

DIANDUCENG JUNYUNKING
HE DUYE WENDINGXING
WENTI YU DUICE

电镀层均匀性 和 镀液稳定性

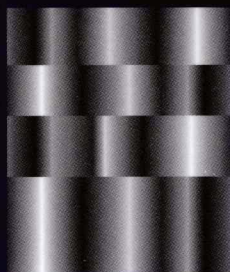
—— 问题与对策

张三元 张 磊 ◎ 编著



化学工业出版社

DIANDUCENG JIANYUNXING
HE DUYE WENDINGXING
WENTI YU DUICE



电镀层均匀性 和镀液稳定性

—— 问题与对策

电镀层的均匀性问题着眼于电镀产品质量，电镀液的稳定性问题着眼于电镀生产效率，这两个问题是电镀生产中的关键性问题。

本书作者基于自己深厚的理论知识和丰富的实践经验，由浅入深，透彻地揭示了问题的本质，深入地分析了问题产生的原因，全面阐述了解决问题的方法。

本书无论对在生产一线的电镀工程技术人员，还是对电镀产品和工艺的研究开发人员，都大有裨益。

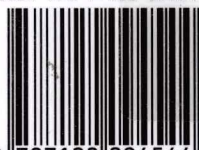


www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议：机械 / 电镀

定价：36.00 元

ISBN 978-7-122-09454-4



9 787122 094544 >

电镀层均匀性 和镀液稳定性

—— 问题与对策

本书共五章,主要针对电镀生产效率(镀液的稳定性)和电镀产品质量(镀层均匀性),对生产实践中产生的问题进行了深入的剖析,陈述了实质性影响因素的作用,给出了解决问题的基本思路和常用方法,同时,对性能的检测和评价方法做了介绍。

本书可供电镀工艺技术人员、管理人员,电镀技术开发人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电镀层均匀性和镀液稳定性——问题与对策/张三元,
张磊编著. —北京:化学工业出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-122-09454-4

I. 电… II. ①张…②张… III. ①电镀-均匀性-研
究②电镀-稳定性-研究 IV. TQ153

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 173795 号

责任编辑:段志兵

文字编辑:孙凤英

责任校对:陶燕华

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张 14 字数 272 千字 2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电镀层分布的均匀性与电镀溶液的稳定性是电镀生产中需要时时关注和研究的两大主题。人们对影响电镀层分布均匀性的因素已经研究得十分透彻了，而且有一套有效的改善镀层分布均匀性的方法和措施。但这些方法和措施的实施，都需要增加一定的成本，从而使问题变成了生产成本与镀层分布均匀性之间的矛盾。在我国国家标准中（也包括 ISO 标准）引入了一个“主要表面”的概念，要求在电镀工件的“主要表面”上，即电镀工件的重要工作表面上，必须具有一定的最低镀层厚度。其言外之意是，在电镀工件的非“主要表面”上的镀层厚度如果适当低于规定的最低厚度，也算是合格的电镀工件。采用一种适当降低镀件的质量标准来解决这一对质量与成本的矛盾。本书的一个目的是希望给读者提供一些方法和措施，能在不大幅提高生产成本的前提下，改善镀层分布的均匀性，提高电镀件的生产质量。

在电镀的生产过程中，电镀液体系与外界进行着大量的物质与能量交换，产生着激烈的电极反应及其他化学反应，所以维护电镀液体系的稳定是相当困难的事。电镀液中各个组分及电镀的工艺条件都有一个最佳值，但一个工艺点是无法操作的，实际上镀液中各个组分及电镀的工艺条件都是处于一个有限区间内发生振荡变化，处于动态平衡之中。只是电镀生产的管理者应当把这有限区间控制得尽量窄些、小些，工艺条件只能生产合格电镀件的大区间内变动振荡，而不能在生产不合格电镀件与合格电镀件这种大范围内来回振荡变化。因为这将会有生产不合格电镀工件的危险。

本书力图从动态平衡的观点来观察、分析镀液体系与周围环境所进行的物质与能量的交换，并提出了多种有效手段控制这种交换，使之处于动态平衡状态，从而能维持电镀生产过程中镀液体系始终处于稳定平衡状态，在较长时间内都能生产出质量处于稳定合格中的电镀工件。

本书最后一章记录了笔者力图用“简单、可靠、高效、低耗”四大原则来调控、改造电镀工业生产过程的某些经验与教训，供读者参考。

本书中对不少问题的解释和分析系首次提出，如读者发现有片面和谬误之处，敬请批评指正。

编著者
2010. 10

目 录

第一章 电镀均匀性问题	1
第一节 镀层厚度及其均匀性的重要性	1
一、电镀层的分类	1
二、镀层厚度和均匀性对使用性能的重要作用	2
第二节 影响镀层厚度均匀分布的因素	3
一、电镀过程的基本知识	3
二、电流效率的变化对镀层分布的影响	3
三、基体金属对镀层分布的影响	4
四、阴极表面上电流分布状况对镀层分布的影响	5
第三节 阴极表面上初次电流分布	5
一、概念	5
二、表征与应用	6
三、影响因素	9
第四节 阴极表面上二次电流分布	14
第五节 镀液的分散能力及其测定方法	18
一、镀液分散能力的基本概念	18
二、远近阴极法	19
三、弯曲阴极法	21
四、霍尔 (Hull) 槽测定法	22
五、镀液分散能力测定与分析实例	22
第六节 镀液的覆盖能力及其测定方法	22
一、影响覆盖能力的因素	23
二、镀液覆盖能力的测定方法	25
第七节 整平作用机理及整平能力测定方法	28
一、微观不平表面的物理化学特性	29
二、镀液微观整平能力的类型	29
三、镀液微观整平能力的测定方法	31
第八节 用霍尔槽测定镀液分散能力、整平能力及其他应用	32
一、霍尔槽及其结构	32
二、霍尔槽的试验与分析评定方法	34

三、用霍尔槽测定镀液的分散能力	37
四、用霍尔槽测定镀液的整平能力	39
五、霍尔槽在电镀生产中其他的应用	39
第九节 镀件表面各点实际电流密度的测定	40
一、等位线、电力线法	40
二、直接测定法	42
三、电镀现场对平均电流密度的控制	42
第十节 电镀液电导率的测定	45
第十一节 镀液阴极电流效率的测定	47
第十二节 电镀液 pH 值的测定	48
第二章 改善电镀层分布均匀性	51
第一节 加强与镀件设计、机加工工序的协调	51
第二节 改善几何因素,提高镀(铬)层分布均匀性	55
一、控制镀液导电的自由空间法	56
二、保护性阴极法	57
三、调整阳极大小、长短、排布位置法	58
四、分段、分部位多次镀铬法	60
五、活塞环的旋转、刮刷镀铬法	62
第三节 某些特定形状的工件改善几何因素的方法	66
一、表面有孔工件的镀铬方法	66
二、特大圆柱体的镀铬方法	67
三、大型冷冲压模具的镀铬方法	67
四、减震器杆等杆件的镀铬方法	70
第四节 电镀挂具对改善镀层均匀性的重要作用	72
一、概述	72
二、常规挂具设计的基本原则	73
三、电镀挂具的种类与结构	75
四、挂(吊)镀中,影响电镀均匀性的主要几何因素	76
五、碗状或筒状工件镀锌挂具及双极性电镀挂具	77
第五节 电镀自动线用挂具	78
一、电镀自动线用挂具的特点	78
二、挂具的及时检修维护	80
第六节 利用滚镀和振动镀改善电镀均匀性	81
一、概述	81
二、单体式滚镀机及振动(荡)电镀机	82

三、滚镀自动生产线	88
第七节 阳极对镀层均匀性的影响	90
第八节 采用调制电流技术改善镀层分布的均匀性	93
一、调制电流技术的概念	93
二、调制电流(脉冲电流)对镀层分布均匀性的影响	94
第九节 采用刷镀方法制取均匀度较高的镀层	96
一、刷镀的基本原理和应用范围	96
二、刷镀的镀层厚度及其分布	99
第十节 利用化学镀、浸镀、机械镀和气相沉积技术获得均匀镀层	99
一、化学镀	100
二、浸镀(置换镀)和接触镀	101
三、机械镀	102
四、物理气相沉积涂(镀)层	102
第十一节 通过调节电镀液的组成改善镀层分布的均匀性	103
第十二节 用络合剂改善镀液的分散能力及覆盖能力	104
第十三节 用电镀添加剂改善分散能力、覆盖能力	108
一、电镀用有机添加剂的特点	108
二、有机添加剂作用机理浅述	108
第十四节 深孔、盲孔工件镀镍中用络合物、有机添加剂提高镀液覆盖能力	110
第十五节 选择适当的电镀工艺规范,获取较均匀分布镀层	112
第十六节 对改善镀层厚度分布均匀性措施的评述	113
第三章 镀层厚度的测定方法	116
第一节 概述	116
第二节 常规液流测厚法	116
一、计时液流测厚法	117
二、一种改进型计量(或计时)液流测厚仪	120
三、用液流电位法客观地判定液流测厚的终点	123
第三节 点滴测厚法及化学溶解测厚法	128
一、点滴测厚法用于常见一般镀层的厚度测定	128
二、薄镀铬层的点滴法测厚	130
三、化学溶解测厚法	131
第四节 阳极溶解法测量镀层厚度	132
第五节 金相显微镜测厚法、扫描电子显微镜测厚法及轮廓仪测厚法	135
一、金相显微镜测厚法	135

二、扫描电子显微镜测厚法	136
三、轮廓仪测厚法	137
第六节 非破坏性测厚法	137
一、概述	137
二、磁性测厚仪	138
三、涡流测厚仪	139
四、X 射线光谱测厚法	140
五、 β 射线反向散射测厚法	142
六、用塞规、千分尺等机械量具测厚法	143
七、在电镀自动线生产过程中对镀层厚度的控制与检测方法	143
第七节 电镀层厚度测量方法评述	145
一、测量方法	145
二、各种测量镀层厚度方法适用范围的选择	146
 第四章 镀液稳定性及其控制	 148
第一节 镀液中的多种类型的动态平衡	148
一、为什么要控制镀液稳定性	148
二、镀液中的动态平衡	149
第二节 电镀过程中的物料衡算	150
第三节 电化学反应物及其产物对镀液浓度动态平衡的影响	151
一、镀液中被镀金属离子浓度的动态平衡	151
二、镀液中有有机添加剂及光亮剂浓度的动态平衡	158
第四节 镀液中基本不参与电化学反应的物质浓度的动态平衡	162
一、属于镀液配方中包含的组分的动态平衡	162
二、镀液配方中未包含成分的动态平衡	165
第五节 电镀生产过程中清除杂质的方法	169
一、电镀生产过程中的自洁作用	169
二、常用的除去镀液中(有害)杂质的方法	171
第六节 采用调节槽法维持镀液浓度的动态平衡	176
第七节 镀槽生产时的平均装载量及生产强度对槽液稳定性的影响	177
第八节 仿金镀液、黑镍镀液稳定性控制	177
第九节 镀液热量平衡及电镀温度的选定	179
一、镀液体系内的热量平衡	179
二、电镀液工作温度的选定及其对节能的重要意义	181
第十节 镀液体积的动态平衡	182
一、引起镀液体积变化的原因	182

二、镀液体积的动态平衡的控制	183
第五章 电镀过程中简易、快速的监测与控制方法	185
第一节 电镀过程中的“望闻问切”诊断法	185
一、望诊	186
二、闻诊	190
三、问诊	190
四、切诊	191
第二节 掌握一些简单的定性分析方法	191
一、检查与消除碱性镀锡液中 Sn^{2+}	192
二、检查纯水质量	192
三、鉴定铁盐及亚铁盐	192
第三节 电镀中浓度的监控	194
第四节 利用镀液组成变化特点,简化镀液化学分析过程	199
第五节 含铬废水中 CrO_3 含量达标排放的简易定性测定方法	200
一、试剂配制	201
二、检定方法	201
第六节 电化学抛光液 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{6+}$ 含量的比例变化的监测	201
一、“铬标准”的配制方法	202
二、目视比色操作程序	203
第七节 对工作状态变化较快溶液在车间建立简易的监控手段	203
第八节 工件表面脱脂(去油)效果几种简易评定方法	205
第九节 建立镀液严密监管制度	206
第十节 充分利用标准样板	207
参考文献	209

第一章

电镀均匀性问题

第一节 镀层厚度及其均匀性的重要性

一、电镀层的分类

电镀技术是众多表面处理技术中发展历史较长、工艺相对成熟、成本低廉的一种技术。对国民经济的各行各业发展都起到重要作用，无数的电镀制品与我们的日常生活息息相关。比如：钟表、领带别针、皮带扣、手提包的卡口等装饰品；剪刀、订书机、钢笔等文具用品；冰箱、电风扇、电视机等家用电器以及家具等，到处都有电镀件的身影。

通常，经过电镀处理能赋予或改善产品的表面状态或者使其表面结构具备某种有用功能。按照行业习惯，可根据产品获得的功能分为两大类型。

(一) 防护装饰性电镀

传统上常把这类镀层一分为二，即防护性镀层，如锌、镉及其合金等镀层；装饰性镀层，如 Cu/Ni/Cr、Ni/Cr、仿金、仿古铜等。然而，在市场经济中，即便是防护性镀层，也应提高其外表的装饰性，产品的外表美观悦目就能提高其商品价值。反之，装饰性镀层仅仅是外表美观华丽而不能防护，甚至会引起基体材料的加速腐蚀破坏，必然会破坏其外观而无法单独采用。所以防护与装饰这两类功能在实际运用中必须同时考虑，很难绝对区分。

(二) 功能性电镀

功能性电镀主要指那些能够使被镀工件表面具备某种特殊功能的镀层。随着现代工业和技术的发展，各类新型镀层的不断涌现，除传统的提高表面硬度，增加耐磨性；改良导电或接触电阻；增加反光、抗高温、改善焊接和胶接、防止扩散或渗透、修复磨损工件等之外，在高科技行业，特别是电子工业中获得了新的应用，如 IT 产业的印刷电路板、磁记录介质镀层等。此外，用电镀技术获得功

能性膜层已经成为现代应用电化学的重点研究方向之一。

二、镀层厚度和均匀性对使用性能的重要作用

为了达到电镀层所希望的性能，对镀层的质量有较多要求，其中很重要的要求是电镀层必须具有符合标准规定的镀层厚度，而且要求镀层分布均匀。对于以防蚀作用为主的防护镀层如锌、镉等镀层来说，它们对于钢铁等工件基体是“阳极性镀层”。这是由于锌、镉的标准电极电位比钢铁的标准电极电位负得多，因此当镀件（钢铁）在腐蚀介质受到电化学腐蚀而生成铁-锌（或镉）原电池时，锌镀层将是阳极，它自身遭到溶解，并保护钢铁基体免遭腐蚀。即使工件表面的锌镀层局部不太完整，也仍能起到保护作用（在其保护半径之内时）。所以，锌镀层对镀件既有机隔离腐蚀介质的保护作用，又有电化学的保护作用。很显然，这类“阳极性镀层”的使用寿命或保护期限将很大程度上决定于锌镀层可以溶解多长时间，这个时间主要决定于锌镀层的厚度大小。

对于以装饰性为主的 Cu/Ni/Cr 等镀层，它们是“阴极性镀层”。这类金属镀层的标准电极电位比基体钢铁的标准电极电位正。因此，在腐蚀介质内受到电化学腐蚀作用时，钢铁基体将作为阳极，发生溶解，受到腐蚀而生锈。阴极性镀层在工件表面上，仅有机隔离腐蚀介质的保护作用。当镀层上出现深入到基体金属钢铁的孔隙、裂纹时，镀层就不但不能保护基体钢铁，反而会加速它的腐蚀。而镀层上孔隙、裂纹，甚至局部因腐蚀而剥落的产生除和镀液性能、电镀工艺等有关外，很重要的影响因素是镀层厚度。所以，对于防护装饰性镀层（从标准电极电位来分类），无论是阳极性镀层，还是阴极性镀层，镀层厚度都是极重要的产品质量指标。

对于各种各样应用目的的功能性电镀层，一定的镀层厚度也是达到一定性能要求、应用目的的重要手段和保证。例如，耐磨性镀层的性能和使用寿命，除和镀层的硬度等性能有关外，镀层厚度是极关键的指标。对于抗高温、具有超导性能、磁性能、磁电性能等镀层都离不开要求足够镀层厚度。对于多种功能薄膜材料镀层甚至还要求一定的镀层厚度，既不能过薄，也不能过厚，否则镀层性能将不能满足要求，镀件也将失去效能。所以，无论对防护装饰性镀层，还是功能性镀层，镀层厚度值的高低大小往往是产品设计和对镀件质量要求中首先要考虑的。

另外，镀层厚度分布是否均匀、镀层能否覆盖在工件的所有表面上都是十分重要的控制指标。因为这里有所谓水桶的短板决定水桶的容量大小的效应，作为防护性镀层往往在镀层最薄处首先生锈；用作装饰性镀层在镀层的最薄处开始漏底，产生锈蚀和破坏装饰性外观。对于功能性镀层大多也有对镀层的均匀性要求，例如对于修复工件被磨损尺寸的镀层，镀层厚度不均匀常常会影响

工件的公差配合,或产生锥度、椭圆度等问题。对于具有特殊性能的镀层,不均匀的镀层厚度也常会使其性能变坏。但是在电镀实际生产过程中,要做到镀层厚度均匀分布是件颇费周折的事。为此,有必要深入了解影响镀层厚度均匀分布的各种因素。在控制镀层平均厚度的同时,也能使镀层在工件表面上均匀地分布。

第二节 影响镀层厚度均匀分布的因素

一、电镀过程的基本知识

电镀技术又称为电沉积技术,是在被镀工件表面获得金属镀层的主要方法之一。在电镀时,被镀工件作为阴极,与直流电源的负极相连接,阳极(金属板)连接电源的正极,共同构成直流电的回路,使镀液中的金属离子被还原并沉积到阴极(被镀工件)表面上这样一个过程。根据法拉第电解定律,在直流回路中,电流通过电镀溶液,在阴、阳极会引起电化学反应。在阴、阳极上析出(或在阳极上溶解)物质的量与通过的电量成正比。数学上可表示成下式:

$$\Delta m = KQ = KI t \quad (1-1)$$

式中, Δm 为电化学反应物质即电沉积的量; K 为比例系数,称为电化当量,即表示通过单位电量所产生的(电)化学变化量; Q 为通过的电量,它等于电路中所通过电流 I 和通电时间 t 的乘积。

从这一点来讲,被镀金属在阴极表面各个部位上的沉积量取决于电流在阴极(被镀工件)表面上的分布状况。所以,一切能影响电流在阴极表面分布的因素,都能影响被镀金属镀层在阴极表面上的分布。但是,在实际电镀生产过程中,阴极上发生的反应,往往不单是金属的析出,在伴随着金属析出的同时,常常还有其他的所谓副反应发生。例如电镀溶液多半是水溶液,其中必有 H^+ 的存在,所以 H^+ 放电,形成氢气的析出是最常见的副反应之一。这就牵涉到电流效率问题。

二、电流效率的变化对镀层分布的影响

在电镀过程中,在阴极表面不同部位上沉积出金属的多少,不仅与通过该部位的电流大小有关,同时还受到电流效率的影响。对于一定的电镀过程,当通电时间一定时,在阴极上某一部位所得到的镀层厚度(即金属的沉积量)与该部位通过的电流(如为单位面积时,则是电流密度)和电流效率成正比。可表示为

$$\delta = I \eta_K k \quad (1-2)$$

式中, δ 为镀层厚度; I 为电流密度; η_K 为在该电流密度下时的电流效率;

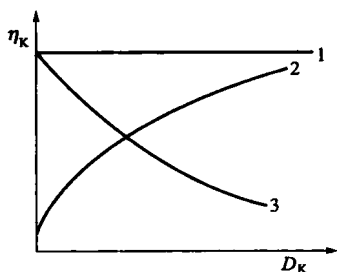


图 1-1 电流效率与电流密度的关系

k 为比例系数。电镀生产实践表明，阴极电流效率随电流密度变化的关系有下述三种情况，如图 1-1 所示。

① 电流效率与电流密度无关：如图 1-1 中直线 1 所示。最典型的例子如酸性硫酸铜镀铜液和某些银镀液，其电流效率很少随电流密度变化而变化，且其电流效率几乎可达 100%，所以常设计为计量电路中通过电量多少的库仑计。在这种镀液中，电镀层在阴极表面上的分布实际上与电流在阴极表面上的分布相同或者

说成正比关系。

② 电流效率随着电流密度的增大而增大，如曲线 2。镀铬电解液就是典型例子。由于阴极上电流密度大的部位电流效率高；电流密度小的部位电流效率低，这样从公式 (1-2) 可以看出，在电流密度小的阴极表面上的部位，原本就应金属沉积量少，镀层厚度薄，现在电流效率又低，镀层厚度就更薄了。从而更加剧了镀件上镀层厚度的不均匀分布。这是镀铬电镀液分散能力极差的原因之一。

③ 阴极电流效率随着电流密度的增大而减小，如曲线 3。所有采用了络合剂（又叫配位体）的电镀液均属此类。由于电流密度大的阴极部位，其电流效率低；电流密度小的阴极部位的电流效率高，相对增加了镀层厚度（金属沉积量），从而使阴极上镀层的厚度分布更加均匀。一切氰化物电镀液即此类典型。

应当说明一下，其实能影响电流效率的因素很多，例如电镀时的温度、镀液的组成、浓度、pH 值等，均可能使电流效率增加或降低，但不一定会影响到镀层在阴极表面分布的均匀性。具体说，如果当电镀温度从 40℃ 上升到 60℃ 进行电沉积过程时，电流效率从 90% 下降到 80%，下降了 10%。但是如果在 60℃ 电沉积时在阴极表面上电流密度高的部位与电流密度低的部位的电流效率均从 90% 下降到 80%，即都下降 10%。这样，这种变化的效果就相互抵消了，并不会影响到镀层在阴极表面上分布的均匀性。只有当这种影响使不同电流密度的电流效率产生不同效果时，才会起作用。

三、基体金属对镀层分布的影响

基体金属的本性及其表面状态对镀层分布都有影响。基体金属上氢的过电位，基体金属的表面状态，其表面是否清洁（有无氧化皮、氧化膜、钝化膜、油污等），其表面的粗糙度情况等均对镀层在其上沉积和分布的均匀性有一定影响（这些在镀液的覆盖能力一节中将详细说明）。但是，这种影响在基体金属（被镀

工件)表面上完整地覆盖上一层镀层之后就会逐渐消失。

四、阴极表面上电流分布状况对镀层分布的影响

影响电流在阴极表面上分布的因素很多,可以把它们归纳为以下两个方面。第一是几何因素的影响,这包括阳极、阴极(即电镀工件)和镀槽的形状及尺寸;阳极与阴极间的距离及它们间的相互排布;阳极和阴极浸入镀液中的深度等情况来决定。第二是电化学因素、放电离子的扩散速度等因素的影响。它主要由电镀液的特性及对镀液的搅动情况来决定。同时,把受第一类几何因素影响所形成的电流分布称为初次电流分布;把受第二类因素影响所形成的电流分布称为二次电流分布。

从式(1-2)可以看出,在一定的电镀过程中,当通电时间一定时,在阴极上某部位所得到的镀层厚度 δ 与该部位通过的电流密度及电流效率成正比。但在多数情况下电流效率 η_k 的变化范围较小,变化多在20%以内。而电流密度的变化可以是几倍,甚至几十倍。从中可看出,影响镀层在阴极表面上(均匀)分布的三大因素中,起决定性作用的是电流在阴极表面上的分布状况。因此,应该对它作出更深入的全面分析。

第三节 阴极表面上初次电流分布

一、概念

可以设计一个简单的电解池装置来初步说明初次电流分布的概念(如图1-2)。在电解池中将三块面积相等的矩形薄钢板作为阴极和阳极,并平行地放置在电解池中,当外部接入一个直流电压 V (槽压)在阴阳极两端时,将有直流电通过电解池。由于金属导线和金属电极的电阻远小于电解液的电阻(一般相差 $10^3 \sim 10^{10}$ 倍左右)。所

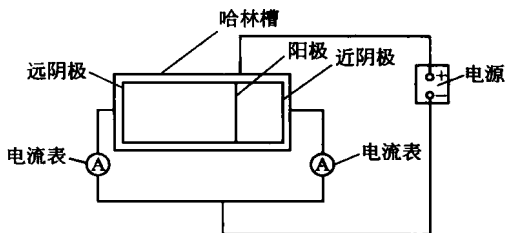


图 1-2 电解池

以认为距阳极近的阴极板(简称“近阴极”)与阳极间的电压值和距阳极较远的阴极板(简称“远阴极”)与阳极间的电压值应当相同,都是外部接入的电压“ V ”。根据欧姆定律,通过阴极上的总电流为

$$I_{\text{总}} = \frac{\text{槽电压}(V)}{\text{总电阻}} \quad (1-3)$$

当直流电通过电解槽时,主要会遇到两类阻力:一类是从阳极到阴极表面之

间的电解液的欧姆电阻 ($R_{\text{电解液}}$)；另一类是发生在固体电极与电解液 (金属-溶液) 两相界面上的阻力 (阻抗) ($R_{\text{极化}}$)。这种阻力是由于电化学反应过程或放电离子扩散过程进行缓慢所引起的。也就是由于电化学极化和浓差极化造成的阻力，称为极化电阻，用 $R_{\text{极化}}$ 表示。

当不存在极化，即 $R_{\text{极化}} = 0$ 时，电流在阴极表面上的分布称为初次分布，即：不考虑电化学因素、扩散因素的影响，而只考虑几何因素的影响时，在阴极表面上的电流分布。初次电流分布由阴、阳电极间建立的电场决定，这种电场服从经典的 Laplace (拉普拉斯) 规律。

$$\nabla^2 \varphi = \text{div} (\text{grad } \varphi) = 0 \quad (1-4)$$

式中，电位 φ 是位置的函数。

以上 Laplace 方程式的解析解法只是对某些最简单的几何形状才是可能的。即使在这种条件下，其数学处理仍极复杂和烦琐，只是由于近年来计算机技术的进步，才有助于问题的解决。据国外报道，有人对涡轮机叶片进行复合镀镍时，其理论计算的镀层厚度值分布能与实测结果基本相符。但由于其数学计算复杂、深奥，而且仅能解决一些几何形状最简单的镀件。所以，并未得到太多的应用。

二、表征与应用

初次电流分布主要取决于镀槽和电极的几何因素。其中镀槽和电极 (阳极和被镀工件) 的形状、电极的相对尺寸及其布置方式的选用等起主要作用，而电极的 (绝对) 尺寸大小与规模相对影响不大。镀液的电导可以看做各处相等，如果没有特别的扰动，导电应当均匀。即使如此，实际电镀条件下，镀槽、镀件等的变数太多，实践中常用方法是使用电场和电力线的概念来方便地定性分析和判断问题。

电极间形成的电场体现在镀液内电流流经的途径不同时具有不同的电位梯度。通过实际测量镀液中各个具体点的电位值，并将等值电位点相互连接构成

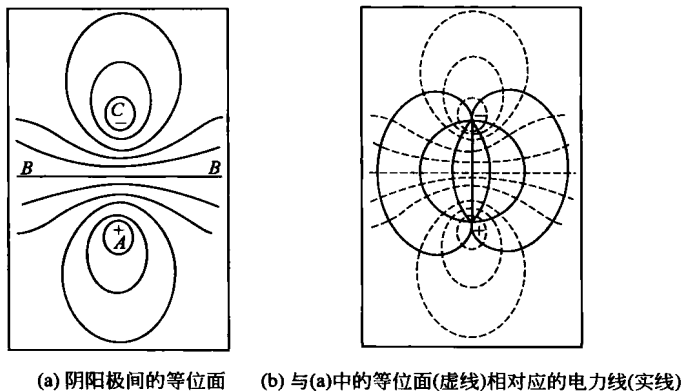


图 1-3 电极间的等位面和电力线分布的示意

等电位面，而与等电位面垂直的法线方向的电流的途径就是电力线。这样电力线的分布便体现和显示了初次电流分布，使人们获得了一个直观形象。电力线密集的部位，电流密度就高；电力线稀疏处，电流密度就低。由此便可以用来指导电极、镀槽的选择和相对布置，辅助阳极或绝缘遮挡物的设计和安置。等位面 and 电力线的示意图见图 1-3。而电力线与镀层在工件上的实际分布对应关系见图 1-4。

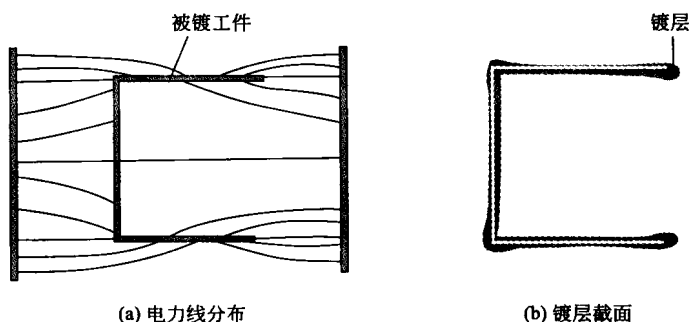


图 1-4 单个的带凹腔的镀件的电力线分布与实际镀层截面示意

利用电力线图指导消除和减少镀层不均匀分布的几个实例见图 1-5~图 1-8。

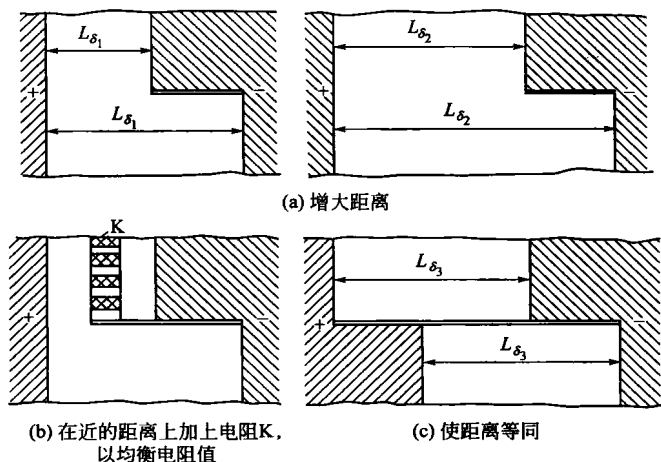


图 1-5 当阴、阳极间的距离不同时，消除电流分布不均匀的方法

从上面数图可以看出电力线图还是比较有用的。但一般工厂实验室更多地还是直接通过测量在被镀工件表面上各部位上的镀层厚度（有时也可以称量各部位上镀层的重量）来估计被镀工件表面上各部位上电流密度的分布状态，以便为改善电流密度分布的均匀性提供实验依据。

为此，最常用的装置如图 1-2。在该装置中，流过阴极的总电流 $I = (\text{槽压}) / R$ （总电阻）。为了研究初次电流分布，我们选择 $R_{\text{极化}} \approx 0$ 的镀液和电解规范。