

电化学光整加工技术及在航空制造领域的应用探讨*

庞桂兵

(大连工业大学机械工程与自动化学院,大连 116034)

[摘要] 介绍了轴承、齿轮、液压阀门、金属管道、自由曲面等几种典型机械零部件表面的电化学光整加工技术。根据航空飞行器性能要求,分析了电化学光整加工技术在航空飞行器特别是航空发动机方面的应用前景,以及需要解决的关键技术问题。

关键词: 航空; 电化学加工; 电化学机械加工; 光整加工; 机械零部件

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.026



庞桂兵

教授, 机械工程学科特种精密加工技术及装备方向带头人, 大连工业大学特种精密机械研究所所长、大连市光整加工工程技术研究中心负责人。研究方向为特种加工、精密光整加工及其相关的智能制造技术。发表研究论文 70 余篇, 获得授权发明专利 10 余项。

航空航天器技术密集、结构复杂, 尤其是航空发动机, 承受高温、高速、高压和重载荷, 工作条件复杂恶劣, 要求其零部件使用寿命长和高可靠性。飞行器的高推重比、大负载运输对发动机零件、传动部件等性能提出了苛刻甚至逼近材料极限使用性能的要求^[1]。这类零部件材料大多采用高温合金、钛合金等难加工材料制造, 精度要求高, 技术条件严格, 对零件表面质量及完整性要求极高, 其加工质量直接影响到发动机的使用寿命和可靠性, 表面光整加工技术能有效改善零件表面质量及完整性, 成为提高航空发动机零件质量的重要手段^[2]。电化学光整加工是光整加工领域一类重要技术, 具有加工效率高、表面质量好以及不受加工材料硬度及刚度制约的特点, 在零部件光整加工领域受到越来越多的重视^[3]。本文介绍了电化学光整加工近年来在部分关键机械零部件加工领域的研究和应用情况, 讨论了在航空航天器制造领域应用的可能性以及需要解决的关键问题。

电化学光整加工技术

1 轴承光整加工技术

广义来讲, 轴承电化学光整加工技术包括轴承滚道光整加工、轴承保持架光整加工和轴承套圈刻字加工技术等。

轴承滚道电化学光整加工的实施方式主要有电化学油石复合加工^[4]和电化学砂带复合加工^[5]。该技术能够在短时间内将磨削甚至精车后的滚道表面加工至镜面^[6]。图 1 是精车表面电化学油石复合光整加工前后效果对比。图 2 是超精表面电化学砂带复合加工前后轮廓对比^[6]。近年来, 研究者在轴承滚道电化学光整加工研究过程中, 通过控制电场分布, 实现滚道材料的可控蚀除, 形成了光整与成型复合加工技术, 实现了滚道光整加工过程中同时形成凸度^[6]。作者在研究轴承滚道电化学机械复合光整加工技术过程中, 着眼于同时改善滚道的圆度、波纹度和粗糙度特性, 提出了滚道电化学机械精准光整加工技术, 实现了光整过程中微观形

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51675072)。

貌、宏观精度以及波纹度的同时有效改善^[7]。

轴承保持架电化学光整加工主要是指边缘去毛刺和工作面的光整加工。电化学光整加工可实现保持架表面光整和去毛刺在同一工艺过程中完成,能有效提高加工效率^[8]。电化学加工后的表面具有高原形和波浪形表面特性,这种表面形貌有利于提高工作面的储油和润滑性能^[9]。

电化学刻字技术不产生机械应力或热应力,刻蚀区域表面完整性良好,有利于提高苛刻工作状态下服役零件的可靠性。轴承刻字一般采用固定阴极法,配合脉冲电流小间隙加工能获得高质量刻字效果^[10]。近年来,电化学微细加工技术获得长足进展,与数控技术相结合可实现微小字体和图案的清晰刻蚀,在微型轴承刻字领域应用前景广阔^[11-12]。

2 齿轮光整加工技术

2.1 展成法圆柱齿轮电化学机械光整加工

光整加工

该工艺是通过展成式阴极和工件齿轮相啮合,实现加工的方法,适用于外齿轮加工。该方法可在短时间内实现齿轮齿面粗糙度的大幅降低,同时能在一定程度上改善齿轮精密度。通过控制机械作用强度分布,还可实现轮齿齿向的修型。图2是作者采用展成式阴极加工圆柱直齿轮获得的加工效果,图3~5是检测结果^[13]。

2.2 移动阴极法圆柱齿轮脉冲电化学光整加工

该工艺通过制作与齿轮齿廓形状相似、但周边加工间隙值均匀缩小的成形阴极,阴极从齿轮一端运动到另一端实现齿面光整,适用于内齿轮加工,也适用于外齿轮加工。该方法可采用单齿成形阴极和多齿成型阴极。单齿成形阴极利用一片阴极可加工整个齿轮齿面,阴极制造成本低,对电源功率要求低。多齿成型阴极采用一个阴极可实现多个轮齿加



(a) 加工前

(b) 加工后

图1 轴承套圈电化学机械光整加工前后表面

Fig.1 Bearing raceway surface before and after electrochemical mechanical finishing

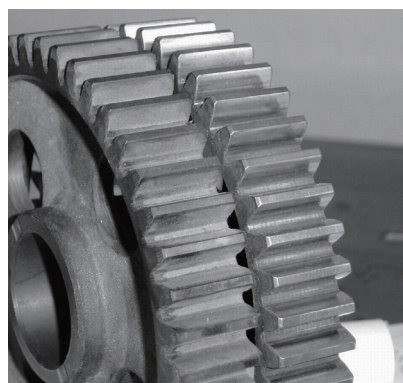
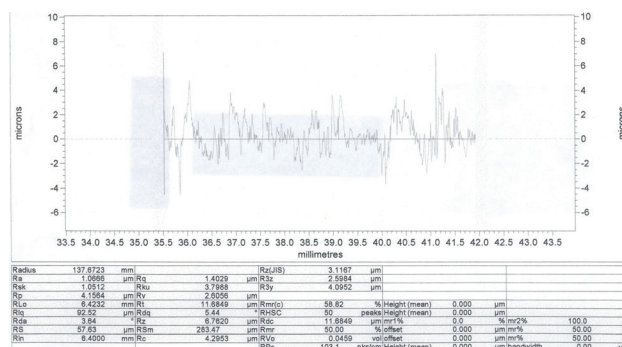


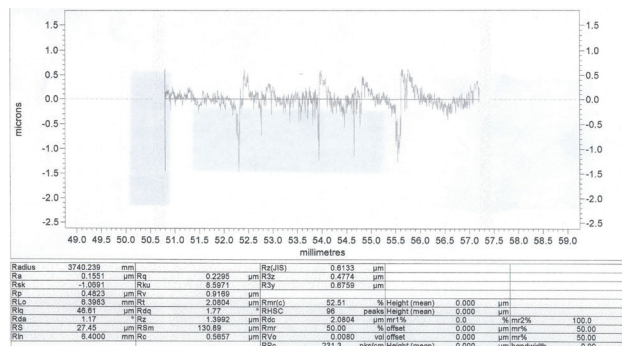
图2 电化学机械加工前后的齿轮

Fig.2 Gears before and after electrochemical mechanical finishing



($R_z 6.76 \mu\text{m}$, $R_a 1.06 \mu\text{m}$)

(a) 加工前



($R_z 1.396 \mu\text{m}$, $R_a 0.15 \mu\text{m}$)

(b) 加工后

图3 加工前后的齿面粗糙度

Fig.3 Tooth roughness before and after electrochemical mechanical finishing

工,加工效率高。在多次扫描条件下,该工艺能实现齿面粗糙度 R_a 值从 $1.0\ \mu\text{m}$ 降至 $0.1\ \mu\text{m}$ 左右^[14]。

2.3 旋转扫描式阴极螺旋伞齿轮

脉冲电化学光整加工

该工艺采用一组阴极分别安装在可作回转运动的刀盘上,当刀盘绕自身回转中心旋转时,利用阴极工作面扫描螺旋锥齿轮齿面,采用脉冲电源实现光整加工。当一个齿面光整加工完毕后,由分齿机构完成分齿并加工下一个齿面。重复上述过程,可使所有齿面得到光整。螺旋伞齿轮脉冲电化学光整加工能获得良好的加工效果,凸凹两侧面型精度提高,粗糙度显著改善^[15]。表1所示为表面粗糙度的改善效果。

3 自由曲面光整加工技术

自由曲面光整加工是光整加工领域的难题之一。电化学加工实现自由曲面光整时,可在成形加工中变换工艺参数,能在一定程度上改善表面粗糙度,但受工艺局限,难以获得镜面加工效果。电化学机械加工技术应用于自由曲面的研究较少。针对型腔模具表面光整加工,作者曾提出手持工具式电化学机械光整加工,将机械零件上的不规则表面分解为若干种规则表面的组合,采用组合工具方法,实现不规则表面加工。该方法能使表面粗糙度 R_a 值从 $0.8\ \mu\text{m}$ 降至 $0.024\ \mu\text{m}$,去除量平均值约为 0.015mm ,在直径 150mm 加工范围内,去除量的不均匀性不超过 0.008mm ^[16]。

图6为对带外圆弧平面、内曲面和窄槽面采用手持式工具电化学机械光整加工时,获得的加工效果。

4 流体管道及液压阀光整加工技术

流体管道及液压阀门工作面电化学机械光整加工的技术难点在于如何在内壁面上实施该工艺,阀门及管径越小,实施难度越高。本文采用复合阴极法,实现了 5mm 以上孔径的细长管内孔的加工,获得的加工效

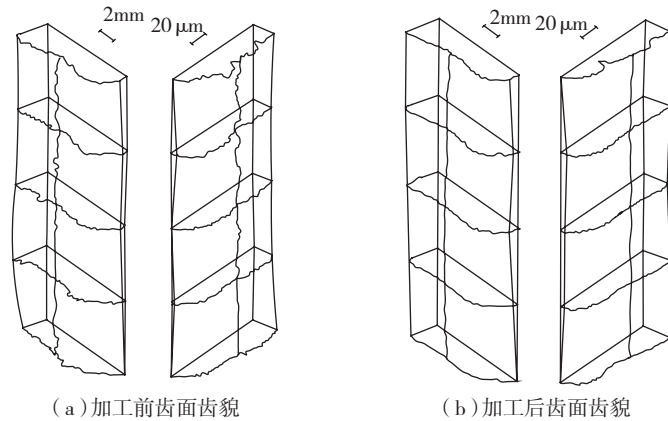


图4 电化学机械加工前后的齿面齿貌

Fig.4 Surface profile of gear tooth before and after electrochemical mechanical finishing

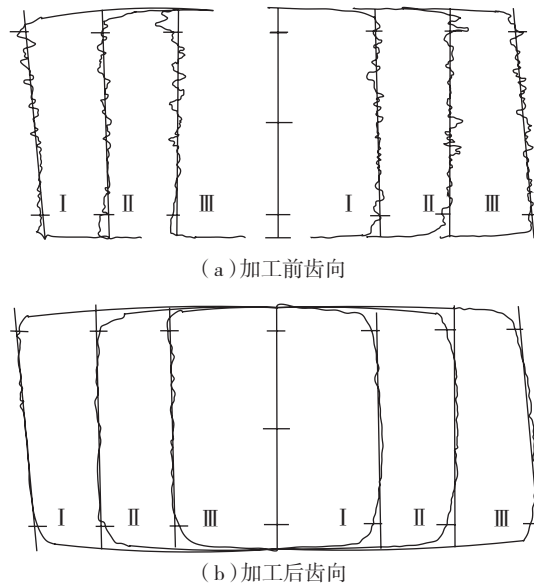


图5 电化学机械加工前后的齿向轮廓

Fig.5 Surface profile of gear tooth trace before and after electrochemical mechanical finishing

表1 脉冲电化学光整前后齿面粗糙度对比

粗糙度		整平前	整平后
凸面	$R_a/(\mu\text{m})$	2.5117	0.1362
	$R_z/(\mu\text{m})$	14.2562	3.0074
凹面	$R_a/(\mu\text{m})$	2.9174	0.1060
	$R_z/(\mu\text{m})$	9.8684	1.0289

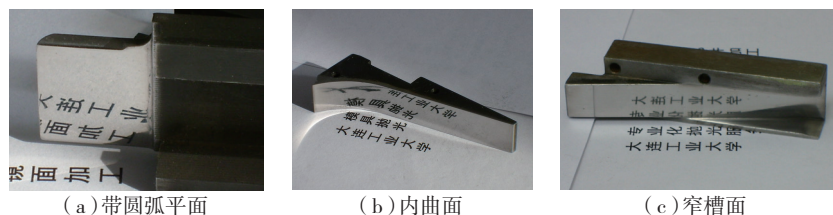


图6 手持式工具自由曲面光整加工效果

Fig.6 Machining effect of free-form surface by electrochemical mechanical finishing with hand-held tool

果如图7、图8所示。经过加工后,表面粗糙度高度参数 R_a 、 R_z 及 R_y 值大幅降低。同时还发现,表面形貌参数宽高比显著提高,如图9所示,这有利于管道抗粘附性能或自清洁性能的增强^[17],对于液压系统具有积极意义。

5 交叉孔去毛刺及倒圆复合光整加工技术

交叉孔部位是机械加工最容易产生毛刺的部位,也是机械去毛刺法难以有效实施的部位。电化学去毛刺则是一种有效方法。在毛刺部位设置电极,对阴极上远离毛刺部位进行绝缘,可实现毛刺部位材料优先溶解。通过控制加工时间和合理设置阴极形状,还可实现毛刺部位的倒圆,实现去毛刺及倒圆的复合加工。图10是对航空发动机某零件交叉孔进行去毛刺加工获得的效果,在毛刺得到有效清除的同时交叉孔部位实现倒圆。

电化学光整加工技术在航空领域的应用探讨

1 发动机叶片或整体叶盘

为了实现航空发动机的高推重比及轻量化,发动机核心零件叶片在结构上广泛采用整体结构和在材料上大量采用高强度合金等难加工材料,这一方面要求叶片表面具有优良的表面完整性,另一方面也给叶片光整加工带来了难题^[18]。研究表明,在材料和热处理性能大体相当情况下,影响叶片使用性能和寿命的关键因素是叶片的精度和表面粗糙度。罗罗公司的研究数据表明:当转子叶片加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 值由 $0.5\mu\text{m}$ 减小到 $0.2\mu\text{m}$,发动机的压缩效率将从89%提升到94%^[19]。我国目前整体叶盘等复杂构件的表面品质较发达国家至少低一个等级,严重影响了压缩效率的提高。因此,如何提高航空发动机叶片的表面质量已经成为我国先

进航空发动机制造领域面临的关键问题。

目前国内航空发动机叶片光整

加工主要采用手工抛光,存在去除量不均、粗糙度不一致、波纹度明显、型面精度和表面完整性不易保证等问



(a) 液压阀体

(b) 液压阀杆

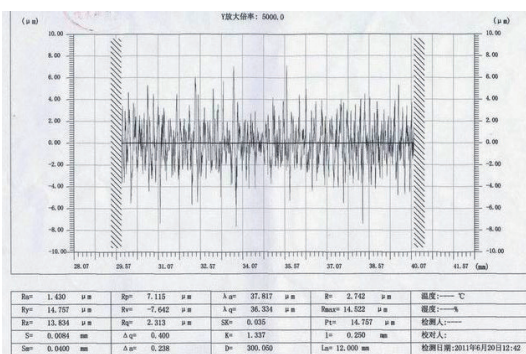
图7 液压阀门的电化学机械加工效果

Fig.7 Machining effect of hydraulic valve by electrochemical mechanical finishing

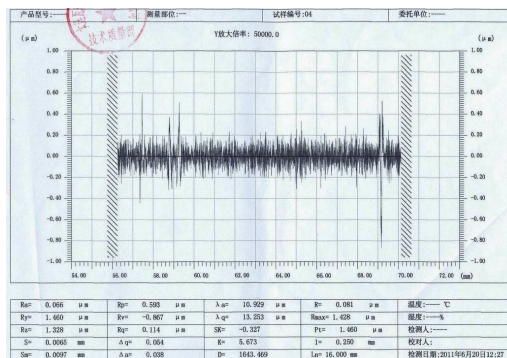


图8 不锈钢管内表面的电化学机械加工效果

Fig.8 Machining effect of inner surface of steel tube by electrochemical mechanical finishing



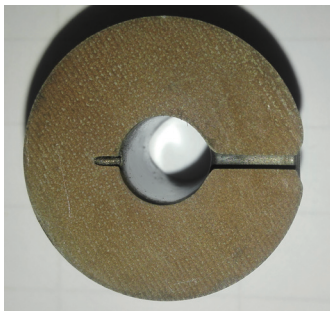
(a) 加工前



(b) 加工后

图9 不锈钢管道电化学机械加工前后的粗糙度轮廓

Fig.9 Roughness of inner surface of steel tube before and after electrochemical mechanical finishing



(a) 剖视图



(b) 局部放大图

图10 航空发动机某零件的去毛刺及倒圆
Fig.10 Deburring and rounding of an aero-engine part

题,导致叶盘可靠性降低,同时由于是人工操作,效率低、加工质量不稳定,严重影响着航空发动机的使用性能、安全可靠性以及生产周期。针对手工抛光存在的问题,研究者研究了自动化光整加工技术,主要有振动光饰加工、砂带磨削抛光和磨料流加工等^[1]。振动光饰适用于要求不高的常规零件的加工,对于航空发动机整体叶盘等可能会造成过切、变形等问题,同时难以达到良好表面粗糙度和叶型精度^[20];砂带磨削抛光具有较好的抛光一致性和加工效率,但是无法改变机械加工固有的尖峰状表面微观形貌形成的潜在疲劳源^[21];磨粒流抛光是通过软性磨料介质在压力的作用下往复流过零件被加工面来实现光整,但磨粒流加工的材料去除缺少选择性,且流动方向存在不一致性,容易使叶型精度丢失^[22]。

电化学加工形成的表面具有良好的表面完整性,目前已成功应用于叶片的成形加工,近年来,相关学者采用脉冲电流等手段进一步提高了

加工精度和改善了表面粗糙度^[23-24],在叶片加工领域显示出良好的应用前景。电化学加工也是目前加工技术当中,唯一采用一种工艺能实现成形加工、精加工和光整加工的工艺技术。

目前技术条件下,采用单纯的电化学加工获得极低的表面粗糙度值尚有困难。电化学机械复合加工应用于叶片镜面加工是一种可行方案,但由于叶片的特殊形状和特殊要求,还需要解决在复杂曲面上如何实施电化学和机械作用的复合、如何规划阴极和磨具运动轨迹、如何保证材料的宏观精确蚀除等关键技术问题。

2 大推力轴承及大功率齿轮等关键传动部件

航空发动机极限性能的不断突破和提升对大推力轴承及大功率齿轮性能提出越来越苛刻的要求。轴承或齿轮等关键传动部件若发生磨损、过热、咬死、润滑剂变质等将会直接导致航空发动机装备和系统的止转恶性失效。

轴承滚道表面质量极大地影响着接触表面的摩擦、磨损、润滑、疲劳强度、抗蚀性等功能特性,并最终影响轴承振动、油膜温升及寿命。研究表明,滚道表面粗糙度对轴承中频段和频段振动具有重要影响,对高速轴承振动的影响较低速轴承更为显著^[25]。由于滚道表面粗糙度增加了对润滑剂的“储存”作用和对润滑剂流动的“阻碍”作用,使润滑剂阻塞导致压力增大,油膜层剪切力也增大,油膜温升随粗糙度幅值增加而增大^[26]。

齿轮齿面质量也极大地影响着齿轮性能和寿命。对磨齿与超精加工齿轮的摩擦损失对比试验表明,超精加工齿轮的摩擦损失较磨齿齿轮显著减小。在5000r/min速度与载荷条件下,超精加工齿轮的摩擦载荷比磨齿齿轮减小约30%,齿面温度

降低10℃左右。这对于地面机械的意义可能不太明显,但对于航空发动机等应用的齿轮-叶片驱动系统上的大功率齿轮,可以有效减小齿轮尺寸,减小航空动力冷却系统负荷,意义重大。直升机驱动齿轮经磨齿、再珩齿至 $R_a 0.2 \mu\text{m}$,疲劳寿命能提高1000%,同时承载能力增加30%。齿轮的齿形和齿距误差从3~6 μm 降低到1 μm ,则其单位重量所能传递的扭矩可提高近1倍^[27-29]。这表明,通过光整加工提高传动部件表面质量是提高发动机性能的重要途径,若能同时改善精密度,则意义更为显著。

目前,高档齿轮的终加工工艺一般采用磨齿或珩齿,表面粗糙度 R_a 能达到0.8~0.2 μm ,研齿能获得更低的表面粗糙度,但效率低、成本高昂。轴承终加工工艺一般采用超精加工,欲获得低表面粗糙度,必须采用极细粒度的油石,导致效率低和成本增加。作者和某轴承生产企业合作进行的批量精密轴承抛光实验中还发现,超精后的轴承滚道经过精细抛光后,部分滚道表面发现微小划伤,可能是磨削过程中的磨粒刻划导致,却被超精纹理掩盖了,如果不加工至镜面,这些微观缺陷很难被发现。这些微小缺陷在地面机械中使用时出问题的几率可能不大,但在航空器这种要求接近极限性能条件还具有极高可靠性的场合使用,存在严重隐患。

电化学机械复合光整加工应用于轴承滚道和齿轮齿面能够获得接近镜面的经济表面粗糙度,并能在一定程度上改善精密度,这对于大推力轴承及大功率齿轮等航空传动部件可能是一种很有竞争力的工艺。

3 航空器液压回路相关零件

大多数飞机上的液压管道连接着飞行员的踏板和手柄,到飞机的所有控制面、副翼、升力面等。飞机液压系统要求绝对可靠,飞机液压系统失灵常常导致严重后果。由于空间

限制,机载设备要求高度集成化和轻量化,各种控制系统中的壳体、阀体、液压偶件、液压平板阀等关键零件以及一些光管零件,都具有尺寸小、结构复杂、精度和表面质量要求高的特点^[19,30]。

目前,我国航空液压件生产技术水平还难以满足航空工业发展的需要。进口的高档液压活塞杆和油缸表面要求 R_a 值 $0.02\ \mu\text{m}$,国内多采用磨削或珩磨, R_a 值一般能达到 $0.2\ \mu\text{m}$ 。发生泄露时,人们往往从密封件质量上找原因,而忽略了活塞杆表面机械加工微刃口对密封件的刮削才是导致泄露的真正原因^[8]。

电化学光整加工在解决液压系统部件——液压油缸及活塞表面、液压阀体及阀杆表面、液压管路表面的光整加工方面具有优势。在工作面获得镜面级粗糙度的同时,台阶部位在电力线尖峰集中等效作用下,能自然产生毛刺去除效果,有利于提高密封性能。液压管路在表面粗糙度改善的同时,表面形貌特征参数的宽高比会提高,有利于液压系统工作面形成抗粘自洁效果,从而提高液压系统的工作可靠性。因而电化学光整加工在航空液压件领域也具有良好的应用潜力。

结论

(1) 电化学光整加工在齿轮、轴承、液压阀门及管道等零部件上取得了良好效果,技术相对成熟,在航空轴承、齿轮、液压系统方面具有良好的应用前景,所要解决的关键问题是针对航空零部件结构特点形成专用技术及装备体系。

(2) 发动机叶片属于典型的复杂曲面,电化学加工是现有技术中唯一可以采用同一工艺实现叶片从粗加工、精加工到光整加工的工艺。电化学机械复合加工是获得叶片镜面级粗糙度极具潜力的工艺,关键问题是在复杂曲面上如何实施电化学和

机械作用的复合、规划阴极和磨具运动轨迹、保证材料宏观的精确蚀除等。

参考文献

- [1] 黄云,肖贵坚,邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045–2064.
- [2] 杨世春. 表面质量与光整技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 周锦进,方建成,徐文骥. 光整加工技术的研究与发展[J]. 制造技术与机床, 2004(3): 7–11.
- [4] 周锦进,王小明,庞桂兵. 非传统光整加工技术研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(1): 51–56.
- [5] 陶彬. 轴承滚道电化学机械凸度成型与光整加工技术基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [6] XU W J, BIN T, PANG G B, et al. Crown modification of cylinder-roller bearing raceway using electrochemical abrasive belt grinding[J]. Key Engineering Materials, 2008(359–360): 335–339.
- [7] 庞桂兵,徐文骥,周锦进. 电化学机械精准光整加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(19): 2589–2593.
- [8] PANG Guibing, XU Wenji, ZHOU Jinjin. Study on electrochemical mechanical precision finishing technology[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(19): 2589–2593.
- [9] 王小明. 脉冲电化学及其复合光整加工机理和表面特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [10] WANG Xiaoming. The mechanism and surface characteristic of pulse electrochemical and its compounded finish machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [11] 翟小兵,周锦进,庞桂兵,等. 脉冲电化学加工表面形貌与摩擦磨损[J]. 起重运输机械, 2003(12): 29–31.
- [12] ZHAI Xiaobing, ZHOU Jinjin, PANG Guibing, et al. Surface morphology and friction and wear of pulsed electrochemical machining[J]. Lifting the Transport Machinery, 2003(12): 29–31.
- [13] 翟小兵,王辉,庞桂兵,等. 脉冲电化学光亮刻字新技术[J]. 轴承, 2007(7): 18–26.
- [14] ZHAI Xiaobing, WANG Hui, PANG Guibing, et al. A new sheeny lettering technology by pulse electrochemical etching[J]. Bearings, 2007(7): 18–26.
- [15] 朱荻,王明环,明平美,等. 微细电化学加工技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2): 151–155.
- [16] ZHU Di, WANG Minghuan, MING Pingmei, et al. Micro electrochemical fabrication[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2): 151–155.
- [17] 张朝阳,朱荻,王明环,等. 超短脉冲电流微细电解加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(14): 1295–1298.
- [18] ZHANG Zhaoyang, ZHU Di, WANG Minghuan, et al. Investigation on electrochemical micro-machining using ultra-short voltage pulses[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(14): 1295–1298.
- [19] 庞桂兵,阿达依·谢尔亚孜旦,徐文骥,等. 展成式电化学机械光整加工圆柱齿轮的齿面质量与精度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 163–167.
- [20] PANG Guibing, ADAY Xieyazidan, XU Wenji, et al. Surface quality and accuracy characteristics of cylindrical gears by generative electrochemical-mechanical finishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 163–167.
- [21] 周锦进,庞桂兵,徐文骥. 脉冲电化学齿轮齿面光整加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(24): 2187–2190.
- [22] ZHOU Jinjin, PANG Guibing, XU Wenji. Experimental study on pulse electrochemical finishing of gear teeth surface[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(24): 2187–2190.
- [23] 阿达依·谢尔亚孜旦,周进锦,庞桂

兵,等.螺旋锥齿轮脉冲电化学光整加工流场设计[J].中国机械工程,2009,20(12):1426-1429.

ADAY Xieyazidan, ZHOU Jinjin, PANG Guibing, et al. Design of flow field for finishing spiral bevel gear in pulse electrochemical finishing[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1426-1429.

[16] 庞桂兵,翟小兵,徐文骥,等.模具型腔表面电化学机械光整加工技术[J].模具工业,2009,35(3):55-59.

PANG Guibing, ZHAI Xiaobing, XU Wenji, et al. Electrochemical mechanical finishing technique for mould cavity surface[J]. Mold Industry, 2009, 35(3): 55-59.

[17] 庞桂兵,李殿明,齐学智,等.电化学蚀除法调控1Cr18Ni9Ti表面润湿性的研究[J].机械工程学报,2012,48(21):105-109.

PANG Guibing, LI Dianming, QI Xuezhi, et al. Study on regulation and control of surface wettability of 1Cr18Ni9Ti eroded by electrochemical method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(21): 105-109.

[18] 朱永伟,徐家文,薛林强.大扭曲叶片整体涡轮电解除加工工艺设计与试验[J].电加工与模具,2005(1):16-20.

ZHU Yongwei, XU Jiawen, XUE Linqiang. The process designing and tests about electrochemical machining integral impeller with big-twisted blades[J]. Electrical Processing and Mold, 2005(1): 16-20.

[19] 章云,梅雪松.面向航空制造的数控加工机床主轴单元及其发展趋势[J].航空制造技术,2010,53(5):26-29.

ZHANG Yun, MEI Xuesong. Spindle unit of nc machine tool in aviation manufacturing and its

development trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(5): 26-29.

[20] 何坚,朱红钢,刘秀梅.整体叶盘振动光饰加工技术[C]//2010年“航空航天先进制造技术”学术交流论文集.北京,2010.

HE Jian, ZHU Honggang, LIU Xiumei. Integral leaf disk vibration finishing technology[C]//2010 "Advanced Aerospace Manufacturing Technology" Academic Exchange Proceedings. Beijing, 2010.

[21] 黄云,许庆顺,黄智.手持叶片砂带磨床的研制[J].机械设计与制造,2007(12):112-114.

HUANG Yun, XU Qingshun, HUANG Zhi. Development of a abrasive belt grinding machine using manual to grind blades to grind[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(12): 112-114.

[22] 高航,李世宠,付有志.金属增材制造格栅零件磨粒流抛光[J].航空学报,2017,38(10):1-9.

GAO Hang, LI Shichong, FU Youzhi. Metal additive manufacturing grille parts abrasive flow polishing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 1-9.

[23] 徐正扬,朱荻,朱栋.发动机叶片电解除加工变间隙阴极修正法[J].机械工程学报,2009,45(9):187-192.

XU Zhengyang, ZHU Di, ZHU Dong. Variable gap amendment of cathode for the electrochemical machining of turbine blade[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 187-192.

[24] 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,2016,27(22):3087-3092.

CHEN Yanlong, FANG Ming, PEI Di,

et al. Multi-physics coupling simulation of ECM processes for compressor blade[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3087-3092.

[25] 汪久根,王庆九,章维明.表面粗糙度对轴承振动的影响[J].轴承,2007(1):23-30.

WANG Jiugen, WANG Qingjiu, ZHANG Weiming. Effects of surface roughness on vibration of rolling bearings[J]. Bearing, 2007(1): 23-30.

[26] 郑学普,邓四二,周彦伟,等.滚道表面粗糙度对高速圆柱滚子轴承弹流的影响[J].轴承,2005(7):4-7.

ZHENG Xuepu, DENG Sier, ZHOU Yanwei, et al. Effect of roller surface roughness on high speed cylindrical roller bearing elastohydrodynamics[J]. Bearing, 2005(7): 4-7.

[27] BNTTON R D, ELCOATE C D, ALANOU M P, et al. Effect of surface finish on gear tooth friction[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1): 354-360.

[28] TONSFOFF H K, MARZENELL C. Effects of gear honing on flank characteristics and pitting life[J]. Production Engineering, 2000, 7(1): 5-8.

[29] DUGAS J P. Gear finishing by shaving, rolling & honing-part I[J]. Gear Technology, 1992, 9(2): 14-21.

[30] 陈闵叶,么娆.飞机系统[M].北京:国防工业出版社,2014.

CHEN Minye, YAO Rao. Aircraft system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

通讯作者:庞桂兵, Email: pangguibingsx@163.com。

Electrochemical Finishing Technology and Its Application in Aviation Manufacturing

PANG Guibing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

[ABSTRACT] This paper introduces the electrochemical finishing of several components such as bearings, gears, hydraulic valves, metal pipes, free-form surfaces and so on. According to the requirements of aircraft performance, the application prospects of the electrochemical finishing technology in aircraft, especially in aeroengine, are discussed and the key technical problems to be solved are analyzed.

Keywords: Aircraft; Electrochemical machining; Electrochemical mechanical machining; Finishing; Mechanical parts

(责编 海山)