了更大的方便,同时可与MATLAB进行联合仿真,使仿真效果更加贴合实际,也可以进行参数化仿真和设计优化,进行优化时将所需几何尺寸、计算步长、边界条件、材料属性等参数定义为变量,根据设定的目标函数,运行求解,即可得出优化的结果。

COMSOL的电化学模块涵盖了涉及电化学反应的一系列应用。电化学模块中的接口用于模拟具有二次或三次电流分布假设的系统^[6]。通



图3 COMSOL叶片电化学加工仿真示例

过仿真,电化学模块扩展了电化学系统设计、理解和优化的能力,为研究人员提供了很大的便利。叶片电化学加工在 COMSOL 中的仿真示例^[10]如图 3 所示。

3 结语

电化学加工是在阳极金属在通电电解液中产生电化学反应条件下去除材料,实现阳极工件的加工成型,其加工范围广、加工效率高、表面质量好。

发动机叶片的加工设计过程很复杂,要考虑包括流体动力学、传热学、强度等方面的问题。利用电化学加工方法对叶片进行电化学加工涉及多种物理场的耦合问题,包括电场、流场、热场等,其加工过程很难被准确预测,通常采用计算机仿真模拟的方式预先模拟叶片的加工过程,然后再做实验进行验证对比。电化学加工的高效率和无残余应力等优点,将使其在叶片加工方面发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 朱顺康.航空发动机叶片脉冲振动电解加工技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [2] 江伟.叶片高频窄脉冲电解加工过程多场耦合仿真[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [3] 穆莉.混流涡轮叶轮强度仿真研究[D].大连:大连交通大学,2013.
- [4] 秦艳芳.高频微秒级脉冲精密电化学加工中的多场耦合数值模拟[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [5] 何亚峰,卢文壮,干为民.基于电场分析的钛合金电解加工圆孔成形研究[J].中国机械工程,2016(11):1461-1466.
- [6] 裴迪.基于多场耦合仿真的脉冲电化学加工温度域的研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [7] 荆光涛.高频微秒级脉冲电解加工叶片的工艺研发[D].合肥:合肥工业大学,2015.
- [8] 赵龙. γ -TiAl 金属间化合物叶片电解加工试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [9] 何亚峰,卢文壮,干为民,等.基于电场和流场耦合的微坑电解加工数值研究[J].中国机械工程,2016(10):1365-1370.
- [10] 陈远龙,方明,裴迪,等.叶片电化学加工过程多场耦合仿真[J].中国机械工程,2016(22):3087-3092.

(责任编辑:曲继鹏)

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] HAMDANI. Optimum Moisture Content for Compacting Soils: One-Point Method [J]. J. Irrig. Drain Eng., 1983, 109(2):232-237.
- [2] 王兰民,袁中夏,王俊,等.干密度对击实黄土震陷性影响的试验研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(1):75-80.
- [3] 陈辉,雷胜友.土的击实试验影响因素[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):69-71.
- [4] 黄英,符必昌.确定土的最大干密度和最优含水率的数值解法[J].岩土工程学报,2002,24(4):538-540.
- [5] 冯忠居,谢永利.标准击实试验最佳含水率和最大干密度的理论计算[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(2):10-13.
- [6] 罗孝荣,陆学元,张素云.标准击实曲线的理论分析和应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(5):556-559.
- [7] 朱崇辉,王增红,希罗科夫 B.H.. 单点击实法击实试验研究[J].岩土力学,2012,33(1):60-64.
- [8] GBT 50123-1999,土工试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [9] JTG E40-2007,公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [10] SL 237-1999,土工试验规程[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [11] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] ASTM D1557-91, Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2002.
- [13] BS1377-1990, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes-part 4: Compaction-related Tests [S]. London: British Standards Institution, 2002.
- [14] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.非饱和 Q_3 黄土渗气特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1264-1273.
- [15] 邓建中,刘之行.计算方法[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.

(责任编辑:曲继鹏)