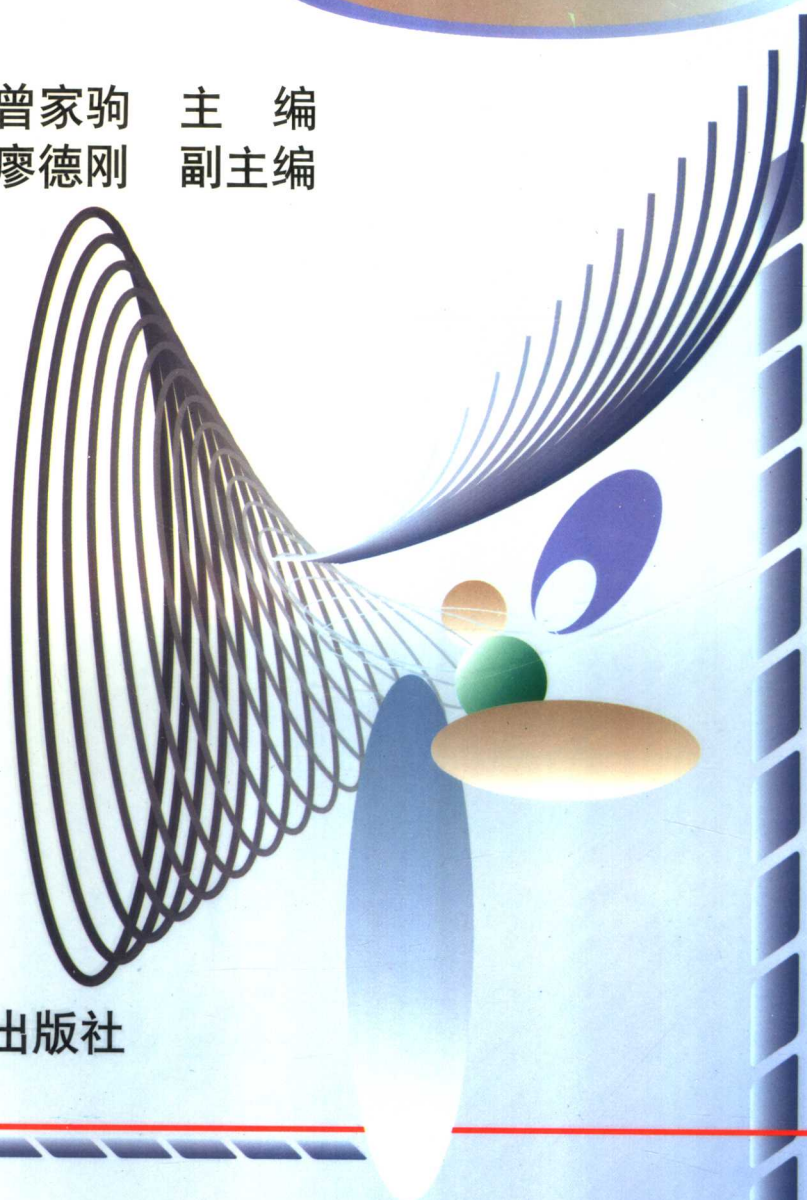


高等专科学校适用教材

机械制造技术

(现代技术部分)

曾家驹 主 编
王懋荣 廖德刚 副主编



机械工业出版社



高等专科学校适用教材

机械制造技术

(现代技术部分)

主 编	曾家驹	
副主编	王懋荣	廖德刚
参 编	胡竞湘	华煜煜
主 审	刘友才	

机械工业出版社

本书是根据国家教委批准的机制专业“大幅度”改革方案,并结合各编者学校多年来的教改经验编写而成。本书与朱正心主编的《机械制造技术(常规技术部分)》配套,是机械制造技术的现代部分。本书的内容包括特种加工、精密加工及超精密加工技术、成组技术、组合机床及其自动线,以及机械制造系统自动化。

本书可作高等工程专科学校“机械制造工艺及设备”“机电一体化”等专业的教材,也可作“电大”“职大”教材,亦可供从事机械制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造技术,现代技术部分/曾家驹主编. —北京:
机械工业出版社,1998.10(2000.5重印)
高等专科学校适用教材
ISBN 7-111-07026-7

I. 机... II. 曾... III. 机械制造工艺-高等学校-
教材 IV. TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第56745号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:钱飒飒 版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧
封面设计:姚毅 责任印制:何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000年5月第1版第2次印刷
787mm×1092mm $1/16$ ·10印张·243千字
5 001—8 000册
定价:13.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书是根据国家教委批准的机制专业“大幅度”改革方案,结合各编者学校多年来的教改经验并参考兄弟学校近期出版的一些教材编写而成。授课学时约 50 学时。

本书与朱正心主编的《机械制造技术(常规技术部分)》配套使用。其内容有:第一章特种加工,介绍电火花加工、电解加工、电解磨削、激光加工、超声波加工等特种加工方法。第二章精密加工及超精密加工,主要论述了精密加工和超精密加工的机理和方法,并对平板、角尺、蜗杆副、分度板和球等典型精密零件加工中的关键问题进行了分析。第三章成组技术,介绍成组技术的基本原理、分类编码系统、零件分类成组方法、成组夹具的设计、成组技术的工艺设计等。第四章组合机床及其自动线,对组合机床的组成及其特点、通用部件、多轴箱及组合机床总体设计、组合机床的自动线作了较详尽的介绍。第五章机械制造系统自动化,阐述了机械加工自动化的基本概念和自动化技术,包括数控机床、加工中心、计算机数控、机械手与工业机器人、柔性制造系统、计算机辅助制造、工艺过程的优化及适应控制。

本书采用了最新的国家标准和法定计量单位。书中在对现代制造技术介绍时,往往辅之以实例,使读者易读易懂。

本书为高等工程专科学校教材,也适用于职工大学和“电大”,还可供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有常德工业高等专科学校廖德刚(第一章),湘潭机电高等专科学校曾家驹(前言及第二章)、王懋荣(第三章)、胡竞湘(第四章),湖南轻工业高等专科学校华燮煜(第五章)。

本书由曾家驹任主编,王懋荣和廖德刚任副主编。

全书由湘潭机电高等专科学校刘友才主审。

由于编者水平有限,不足之处难免,恳请广大读者批评指正。

编者 1998 年 12 月

目 录

前言

第一章 特种加工	1
第一节 概述	1
第二节 电火花加工	1
第三节 电解加工和电解磨削	6
第四节 超声加工	14
第五节 激光加工	18
第六节 其他特种加工	22
思考题与习题	27
第二章 精密加工及超精密加工	28
第一节 概述	28
第二节 精密加工和超精密加工方法	29
第三节 精密元件的加工	36
第四节 精密加工和超精密加工的 特点及其发展	55
思考题与习题	57
第三章 成组技术	58
第一节 成组技术的基本原理	58
第二节 零件分类编码系统	59
第三节 零件分类成组方法	64
第四节 成组技术的工艺设计	71
第五节 成组夹具设计	80

第六节 成组生产组织形式及 设备布置设计	89
思考题与习题	99
第四章 组合机床及其自动线	100
第一节 组合机床的组成及其特点	100
第二节 组合机床的通用部件	101
第三节 组合机床的多轴箱	105
第四节 组合机床的配置形式 及其应用范围	108
第五节 组合机床的总体设计	111
第六节 组合机床的自动线	118
思考题与习题	124
第五章 机械制造系统自动化	126
第一节 概述	126
第二节 计算机数字控制制造系统	128
第三节 柔性制造系统 (FMS)	142
第四节 计算机辅助制造 (CAM)	144
第五节 机械手与工业机器人	147
第六节 工艺过程的优化及适应控制	149
复习与思考题	151
附录 JLBM-1 分类系统	152
参考文献	156

第一章 特种加工

第一节 概 述

传统的切削加工是用一种比工件硬度更高的材料作刀具，对工件施以切削力，利用机械能切除工件上多余材料的一种加工方法。随着生产的发展和科学实验的需要，加工中各种新问题相继产生，一方面是特殊材料的加工问题，如耐热钢、高强度合金钢、金刚石、宝石、锗、硅等各种高硬度、高强度、高脆性的金属及非金属；另一方面是特殊廓形和特殊要求的零件加工问题，如喷汽涡轮机叶片、喷油嘴、模具及有些高精度低刚度零件等。要解决这些问题，仅仅依靠传统的加工方法就很难实现，甚至根本无法实现。特种加工就是在这种前提条件下产生和发展起来的。

特种加工是指不仅利用机械能，而且更主要是利用其他能量（电、化学、光、声、热）来去除工件上多余材料的一类新的加工方法。这类加工方法与传统的切削加工方法有质的区别。特种加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力，工具硬度可以低于被加工材料的硬度。因此，特种加工可解决传统加工方法难以解决甚至无法解决的问题。

特种加工的形式较多，一般按用途可分为尺寸加工和表面加工两大类，每类可按能量来源和作用原理分为多种不同的工艺方法，见表 1-1。

本章主要介绍生产中应用较为广泛的一些特种加工方法的基本原理、规律、特点及应用范围。

表 1-1 特种加工方法分类

用 途	加工方法	能量形式	用 途	加工方法	能量形式
尺寸加工	电火花加工	电、热能	尺寸加工	化学腐蚀加工	化学能
	电解加工	电、化学能		导电切削	热、机械能
	电解磨削	电、化学、机械能	表面加工	电解抛光	电、化学能
	超声波加工	声、机械能		化学抛光	化学能
	激光加工	光、热能		电火花强化	电、热能
	电子束加工	电、热能		液体磨料抛光	机械能
	等离子束加工	电、热能			

第二节 电火花加工

1870 年，英国科学家普里斯特利（Priestley）最早发现电火花对金属的腐蚀作用。之后，前苏联科学家拉札连柯（Lazarenko）等把电火花的破坏作用利用起来，从而开创了一种可控的金属加工方法，并于 1943 年制成了第一台电火花腐蚀设备并开始应用于生产实践。多年来，这项新工艺得到了迅速发展。

一、电火花加工的基本原理与规律

电火花加工 (EDM) 是在一定的介质中通过工具电极和工件电极之间的脉冲放电的电蚀作用对工件进行加工的方法。

1. 电火花加工的基本原理

电火花加工原理如图 1-1 所示。安装在工作液槽中的工件 1 与装在主轴端部的工具电极 4 分别同脉冲电源 2 的两输出端相联接。主轴自动进给调节装置 3 使工具与工件间经常保持一很小的放电间隙, 当脉冲电压加到两极之间时, 便会在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿, 在该局部产生火花放电, 瞬时高温使工件和工具表面都蚀除掉一小部分金属, 分别形成一个小凹坑, 如图 1-2 所示。图 1-2a 表示单个脉冲放电后的电蚀坑, 图 1-2b 表示多次脉冲放电后的电极表面。被蚀下的金属颗粒掉进工作液中冷却、凝固并被冲走。当第一个脉冲放电结束后, 经过一个脉冲间隔时间, 使工作液恢复绝缘后, 第二个脉冲电压又加到两极上, 也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。随着高频、重复放电, 工具电极不断向工件进给, 就可将工具形状复制在工件上, 从而加工出所需的零件。

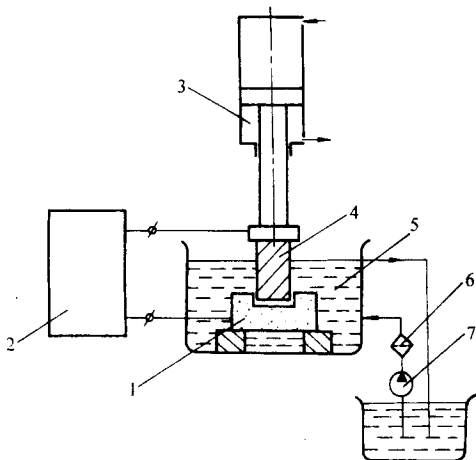


图 1-1 电火花加工原理示意图

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

2. 电火花加工的基本规律与加工质量

实验表明, 每一次放电电蚀加工过程是电力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合作用的结果。这一过程大致可分为介质的击穿与放电、能量转换与分散、蚀除产物的抛出和间隙介质的消电离四个阶段。为保证产品加工质量, 更好地应用电火花加工方法, 必须掌握电火花加工中的有关基本规律。

电火花加工的核心问题是放电腐蚀, 它直接影响了生产率, 影响了生产成本和产品质量。

在电火花加工过程中, 不仅工件被蚀除, 工具电极也同样被蚀除, 但程度不一样; 即使两极的材料相同, 例如钢加工钢, 正负电极的电蚀量也是不等的。这种因正、负极性不同而电蚀量不一样的现象叫做极性效应。它是影响放电腐蚀的重要因素。一般来说, 在短脉冲精加工时, 常把工件接脉冲电源正端, 工具电极接负端, 即所谓“正极性”加工, 而长脉冲粗加工则采用“负极性”加工, 而且, 生产中常用不同的电极材料来提高其极性效应, 以保证在较高生产率条件下工具电极损耗较少。表 1-2 所示为常用电极材料及其选择。

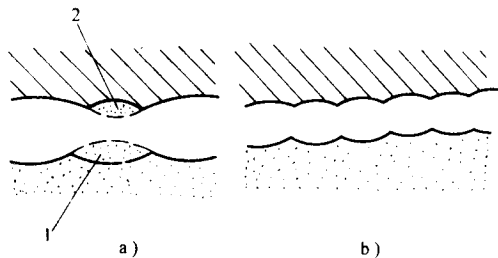


图 1-2 电火花加工表面局部放大图

1—工件上被蚀除掉的材料
2—工具电极上被蚀除掉的材料

除极性效应外, 影响放电腐蚀的因素还有电参数、金属材料的热学常数、工作液等。其中电

参数是影响工件电蚀量（当然也影响工具电极损耗），即生产率的重要因素。提高脉冲频率和增加单个脉冲能量都可较显著增大加工速度，即增加电蚀量。提高脉冲频率主要靠缩小脉冲停歇时间和压窄脉冲宽度，但若频率过高，脉冲停歇时间过短，会使加工区工作液来不及消电离、排除电蚀物及气泡来恢复其介电性能，以致形成破坏性的稳定电弧放电，使电火花加工不能正常进行。增加单个脉冲能量主要靠加大脉冲电流和增大脉冲宽度。值得注意的是，尽管此时可以提高加工速度，但同时会使表面粗糙度值增大和降低加工精度，因此，一般只用于粗加工或半精加工的场合。

表 1-2 常用电极材料的选择

材料	磨损比	金属切除率	制造难易程度	成本	用 途
铜	低	高（对粗加工）	容易、能喷涂	高	可用于所有金属
黄铜	高	高（仅对精加工）	容易	低	可用于所有金属
钨	最低	低	困难	高	仅用于钻小孔
钨铜合金	低	低	困难	高	用于较精密工件
铸铁	低	低	容易	低	仅用于少数材料
钢	高	低	容易	低	仅用于光整加工
锌基合金	高	高（对粗加工）	容易模铸	低	能用于所有金属
石墨铜	低	高	很脆弱，困难	高	能用于所有金属

就电火花加工工艺而言，影响加工精度的主要因素有放电间隙大小及其一致性，工具电极的损耗及其稳定性等因素。

工具电极和工件表面之间必须经常保持一定的合理间隙。若间隙过小，则很容易形成短路接触而不产生火花放电；若间隙过大，则对加工精度有较大影响，太大时甚至不能击穿介质，因此在加工过程中，必须有如图 1-1 中的工具电极自动进给调节装置 3。放电间隙尤其其对复杂形状的加工表面影响较大，因其棱角部位电场强度分布不均。间隙越大，对复杂形状的加工表面影响越严重。为减少加工误差，应采用较弱小的加工规准（加工规准即工艺参数，如电规准中电压、电流、脉宽、脉间等），缩小放电间隙，这样不但能提高仿形精度，而且放电间隙愈小，可能产生的间隙变化量也愈小。另外，还必须通过修正工具电极的尺寸或其他补偿措施来尽可能使加工过程稳定，保持间隙的一致性，一般精加工时放电间隙只有 0.01mm（单面），而粗加工时则可达 0.5mm 以上。

工具电极的损耗对尺寸精度和形状精度都有影响。电火花穿孔加工时，电极可以贯穿型孔而补偿电极的损耗，而型腔加工时则无法采用这一方法，精密型腔加工时可采用更换电极的方法。“二次放电”也是影响电火花加工形状精度的重要因素。它是指已加工表面上由于电蚀产物等的介入而再次进行的非正常放电。它集中表现在加工深度方向产生斜度（图 1-3）和加工棱角边变钝等方面。

电火花加工表面和机械加工表面不同，它是由无数小坑和光滑的硬凸边所组成的，特别有利于保存润滑油。与机械加工相比，在相同的表面粗糙程度和润滑情况下，表面的润滑性能和耐磨损性能均比机械加工表面好。对电火花加工表面粗糙程度影响最大的是单个脉冲能量，因为脉冲能量大

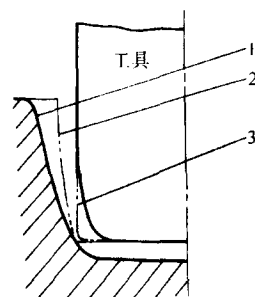


图 1-3 电火花加工时的加工斜度

1—实际工件轮廓线 2—电极有损耗
而不考虑二次放电时的工件轮廓线
3—电极无损耗时工具轮廓线

时, 每次放电蚀除量大, 放电凹坑既大又深, 使表面粗糙度值变大。这表明, 电火花加工的表面粗糙度值和加工速度之间存在着很大的矛盾, 如从 $R_a 2.5\mu\text{m}$ 提高到 $R_a 1.25\mu\text{m}$ 时, 加工速度下降十多倍。工件材料对加工表面也有影响, 熔点高的材料(如硬质合金), 在相同能量下加工的表面粗糙度值要比熔点低的材料(如钢)小, 当然加工速度会相应下降。另外, 精加工时, 工具电极的表面粗糙度也将影响到加工工件表面粗糙度, 如石墨电极很难得到非常光滑的表面, 因此, 用它作工具电极时所加工工件表面粗糙度值较大。

工作介质是产生放电的基本条件, 目前主要是采用液体介质。它形成火花击穿放电通道, 并在放电结束后迅速恢复间隙的绝缘状态, 对放电通道产生压缩作用, 帮助电蚀产物的抛出和排除, 并使工具、工件冷却。因此, 作为电火花加工用的液体介质应具有高的介质强度, 而且一旦达到击穿电压时应在尽可能短的时间内完成电击穿, 放电过后应能迅速使火花间隙消除电离, 同时还应具备较好的流动性、冷却效果和经济性。目前广泛使用的是轻质碳氢化合物油类、变压器油、石蜡油、煤油、还有蒸馏水等。表 1-3 列举了在加工钢时, 采用黄铜为工具时的几种液体介质的性能比较。

表 1-3 几种液体介质性能比较

液体介质	加工效率 (去除的金属材料) / $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	磨损比 ^①	液体介质	加工效率 (去除的金属材料) / $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	磨损比 ^②
碳氢化合物油	39.0	2.8	自来水	57.7	4.1
蒸馏水	54.6	2.7	四乙二醇	102.9	6.8

① 磨损比 = $\frac{\text{单位时间内工件材料切除掉的体积}}{\text{单位时间内电极材料所消耗的体积}}$

二、电火花加工的特点、分类及应用

电火花加工的主要特点是脉冲放电的能量密度很高, 可以加工用传统的机械加工方法难于加工或无法加工的特殊材料、复杂形状的工件。加工时工具电极不与工件直接接触, 两者之间的宏观作用力小, 不受工具和工件刚度的限制, 有利于实现微细加工, 而且工具电极材料可以比工件材料软, 工具电极较易制造。因此, 电火花加工已广泛应用于宇航、电子、电机电器、精密机械、汽车拖拉机、仪器仪表、轻工等各个机械制造行业, 尤其在模具制造业中已成为一种不可缺少的加工方法。

电火花加工方法按在加工过程中工具和工件相对运动的方式与用途不同, 大致可分为电火花穿孔成形加工、电火花线切割、电火花磨削和铰磨、电火花同步回转加工、电火花表面强化与刻字五大类, 见表 1-4。前四类主要用于改变零件形状和尺寸, 后者则主要用于改善和改变零件表面性质。

在各类电火花加工中, 电火花穿孔成形加工和电火花线切割应用最广泛, 前者的加工工作原理已在前面的图 1-1 中作了介绍, 而后者则是在前者基础上发展起来的。电火花线切割加工的基本原理与电火花穿孔成形加工一样, 也是利用工具对工件进行脉冲放电去除金属, 只是电火花线切割无需制成成形工具电极, 而是采用细的电极丝(铜丝、钨丝或钼丝)对工件进行切割成形的。图 1-4 为电火花线切割加工原理图。工作时由脉冲电源 5 提供能量, 工具电极丝 4 和工件之间浇有工作液介质, 工件 6 由工作台带动在水平面两个坐标方向各自按预定的控制程序、根据放电间隙状态作伺服进给移动而完成各种所需廓形轨迹。传动轮 1 带动电极丝作正反向交替移动, 并不断与工件产生放电, 从而把工件切割成形。

表 1-4 电火花加工工艺方法分类

工艺类别	特 点	用 途	备 注
电火花穿孔成形加工	1. 工具和工件间主要只有一个相对的伺服进给运动 2. 工具为成形电极,与被加工表面有相同的截面或形状	1. 型腔加工;加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件 2. 穿孔加工;加工各种冲模,挤压模,粉末冶金模,各种异型孔及微孔	约占电火花机床总数的 40%。 典型机床有 D7125、D7140 等电火花成形机床
电火花线切割加工	1. 工具电极为顺电极丝轴线移动的线电极 2. 工具与工件在两个水平方向同时有相对伺服进给运动	1. 切割各种冲模和具有直纹面的零件 2. 下料,截割和窄缝加工	约占电火花机床总数的 50%。 典型机床有 DK6725、DK6732 数控电火花线切割机床
电火花内孔、外圆和成形磨削	1. 工具与工件有相对的旋转运动 2. 工具与工件间有径向和轴向的进给运动	1. 加工高精度、良好表面粗糙度的小孔,如拉丝模、挤压模、微型轴承内环、偏心钻套等 2. 加工外圆,小模数滚刀等	约占电火花机床总数的 34%。 典型机床有 D6310 电火花小孔内圆磨床等
电火花同步回转加工	1. 成形工具与工件均作旋转运动,但二者角速度相等或成整数倍,相对接近的放电点可有切向相对运动速度 2. 工具相对工件可作纵、横向进给运动	以同步回转、倍角速度回转等不同方式,加工各种复杂型面的零件,如高精度的异形齿轮、精密螺旋环规、高精度、高对称度,良好表面粗糙度的内、外回转体表面等	约占电火花机床总数的 1%~2%。典型机床有 JN-2、SN-8 内外螺纹加工机床
电火花表面强化,刻字	1. 工具在工件表面上振动 2. 工具相对工件移动	1. 模具刃口,刀、量具刃口表面强化和镀覆 2. 电火花刻字、打印记	约占电火花机床总数 2%~3%。典型机床有 D9105 电火花强化机等

与电火花成形加工相比,电火花线切割加工具有其显著特点。首先,它省掉复杂的成形电极,大大降低了设计和制造费用及周期。因电极丝极细(一般 0.08~0.15mm),可以加工微细异形孔、窄缝和复杂形状的工件,同时也使得切缝很窄,工件加工量小,材料利用率高,生产率高。交替移动的电极丝使得其单位长度损耗较少,对加工精度影响较小。另外,电火花线切割易于实现微机控制,自动化程度高,但它不能加工盲孔类零件表面和阶梯成形表面。

随着生产的发展,电火花加工领域不断扩大,除了前述两种常用加工方法外,近些年又出现了许多其他方式的电火花加工方法,如表 1-5 所示。

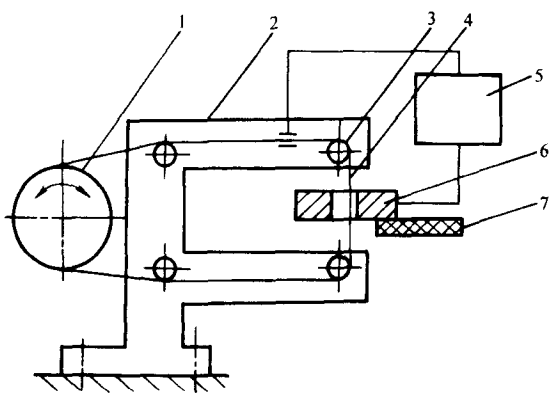
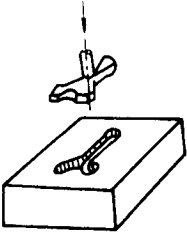
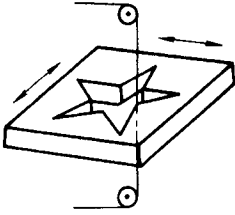
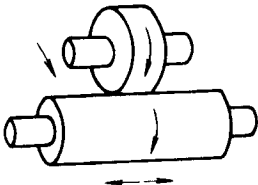
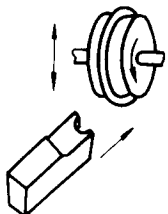
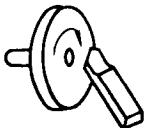
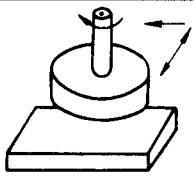
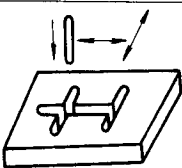
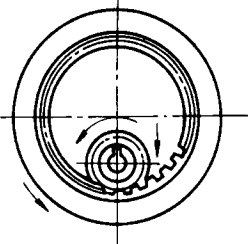
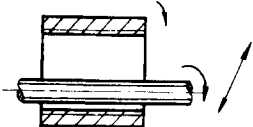
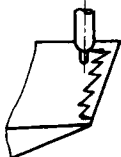
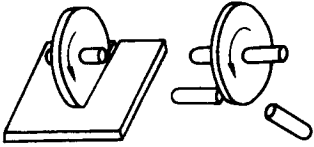


图 1-4 电火花线切割加工原理图

1—传动轮 2—支架 3—导向轮 4—工具电极丝(钼丝)
5—脉冲电源 6—工件 7—绝缘底板

表 1-5 电火花加工方法及其运动组成

	成形加工 工件一般不动，成形工具电极相对工件进给		线切割 工件作成形运动，工具电极丝作正反向交替移动
	外圆磨削 工具电极作旋转和直线运动，工件作旋转和往复运动		成形刀具的刃磨 工具电极作旋转和直线运动，工件作直线运动
	内圆磨削 工件作旋转、轴向运动并作径向进给		刃磨 工具电极作旋转运动，刀具作横向往复运动，纵向直线运动
	平面磨削 工具电极作旋转运动，工件在三个互相垂直方向上作直线运动		铣沟槽 工具电极作旋转和一个方向直线运动，工件作两个互相垂直方向的直线运动
	回转齿轮加工 工具电极与工件作共轭范成运动，工具电极作径向进给运动		回转螺纹加工 工具电极作与工件同步旋转运动，工件作径向进给运动
	金属表面强化 电极振动，并沿金属表面作进给运动		材料切断 工具电极作旋转和直线运动

第三节 电解加工和电解磨削

电解加工 (ECM) 又称电化学加工，是继电火花加工之后于 20 世纪 60 年代发展起来的一项新工艺，目前已广泛应用于枪炮、航空、汽车拖拉机等制造工业和模具制造行业。

一、电解加工的基本原理与规律

电解加工是利用金属在电解液中可以产生阳极溶解的电化学原理来进行尺寸加工的。这种电化学现象在机械工业中早已被用来实现电抛光和电镀，电解加工是在电抛光基础上发展起来的。

图 1-5 为电解加工过程示意图。加工时工件 3 接直流电源 1 的正极，成形工具 2 接直流电源负极，两极之间电压一般为 5~25V 的低电压，工具向工件作缓慢进给，使两极之间保持一定的间隙 (0.1~1mm)，具有一定压力的电解液从间隙中高速 (5~50mm/s) 流过，使两极间形成导电通道，并在电源电压下产生电流，这时阳极工件的金属被逐渐电解腐蚀，电解产物被电解液带走。

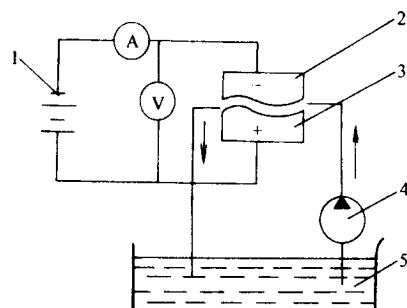


图 1-5 电解加工示意图

1—直流电源 2—工具阴极 3—工件阳极
4—液压泵 5—电解液

图 1-6 为电解加工原理图。电解加工刚开始时工件毛坯形状与工具形状是不同的，电极间隙不等（图 a），这样间隙小的地方电场强度高，电流密度大（即图中竖线密），电解液的流速也较高，因此金属溶解速度也较快；反之，工具与工件距离较远处加工速度较慢，随着工具不断向工件进给，间隙大致相同，电流密度趋于一致时，工件阳极表面的形状就逐渐与阴极形状相近，这样便完成工件的电解加工。

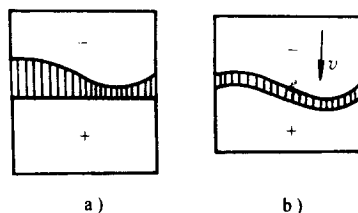


图 1-6 电解加工成形原理

电解液是电解加工的关键因素。电解液的种类、浓度、温度、压力及流速等直接影响电解过程，从而影响生产率和加工质量。其主要作用是：①作为导电介质传递电流；②在电场作用下进行电化学反应，使阳极溶解能顺利而有控制地进行；③及时带走电解产物及热量，起更新与冷却作用。一种高效电解液应具有高的电导率，低粘度和高的比热容，较好的化学稳定性，并能阻止在工件表面上形成钝化膜，无腐蚀性和毒性，并且有较好的经济性。目前常用的电解液及其特性见表 1-6。NaCl 水溶液是比较令人满意的一种，下面以它为例简单分析电解过程中的电极反应。

表 1-6 电解液及其特性

电 解 液	材 料	优 点	缺 点
NaCl 或 KCl ($\rho \leq 0.25$)	钢 和 铁 基合金	便宜、无毒、无易燃性，能用于各种材料。使加工面向周围表面过渡产生光滑圆角。在高浓度时，导电率易于控制。电流效率高	从光制表面的四周切除材料。选择性地趋向于加工不锈钢的晶粒边界 电导率易受温度影响
NaNO ₃ ($\rho \leq 0.5$)	钢 和 铁 基合金	表面粗糙度值小 较少的高散加工	比用 NaCl 的费用高，且易燃。好的电导率需要高的浓度。电阻率能随产生流线的流动速度而变化，要求更高的电压，电导率受温度影响

(续)

电 解 液	材 料	优 点	缺 点
NaClO_3 ($\rho=0.2\sim0.5$)	钢 和 铁 基合金	表面非常光滑明亮,可以阻止后续的腐蚀作用 电导率相对地不受温度影响。无离散加工,可用于精确加工	成本高、有毒、易燃、有火灾危险。要求特殊的处理和储藏。在较低的浓度时,电流效率低,为达到最佳效果,要求高的电压(约20V),在小于9V时无加工能力
NaCl ($\rho=0.1$) + 柠檬酸($\rho=0.01$)	钢 和 铁 基合金	能防止金属氢氧化物沉淀物的形成。适用于间隙很小的工序,使复杂的工件轮廓清楚。能使用较低的电解液压力	成本较高,电解液必须经常更换
NaCl ($\rho\leq 0.2$) 或 NaNO_3 ($\rho\leq 0.5$)	灰铸铁	表面粗糙度值小	必须采用大的加工间隙(0.50~0.80mm),使石墨颗粒清除干净
NaCl ($\rho\leq 0.1$) + NaNO_3 ($\rho\leq 0.1$)	镍 和 钴 基合金	便宜的混合物,表面粗糙度值小	工件表面上产生流线,加工表面具有不多的灰色粘附物
NaNO_3 ($\rho\leq 0.5$)	镍 和 钴 基合金	表面粗糙度值小	与上基本相同,而且比上一种电解液贵,有易燃性,需较高的工作电压
NaCl ($\rho\leq 0.25$)	镍 和 钴 基合金	产生光滑表面,表面不需要再清洗	用该电解液,晶间腐蚀会较大地影响工件的疲劳强度,与加工区邻近的表面有点蚀的危险
NaCl ($\rho\leq 0.25$) + NaF ($\rho\leq 0.002$)	镍 和 钴 基合金	呈现不规则黑色氧化膜的材料,表面粗糙度值一般较小	与 NaCl 的缺点相同
NaCl ($\rho\leq 0.15$) + NaBr ($\rho=0.05$) + NaF ($\rho=0.002$)	钛合金	表面粗糙度值小,表面氧化物膜层的特性不受流速的影响,易于控制轮廓尺寸	较高的电压,减少钝化的机会,工件表面上残留疏松的灰色氧化物磨层,与加工区相邻的表面有被电蚀的危险
NaCl ($\rho\leq 0.1$)	钛合金	比上述电解液产生的表面粗糙度值更小,加工表面无任何氧化物膜	要求电压高,流线会在工件表面上形成。加工时表面更易产生钝化膜,难于保持精确的轮廓尺寸,靠近加工区的表面上易发生点蚀

① ρ 为物质的质量浓度,单位 kg/L。

NaCl 是一种强电解质,溶于水后几乎全部被电解,弱电解质水有少量电解,因此在电解质溶液中存在着 H^+ 、 OH^- 、 Na^+ 、 Cl^- 四种离子。外加直流电源使工件(钢铁材料)为阳极,工具为阴极,通电后,溶液在电场力的作用下负离子 Cl^- 、 OH^- 向阳极移动,而阳极表面的铁原子在电源正极电压的作用下放出电子成为正二价铁离子(其电极电位最负)进入电解液中,便会与 OH^- 离子化合生成墨绿色的絮状沉淀物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 随电解液的流动而被带走,并逐渐为电解液及空气中的氧氧化为黄褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀。溶液中的 Na^+ 、 H^+ 向阴极移动,由于 H^+ 得电子的能力比 Na^+ 强(即电极电位最正),故在阴极得到电子还原为氢原子,进而结合成氢气放出。可见,在理想情况下,阳极铁不但以 Fe^{+2} 形式被溶解,水被分解消耗,因而电解液浓度稍有变化。电解液中的 Cl^- 和 Na^+ 起导电作用,本身并不消耗,所以 NaCl 电解液使用寿命

长,但钢铁中往往含有多种元素,如在碳钢中存在有较多 Fe_3C 时,可能有少量的氯气或氧气析出,它们不但消耗电量,减少金属蚀除量,而且使表面变粗糙。

影响电解加工生产率的因素很多,归纳起来主要有两个方面,即电量和加工间隙。

电解时电极上溶解或析出物质的量(质量或体积)与电解电流大小和电解时间成正比,亦即与电量成正比,这一规律即所谓法拉第电解定律。实际生成中一般不用金属蚀除量来衡量生产率,而是用蚀除速度衡量。电解加工时某处的蚀除速度与该处的电流密度成正比,电流密度越高,生产率也越高。电解加工时的平均电流密度约为 $10\sim 100\text{A}/\text{cm}^2$,电解液流速较高时,可选用较高的电流密度。若电流密度过高,将会出现火花放电,析出氯、氧等气体,并使电解液温度过高,甚至在间隙内会造成沸腾气化而引起局部短路,实际电流强度又取决于电源电压,电极间隙及电解液的导电率。

电极间隙越小,电解液的电阻也越小,电流密度就越大,因此蚀除速度越高,生产率越高。即蚀除速度与电极间隙成双曲线反比关系。图 1-7 为不同电压时蚀除速度 v_a 与加工间隙 ΔL 之间的双曲线图形。

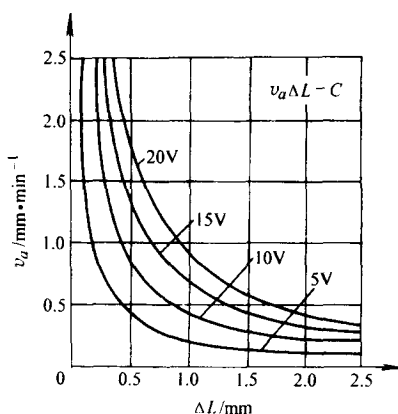


图 1-7 v_a 与 ΔL 间的双曲线关系

加工间隙的大小,不仅影响蚀除速度,更主要影响工件尺寸和成形精度。实际电解加工中,加工间隙往往要受进给速度大小的影响。假定电解加工刚开始的起始间隙为 ΔL_0 ,如果阴极固定不动,则加工间隙会因工件有蚀除而逐渐增加,从而反过来会使蚀除速度逐渐减小,因此阴极必以一定速度向工件进给才能维持正常加工。若阴极以恒定速度 v_c 进给,则加工间隙逐渐减小,蚀除速度将相应增大,随着时间推移,总会出现工件的蚀除速度 v_a 与阴极的进给速度 v_c 相等而达到动态平衡的情况,此时的加工间隙将稳定不变,称之为平衡间隙 ΔL_b 。换句话说,平衡间隙是指当加工过程达到稳定时的加工间隙,当阴极进给速度 v_c 较大时,达到平衡时的间隙 ΔL_b 较小,在一定范围内它们成双曲线反比关系,能互相平衡补偿,但若进给速度 v_c 过大,平衡间隙过小时,将引起局部堵塞,造成火花放电或短路。平衡间隙一般为 $0.12\sim 0.8\text{mm}$,比较合适的为 $0.25\sim 0.3\text{mm}$ 左右。实际上的平衡间隙主要取决于选用的电压和进给速度。

利用平衡间隙理论可以计算加工过程中各种电极间隙,如端面、斜面、侧面间隙。这样,可以根据阴极的形状来推算加工后工件的形状和尺寸,反过来也可以根据工件形状尺寸设计计算阴极形状尺寸。同时还可以利用它选择各种加工参数,如电极间隙、电源电压、进给速度等。

平衡间隙理论是分析各种加工间隙的基础,凡对平衡间隙有影响的因素,如阴极进给速度、加工电压、电流效率(实际金属蚀除量占理论计算蚀除量的百分比)、工具形状、电解液流向等都会影响加工间隙,也将影响电解加工的成形精度。

二、电解加工的特点及应用

1. 电解加工的特点

1) 加工范围广。电解加工能加工各种高强度、高硬度、高韧性的导电材料,如硬质合金、淬硬钢、不锈钢、耐热合金等难加工材料。

2) 生产效率高, 电解加工是特种加工中材料去除速度最快的方法之一, 约为电火花加工的 5~10 倍。

3) 加工过程中无机械切削力和切削热, 没有因为力与热给工件带来的变形, 可以加工刚性差的薄壁零件, 加工表面无残余应力和毛刺, 能获得较小的表面粗糙度值 (一般为 $R_a 1.25 \sim 0.2 \mu\text{m}$) 和一定的加工精度 (平均尺寸误差约 $\pm 0.1 \text{mm}$)。

4) 加工过程中工具阴极理论上无损耗, 可长期使用并保持其精度。

5) 电解加工不需要复杂的成形运动就可加工复杂的空间曲面, 而且不会像传统机械加工 (如铣削) 那样留下条纹痕迹。

6) 电解加工不能加工非导电材料, 较难加工窄缝、小孔及尖角。

7) 对复杂加工表面的工具电极的设计和制造比较费事, 不利于单件、小批生产。

8) 虽然用电解加工制造出来的工件无应力, 但其疲劳强度约降低 10%~20%, 因此对疲劳强度要求较高的工件可用电解加工后的喷丸硬化来恢复强度。

9) 电解加工附属设备较多, 占地面积大, 投资大, 且设备易腐蚀和生锈, 需采取一定的防护措施。

10) 电解加工的加工缺陷主要有空蚀、产生亮点、加工精度低等。

表 1-7 列出了加工中常见缺陷检查情况, 并介绍了修正方法。

表 1-7 电解加工缺陷检查表

缺 陷	部 位	原 因	修 正 次 序
停机无损坏		不足以损坏工具的小火花	减小保护电路的灵敏度, 以加速破坏工具上有缺陷的部位
小的不规则凸起区, 常有光亮的工件表面, 好像上面的火花损伤一样。 均匀的花纹凸起区域 (像腐化的壳层)	工具的几何形状急剧变化或者急剧地扩大了流动路程的部位	空蚀	减小电解液的供给压力, 在工具上制出尖锐的半径, 增加工具进给量 重新设计工具, 使电解液的流动成渐缩状
工件表面上出现条纹, 波纹	工具上流体进口附近或在渐扩流动区域	阴极电位对流动速度变化敏感	增加电解液的供给压力, 减小工具进给速率, 降低电压以维持相同的间隙, 变换电解液
表面较粗糙	与工具进给方向成最小角的表面	材料各晶相加工不均匀	增加工具进给速率, 增加电压以保持间隙尺寸, 稀释电解液和增加电压
表面粗糙	所有表面	材料各晶相加工不均	交换电解液
加工精度低	工件所有表面	工具调整不当或工具轮廓误差	复查工具轮廓精度和调整工具轮廓精度
	与原始材料形状有关的位置	在电解加工之前零件上公差适当	可修正零件材料的公差

(续)

缺 陷	部 位	原 因	修 正 次 序
加工精度低	与工具进给方向成最小角的表面上精度差	间隙不当或工具轮廓设计不正确	加工时要检查设计间隙, 校核设计工具轮廓的计算
	不精确程度随电解液流程的增加而增加	垂直加工面上电解液电导率的变化	增加电解液的供给压力, 减少工具进给率
	在工件边界或工件尖锐部位	电场加工电流的聚集	把工具非加工区绝缘, 把过量材料加到电场聚集区的工件毛坯上
	在零件的被孤立的细截面上	加工电流经过工件时有电压损失	在不准确区域附近, 采用附加的接点, 采用最大可能的加工电压和稀释电解液, 减少工具的进给速率, 并用适当稀释的电解液, 以保持间隙的大小
工件中无规则的误差	任意区域	电接点的过热造成挠曲	检查电接点的烧坏程度。增加接点压力
	发生在相似的区域	因电解液的压力或夹紧力, 使零件挠曲或产生残余压力	在工件加工后不夹紧时检查挠曲, 工件在加工前消除应力, 重新调整夹具的夹紧力, 提供附加的工件支撑克服电解液的压力
火花损坏工具或工件	电解液进入加工间隙的附近	在电解液中有外来的粒子	检查过滤器, 电解液管道, 密封和接头等的内部情况
	在某些其他缺陷的部位上	在工具上的绝缘损坏	检查工具的绝缘表面, 找出并消除主要的缺陷

2. 电解加工的应用

电解加工主要用于切削加工困难的领域, 如难加工材料、形状复杂的表面、刚性较差的薄板等。常用的有电解穿孔、电解成形、电解去毛刺、电解切割、电解抛光、电解刻印等。图 1-8 列举了几种电解加工的应用。

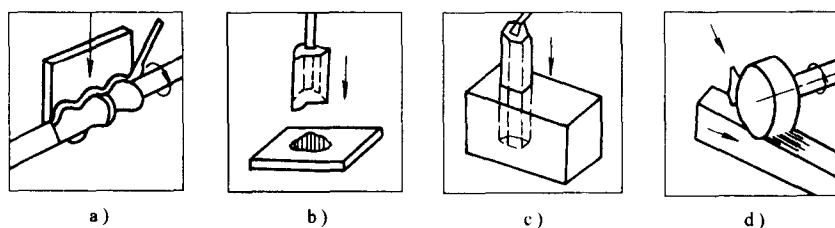


图 1-8 电解加工的应用

a) 车削 b) 薄板上钻型孔 c) 钻深孔 d) 铣削

(1) 电解穿孔 对于一些形状复杂、尺寸较小的型孔(四方、六方、椭圆、半圆等形状的通孔和盲孔)是很难采用机械加工方法得到的。但若采用电解加工则比较容易解决。因此, 它已广泛应用于枪、炮管内孔和膛线(来复线)等的加工。型孔加工大多采用单面进给方式,

为避免形成锥度，阴极（工具）侧面必须绝缘，一般用环氧树脂作为绝缘层与阴极侧面粘牢（图 1-9）。电解穿孔时工作液均匀进入工作区，使工件和工具都浸在电解液中。

（2）电解成形 电解加工可以使用成形阴极（工具）对复杂工件型腔一次成形，生产率高，表面粗糙度值小，但加工精度不如电火花加工高，它易受电场、流场、电解液状态及进给速度等影响，生产中常根据均匀间隙理论初步设计工具形状，然后通过多次实验修正以达到精度要求。目前多用于锻模型腔加工，尺寸精度可控制在 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 的范围。如汽车、拖拉机制造中的连杆（图 1-10）、曲轴、十字轴、凸轮轴等零件以及汽轮机叶片、链轮等加工。

（3）电解去毛刺 机械加工中去毛刺的工作量很大，尤其去除硬而韧的金属毛刺，需占用很多人力。电解去毛刺可大大提高工效和节省费用，并可减少对已加工表面的损坏。因此，广泛应用于汽车、拖拉机等大批量生产行列。美国很早就已应用于真空管电极的去毛刺加工。电解去毛刺时，电极静止不动，把工件绝缘起来，仅让有毛刺部分露出，用与工件形状相应的工具把毛刺蚀除掉。去毛刺电压可较高些（如 70V ），这样，电极间隙可较大些，以防短路。可利用旋转工作台，既提高效率又可实现自动化，如图 1-11 所示。

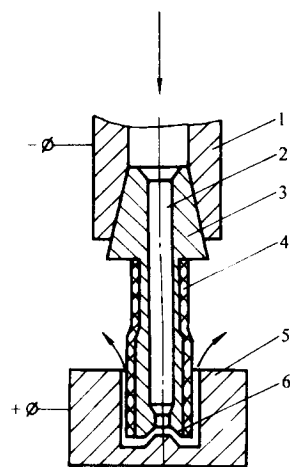


图 1-9 单面进给式型孔加工示意图

1—机床主轴套 2—进水孔 3—阴极主体 4—绝缘层 5—工件 6—工作平面

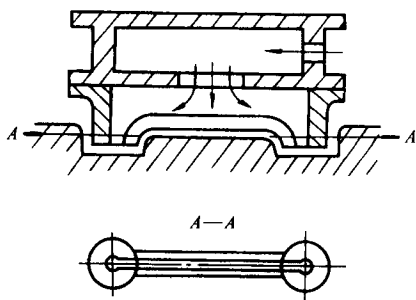


图 1-10 连杆型腔模的电解加工

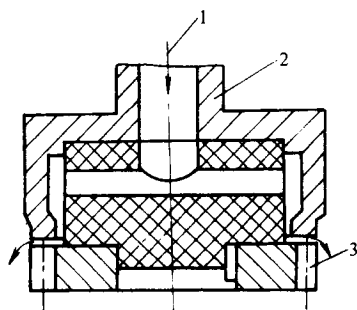


图 1-11 齿轮的电解去毛刺

1—电解液 2—阴极工具 3—齿轮工件

三、电解磨削

电解磨削（ECG）是电化学腐蚀与机械磨削作用相结合的一种复合加工方法，比电解加工具有较高的加工精度和较小的表面粗糙度值，比机械磨削有较高的生产率。

1. 电解磨削的基本原理

电解磨削是一种特殊形式的电解加工，其工作原理如图 1-12 所示。高速旋转的导电砂轮 1 通过主轴及电刷 3 与低压（ $5 \sim 15\text{V}$ ）直流电源 4 的负极相连，放在工作台 8 上的工件 9 接电源正极。砂轮中的绝缘材料均匀地突出在砂轮表面上，当工件被压而与磨粒接触时，在砂轮上的磨粒的高度便确定了阳极（工件）与阴极（砂轮）之间的有效间隙（图 1-13），电解液箱 7 中的电解液经泵 6、过滤器 5 送入到间隙区，这样，电流接通后工件与砂轮形成回路，工