

照相电解加工技术的发展与应用

Development and Application of Mask Electrochemical Machining Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 李红英 张明岐 冯 健 程小元 张志金



李红英

高级工程师,主要从事照相电解、精密电解加工技术相关研究和型号研制工作。先后承担了多项基金、民机科研、总装预研、智力引进等项目,获得集团公司科技进步一等奖和二等奖各1项,申请专利5项,发表学术论文近10篇。

在简要论述照相电解加工技术原理和技术特点的基础上,介绍了照相电解加工技术在薄板群孔、群柱类结构、薄壁回转曲面复杂表面形状上的具体应用,探讨了照相电解加工技术的研究现状和发展。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.057

一般工艺过程如图1所示。

照相电解加工的具体流程如下。

(1)掩膜底片制作:首先根据图纸设计要求,绘制出要加工的图形。现已采用激光光绘仪直接制作底片,完全替代了传统的手绘图形照相制版方法。

(2)清洗:工件表面进行除油、去污、干燥处理,以利于感光膜均匀

涂覆。

(3)贴膜:在清洁干燥的零件表面上,用贴膜机熨贴感光干膜,或采用丝网印刷涂覆湿膜。

(4)曝光显影:将掩膜底片放在贴有感光膜的零件上,在曝光机内进行曝光,使膜感光的部位固化,形成牢固绝缘的保护膜。将曝光后的零件放在显影液中,膜未感光的部位在

照相电解加工工艺是由激光光绘、丝网印刷、曝光、显影、电解加工等多项技术融合形成的一种特种加工方法。加工时对工件表面不加工部位进行覆膜保护,加工部位的金属裸露,通过电解加工方法去除,以实现选择性腐蚀成形。照相电解加工

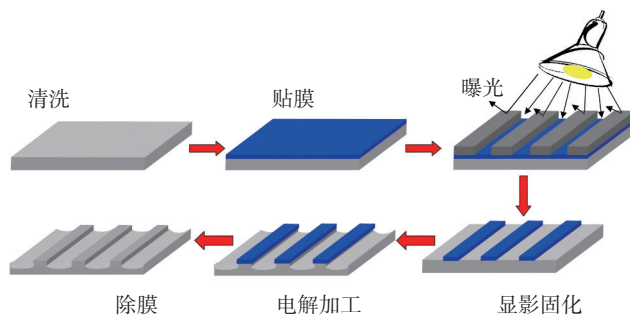


图1 照相电解加工工艺过程

显影溶液中溶解,露出被加工部分金属。

(5) 电解加工: 工件装夹在照相电解机床上,如图 2 所示,接通电解液后,加工阴极接加工电源负极,工件接正极,电极与工件表面保持一定的间隙进行往复扫描加工,直到孔透或达到尺寸为止。

(6) 除膜: 电解加工完毕后,从零件表面上除去保护膜。

照相电解加工技术具有传统电解加工的工艺特点,是一种非接触式的冷加工工艺,不存在机械切削力及加工应力,适用于材料去除比较大的薄壁低刚度构件的加工制造。工具阴极采用在工件表面扫描运动进给,形状简单,且在加工过程中不会产生损耗。与化学铣切方法相比,照相电解加工对加工材料的适用性更强,加工对象不受材料强度、硬度等条件限制,可用于高温合金、不锈钢、钛合金等几乎所有导电材料的加工;生产准备周期短,设备投资少,效率高,适合单件和批量的各种生产规模;可加工任意形状的孔、槽及各种复杂图形,尤其在大面积密集群孔、群柱、群凸台等群组结构的整体一次成形加工方面具有独特的技术优势,甚至对一些特殊结构(如复杂表面上的非规则凸台、凹腔结构),照相电解被航空发动机主机厂和设计所认为是唯一可行的加工技术。

照相电解加工技术发展

1 国内外研究现状

近年来,国外相继展开了照相电

解加工相关技术研究,取得了很大进展。欧美称之为 M-ECM (Mask Electrochemical Machining),即膜防护电解加工。在照相电解加工及化学铣切保护膜的制备上,国外除采用光绘掩膜曝光技术外,还利用激光刻蚀技术,通过对保护涂层选择去除而完成防护膜的成形。基于快捷、高柔性的保护膜制备技术及电解加工的可控性,国外对平面或曲面上的孔、槽、腔、凸台开始由化学铣切转向照相电解加工。美国学者 McCrabb 等阐述了将脉冲和反极性脉冲引入照相电解加工中对提高加工精度、表面质量的重要作用,并明确采用照相电解加工方法来解决阻尼、冷却作用的一些层板结构制造^[1]。韩国学者 Ryu 等介绍了采用微细照相电解加工微细群孔(直径 $150\mu\text{m}$)的研究成果^[2]。可以看出,国外虽然报道的相关应用不多,但由于其制膜、电解加工等相关技术发达,照相电解加工技术已经超越了国内的研究水平。

国内北京航空制造工程研究所、南京航空航天大学等单位均进行了照相电解加工技术研究。重点面向航空航天工业,先期开展的平面薄板群孔加工技术的研究解决了如冷气导管、阻尼套、燃油滤网、滑油滤网、薄壁护罩等零件加工难题,已在生产中大量应用。“十二五”期间,北京航空制造工程研究所在薄壁回转曲面复杂形状的照相电解加工上取得了较大进展,突破了回转面保护膜制备、电解加工大面积流场均匀性控制、加工深度实时在线监测控制等技

术关键^[3],达到了工程应用水平,已用于先进涡轴发动机研制中。南京航空航天大学等国内高校开展了微细照相电解加工的基础性研究,在阵列微细孔结构加工试验研究方面取得了一定的成果^[4-6]。

2 照相电解加工技术发展方向

照相电解加工方法是多种技术的组合,相关技术的进步直接支持照相电解工艺发展。照相电解加工技术一方面将继续针对航空航天更复杂、更大面积的难加工材料薄壁零件加工开展研究,另一方面将向着精细化、数字化方面发展。

(1) 利用激光刻蚀技术,实现曲面保护膜的快速制备。采用复杂图形 CAD 数据直接驱动激光刻蚀设备,利用高能脉冲激光束在全面积涂膜的零件表面直接刻蚀保护膜图案,省掉了光绘制版、曝光、显影等工序,使加工效率大幅提升。由于激光分辨率高,且没有掩膜曝光时的透光误差,故可制作更精细的图案,有利于保证零件的加工精度。采用激光直接刻蚀方法,感光胶不再是保护膜材料的唯一选择,从而使材料选择范围更大、成本更低。

(2) 采用数字化光学投影曝光技术,实现复杂表面的保护膜数字化制备。在传统的制膜技术中,制版与曝光工序分离是保护膜制备误差的主要原因。该技术是利用电荷耦合元件,将数字化图形在 CCD 图像控制器上实现电荷信号与光信号的转换,形成精密图形光源,在复杂的曲面上进行直接曝光,为照相电解加工制备出复杂图案保护膜。为了突破单次投射面积受图形发生器面积和投影物镜倍率的控制,将通过自动图形步进拼接的方法,使曝光图像延展至小于基片的任何尺寸。在进行步进拼接时,通过运动误差补偿校正、新型图形算法等方法对拼接边沿进行适当处理,以做到无明显拼接痕迹。数字化光学投影曝光技术不仅

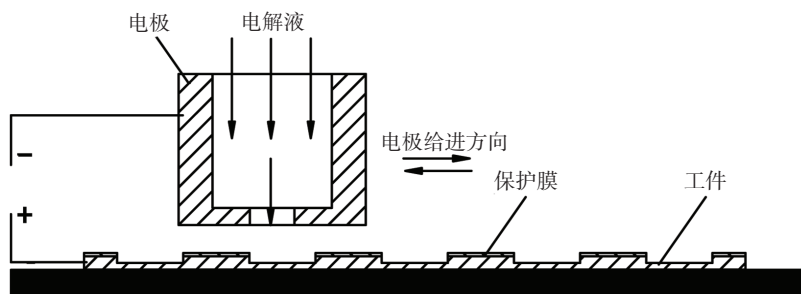


图2 照相电解加工示意图

适用平板和规则的回转曲面,且还可应用在诸如圆锥面、腰鼓形型面、马鞍形型面甚至非规则复杂样条曲面结构的内外型面复杂图形的照相电解加工中。

(3)采用沿曲面运动的柔性阴极,以控制间隙为目的,适应复杂曲面照相电解加工要求。依据各区域的加工时间分配,实现电极运动路径及速度的设计。

(4)采用脉冲和反脉冲电流替代现有的直流加工,结合微米级分辨率的光刻胶材料,在极小间隙条件下实现微细结构加工。

照相电解加工技术的典型应用

1 薄壁群孔结构加工

据统计,一台现代先进航空发动机的各种小孔数量总计可达数十万,其中大部分为薄壁群孔结构,多用于具有空气传导冷却、消音降噪、过滤等功能构件中。这些零件的材料一般为高温合金、钛合金或不锈钢,板厚一般为0.15~1.5mm,从毛坯加工成零件的材料去除量大,开孔率最高可达90%。如前轴阻尼筒分布有8排椭圆孔,后轴阻尼套薄壁上分布有数百个直径2mm小孔,压气机空气导管内的钛合金阻尼衬套上有近9万个直径为1mm的小孔,展开板面为400mm×600mm;燃油滤网每平方米有400多个直径0.4mm的小孔,还有多孔层板火焰筒、冷气导管、飞机消音器、护罩等。薄壁群孔结构已成为航空制造领域的一个重要分支,采用常规机械加工存在机械切削力,以及薄板变形严重、孔口有毛刺、生产效率低等问题;采用激光加工、电火花加工存在烧蚀层、毛刺、变形等问题难以解决,严重影响后续薄壁成形及焊接工序^[7-8]。

照相电解加工技术是满足这类大面积群组结构加工要求的“灵丹妙药”,是高温合金、钛合金等难切削

材料薄板群孔的最佳加工方法。该方法实现了所有图形的整体一次成形,加工效率极高,适合单件或批量生产,可加工圆形、菱形、椭圆形、六方形等任意形状的密集小孔和窄槽,适用范围广,且加工后板面无变形,孔口无毛刺,表面质量好,在航空发动机制造和不锈钢过滤板加工中具有广泛应用前景^[9]。研制出的结构件目前已在航空发动机、飞机的多个型号中成功应用,部分实现批产。图3为部分薄壁群孔件。

2 薄壁回转曲面复杂表面形状的加工

为减轻结构重量、提升性能,在现代新型飞行器上采用较多整体薄壁结构,如燃烧室薄壁机匣、火焰筒、流道环形件等。这类结构采用高温合金等难切削材料,表面上具有各种形状各异的安装凸台、环形横向加强筋等,凸台、型腔上下位置交错,且分布密集、不规则,加工后零件最小壁厚为1mm左右,除各种复杂形状的凸台、筋条保留外,其余部分均需去除材料形成连续曲面,加工去除比达到80%以上,使得采用一些常规加工方法变得非常困难(图4)。

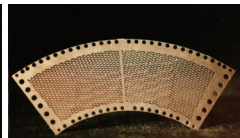
以燃烧室薄壁机匣为例,如采用机械加工:一是由于材料切削性能很差,加工效率极低;二是刀具损耗严重,加工成本高;三是加工应力的累加导致零件变形严重,且变形难于控制。因此,在加工过程中需要精确控制吃刀量,且必须进行多次热处理来消除应力,加工工序多,难以适应批产甚至是小批试制需求。而采用传统的电解成形加工:一是由于机



(a) 滤网类



(b) 护罩类



(c) 层板类

图3 典型的薄壁群孔结构件

匣凸台的形状各异,成形加工电极尺寸分类过多,电极及夹具装卸频繁,工序难以简化;二是凸台位置交错,难以实现合理分组;三是加工有接刀,形不成连续曲面。

北京航空制造工程研究所针对高温合金薄壁机匣结构提出了旋转扫描式照相电解加工方法,即对回转曲面上凸台、加强筋条等非加工部位进行局部精确保护,采用简单弧面阴极进行旋转扫描加工,阴极工作面与被加工的薄壁筒体构件表面相配合,工作面的长度与被加工的薄壁筒体构件轴向长度相等,阴极的侧面非工作面进行可靠的绝缘防护,实现了回转体曲面上复杂表面形状的整体一次成形。图5为照相电解加工的表面凸台形状,加工后最小壁厚处1mm,凸台最大高度达1.5mm,加工效率较机械加工提高5倍以上。

旋转扫描式照相电解加工电极结构简单,加工效率高,一次安装即可完成环形结构件上所有形状凸台的加工;加工出的凸台形状及相互位置精度能得到可靠保证,重复性好,为薄壁低刚度回转构件提供了一

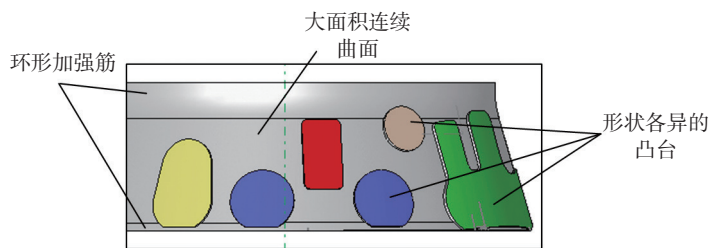


图4 典型薄壁回转复杂表面结构示意图



图5 照相电解成形的复杂表面形状

种切实可行的解决方法^[10]。该技术方法已获得授权国防发明专利,并荣获中航工业集团科技进步三等奖,成功应用于新型涡轴发动机燃烧室薄壁机匣壳体的批生产加工中,通过了装机考核。

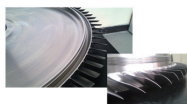
(上接第 56 页)
求,如图 9 所示。

航空新材料电解加工

钛铝系金属间化合物是国内外重点开展研制的下一代航空材料,以期取代现在采用的钛合金及高温合金材料。而钛铝系金属间化合物的塑性变形和切削加工性能很差,成形和加工非常困难,但这不会对精密电解加工构成决定性的障碍。图 10 为



(a) 德国 MTU 公司^[4]



(b) 北京航空制造工程研究所

图9 精密电解加工的高温合金叶盘

结束语

照相电解加工技术由北京航空制造工程研究所在 20 世纪 80 年代发明,并获得国家发明三等奖。历经 30 余年,在航空发动机薄壁群孔及表面复杂形状结构加工中有着巨大的技术优势,占据了显著的地位。

照相电解加工技术作为特种加工工艺技术的重要分支,涉及光、电、化学、电化学等多学科,将照相电解加工技术的独特优点与其他新技术的优势结合起来,不断推进照相电解加工的工艺水平,是该项技术的重要发展方向。

参考文献

[1] MCCRABB H, LOZANO-MORALES A, SNYDER S, et al. Through mask electrochemical machining. ECS Transactions, 2009, 19(26):19-33.
[2] RYU H Y, AHN J B. Stencil fabrication by through mask electrochemical

micromachining of stainless steel// International Symposium on Electrochemical Machining Technology, 2014: 97-102.

[3] 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. 电加工与模具, 2014(1):60-62.

[4] 孙毅, 曲宁松, 李寒松. 微小群孔阵列的照相电解加工技术研究. 机械制造与研究, 2009, 38(2):39-41, 46.

[5] 李嘉桁, 马保吉, 范植坚. 光刻胶掩膜微细电化学加工参数的试验研究. 电加工与模具, 2005(6):17-19.

[6] 唐仪, 黄志刚, 郭钟宁. 微细掩膜电解加工的孤岛有限仿真研究. 电加工与模具, 2014(4):20-23.

[7] 王同生, 冯建. 空气导管阻尼套群孔照相电解加工技术研究. 航空制造技术, 2003(6):59-61.

[8] 王同生. 冷气管照相电解加工. 航空制造技术, 2008(4):83-85.

[9] 刘家富, 王同生. 薄板群孔的照相电解加工. 航空科学技术, 1994(2):26-29.

[10] 潘志福, 张明岐, 程小元. 大面积回转复杂凹凸型面高效电解加工工艺探索. 航空制造技术, 2012(1/2):108-111.

(责编 古京)

德国精密电解加工的钛铝金属间化合物叶片,由此可见,由于没有其他成形和加工手段,只能从挤压出锥型的原始材料逐步电解加工出最终的叶片叶型。因此,一旦此类材料研制成熟并开始大量应用于航空发动机叶片、机匣及整体叶盘等整体结构件时,精密电解加工必将在其中发挥重要作用。

结束语

经过多年发展,精密电解加工技术已趋于成熟和完善,要使其在国内

航空发动机整体结构件制造中得到更多的实际应用:一是取决于各类航空发动机的产量规模;二是应用单位能深入认识精密电解加工的特点和优势,培养更多通晓工艺的专业人员,缩短将工艺应用到具体结构件加工的工艺准备和定型加工生产周期,使精密电解加工技术成为航空发动机制造不可或缺的一部分。

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. 航空制造技术, 2003(6):31-34.

[2] 程小元. 精密电解加工—航空发动机整体叶盘叶型低成本、高形状精度加工的理想工艺方法. 中国航空报, 2014-9-25[2015-9-01].

[3] KELLER R. (P)ECM technology more than just deburring. INSECT 2014:167-180.

[4] MARTIN B, JÜRGEN K, ERWIN B. An integrated cost-effective approach to blisk manufacturing. ISABE 2005.

(责编 古京)



图10 钛铝金属间化合物叶片精密电解加工(德国)