

# 冷气导管照相电解加工

## Photographic ECM for Cooling Air Tube

北京航空制造工程研究所 王同生

**[摘要]** 介绍了冷气导管的加工难度,对冷气导管的多种加工方法进行了比较,得出电解加工技术在高温合金薄壁群孔结构加工中的优越性。

**关键词:** 化学腐蚀 电化学腐蚀 照相电解加工

**[ABSTRACT]** The machining difficulty of cooling air tube is described. Some machining methods are compared. Predominance of photographic ECM for thin wall group hole construction of high-temperature alloy is introduced.

**Keywords:** Chemical corrosion Electrochemical corrosion Photographic ECM

### 1 几种冷气导管加工方法比较

随着航空发动机性能的不断改进,航空发动机上薄壁群孔类零件的种类和数量急剧增加。据粗略统计,某先进航空发动机上各种类型的小孔有数十万之多,而且这些孔类零件多在高温、重载下工作,零件材料大部分是机械加工性能很差的高温合金、钛合金或不锈钢,因此,各种小孔的加工已经成为当今航空发动机制造中的关键技术之一。

图1是某发动机的冷气导管的展开照片。冷气导管有3种直径的小孔和复杂的零件外形。3种孔的直径分别为0.55mm、0.65mm和1.1mm。板材采用牌号为GH3030的高温合金,板厚0.3mm。冷气导管的加工要求很高,加工后小孔和外形边缘不允许产生毛刺,加工面无微裂纹和重熔层,板面不允许变形,表面不允许有划伤和点蚀,因此加工难度很大。

冷气导管加工可采用多种工艺,通常有激光加工、数控高速冲孔加工、电火花加工等,此外,化学腐蚀加工和电化学腐蚀加工也是人们尝试过的加工方法。

#### (1) 激光加工。

激光加工可用于加工各种难加工材料的薄板群孔,加工效率高。加工过程不需专用工装,只需按孔的分布进行数控编程,生产准备周期短,适用于单件及

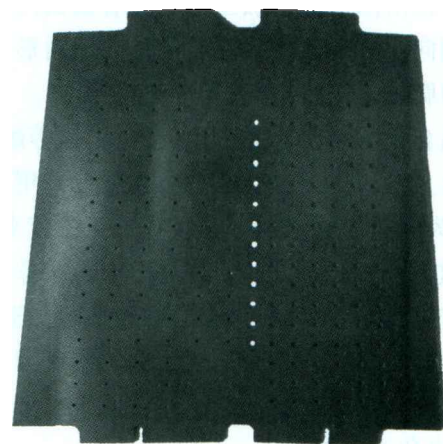


图1 冷气导管(展开)

Fig.1 Cooling air tube (expanded)

批量生产等各种生产规模。缺点是设备投资较大,更为严重的问题是激光加工后毛刺较多,板面金属飞溅污染较为严重,尤其在开孔率高的情况下,由于热应力的存在,加工后累计变形非常严重。所以,激光加工不适合冷气导管加工,在航空发动机薄壁群孔零件加工中已很少应用。

#### (2) 数控高速冲孔加工。

数控高速冲孔加工的精度较高,冲孔速度较快,能获得足够的群孔加工效率,但数控高速冲孔设备昂贵,并需要设计、制造专用冲模,生产准备周期长,不适合单件加工。采用该工艺加工后,小孔边缘毛刺严重,一般还需要进行电解抛光去毛刺工序;零件加工后应力变形将造成薄板翘曲,零件外形还需要后续加工,会出现很多工艺问题,甚至导致零件报废。由于在小批量生产时成本高、效果差,所以,一般不采用数控冲孔加工方法。

#### (3) 电火花加工。

电火花加工质量较好,精度高,在合理控制参数的情况下可以避免板面变形,但需要制作复杂的群孔电极,电极制作的难度很大,并会在加工中不断消耗;如果不采用多通道加工电源,在孔通的瞬间会出现过流烧伤。同时,还需要增加一道工序来加工零件外形,最终保证多孔板的精度比较困难。所以,小孔数量多

的冷气导管不适合采用电火花加工方法。

(4) 化学腐蚀加工。

以往采用传统的化学腐蚀方法来加工冷气导管。腐蚀剂是各种强酸,其成分根据零件材料选择。零件通过在腐蚀剂中浸泡或搅拌,使腐蚀剂与加工表面充分接触,能沿整个图形均匀、快速腐蚀。由于腐蚀加工时腐蚀不仅沿图形深度加工,还沿着侧面同时加工,即出现侧向腐蚀现象,因此,在设计腐蚀图形时,应根据要求的腐蚀深度留出相应的侧向腐蚀量。

高温合金材料含有大量镍、铬、钨、钴等耐蚀性很强的合金元素,化学腐蚀加工非常困难,需用硫酸、硝酸、盐酸为主的强腐蚀剂。因此,在加工中带来了一系列的严重问题:一是腐蚀加工的工作条件恶劣,环境污染严重;二是化学反应生成的热量极容易造成抗蚀保护膜剥落、损坏,常常在未达到要求的腐蚀深度时,腐蚀加工已无法进行。

(5) 电化学腐蚀加工。

针对化学腐蚀加工的缺点,经过技术改进,在高温合金材料的加工中采用电化学腐蚀加工方法,图2为酸性溶液电化学腐蚀加工的示意图。由于利用了金属的阳极溶解特性,金属的腐蚀量遵循法拉第定律,通过的极间电流越大,腐蚀速度就越快。为了将金属离子从阳极表面快速溶解,使电化学反应连续进行,电化学腐蚀加工仍需酸性电解液。

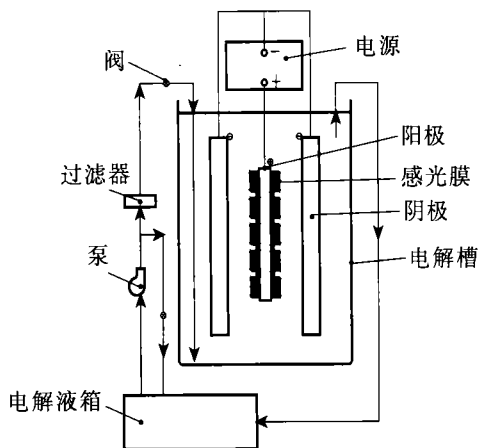


图2 酸性溶液电化学腐蚀加工示意图  
Fig.2 Diagram of electrochemical corrosion machining in acid solution

电化学腐蚀加工时,由于产生的热量和氢气分布不均匀,容易造成加工表面电流不均,腐蚀不均现象仍很严重。人们采用了多种方法来避免或减轻腐蚀不均匀现象,例如,图2所示用泵循环电解液就是其中

的一种措施;还可通过加大两极间距离,减小电流密度降低腐蚀速度等方法;也可以定时取出零件,清洗腐蚀表面,改变零件在电解槽的位置,然后再继续腐蚀加工。不过,采用这些方法的结果是加工效率低,操作复杂,加工质量也难于控制。电化学腐蚀工艺在加工中电解液温度升高很快,有时可达100℃,这样,保护膜在高温、强酸的长时间作用下,很容易损坏脱落,致使腐蚀无法进行,可腐蚀深度(小于0.2mm)很难达到航空发动机高温合金薄板群孔零件的厚度,且腐蚀深度仍不够均匀,精度差,腐蚀速度也很低(0.1mm/h)。

2 照相电解加工

照相电解加工是一种特种加工方法。它由化学铣切、照相化学铣切等加工方法发展而来。照相电解加工利用电化学阳极溶解原理,工件接电源正极,电极接电源负极进行电化学加工。加工时,不加工部位被保护膜保护起来,只裸露加工部位的金属,所以,适合小孔及复杂形状加工。照相电解加工是一种高品质、无应力加工方法,具有加工后小孔边缘无毛刺、板面不变形、表面质量高等优点。而且,在加工平板大面积上的群孔时,不受阴极形状的限制,效率极高。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,可以加工高温合金材料薄壁上的群孔,生产准备周期短,设备投资少,保护膜制作快捷迅速,适合单件和批量的各种生产规模。实践证明,照相电解加工是高温合金薄壁群孔的最佳加工方法,因此,在航空发动机薄壁群孔结构加工中,照相电解加工占据了显著的地位。对于图1所示的冷气导管,采用照相电解方法加工,3种直径的小孔和零件外形在一道工序中可同时完成。利用光绘排版技术的优势,可以在大面积板上实现几十件同时加工。目前照相电解加工已成功应用于多种发动机的生产研制。

2.1 照相电解加工工序

照相电解加工是由照相制板和电解加工组成的一种多工序加工技术。照相电解加工的主要工序如图3所示。

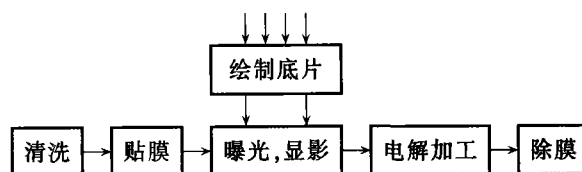


图3 照相电解加工工序图  
Fig.3 Process of photographic ECM

(1)绘制底片。首先根据图纸设计要求,用光绘仪绘制要加工的图形,即制作掩模板,俗称底片。传统的照相制版方法较为落后,先手工画出放大图,再通过照相制作掩模板,有时为了得到精确的掩模板,要进行多次反复画放大图再照相的工作,费时费力,工作量大,生产准备周期长。随着现代照相制版技术的发展,可利用光绘仪直接制作掩模板,这种方法快速、精确,大大提高了制版效率,缩短了生产周期。

(2)清洗。为了得到清洁干净的零件表面,使感光干膜能够均匀牢固地粘附在零件上,需进行零件的除油、去污、干燥处理。

(3)贴膜。在清洁干燥的零件表面上,用贴膜机贴感光干膜;要求干膜粘贴牢固,防止加工时保护膜脱落。

(4)曝光,显影。将掩模板放在贴有感光干膜的零件上,用曝光机进行曝光,使干膜感光的部位发生光化学反应,使干膜固化,成为绝缘的保护膜。然后,将曝光后的零件放在显影液中,干膜未感光的部位在显影溶液中溶解,露出被加工部分金属。

(5)电解加工。将已经准备好的零件进行加工。

(6)除膜。电解加工完毕后,从零件表面上除去保护膜。

## 2.2 照相电解加工主要装备

(1)贴膜机。关键部件有两根旋转的橡胶压辊,可加压加热,贴膜滚的温度、速度可调。贴膜机的功能是在压力、温度的作用下选定合适的速度将干膜贴在零件表面上。

(2)曝光机。由曝光灯、曝光盒、控制系统组成。过去采用镝灯,现在多采用碘钾灯。曝光机工作时要求光线分布均匀,通过试验选择合适的曝光时间进行严格控制,才能得到清晰的、保护膜牢固的加工图形。

(3)照相电解加工专用设备。包括机床主机、机床控制系统、加工电源、电解液输液系统、电解液处理系统等。设备要求精度高,使用稳定可靠,耐腐蚀,由北京航空制造工程研究所根据工艺特点及使用要求自行研制。

## 2.3 照相电解加工工艺

经过大量的试验及分析总结,北京航空制造工程研究所在化学腐蚀加工和电化学腐蚀加工的基础上进行了改造,开发出了照相电解加工工艺,解决了在难加工材料上进行薄壁群孔加工的技术关键。照相电解加工采用中性溶液,代替了电化学腐蚀中的酸液,

改善了工作环境,使该工艺成为高品质、高效率、精度高、安全性好的一种全新的加工方法。

图4是照相电解加工示意图。电解液采用NaCl、NaNO<sub>3</sub>水溶液,对保护膜无腐蚀作用。高速流动的电解液及时带走了加工产物和产生的热量,使加工连续正常进行。加工深度可达0.6mm,为酸性溶液的3倍;加工速度0.1mm/min,为酸性溶液加工的60多倍。

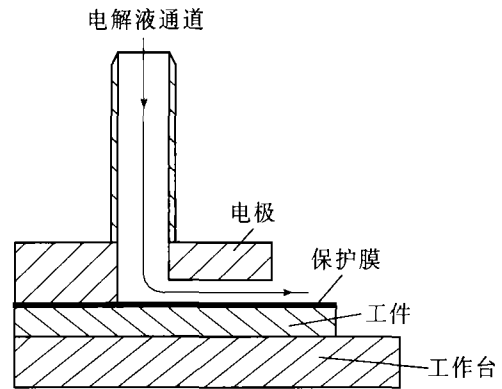


图4 照相电解加工示意图

Fig.4 Diagram of photographic ECM

与化学腐蚀、电化学腐蚀这两种传统的腐蚀加工方法相比,照相电解加工具有明显的优越性,见表1。

表1 照相电解加工与传统腐蚀加工技术对比

加工技术	腐蚀深度/mm	腐蚀速度/(mm·h <sup>-1</sup> )	加工精度/mm	废品率/%	效率	加工成本	污染状况
传统腐蚀加工技术	0.2	0.1	>0.3	>30	高	高	重
照相电解加工技术	0.5	6	<0.1	<2	低	低	轻

## 3 结论

(1)冷气导管采用照相电解加工工艺大大提高了加工深度、加工精度、加工效率、成品率,降低了污染,满足了设计使用需求。

(2)与传统腐蚀加工技术相比,照相电解加工在加工深度、加工精度、加工效率等多方面具有显著优势。

(3)大量的生产实践表明,照相电解加工是高温合金薄板群孔的最佳加工方法,在航空发动机研制、生产中加工了冷气管、阻尼套、燃油滤网、滑油滤网、护罩等多种零件,具有广泛的应用前景。(责编 金卯)