

高等职业教育机械设计与制造系列精品教材

▶ “互联网+” 创新型教材

特种加工技术

主 编 靳 敏
副 主 编 牛 俊 张学明



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本教材讲述现代制造工程技术中除常规切削加工以外的特种加工新技术,包括电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、高能束加工、超声加工及快速成型技术。对每种特种加工技术,讲述其基本加工原理和规律、基本设备、工艺特点和分类,并列举其生产应用实例。

本教材取材丰富、图文并茂,既有一定的理论深度,又有丰富的生产实践内容,可供高职高专院校机械类专业师生以及广大从事机械制造的工程技术人员使用及参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/靳敏主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2012.11(2022.11重印)

ISBN 978-7-5635-3293-3

I. ①特… II. ①靳… III. ①特种加工—高等职业教育—教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 269653 号

策划编辑: 马子涵 责任编辑: 于伟蓉 封面设计: 黄燕美

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 10.5

字 数: 268 千字

版 次: 2012 年 11 月第 1 版

印 次: 2022 年 11 月第 9 次印刷

ISBN 978-7-5635-3293-3

定 价: 32.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话:400-615-1233

目 录

| | |
|---------------------------|-----------|
| 绪论 | 1 |
| 一、特种加工技术的产生和发展 | 1 |
| 二、特种加工技术的特点 | 1 |
| 三、特种加工技术的分类 | 2 |
| 四、特种加工技术对机械制造领域的影响 | 4 |
| 课题一 电火花加工 | 6 |
| 任务一 精密微细小孔零件的电火花加工 | 6 |
| 任务描述 | 6 |
| 任务分析 | 7 |
| 知识准备 | 7 |
| 一、电火花加工的基本原理及机理 | 7 |
| 二、电火花加工的特点及分类 | 11 |
| 任务实施 | 13 |
| 拓展提高 | 15 |
| 任务二 浅型腔花纹模的电火花加工 | 16 |
| 任务描述 | 16 |
| 任务分析 | 16 |
| 知识准备 | 17 |
| 一、电火花加工的工艺规律 | 17 |
| 二、电火花加工机床 | 27 |
| 任务实施 | 39 |
| 拓展提高 | 40 |
| 任务三 E形封口环模具的电火花加工 | 42 |
| 任务描述 | 42 |
| 任务分析 | 43 |
| 知识准备 | 43 |

| | |
|-------------------|----|
| 一、电火花穿孔成形加工 | 43 |
| 二、型腔模的电火花加工 | 46 |
| 任务实施 | 48 |
| 拓展提高 | 49 |
| 复习思考题 | 51 |

课题二 电火花线切割加工 52

任务一 小批量零件的线切割加工 52

| | |
|-----------------------|----|
| 任务描述 | 52 |
| 任务分析 | 53 |
| 知识准备 | 53 |
| 一、电火花线切割加工概述 | 53 |
| 二、电火花线切割加工机床 | 56 |
| 三、电火花线切割加工的工艺规律 | 61 |
| 任务实施 | 66 |
| 拓展提高 | 67 |

任务二 大批量高精度零件的线切割加工 69

| | |
|----------------------|----|
| 任务描述 | 69 |
| 任务分析 | 69 |
| 知识准备 | 70 |
| 一、电火花线切割加工准备工作 | 70 |
| 二、电火花线切割加工编程 | 76 |
| 任务实施 | 87 |
| 拓展提高 | 89 |
| 复习思考题 | 90 |

课题三 电化学加工 91

| | |
|-----------------|-----|
| 任务描述 | 91 |
| 任务分析 | 92 |
| 知识准备 | 92 |
| 一、电化学加工概述 | 92 |
| 二、电解加工 | 94 |
| 任务实施 | 108 |
| 拓展提高 | 109 |
| 复习思考题 | 112 |

课题四 高能束加工 113**任务一 激光加工 113**

| | |
|--------------------|-----|
| 任务描述 | 113 |
| 任务分析 | 114 |
| 知识准备 | 114 |
| 一、高能束加工概述 | 114 |
| 二、激光的产生及特性 | 114 |
| 三、激光加工的原理与特点 | 116 |
| 四、激光加工设备 | 118 |
| 任务实施 | 119 |
| 拓展提高 | 127 |

任务二 电子束加工和离子束加工 127

| | |
|------------------|-----|
| 任务描述 | 127 |
| 任务分析 | 128 |
| 知识准备 | 128 |
| 一、电子束加工 | 128 |
| 二、离子束加工 | 130 |
| 任务实施 | 131 |
| 一、电子束加工的应用 | 131 |
| 二、离子束加工的应用 | 133 |
| 拓展提高 | 135 |
| 复习思考题 | 136 |

课题五 超声加工及快速成型技术 137**任务一 超声加工 137**

| | |
|-------------------------|-----|
| 任务描述 | 137 |
| 任务分析 | 138 |
| 知识准备 | 138 |
| 一、超声加工的原理及特点 | 138 |
| 二、超声加工设备 | 140 |
| 三、超声加工的工艺指标及其影响因素 | 144 |
| 任务实施 | 146 |
| 拓展提高 | 147 |

任务二 快速成型技术 150

| | |
|------------|-----|
| 任务描述 | 150 |
|------------|-----|

| | |
|-------------------|-----|
| 任务分析 | 150 |
| 知识准备 | 151 |
| 一、快速成型技术概述 | 151 |
| 二、快速成型技术的原理 | 152 |
| 任务实施 | 153 |
| 拓展提高 | 158 |
| 复习思考题 | 158 |

绪 论

一、特种加工技术的产生和发展

20 世纪以来,随着机械加工技术的迅速发展,为了满足在高温、高压、高速、重载和强腐蚀等苛刻条件下的工作要求,一些装置和机载设备上大量采用了新结构、新材料和复杂形状的精密零件,这些零件用传统的机械加工方法难以达到要求,新型特种加工方法应运而生。

特种加工是将电能、热能、光能、声能和磁能等物理能、化学能及其组合,或者与机械能组合直接施加到被加工的部位上,从而实现材料去除的加工方法。为了与现有的金属切削加工相区别,特种加工也称为非传统加工(non-traditional machining, NTM)或非常规加工(non-conventional machining, NCM)。特种加工方法产生于 20 世纪 40 年代,当时苏联的拉扎连科夫妇受开关触点遭受火花放电腐蚀破坏现象的启发,发明了电火花加工,开创了特种加工的历史。

虽然特种加工方法的产生源于偶然,但特种加工的迅速发展和广泛应用却是历史必然。近年来,随着精密细小、形状复杂和结构特殊零件的应用逐渐增加,以及计算机技术、微电子技术和控制技术的迅速发展,对特种加工技术的需求也越来越广泛。目前,特种加工技术已成为零件制造的重要工艺技术手段,是现代制造技术的前沿。可以预见,随着科学技术和现代工业的发展,特种加工技术必将不断地完善和迅速发展;反之,特种加工技术的发展又必将推动科学技术和现代工业的发展,在生产中发挥越来越重要的作用。

二、特种加工技术的特点

特种加工技术的应用范围非常广。与传统机械加工方法相比,特种加工技术有其独到之处。

(1)特种加工技术主要依靠除机械能以外的其他能量(如电能、热能、光能、声能以及化学能等)进行加工,因而不受工件力学性能的限制,能加工各种高硬度、高脆性、耐热或高熔点的金属及非金属材料,而且特种加工产生的切削热很少或无切削热,故可加工热敏材料。

(2)特种加工不一定需要工具,有的虽然使用工具,但与工件不接触,因此,工具硬度可低于工件硬度。因为工件不承受大的作用力,所以特种加工可加工刚度极低的零件和弹性

元件。

(3)加工过程中工具和工件之间不存在显著的机械切削力作用,易获得良好的表面质量,加工后的零件的残余应力、热应力、热影响区和冷作硬化程度等均较小。

(4)特种加工属于微细加工,它突破了传统加工的零件尺寸和质量限制,可加工尺寸微小的孔或狭缝,使零件获得极高的加工精度和表面质量。

(5)各种特种加工方法易于复合形成新的工艺方法,便于推广和应用。

目前,特种加工技术还存在着不少亟待解决的问题,如有些特种加工的机理还不是很清楚,工艺参数的选择还需深入研究,加工过程的稳定性有待进一步提高,环境污染问题需妥善解决,设备投资大,使用维修费高等。如何不断完善已有的特种加工方法并开发出更新、更先进的特种加工方法是机械制造业面临的新问题。

三、特种加工技术的分类

特种加工一般按加工时所采用的能量类型分为电火花加工、电化学加工、激光加工、超声加工、射流加工、电子束加工、离子束加工和化学加工等基本加工方法,以及由这些基本加工方法组成的复合加工方法。特种加工的分类见表 0-1。

表 0-1 特种加工的分类

| 特种加工方法 | | 能量类型 | 作用原理 | 英文缩写 |
|--------|------------|-----------|----------|------|
| 电火花加工 | 电火花成形加工 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | EDM |
| | 电火花线切割加工 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | WEDM |
| 电化学加工 | 电解加工 | 电化学能 | 金属离子阳极溶解 | ECM |
| | 电铸 | 电化学能 | 金属离子阴极沉积 | EFM |
| | 涂镀 | 电化学能 | 金属离子阴极沉积 | EPM |
| 高能束加工 | 激光加工 | 光能、热能 | 熔化、汽化 | LBM |
| | 电子束加工 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | EBM |
| | 离子束加工 | 电能、机械能 | 原子撞击 | IBM |
| 物料刻蚀加工 | 超声加工 | 声能、机械能 | 磨料高频撞击 | USM |
| | 射流加工 | 机械能 | 气蚀 | — |
| 化学加工 | 化学铣削 | 化学能 | 腐蚀 | CHM |
| | 光刻 | 光能、化学能 | 光化学腐蚀 | PCM |
| | 化学抛光 | 化学能 | 腐蚀 | CHP |
| 快速成型 | 光敏树脂液相固化成型 | 光能、化学能 | 增材法加工 | SLA |
| | 粉末烧结成型 | 光能、化学能 | 增材法加工 | SLS |
| | 薄片叠加成型 | 光能、机械能 | 增材法加工 | LOM |
| | 熔丝堆积成型 | 光能、热能、机械能 | 增材法加工 | FDM |

续表

| 特种加工方法 | 能量类型 | 作用原理 | 英文缩写 | |
|--------|-----------|--------------|------------|-----|
| 复合加工 | 电解磨削 | 电化学能、机械能 | 阳极溶解、磨削 | ECG |
| | 电解研磨 | 电化学能、机械能 | 阳极溶解、研磨 | ECH |
| | 超声电解复合加工 | 声能、机械能、电化学能 | 气蚀、阳极溶解 | — |
| | 电解电火花复合加工 | 电化学能、电能、热能 | 阳极溶解、熔化、汽化 | — |
| | 电火花超声复合加工 | 电能、热能、声能、机械能 | 熔化、汽化、气蚀 | — |
| | 超声振动切削 | 声能、机械能 | 切削 | — |

在特种加工范围内还有一些属于提高表面质量或改善表面性能的工艺:提高表面质量的加工包括电解抛光、化学抛光、离子束抛光等;改善表面性能的加工包括电火花表面强化镀覆、刻字、激光表面处理、改性、电子束曝光、离子镀等。

在特种加工发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工之间的过渡性工艺,如在切削过程中引入超声振动或低频振动的振动切削,在切削过程中通以低电压、大电流的导电切削,加热切削和低温切削等。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的,目的是改善切削的条件,基本上还属于切削加工。

几种常用的特种加工方法见表 0-2。

表 0-2 几种常用的特种加工方法

| 特种加工方法 | 材料去除率/ (mm^3/min) 平均/最高 | 尺寸精度/ μm 平均/最高 | 表面粗糙度 Ra / μm 平均/最高 | 可加工材料 | 适用范围 |
|----------|---|---------------------------------|--|-------|---|
| 电火花成形加工 | 30/3 000 | 30/3 | 10/0.04 | 金属 | 从微米级的孔、槽到超大型模具、工件等,如圆孔、方孔、异形孔、深孔、微孔、弯孔、螺纹孔,以及冲模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模。还可进行刻字、表面强化或涂覆加工 |
| 电火花线切割加工 | 20/200 | 20/2 | 5/0.32 | | 切割各种冲模、塑料模、粉末冶金模等二维及三维直纹面组成的模具及零件。可直接切割各种钢板、磁钢、硅钢片冲片。也常用于钨、钨、半导体材料或贵金属的切割 |
| 电解加工 | 100/10 000 (mm^2/min) | 100/10 | 1.25/0.16 | | 从细小零件到超大型工件及模具,如仪表微型小轴、齿轮上的飞边、涡轮叶片、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异形孔、锻造模、铸造模,以及抛光、去飞边等 |
| 电解磨削 | 1/100 | 20/1 | 1.25/0.04 | | 硬质合金等难加工材料的磨削,如硬质合金刀具、量具、轧辊、小孔、深孔、细长杆磨削,以及超精光整研磨、珩磨等 |

续表

| 特种加工方法 | 材料去除率/ (mm ³ /min) 平均/最高 | 尺寸精度/ μm 平均/最高 | 表面粗糙度 Ra/ μm 平均/最高 | 可加工 材料 | 适用范围 |
|--------|---|----------------------|--------------------------|-----------|--|
| 激光加工 | 瞬时去除率很高,受功率限制,平均去除率不高 | 10/1 | 10/1.25 | 任何材料 | 精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀等,如金刚石拉丝模,钟表宝石轴承,化纤喷丝孔,在不锈钢板上打小孔,切割钢板、石棉、纺织品、纸张,还可进行焊接、热处理等操作 |
| 电子束加工 | | | | | 在各种难加工材料上打微孔、切口、蚀刻、曝光以及焊接等。常用于制造中、大规模集成微电子器件 |
| 离子束加工 | 很低 | —/0.01 | —/0.01 | | 对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、蚀刻、掺杂或镀膜等 |
| 超声加工 | 1/50 | 30/5 | 0.63/0.16 | 硬脆材料 | 加工、切割硬脆材料,如玻璃、石英、宝石、金刚石、半导体单晶锗或硅等。可加工型孔、型腔、小孔或深孔等 |
| 水射流加工 | >300 | 200/100 | 20/5 | 钢铁、石材 | 下料、成形切割、剪裁 |

注:线切割加工的金属去除率按惯例均以 mm²/min 为单位。

四、特种加工技术对机械制造领域的影响

特种加工技术集机械技术、电子技术、信息技术、材料技术和计算机技术于一体,发展十分迅速。加工尺度的微细化、加工方法的复合化和加工过程的自动化已成为特种加工技术研究发展的热点。特种加工的特点和逐渐广泛的应用引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革。

1. 提高了材料的可加工性

金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等一般很难加工。电火花、电解、激光等多种加工方法使金刚石、聚晶(人造)金刚石制造的刀具、工具、拉丝模具等得到了广泛应用,材料的可加工性不再与硬度、强度、韧性、脆性等直接关系。例如,对电火花线切割加工而言,淬火钢比未淬火钢更易加工。特种加工技术使材料的可加工范围从普通材料发展到硬质合金、超硬材料和特殊材料。

2. 改变了零件的典型工艺路线

在传统加工中(磨削加工除外),切削加工、成形加工等都必须安排在淬火工序之前进行,这是所有工艺人员必须遵守的工艺准则,但特种加工的出现改变了这种一成不变的程序格式。由于特种加工基本上不受工件硬度的影响,为了避免加工后再进行淬火而引起变形,一般都是先淬火、后加工,最为典型的加工方法是电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工。

特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”产生了影响。由于特种加工过程中没有显著的机械作用力,机床、夹具、工具的强度和刚度不是主要问题,因此,即使是较大的、复

杂的加工表面,也可使用一个复杂工具经过一次装夹、一道工序加工出来,工序比较集中。

3. 缩短了新产品试制周期

试制新产品时,采用特种加工技术可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮,微型电动机定子、转子硅钢片,各种变压器铁心,各种复杂、特殊的二次曲面体等零件,可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工具的环节,大大缩短了试制周期。快速成型技术更是试制新产品的必要手段,改变了过去传统的产品试制模式。

4. 对产品零件的结构设计产生了很大的影响

各种复杂冲模以往难以制造,一般做成镶拼式结构,在采用电火花线切割加工技术后,即使是硬质合金的模具或刀具也可以做成整体式结构。由于电解加工的出现,喷气发动机涡轮也可以采用带冠整体结构,大大提高了发动机的性能。

5. 改变了对传统结构工艺性的衡量标准

方孔、小孔、深孔、弯孔、窄缝等被认为是工艺性很差的典型,对工艺设计人员来说是非常忌讳的,有的甚至被认为是机械结构的禁区,但是对于电火花穿孔加工、电火花线切割加工来说,加工方孔、圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔,喷丝头小异形孔,涡轮叶片上大量的小冷却深孔、窄缝,静压轴承和静压导轨的内油囊型腔等,在采用电火花加工技术以后,其工艺性都得到了改善。采用传统机械加工方法时,若在淬火工艺处理前漏掉钻定位销、铣槽等工艺,淬火处理后这种工件只能报废,现在则可以用电火花打孔、切槽等方法进行补救。而且,现在有时为了避免淬火处理产生开裂、变形等缺陷,还特意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火工艺处理之后,使工艺路线的安排更为灵活。

特种加工技术已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术和尖端技术,国防工业、微电子工业等现代工业的发展都需要采用特种加工技术来制造相关的仪器、设备和产品。

我国的特种加工技术既有广大的社会需求,又有巨大的发展潜力。目前,我国特种加工的整体技术水平与发达国家还存在着较大的差距,需要我们不断地拼搏和努力,加速开展相关工作,促进我国特种加工技术的研究开发和推广应用。

知识目标

理解电火花加工方法的原理与特点；

了解电火花加工方法的分类；

掌握电火花加工方法的基本工艺规律。

技能目标

熟悉电火花加工机床的组成及各部分功用；

掌握电火花加工的应用。

任务一 精密微细小孔零件的电火花加工



任务描述

图 1-1-1 所示为用一根成形电极连续加工五个 $\phi 0.042$ mm 微孔的加工实例,工件材料为 0.1 mm 厚的不锈钢板(SUS304)。那么,要完成这五个精密微孔的加工,在加工过程中应该如何选用电极材料? 电极采用什么方法制作? 加工规准又应该如何选择呢?

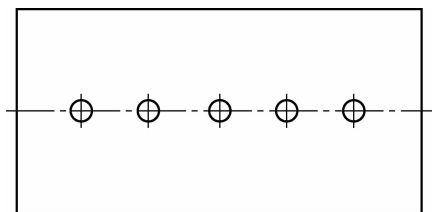


图 1-1-1 精密微孔的加工实例



任务分析

利用电火花进行精密、微细孔的加工是一种有效的加工手段,微细孔的应用范围很广,可用于化纤喷嘴模具、燃料喷嘴、光学仪器零件的微孔、喷墨打印机的模具或医疗器械的微孔加工等。

在加工精密微孔时,主要需解决两大难点,即加工装置和电极的制作。加工装置应满足一定的功能要求。电极的制作方法目前主要有机械加工法、细丝电极法和电火花成形法,根据加工要求选择合适的电极制作方法是操作者需要掌握的内容。



知识准备

一、电火花加工的基本原理及机理

1. 电火花加工的基本原理

电火花加工又称为放电加工(electrical discharge machining, EDM),其加工过程与传统的机械加工完全不同。电火花加工是一种电能、热能加工方法。

电火花加工的基本原理是利用工具和工件(正、负电极)之间产生脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属,以达到对零件的尺寸、形状及表面质量的加工要求。研究表明,电火花腐蚀的主要原因是放电时火花通道中瞬时产生大量的热,产生的高温足以使任何金属材料局部熔化、汽化而被蚀除掉,形成放电凹坑。要利用电腐蚀现象对金属材料进行加工应具备以下条件。

(1)工具电极和工件被加工表面之间应保持一定的放电间隙。放电间隙过大,极间电压不能击穿极间介质,不会产生火花放电;放电间隙过小,容易形成短路,同样不能产生火花放电。因此,在电火花加工过程中必须具有电极自动进给调节装置,使工件与电极之间保持一定的放电间隙。放电间隙的大小与加工电压、加工介质等因素有关,一般为 $0.02\sim 0.1\text{ mm}$ 。

(2)火花放电必须在有一定绝缘性能的工作介质中进行。对导电材料进行加工时,两极间为液体介质;进行材料表面强化时,两极间为气体介质。液体介质又称为工作液,如煤油、皂化液或去离子水等。它们必须具有较高的绝缘强度,以利于产生脉冲性的火花放电。同时,工作液还能把电火花加工过程中产生的金属屑、炭黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去,并且对电极和工件表面有较好的冷却作用。

(3)火花放电必须是瞬时的脉冲性放电,而不是持续电弧放电。放电持续一段时间(一般为 $10^{-7}\sim 10^{-3}\text{ s}$)后,需停歇一段时间,这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分,而把每一次的放电点分别局限在很小的范围内;否则,会像持续电弧放电那样,使表面烧伤而无法用于尺寸加工。因此,电火花加工必须采用脉冲电源。图 1-1-2 所示为脉冲电源的空载电压波形,图中 t_1 为脉冲宽度, t_0 为脉冲间隔, t_p 为脉冲周期, u_1 为脉冲峰值电压或空载电压。

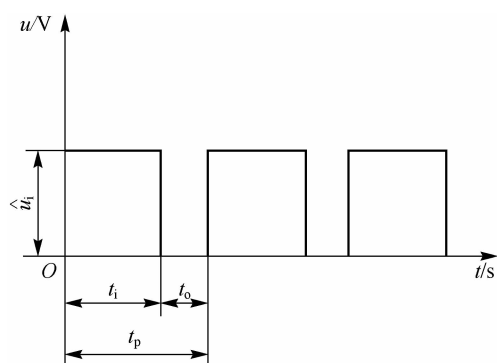


图 1-1-2 脉冲电源的空载电压波形

以上这些问题的综合解决,是通过图 1-1-3 所示的电火花加工系统来实现的。工件 1 与工具电极 4 分别与脉冲电源 2 的两输出端相连接。自动进给调节装置 3(此处为电动机及丝杠螺母机构)使工具电极 4 和工件 1 之间始终保持一个很小的放电间隙,当脉冲电压加到两极之间,便在当时条件下相对某间隙最小处或绝缘强度最低处击穿介质,在该局部产生火花放电,产生的瞬时高温使工具电极和工件表面都蚀除一小部分金属,各自形成一个小凹坑,图 1-1-4(a)表示单个脉冲放电后的电蚀坑,图 1-1-4(b)表示多个脉冲放电后的电极表面。脉冲放电结束后,经过一段时间间隔(即脉冲间隔 t_o),使工作液恢复绝缘后,第二个脉冲电压又加到两极上,又会在当时极间距离相对最近或绝缘强度最弱处击穿放电,电蚀出一个小凹坑。这样,工具电极和工件间以相当高的频率连续不断地重复放电,工具电极不断地向工件进给,就可将工具电极的形状复制在工件上,加工出所需要的零件,整个加工表面将由无数个小凹坑组成。

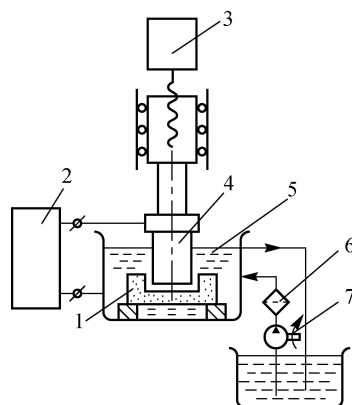


图 1-1-3 电火花加工系统原理示意图

- 1—工件；2—脉冲电源；3—自动进给调节装置；
4—工具电极；5—工作液；6—过滤器；
7—工作液泵

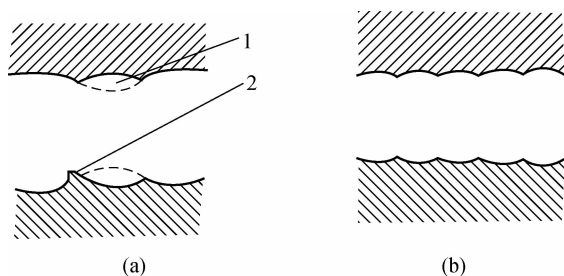


图 1-1-4 电火花加工表面局部放大图

1—凹坑；2—凸边

2. 电火花加工的机理

电火花腐蚀的微观过程是电力、热力、磁力、流体动力等综合作用的过程,该过程大致可分为四个连续的阶段:极间介质的电离、击穿和放电通道的形成;介质热分解,电极材料熔化、汽化和热膨胀;蚀除产物的抛出;极间介质的消电离。

1) 极间介质的电离、击穿和放电通道的形成

电火花加工中工作介质的击穿状态直接影响电火花加工的规律性,因此,必须掌握工作介质击穿的规律和特性,尤其是击穿通道特性参数随击穿状态(如电参数、介质特性、电击特性及极间距离等)而变化的规律性。

图 1-1-5 所示为矩形波脉冲放电时的电压和电流波形。当约 80 V 的脉冲电压施加于工具电极与工件之间时(图 1-1-5 中的 0~1 段和 1~2 段),两极之间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比,与距离成反比,即随着极间电压的升高或极间距离的减小,极间电场强度也将增大。由于工具电极和工件的微观表面是凹凸不平的,极间距离又很小,因而极间电场强度是很不均匀的,两极间离得最近的突出点或尖端处的电场强度一般为最大。

电火花加工的工艺特性决定了极间工作介质中不可避免地含有各种各样的杂质,如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等,也有一些自由电子使介质呈现一定的电导率。在电场作用下,这些杂质将使极间电场更不均匀。当阴极表面某处的电场强度增加到 10^5 V/mm(即 100 V/ μm)左右时,就会由阴极表面向阳极逸出电子。在电场作用下,电子高速地向阳极运动并撞击工作液介质中的分子或中性原子,产生碰撞电离,形成带负电的粒子(主要是电子)和带正电的粒子(正离子),导致带电粒子以几何级数的方式增大,使介质击穿而形成放电通道。这种由于电场强度高而引起的电子发射形成的间隙介质击穿,称为场致发射击穿;由于负极表面温度升高,局部过热而引起大量电子发射形成的间隙介质击穿,称为热击穿。

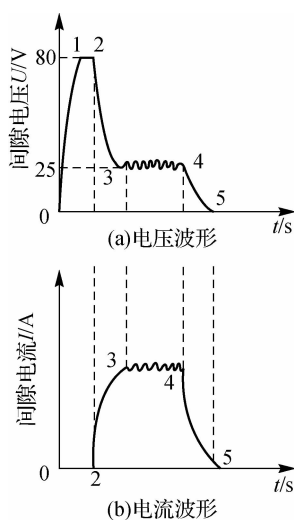


图 1-1-5 矩形波脉冲放电时的电压和电流波形

从极间介质电离到建立放电通道的过程非常迅速,一般小于 $0.1 \mu\text{s}$,间隙电阻从绝缘状况迅速降低到几分之一欧,间隙电流迅速上升到最大值(几安到几百安)。由于通道直径很小,因而通道中的电流密度可高达 $10^3 \sim 10^4 \text{ A/mm}^2$ 。间隙电压则由击穿电压迅速下降到火花维持电压(一般约为 25 V),电流则由零上升到某一峰值电流,如图 1-1-5(b)中的 2~3 段。

放电通道是由数量基本相等的正离子和电子以及中性粒子(原子或分子)组成的等离子体。带电粒子高速运动相互碰撞,产生大量的热,使通道温度升高,通道中心的温度可达 $10\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。由于电子流动形成电流而产生磁场,磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应和周围介质惯性动力压缩效应的作用,通道瞬间扩展受到很大阻力,故放电开始阶段通道截面积很小,电流密度高达 $10^7 \sim 10^9 \text{ A/mm}^2$,而通道内由瞬时高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高温、高压的放电通道以及随后瞬时汽化形成的气体(以后发展成气泡)急速扩展,并产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中,同时还伴随着一系列派生现象,其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁波辐射和局部爆炸冲击波等。

2) 介质热分解,电极材料熔化、汽化和热膨胀

极间介质一旦被击穿、电离,形成放电通道后,脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极,使正离子奔向负极,电能变成动能,动能通过碰撞又转变为热能。于是,在通道内,正极和负极表面分别成为瞬时热源,温度急剧升高。放电通道在高温的作用下,首先把工作液介质汽化,进而热分解汽化,如煤油等碳氢化合物工作液高温后裂解为 H_2 (约占 40%)、 C_2H_2 (约占 30%)、 CH_4 (约占 15%)、 C_2H_4 (约占 10%)和游离碳等,水基工作液则热分解为 H_2 、 O_2 的分子,甚至原子。正、负极表面的高温除使工作液汽化、热分解汽化外,也使金属材料熔化,直至沸腾汽化,这些汽化后的工作液和金属蒸气瞬间体积剧增,迅速热膨胀,具有爆炸的特性。观察电火花加工过程可以发现,放电间隙间冒出很多小气泡,工作液逐渐变黑,还可以听到轻微而清脆的爆炸声。

电火花加工主要靠热膨胀和局部微爆炸使已经熔化、汽化的电极材料抛出而形成蚀除产物,如图 1-1-5 中的 3~4 段。此时 80 V 的空载电压降为 25 V 左右的火花维持电压,由于它含有高频成分而呈锯齿状,此时电流则上升为锯齿状的放电峰值电流。

3) 蚀除产物的抛出

通道和正、负极表面放电时产生的瞬时高温使工作液汽化和金属材料熔化、汽化,热膨胀产生很高的瞬时压力。通道中心的压力最高,使汽化的气体体积不断向外膨胀,形成一个扩张的“气泡”。“气泡”上下、内外的瞬时压力并不相等,压力高处的熔融金属液体和蒸气就被排挤、抛出而进入工作液中。

实际上,金属材料的蚀除、抛出过程远比上述过程要复杂。熔融材料被抛出后,在电极表面形成放电痕,其剖面放大示意图如图 1-1-6 所示。熔化区未被抛出的材料冷凝后残留在电极表面,形成熔化凝固

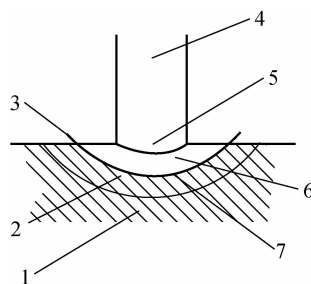


图 1-1-6 单个脉冲放电痕剖面放大示意图

1—无变化区；2—热影响层；3—翻边凸起；4—放电通道；
5—汽化区；6—熔化区；7—熔化凝固层

层,在四周形成稍凸起的翻边,熔化凝固层下面是热影响层,再往下是无变化的材料基体。

总之,材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果,对这一复杂的抛出过程机理的认识还在不断深化中。

4) 极间介质的消电离

随着脉冲电压的下降,脉冲电流也迅速下降为零,如图 1-1-5 中的 4~5 段,标志着一次脉冲放电结束。此后仍应有一段时间间隔使间隙介质消电离,即放电通道中的带电粒子复合为中性粒子,恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度,以免总是重复在同一处发生放电而导致电弧放电,这样可以保证在其他两极相对最近处或电阻率最小处形成下一击穿放电通道,这是电火花加工时所必须遵循的放电点转移原则。

如果在加工过程中产生的电蚀产物(如金属微粒、碳粒子、气泡等)来不及排除、扩散出去,就会改变间隙介质的成分,降低间隙介质的绝缘强度。脉冲火花放电时产生的热量如不及时传出,带电粒子的自由能不易降低,将大大减少复合的概率,使消电离过程不充分,结果将使下一个脉冲放电通道不能顺利地转移到其他部位,而始终集中在某一部位,使该处介质局部过热而破坏消电离过程,脉冲火花放电将转变为有害的稳定电弧放电,同时工作液局部高温分解后可能形成积炭,在该处聚集成焦炭粒而在两极间搭桥,使加工无法进行下去,并烧伤电极。

由此可见,为了保证电火花加工过程正常进行,在两次脉冲放电之间一般都应有足够的脉冲间隔 t_0 。最小脉冲间隔的确定,不仅要考虑介质本身消电离所需的时间(与脉冲能量有关),还要考虑电蚀产物排出放电区域(与脉冲爆炸力大小、放电间隙大小、拾刀及加工面积有关)的时间。

综上所述,电火花加工的整个过程如图 1-1-7 所示。

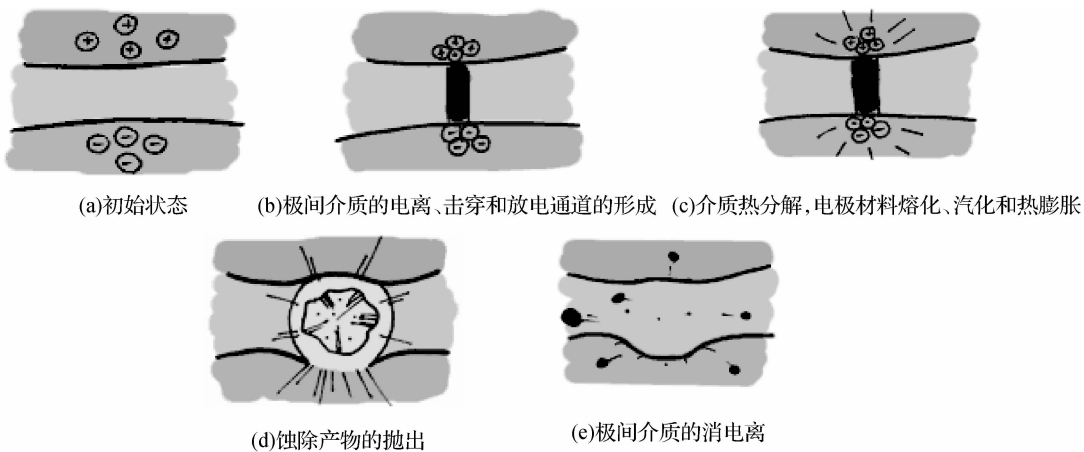


图 1-1-7 电火花加工的整个过程

二、电火花加工的特点及分类

1. 电火花加工的特点

通过前面对电火花加工原理的分析可知,在电火花加工过程中,工件的加工性能与工件材料的力学性能(硬度、强度等)几乎无关,主要取决于材料的导电性及热学特性(如熔点、沸点、比热容及电阻率等)。另外,电火花加工时的宏观作用力远小于传统切削加工时的切削

力,所以在加工相同规格的工件时,电火花机床的刚度和主轴驱动功率要求比金属切削机床低得多。

归纳起来,电火花加工有如下特点。

(1)电火花加工适用于任何难切削材料的加工,如航天、航空领域的发动机零件,蜂窝密封结构件,深窄槽及狭缝等的加工,特别适宜加工低刚度、薄壁工件,异形孔以及形状复杂的型腔模具、弯曲孔等。

(2)电火花加工时,工具电极与工件并不直接接触,两者之间宏观作用力极小,工具电极不必比工件材料硬,因此工具电极制造容易。

(3)电火花可以加工特殊及复杂形状的零件或表面。由于加工中工具电极和工件不直接接触,没有机械加工的切削力,因而它适用于低刚度工件的加工及微细加工(通常可用于0.01~1 mm范围内的型孔加工)。由于可以简单地将工具电极的形状复制到工件上,因此特别适用于复杂形状表面工件的加工,如复杂型腔模具加工等。

(4)电火花加工直接利用电能,因而易于实现加工过程的自动控制及无人操作,可以减少机械加工工序,缩短加工周期,降低劳动强度,并且使用、维护方便。

但是,电火花加工也有它的局限性。

(1)电火花加工主要用于加工金属等导电材料。

(2)电火花加工速度一般较慢。由于电火花加工时工件材料是靠一个个火花放电进行蚀除的,加工速度相对于切削加工而言是很低的,因此,安排工艺时多采用切削加工来去除大部分余量,然后再进行电火花加工,以提高生产效率。

(3)电火花加工存在电极损耗。由于火花放电时工件与电极均会被蚀除,因此电极的损耗对加工形状及尺寸精度的影响比切削加工时刀具的影响要大。

(4)电火花加工后,由于工件表面由众多放电凹坑组成,硬度较高,不易去除,因而影响后续工序加工。

2. 电火花加工工艺方法的分类

按工具电极的形状、工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同,电火花加工大致可分为电火花穿孔成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削和镗磨、电火花展成加工(同步共轭回转加工)、高速小孔加工、电火花表面强化与刻字。前五类属于电火花成形和尺寸加工,用于改变零件形状或尺寸;后者属于表面加工方法,用于改善或改变工件表面性质。其中,以电火花穿孔成形加工和电火花线切割加工应用最为广泛。电火花加工工艺方法分类见表1-1-1。

表 1-1-1 电火花加工工艺方法分类

| 类 别 | 工艺方法 | 特 点 | 用 途 | 备 注 |
|-----|-----------|----------------|---------------------|--|
| 1 | 电火花穿孔成形加工 | 工具为成形电极,一个进给运动 | 用于型腔、冲模、挤压模、异形孔等的加工 | 约占电火花机床总数的30%,典型机床有D7125、D7140等电火花穿孔成形机床 |
| 2 | 电火花线切割加工 | 工具为线状电极,两个进给运动 | 用于冲模、直纹面、窄缝、下料等的加工 | 约占电火花机床总数的60%,典型机床有DK7725、DK7740数控电火花线切割机床 |

续表

| 类别 | 工艺方法 | 特点 | 用途 | 备注 |
|----|------------|--------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 3 | 电火花磨削和镗磨 | 相对旋转运动,径向、轴向进给运动 | 用于精密小孔、外圆小模数滚刀等的加工 | 约占电火花机床总数的3%,典型机床有D6310电火花小孔内圆磨床等 |
| 4 | 同步共轭回转加工 | 均做旋转运动且纵向进给 | 用于精密螺纹、异形齿轮、回转表面等的加工 | 约占电火花机床总数的1%,典型机床有JN-2、JN-8内外螺纹加工机床 |
| 5 | 高速小孔加工 | 细管电极旋转,穿孔速度极高 | 用于深小孔、喷嘴、穿丝孔的加工 | 约占电火花机床总数的2%,典型机床有D703G电火花高速小孔加工机床 |
| 6 | 电火花表面强化与刻字 | 工具在工件上振动,工具相对于工件移动 | 用于工具刃口强化、刻字等的加工 | 约占电火花机床总数的2%~3%,典型机床有D9105电火花强化机床等 |

任务实施

在加工精密微孔时,主要解决两大难点,即加工装置和电极的制作。

1. 加工装置

加工装置的主要功能必须满足如下要求。

- (1)应具有旋转功能。
- (2)应具有电极成形装置及功能。
- (3)X、Y、Z各轴的分辨率应在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。
- (4)优异的伺服响应性。
- (5)能设定微细电气条件。
- (6)主轴旋转的动态精度要高。
- (7)应使极间静电容量控制在极小限度内。

2. 电极的制作

电极的制作方法目前主要有机械加工法、细丝电极法和电火花成形法。

1) 机械加工法

机械加工法主要包括切削法和磨削法,两者都属于接触加工法,加工小直径的电极较困难。

2) 细丝电极法

细丝电极法直接用钨丝、钼丝、黄铜丝、纯铜丝作电极。由于其存在变形或弯曲,需用导向器进行导向,很少用于精密加工。例如,在用 $\phi 0.05\ \text{mm}$ 的钨丝加工时,仅能加工 $\phi 0.07\ \text{mm}$ 的微孔。

3) 电火花成形法

电火花成形法是制作精密微孔加工电极的一种有效方法。利用旋转方式能使任意直径及长度的电极在较短时间内成形。在电极成形方法中,有反拷贝式电火花磨削法和线电极

磨削法,如图 1-1-8 和图 1-1-9 所示。反拷贝式电火花磨削法是一种无需特殊装置、简单易行、成本较低的电极成形法;线电极磨削法虽然需要特殊的电极丝运行装置,但却具有成形直线度好、所能成形的电极更长等优点。

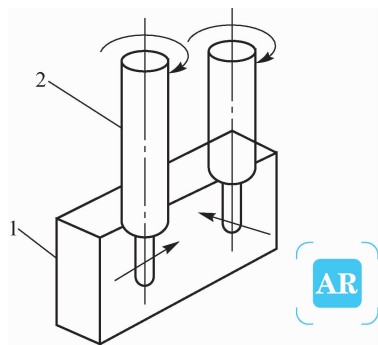


图 1-1-8 反拷贝式电火花磨削法

1—成形电极(一次电极); 2—被成形电极(二次电极)

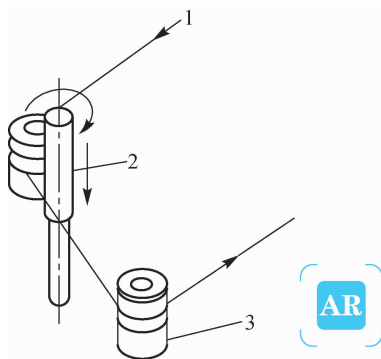


图 1-1-9 线电极磨削法

1—黄铜丝电极; 2—被成形电极; 3—导轮

图 1-1-1 所示的精密微孔加工实例中就是选择电火花成形法制作电极,电极材料为钨,直径为 0.032 mm,长度为 1.42 mm。加工规准的选择与转换及每挡规准的加工深度见表 1-1-2。

表 1-1-2 加工规准的选择与转换及每挡规准的加工深度

| 加工条件 | 脉冲宽度 ON | 脉冲间隔 OFF | 峰值电流 I_p | 伺服基准电压 SV | 加工极性 PL | 电源电压 | 辅助电源 HP | PP | 伺服速度 | 加工深度 /mm |
|------|---------|----------|------------|-----------|---------|------|---------|----|------|----------|
| C010 | 000 | 000 | 0000 | 03 | — | 01 | 082 | 10 | 003 | 1.3 |

注:表中未注单位的加工参数值为代码。

加工结果为:每孔加工时间为 46 s,每孔电极损耗量为 0.067 mm,加工表面粗糙度 R_a 为 1.5 μm ,五个精密微孔的直径最大误差为 0.5 μm 。

3. 任务测评

根据零件图要求对加工零件进行检测,并进行质量分析,任务测评见表 1-1-3。

表 1-1-3 成形电极连续加工精密孔的任务测评

| 序号 | 项目 | 考核内容 | 配分 | 测评结果 | 得分 |
|----|------|-------------|-----|------|----|
| 1 | 工具电极 | 制作方法 | 10分 | | |
| 2 | | 电极材料 | 15分 | | |
| 3 | | 尺寸 | 15分 | | |
| 4 | | 电极损耗 | 15分 | | |
| 5 | 工件 | 加工时间 | 15分 | | |
| 6 | | 表面粗糙度 R_a | 15分 | | |
| 7 | | 直径最大误差 | 15分 | | |

注:如发生重大安全事故,造成设备或人身损害直接为不合格。



拓展提高

1. HCD300K 型机床简介

HCD300K 型机床是一种中等规格的高精密特种加工机床,如图 1-1-10 所示。HCD300K 型机床兼备国内外同类机床的特点,是以用户的实际需要为目的设计开发的一种结构新颖、性能可靠的精密电火花成形机床,具有造型美观、操作方便、附件齐全等特点。它采用纯铜、石墨、钢、铜钨合金等电极材料,能对碳素钢、工具钢、合金钢、硬质合金及其他高硬度金属材料进行放电加工,可加工冲压模(落料模、复合模等)、型腔模(精锻模、压铸模、注塑模等)以及各种零件的坐标孔及复杂的异形曲面,还可以加工 $\phi 0.1$ mm 以上的小孔和宽 0.2 mm 的窄缝,广泛应用于仪器仪表、汽车、航空航天、轻工、军工、模具制造等行业。



图 1-1-10 HCD300K 型机床

2. HCD300K 型机床的主要规格及技术参数

HCD300K 型机床的主要规格及技术参数见表 1-1-4。

表 1-1-4 HCD300K 型机床的主要规格及技术参数

| 主要规格 | | 技术参数 |
|--------|----------------|------------------------|
| 工作台 | 长×宽 | 630 mm×350 mm |
| | 纵向最大行程(X) | 300 mm |
| | 横向最大行程(Y) | 200 mm |
| | 承载最大质量 | 300 kg |
| 工作液槽 | 内部尺寸(长×宽×高) | 1 070 mm×550 mm×340 mm |
| | 容量 | 200 L |
| 主轴 | 主轴垂行程(Z) | 250 mm |
| | 主轴端面距工作台台面最大距离 | ≥510 mm |
| | 允许最大电极质量 | 50 kg |
| | 电极连接板尺寸 | 124 mm×180 mm |
| 坐标定位精度 | | X:0.014 mm Y:0.011 mm |
| 油箱 | 容量 | 30 L |
| | 液泵流量 | 60 L/mm |
| | 外形尺寸(长×宽×高) | 1 120 mm×800 mm×520 mm |

续表

| 主要规格 | | 技术参数 |
|---------------|----------------|----------------------------|
| 效率 | 最大加工电流 | 50 A |
| | 最大加工生产率 | 400 mm ³ /min |
| | 最佳加工表面粗糙度 Ra | $\leq 0.3 \mu\text{m}$ |
| | 最佳电极损耗 | $\leq 0.3\%$ |
| 电气容量 | 脉冲电源柜输入功率 | 7 kW |
| 主机外形尺寸(长×宽×高) | | 1 335 mm×1 110 mm×2 213 mm |
| 机床质量 | | 1 600 kg |
| 整机噪声 | | ≤ 70 dB |

任务二 浅型腔花纹模的电火花加工

任务描述

用电火花加工的方法制作如图 1-2-1 所示景泰蓝用的仕女头像纪念品冲压模。工件材料选用 45 钢。工件形状为椭圆或圆凹鼓形,面积约为 20 cm²,此工件是工艺美术品模具,尺寸精度无严格要求,但要求型面清洁均匀,工艺花纹清晰。



图 1-2-1 仕女头像

要完成仕女头像的电火花加工,工具电极应具备怎样的功能? 加工过程中所采用的工艺方法、设备、装夹方式及加工规准应该如何选择?

任务分析

型腔模包括锻模、压铸模、胶木模、塑料模、挤压模等。型腔模的加工比较困难,主要因为均是不通孔加工,工作液循环和电蚀产物排除条件差,工具电极损耗后无法靠主轴进给补偿精度,金属蚀除量大;其次是加工面积大,加工过程中电规准的变化范围也较大,并且由于型腔复杂,电极损耗不均匀,对加工精度影响很大。因此,对型腔模的电火花加工,既要求蚀除量大、加工速度高,又要求电极损耗低,并保证所要求的精度和表面粗糙度。