

# 铜 电 解 工



11.4

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

这是一本供铜电解精炼厂工人阅读的读物。书中由浅入深地叙述了铜电解精炼的生产原理，而侧重介绍了生产工艺和操作技术，并列举了一些简易计算方法及一些习题。此外，在第一编中还简明地阐述了溶液、电、电离及电解过程的理论基础。

## 铜 电 解 工

沈阳冶炼厂《铜电解工》编写组 编

冶金工业出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张 4 1/2 字数 95 千字

1976年6月第一版 1976年6月第一次印刷

印数 0,001~8,000 册

统一书号：15062·3221 定价（科二）0.34 元

# 毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

人民，只有人民，才是创造世界历史的动力。

入门既不难，深造也是办得到的，只要有心，只要善于学习罢了。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

---

# 目 录

## 第一编 一般基础知识

第一章	电的基本知识	1
第二章	溶液和电离	19
第三章	电解过程的理论基础	35

## 第二编 铜的电解精炼

第四章	铜电解精炼的电化学理论基础	47
第1节	概述	47
第2节	铜的性质	47
第3节	铜电解精炼时的电极反应	48
第4节	铜电解时各种杂质的行为	53
第五章	铜电解精炼过程及主要技术条件	59
第1节	铜电解精炼的生产流程	59
第2节	阳极及其电解前的加工处理	60
第3节	始极片的生产	63
第4节	阴极的制作和电铜的标准	69
第5节	出槽和装槽	70
第6节	电解液成分的选择	71
第7节	添加剂及其作用	72
第8节	电解液的温度	75
第9节	电解液循环量	81
第10节	阳极泥处理	83
第六章	铜电解精炼的主要设备	86
第1节	电解槽	86
第2节	加温设备	87
第3节	集液槽与供液箱	89

第七章	铜电解精炼的主要技术经济指标	91
第1节	电流密度的选择	91
第2节	电流效率	93
第3节	电力单消	97
第4节	残极率	101
第5节	金属实收率	101
第八章	电极排列	102
第1节	电极连接法	102
第2节	整流器及导电路径	104
第九章	电解液的净化和硫酸铜的生产	106
第1节	电解液净化的必要性和净液量计算	106
第2节	净液流程	107
第3节	中和过程	107
第4节	结晶过程	115
第5节	真空蒸发过程	118
第6节	固液分离过程	120
第7节	气流干燥	120
第8节	脱砷锑电解	121
第9节	冷冻液的加温过滤	121
第10节	结晶硫酸镍的生产	122
第十章	铜电解精炼发展的动向	127
第1节	高电流密度周期反向电解	127
第2节	净液方面的其他办法	127
第3节	其他方面的改进	128
第十一章	冶金计算	129
附录一	硫酸比重表	135
附录二	比重换算表	136

## II

# 第一编 一般基础知识

## 第一章 电的基本知识

### 一、电的概念

一切物质都是由分子构成的，分子是由原子构成的。原子并不是最小的质点，还是可分的。现在我们已经知道，原子的中心有一个核，称为原子核。原子核由质子和中子组成，质子是带正电荷的；原子核周围有电子绕着转动，电子是带负电荷的质点。

不同的元素，原子核的质量和所带电荷的多少就随着不同，绕着原子核转动的电子数目也不同。氢是最轻的元素，它的原子结构最简单，原子核重量最轻，原子核所带的正电荷也最少，核周围只有一个电子，绕着转动。别的元素的原子结构都比它复杂，原子核比它重，原子核所带的电荷比它多。无论哪种元素，在正常状态下，原子核所带的正电荷跟核周围电子所带的负电荷是等量的，这时正负电荷的作用互相抵消，所以显不出带电现象。

如果一个原子因为某种原因失去一个电子，则原子里面全部质子的正电荷总数将较全部电子的负电荷总数多出一个单位，此时的原子便呈现正电性，正电性的原子，时时刻刻想收回失去的电子而恢复到原来中性的稳定状态。同样，多余电子的原子，将呈现负的电性，负电性的原子，也时时刻刻想把多余的电子放出来而恢复到中性的稳定状态。也就是说，带正电荷的物质时时刻刻想收回它失去的电子，而带负

电荷的物质时时刻刻想放出它的多余的电子。如图 1 所示，甲球上缺少电子（即带正电荷的），乙球上有多余的电子（即带负电荷的），当人们用一条铜线丙将两球连结起来时，乙球上的电子立刻被排斥向甲球移动，此时丙线上即有电子在内流动，这种电子流动，称为电流。

在电子流动时，乙球上的电子逐渐减少，甲球上的电子逐渐增多。如果乙球上多余的电子完全流到甲球上，并且恰好补足甲球所缺少的电子时，则电子即不再流动而成中性的稳定状态。

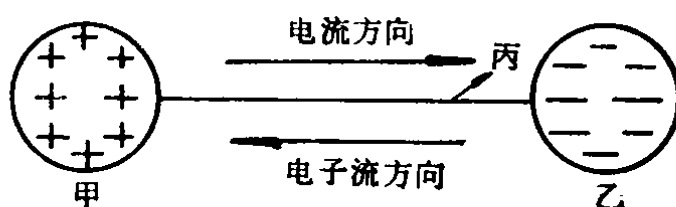


图 1 电流方向

## 二、导体与绝缘体

能够传导电荷的物体，称为导体。导体中存在的自由电荷在电场的作用下，能有秩序地运动起来形成电流。具有大量自由电荷的金属是电的导体。电解液——酸碱及盐类的溶液是导体，而一些熔融状态的盐类也是导体，所有这些物质都具有大量的正负离子。属于电导体的还有电离的气体、碳、人体、地球等等。

不能传导电荷的物体，称为非导体或称为绝缘体，如玻璃、云母、油类、瓷器、琥珀、硬橡胶、石蜡、丝绸以及未电离的气体等等。

应该指出，在导体与绝缘体之间并没有明显的分界线。

介乎导体与绝缘体之间，具有微弱导电能力的物质，称为半导体，如锗、硒、硅、氧化亚铜等都是半导体。

### 三、电流的方向

电荷沿着一定方向移动就形成电流。电流是有方向的。科学上规定，正电荷移动的方向为电流的方向。这样规定的电流方向跟电子在金属导体中移动的方向恰巧相反。例如，在连接电池两极的金属导线上，实际是自由电子从电池负极沿着导线流向电池正极，可是我们通常却说电流的方向是从正极经过导线流向负极。也就是在电池的外路中，电流的方向是从正极到负极，而实际上电池内路的电流方向却是从负极到正极。这种情况是由于过去科学上规定电流方向的时候，还不了解电荷在各种导体里运动的情况。那时候认为，在所有的导体内，包括金属导体，两种电荷都能移动。当时规定以正电荷运动的方向作为电流的方向。因此按照规定，在金属导体内电流的方向就是由正极向着负极。这跟电子实际运动的方向恰好相反。但是，在科学上一直沿用下来，所以现在电学上的一些规律都是根据这种电流方向来说明的。

### 四、电 量

物体所带的电荷量，称为电量。通过银盐溶液能在阴极上析出1.118毫克银的电量，定为电量的单位，称为1库仑。

例题 在硝酸银溶液里通电以后，如果阴极上析出5.59毫克的银，那么通过的电量是多少库仑？

〔解〕析出1.118毫克的银，需要1库仑的电量，那么析出5.59毫克的银，所需要电量为：

$$\frac{5.59\text{毫克}}{1.118\text{毫克/库仑}} = 5\text{库仑}$$



## 习 题 一

在银盐溶液里通电以后，如果阴极上析出 2.236 克的银，问要多少库仑电量？

### 五、电 流 强 度

每秒钟通过导体单位截面的电量称为电流强度。电流强度是以安培做单位的。1 安培就是每秒钟通过导体截面 1 库仑电量的电流强度。导线上的电流如果是 2 安培，就是每秒钟通过的电量是 2 库仑，如果是 10 安培，就是每秒钟通过的电量是 10 库仑。

实用中，安培这个单位有时嫌大，比安培小的单位里常用的是毫安培，1 毫安培等于千分之一安培，即：

$$1 \text{ 安培} = 1000 \text{ 毫安培}$$

在科学研究工作上，有时还用到更小的电流强度单位——微安培。1 微安培等于千分之一毫安培，即：

$$1 \text{ 毫安培} = 1000 \text{ 微安培}$$

电路上的电流强度是用安培计来测量的。

### 六、电 动 势

我们知道，水从高的地方流向低的地方，是因为高的地方的位能比低地方的位能大；位能的相差是驱使水流流动的原因。位能大的，称为高水位；位能小的，称为低水位。电的情况也是一样，在前面已经讲过，带有正电荷的物体，时时刻刻都想收回它所失去的电子，这种企图，我们称为物体的电动势（意即吸引电子的势力）。电子失去得愈多，它需要补足电子的企图也就愈加迫切。因此，我们便说它的电

电动势愈大。甲球电动势是正的，乙球是负的，这两个带电球之间有一电位差存在。当我们以一根铜线丙连结在一起时，即产生电子流。根据这个理论，电动势的相差是驱使电流流动的原因。电动势大的，称为高电位；电动势小的，称为低电位。水位愈大，水流愈急；电位愈大，电子流动的速度也愈快。

将1千克的水，从低处扬到高处，假如所需的功是1米·千克的话，则毫无疑问水位差便是1米，水位的高低以米为单位，电位的高低则以伏特为单位。将1库仑的电，从甲点送到乙点，所需之功如果是1焦耳，则甲、乙两点间的电位，便是1伏特。电位差通常也称为电压。

**电量、电流及电压的通用符号及其单位** **表 1**

名 称	通用符号	单 位	简 写
电 量	$Q$	库 仑	$C$
电 流	$I$	安 培	$A$
电 压	$E$	伏 特	$V$

例如：电流为20安培，可写为  $I = 20 A$

电压的大小是用伏特计来测量的。在实用上亦嫌太大，常用小的单位毫伏特，1毫伏特等于千分之一伏特，即：

$$1 \text{ 伏特} = 1000 \text{ 毫伏特}$$

### 七、导体的电阻

前面说过，电位差愈大，电子流动的速度愈快；换句话说，两点间的电流的大小，与两点间的电压有关。另一方面，电流的大小也要看连结两点的导体的性质来决定。如果连结两点的物质是铜线，电子的流动比较迅速；若连结的物

质是铁棒，则对于同样的电位差，电子的流动就要迟缓，即电流强度要小些。物质抵抗电子流动的阻力，称为电阻。电阻的大小，是由于导体的材料、长度、粗细或温度的不同而有差别。因而，当电压一定时，电流强度减小，这是表示导线的电阻增大。

实用上电阻的单位是欧姆。当电流不变，温度恰为冰的熔点时，长为106.3厘米，截面为1平方毫米，而质量为14.4521克的水银柱所具有的电阻，称为1欧姆。

习惯上常用希腊字母 $\Omega$ 来表示欧姆，这是国际通用的一个符号。例如10欧姆可以写做 $10\Omega$ 。

#### 八、电 阻 率

前面讲过，导体的电阻，随金属材料而不同，假如同一材料，则其电阻与物体长度 $l$ 成正比，而与其断面积 $S$ 成反比并与电阻率 $\rho$ 成正比，那么电阻 $R$ 可以从下面公式算出来：

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ 欧姆}$$

用某种材料制成的导体，当它的长度是1米，截面积是1平方毫米时，它的电阻欧姆数叫做这种材料的电阻率，或称为比电阻，通常以 $\rho$ 表示之。

在工业上，通常以长为1米、切断面为1平方毫米的导体的电阻，称为比电阻。这要比长为1厘米，切断面为1平方厘米的导体电阻大10,000倍。为计算方便起见，现将表2换算为表3。

从表3可看出，不同材料的导体与绝体之间的电阻率相差很大。

从表2可看到，长1米、截面积1平方毫米的镍线，其

纯金属及合金的电阻率  $\rho$  与温度系数  $\alpha$

表 2

金属名称 (材料)	20℃时的电阻率 (欧姆·毫米 <sup>2</sup> /米)	由0°到100℃温度系数的 平均值 (1/℃)
银	0.0161	0.00400
铜	0.0168~0.00175	0.00445
金	0.0237	0.00377
铝	0.0278	0.00428
钼	0.0476	0.00435
钨	0.0612	0.00464
锌	0.0620	0.00390
铂	0.0266	0.00247
铁	0.0818	0.00625
钴	0.109	0.00658
镍	0.138	0.00821
锡	0.143	0.00440
铅	0.221	0.00411
汞	0.948	0.00027
黄铜	0.2~0.06	0.002
镍铜*	0.042	0.0003

\* 镍铜: Cu 55~68%, Ni31%, Zn6~13%

某些材料的电阻率 (欧姆·厘米<sup>2</sup>/厘米)

表 3

材 料	电阻率 (20℃)	材 料	电阻率 (20℃)
银	$1.61 \times 10^{-6}$	镍铜	$49 \times 10^{-6}$
铜	$1.75 \times 10^{-6}$	纯水	$8 \times 10^5$
铝	$2.8 \times 10^{-6}$	普通玻璃	$5 \times 10^{13}$
锌	$6.2 \times 10^{-6}$	无釉瓷	$3 \times 10^{14}$
铁	$8.18 \times 10^{-6}$	石蜡	$1 \times 10^{16}$
镍	$13 \times 10^{-6}$	硫黄	$1 \times 10^{17}$
锡	$14.3 \times 10^{-6}$	石英玻璃	$5 \times 10^{18}$
铅	$22.1 \times 10^{-6}$	硬橡胶	$1 \times 10^{18}$

电阻为0.13欧姆，若要获得1欧姆的电阻，则需要7.7米长的这种镍线才行。银的电阻最小，要获得1欧姆的电阻，需

某些电解质水溶液（长1厘米，截面1厘米<sup>2</sup>）

的电阻欧姆数（18°C时）

表 4

溶液的浓度(%)	NaCl	CuSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>	NaOH	KOH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
5	14.9	52.9	52.4	5.1	5.8	4.8
10	8.3	31.3	31.2	3.2	3.2	2.6
15	6.1	23.8	24.1	2.9	2.4	1.8
20	5.1	—	21.3	3.0	2.0	1.5
25	4.7	—	20.8	3.7	1.9	1.4
30	—	—	—	4.8	1.8	1.35

要长62.5米、截面积1平方毫米的银线。银虽然是良导体，但价格太贵，所以不可能大量应用它。在同一表中看到，长1米、截面积1平方毫米的铜线，具有电阻0.0168欧姆。如果要获得1欧姆的电阻，则需要铜线57米。铜的电阻率虽然较银略大，但价格低廉，还具有质地柔韧而便于焊接的优点。铝的电阻系数较铜略大，不便于焊接，然而它质量较轻，并且曝露于空气中不受氧化，故近年来远距离送电多采用铝线。

电阻单位：导线两端电位差为1伏特，导线上电流的强度为1安培，则此时的电阻称为1欧姆。

例题1. 铜线长200米、截面积0.5平方毫米，20°C时，其电阻多少？

〔解〕长1米，截面积1平方毫米的铜线，20°C时的电阻率为0.0168Ω，所求之电阻为：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$R = 0.0168 \times \frac{200}{0.5} = 6.4 \text{ 欧姆}$$

例题2. 有一铜块,使其延长成线,一次为120米,另一次为360米,其电阻之比如何?

〔解一〕360米为120米的3倍。又截面积长者 为短者之1/3,故电阻亦为3倍,所以长者 为短者的  $3 \times 3 = 9$  倍。

〔解二〕假如铜块延长360米,其直径为1平方毫米;若延长120米时,其直径为细的3倍。

由下列公式求得  $R = \rho \frac{l}{S}$

式中  $R_1$  为 360 米的电阻;

$R_2$  为 120 米的电阻。

$$R_1 = \rho \frac{360}{1}$$

$$R_2 = \rho \frac{120}{3}$$

铜的电阻率  $\rho$  是相等的,故省略。

$$R_1 : R_2 = 360 : 40 = 9 : 1$$

## 习 题 二

(1) 有两条同样粗细的铜线,一条长30厘米,一条长1.5米,算出哪一条电阻大?大的是小的多少倍?

(2) 有两条同样长的铝导线,一条的截面积是0.1平方厘米,电阻是1.8欧姆;另一条的截面积是2平方毫米,电阻是多少?

(3) 阳极棒的长度为1.25米,其切面积为390平方毫米,求铜棒在20°C时的电阻?

## 九、电阻的温度系数

任何物质的电阻均随温度的变化而改变,通常以20°C为

标准状态下的电阻。温度为  $t^{\circ}\text{C}$  时的电阻  $R_t$  与  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻  $R_{20}$  之间，有下列的关系：

$$R_t = R_{20} [1 \pm \alpha_{20} (t^{\circ} - 20^{\circ})]$$

$\alpha_{20}$  称为电阻在  $20^{\circ}\text{C}$  时的温度系数，它代表温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$  时的电阻比它在  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻所增加的百分数。一般物质的电阻，均随温度升高而增大，所以他们的  $\alpha_{20}$  均为正值；只有少数的物质，如无定形碳、石墨以及一切电解质的无机酸、硷、盐溶液与熔融盐类等，它们的电阻随温度的升高而减少，故  $\alpha_{20}$  为负值。

例题1. 电解槽上使用的阳极棒假如长度是 1.25 米，切面积为 390 平方毫米，若温度为  $40^{\circ}\text{C}$ ，求其电阻？

〔解〕由公式先求出阳极棒在  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻：

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0.0175 \times \frac{1.25}{390}$$

$$\therefore R_{20} = 0.0000561 \text{ 欧姆}$$

再将  $R_{20}$  的值代入下列公式中：

$$\begin{aligned} R_t &= R_{20} (1 + \alpha_{20} (t^{\circ} - 20)) \\ R_t &= 0.0000561 \times (1 + 0.00445 \times (40 - 20)) \\ &= 0.0000561 \times (1 + 0.00445 \times 20) \\ &= 0.0000561 \times (1 + 0.089) \end{aligned}$$

$$\therefore R_t = 0.000061 \text{ 欧姆}$$

例题2. 如前题所示，若阳极棒用铝制成，其电阻是多少？

$$\text{〔解〕} \quad R_{20} = 0.0278 \times \frac{1.25}{390} = 0.000088 \text{ 欧姆}$$

$$\begin{aligned} R_t &= 0.000088 \times (1 + 0.00428 \times (40 - 20)) \\ &= 0.000088 \times (1 + 0.00428 \times 20) \end{aligned}$$

$$\therefore R_t = 0.0000955 \text{ 欧姆}$$

### 习 题 三

(1) 铜质阳极棒长为92.5厘米，直径为4厘米，求在38°C时的电阻是多少？

(2) 铜电解阳极棒长为92.5厘米，直径为4厘米，求30°C时的电阻是多少？

### 十、电解质溶液的电导

电解质的溶液也象金属一样，具有一定的电阻。但溶液的电阻较金属的电阻大得多，如表5和表6所示。在冶金计算上，对于电解质的溶液，常常谈到的不是溶液的电阻而是溶液的电导。电导是电阻的倒数，电导的单位是欧姆的倒数（欧姆<sup>-1</sup>）称为姆欧。长1厘米，截面面积为1平方厘米的导体的电导称为电导率，也叫比电导，如果用希腊字母  $\kappa$ （读为卡巴）表示比电导，则有下列的关系：

纯金属和合金的电导率（比电导）

表 5

材 料	20°C时的电导率 ( $\kappa$ 欧姆 <sup>-1</sup> )	材 料	20°C时的电导率 ( $\kappa$ 欧姆 <sup>-1</sup> )
银	$62.11 \times 10^4$	锡	$6.99 \times 10^4$
铜	$59.52 \times 10^4$	铅	$4.52 \times 10^4$
金	$42.19 \times 10^4$	汞	$1.05 \times 10^4$
铝	$35.97 \times 10^4$	镍铜	$3 \times 10^4$
钨	$16.34 \times 10^4$	汽油	$1 \times 10^{-12}$
锌	$16.13 \times 10^4$	煤油	$1.7 \times 10^{-10}$
铂	$11.55 \times 10^4$	松节油	$2 \times 10^{-12}$
铁	$10.89 \times 10^4$	凡士林油	$8 \times 10^{-17}$
钴	$9.17 \times 10^4$	纯水	$2 \times 10^{-6}$
镍	$7.25 \times 10^4$		



电解质溶液 (18°C时) 的电导率(欧姆<sup>-1</sup>)

表 6

浓度 (%)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl	NaOH	KCl	AgNO <sub>3</sub>	CuSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>	CdSO <sub>4</sub>	NiSO <sub>4</sub>
5	0.2085	0.392	0.19	0.0684	0.0253	0.0187	0.0191	0.0145	0.0153
10	0.3881	0.629	0.31	0.1350	0.0276	0.0319	0.0321	0.0217	0.0254
15	0.540	0.741	—	0.2000	0.06776	0.0419	0.0415	0.0325	0.0385

$$\kappa = \frac{1}{\rho}$$

式中  $\rho$  为比电阻, 而  $\kappa$  为比电导。

### 十一、欧姆定律

电流的强度与导体两端的电位差成正比, 与导体的电阻成反比。

$$I = \frac{E}{R}$$

$$R = \frac{E}{I}$$

$$E = I \cdot R$$

式中  $I$  为电流, 安培;

$R$  为电阻, 欧姆;

$E$  为电压, 伏特。

例题1. 铜电解槽通过3800安培, 槽电压为0.32伏特, 求电解槽的电阻?

〔解〕 
$$R = \frac{E}{I} = \frac{0.32}{3800} = 0.000084 \text{ 欧姆}$$

例题2. 一个电灯泡的电阻为440欧姆, 如果电灯的线路电压是220伏特, 计算灯泡内通过电流是多少?

〔解〕 
$$I = \frac{220}{440} = 0.5 \text{ 安培}$$