

电解加工技术

国防工业出版社

81.31
406
C.2

电 解 加 工 技 术

哈尔滨工业大学机械制造工艺教研室 编

2021/9/18

国防工业出版社

内 容 简 介

本书深入浅出、较系统地介绍了电解加工的基本原理,包括金属阳极溶解的机理,电场、流场的分布规律对加工精度、生产率的影响;并扼要地介绍了电解液、过滤系统、电解加工机床和混气电解加工、加工工艺及其应用。

本书可供从事电解加工工作的青年工人和技术人员阅读。

本书主要由刘晋春、陆纪培编写。

电解加工技术

哈尔滨工业大学机械制造工艺教研室 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 57/8 125千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数: 00,001—34,000册

统一书号: 15034·1810 定价: 0.50元

目 录

主要符号	1
概 述	3
第一章 电解加工的基本原理	5
§ 1 电解加工过程	5
§ 2 电解质溶液	7
§ 3 水的电离平衡、pH 值	12
§ 4 电解质溶液的导电性	14
§ 5 电极电位	16
§ 6 电极的极化	22
§ 7 金属的钝化	28
§ 8 电解加工中两极间的电压分布	31
§ 9 电解加工过程中的电极反应	33
第二章 电解加工用的电解液	39
§ 1 对电解液的基本要求	39
§ 2 电解液的种类及特性	40
§ 3 电解液的选择	48
§ 4 电解液参数对电解加工过程的影响	52
第三章 电解加工过程中的流场	55
§ 1 伯努利方程及其在电解加工中的应用	55
§ 2 电解液的流速及流量	58
§ 3 电解加工中的流场	62
§ 4 阴极出水口的布局	70
§ 5 电解液的压力、流速、流量的测量	73

34896

第四章 电解加工中的一些基本规律	78
§ 1 工件的蚀除速度	78
§ 2 影响生产率(即蚀除速度)的因素	81
§ 3 平衡间隙	87
§ 4 影响电解加工精度的因素	92
§ 5 电解液电导率补偿	100
§ 6 电解加工后零件的表面质量	106
第五章 混气电解加工	111
§ 1 混气电解加工概述	111
§ 2 电解液中混入气体的作用	112
§ 3 气液混合比	116
§ 4 气液混合装置	118
§ 5 混气电解加工实例	121
第六章 电解加工设备	123
§ 1 电解加工用的直流电源	123
§ 2 直流电源的保护回路	130
§ 3 电解加工机床	133
§ 4 电解加工机床的防腐及其措施	140
§ 5 电解液泵	144
§ 6 电解液的净化过滤装置及电解液槽	147
§ 7 电解产物的处理	156
第七章 电解加工工艺的应用	157
§ 1 深孔类零件的电解加工	157
§ 2 异形零件电解加工工艺	161
§ 3 异形孔的电解加工工艺	166
§ 4 叶片电解加工工艺	171
§ 5 药室体型腔加工	174
§ 6 锻模电解加工工艺	178
§ 7 电解加工在其它方面的应用	182
主要参考资料	184

主 要 符 号

A ——原子量	n ——原子价; 转速
b ——宽度	P ——电解液压力; 压力
C ——常数; 电解液浓度	Q ——电量; 流量
d ——直径	R ——电阻; 气体常数
E ——电极电位	r ——半径
E' ——平衡电极电位	S ——面积
E° ——标准电极电位	T ——温度; 绝对温度
e ——电子	t ——时间
F ——法拉第常数	U ——工作电压
f ——频率	U_R ——欧姆压降
g ——重力加速度	u ——流速
H ——高度	V ——体积蚀除量
h ——余量	V' ——体积蚀除率
h_w ——液体流动损耗能量	v ——阴极进给速度; 速度
I ——电流	v_i ——金属阳极溶解速度
i ——电流密度	W ——重量蚀除量
i_a ——临界电流密度	W' ——重量蚀除率
K ——离子积常数; 系数	Z ——齿数; 叶片数
k ——重量电化当量	α ——温度系数
l ——长度	γ ——比重; 重度
M ——克分子浓度	Δ ——加工间隙

Δ_c ——临界间隙

δ ——误差；偏差；气泡层
厚度

δE ——分解电压

η ——电流效率

κ ——电导率

λ ——阻力系数

ρ ——电阻率

ν ——流体运动粘度

ω ——体积电化当量

注 脚

a ——阳极

b ——平衡状态

c ——阴极

e ——出口处

l ——电解液

n ——法线方向

o ——初始状态；进口处

s ——侧向

概 述

电解加工工艺是在二十世纪五十年代开始研究和逐步应用到生产中的。现在国内外已应用于枪、炮、航空发动机、火箭等制造工业中，在模具制造中也得到了应用，并成为机械制造业中一种不可缺少的新工艺。

电解加工是在电解抛光的基础上发展起来的。我国采用电解加工工艺是比较早的，从一九五六年开始研究，到一九五八年初膛线电解加工工艺试验成功，并正式投入生产。随后电解加工迅速发展，先后在枪管、炮管膛线，航空发动机叶片，筒形零件，花键孔，内齿轮，链轮，模具，阀片，异形零件等的加工中得到应用。尤其是几年来又出现了重复加工精度较高的一些新型电解液及混气电解加工工艺，从而提高了电解加工的成型精度，简化了工具阴极的设计，促进了电解加工工艺进一步发展。

电解加工与其它加工方法比较，它具有很多优点和特点：

(1) 电解加工的加工范围广、不受金属材料本身硬度和强度的限制，可以加工硬质合金、淬火钢、不锈钢、耐热合金等高硬度、高强度和高韧性金属材料，以及叶片、锻模等各种复杂型面。

(2) 电解加工的生产率较高，约为电火花加工的5~10倍以上，在某些情况下比切削加工的生产率还高。

(3) 表面光洁度较高, 一般可达 $\nabla_7 \sim \nabla_9$ 。

(4) 由于加工过程中不存在机械切削力, 所以不会产生由切削力所引起的残余应力及变形, 没有飞边毛刺。

(5) 加工过程中阴极工具在理论上不会损耗, 可长期使用, 在大批生产中能大大降低工具成本。

电解加工的弱点和局限性是:

(1) 对很细的小孔、窄缝及棱角很尖的表面比较难加工。

(2) 对电解加工的机理和成型规律的认识还不足, 需进一步研究。

(3) 对复杂型面的加工, 电极工具的设计和制造较困难, 并需多次试验修正, 因此在单件、小批生产中的使用受到限制。

(4) 电解加工的附属设备较多, 占地面积较大。

(5) 对机床、夹具、设备与工件的防锈、防腐蚀, 以及电解产物的处理等问题还没有得到很好解决。

电解加工虽然存在以上不足之处, 但由于它具有更多优越性, 因而随着对电解加工规律的不断认识和掌握, 得到了越来越多的应用。

第一章 电解加工的基本原理

§ 1 电解加工过程

电解加工是利用金属在电解液中受到电化学腐蚀（更确切地叫电化学阳极溶解），将工件加工成形的。电化学腐蚀现象在日常生活中是常见的，例如铝饭盒盛放食盐、醋、酱油等食品，就会逐渐被腐蚀穿孔。又如钢铁等金属，在潮湿的地方会生锈腐蚀，要是接触到盐水等“电解液”时，锈蚀将更快。而纯铝、纯铁在上述条件下却不发生腐蚀。可见这不是单纯的化学腐蚀，而是由于金属中含有某些合金元素或杂质，与能导电的电解液接触后形成了原电池或微电池，并局部放电，产生了电化学腐蚀的结果。

多少年来，人们一直在努力防止和减少这种有害的电化学腐蚀现象。但是一切事物在一定条件下是可以转化的，人们在掌握了其规律以后，可以因势利导，变有害为有用。就象电火花腐蚀可以用来电火花加工一样，在工业生产中也早已应用电化学腐蚀作用来电解抛光工件表面。不过电解抛光时，由于工件和工具电极之间的距离较大和电解液静止不动等原因，只能对工件表面进行普遍的腐蚀和抛光，而不能有选择地腐蚀成所需的形状和尺寸。

电解加工是在电解抛光的基础上发展起来的，图 1-1 为电解加工过程的示意图。加工时，工件接直流电源的正极，

工具接负极，电极间隙内充满了电解液，接通电源后两电极间就有电流通过，在电流作用下，阳极工件被逐渐溶解腐蚀；而在阴极工具上则有氢气析出。为了使电解加工过程正常进行下去，工具需向工件缓慢进给，使两极之间保持较小的间隙，约 0.1~1 毫米，具有一定压力的电解液从间隙中流过，把电解后的产物冲走。

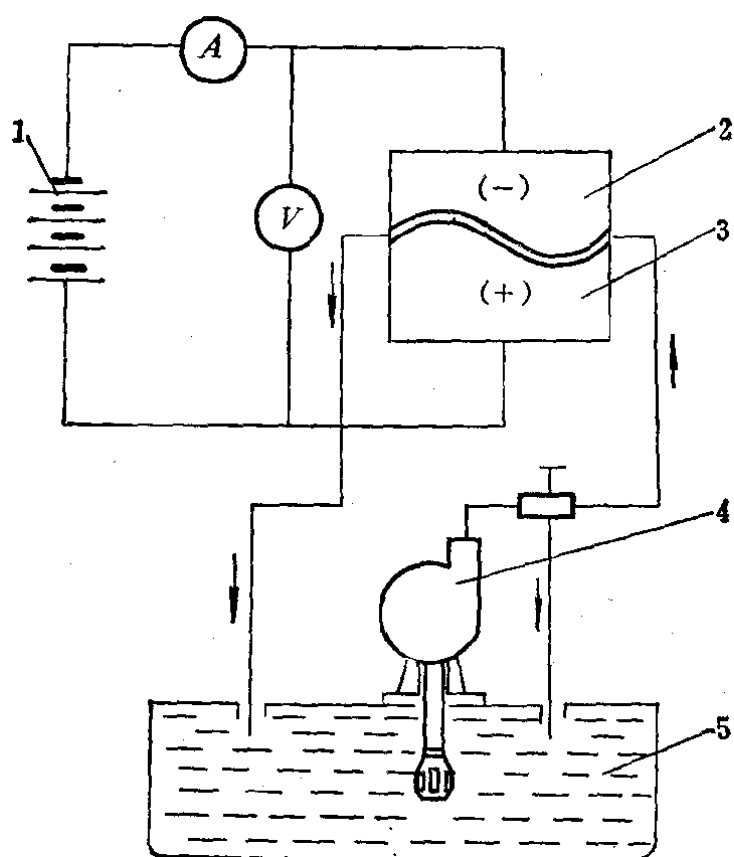


图1-1 电解加工示意图

1—直流电源；2—工具阴极；3—工件阳极；4—电解液泵；5—电解液。

图 1-2 为电解加工成型原理图。图中的细竖线表示通过阴极与阳极的电流，竖线的疏密程度表示电流密度的大小，见图 1-2 (a)。在加工刚开始时，阴极与阳极距离较近的地方通过的电流密度较大，电解液的流速较高，阳极溶解速度

也较快。由于工具相对工件不断进给，工件表面就不断被溶解，电解产物不断被电解液冲走，直至工件表面形成与阴极工作面基本相似的形状，见图 1-2 (b)。

电解加工过程是如何进行的，为什么阳极发生金属的溶解？而在阴极

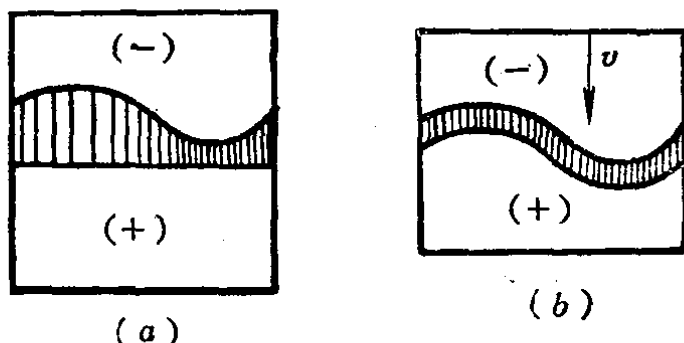


图1-2 电解加工成型示意图

上却有氢气析出？如何控制和提高电解加工的精度、光洁度和生产率？电解加工过程中还存在哪些问题等等？这是一个相当复杂的问题，它是与电场分布、流场分布、温度场分布、以及机械参数有关的电化学反应过程。本章着重讨论电解加工时的电化学反应过程。

§ 2 电解质溶液

凡是其水溶液能导电的物质都称为电解质，如盐酸(HCl)、硫酸(H_2SO_4)、氢氧化钠(NaOH)、氢氧化氨(NH_4OH)、氯化钠(NaCl)、硝酸钠(NaNO_3)、氯酸钠(NaClO_3)等酸、碱、盐都是电解质。酒精、煤油、糖等不能导电的物质称为非电解质。电解质与水形成的溶液为电解质溶液，简称为电解液。

一、电解液浓度

电解液浓度是表示电解液中所含电解质的多少，电解液的浓度可以有不同的表示方法。通常有以下几种：

(1) 重量百分浓度 (符号为%), 它是指 100 克溶液中所含溶质的克数。例如: 浓度为 18% 的 NaCl 水溶液, 就是 100 克食盐水中含 18 克食盐, 其中水占 82 克。

(2) 电解加工中也常用“克/升”来表示电解液的浓度。例如: 水溶液中 NaClO_3 为 300 克/升, 表示每升溶液中溶有氯酸钠 300 克。

(3) 克分子浓度 (符号为 M), 指一升水中含溶质的克分子数。例如: 钠的原子量为 23, 氯的原子量为 35.453, 所以氯化钠 (NaCl) 的分子量为 58.5, 58.5 克氯化钠 (食盐) 就是一个克分子食盐。往 58.5 克食盐中加水到一升, 这食盐水溶液就称为一克分子浓度 (以 $1M \text{ NaCl}$ 表示)。

(4) 克当量浓度 (符号为 N), 表示每升溶液中含有溶质的克当量数 ($\text{当量} = \frac{\text{分子量}}{\text{化合价}}$)。

二、溶 解 度

电解质在水中的溶解量是不能无限制增加的。例如, 在一定量水中只能溶解一定量的食盐, 再多加就不能溶解了, 而形成沉淀, 溶液达到了饱和。这一最大溶解限度称为溶解度。

一般用 100 克溶剂中达到饱和时能溶解的溶质克数来表示溶解度。溶解度与温度有关, 一般温度升高时溶解度增大。不同物质在水中的溶解度不同, 例如: 20°C 时 100 克水中最多只能溶解 36 克食盐, 即食盐的溶解度为 36, 这时食盐水溶液的浓度为 $36/100 + 36 \approx 26.5\%$ 。即当温度为 20°C 时, NaCl 溶液的最高浓度为 26.5%。

三、电解质在水中的电离

为什么电解质溶液能导电？这与电解质在水中存在的状态有关。

原子是由原子核和电子组成的，原子核又由质子和中子组成，每个质子带一个单位的正电荷，中子不带电。电子带一个单位负电荷，其重量约为质子的 $1/1840$ 。原子核带正电，电子围绕原子核高速运动，好象地球绕太阳运动那样。

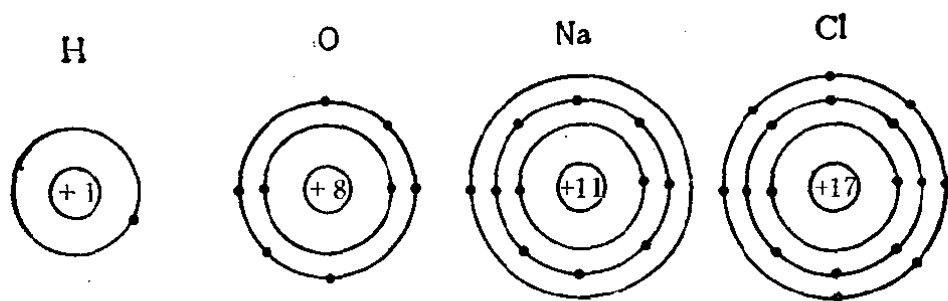


图1-3 氢、氧、钠、氯原子的电子排布情况

图 1-3 为氢(H)、氧(O)、钠(Na)、氯(Cl) 等原子的电子排布情况。一般最外层的电子数以 8 个为最稳定,所以,最外层电子数较少的原子(如钠)与最外层电子数较多的原子(如氯)在一起时,就要失去和得到电子。钠原子容易失去最外层的一个电子而成为带一个正电荷的钠离子 (Na^+),氯原子容易得到一个电子,而带一个负电荷,成为氯离子 (Cl^-)。钠离子和氯离子因静电引力作用而结合成氯化钠 (NaCl)。

水分子 (H_2O) 是由两个氢原子和一个氧原子组成的。每对氢、氧原子各提供一个电子组成一个共同的电子对,如图 1-4 所示。这个电子对围绕着氢、氧原子核运动,把它们

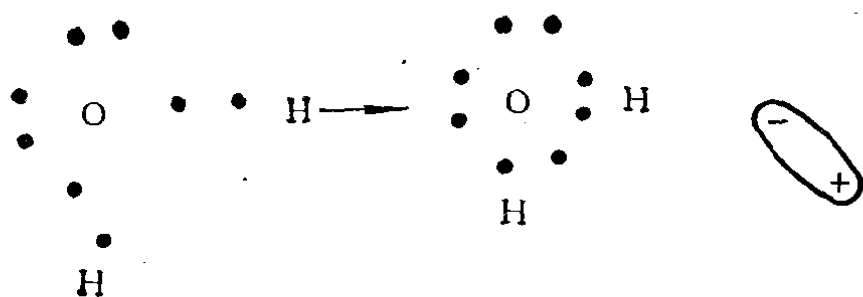


图1-4 水分子的结构

结合在一起。氧原子的原子核有 8 个质子，带 8 个正电荷。原子核外围有 8 个电子，分两层运动，最外层有 6 个电子，见图 1-3。氢原子核就是一个质子，核外围只有一个电子。水分子中有两个电子对，即分别有两个电子既绕氢原子核运动，又绕氧原子核运动，见图 1-4。且两个氢原子和一个氧原子的位置不是对称的 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ ，而是偏向一边 $\begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ 。这样就使水分子内部正电荷（原子核）、负电荷（电子）的分布不对称，在分子内出现了一个正电荷重心和一个负电荷重心，分子是一个偶极子，这种分子叫极性分子。

由于水分子是极性分子，可以和其它带电的粒子发生电的作用，或者和其它极性分子发生电的作用。例如食盐 (NaCl) 是一种电解质，它是结晶体。组成食盐晶体的粒子，不是 NaCl 分子，而是相间排列的 Na^+ 离子和 Cl^- 离子，叫做离子型晶体。把它放到水里，就发生如图 1-5 所示的作用。这种作用使 Na^+ 和 Cl^- 离子之间的静电作用减弱，大约只有原来静电作用的 $1/80$ 。因此， Na^+ 、 Cl^- 离子一个个一层层地被水分子拉入溶液中。在这种电解质水溶液中，每个钠离子和每个氯离子均吸引着一些水分子，成为水化离子，这过程称为电解质的电离过程。其电离方程式简写为：

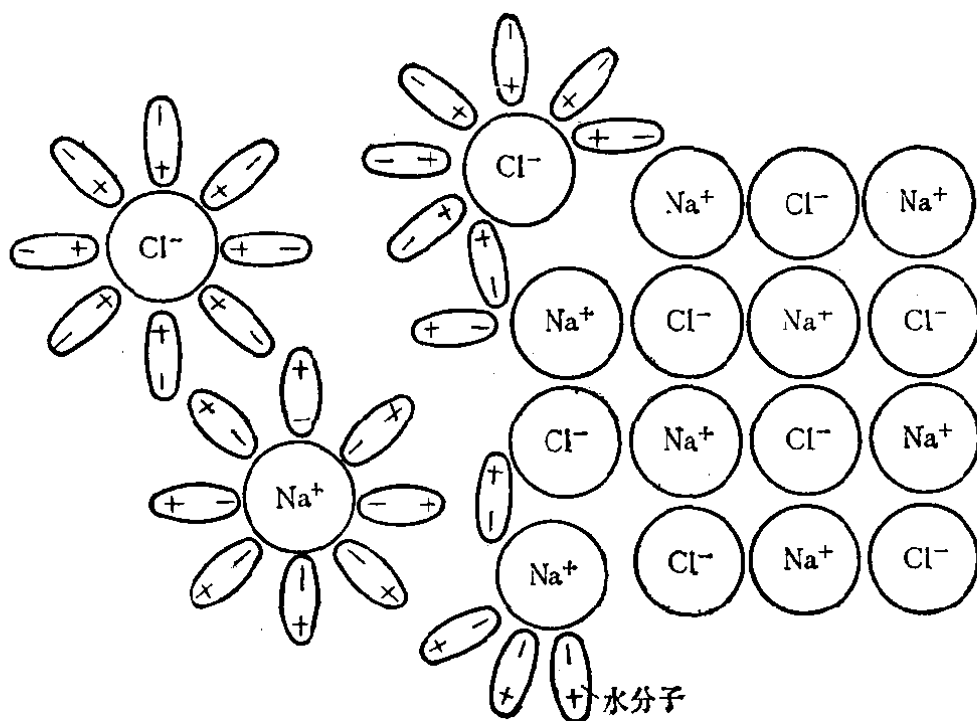
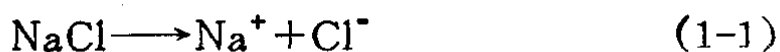


图1-5 NaCl晶体在水中电离示意图



NaCl 在水中能 100% 电离，称为强电解质。强酸、强碱和大多数盐类都是强电解质，它们在水中都完全电离。弱电解质如氨 (NH_3)、醋酸 (CH_3COOH) 等在水中仅小部分电离成离子，大部分仍以分子状态存在，导电能力弱，为弱电解质。

由此可见，电解质在水中或多或少电离成离子，而且电离成阳离子和阴离子的正、负电荷总数相等，所以整个溶液仍保持电中性。但又因为电解质溶液中已有可以自由移动的离子，所以溶液通电后，这些离子受到电场的作用，阴离子向阳极移动，阳离子向阴极移动而导电。

§ 3 水的电离平衡、pH值

由于分子和分子内原子的运动，所以水分子不是固定不变的。一个氢原子核（又叫质子、氢离子）可以脱离水分子，少数水分子离解成氢离子和氢氧根离子。



25°C时纯水中离解的水分子只占 1.81×10^{-9} ，即每一百亿个水分子中有 18 个离解。

在温度为25°C、水分子按公式 (1-2) 达到平衡时，则：

$$\begin{aligned} [\text{H}^+] = [\text{OH}^-] &= 55.5 \times 1.81 \times 10^{-9} = 1.004 \\ &\times 10^{-7} (\text{克离子/升}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $[\text{H}^+]$ ——氢离子浓度；

$[\text{OH}^-]$ ——氢氧根离子浓度。

55.5 为 25°C时 1 升水中的克分子数， 1.81×10^{-9} 为水的电离度。

由实验得知，平衡时， $[\text{H}^+]$ 和 $[\text{OH}^-]$ 之间有下列关系式：

$$[\text{H}^+] \times [\text{OH}^-] = K_{\text{水}} \quad (1-4)$$

式中 $K_{\text{水}}$ ——水的离子积常数。

在 25°C时，1 升水中仅有 1.004×10^{-7} 个克分子的水电离成离子。因此

$$K_{\text{水}} = [\text{H}^+] \times [\text{OH}^-] = 1.008 \times 10^{-14} \quad (1-5)$$

在常温 (22°C) 时，1 升水中有 10^{-7} 个克分子的水电离成离子。当水溶液为中性时，氢离子浓度和氢氧根离子浓度相等，即 $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ 。一般常用的酸、碱水溶液中， $[\text{H}^+]$ 不等于 $[\text{OH}^-]$ ，但是氢离子浓度与氢氧根离子浓度的