

序 言

随着我国国民經济的发展，炼銅工业也日益增长着。培养和提高冶金技术工人，对保証滿足冶金企业需要，是有着巨大意义的。

本書初稿，系根据原重工业部教育司制定的技工学校电解銅专业的教学大綱編写的。經過几年試用后，最近根据收集的意见，对初稿作了一些修改而編写成此書。

本書內容包括两部分：銅电解技术基础知識；銅电解过程与操作。教材內容具有下述三个特点：

1. 生产設備是根据国内工厂情况叙述的；
2. 書中列举的有关技术数据系摘自国外文献；
3. 計算題是根据工厂生产过程編写的，較为切合实际。

編者自知書中不无缺点，因此希望讀者多提出意见和要
求。

編 者

目 录

第一編 一般基礎知識

第一章 电学的基本知識	1
§ 1 电的概念.....	1
§ 2 导体与絕緣体.....	2
§ 3 电流的方向.....	3
§ 4 电量.....	3
§ 5 电流强度.....	4
§ 6 电动势.....	4
§ 7 导体的电阻.....	6
§ 8 电阻系数.....	6
§ 9 电阻的溫度系数.....	10
§ 10 电解質溶液的电导.....	11
§ 11 欧姆定律.....	12
§ 12 电路及电路图.....	13
§ 13 导綫的串联及並联.....	15
§ 14 电功率.....	18
§ 15 电流的热效应.....	19
第二章 溶液和电离	21
§ 16 溶液.....	21
§ 17 溶質与溶剂.....	21
§ 18 溶液的浓度.....	21
§ 19 飽和溶液.....	25
§ 20 溶解度.....	25
§ 21 电解質和非电解質.....	27
§ 22 电离.....	27

§ 23	电离度	23
§ 24	电离常数	29
§ 25	溶度积	31
§ 26	共同离子对于溶解度的影响	32
§ 27	氢离子及氢氧根离子指数	33
§ 28	离子移动的速度	35
第三章 电解过程的理論基础		37
§ 29	法拉第定律	37
§ 30	金屬的电溶压、渗透压和标准电位	38
§ 31	分解电压与超电压	43

第二編 銅的电解精煉

第四章 銅电解精煉的電化学理論基础		50
§ 32	概論	50
§ 33	銅的性質	51
§ 34	銅电解精煉时的电极反应	5
§ 35	电解时各种杂質的行为	57
第五章 电解槽、阳极和阴极		62
§ 36	电解槽的装置	62
§ 37	阳极	63
§ 38	种板	67
§ 39	阴极	69
§ 40	出装槽操作实践	71
第六章 电解質的成分、溫度和循环量		73
§ 41	电解質成份的选择	73
§ 42	添加剂的作用	74
§ 43	溫度的影响	75
§ 44	循环量	81

第七章	电流密度、电流效率和电能消耗	85
§ 45	电流密度的选择	85
§ 46	电流效率	88
§ 47	电能消耗	91
第八章	电极排列	95
§ 48	电极连接法	95
§ 49	导电线路	97
第九章	阳极泥及其处理	99
§ 50	阳极泥过滤	99
§ 51	阳极泥处理	99
第十章	净化、胆矾和硫酸镍的制造	101
§ 52	电解液的净化	101
§ 53	造酸净液法	101
§ 54	胆矾结晶法	102
§ 55	结晶和电解併用法	109
第十一章	技术经济指标和车间劳动组织	114
§ 56	技术经济指标	114
§ 57	劳动组织和技術安全	415
§ 58	改进的方向	116
第十二章	冶金计算	118
§ 59	综合例题计算	118

第一編 一般基礎知識

第一章 電工學的基本知識

§ 1 電的概念

一切物質都是由分子構成的，分子是由原子構成的。原子並不是最小的質點，還是可分的。現在我們已經知道，原子的中心有一核，稱為原子核。原子核由質子和中子組成，質子是帶正電荷的；原子核周圍有電子繞着轉動，電子是帶負電荷的質點。

物質元素不同，原子核的質量和所帶電荷的多少就隨着不同，繞着原子核轉動的電子數目也不同。氫是最輕的元素，它的原子結構最簡單，原子核重量最輕，原子核所帶的正電荷也最少，核周圍只有一個電子，繞着轉動。別的元素原子結構都比它複雜，原子核比它重，原子核所帶的電荷比它多，核周圍從一個至一百零二個電子繞着轉動。無論哪種元素，在正常狀態下，原子核所帶的正電荷跟核周圍電子所帶的負電荷是等量的，這時正負電荷的作用互相抵消，所以顯不出來帶電現象。

若是一個原子因為某種原因失去一個電子，則原子里面全部質子的正電荷總數將較全部電子的負電荷總數多出一個單位，此時的原子便呈現正電性，正電性的原子，時時刻刻想收回失去的電子而恢復到原來中性的穩定狀態。同樣，多余電子的原子，將呈現負的電性，負電性的原子，也時時刻

刻想把多余的电子放出来而恢复到中性的稳定状态。

前面講过，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說明，A球上缺少电子（即带正电荷的）B球上有多余的电子（即带负电荷的），当人們用一条銅綫C将两球連結起来时，B球上的电子立刻被推斥向A球移动，此时C綫上即有电子在内流动，这种电子流动，称为电流。

在电子流动的时间里，B球上的电子逐渐减少，A球上的电子逐渐增多。若是B球上多余的电子完全流到A球上，并且恰好补足A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

§ 2 导体与絕緣体

含有自由电荷（正及負离子）的物体，称为导体。这些自由电荷在电场的作用下，就能有秩序地运动起来形成电流。具有大量自由电荷的金屬是属于电的导体。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負离子。属于电导体的还有电离子的气体、碳、人体、地球等等。

沒有自由电子或仅有少量自由电荷的物体，称为非导体，或称为絕緣体；如玻璃、云母、油类、瓷器、琥珀、硬橡胶、石蜡、絲綢以及未电离的气体等等。

應該指出：在导体与絕緣体之間並沒有明显的分界綫。介于导体与絕緣体之間，具有微弱导电能力的物質，称为半导体，如紙張、稻草、石板、大理石、酒精、乙醚、树木、各种氧化物等都是半导体。

§ 3 电流的方向

电流就是电荷的运动。在金屬导体里的电流，实际就是自由电子沿同一方向的移动。因为自由电子带的是負电，它是从电势低的地方向着电势高的地方移动。例如，在連接電池两极的金屬导綫上，实际是自由电子从電池負极沿着导綫流向電池正极，可是我們通常却說电流的方向是从正极經過导綫流向負极。也就是在電池的外路中，电流的方向是从正极到負极，而電池內路的电流方向却是从負极到正极。

这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。那时候認為，在所有的导体內，包括金屬导体在內，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，在金屬导体內电流的方向就是由正极向着負极，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規律都是根据这种电流方向来说明的。

§ 4 电 量

物体所带的电荷量，称为电量。通过銀盐溶液能在阴极上析出1.118毫克銀的电量，定为电量的单位，称为1庫仑。

例题 1. 在硝酸銀溶液里通电以后，如果阴极上析出5.59毫克的銀，那么通过的电量是多少庫仑？

[解] 析出1.118毫克的銀，需要1庫仑的电量，那么析出5.59毫克的銀，应需要电量为：

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

习 題 一

(1) 在銀盐溶液里通电以后，如果阴极上析出2.236克的銀，問要多少庫仑电量？

§ 5 电流强度

每秒鐘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安培就是每秒鐘通过导体截面1庫仑电量的电流强度。导线上的电流如果是2安培，就是每秒鐘通过的电量是2庫仑，如果是10安培，就是每秒鐘通过的电量是10庫仑。

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，有时还用到最小的电流强度单位——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計来测量的。

§ 6 电 动 势

我們知道，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；位能的相差是驅使水流流动的原因。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 § 1 中已經講过，带有正电荷的物体，时时刻刻想收回它所失去的电子，这种企图，我們称为物体的电动势（意即吸引电子的势力）。电子失去愈多，它需要补足电子的企图也就愈加迫切。因此，我們便說它的电动势愈大。A 球电动势是正的，B 球是負的，这两个带电球之間有一电位差存在。当我们以一根銅錢 C 連結在一起时，即产生电子流。根据这个理論，电动势的相差是驅使电流流动的原因。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，从低处曳扬到高处，假如所需的功是 1 米/仟克重的話，則毫无疑问地水位差便是 1 米，水位的高低以米为单位，电位的高低則以伏特为单位。将 1 庫仑的电，从 A 点送到 B 点，所需之功，若是 1 焦耳，則 A、B 两点間的电位，便是 1 伏特。电位差通常也称为电压。

表 1

电量、电流及电压的通用符号及其单位

名 称	通用符号	单 位	簡 写
电 量	Q	庫 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 $I = 20A$

电压的大小是用伏特計来测量的。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：

$$1 \text{ 伏特} = 1000 \text{ 毫伏特}$$

§ 7 导体的电阻

前面說过，电位差愈大，电子流动的速度愈快；換句話說，两点間的电流的大小，与两点間的电压有关。另一方面，电流的大小也要看連結两点的导体的性質来决定。如果連結两点的物質是銅綫，电子的流动比較自由；若連結的物質是木棒，則对于同一的电位差，电子的流动就要迟緩，亦即电流的强度便要小些。物質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、粗細或溫度的不同而有差別。因而，所流过的电流强度自然也不会相等。电流强度减小，便是表示导綫的电阻增大。

实用上电阻的单位是欧姆。所謂国际欧姆是当电流不变，溫度恰为冰的熔点时，其长为 106.3 厘米，沿整个长度具有同样截面（1 平方毫米）而质量为 14.4521 克的水銀柱所具有的电阻。

习惯上常用希腊字母 Ω 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 10Ω 。

§ 8 电阻系数

前面講过，导体的电阻，随金属材料而各有不同，假如同一材料，其电阻与物体长度 l 成正比，而与其断面积 S 成反比并与电阻系数 ρ 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 平方毫米的时候，它的电阻欧姆数叫做这种材料的电阻系数，或称为比电阻，通常以 ρ 表示之。

表 2

純金屬及合金的电阻系数 ρ 与温度系数 α

金屬名称 (材料)	20°C时的电阻系数 (ρ mm ² /m)	由 0°到 100°C 之温度 系数的平均值 (1/°C)
銀	0.0161	0.00400
銅	0.0168~0.00175	0.00445
金	0.0237	0.00377
鉛	0.0278	0.00428
鉅	0.0476	0.00435
鎢	0.0612	0.00464
鋅	0.0610	0.00390
鉑	0.0266	0.00247
鈦	0.0818	0.00625
鈷	0.109	0.00658
鎳	0.138	0.00821
錳	0.143	0.00440
鈳	0.221	0.00411
汞	0.948	0.00027
铂	1.39	0.00364
钨	0.2~0.06	0.002
铋	0.042	0.0003

○ 銀銅 Cu 55—68%, Ni 31%, Zn 6—13%.

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，兹将表 2 换算为表 3。

从下表可看出，不同材料的导体与导体之间的电阻系数相差很大。

表 3

某些材料的电阻系数 ($\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$)

材 料	电阻系数 (20°C)	材 料	电阻系数 (22°C)
銀	1.47×10^{-6}	鍍銅	49×10^{-6}
銅	1.75×10^{-6}	純水	8×10^6
鋁	2.8×10^{-6}	普通玻璃	5×10^{13}
鋅	6.2×10^{-6}	无釉瓷	3×10^{14}
鐵	8.18×10^{-6}	石腊	1×10^{16}
鎳	13×10^{-6}	硫黃	1×10^{17}
錫	14.3×10^{-6}	石英玻璃	5×10^{18}
鉛	22.1×10^{-6}	硬橡胶	1×10^{18}

表 4

某些电解質水溶液 (长 1 厘米, 截面 1 厘米²)
的电阻欧姆数 (18°C时)

溶液的浓度 (%)	NaCl	CuSO ₄	ZnSO ₄	NaOH	KOH	H ₂ SO ₄
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

从表 2 可看到, 长 1 米、截面积 1 平方毫米的鍍鐵, 其电阻为 0.13 欧姆, 若要获得 1 欧姆的电阻, 则需要 7.7 米长的这种鍍鐵才行。銀的电阻最小, 要获得 1 欧姆的电阻, 需要长 62.5 米、截面积 1 平方毫米的銀綫。銀虽然是良导体, 但价格太貴, 所以不可能大量应用它。在同一表中看到, 长 1 米、截面积 1 平方毫米的銅綫, 具有电阻 0.0168 Ω 。若要

获得 1 欧姆的电阻，则需要铜线 57 米。铜的电阻系数虽然较银略大，除价格低廉外，它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，但不便于焊接。然而由于它质量较轻，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 时的电阻系数为 0.0168Ω ，故所求之电阻由：

$$\text{公式 } R = \rho \frac{l}{S}$$

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

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 米的三倍。又截面积长者为短者之 $\frac{1}{3}$ ，故电阻亦为三倍，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。

由公式： $R = \rho \frac{l}{S}$ 求得之：

R_1 为 360 米的电阻；

R_2 为 120 米的电阻。

$$R_1 = \rho \frac{360}{1} \quad R_2 = \rho \frac{120}{3}$$

铜的电阻系数 ρ 是相等故省略。

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

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？

§ 9 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为电阻的标准。温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻 R_t 与20°C时的电阻 R_{20} 之间，有下列的关系：

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

α_{20} 称为电阻在20°C时的温度系数，它代表温度每升高1°C时的电阻比它在20°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，所以它们的 α_{20} 均为正值；只有少数的物质，如无定形碳、石墨、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 α_{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，求其电阻？

[解] 由公式先求出阳极棒在20°C时的电阻：

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

$$\therefore R_{20} = 0.000561 \text{ 欧姆。}$$

再将 R_{20} 的值代入下列公式中：

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

$$\begin{aligned} R_t &= 0.0000561 \times [1 + 0.00445 \times (40 - 20)] \\ &= 0.0000561 \times [1 + 0.00445 \times 20] \\ &= 0.0000561 \times [1 + 0.089] \end{aligned}$$

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

例題 2. 如前題所示，若阳极棒用鋁制成的，其电阻是多少？

$$[\text{解}] R_{20} = 0.0278 \times \frac{1.25}{390} = 0.000088 \text{ 欧姆}$$

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

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

习 題 三

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

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

§ 10 电解質溶液的电导

电解质的溶液也像金屬一样，具有一定的电阻。仅溶液的电阻較金屬的电阻大的多，如表 6 所示。在冶金計算上，对于电解质的溶液，常常談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⁻¹）称为姆欧。长 1 厘米，截面面积为 1 平方厘米的导体的电“导”称为导电系数，也叫比电导，如果用希腊字母 κ （讀为卡巴）表示比电导，則有下列的关系：

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

式中： ρ 为比电阻，而 κ 为比电导。

表 5

純金屬和合金的导电系数 (比电导)

金屬 (材料)	20°C时的导电系数 (κ 欧姆 ⁻¹)	液体 (材料)	20°C时导电系数 (κ 欧姆 ⁻¹)
銀	62.11×10^4	錫	6.99×10^4
銅	59.52×10^4	鉛	4.52×10^4
金	42.19×10^4	汞	1.05×10^4
鋁	35.97×10^4	鎳銅	3×10^4
鎢	16.34×10^4	汽油	1×10^{-12}
鋅	16.13×10^4	煤油	1.7×10^{-10}
鉑	11.55×10^4	松节油	2×10^{-12}
鉄	10.89×10^4	凡士林油	8×10^{-17}
鈷	9.17×10^4	純水	2×10^{-6}
鎳	7.25×10^4		

表 6

电解質溶液 (18°C时) 的导电系数 (欧姆⁻¹)

浓度 (%)	H ₂ SO ₄	HCl	NaOH	KCl	AgNO ₃	CuSO ₄	ZnSO ₄	CdSO ₄	NiSO ₄
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

§ 11 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。

$$(1) \quad I = \frac{E}{R}$$

$$(2) \quad R = \frac{E}{I}$$

$$(3) \quad E = I \cdot R$$

式中 I 为电流，安培；

R 为电阻，欧姆；

E 为电压，伏特。

例題 1. 銅電解槽通過 3800 安培，槽電壓為 0.32 伏特，求電解槽的電阻？

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

例題 2. 一個電燈泡的電阻為 440 歐姆，如果電燈的綫路電壓是 220 伏特，計算燈泡內通過電流是多少？

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

習 題 四

(1) 電路內的電阻綫的電阻是 2.5 歐姆，從安培計上讀出電路里的電流是 1 安培，這時接在電阻綫兩端的伏特計上，所示的電壓應該是多少？

§ 12 電路及電路圖

電荷移動所經過的閉路，稱為電路。電路可以用簡單的圖表示出來，這樣的圖稱為電路圖。畫電路圖的時候，用圖 2 內各種符號來表示電路的各個組成部分。

把兩盞電燈順次地連接到電路里，這樣的連接法，稱為串聯。如圖 3 所示。