

航空发动机整体薄壁结构复杂 表面电解加工技术

李红英,张明岐,张志金,程小元,褚玉程,冯 健,黄明涛,翟士民

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

[摘要] 针对新一代航空发动机制造成本及可靠性要求,电解加工技术在航空发动机整体薄壁结构制造上具有其他制造技术不可比拟的效率与完整性优势。重点论述国内现有薄壁结构复杂表面制造的几种加工技术,航空发动机整体薄壁结构复杂表面电解加工技术的国内外现状,整体薄壁结构复杂表面电解加工技术的最新研究进展以及今后需要解决的问题和应用前景。

关键词: 电解加工;薄壁;复杂表面;航空发动机;高效率

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.041



李红英

高级工程师,长期从事电解加工工艺技术研究,负责多项国家级科研课题,多次赴德国访问和技术交流,获得省部级科技进步奖一等奖1项,二等奖2项,专利10项。

发动机是飞机的“心脏”,是飞机性能、可靠性和经济性的决定性因素^[1]。未来新型战机对发动机性能提出了更高的要求,如更高的燃油效率、更小的噪音和更少的环境污

染等,这就对发动机的设计、先进制造技术和修复技术提出了更严格的要求^[2]。随着航空发动机性能及设计结构的不断改进与提高,越来越多的整体薄壁结构和高温高强度合金材料被采用,如钛合金、高强度钢、高温合金等。为了进一步减轻重量,提高推重比,在推重比12~15发动机设计中,在风扇和压气机中采用了比强度更高的耐高温金属间化合物材料(如TiAl、Ti₃Al、Ti₂AlNb等);结构上,更加注重结构功能的一体化设计,如大型压气机机匣、燃烧室薄壁机匣、流道内外壁等轻量化整体薄壁环形构件。这类整体薄壁构件作为发动机的骨架,连接着发动机的各个部件,是航空发动机的重要承力部件,构件直径则200~300mm,大则1000mm以上,其内外环形表面上分布有大量的岛屿、凸台、安装座、凹槽、环形加强筋、叶片安装槽等,并呈现明显的壁薄特征,最小壁厚处可达0.5mm。在制造的过程中材料去除量很大,去除比可达到60%~80%,

且余量分布不均匀^[3],采用一般的机械加工方法加工后变形非常严重,在工序安排上需要多次热处理,效率极低,难以适应批产甚至是小批试制需求。因此,以薄壁机匣为代表的航空发动机整体薄壁复杂结构件由于其难切削的材料和复杂的几何结构,对现有制造技术提出了更加苛刻的要求,迫使世界各国学者研究利用新的加工技术群以解决这类构件的制造难题,其中特种加工技术占据了重要位置。

电解加工技术是一项基于电化学阳极溶解原理的传统特种加工技术,具有加工效率高、工具电极无损耗等优势。近年来,电解加工的相关技术取得了很大进步,包括高频窄脉冲电源、电解液高精过滤和自动反冲洗技术、参数可控的集成输液系统等,使电解加工工艺可靠性、稳定性和加工精度大幅度提升,该项工艺技术的应用范围得到了很大的拓展^[4],尤其是在薄壁零件的大去除量、低刚性、无加工应力和变形等方面工艺优

势明显,成为这类薄壁构件加工“最为合理”的制造方法,已应用于多种机匣类薄壁构件的批生产加工中。

本文重点论述国内现有薄壁结构复杂表面制造的几种加工技术,航空发动机整体薄壁结构复杂表面电解加工技术的国内外现状,整体薄壁结构复杂表面电解加工技术的最新研究进展以及今后需要解决的问题和应用前景。

整体薄壁结构复杂表面的制造技术

针对整体薄壁结构复杂表面的加工需求,航空发动机制造商尝试采用了多种加工技术,包括机械加工、电火花加工、电解加工等。

机械加工方法:机匣类零件整体尺寸大,壁厚小,壁厚差大,是典型的弱刚性结构。多采用特殊的高温、高比强度、耐磨性能好的材料,如高温合金、钛铝合金等,采用一般的数控机械铣削方法加工难度很大,主要在于复杂的表面切削效率低,大的去除量引起的变形严重,及加工高硬度材料时刀具磨损量大,加工硬化现象十分严重,造成刀具成本高、工艺链经济性差。近年来,为保证零件的加工精度和表面质量,许多学者提出了机械加工过程中有效控制变形的方法,在工艺路线的安排、加工余量以及定位基准的选择等方面采取了一系列工艺措施,如整个环形外型面分层分区域进行加工,规划合理的走刀路径,同时采用对称的加工余量,分次走刀的加工方法,并增加热处理次数去除材料内应力等。这只是解决了零件变形的问题,从工艺性和经济性评估来看,仍然存在一系列问题需要解决,如提高去除速率、减少废品率、降低刀具成本等。更为重要的是,在实际加工过程中,切削厚度不同还会引起颤振现象,从而导致加工精度降低和表面质量变差。还有,加工表面完整性也受切削过程中温度变化影响^[2,5-9]。目前国内

部分企业承担的外贸机匣零件加工,仍采用传统的机械数控加工工艺,其刀具成本占据了其附加值的70%以上。如何降低加工成本,扭亏为盈,是提升国际竞争力的关键^[10]。

电火花放电铣削:借鉴了数控铣削加工方式,采用简单的超长铜管做电火花电极,通过导向器导向,电极在工作中高速旋转,加工时电极与工件间施加高频脉冲电源,加工电流高达上百安培,加工区冲浸起冷却排屑作用的工作液,通过脉冲放电实现零件复杂型面的加工。此方法可以加工特殊及复杂三维型面的零件,加工效率比普通电火花加工高,达2000mm³/min,采用安全无污染的水质工作液,与数控加工中心相比设备的成本较低。但该方法的电热蚀除过程会产生表面再铸层,而且很难人为控制其产生过程。实际生产中一般采用留量后续精加工的方法,加工效率降低。因此,该工艺只适用于三维曲面复杂的单件零件的加工^[8,10]。

电解加工:电解加工时,在工具阴极与工件阳极之间的小间隙中持续进行电化学反应,工件材料以离子形式溶解“剥落”,反应过程中的热量被电解液带走,因而在加工过程中无热影响和加工应力,表面完整性好;加工零件无需进行中间热处理,整体工艺路线简单;加工过程是成形工具阴极的“复制”过程,工具阴极加工端面形状决定工件型面的最终形状,工具阴极无损耗,同种型面形状可采用一种工具阴极加工,加工成本低;加工效率显著高于机械加工和电火花放电铣削,加工时间不足普通电火花加工时间的1/5,适用于大批量生产^[9-10]。在高温合金和钛合金等难加工材料复杂构件的制造和生产中具有无可比拟的技术优势。

整体薄壁结构复杂表面的电解加工技术

1 国内外现状

国外非常重视电解加工工艺在**高强、高硬、难加工材料和轻量化薄壁构件上的应用研究**,在高温合金机匣加工上已普遍采用电解加工工艺,设备条件可靠,特别是在阴极设计制造、电解液供液和处理等方面,形成了一整套切实可行的成熟工艺方法,保证了机匣批量加工时效率、成本控制以及环保的要求。

美国 Teleflex Aerospace 公司采用五坐标数控电解加工技术(ECM)进行整体机匣加工,其生产线专门为GE、罗罗和P&W等公司电解加工航空发动机整体机匣、整体叶盘等复杂结构件;电解加工的机匣已应用于民用波音737、空客A320的CFM56系列(GE公司)、波音767和747的PW4000系列(P&W公司)、CF6-80系列(GE公司)以及军用F/A-18的F404(GE公司)、F-16的F100(P&W公司)等发动机制造中,见图1(a)。据报道,CMF56发动机大型整体机匣全部采用高效电解加工进行前期的预加工,为精加工预留的余量很小。与全部采用五坐标数控铣削加工方法相比,加工时间减少了50%~85%。德国MTU、Köppern、Leitritz等公司为此均建有电解加工车间,用于航空发动机机匣的制造生产,见图1(b)。日本APC Aerospecialty(エーピーシーエアロスペシャルティ株式会社)也拥有专用的整体构件电解加工机床,该公司为西班牙ITP公司提供了专用于航空发动机机匣加工的目前世界上最大的电解机床,可加工机匣的最大直径达2m。APC公司现在不单是提供专用设备,同时也开始承接中小整体结构件的电解加工,如图1(c)所示^[4]。图1(d)为法国Aerospace公司电解加工的机匣。

国内航空发动机主机厂目前也多采用电解加工进行机匣的生产。中航动力股份有限公司(430厂)最早从英国罗罗公司引进了全套的电

解加工工艺,包括加工工装电极、工艺规范及设备,已用于多个型号发动机机匣零件的批生产中。之后国内各大主机厂的机匣电解加工工艺及专用设备系统都由中国航空制造技术研究院(625所)研发,在国内形成了较完整可行的机匣批量电解加工解决方案和标准,已在多个国产发动机型号的机匣和承揽的外贸机匣加工中发挥重要作用。图2为采用中国航空制造技术研究院生产的电解加工设备加工的大型机匣环带部分。

2 最新研究进展

2.1 回转表面复杂凹凸形状高效电解加工技术

以发动机燃烧室机匣壳体为代表的一类具有回转轴的环形薄壁构件,其外环表面上分布有众多复杂非规则岛屿状凸台,每个凸台又是不同的复杂凹凸形状,表面的凸台、凹腔或环形加强筋等高度一般在2mm以内。加工的去除比为80%以上,由于机械加工难以控制变形,因此一直未能找到理想的解决途径。

中国航空制造技术研究院在照相电解加工工艺的基础上,创新性提出了旋转扫描式电解加工方法。具体为,首先对回转曲面上凸台、筋条形状等非加工部位进行精确保护;然后设计简单弧面工具阴极,阴极工作端面与被加工构件(工件阳极)的环形表面相适配,阴极侧面的非工作面进行可靠的绝缘防护,加工时阴阳极间保持一定的加工间隙,间隙内通以循环流动电解液,工件旋转以实现阴极在其外表面的“扫描”加工,从而完成回转曲面上复杂凹凸形状连续加工成型。图3为采用旋转扫描式掩膜电解方法在环形薄壁构件上加工的表面凸台和环形加强筋零件。加工后的最小壁厚1mm,凸台最大高度1.5mm。此工艺电极结构简单,加工效率高,一次安装即可完成环形构件上所有凸台形状的加工,效率较机械加工提高5倍以上;

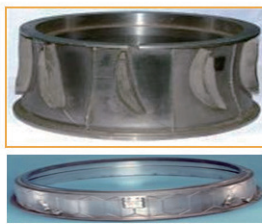
凸台形状及位置精度在掩膜制备中已得到了可靠的保证,无需再进行后续的精加工,且批产中的重复一致性好。该工艺已成为这类薄壁低刚度回转构件上复杂表面高效无变形加工的最适用方法^[11-13]。中国航空制造技术研究院已为主机厂提供了全套的加工工艺和专用设备系统,在新

型涡轴发动机燃烧室薄壁机匣壳体的批生产加工中成功应用。

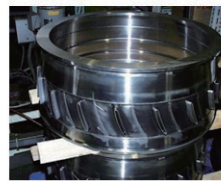
南京航空航天大学提出的旋印电解加工工艺也是一种针对回转体零件复杂型面的高效加工工艺,采用的是阴阳极对辊反拷电解加工方式,使用特定窗口结构的阴极,配合阴阳极之间等角速度逆向高速旋转运动控制,



(a) 美国 Teleflex Aerospace 公司及 GKN Aerospace 公司电解加工的机匣



(b) 德国 MTU 公司及 Köppern 公司电解加工的机匣



(c) 日本 APC 公司电解加工的机匣



(d) 法国 Aerospace 公司电解加工的机匣

图1 国外各大航空宇航公司采用电解加工的机匣

Fig.1 Casing manufactured by ECM of worldwide aeronautical corporation

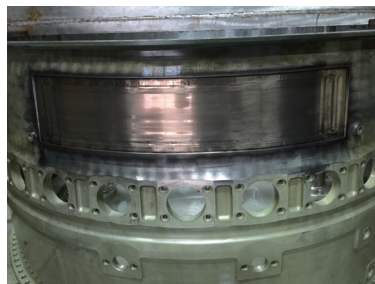


图2 大型机匣环带部分电解去除加工

Fig.2 Girdle part of large casing manufactured by ECM

将工具阴极形貌“反拷复印”到工件阳极表面形成复杂空间结构^[14-15],最大的优点是可加工深度更大的凸台形状。目前针对压气机后机匣和栅格结构机匣也已加工出了几种典型凸台形状,如图4所示。

2.2 薄壁壳体内外表面大面积高精度型腔精密振动电解加工技术

目前成熟应用的机匣电解加工工艺,一般是针对大尺寸机匣(直径在 $\Phi 500\sim 1100\text{mm}$ 左右)上较高的凸台、较深的型腔(高低差 $15\sim 20\text{mm}$),采用成形工具阴极进行去除加工的。机匣表面的凸台形状和分布相对规则,一般加工精度为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$,为后续的机械加工预留 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 的余量,属于高效电解预加工范畴。但一些如涡轴发动机的流道内壁、流道外壁等小型壳体内外表面,分布有较大面积的精密浅型腔,采用电解预加工收益不大,而全部机械加工又因变形问题非常困难。因此,如采用电解加工必须实现型腔的终成形加工才具有真正的应用价值。近年来,由于精密振动电解加工技术的发展,电解加工的精度进入到了微米级水平,使得电解加工由原来的粗加工或半精加工,成为了精密终成形工艺。通过工具阴极工作端面形状的高精度设计、非加工面的致密绝缘防护、大流量电解液参数控制、大容量脉冲电源等几个方面,完全可以实现凸台、型腔等形状的精密无余量加工,无需后续再数控精加工,使得加工精度和表面质量达到构件终成形要求。

精密振动电解加工技术的关键在于机械振动与脉冲电源的精确匹配。加工过程中,进给主轴头始终处于小幅振动状态,每个振动循环中,电极振动至最低位置时,电源开通,以保证工作区在极小间隙下进行高频窄脉冲加工;电极远离工件时,关断信号发生,脉冲电源快速封锁输出,加工休止。采用精密振动电

解加工的优势在于,从工艺步骤到阴极设计、流场设计,与常规的电解加工相比,几乎不需做较大的改变。加工高精度大面积型腔的成形工具阴极电解加工是将壳体构件的内外表面形状分组分块,相同几何形状和尺寸的型腔分为一组,设计几组不同的工具阴极和工装夹具,加工时工具阴极直线进给加工,形成具有一定深度的型腔,然后通过工作转台依次实现工件的分度,完成各组型腔形状的加工^[16-17]。

2.3 非规则表面复杂形状掩膜精密电解加工技术

该新技术针对非规则曲面上复杂形状,如新型涡扇发动机的整体式火焰筒,内外型面为类球面曲面薄壁

结构,其上分布有大面积群孔、群柱。这类非规则曲面上的群结构面临着机械加工变形严重、效率低以及传统的电火花和激光加工表面热影响层、孔口毛刺、加工效率低等问题,现有加工方法用于生产基本不可行。

中国航空制造技术研究院提出的非规则表面复杂形状掩膜精密电解加工技术是在照相电解加工工艺的基础上,采用先进的激光刻蚀技术和数字化光学投影曝光技术,实现非规则曲面保护膜图形的快速精确制备,较传统的平面和回转面保护膜图形制作方法有重大改进;然后采用沿曲面运动的柔性阴极,通过精确控制运动轨迹和加工间隙,适应复杂曲面的精密电解加工要求。采用脉冲

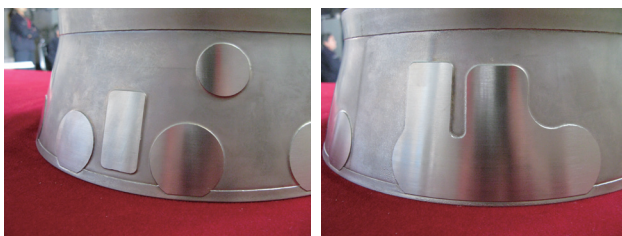


图3 旋转扫描式掩膜高效电解加工出的回转表面复杂凸台形状和环形加强筋
Fig.3 Complex shape boss and ring stiffener on a rotating surface by scanning ECM with local mask



图4 旋印电解加工工艺加工出的典型凸台
Fig.4 Typical boss manufactured by rotary printing ECM

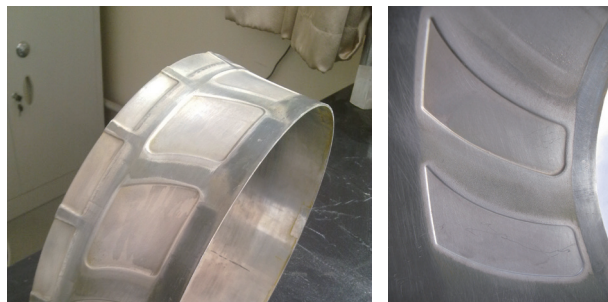


图5 中国航空制造技术研究院精密振动电解加工的壳体内外表面型腔
Fig.5 Inner and outer surface cavity of housing by precise ECM from AVIC Manufacturing Technology Institute

和反脉冲电流替代现有工艺的直流加工,结合微米级分辨率的光刻胶材料,在极小间隙的条件下实现曲面复杂形状的精密加工。

结论

近年来,电解加工技术在传统工艺的基础上实现了很大的改进和创新,尤其是针对一些薄壁复杂结构。随着难加工材料薄壁构件在航空制造领域应用的深入和发展,电解加工技术的应用将会越来越多,技术优势越来越明显。今后应重点研究各项电解加工工艺细节,将工装电极结构形式、流场形式、电解工艺、设备等工艺条件和参数固化,形成标准,确保加工工艺稳定性和设备可靠性。

在具体工艺技术开发方面,下一步需针对大型航空发动机机匣的深型腔开展精终成形加工技术研究,将现有的传统电解加工工艺与精密振动电解加工工艺相结合,形成完善的粗精加工整套工艺链,同时还应特别指出的是,该工艺一般采用大面积的加工电极和大型的加工设备,包括大容量的脉冲加工电源和大流量的电解液系统,以实现高的生产效率,整套设备系统一次性投入大,因此,只有当各类机匣的年产量达到一定规模时,建立机匣电解加工生产线才最为经济合理,在保证生产周期的同时可大幅降低成本。该工艺的工艺准备和实施相对复杂,应用单位应培养更多通晓工艺的专业人员,尽快将新工艺技术灵活应用到型号研制和生产中。

参考文献

- [1] 姜晓莲,王斌.浅析未来航空发动机的发展[J].航天科学技术,2010(2):10-12.
- [2] FRITZ K, ANDREAS K. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 703-726.
- [3] 王聪梅.控制较大尺寸机匣件加工变形的工艺措施[J].航空制造技术,2012,55(22):96-98.
- [4] 程小元.精密电解加工在航空发动机整体结构件制造中的应用[J].航空制造技术,2015,58(23/24):54-60.
- [5] 周续,张定华.材料切除对机匣铣削动力学与稳定性的影响[J].航空学报,2016,37(4):1352-1362.
- [6] 王丽花,俸跃伟.航空发动机机匣类零件数控程序优化策略研究[J].制造技术与机床,2013(11):119-121.
- [7] 徐斌,盛文娟.电解加工机匣型面试验研究[J].电加工与模具,2011(4):37-42.
- [8] 于志涌.航空发动机机匣加工工艺探讨[J].科技创新与应用,2013(17):103.
- [9] 何东敏,孙可婧,常久青,等.薄壁机匣加工变形控制[J].中国新技术新产品,2015(9):77.
- [10] 李海宁.机匣型面电解加工的应用[J].电加工与模具,2013(1):60-61.
- [11] 李红英,张明岐,程小元.薄壁机匣高效整体一次成形电解加工技术研究[J].电加工与模具,2014(1):60-62.
- [12] 潘志福,张明岐,程小元,等.大面积回转复杂凹凸型面高效电解加工工艺探索[J].航空制造技术,2012,55(1/2):108-111.
- [13] 李红英,张明岐,冯健,等.照相电解加工技术的发展与应用[J].航空制造技术,2015,58(23/24):57-60.
- [14] 马良,朱增伟.高温合金旋印电解加工基础研究[J].电加工与模具,2013(2):26-29.
- [15] 朱浩,朱增伟.旋印电解加工的仿真与试验研究[J].电加工与模具,2012(1):29-32.
- [16] 张云.基于电解加工技术的发动机机匣研究[J].中国新技术新产品,2012(8):108.
- [17] 崔海军,张明岐,程小元,等.民机机匣电解加工设备的研制[J].电加工与模具,2016,59(S1):60-65.

LI Hongying, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan. Study on high efficiency ECM of thin-walled casing[J]. Electromachining & Mould, 2013(1): 60-61.

LI Hongying, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan. Study on high efficiency ECM of thin-walled casing[J]. Electromachining & Mould, 2014(1): 60-62.

LI Hongying, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan. Study on high efficiency ECM of thin-walled casing[J]. Electromachining & Mould, 2014(1): 60-62.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

PAN Zhifu, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Research on high efficiency ECM process of large area rotary complex concave convex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 108-111.

(下转第59页)