



“十二五”国家重点图书出版规划项目·航空航天精品系列

RESEARCH ON ELECTROLYSIS AND PLASMA POLISHING TECHNOLOGY

电解质等离子抛光技术研究

● 索来春 赵锦芝 刘远韬 索景宇 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家重点图书出版规划项目·航空航天精品系列

RESEARCH ON ELECTROLYSIS AND PLASMA POLISHING TECHNOLOGY

电解质等离子抛光技术研究

● 索来春 赵锦芝 刘远韬 索景宇 著



哈爾濱工業大學出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书利用自行研制的金属表面电解质等离子抛光设备,通过一系列的实验研究了电解质等离子抛光机理,并依据抛光机理和研究材料去除速率的变化规律建立了抛光过程中表面粗糙度随时间变化的数学模型,进行了正交实验确定各因素对抛光效果影响的主次顺序和最佳的参数组合,同时对一些形状特殊的工件的抛光方法进行研究,并设计出符合产业化生产要求的电解质等离子抛光设备。本书的研究成果对于电解质等离子加工技术的发展具有一定的理论指导意义,为后续研究提供了参考,同时在一定程度上将推进电解质等离子抛光技术的产业化。

本书可供从事机械制造及相关专业的研究人员与工程技术人员参考,也可作为相关专业本科生或研究生的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

电解质等离子抛光技术研究/索来春等著.——哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-5603-7419-2

I. ①电… II. ①索… III. ①金属材料-抛光-研究
IV. ①TG580.692

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 114007 号

策划编辑 张 荣 王桂芝

责任编辑 张 荣 刘 威

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司

开 本 787mm×1 092mm 1/16 印张 12.25 字数 297 千字

版 次 2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7419-2

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

电解质等离子抛光是一种“绿色”高质高效的新型抛光金属工件的加工方法，即通过在工件和抛光液之间形成完全包裹工件的等离子气层实现对工件的抛光。抛光液为低质量分数的盐溶液，并可循环使用。该方法可以解决机械抛光难于加工形状复杂工件的问题，也可以解决化学和电解抛光很难避免的污染问题，应用前景广阔。

本书研究电解质等离子抛光机理，利用流注理论解释该抛光方法能够实现微观整平的原因。基于气体放电的相关理论，研究抛光液成分对抛光效果的影响，指出电解质等离子抛光是一个气体放电和化学反应同时进行的动态过程，气体放电的去除速度大于化学反应的生成速度是实现抛光的前提。通过实验和分析得出以不同的方式将工件潜入抛光液时的伏安特性曲线和电流、电压随时间变化的曲线，确定最合理的工件下潜方式。根据抛光机理，设计电解质等离子抛光实验设备，重点考虑设备对抛光工艺条件的控制。采用扫描电镜、能谱分析仪、粗糙度仪、电化学分析仪等仪器研究电解质等离子抛光前后不锈钢工件在外形尺寸、粗糙度、显微硬度、微观形貌、表面化学成分和耐腐蚀性等表面状态的变化。实验结果一方面证明了电解质等离子抛光可以达到理想的抛光效果，另一方面也在一定程度上验证了所提出的抛光机理。

本书提出中心电极法，并且针对 304 不锈钢钢管进行了实验性加工，找出了能用于不锈钢钢管内壁抛光的电压参数和抛光方法。并在此基础上针对不锈钢钢管内表面抛光问题进行了系列实验，考察了各工艺参数对抛光后内表面粗糙度的影响，得出了电解质等离子内表面抛光的基本规律。进一步以抛光液流量、抛光液温度、抛光液质量分数和加工时间为影响因素进行正交实验，对结果进行分析，得出了最佳加工参数。并利用最优参数对直径为 25 mm、长度为 50 mm 的不锈钢钢管进行了加工，用 OLS3000 共聚焦显微镜对距离下端口处 10 mm 的切片进行检测，对加工前后的内表面微观形貌和粗糙度进行对比，发现表面粗糙度从初始的 $0.611\ 3\ \mu\text{m}$ 降低到了 $0.054\ 1\ \mu\text{m}$ 。随后，对不锈钢盲孔内表面进行了抛光，取得了良好的抛光效果，并分析了不锈钢保温杯的特点和抛光要求，设计了专用的卡具对保温杯进行抛光，提高了保温杯内表面的光洁度。

书中针对铜合金电解质等离子抛光方法进行研究，分析其抛光影响因素（如抛光液温度、抛光液质量分数、加工时间、下潜深度、抛光液流速等）对铜合金的电解质等离子抛光效果的影响。对 H62 黄铜材料进行一系列工艺实验，探求金属电解质等离子抛光工艺方法，研究抛光后零件表面的效果和材料的性能。通过正交实验极差分析可得出零件表面粗糙度值检验结果，对实验中的 5 个影响因素做出分析，得出因素的好坏与优组合。同时，以零件去除速率来进一步验证实验结果，利用方差分析得出各个影响因素的显著性。并从材料的去除速率、

表面粗糙度、耐腐蚀性等方面研究抛光液温度、抛光液质量分数、加工时间、下潜深度、抛光液流速分别对材料抛光后表面性能的影响，最终得出优化的铜合金的电解质等离子抛光工艺方法。

通过向现有抛光液配方中加入添加剂的方法，对铝合金的抛光液配方进行了优化。试件选择了 1050、5052、6061 三种材质的铝合金，先采用全组合实验，以抛光后铝合金表面的粗糙度值为评价指标，对现有抛光液配方进行分析实验，得到了三种铝合金的抛光液基础配方。通过查阅资料，选择了七种添加剂；在三种铝合金的抛光液基础配方中，分别添加不同成分的添加剂，采用均分法，选择出对抛光效果有所改善的添加剂，完成了添加剂的一次筛选；对筛选后的添加剂进行正交实验，考察混合添加剂对抛光效果的影响，进行了添加剂的二次筛选；最后对二次筛选后的试剂进行正交实验，得出了三种铝合金最佳的抛光液配方组合。为进一步提高铝合金抛光的效果，选取了加工温度、加工时间两个因素，设计了二因素三水平正交实验，通过对实验结果的分析，得到了三种铝合金的最佳工艺条件。

本书共有 7 章，分别介绍了不锈钢、铜合金、铝合金材料的电解质等离子抛光机理及工艺，在此感谢课题组成员王季、黄志鹏、刘登卫、隗倩、吴建龙、梁诸伟等研究生及冯勇老师所做的贡献！

本书得到科技部国际合作项目“军民两用金属表面电解质等离子加工技术的研究”（No.2009DFR70110）的资助，得到“十二五”国家重点图书出版规划项目、黑龙江省精品图书出版工程及哈尔滨市科技局的支持，得到南京工程学院校级科研基金（YKJ201401）和国家自然科学基金面上项目（51775260）的资助，在此一并表示衷心的感谢！

作 者

2018 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究的背景和意义	1
1.2 国内外金属电解质等离子加工技术的研究现状及分析	2
1.2.1 等离子体的定义	2
1.2.2 等离子体技术的发展和等离子体的分类	4
1.2.3 气体放电理论	5
1.3 国内外金属零件表面抛光技术的研究现状及分析	9
1.3.1 机械抛光	9
1.3.2 化学抛光和电解抛光	10
1.3.3 化学机械抛光	12
1.3.4 超声波抛光和磁研磨抛光	12
1.4 本书的主要研究内容	13
第 2 章 电解质等离子抛光机理研究	15
2.1 电解质等离子抛光的机理研究	16
2.1.1 宏观机理	16
2.1.2 微观机理	17
2.1.3 抛光液成分的影响	19
2.1.4 电流、电压特性曲线	21
2.2 电解质等离子抛光实验设备设计	24
2.2.1 总体设计	24
2.2.2 主机设计	26
2.2.3 安装调试	29
2.2.4 主要特点和操作流程	30

2.3 电解质等离子抛光对不锈钢表面状态的影响	31
2.3.1 检测项目与仪器	31
2.3.2 外形尺寸	32
2.3.3 表面粗糙度	33
2.3.4 微观形貌	34
2.3.5 表面化学成分	35
2.3.6 显微硬度	37
2.3.7 耐腐蚀性	37
2.4 本章小结	42
第3章 电解质等离子内表面抛光研究	43
3.1 内表面抛光单因素实验	44
3.1.1 实验材料和检测仪器选择	44
3.1.2 不同放置方式下粗糙度随直径的变化关系	44
3.1.3 不同长度的抛光实验	46
3.1.4 电解质等离子内表面抛光基础规律	47
3.2 内表面抛光正交实验	52
3.2.1 正交实验设计	52
3.2.2 正交实验结果与分析	53
3.2.3 不锈钢盲孔和保温杯抛光	59
3.3 本章小结	63
第4章 铜合金电解质等离子抛光方法正交实验分析	64
4.1 制订实验计划	64
4.2 实验结果分析	66
4.2.1 实验结果极差分析	67
4.2.2 实验结果方差分析	68
4.2.3 因素间粗糙度的交互作用	69
4.3 实验结果验证	70
4.3.1 去除量正交实验设计	70
4.3.2 验证结果极差分析	70
4.3.3 验证结果方差分析	72
4.3.4 因素间去除量的交互作用	72
4.4 实验中单因素对抛光效果的影响	73
4.4.1 抛光液温度对抛光质量的影响	73

4.4.2	加工时间对抛光质量的影响	77
4.4.3	抛光液质量分数对抛光质量的影响	81
4.4.4	下潜深度对抛光质量的影响	85
4.4.5	抛光液流速对抛光质量的影响	88
4.5	抛光方法最优化参数对材料性能的影响	92
4.5.1	零件表面粗糙度测试	92
4.5.2	零件表面微观形貌测试	93
4.5.3	零件表层元素组成测试	94
4.5.4	零件表层硬度测试	96
4.5.5	零件表面相检测	97
4.5.6	零件表面耐腐蚀性测试	97
4.5.7	零件表面光亮度测试	99
4.6	本章小结	99
第 5 章	铝合金电解质等离子抛光方法研究	101
5.1	铝合金配方优化	101
5.1.1	现有抛光液配方分析实验	101
5.1.2	添加剂的选择	105
5.1.3	添加剂的一次筛选	105
5.1.4	添加剂的二次筛选	109
5.1.5	配方的最终优化	113
5.2	铝制品抛光实验	120
5.2.1	引言	120
5.2.2	三种铝合金抛光工艺条件优化	120
5.2.3	1050 型铝合金制品抛光实验	123
5.2.4	5052 型铝合金制品抛光实验	125
5.2.5	6061 型铝合金制品抛光实验	125
5.3	本章小结	127
第 6 章	电解质等离子抛光产业化设备设计	128
6.1	电解质等离子抛光产业化设备的设计	128
6.1.1	总体设计	128
6.1.2	控制和操作系统选择	129
6.1.3	主机设计	132
6.1.4	挂架升降系统设计	134

6.1.5 循环搅拌冷却系统设计	136
6.1.6 控制柜设计	137
6.1.7 安装调试和主要特点	139
6.2 控制系统的开发与监控组态软件的设计	140
6.2.1 控制系统的总体方案设计	140
6.2.2 基于工控机的控制系统硬件架构	147
6.2.3 控制系统组态设计与系统测试	163
6.3 界面制作与脚本程序编写	176
第 7 章 展望与结论	178
参考文献	180
名词索引	186

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景和意义

自公元前 1400 年人类学会冶炼金属开始,金属便和人类的发展密不可分。小到餐具、饰品,大到飞机、轮船,金属已成为人们生活和工作的必需品。由于人们对生活质量的要求日益提高,生产商根据客户需求,生产的金属制品表面往往要进行抛光,有时甚至需要达到镜面的程度。应用抛光技术不仅可以提升工件的外观,还能够改善材料表面的耐腐蚀性和耐磨性,使模具易于脱模,减少生产注塑周期,同时起到使产品升值的作用^[1]。选择合适的抛光方法和抛光工艺是提高产品质量的重要手段^[2]。目前我国常用的抛光方法有:机械抛光、化学抛光、电解抛光、超声波抛光、磁研磨抛光等。但是以上几种抛光方法中,其中一些不但要依靠抛光工人的手工劳动,抛光过程中产生的金属粉尘还会严重影响抛光工人的身体健康^[3],并且有图案的表面及复杂外形的零件很难达到所希望的高品质,加工效率低,产品的精度、一致性差;有些方法还需要使用一定质量分数的强酸或者强碱^[4,5],这些大部分都是对环境有污染的化学物品,同时抛光成本高,成效有限。

电解加工是一种利用金属阳极电化学溶解原理来去除材料的制造技术,它具有许多独特的优点,如无工具损耗、与材料硬度无关、生产率高、表面质量好、可加工三维复杂形状等^[6]。等离子体技术作为一个学科交叉的前沿研究领域,在材料、能源、天文、化工、生物工程等方面具有广泛的应用,在短短的发展历程中已经在化学合成、新材料研制、精细化学加工、表面处理等领域开拓出一系列新技术和新工艺^[7]。金属表面电解质等离子抛光技术结合等离子技术和电解加工,利用气液等离子发生技术,将被加工工件置于抛光液中,施加一定的直流电压,使工件周围的抛光液沸腾蒸发,形成一个包围工件的气体层,在电压的进一步作用下气体层进入等离子态,开始对工件表面进行抛光。该项技术不仅能解决传统抛光方法所存在的问题,还可以对表面形状复杂的工件达到很好的抛光效果,同时抛光液使用低质量分数的中性盐溶液对环境没有污染,抛光效果更是传统方法很难达到的^[8],抛光效率也是传统抛光方法望尘莫及的。

金属表面电解质等离子抛光技术适用于对金属表面抛光、消除毛刺,磨钝尖刃,清理焊接缝,清除材料表面的氧化色、氧化皮和污渍,表面除油等。该项技术应用前景广阔,包括:复杂结构零件的抛光处理;航空航天精密零件的表面处理;兵器高质量零件的表面抛光;各类的机器与仪表零部件的精加工;化学设备抗腐蚀零件的抛光精加工;医疗设备和医疗移植

零件的抛光加工；螺旋桨推进器和液压设备叶片的抛光加工；对食品加工业设备零件和不锈钢餐具制品的抛光加工；以及对卫生技术设备、照明设备的零件、家具配件的抛光加工等。我国的机器制造业、仪表制造业、航空工业、造船业、化学、食品工业等行业对此项技术均十分关注。

本书依托科技部国际合作项目“军民两用金属表面电解质等离子加工技术的研究”（No.2009DFR70110），利用项目自行研制的金属表面电解质等离子抛光设备，进行一系列的实验，研究电解质等离子抛光机理，并依据抛光机理和研究材料去除速度的变化规律的实验结果，建立抛光过程中表面粗糙度随时间变化的数学模型，然后进行正交实验确定各因素对抛光效果影响的主次顺序和最佳的参数组合，对一些形状特殊的工件的抛光方法进行研究，并设计符合产业化生产要求的电解质等离子抛光设备。本书的研究成果对于电解质等离子加工技术的发展具有一定的理论指导意义，在一定程度上推进了电解质等离子抛光技术的产业化，同时也为后续研究提供了参考。

1.2 国内外金属电解质等离子加工技术的研究现状及分析

1.2.1 等离子体的定义

等离子态是区别于固体、液体、气体的另一种物质聚集态，被称为物质的第四态，是物质存在的基本形态之一。据印度著名天体物理学家沙哈的计算，宇宙中 99.9% 的物质都处于等离子状态^[9]。当物质处于不同的温度范围或粒子处于不同的能量范围时，呈现出不同的聚集态，即物质的聚集态有赖于粒子的平均动能。物质从能量较低的聚集态转化为能量较高的聚集态需要外界供给能量，从固态到液态、从液态到气态均是如此。当气体进一步从外界吸收能量，分子热运动进一步加剧，分子离解为原子，原子中的电子获得足够的能量后脱离原子，成为自由电子，气体被电离。被电离的气体中含有大量的电子、离子及中性粒子，其中电子和离子的电荷数差不多相等，因此其宏观上呈电中性。可以简单地说，等离子体是完全电离或部分电离的物质聚集态^[10,11]。就像固体可以直接升华转变为气体，等离子体也不一定是电离的气体（电离的气体必须满足一定的条件才能成为等离子体），如固态金属中晶格上的正离子和运动的自由电子以及半导体中的空穴和电子均构成固态等离子体；电解质溶液中的正离子和负离子也构成液态等离子体。固体、液体、气体和等离子体之间的转化如图 1.1 所示。

等离子体内有大量的带电粒子，如果仅有两个带电粒子，它们之间就是简单的库伦作用，但是如果在两个粒子周围还存在大量的带电粒子，由于相互影响，它们之间的作用会变得更加复杂。在等离子体中，任何一个带电粒子由于其静电场的作用，都会在周围吸引带异号电荷的粒子，同时排斥带同号电荷的粒子，从而使其附近带异号电荷的粒子要多于带同号电荷的粒子，因此就削弱了它对远处带电粒子的影响，这就是电荷屏蔽^[12,13]。考虑电荷屏蔽作用，原点处一电荷 q 在空间某一位置的电势为

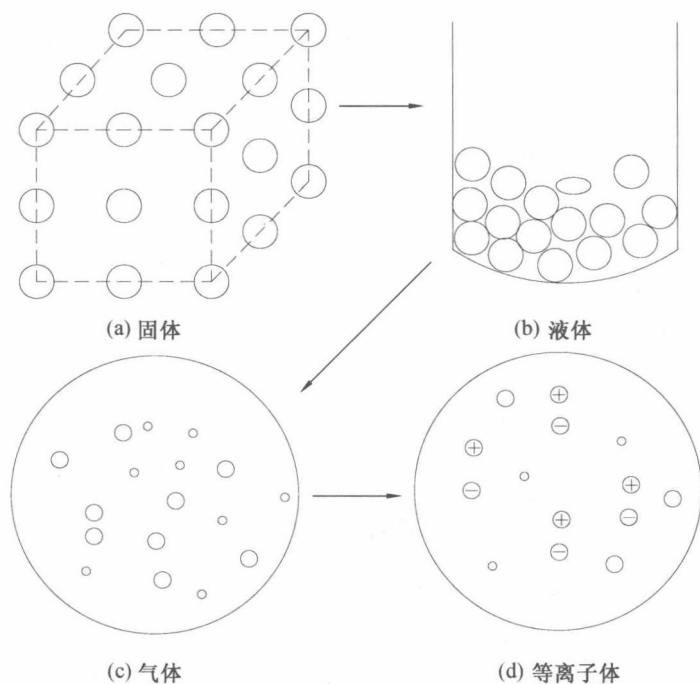


图 1.1 物质四态示意图

$$\phi(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right) \quad (1.1)$$

式中 λ_D ——德拜长度, $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{n_e e^2}}$ (m);

ϵ_0 ——真空介电常量 (F/m);

e ——电子电荷 (C);

T_e ——电子温度 (K);

n_e ——电子粒子数密度 (个/m³)。

式 (1.1) 相当于库伦势乘以一个衰减因子, 反映了电荷屏蔽的效果。 λ_D 被称为德拜屏蔽长度或德拜长度, 它是等离子体保持准电中性的空间下限, 如果空间尺度远大于德拜长度, 式 (1.1) 的电势将趋近于零, 宏观作用引起的局部净电荷的效果就会被电荷屏蔽消除, 准电中性得以保持, 因此空间尺度远大于德拜长度是能否成为等离子体的基本条件之一。

电子在等离子体中的振荡是不可避免的, 它走完一个相当于德拜长度的振幅所需要的时间 τ_p 可作为等离子体存在的时间下限, 即

$$\tau_p = \sqrt{\frac{\lambda_D m_e}{T_e}} \quad (1.2)$$

式中 m_e ——电子质量 (kg)。

当时间尺寸小于 τ_p 时,电子振荡总是存在的,体系内部任意位置的正、负电荷是分离的,其平均效果不为零;只有当时间尺寸大于 τ_p 时,振荡引起的空间电荷和空间电场的平均效果均为零,等离子体才是准电中性的。

根据德拜长度可以将等离子体中带电粒子的相互碰撞作用分成两类:在以德拜长度为半径的德拜球内的短程库伦作用和德拜球外的长程库伦作用。长程库伦作用表现的是集体的带电粒子的行为,而短程库伦作用的结果是库伦碰撞,在很多条件下可以近似地等于两体碰撞的叠加。计算表明,短程库伦作用所造成的碰撞过程的时间尺度远大于长程库伦作用所造成的碰撞过程的时间尺度,这就是说在短程库伦作用的时间内,可以出现各种等离子体的集体作用,等离子体的特征是以集体效应为主的^[14]。

因此等离子体的定义就是:由大量正、负带电粒子(有时还包括中性粒子)组成的,空间尺寸远大于德拜长度,时间尺度远大于电子走完一个相当于德拜长度的振幅所需要的时间,以集体效应为主的,具有准电中性的体系。

1.2.2 等离子体技术的发展和等离子体的分类

早在 1879 年,英国物理学家克鲁克斯研究了真空放电管中的放电过程之后,提出了物质的第四态存在。1887 年,汤生对不同稀薄气体、不同材料电极制成的阴极射线管施加电场和磁场,精确地测定构成阴极射线的粒子有同一荷质比,从而为电子提供了实验依据,由此揭开了粒子物理学的序幕^[15]。从 1897 年到 1918 年第一次世界大战结束,等离子体的研究处于萌芽时期。1918 年到 1930 年,等离子科学取得了一些最基本的成就,如法拉第观察了气体辉光放电的过程。1932 年的诺贝尔化学奖获得者朗缪尔在 1928 年首次采用“Plasma”这个词(中译为等离子体)来定义包含电子、离子、中性原子和分子具有一定电离度,宏观呈电中性的气体状态。从 20 世纪的 30 年代到 1945 年第二次世界大战结束,等离子研究有了很大的进步,天文物理和空间物理的需要推动了早期等离子物理学的发展,第二次世界大战中著名的物理学家费米和爱德华·泰勒提出了氢弹原理和核聚变反应堆的设想。第二次世界大战后,在氢弹实验成功的启发下,开展了受控核聚变的研究^[16,17]。20 世纪 50 年代后,由于受控核聚变研究的需要,以及后来太阳物理和星际物理的进展,等离子体技术成为一门新兴的学科,迅速发展起来。大约在 20 世纪 80 年代,随着电子工业、材料工业的发展,等离子体的应用和研究异军突起,给人类的生活带来显著的变化。

等离子体的分类方法有很多^[18],按产生的机制可以分为天然等离子体和实验室等离子体;按粒子密度可以分为高密度等离子体和低密度等离子体;按存在时间可以分为稳态等离子体和瞬时等离子体;按电离强弱程度可分为强电离等离子体和弱电离等离子体;按是否达到或接近热力学平衡可以分为热力学平衡等离子体和非热力学平衡等离子体;但是最常见的分类方法还是按宏观温度分为高温等离子体和低温等离子体。高温等离子体是热力学平衡的等离子体,其热力学温度为 $10^6 \sim 10^8$ K,如太阳就是高温等离子体。低温等离子体又分为热等离子体和冷等离子体。热等离子体是热力学平衡或接近热力学平衡的等离子体,其热力学温度是 $10^3 \sim 10^5$ K。冷等离子体是非热力学平衡的等离子体,其电子温度 T_e 为 $3 \times 10^2 \sim 10^5$ K,而冷等离子体的温度仅为其电子温度的十分之一到百分之一。早期等离子体的研究以热等离子体为主,而随着等离子体技术的发展,冷等离子体宏观低温的优点逐步体现出来,

冷等离子体技术也越来越受到人们的重视, 其研究也取得了很多突破性的进展^[19-21]。

目前对等离子体的应用主要涉及三大领域: 物理、化学和工程, 因而就形成了三大等离子体学科, 即等离子体物理、等离子体化学和等离子体工程。等离子体物理是物理学科的一门分支, 内容包括支配等离子体行为的基本规律和物理过程。等离子体化学主要研究等离子体存在时的多相化学反应, 在化学合成、精细化学加工、表面改性和薄膜制备等方面具有广阔的应用前景。等离子体工程是研究等离子体发生及其装置的学科^[22]。

1.2.3 气体放电理论

气体放电是指利用电场等激活气体使其电离, 形成能导电的电离气体的现象。气体放电是最常用的等离子体发生方法, 而在等离子体形成后气体放电常常会继续进行产生新的带电粒子, 因此研究气体放电既是研究等离子体的发生, 也是研究等离子体的发展。

1. 气体放电的伏安特性

按照气体放电时极间电压和放电电流之间的伏安关系, 气体放电可以分为四种不同的形式^[23,24], 如图 1.2 所示。

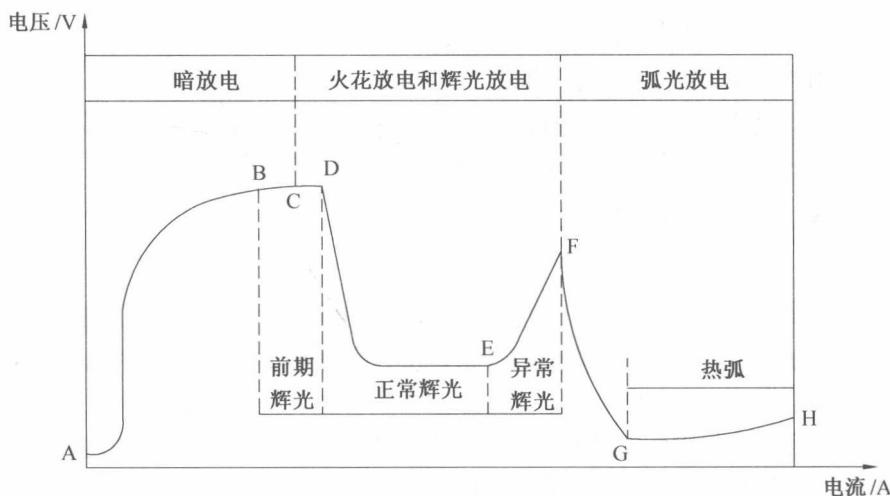


图 1.2 气体放电的伏安特性曲线

(1) 暗放电。

暗放电是带电粒子在电场的作用下定向移动形成的, 其电流往往很小, 有时只有几微安, 并随带电粒子数量的增多而增大。在发生暗放电时, 放电电流会随着极间电压的增大而增大。

(2) 火花放电和辉光放电。

在暗放电的状态下如果升高极间电压, 会发生伴有发光的放电。在气压较高时, 放电通道具有细的线条形状, 并有闪光和破裂声, 具有火花的明显特征, 这就是火花放电^[25]。因为在火花放电时只有放电通道的气体被击穿并变成导体, 所以在发光的放电通道内电流密度非常大, 还会引起导电气体内部压力和温度急剧增加, 它与周围气体所形成的压力梯度会使放电通道迅速扩大, 电流急剧增大而电压反而迅速降低, 极间呈现出负阻抗特性^[26]。如果此时

电源功率不够大,电压将会迅速下降使放电结束。如果电源功率足够大,电压下降到一定数值以后就将保持基本不变,而放电将转变为另一种形式——弧光放电。因此,火花放电是一种不稳定的放电状态,往往是一种过渡的存在,这也是它的一个特性。

从图 1.2 可以看到,越过暗放电区后,如果继续减小外电路的电阻或者增大极间电压,电流会突然剧增,发生击穿,如果这时的气压较小,放电就会发出特有的辉光,因此被称为辉光放电。辉光放电时由于气压低、气体密度小,带电粒子很容易被加速获得足够的能量,撞击阴极产生二次电子发射。辉光放电的基本条件就是气压低、密度小。辉光放电又可以分为前期辉光放电、正常辉光放电和异常辉光放电。前期辉光放电伴随有暗放电。正常辉光放电的放电电流随输入功率的增大而增大,而电压基本保持不变,并低于击穿电压。越过正常辉光的区域,电流和电压均会急剧上升,直至变成弧光放电,这一区域就是异常辉光放电区域。辉光放电是一种复杂的稳态的自持放电,应用非常广泛^[27-29]。

(3) 弧光放电。

弧光放电是气体放电的另一种重要形式^[30-32],放电电流密度大,发光度强,温度高,其最大特点是在低的电压下能流过很大的电流。弧光放电时极间电压几乎保持不变,但电流的变化范围却可以很大。弧光放电在高气压和低气压的情况下均可以发生,形成近似热力学平衡的等离子体。弧光放电又分为热电子弧光放电和冷阴极弧光放电。热电子弧光放电是利用阴极的高温发射电子来维持放电的,根据是否需要外部热源加热阴极分为自持和非自持两种。冷阴极弧光放电的阴极温度也远高于常温,但却不足以形成热电子发射。由于弧光放电是气体放电的最成熟阶段,所以整个放电通道都处于稳定的平衡状态。

2. 汤生理论、帕邢定律和彭宁效应

(1) 汤生理论。

汤生(Townsend)提出了放电开始和带电粒子增殖的相关理论,这是气体放电的第一个定量理论,被称为汤生理论^[33]。按照他的理论,放电过程中带电粒子的增殖有以下三种方式。

① 电子碰撞电离—— α 电离过程。

电子向阳极运动,与中性气体粒子频繁碰撞,发生电离产生大量新的电子和正离子。每个电子沿电场方向每行进 1 cm 与气体粒子碰撞所发生的平均电离次数为 α , α 称为电子碰撞电离系数,也称汤生第一电离系数。

$$\alpha = Ap \exp\left(\frac{ApV_i}{E}\right) \quad (1.3)$$

式中 p ——气体压力 (Pa);

V_i ——气体粒子的电离电位 (V);

E ——电场强度 (V/m);

A ——与气体本身性质和实验条件相关的常数,一般通过实验或查文献获得。

如果电场足够强,一个电子由阴极飞向阳极的过程中,和气体粒子碰撞后发生电离,就多了一个自由电子。这两个自由电子飞向阳极,再次与气体粒子碰撞,分别又多产生了一个电子,就变成了 4 个自由电子。这 4 个电子再次碰撞又会产生更多的电子。如果一个电子由阴极飞向阳极时,电子的增殖就像“雪崩”一样,这种现象被称为电子崩。如果由阴极发出

n_0 个电子, 那么距阴极 x 处的电子数为

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1.4)$$

②正离子碰撞电离—— β 电离过程。

正离子向阴极运动, 与中性气体粒子频繁碰撞, 产生一定量的新的电子和正离子。一个正离子沿电场方向 1 cm 行程中与气体粒子碰撞所发生的平均电离次数为 β , β 称为离子碰撞电离系数。因为正离子只有获得很大的能量才可以通过碰撞电离粒子, 因此正离子经过足够长的自由程获得碰撞电离所需的能量的几率是很小的, 一般情况下 β 远小于 α , 经常忽略 β 过程。

③阴极二次电子发射—— γ 电离过程。

正离子撞击阴极, 使其发射二次电子, 这个概率以 γ 表示, 称为汤生第二电离系数, 而这种电离过程就称为 γ 电离过程。从阴极发射的电子在到达阳极之前, 与气体中的粒子碰撞产生的正离子撞击阴极也会发射二次电子, 碰撞过程中产生的光电子也有可能引起光电发射, 因此广义的 γ 电离过程还包括引起电子从阴极发射的所有过程。显然因为移动过程中的频繁碰撞, 正离子到达阴极时很难具有很高的能量, 因此 γ 在一般情况下也要比 α 小得多。

(2) 帕邢定律。

气体放电变成导体后如果电荷的增殖非常剧烈, 不再需要外界供给能量也能维持放电, 这类放电就是自持放电; 反之, 如果需要外界持续供给能量才能维持的放电就称为非自持放电。根据汤生放电理论可以推导出自持放电的条件, 即

$$\gamma(e^{\alpha l} - 1) = 1 \quad (1.5)$$

式中 l ——放电间距 (m)。

初始电子中, 平均每一个电子通过 α 电离过程产生的 $(e^{\alpha l} - 1)$ 个正离子, 再经过 γ 电离过程至少产生一个后续电子, 这样就可以使电流独立于初始电子之外, 无论是否有新的电子加入, 放电均可以维持自己的延续。

当极间电压增加到某一临界值时, 极间的气体就会发生放电, 这个放电开始的瞬时电压 V_s 称为击穿电压或着火电压。帕邢 (Paschen) 在 1889 年的实验中发现, 当气体温度一定时, 均匀电场中的击穿电压 V_s 是气体压力 p 和放电间距 l 的乘积的函数, 即 $V_s = f(pl)$, 这种函数关系被称为帕邢定律^[34]。图 1.3 为平行板电极间的空气的击穿电压 V_s 随气体压力 p 和放电间距 l 的乘积变化的曲线。

依据汤生放电理论的帕邢定律表达式为

$$V_s = \frac{Bpl}{\ln \frac{Apl}{\ln(1 + 1/\gamma)}} \quad (1.6)$$

式中 B ——与气体本身性质和实验条件相关的常数, 一般通过实验或查文献获得。

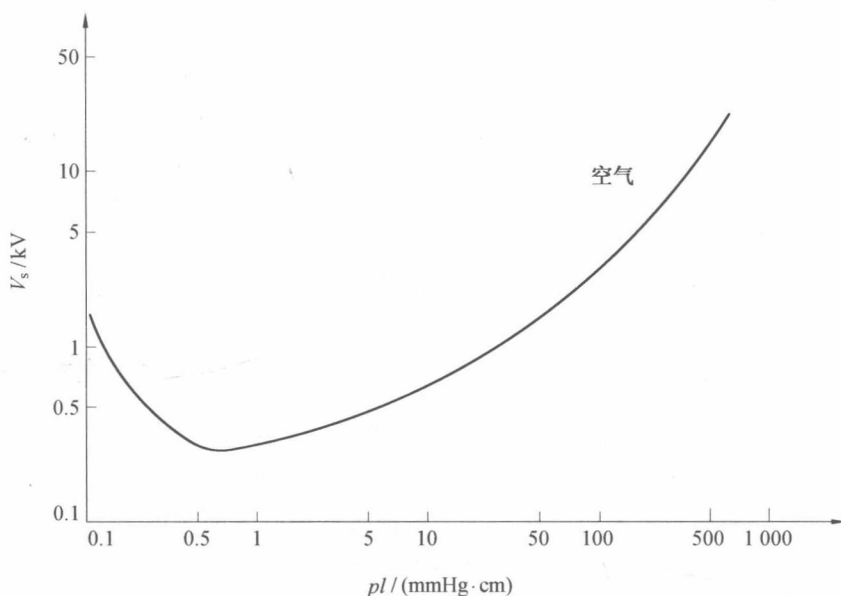


图 1.3 平行板电极间的击穿电压

从帕邢定律可以看出影响击穿电压的主要因素如下：

①气体压力 p 和放电间距 l 。显然根据帕邢定律，其他条件不变时 pl 对击穿电压的变化起着决定性的作用。

②气体的种类和成分。帕邢公式中的 γ 、 A 、 B 均与气体本身的性质有关，所以气体的种类和成分会影响击穿电压。

③电场分布。电场分布影响 α 和 γ 以及电子与正离子的运动速度和轨迹。

④电极表面的材料和表面状态。电极表面的材料和表面状态影响 γ 电离过程的二次电子发射，电极的表面结构还影响电场分布。

⑤外界电离源的影响。

(3) 彭宁效应。

在气体中掺入其他的气体，在相同的条件下电离可能减弱，但也有可能增强，这种在气体中掺入别的气体增强放电的现象称为彭宁（Penning）效应^[35]。例如，在氖中掺入 0.1% 的氩可以提高放电电流。掺入气体一般要具有原子数比主气体高和电离能比主气体的亚稳态和某些激励态激励能低的特点，因为掺入这样气体的粒子才可以吸收亚稳态和激励态的激励能而电离，起到增强放电的效果。在许多气体中掺入汞汽可以获得彭宁效应，就是因为它的电离能比许多气体的第一级激励能低。

汤生理论可以解释很多的气体击穿现象。例如，气压、极距对击穿电压的影响（帕邢定律）以及定性的解释混合气体的彭宁效应。但是汤生理论仍有局限性，一些现象采用汤生理论难以解释。当气压高过大气压时，击穿电压会偏离帕邢定律。从施加电压到产生放电的时间非常短（小于 10^{-7} s），在这么短的时间内正、负离子可以认为是不动的，这就排除了正、负离子参与碰撞形成几代电子崩的可能，同时电子也不可能移动很长距离（在大气压下，这