

第十七篇 电化学技术与电池

主编 张国衡

执笔 张国衡 杨兰生

目 录

第80章 电化学基础

80.1 电化学技术17-3

80.2 电流与电荷量17-4

80.3 电位与电压17-5

第81章 电解工艺

81.1 电解17-8

81.2 电镀..... 17-10

81.3 电化学加工与电铸..... 17-15

81.4 电化学金属精饰..... 17-17

81.5 其它电解生产工艺..... 17-18

第82章 金属防腐技术

82.1 金属腐蚀..... 17-20

82.2 防腐技术..... 17-20

第83章 电池

83.1 概述..... 17-25

83.2 原电池（一次电池）..... 17-27

83.3 蓄电池（二次电池）..... 17-33

83.4 贮备电池..... 17-40

83.5 燃料电池..... 17-41

参考文献

第十七篇 电化学技术与电池

主编 张国衡

执笔 张国衡 杨兰生

目 录

第80章 电化学基础

80.1 电化学技术17-3

80.2 电流与电荷量17-4

80.3 电位与电压17-5

第81章 电解工艺

81.1 电解17-8

81.2 电镀..... 17-10

81.3 电化学加工与电铸..... 17-15

81.4 电化学金属精饰..... 17-17

81.5 其它电解生产工艺..... 17-18

第82章 金属防腐技术

82.1 金属腐蚀..... 17-20

82.2 防腐技术..... 17-20

第83章 电池

83.1 概述..... 17-25

83.2 原电池（一次电池）..... 17-27

83.3 蓄电池（二次电池）..... 17-33

83.4 贮备电池..... 17-40

83.5 燃料电池..... 17-41

参考文献

第80章 电化学基础

80.1 电化学技术

80.1.1 电化学

电化学是关于化学能和电能直接相互转换的技术领域。由化学能转换为电能的过程称为成流过程,干电池、蓄电池的供电作用属于这类电化学过程。由电能转换为化学能的过程称为电解过程,电镀、电解冶金的基本原理则属于这类电化学过程。

进行电化学过程,必须形成电化学体系。电化学体系是由第一类导体与第二类导体联合组成^[1,2]。第一类导体以电子导电为特征,如金属铜;第二类导体以离子导电为特征,如硫酸铜水溶液。一个电化学体系,原则上至少包含一个第二类导体,即电解质溶液,以及与其两端相接触的两个第一类导体,即通称的电极,电化学反应就在两类导体的接触界面处发生。这种电子导体(e)与离子导体(i)的接合称为 $e-i$ 接合,这种接合把界面一侧的单纯电子传导与另一侧的具有功能性的还原或氧化反应过程的电子得失联系起来,构成电路中电荷的传递。这种特殊功能的 $e-i$ 接合可视为一种电气元件,两个 $e-i$ 元件的组合将构成一个 $e-i-e$ 电化学体系,其中电位高的一个 $e-i$ 元件称为正极,电位低的一个称为负极。作为正极,在接通电路后发生还原反应。凡是发生还原反应的电极又称为阴极;与此相对应,在负极上发生的是氧化反应,发生氧化反应的电极又称阳极。习惯上对于电池中的电极采用正极、负极的名称,对于电解中的电极则用阴极、阳极的名称。因此,电化学体系是由两类导体按一定方法接合,并能同时发生氧化和还原两种电化学反应的体系。

80.1.2 电化学技术的应用

电化学技术应用广泛,下面列出几个主要方面的应用:

(1) 电解冶金

1) 水溶液电解冶金:有铜、银、金、锌、镉、铅、铁、钴、镍等。

2) 熔盐电解冶金:有锂、钠、钾、钙、镁、铝、钛、锆、铌、钽、铈等。

(2) 电解合成

1) 制取无机物:烧碱、盐酸、氯酸盐、过氯酸盐、次氯酸盐、氟、氯、氢、氧等。

2) 制取有机物:己二腈、四乙基铅、乙醛酸、葡萄糖酸钙、癸二酸等。

(3) 电镀、电铸

(4) 电化学加工

1) 金属电解尺寸加工:电解加工、电解磨削等。

2) 金属电解表面精饰:电解抛光、阳极氧化等。

(5) 电化学防腐蚀:阴极保护、阳极保护等。

(6) 电化学传感器:玻璃电极、金属电极、气敏电极、离子选择电极、生物膜电极等。

(7) 电化学分析:电位分析、电导分析、电解分析、极谱分析、伏安分析等。

(8) 界面电化学:电泳、电渗等。

(9) 化学电源:干电池、蓄电池、燃料电池、贮备电池等。

80.1.3 电化学反应装置

电化学技术的应用需通过电化学反应装置,来实现化学能与电能的直接转换。由于功能目的和运行特点的不同,电化学反应装置分为电化学反应器和电化学转换器两类^[3]。电化学反应器是电化学反应以较大电流密度和较大电荷量运行,其目的是给化学电源提供电能,或者用于为电解提供产品或加工的装置;电化学转换器是电化学反应在弱电条件下运行,或在平衡状态下转换,其目的在于把与化学能有关的化学量转换为电压、电流等电量。

电化学反应器分类如下:

(1) 按过程性质分为:电能为主导的电解过程反应器;化学能为主导的成流过程反应器。

(2) 按电极导电方式分为单极式、复极式(每块电极的两面分别为阴极和阳极)。

(3) 按电极状态分为:阳极方面有可溶性阳极、不溶性阳极、消耗性阳极;阴极方面有固态阴

极, 液态阴极, 颗粒阴极。

(4) 按电解质性质分为有水溶液、非水溶液、熔盐、固体电解质等类。

(5) 按隔离性质分为无隔离、机械隔离(多孔隔膜)、离子交换膜。

(6) 按受压状态分为常压的与加压的。

(7) 按槽体外形分为方槽式、圆筒式、板框式与螺旋式。

(8) 按容器结构分为容器性与非容器性。

80.2 电流与电荷量

80.2.1 电流效率

电解时实际产生或消耗的物质数量与理论计算量的比值, 以百分数表示, 称为电流效率(η), 即电解过程中, 为获得目的产物时电流的有效利用率。可按下式计算

$$\eta = \frac{m}{Itk} \times 100\% \quad (80-1)$$

式中 m ——实际产生或消耗的物质数量(g);

I ——电流强度(A);

t ——通过电流的时间(h);

k ——电化当量(A/(A·h))。

电流效率通常按阴极与阳极分别表示。针对阴(阳)极上反应的电流效率称为阴(阳)极电流效率。由于电解时各电极上发生的电化学反应不止一种, 如果不是把全部的反应计算在内, 而只计算指定的反应时, 则电流效率总是小于100%。但有时由于存在化学溶解(非电化学反应过程), 这时对于可溶性阳极的溶解, 其阳极电流效率会大于100%; 或者在有不同氧化态的离子(如 Cu^+ 及 Cu^{2+})同时存在, 并参加电化学反应时, 如果仅按高价离子计算电沉积过程时, 则阴极电流效率也会出现大于100%的现象。

80.2.2 电流分布

它是指电流在电极表面的分布。由于在电路中, 电流通过电极与溶液界面各个位置时的阻力不同, 因而在电极表面各处的电流大小也会不同。多数电化学反应过程要求电极表面有均匀的电流分布, 也就是要求有均匀的电流密度的分布。例如, 电镀时若电流分布均匀, 则可在作为阴极的镀件上获得均匀的镀层。

由于电化学反应时的电流与电位之间存在着函数关系, 因此电流分布也就反映了电极表面的电位

分布。根据影响电流分布因素的性质, 可将电流分布分为两类^[3]: 初级电流分布, 仅考虑电压平衡中欧姆压降因素的影响。这类电流分布取决于电化学反应装置(槽体形状、电极形状与排布等)的几何结构, 而与电化学反应的动力学因素无关; 二级电流分布, 对电压平衡中的极化因素也考虑在内(有时浓度极化未考虑在内时称二级电流分布, 考虑在内时则称三级电流分布)。这时, 电导电压与极化电压的影响将都考虑在内。在电化学反应装置几何结构相同的条件下, 初级电流分布最不均匀, 二级电流分布趋向均匀, 并且也更接近电流分布的实际情况。

80.2.3 法拉第定律

通常也称电解定律, 是关于电化学反应中电学量与化学量之间关系的定律。

法拉第第一定律指电极上通过电流产生化学变化的物质质量与通过的电学量成正比。法拉第第二定律指电极上通过一定电学量所产生或消耗的物质质量与该物质的化学当量成正比, 即每通过96489C的电荷, 电极上产生或消耗相当于接受或给出1mol电子的任何物质(即1克当量的物质)。

法拉第定律可用以下的关系式表示:

$$m = \frac{It}{F} \frac{A}{n} \quad (80-2)$$

式中 m ——产生或消耗的物质质量;

I ——电流强度;

t ——通过电流的时间;

A ——该物质的原子量或分子量;

n ——电子转移数(A/n 即克当量);

F ——法拉第常数(相当于1mol电子电荷量的库仑数, 即 $1F=96489C$, 习惯上近似取 $1F \approx 96500C$, 工业上取 $1F \approx 26.8A \cdot h$)。

计算电荷量可以利用通过的电流强度与通电时间的乘积关系, 或者基于这一原理制成的电量计(亦称库仑计)。也可以根据法拉第定律, 利用电解过程中阴极上析出的物质质量来计算电路中通过的电荷量。同样, 也可利用基于这一原理制成的电量计。但是用于这类电量计的电化学反应要求其阴极电流效率应达到100%。其中最常用的是铜库仑计, 它是根据通过电流时在阴极析出铜的数量来计算电荷量。铜库仑计的电解液组成为: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 15%, H_2SO_4 15%, 乙醇5%。阳极为纯铜, 室温下适用的电流密度范围为20~200A/m²。铜库仑计使用简便, 但精确性不高。精确性要求高时, 可用银库仑计。

80.2.4 电化当量

表 80-1 元素的电化当量

元素	符 号	原子量 <i>A</i>	价数 <i>n</i>	电化当量 <i>k</i>	
				10 ⁻³ g/C	g/(A·h)
银	Ag	107.868	1	1.1173	4.0226
铝	Al	26.982	3	0.09321	0.33560
砷	As	74.922	3	0.25882	0.93187
金	Au	196.967	1	2.0413	7.3495
			3	0.68044	2.4498
铍	Be	9.012	2	0.04670	0.16813
铋	Bi	208.980	3	0.72195	2.5992
钙	Ca	40.08	2	0.20769	0.74776
镉	Cd	112.41	2	0.58250	2.0972
氯	Cl	35.453	1	0.36743	1.3229
钴	Co	58.933	2	0.30539	1.0995
铬	Cr	51.996	3	0.17963	0.64672
			6	0.089813	0.32341
铜	Cu	63.54	1	0.65852	2.3709
			2	0.32926	1.1854
氟	F	18.998	1	0.19689	0.70888
			2	0.28941	1.0420
铁	Fe	55.85	3	0.19294	0.69465
			1	0.010446	0.03761
汞	Hg	200.59	1	2.0789	7.4847
			2	1.0395	3.7424
钾	K	39.098	1	0.40521	1.4589
			1	0.07192	0.2589
锂	Li	6.939	1	0.07192	0.2589
镁	Mg	24.305	2	0.12595	0.45345
锰	Mn	54.938	2	0.28469	1.02496
			3	0.18979	0.6833
钠	Na	22.99	1	0.23827	0.85784
			2	0.30412	1.0950
镍	Ni	58.69	2	0.30412	1.0950
氧	O	15.999	2	0.082905	0.29850
铅	Pb	207.2	2	1.0737	3.9657
钯	Pd	106.42	2	0.55146	1.9855
铂	Pt	195.08	2	1.0109	3.6396
			4	0.50505	1.8193
铑	Rh	102.906	2	0.53325	1.9199
			3	0.35550	1.2799
			4	0.26663	0.9599
			4	0.4206	1.5143
锑	Sb	121.75	3	0.4206	1.5143
硒	Se	78.96	4	0.20458	0.73657
锡	Sn	118.69	2	0.61504	2.2144
			4	0.30752	1.1072
钛	Ti	47.88	4	0.12406	0.44664
钨	W	183.85	6	0.31757	1.1433
锌	Zn	65.38	2	0.33880	1.2198

注：原子量数据引自北京大学化学系编《元素周期表》，科学出版社，1984年。

法拉第定律表达式(80-2)中的 $\frac{A}{nF}$ 因子称为

电化当量(*k*)。电化当量表示电解时每通过单位电荷量所产生或消耗的物质数量。当电荷量用A·s表示时，电化当量的单位为mg/C；当电荷量用A·h表示时，则电化当量的单位为g/(A·h)。一部分化学元素的电化当量列于表80-1。

80.3 电位与电压

80.3.1 电极电位

当金属(电极)与电解质溶液接触时，在界面处产生的电位差，称为金属的电极电位 φ 。当溶液中除了作为溶剂的水之外，只含有该金属盐的离子，并且达到平衡状态，这时的电极电位称为该金属的平衡电极电位 φ_0 。平衡电极电位与活度和温度有以下关系：

$$\varphi_0 = \varphi^\circ + \frac{RT}{nF} \ln a \quad (80-3)$$

$$= \varphi^\circ + 2.3026 \frac{RT}{nF} \lg a$$

式中 φ° ——标准电极电位；

R ——气体常数，即8.314J/(K·mol)；

n ——参加反应的电子数；

T ——热力学温度(K)；

F ——法拉第常数；

a ——离子的活度。

25℃时

$$\varphi_0 = \varphi^\circ + \frac{0.059}{n} \lg a \quad (80-4)$$

活度(a)又称有效浓度，它与浓度(c)的关系为 $a = \gamma c$ ， γ 为比例系数，称为活度系数。

任何电解质溶液都是电中性的，因而电离后也必然存在正、负两种离子。既不存在单独一种离子，也不能测出单独一种离子的活度，但是可以采用平均活度($a_{\pm}$)来计算^[1]，它与 a 的关系为 $a = a_{\pm}^\nu$ ，而 ν 为一个电解质分子电离后的正离子数目与负离子数目之和。

电极反应的通式可表示为：氧化态 + ne = 还原态。因此，平衡电极电位可表示成

$$\varphi_0 = \varphi^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{氧化态}}}{a_{\text{还原态}}} \quad (80-5)$$

这就是能斯特方程式。例如，当金属锌与锌离子的水溶液接触时，由于纯金属的活度规定为1，即 $a_{\text{还原态}} = a_{\text{Zn}} = 1$ ，而 $a_{\text{氧化态}} = a_{\text{Zn}^{2+}}$ ，则此时锌的平衡电极

电位可表示如下:

$$\varphi_{e, z_n} = \varphi^\circ + \frac{RT}{2F} \ln a_{z_n} +$$

80.3.2 极化与过电位

当电极上有电流通过时, 电极电位偏离平衡电位的现象, 称为电极的极化。极化值 ($\Delta\varphi$) 的大小可表示如下:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_e. \quad (80-6)$$

在阳极极化时, $\varphi > \varphi_e$, $\Delta\varphi$ 为正值; 在阴极极化时, $\varphi < \varphi_e$, 此时 $\Delta\varphi$ 为负值。电极的极化又可用过电位 (η) 来表示。由于阳极极化值与阴极极化值的符号不同, 习惯上过电位取极化的绝对值。

由于极化值与通过的电流密度有关, 因此在对比较化的大小时, 应取同一电流密度条件下的极化值作比较, 并经常把表示电极电位随电流密度变化的关系绘制成曲线, 称为极化曲线, 如图 80-1 所示。

产生极化的原因主要有两类: 一类是由于电极表面的电化学反应速度小于电子的传递速度, 称为电化学极化; 另一类是由于溶液中的离子传递速度

小于电子的传递速度, 称为浓度极化。

在水溶液中进行电化学反应时, 氢的过电位有很大实用意义, 电位较负的金属离子在阴极能否从水溶液中电沉积出来, 以及其阴极过程电流效率的大小, 都与氢在该金属上的过电位大小密切相关。在这种情况下, 只有当氢在该种金属上的过电位较大时, 其阴极电沉积的可能性会大, 电流效率也相应较高。若氢在铂上的过电位很小, 而在铅、锌、汞上有较大的过电位。对于阳极, 则氧的过电位很重要。因为除了采用可溶性阳极外, 阳极过程经常是氧的析出。不同电极材料上氢与氧的过电位分别列于表 80-2 与表 80-3⁽⁴⁾。

80.3.3 标准电极电位

当能斯特方程 (式 1-5) 中 $a_{\text{氧化态}} = a_{\text{还原态}} = 1$ 时, $\ln \frac{a_{\text{氧化态}}}{a_{\text{还原态}}} = 0$, 则 $\varphi_e = \varphi^\circ$; 此时的平衡电极电位即为

标准电极电位。

实际工作中, 电极电位的绝对值是无法测定的, 而是把氢在 101.325 kPa (即 1 atm)、 $a_{\text{H}^+} = 1$ 条件下的标准电极电位规定为 0, 将待测电极与标准氢电极 (即上述条件下的氢电极) 组成电池后, 用此测得的电动势来表示。按这种标准表示的电极电位, 称为氢标电极电位。此外, 由于单独一种离子的活度无法测定, 在计算平衡电极电位时, 对于可逆过程可以用平均活度代替单独一种离子的活度。在 25℃ 时水溶液中一些常用电极的标准电极电位列于表 80-4。

标准电极电位按大小顺序排列称为电化序。电

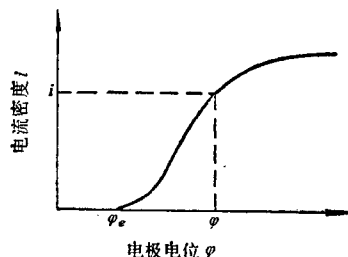


图 80-1 极化曲线

表 80-2 氢的过电位 (25℃)

电流密度 A/m ²	过 电 位 V								
	铂 黑	光 Pt	Cu	Fe	石 墨	Ni	Zn	Pb	Cd
0	—	—	—	0.2026	—	—	—	—	0.466
1	0.0034	—	0.351	0.2183	0.3166	—	—	—	0.651
10	0.0154	0.024	0.479	0.4036	0.5995	0.563	0.716	0.52	0.981
20	0.0208	0.034	—	0.4474	0.6520	0.633	0.726	—	—
50	0.0272	0.051	0.548	0.5024	0.7250	0.705	0.726	1.060	1.086
100	0.0300	0.068	0.584	0.5571	0.7788	0.747	0.746	1.090	1.134
500	0.0376	0.186	—	0.7000	0.9032	0.890	0.926	1.168	1.211
1000	0.0405	0.288	0.801	0.8184	0.9774	1.048	1.064	1.179	1.216
2000	0.0420	0.355	0.988	0.9854	1.0794	1.130	1.168	1.217	1.228
5000	0.0448	0.573	1.186	1.2561	1.1710	1.202	1.201	1.235	1.246
10000	0.0483	0.676	1.254	1.2915	1.2200	1.241	1.229	1.262	1.254
15000	0.0495	0.768	1.269	1.2968	1.2208	1.254	1.243	1.290	1.257

表 80-3 氧的过电位 (25℃)

电流密度 A/m ²	过电位 V							
	铂 黑	光Ni	海绵Ni	Cu	Ag	Au	石墨	光Pt
10	0.398	0.353	0.414	0.442	0.53	0.673	0.525	0.721
50	0.480	0.461	0.511	0.546	0.674	0.727	0.795	0.80
100	0.521	0.519	0.563	0.580	0.729	0.963	0.896	0.85
200	0.561	—	—	0.605	0.813	0.996	0.963	0.92
500	0.605	0.670	0.653	0.637	0.912	1.064	—	1.16
1000	0.638	0.726	0.687	0.660	0.984	1.244	1.091	1.28
2000	—	0.775	0.714	0.687	1.038	—	1.142	1.34
5000	0.705	0.821	0.740	0.735	1.080	1.527	1.186	1.43
10000	0.766	0.853	0.762	0.793	1.131	1.63	1.240	1.49
15000	0.786	0.871	0.759	0.836	1.14	1.68	1.282	1.38

表 80-4 水溶液中的标准电极电位
(氢标, 25℃)

电 极	电 位 V
$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$	-3.0401
$\text{Rb}^+ + e = \text{Rb}$	-2.98
$\text{K}^+ + e = \text{K}$	-2.931
$\text{Ba}^{2+} + 2e = \text{Ba}$	-2.912
$\text{Ca}^{2+} + 2e = \text{Ca}$	-2.868
$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$	-2.71
$\text{Mg}^{2+} + 2e = \text{Mg}$	-2.372
$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$	-1.662
$\text{Ti}^{2+} + 2e = \text{Ti}$	-1.630
$\text{Mn}^{2+} + 2e = \text{Mn}$	-1.185
$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$	-0.7628
$\text{Cr}^{3+} + 3e = \text{Cr}$	-0.744
$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$	-0.447
$\text{Cd}^{2+} + 2e = \text{Cd}$	-0.4030
$\text{In}^{3+} + 3e = \text{In}$	-0.3382
$\text{Tl}^+ + e = \text{Tl}$	-0.336
$\text{Co}^{2+} + 2e = \text{Co}$	-0.28
$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$	-0.257
$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}$	-0.1375
$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}$	-0.1262
$\text{Fe}^{3+} + 3e = \text{Fe}$	-0.037
$2\text{H}^+ + 2e = \text{H}_2$	0.0000
$\text{Sn}^{4+} + 2e = \text{Sn}^{2+}$	0.151
$\text{Cu}^{2+} + e = \text{Cu}^+$	0.153
$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$	0.3419
$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu}$	0.521
$\text{I}_2 + 2e = 2\text{I}^-$	0.5355
$\text{Fe}^{3+} + e = \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$	0.7996
$\text{Hg}^{2+} + 2e = \text{Hg}$	0.851
$\text{Pd}^{2+} + 2e = \text{Pd}$	0.951

(续)

电 极	电 位 V
$\text{Br}_2(\text{液}) + 2e = 2\text{Br}^-$	1.066
$\text{Pt}^{2+} + 2e = \text{Pt}$	1.118
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$	1.229
$\text{Au}^{3+} + 2e = \text{Au}^+$	1.401
$\text{Cl}_2 + 2e = 2\text{Cl}^-$	1.35827
$\text{Au}^{3+} + 3e = \text{Au}$	1.498
$\text{Mn}^{3+} + e = \text{Mn}^{2+}$	1.5415
$\text{Ce}^{4+} + e = \text{Ce}^{3+}$	1.61
$\text{Au}^+ + e = \text{Au}$	1.692
$\text{Co}^{3+} + e = \text{Co}^{2+}$	1.83
$\text{F}_2 + 2e = 2\text{F}^-$	2.66

注：引自R.C. Weast, 《CRC Handbook of Chemistry and Physics》, 69th ed., CRC Press Inc, D151~D154, 1988.

化序能直观地反映金属或化合物的氧化、还原能力。标准电极电位较负的金属能从水溶液中把电位较正的金属的离子置换出来,也就是前者的还原能力强,后者的还原能力弱,而氧化能力则强。例如,锌的标准电极电位为-0.7628V,较铜的标准电极电位+0.3402V为负,则金属锌有较强的还原能力,可以把水溶液中含有的两价铜离子还原为金属铜。

80.3.4 电压平衡与电压效率

电解槽(或电池)在有电流通过时,由其两个电极之间测出的总电压是电解槽(或电池)各部分电压降的代数和,这个等量关系称为电压平衡。在电解时电压平衡的关系式如下:

$$E = E_d + E_c + E_p \quad (80-7)$$

式中 E ——总电压,即电解时向电解槽施加的电

压, 又称槽电压或端电压;

E_d ——分解电压;

E_c ——电导电压, 即为克服电极和溶液的欧姆阻力所需的电压, 可由欧姆定律求出;

E_p ——极化电压。

为了分析电压平衡, 各项常可分解为阳极部分和阴极部分的电压降。

电池工作时的电压平衡关系如下:

$$E = E_c - E_a - E_p \quad (80-8)$$

式中 E_c ——电池的电动势, E_a , E_p 同上式。

电解时, 理论分解电压与实际电解时的总电压的比值, 以百分数表示, 称为电压效率。由于在电压平衡关系式中, 除了理论分解电压外, 尚有导体阻力造成的欧姆电压降和电极极化造成的极化电压降, 减小这两部分电压降有利于降低电能消耗, 因为电能是电流和电压的乘积。所以对于电解工业, 例如电解法生产氯碱以及电解炼铝的生产, 不但要设法提高电流效率, 而且还要提高电压效率, 以达到节能的目的。对于电池, 作为化学电源, 同样要减小 E_c 和 E_p 这两部分的电压降, 才有利于输出最大的电能。

80.3.5 参比电极

电极电位数值的测量, 是借助该电极与标准氢电极组成电池时的电动势数值。由于标准氢电极在实际使用中很不方便, 并对杂质敏感, 因此常用其它电极代替。这种替代电极, 称为参比电极。

作为参比电极, 其电极电位必须稳定, 温度系数小, 在小电流下不极化, 重现性好。选用参比电极时应尽量采用与组成电池的溶液有相同离子的参比电极。例如, 在氯化物溶液中选择甘汞电极或氯化银电极, 在碱性溶液中选择氧化汞电极。常用的几种参比电极见表80-5。

表 80-5 常用参比电极的组成和电极电位 (25℃)

电极名称	电 极 组 成	电极电位 (V)
甘汞电极	Hg Hg ₂ Cl ₂ (固), KCl(饱和溶液)	0.242
	Hg Hg ₂ Cl ₂ (固), KCl(1mol/L溶液)	0.283
氯化银电极	Ag AgCl(固), KCl($a_{Cl^-}=1$)	0.222
	Ag AgCl(固), KCl(0.1mol/L溶液)	0.290
氧化汞电极	Hg HgO(固), NaOH(1mol/L溶液)	0.114
	Hg HgO(固), NaOH(0.1mol/L溶液)	0.165
硫酸亚汞电极	Hg ₂ Hg ₂ SO ₄ (固), H ₂ SO ₄ ($a_{SO_4^{2-}}=1$)	0.614
	Hg ₂ Hg ₂ SO ₄ (固), H ₂ SO ₄ (0.5mol/L溶液)	0.674

第81章 电 解 工 艺

81.1 电 解

81.1.1 电解反应类型

(1) 金属电沉积与电溶解 金属电沉积是利用电解方法在阴极表面沉积出金属的过程。它可用于电解冶金、电镀、电铸以及废液的电解处理。金属电沉积可以是简单的金属离子在阴极还原, 也可以是络合的金属离子在阴极还原, 析出金属。原则上, 标准电极电位越正的金属越容易在阴极还原。如果考虑到电极的极化, 则应当是在同样电流密度下做比较, 电极电位显示越正的金属, 越容易在阴极沉积出来。当外部施加电压进行电解时, 则施加于阴极的电位越负, 越容易把金属电沉积出来。在水溶液中电解因受氢气析出的限制, 因此在水溶液中电沉积金属时的阴极电位一般不应低于-1.8V。

金属电溶解则是利用电解方法使金属在阳极溶

解的过程。金属电溶解可用于电解加工、电解精饰以及采用可溶性阳极的电解过程。金属的标准电极电位越负, 或者在同样电流密度条件下阳极电位显示越负的金属, 越容易在阳极溶解, 但是电位过高, 有时金属表面会发生钝化现象, 将阻止阳极继续溶解。

(2) 电解共同析出 电解时在阴极析出两种或更多种的物质的情况称为电解共同析出。如果是两种以上金属的析出, 称为金属电解共同沉积。例如, 铜和锡可以同时阴极沉积析出, 形成铜锡合金。在水溶液中, 电沉积金属时, 常常伴随有氢气共同析出, 这也是电解共同析出的一种形式, 对于为获取金属的电解, 氢的析出将使阴极电流效率降低。

(3) 电解氧化与还原 原则上每一种阳极反应都是电化学氧化过程, 而每一种阴极反应都是还

原过程。一般提到电解氧化与还原时,则是指有特殊用途的阳极氧化与阴极还原反应过程而言。例如,用电解法排除电镀废液中的铜离子,这是用于回收铜离子的电解还原过程。电解氧化与还原还用于制取化工产品,此时可称为电解合成,例如氧化剂氯酸钾的电解制取。进行电解氧化与还原时,应特别注意氧化产物与还原产物因相互接触而发生化学反应,通常用隔膜将阴极区与阳极区分隔开,以免影响产量和质量。

80.1.2 分解电压与电能效率

能使电解反应进行所需的最小外加电压,称为分解电压。在可逆条件下电解时,阴极与阳极两个电极反应的平衡电极电位的差值,称为理论分解电压(E_d^0),有以下的关系式:

$$E_d^0 = \varphi_{+,e} - \varphi_{-,e} \quad (81-1)$$

式中 $\varphi_{+,e}$ ($\varphi_{-,e}$) 为阳极 (阴极) 平衡电极电位 E_d^0 的数值等于由该电解反应逆过程所构成的自发电池的电动势。通常实测的分解电压值略大于理论分解电压值,这是由于存在溶液欧姆电阻的影响和电极过程常常是不可逆的原因。

电解过程的电能消耗是通过电解槽的电流与电压的乘积,因而电解中的电能效率可表示如下:

$$\text{电能效率} = \text{电流效率} \times \text{电压效率}$$

电流效率在许多电极反应的电流效率都达到90%以上,甚至高达100%。而电压效率由于导体的欧姆压降和电极的极化在电压平衡中都占相当比重,实际都远低于100%,一般在80%以下。因此,实际的电能效率一般在60%~80%范围内,特殊情况则远低于此。

以上是指阴极反应与阳极反应不相同时的情况,如果阴极反应恰好是阳极反应的逆过程,例如用铜阳极在硫酸铜酸性溶液中进行电镀铜时,则这时的理论分解电压为零,实际上这时的槽电压也很小,仅0.3V。为了比较在这类电解过程中电能的利用情况,常采用单位电能的产量来衡量,例如每kW·h生产所得产物的kg数。

81.1.3 电解槽^[2, 3]

利用外加直流电源,使电流通过电极和电解液,并在其接触界面处发生氧化、还原反应的过程即电解。进行电解的反应装置称为电解槽(池)或电解机床。工作时的电解槽内至少应有一种电解液和阴极、阳极两种电极。在工艺上,为了防止阴极与阳极的产物因接触而发生反应,槽内有时设置分离器

(隔膜)。

电解槽的设计原则如下:

- (1) 结构简单合理,易于加工;
- (2) 电流分布均匀,必要时设置辅助电极;
- (3) 极间距离宜小,可减少电能消耗和增加空间利用率;
- (4) 结构材料稳定耐蚀,电绝缘部件性能良好。

电解槽的槽体多数是方形或圆形,可以单个使用,也可以多个串联或并联连接。在电镀工业中广泛采用环形自动线或直线形自动线。其中各槽单独使用,互不连通。按照电解槽与母液槽、净化槽等的连接关系,也可把电解槽分为容器型与非容器型两类。容器型是把电解液固定在电解槽槽体内,靠槽内机械搅拌使溶液流动,以改善液相传质作用。非容器型是利用泵的输送,使电解液在电解槽与其它槽之间循环流动,而不固定在一个槽体内。

81.1.4 电极

电化学中的电极,实质上是指金属与电解液相接触的组合物,例如习惯上所称的金属锌电极,指的是Zn/Zn²⁺组合物。

电解中大量采用的阴极是固态阴极,个别情况下也采用液态阴极,如汞阴极和熔态金属阴极。为了增大电极的表面积,常采用多孔电极和粉末电极,还采用各类颗粒电极。例如,颗粒床电极是由金属颗粒堆集而成的反应电极;滴流床是指电解液以极慢速度流经多层颗粒的一类电极;流化床电极则是颗粒处于悬浮状的一类电极。这些新型电极已被用于电催化合成,稀溶液中金属的回收和有毒废液的处理。

阳极分为可溶性、不溶性(惰性)和消耗性阳极三类。可溶性阳极广泛用于电解精炼金属和电镀工艺中,凡能够阳极溶解的金属都可选作可溶性阳极;不溶性阳极有铂、金、石墨、不锈钢、铅合金、二氧化铅等,其中铂最稳定,但价格昂贵。近来,采用钛上镀铂,以减少铂的用量;也采用钛上涂钌化物,经热处理后形成的钌钛阳极。钌钛阳极广泛用于电解制取氯碱工业,代替传统的石墨阳极。由于这类阳极不变形,寿命长,所以又称为形稳阳极(DSA阳极)。在熔盐电解中常用的板状石墨质阳极属消耗性阳极,在高温条件下因氧化而不断损耗,需定期更换。在电冶铝中为减少电极材料的消耗和便于操作管理多采用连续烧结式阳极。

在水溶液中电解时,如果阴极反应是氢的析出,则要求阴极材料的氢过电位低;对于阴极反应是金属的析出时,则要求阴极材料有高的氢过电位。使用不溶性阳极时,如果阳极上是析氧反应,则要求阳极材料的氧过电位应低;对于阳极上进行的是其它的氧化反应时,则要求氧的过电位应较高,这样才能抑制氧的析出。

81.2 电 镀

81.2.1 电镀工艺操作技术

电镀是指把待镀的零件作为阴极,通过电解使在阴极工件上获得所需性能镀层的金属电沉积过程。

为了获得良好的镀层,一般应按以下程序进行电镀:

- (1) 合理选择镀层和工艺;
- (2) 配制镀液和其它溶液;
- (3) 进行镀前表面处理;
- (4) 电镀和控制工艺参数;
- (5) 镀后处理;
- (6) 质量检验和包装。

镀件在进入电镀槽之前,除了挂镀需上挂具和滚镀需装入滚桶外,还需进行以下的镀前表面处理过程:

(1) 除去油脂或有机物质 可用肥皂液、热碱液或清洗液清洗,必要时需用三氯乙烯、三氯乙烷、四氯化碳等有机溶剂的溶液或蒸气清洗。

(2) 除去铁锈、氧化物或其它无机物 可用各种酸、碱或盐的溶液清洗,也可用电解法清除。

(3) 表面抛光 用以提高表面的光洁度,达到装饰性镀层的要求。过去多采用机械抛光、化学或电化学抛光,对小型零件采用滚光,近来多用添加光亮剂的办法来取代或部分取代。

以下几种电镀方式及工艺是较常采用的:

(1) 挂镀(吊镀) 将零件夹紧在挂具上,然后吊挂于电镀槽的阴极导电杆上进行电镀。适用于镀大型的和较大的工件。

(2) 滚镀 将零件装入带孔的滚桶中,然后浸入电镀液,滚桶与导电杆相连。在电镀过程中使滚桶不断转动,桶中零件连续翻滚,彼此接触而导通电流;得以保证镀层厚度均匀。适用于垫片、螺母等小型零件的电镀。

(3) 连续镀 对于线型或带型材料,可把它

做成连续移动的阴极,使之不断通过镀液而施镀。

(4) 刷镀(又称笔镀、无槽电镀) 对于只需局部位置电镀的机件,不必将整个机件浸入镀槽,可采用刷镀来完成。即将机件作阴极,一般用不溶性导电材料制成可以方便移动的阳极(称作刷笔),在阳极外面包有纤维材料,使纤维材料吸满镀液,导通电流,随着阳极的移动,在阴极对应的部位就沉积出镀层。特别适于磨损机件的修复及在电接触片上制备良好的导电点或带。

大规模生产的电镀车间通常是以机械或电气的自动化方法,实现被镀件在电镀、清洗和干燥各个工序中自动进出槽(箱)时的升降、移动和定时运行,实现挂镀、滚镀全部程序的自动化。电镀自动生产线有直线形和环形两种,均具有生产效率高,电镀质量好,劳动强度低等优点。直线形自动线是一列排成直线的电镀槽和清洗槽,各槽与自动行车没有机械和电气联系。环形自动线的各槽排成U字形或椭圆形,采用液压传动运行,适于固定工艺大批量的生产。近年来,还出现针对不同零件的专用刷镀自动机。

复合电镀及脉冲电镀是改善电镀效果和镀层质量的新技术。复合电镀是在电沉积金属过程的同时,将悬浮于镀液中的粒子借吸附等作用也同时沉积出来,常用的有Ni-金刚砂, Ni-WC, Ni-聚氟塑料等复合镀层。脉冲电镀则采用脉冲电镀电流,它常能改善镀层表面状态,且在贵金属金银等的电镀中可显著节约贵金属。

对于不导电的零件,如陶瓷、塑料等类制品,为了达到导电或美观的目的,也可进行电镀处理,但是首先应采用化学方法沉积上一层导电的金属层,然后再按常规进行电镀。

81.2.2 镀层的选择

包括对镀层种类和厚度两方面的选择。它取决于该镀层所处的工作环境的腐蚀性程度、镀层用途、以及被镀零件的结构和表面性质等。

各类镀层的性能和选择要点如下:

(1) 防护性镀层——保护金属表面免受腐蚀

1) 镀锌层 价格低廉,适用于钢铁制品的防护,但是它的标准电极电位较负,在潮湿空气中易生白斑,并因有氢气共析,会产生氢脆。镀锌层的厚度一般为6~24μm。

2) 镀镉层 它类似于镀锌层,但在潮湿性及海洋性大气中比锌的防护性能好,缺点是镉的价格

高,而且腐蚀产物有毒。锡锌合金镀层性能介于锌与镉之间,可用作代镉镀层。

3) 镀锡层 因为锡的标准电极电位较正,对于钢铁制品,镀锡层属于阴极保护性镀层,因此要求镀层较厚,以减少孔隙率。因锡无毒,故适用于制造食品罐头的镀锡钢板,并因它的钎焊性好,多用于电气控制设备及电子设备的镀锡线缆及压接件。镀锡层的厚度为 $8\sim 30\mu\text{m}$ 。

(2) 装饰性镀层——用以增加表面的光亮,使之美观,通常兼有防护性

1) 镀铬层 有光亮悦目的外观和较好的机械性能,但是镀铬层多孔,而且相对于钢铁基体又属阴极性镀层,因此不能单独使用,必须先镀上底层。长期以来,采用着Cu-Ni-Cr组合体系。其间的镍层,可以是单层的光亮镍,或是由半光亮镍与光亮镍组成的双层镍,以及是由半光亮镍、高硫镍,光亮镍或者由半光亮镍、光亮镍、复合镀镍(即镍封)组成的三层镍,以增强镀层的抗腐蚀能力。在我国还很重视发展铜锡合金镀层,用作镀铬的底层。铬层厚度分别为铜层 $5\sim 20\mu\text{m}$,铜锡层 $6\sim 24\mu\text{m}$,镍层总厚度 $10\sim 30\mu\text{m}$,铬层 $0.25\sim 0.8\mu\text{m}$ 。

2) 金及金合金镀层 色泽美观,用于首饰和贵重产品的表面镀层。金合金镀层含金 $25\sim 80\%$,其余为银、镍或铜。镀金层厚度通常为 $0.25\sim 2.5\mu\text{m}$ 。

3) 仿金镀层 具有金的色泽,但并不含金,通常以18K金(含Au75%)作为标准的仿金色泽。多是由铜、锌、锡组成的二元或三元合金镀层,外加一些添加剂以调剂其色泽。由于镀层不耐磨,易氧化,通常要镀亮铜-亮镍底层,并且镀后需在苯并三氮唑中钝化或涂以有机涂料。镀层厚度为 $2\sim 14\mu\text{m}$ 。

(3) 功能性镀层——用以改善表面状态,提高工作性能

1) 耐磨镀层 硬铬、硬镍和铁镀层用于工具、模具、轴类的镀层和修复。镍与金刚砂和镍与WC、SiC、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等复合镀层也是广泛应用的耐磨镀层。

2) 减摩镀层 有铅基合金、锡基合金镀层,前者耐疲劳性能强,后者耐磨和耐蚀性强。锡、锡铅、银、银镉镀层具有自润滑性能,已在轴承上得到应用。近来镍-石墨、镍- MoS_2 等复合镀层的应用也日益被重视。

3) 可焊性镀层 有金、银、锡及铅锡、锡镍合金,用于提高导电性能和钎焊性能。

4) 电接点镀层 要求电阻值一定,耐磨性能好。有金与铜、镍或钴的合金镀层,以及银铜合金镀层。

5) 磁性镀层 分软磁性膜和硬磁性膜两类,前者有镍-铁(20%)和铁-镍(3%)合金,后者有镍钴、钴磷等合金镀层。

81.2.3 电镀层的沉积速度

表81-1列出各种金属电镀时镀层沉积的速度。

81.2.4 电镀工艺条件和参数

表81-2列出了常用电镀的简要工艺条件和参数。应当指出,每种镀液都有其适用的范围和特点,例如由氰化物镀液得到的镀层细致紧密,但是镀液有剧毒;再则,有些金属不能直接镀在基体上,例如在钢铁零件上不宜直接镀铜,容易因置换反应沉积出一层疏松的铜层,要先镀一层称为底层的中间层。

表 81-1 金属镀层的沉积速度

金 属	化合价	密 度 (g/cm^3)	通电 $1\text{A}/\text{dm}^2$ 沉积速度 ($\mu\text{m}/\text{min}$)
金 Au	1	19.3	0.634
	3		0.211
银 Ag	1	10.5	0.638
镉 Cd	2	8.64	0.404
钴 Co	2	8.8	0.203
铬 Cr	3	7.2	0.149
	6		0.074
铜 Cu	1	8.93	0.442
	2		0.221
铁 Fe	2	7.86	0.220
	3		0.147
镧 In	3	7.3	0.326
镍 Ni	2	8.85	0.206
铅 Pb	2	11.34	0.568
钯 Pd	2	12.16	0.272
铂 Pt	2	21.37	0.283
	4		0.141
铑 Rh	2	12.44	0.257
钌 Ru	3	12.06	0.173
锡 Sn	2	7.28	0.506
	4		0.253
锌 Zn	2	7.12	0.285

注:沉积速度是电流效率为100%时的数值,低于100%时的沉积速度则将表中数值乘以电流效率即可求出。

表 81-2 电镀工艺条件和参数

镀层金属	镀液类型	主要成分 g/L	温度 ℃	电流密度 A/dm ²	阴极电流效率 %	备 注
铜	氰化物	CuCN 25	50	2		光亮镀铜
		NaCN 30				
		Na ₂ CO ₃ 30				
	焦磷酸盐	Cu ₂ P ₂ O ₇ 80	40	2		光亮镀铜
		K ₄ P ₂ O ₇ ·3H ₂ O 340				
	硫酸盐	CuSO ₄ ·5H ₂ O 200 H ₂ SO ₄ 60	30	2	99	
镍	硫酸盐	NiSO ₄ ·7H ₂ O 270	40	2	95	光亮镀镍
		NiCl ₂ ·6H ₂ O 40				
		H ₃ BO ₃ 40				
	氨基磺酸盐	Ni(NH ₂ SO ₃) ₂ 350	50	3	95	
		NiCl ₂ ·6H ₂ O 30				
		H ₃ BO ₃ 40				
	硫酸盐	NiSO ₄ ·7H ₂ O 80	33	0.3		镀黑镍
		ZnSO ₄ ·7H ₂ O 45				
		H ₃ BO ₃ 30				
		NiSO ₄ (NH ₄) ₂ SO ₄ ·6H ₂ O 50				
		NH ₄ SCN 30				
铬	铬酐	CrO ₃ 250	50	20	15	光亮镀铬
		H ₂ SO ₄ 2.5				
	铬酐	CrO ₃ 200	30	20	5	镀黑铬
		H ₃ BO ₃ 30				
	铬酐	NaNO ₃ 5	55	40	16	镀硬铬
		CrO ₃ 160 H ₂ SO ₄ 1.6				
锌	锌酸盐	ZnO 10	室温	2	75	
		NaOH 120				
	氰化物	Zn(CN) ₂ 50	30	3	85	
		NaCN 70				
	硫酸盐	NaOH 75	30	2	98	
		ZnSO ₄ ·7H ₂ O 500				
镉	氨羧络合物	CdCl ₂ 40	室温	1	95	
		NH ₄ Cl 120				
		氨基乙酸 130				
	氰化物	CdSO ₄ ·8/3H ₂ O 80	室温	1.5	93	
		NaCN (总量) 110				
		NaOH 25				
铅	氟硼酸盐	Pb(BF ₄) ₂ 250	室温	2	100	
		H ₂ BF ₄ 90				
	酒石酸盐	Pb(OH) ₂ 120	50	3	95	
		NaOH 60				
		酒石酸钾钠 260				
锡	酸性液	SnSO ₄ 40	室温	1		光亮镀锡
		H ₂ SO ₄ 80				

(续)

镀层金属	镀液类型	主要成分 g/L	温度 ℃	电流密度 A/dm ²	阴极电流效率 %	备注
锡	酸性液	酚磺酸 90	室温	1		光亮镀锡
	碱性液	Na ₂ SnO ₃ ·3H ₂ O 100	80	1		
		NaOH 14				
		CH ₃ COONa 25				
铁	氯化亚铁盐	FeCl ₂ 400	50	10	95	
	硫酸亚铁	FeSO ₄ ·7H ₂ O 250	25	2	95	
		(NH ₄) ₂ SO ₄ 120				
金	氰化物	Au (氰化物) 5	60	0.2	80	
		KCN 20				
		K ₂ CO ₃ 10				
		2				
银	氰化物	AgCl 35	室温	0.5		
		KCN (游离) 40				
		K ₂ CO ₃ 30				
	硫代硫酸盐	AgNO ₃ 40	室温	0.2	100	
		Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O 200				
		K ₂ S ₂ O ₅ 40				
铂	亚硝酸盐	(NH ₃) ₂ Pt 5	95	2		
		(NO ₂) ₂ ·2H ₂ O 25				
		NH ₄ NO ₃ 100				
		NaNO ₂ 10				
铑	硫酸液	Rh 2	40	1	50	
		H ₂ SO ₄ 20				
	氨基磺酸液	Rh 2	40	1		
		NH ₂ SO ₃ H 20				
钢	硫酸盐	In(In ₂ (SO ₄) ₃ 形式) 15	室温	1.5	75	
		Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O 10				
铜锡	氰化物	CuCN 32	66	1	70	光亮低 锡青铜
		Na ₂ SnO ₃ ·3H ₂ O 30				
		NaOH 8				
		Na ₄ P ₂ O ₇ 30				
		CuCN 22	62			(滚镀高锡青铜)
		Na ₂ SnO ₃ ·3H ₂ O 35				
		NaCN 25				
		NaOH 9				
	焦磷酸盐	K ₄ P ₂ O ₇ 380	32	0.8		
		Cu(Cu ₂ P ₂ O ₇ 形式) 18				
		Sn(Sn ₂ P ₂ O ₇ 形式) 2				
		氨三乙酸 35				
铜锌	氰化物	Na ₂ HPO ₄ 45	32	0.4	60	光亮镀 (Cu70%)
		CuCN 25				
		Zn(CN) ₂ 9				
		NaCN (游离) 16				
		Na ₂ CO ₃ 30				

(续)

镀层金属	镀液类型	主要成分 g/L	温度 ℃	电流密度 A/dm ²	阴极电流效率 %	备注
铜锌	氰化物	CuCN 4	30	1	70	白黄铜 (Zn75%)
		Zn(CN) ₂ 34				
		NaCN 85				
		NaOH 17				
		Na ₂ CO ₃ 50				
铅锡	氟硼酸盐	Pb(BF ₄) ₂ 200	室温	2	99	低锡 (Sn8%)
		Sn(BF ₄) ₂ 60				
		HF ₄ 70				
		Pb(BF ₄) ₂ 70	室温	1	99	高锡 (Sn60%)
		Sn(BF ₄) ₂ 125				
		HF ₄ 60				
锡镍	氯化物、 氟化物	H ₃ BO ₃ 25	65	2	98	
		SnCl ₂ ·2H ₂ O 50				
		NiCl ₂ ·6H ₂ O 300				
镍钴	硫酸盐	NH ₄ HF ₂ 60	38	1		(Ni70%)
		NiSO ₄ ·7H ₂ O 200				
		CoSO ₄ ·7H ₂ O 8				
		NaCl 11				
		H ₃ BO ₃ 30	43	3		(Co80%)
		NiSO ₄ ·7H ₂ O 135				
		CoSO ₄ ·7H ₂ O 106				
		KCl 6				
镍铁	硫酸盐	H ₃ BO ₃ 18	60	4		
		NaCl 20				
		FeSO ₄ ·7H ₂ O 15				
		NiSO ₄ ·7H ₂ O 200				
铜锌锡	氰化物	CuCN 16	30	1		仿金镀层
		Zn(CN) ₂ 8				
		Na ₂ SnO ₃ 5				
		酒石酸钾钠 30				
		NaCN (游离) 6				
金铜	氰化物	Au (氰化物) 3	60	2		
		CuCN 12				
		KCN 8				

注：(1) 表中镀液只列出主要成分，各种附加剂和添加剂均未列入；(2) 除有注明者外皆适用于吊镀；(3) 数字取平均值或最适值。

81.2.5 镀层的质量与检测

电镀层品质的检测主要包括厚度、孔隙率、耐腐蚀性、硬度、光泽度、结合强度等项目。此外，针对具体使用要求，还可选地检测耐磨性、减摩性、钎焊性、导电性、磁性、脆性，以及与镀层厚

度有关的均镀能力和深镀能力。

在进行各项质量检测之前，首先应对镀层进行目力外观检查。如不合格，就不再进行常规的镀层检测，并根据情况决定退镀或报废。外观检查包括针孔、麻点、起皮、起泡、暗影、烧焦、枝晶及缺