

HUAXUE DIANYUAN JISHU JIQI YINGYONG

化学电源技术 及其应用

杨贵恒 杨玉祥 王秋虹 王华清 编著



化学工业出版社

HUAXUE DIANYUAN JISHU JIQI YINGYONG

化学电源技术 及其应用

杨贵恒 杨玉祥 王秋虹 王华清 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化学电源技术及其应用/杨贵恒等编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-122-29186-8

I. ①化… II. ①杨… III. ①化学电源
IV. ①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 040885 号

责任编辑: 高墨荣
责任校对: 边 涛

文字编辑: 向 东
装帧设计: 王晓宇

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 20³/₄ 字数 553 千字 2017 年 6 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: 88.00 元

版权所有 违者必究

化学电源是一种将物质的化学能直接转化为电能的装置。自 1859 年法国著名的物理学家、发明家普兰特 (Gaston Planté) 研发了世界上第一块铅酸蓄电池, 1868 年法国工程师勒克朗谢 (C. Leclanche) 发明了采用 NH_4Cl 水溶液作电解质溶液的锌二氧化锰电池以来, 化学电源经历了近 160 年的发展历史。特别是目前能源紧缺急需各种替代能源、各种用电器具对高能化学电源的需求以及材料科学的发展给新型化学电源的开发提供了各种新型材料, 使得传统的化学电源的性能得以提高, 而且出现了许多新型的化学电源。这些性能优越的化学电源如锂一次电池、锂离子电池、金属氢化物镍电池和质子交换膜燃料电池等, 在交通、航空航天、电子、通信和家用电器等领域都有着很好的应用前景。

本书在阐述化学电源理论基础和基本概念的基础上, 系统地讲述了各种主要化学电源的基本结构、工作原理、主要性能、应用前景及其使用维护方法。全书共分 8 章: 第 1 章化学电源理论基础, 主要讲述了化学基础知识、溶液与溶液浓度、电解质溶液、原电池与电池的可逆性、电极电位与能斯特方程、电解与电解定律等; 第 2 章化学电源概论, 对化学电源的工作原理与组成、分类、应用与发展、主要性能以及多孔电极理论做了概述; 第 3 章~第 8 章, 分别对铅酸蓄电池、碱性蓄电池 (镉镍蓄电池、氢化物镍蓄电池以及锌银蓄电池)、锂离子电池、燃料电池、一次电池 (锌锰电池、锌氧化银原电池以及锂原电池) 和其他化学电源 (金属空气电池、电化学电容器以及氧化还原液流电池) 的结构、工作原理、主要性能特点、使用维护方法及常见失效模式等进行了详细论述。

本书由杨贵恒、杨玉祥 (重庆市公安局科技信息处)、王秋虹、王华清编著, 刘凡、李锐、强生泽、向成宣、刘扬、任开春、张颖超、曹均灿、张瑞伟、文武松、聂金铜、龚利红、金丽萍、赵英、刘小丽、杨波、杨翱、张伟、杨科目、雷绍英、李光兰、邹洪元、陈昌碧、杨贵文、徐树清、杨芳、付保良、温中珍、余江、蒋王莉、张传富、杨胜、杨蕾、杨楚渝、王涛、吴伟丽等做了大量的资料搜集与整理工作。在编写过程中, 特别参考了王秋虹和王华清两位老师以前编写的化学电源讲义, 在此表示衷心感谢!

本书内容通俗易懂、实用性强, 既适合高等院校相关专业作为教材或参考书使用, 也适合相关工程技术人员和管理干部查阅, 还可供具有高中以上文化程度准备从事化学电源相关工作的人员自学。

随着化学电源技术的快速发展, 其新理论、新材料和新工艺等不断涌现, 限于编者水平, 书中难免有疏漏和不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

编著者

第 1 章 化学电源理论基础 001

1.1 化学基础知识 001

1.1.1 原子和原子量 001

1.1.2 分子和分子式 003

1.1.3 元素和元素符号 005

1.2 溶液与溶液浓度 006

1.2.1 溶液 006

1.2.2 溶解过程 009

1.2.3 溶液的浓度 010

1.2.4 溶液的配制 011

1.3 电解质溶液 012

1.3.1 电解质的种类 012

1.3.2 离子与水分子的作用 013

1.3.3 强电解质溶液的活度 013

1.3.4 电解质溶液的导电 015

1.4 原电池与电池的可逆性 016

1.4.1 氧化还原反应 016

1.4.2 原电池 017

1.4.3 可逆电极 019

1.4.4 电池的可逆性 020

1.5 电极电位与能斯特方程 021

1.5.1 电动势的形成 021

1.5.2 标准电极电位 024

1.5.3 浓度对电极电位的影响 031

1.5.4 电极电位的能斯特方程 031

1.5.5 电池电动势的能斯特方程式 032

1.5.6 电极电位的应用 033

1.6 电解与电解定律 035

1.6.1 电解原理 035

1.6.2 分解电压 036

1.6.3 电极极化 039

1.6.4 电解产物 043

1.6.5 电解定律 045

习题与思考题..... 046

2.1 化学电源的工作原理与组成	049
2.1.1 化学电源的工作原理	049
2.1.2 化学电源的组成	050
2.1.3 化学电源的表示方法	051
2.2 化学电源的分类	052
2.2.1 按电解质（液）的类型分类	052
2.2.2 按活性物质的存在方式分类	052
2.2.3 按电池的特点分类	052
2.2.4 按电池工作性质及储存方式分类	052
2.3 化学电源的应用与发展	053
2.3.1 化学电源的选择	053
2.3.2 化学电源的应用	054
2.3.3 化学电源的发展	055
2.4 化学电源的性能	057
2.4.1 电动势与开路电压	057
2.4.2 内阻	058
2.4.3 放电电压与充电电压	059
2.4.4 容量与比容量	060
2.4.5 能量与比能量	062
2.4.6 功率与比功率	064
2.4.7 效率与寿命	065
2.4.8 储存性能与自放电	066
2.5 多孔电极理论	067
2.5.1 多孔电极的分类	067
2.5.2 多孔电极的结构特点	067
2.5.3 多孔电极的行为	069
2.5.4 多孔电极过程	070
习题与思考题	075

3.1 概述	076
3.1.1 铅酸蓄电池的发展史	076
3.1.2 铅酸蓄电池的分类	078
3.1.3 铅酸蓄电池的型号编制	079
3.1.4 铅酸蓄电池的特点	081
3.2 铅酸蓄电池的构造	081
3.2.1 电极	082
3.2.2 电解液	082
3.2.3 隔板（膜）	084
3.2.4 电池槽	085

3.2.5	排气栓	086
3.2.6	附件	087
3.2.7	装配方式	087
3.3	铅酸蓄电池的工作原理	089
3.3.1	放电过程	089
3.3.2	充电过程	089
3.3.3	蓄电池密封原理	090
3.4	铅酸蓄电池的性能	092
3.4.1	内阻特性	092
3.4.2	电压特性	094
3.4.3	容量特性	100
3.4.4	自放电特性	105
3.4.5	寿命特性	109
3.5	铅酸蓄电池的充电方法	110
3.5.1	恒流充电法	110
3.5.2	恒压充电法	111
3.5.3	分级恒流充电法	111
3.5.4	先恒流后恒压充电法	112
3.5.5	限流恒压充电法	112
3.5.6	快速充电	112
3.5.7	浮充充电	114
3.6	铅酸蓄电池的运行方式	114
3.6.1	充放电运行方式	114
3.6.2	全浮充运行方式	115
3.6.3	半浮充运行方式	117
3.7	铅酸蓄电池的失效模式	118
3.7.1	极板硫化	118
3.7.2	内部短路	121
3.7.3	极板反极	122
3.7.4	正极板栅腐蚀	123
3.7.5	失水	124
3.7.6	热失控	125
3.7.7	负极汇流排腐蚀	126
3.8	铅酸蓄电池的维护	127
3.8.1	安装方法	127
3.8.2	充电维护方法	127
3.8.3	日常维护	129
3.8.4	剩余容量的测量	131
	习题与思考题	133

4.1	镉镍蓄电池	135
-----	-------------	-----

4.1.1	概述	135
4.1.2	基本组成	137
4.1.3	基本结构	140
4.1.4	工作原理	142
4.1.5	主要性能	144
4.1.6	使用与维护	148
4.2	氢化物镍蓄电池	153
4.2.1	概述	153
4.2.2	基本结构	154
4.2.3	工作原理与密封原理	159
4.2.4	主要性能	160
4.2.5	使用与维护	163
4.3	锌银蓄电池	164
4.3.1	概述	164
4.3.2	基本结构	167
4.3.3	工作原理	168
4.3.4	主要性能	169
4.3.5	使用与维护	174
	习题与思考题	180

第5章 锂离子电池

182

5.1	概述	182
5.1.1	发展历史	182
5.1.2	分类与特点	184
5.1.3	应用前景	186
5.2	液态锂离子电池	187
5.2.1	基本结构	187
5.2.2	工作原理	194
5.2.3	主要性能	195
5.2.4	使用与维护	197
5.3	聚合物锂离子电池	198
5.3.1	主要特点	198
5.3.2	基本结构	198
5.3.3	主要性能	200
	习题与思考题	200

第6章 燃料电池

202

6.1	燃料电池概述	202
6.1.1	发展历史	202
6.1.2	主要特点与分类	203
6.1.3	基本组成与工作原理	205
6.1.4	燃料电池系统	205

6.2	燃料电池的性能	207
6.2.1	电动势	207
6.2.2	理论效率	208
6.2.3	极化行为	208
6.2.4	实际效率	209
6.2.5	其他性能	209
6.3	碱性燃料电池	210
6.3.1	工作原理	211
6.3.2	基本结构	211
6.3.3	CO ₂ 的毒化与吸收	215
6.4	磷酸燃料电池	216
6.4.1	工作原理	217
6.4.2	基本结构	218
6.4.3	PAFC 发电系统	220
6.4.4	工作条件对电池性能的影响	222
6.5	熔融碳酸盐燃料电池	223
6.5.1	工作原理	224
6.5.2	基本结构	225
6.5.3	MCFC 发电系统	228
6.5.4	工作条件对电池性能的影响	229
6.6	固体氧化物燃料电池	230
6.6.1	工作原理	231
6.6.2	基本结构	232
6.6.3	SOFC 电池组	242
6.6.4	SOFC 发电系统	245
6.7	质子交换膜燃料电池	247
6.7.1	工作原理	247
6.7.2	基本结构	248
6.7.3	水与热的管理	256
6.7.4	电池性能	260
6.7.5	电池系统	262
6.7.6	应用前景	264
	习题与思考题	265

第7章 一次电池

267

7.1	锌锰电池	268
7.1.1	工作原理	268
7.1.2	基本构造	270
7.1.3	型号规格	272
7.1.4	主要性能	273
7.1.5	使用维护	276
7.2	锌氧化银(原)电池	277

7.2.1	工作原理	277
7.2.2	基本结构	277
7.2.3	工作特性	278
7.2.4	型号尺寸	278
7.3	锂(原)电池	279
7.3.1	二氧化锰电池	280
7.3.2	二氧化硫电池	283
7.3.3	亚硫酰氯电池	286
7.3.4	碘电池	292
7.3.5	氧化铜电池	294
7.3.6	使用维护	296
	习题与思考题	297

第 8 章 其他化学电源

298

8.1	金属空气电池	298
8.1.1	锌空气电池	299
8.1.2	铝空气电池	305
8.1.3	镁空气电池	310
8.2	电化学电容器	313
8.2.1	工作原理	314
8.2.2	基本结构	315
8.2.3	主要特性	315
8.2.4	注意事项	317
8.3	氧化还原液流电池	318
8.3.1	工作原理	318
8.3.2	基本结构	319
8.3.3	主要特性	319
	习题与思考题	321

参考文献

322

化学电源理论基础

1.1 化学基础知识

1.1.1 原子和原子量

(1) 原子

人们在长期的生产与科学实验的实践中，发现物质在化学反应中存在一种不能再分的微粒，科学上就把这种用化学方法不能再分的微粒叫原子。

原子是非常小的，它的直径数量级为 10^{-8} cm。打个比方，如果把一亿个原子排成一行，其总长度也只有 1cm 左右。

然而原子并不是最小的微粒，它还能再分。现代科学实验已经证明，原子也是具有复杂结构的微粒。原子的结构如图 1-1 所示。由图可见，原子的中心有一个带正电荷的原子核，核外有许多电子围绕核高速旋转，原子核带正电，电子带负电，由于原子核所带的电量和核外电子的电量相等，但电性相反，所以整个原子不显电性。

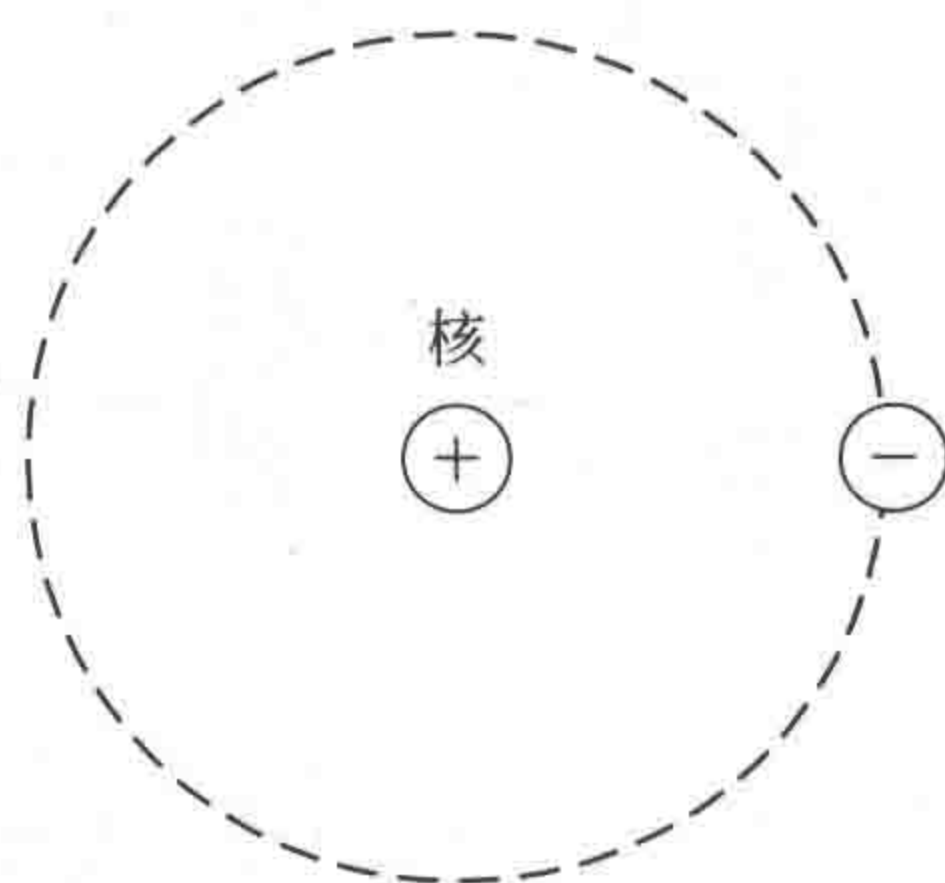


图 1-1 原子结构示意图

不同类的原子，其原子核所带的电荷数彼此不同。如氢原子，原子核带 1 个单位正电荷，核外有 1 个电子，即 1 个单位负电荷；氧原子，原子核带 8 个单位正电荷，核外有 8 个电子，即 8 个单位负电荷等。

原子核还可以再分，原子弹的爆炸就是利用了原子核裂变时所放出的巨大能量。现代科学实验证明，原子核是由质子和中子两种微粒构成的，每个质子带一个单位的正电荷，中子不带电。可见原子核所带的正电荷数（即核电荷数）就是核内质子的数目。上面对原子核的认识还是初步的，今后人类对原子结构的认识，将随着科学的发展而不断深化。

(2) 原子量

原子虽然很小但有一定的质量，原子的质量是原子的一种重要性质。原子的质量各不相同，一个氧原子的质量是 2.657×10^{-28} g，一个碳原子的质量为 1.993×10^{-23} g。

这样小的数字，书写、记忆和使用都很不方便，就如同用吨来表示一粒稻谷的质量。因此，在科学上一般不直接用原子的实际质量，而是采用不同原子的相对质量。国际上通常是以一个碳原子质量的 $1/12$ 作为标准，其他原子的质量跟其相比较所得的数值，就是该种原子的原子量。例如，采用这个标准，测得最轻的氢原子量约等于 1、氧原子量约等于 16、铁原子量约等于 56 等。由此可见，原子量只是一个比值，它没有单位。采用原子量来计算、书写和记忆就很方便了。国际原子量表和元素周期表见表 1-1，一般化学计算是采用原子量的近似值，见表 1-2。

表1-1 国际原子量表和元素周期表

族 周期	IA 1	IIA 2	过渡元素										IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	0族 18																																																																																																											
1	1 H 氢 1.008		元素符号, 红色 指放射性元素										2 He 氦 4.003						0族 电子数																																																																																																										
2	3 Li 锂 6.941	4 Be 铍 9.012	原子序数 元素名称 注*的是 人造元素										5 B 硼 10.81	6 C 碳 12.01	7 N 氮 14.01	8 O 氧 16.00	9 F 氟 19.00	10 Ne 氖 20.18	8 2																																																																																																										
3	11 Na 钠 22.99	12 Mg 镁 24.31	92 U 铀 238.0										13 Al 铝 26.98	14 Si 硅 28.09	15 P 磷 30.97	16 S 硫 32.06	17 Cl 氯 35.45	18 Ar 氩 39.95	8 8 2																																																																																																										
4	19 K 钾 39.10	20 Ca 钙 40.08	21 Sc 钪 44.96	22 Ti 钛 47.87	23 V 钒 50.94	24 Cr 铬 52.00	25 Mn 锰 54.94	26 Fe 铁 55.85	27 Co 钴 58.93	28 Ni 镍 58.69	29 Cu 铜 63.55	30 Zn 锌 65.41	31 Ga 镓 69.72	32 Ge 锗 72.64	33 As 砷 74.92	34 Se 硒 78.96	35 Br 溴 79.90	36 Kr 氪 83.80	8 18 8 2																																																																																																										
5	37 Rb 铷 85.47	38 Sr 锶 87.62	39 Y 钇 88.91	40 Zr 锆 91.22	41 Nb 铌 92.91	42 Mo 钼 95.94	43 Tc 锝 [98]	44 Ru 钌 101.1	45 Rh 铑 102.9	46 Pd 钯 106.4	47 Ag 银 107.9	48 Cd 镉 112.4	49 In 铟 114.8	50 Sn 锡 118.7	51 Sb 锑 121.8	52 Te 碲 127.6	53 I 碘 126.9	54 Xe 氙 131.3	8 18 18 8 2																																																																																																										
6	55 Cs 铯 132.9	56 Ba 钡 137.3	La~Lu 镧系										81 Tl 铊 204.4	82 Pb 铅 207.2	83 Bi 铋 209.0	84 Po 钋 [209]	85 At 砹 [210]	86 Rn 氡 [222]	8 18 32 18 8 2																																																																																																										
7	87 Fr 钫 [223]	88 Ra 镭 [226]	Ac~Lr 锕系										112 Uub * [285]	111 Rg 伦* [272]	110 Ds 达* [281]	109 Mt 钹* [268]	108 Hs 黑* [277]	107 Bh 铍* [264]	106 Sg 矽* [266]	105 Db 钽* [262]	104 Rf 钐* [261]	103 Lr 镱系 [262]	102 No [259]	101 Md [258]	100 Fm [257]	99 Es [252]	98 Cf [251]	97 Bk [247]	96 Cm [247]	95 Am [243]	94 Pu [244]	93 Np [237]	92 U 238.0	91 Pa 231.0	90 Th 232.0	89 Ac [227]	88 Ra [226]	87 Fr [223]	86 Rn [222]	85 At [210]	84 Po [209]	83 Bi 209.0	82 Pb 207.2	81 Tl 204.4	80 Hg 200.6	79 Au 197.0	78 Pt 195.1	77 Ir 192.2	76 Os 190.2	75 Re 186.2	74 W 183.8	73 Ta 180.9	72 Hf 178.5	71 Lu 175.0	70 Yb 173.0	69 Tm 168.9	68 Er 167.3	67 Ho 164.9	66 Dy 162.5	65 Tb 158.9	64 Gd 157.3	63 Eu 152.0	62 Sm 150.4	61 Pm [145]	60 Nd 144.2	59 Pr 140.9	58 Ce 140.1	57 La 138.9	56 Ba 137.3	55 Cs 132.9	54 Xe 131.3	53 I 126.9	52 Te 127.6	51 Sb 121.8	50 Sn 118.7	49 In 114.8	48 Cd 112.4	47 Ag 107.9	46 Pd 106.4	45 Rh 102.9	44 Ru 101.1	43 Tc [98]	42 Mo 95.94	41 Nb 92.91	40 Zr 91.22	39 Y 88.91	38 Sr 87.62	37 Rb 85.47	36 Kr 83.80	35 Br 79.90	34 Se 78.96	33 As 74.92	32 Ge 72.64	31 Ga 69.72	30 Zn 65.41	29 Cu 63.55	28 Ni 58.69	27 Co 58.93	26 Fe 55.85	25 Mn 54.94	24 Cr 52.00	23 V 50.94	22 Ti 47.87	21 Sc 44.96	20 Ca 40.08	19 K 39.10	18 Ar 39.95	17 Cl 35.45	16 S 32.06	15 P 30.97	14 Si 28.09	13 Al 26.98	12 Mg 24.31	11 Na 22.99	10 Ne 20.18	9 F 19.00	8 O 16.00	7 N 14.01	6 C 12.01	5 B 10.81	4 Be 9.012	3 Li 6.941	2 He 4.003	1 H 1.008	0族 电子数

铜系	57 La 镧 138.9	58 Ce 铈 140.1	59 Pr 镨 140.9	60 Nd 钕 144.2	61 Pm 钷 [145]	62 Sm 钐 150.4	63 Eu 铕 152.0	64 Gd 钆 157.3	65 Tb 铽 158.9	66 Dy 镝 162.5	67 Ho 铈 164.9	68 Er 铒 167.3	69 Tm 铥 168.9	70 Yb 镱 173.0	71 Lu 铥 175.0
铜系	89 Ac 锕 [227]	90 Th 钍 232.0	91 Pa 镤 231.0	92 U 铀 238.0	93 Np 镎 [237]	94 Pu 钚 [244]	95 Am 镅 [243]	96 Cm 锔 [247]	97 Bk 锫 [247]	98 Cf 锿 [251]	99 Es 镱 [252]	100 Fm 镆 [257]	101 Md 钔 [258]	102 No 镎 [259]	103 Lr 镥 [262]

表 1-2 一些常见元素的名称、符号、原子量（近似值）

元素名称	元素符号	原子量	元素名称	元素符号	原子量	元素名称	元素符号	原子量
氢	H	1	碘	I	127	锌	Zn	65
氮	N	14	钠	Na	23	银	Ag	108
氧	O	16	镁	Mg	24	锡	Sn	119
氯	Cl	35.5	铝	Al	27	铋	Sb	122
溴	Br	80	钾	K	39	钡	Ba	137
碳	C	12	钙	Ca	40	钨	W	184
硅	Si	28	锰	Mn	55	金	Au	197
磷	P	31	铁	Fe	56	汞	Hg	201
硫	S	32	铜	Cu	63.5	铅	Pb	207

1. 1. 2 分子和分子式

(1) 分子

人们在长期的生产实践和日常生活中，经常会遇到这样一些现象，例如，湿的衣服晒一定时间就干了；食糖放进水中很快就不见了，而水有了甜味；蓄电池在充电过程中，从远处就能闻到刺激性的气味等。这些现象都跟物质的结构有着密切的关系。

人们经过长期的科学实验和分析，证明物质都是由许许多多肉眼看不见的微粒构成的。构成物质的微粒有许多种，分子是构成物质的一种微粒。例如水就是由大量的水分子聚集而成的。水分子很小，一滴水里大约就有十五万亿亿个水分子，人们必须用放大几万到几十万倍的显微镜才能看到。

分子并不是静止地存在，而是不断地运动着的。人们能闻到远处传来的蓄电池在充电过程中的刺激性气味，湿衣服晒一定时间就干了，正是由于刺激性气体分子、水分子不断运动而扩散到空气中。

分子与分子间有一定的间隔，一般物体有热胀冷缩的现象，就是由于物质分子间的间隔受热增大、遇冷减小。这种间隔如果很大，物质就呈现为气态，如果间隔较小，物质就呈现为液态或固态。一般物质在不同的条件下有三态的变化，主要是由于其分子间的间隔大小发生了变化。不论是气态、液态或固态的物质，其分子与分子之间都存在一定的作用力。

当物质发生物理变化时，其分子本身没有变，所以物质仍然是原来的物质。例如水变成水蒸气，只是分子间的间隔增大了，水分子本身没有变。而当物质发生化学变化时，其分子被转变成了别的分子，所以物质也变成了别的物质。例如硫在氧气里燃烧变成了二氧化硫气体，是由于硫分子跟氧分子反应变成了二氧化硫分子。新生成的分子，其化学性质和原来的分子不同。由此可见，分子是保持物质化学性质的一种微粒。同一种物质的分子化学性质相同，不同种物质的分子，其化学性质不同。

(2) 分子式

科学实验证明，各种物质的分子都由一定的元素组成，为了便于认识和研究物质，化学上常用元素符号来表示物质分子的组成。例如氧分子、氢分子和水分子的组成，可以分别用O₂、H₂和H₂O来表示，这种用元素符号来表示物质分子组成的式子叫做分子式。

各种物质的分子式，是通过实验的方法，测定了物质的组成后得出来的。一种物质只有一个分子式。下面来讨论分子式的写法。

① 单质分子式的写法 单质是由同种元素组成的。写单质分子式时，首先写出它的元

素符号，然后在元素符号的右下角写一个小数字以表示这种分子里所含原子的数目（原子数是1时不写）。

例如氢气和氧气的每一个分子里都含有两个原子，所以这些单质的分子式可写成 H_2 和 O_2 。如果每个分子只由单个原子组成，如氦气和氖气可用 He 和 Ne 来表示。

金属单质和固体非金属单质的结构比较复杂，习惯上就用元素符号来表示它们的分子式。例如铁用 Fe 、铅用 Pb 来表示。

② 化合物分子式的写法 化合物是由不同种元素组成的物质。写化合物分子式时，必须知道这种化合物分子由哪几种元素组成，以及一个分子里每种元素各有多少个原子，然后在每种元素符号的右下角写个小数字以标明一个分子里所含该元素的原子数。

由氧元素跟另一元素组成的化合物，在书写其分子式时，一般要把氧元素符号写在右方，另一种元素符号写在左方。例如一氧化碳 CO 、氧化铅 PbO 等。

由金属元素与非金属元素组成的化合物，在书写其分子式时，一般要把金属元素符号写在左方，非金属元素写在右方。例如硫化铁分子写成 FeS 。

分子式用来表示物质的一个分子。如果要表示物质的几个分子，可以在分子式前面加上系数标明该物质的分子数。例如表示两个氧分子写成 $2O_2$ ，表示3个水分子写成 $3H_2O$ 。

书写分子式时应该注意：元素符号右下角的数字和元素符号前面的数字在意义上是完全不同的。例如 O_2 表示一个氧分子由两个氧原子组成， $2O$ 则表示两个氧原子； $3O_2$ 表示三个氧分子。

由两种元素组成的化合物的名称，一般是从右向左读作“某化某”。例如 $CuCl_2$ ，读作氯化铜、 SCl_4 读作四氯化硫等等。一些常见化合物的名称如表 1-3 所示。

表 1-3 常见化合物名称举例

物质	分子式	物质	分子式	物质	分子式
氢气	H_2	二氧化铅	PbO_2	氯化钠	$NaCl$
氧气	O_2	盐酸	HCl	氯化锌	$ZnCl_2$
氯气	Cl_2	硫酸	H_2SO_4	氯化铵	NH_4Cl
水	H_2O	硝酸	HNO_3	硫酸铜	$CuSO_4$
二氧化锰	MnO_2	氢氧化钠	$NaOH$	硫酸锌	$ZnSO_4$
氧化银	AgO	氢氧化钾	KOH	硫酸铅	$PbSO_4$
二氧化碳	CO_2	氢氧化镉	$Cd(OH)_2$	硝酸银	$AgNO_3$

(3) 分子量

分子量是指一个分子中各原子的原子量的总和，根据各个物质的分子式可以算出其分子量。例如：

氧气的分子式是 O_2 ，那么氧气的分子量就是两个氧原子的原子量之和，即

$$O_2 \text{ 的分子量} = 16 \times 2 = 32$$

二氧化碳的分子式是 CO_2 ，那么二氧化碳的分子量就是两个氧原子的原子量和一个碳原子的原子量之和，即

$$CO_2 \text{ 的分子量} = 12 + 16 \times 2 = 44$$

根据分子式还可以计算出组成物质的各元素的质量比。例如：

水的分子式是 H_2O ，那么组成水分子的氢元素和氧元素的质量比是 $(1 \times 2) : 16 = 1 : 8$ 。

因此，可以总结出分子式所代表的意义，如表 1-4 所示。

表 1-4 分子式的意义

分子式的意义	以 H ₂ O 为例
① 表示物质的一个分子	一个水分子
② 表示组成物质的各种元素	水由氢和氧两种元素组成
③ 表示物质的一个分子里各元素的原子个数	一个水分子含有两个氢原子和一个氧原子
④ 表示物质分子的分子量	水的分子量 = $1 \times 2 + 16 = 18$
⑤ 表示组成物质的各元素的质量比	氢 : 氧 = $(1 \times 2) : 16 = 1 : 8$

1. 1. 3 元素和元素符号

(1) 元素

如前所述，氧分子是由氧原子组成的，水分子是由氧原子和氢原子组成的，无论是氧分子中的氧原子，水分子中的氧原子，还是其他分子中的氧原子，其核电荷数都是 8，都有 8 个质子，在化学上把具有相同的核电荷数（即质子数）的同一类原子总称为元素。氧元素就是所有氧原子的总称，氢元素就是所有氢原子的总称。

在自然界里，物质的种类非常多，有几百万种，但是构成这些物质的元素并不多。到目前为止，已经知道的元素有 119 种，其中包括十几种人造元素。

自然界里的物质，有的是由同种元素组成的。如氧气是由氧元素组成的，氢气是由氢元素组成的。这种由同种元素组成的物质叫做单质。有的单质由分子构成，如氧气、氢气、氮气等。有的单质由原子构成，如铁、铅、锌等。根据单质的不同性质，一般又可分为非金属单质和金属单质两大类。例如氧气、氢气、硫等都是非金属单质；铁、铜、铅等都是金属单质。

有些物质的组成比较复杂，例如氧化铁、氧化铅是由两种不同的元素组成的，氢氧化钾是由氢、氧、钾三种不同的元素组成的，硫酸铅是由铅、硫、氧三种不同的元素组成的，像这种由不同种元素组成的物质叫作化合物。在各种化合物里，如果其中一种是氧元素，这种化合物叫作氧化物，如氧化铁、氧化铅等都是氧化物。

自然界里的元素有两种存在的形态，一种是以单质的形态存在的，叫作元素的游离态；另一种是以化合物的形态存在的，叫作元素的化合态。例如氧气里的氧元素是游离态，二氧化碳中的氧元素是化合态。

(2) 元素符号

在化学上，规定采用不同的符号表示各种元素。例如用“O”表示氧元素、用“P”表示磷元素、用“Fe”表示铁元素等。这种用来表示不同元素的符号叫作元素符号。国际上统一采用元素的拉丁文名称的第一个大写字母来作为该元素的元素符号。如果几种元素符号的第一个字母相同时，可再附加一个小写字母来区别。例如，Cu 代表铜元素。书写时要注意：第二个字母须小写，以免混淆。例如，“Co”表示钴原子，如果写成 CO 便表示一氧化碳分子了。一些常见的元素及其元素符号见表 1-2。

(3) 元素周期律和周期表

如果把自然界里已发现的 119 种元素按照它们的核电荷数由小而大地排列，这个排列的顺序叫做原子序数。显然原子序数就是原子的核电荷数，即每个原子的核外的电子数。按原子核电荷数依次排列时，原子最外层电子个数总是由 1 个递增到 8 个（氢、氦元素除外）。由此可见，随着元素的原子序数依次递增，它们的原子最外层电子数呈现周期性的变化，与此同时元素和其化合物性质也显示规律性的变化，这个规律就叫元素的周期律。

根据元素的周期律可以制成元素的周期表。将目前已知的 119 种元素，按照它们的原子

序数递增顺序依次排成一个长列，然后把这个长列分成若干部分，每一部分都从活泼的金属开始到惰性气体为止，这些部分称为一个周期。把各周期上下相叠，使不同周期内性质相似的各元素处于同一纵行，这些纵行称为族。这样就制成了元素周期表（见表 1-1）。

元素同期律是 1869 年俄国化学家门捷列夫发现的。他根据当时已知的元素（63 种）和大量的实验事实，经过分析和概括得出，元素及由它所组成的单质和化合物的性质，都随着元素原子量的递增而周期性地变化。需要指出的是，由于当时人们对原子的内部结构还没有充分认识和研究，所以门捷列夫只能从元素的原子量递增来研究元素性质的变化。今天人们对原子的内部结构已有了进一步的认识，因此可以更本质地从原子核内质子数的递增来说明元素的性质及其具有周期性变化的真正原因，这就是由于元素的原子随着核电荷数的递增，核外电子（主要指最外层上的电子）周期性地重复着同样的排列分布。

元素周期表是化学元素周期律的直观表现，它不仅反映了元素的自然分类，同时也是学习和研究科学的重要工具。下面简略地对周期表加以说明。

在元素周期表里，共有七个行，每个行是一个周期，所以有七个周期。一、二、三周期元素数目较少，称为短周期。四、五、六周期元素数目多，称为长周期。第七周期还不是一个完整的周期，因此叫不完全周期。从纵的方面看，共有 18 个列，每个列叫做一族（除 8、9、10 三个纵行为一族外）。族分主族和副族，通常把短周期元素与长周期元素共同构成的族叫作主族，完全由长周期元素构成的族，叫作副族。最右边一族是惰性元素，它们在通常情况下不起化学变化，化合价是零，因此称为零族。人们利用周期表，可以推断元素的性质，可以预言新的元素，还可探索新材料。

1.2 溶液与溶液浓度

1.2.1 溶液

由一种或几种物质的微粒分散到另一种物质的微粒中所形成的体系叫分散系。如碘分散在酒精中形成的碘酒、浓硫酸分散在水中形成的稀硫酸、泥土分散在水中形成的泥浆等都是分散系。在分散系中，被分散的物质称为分散相（如碘、浓硫酸、泥土），微粒在其中分散的物质称分散介质（如酒精、水）。分散系可以是均匀的（如碘酒、稀硫酸），也可以是非均匀的（如泥浆），这主要取决于分散系中分散相微粒的大小。如果按照分散相微粒直径的大小，分散系可分为真溶液、胶体溶液和浊液，如表 1-5 所示。

表 1-5 分散系的分类

分散相直径/m	分散系类型
10^{-9} 以下	(真) 溶液
$10^{-9} \sim 10^{-7}$	胶体溶液
10^{-7} 以上	浊液 (悬浊液、乳浊液)

(1) (真) 溶液

真溶液也称溶液，它是由分散相以分子或离子形式在分散介质中分散所形成的均匀分散系。由于分子或离子的直径很小，所以溶液具有均一、稳定的特性。溶液的分散相也叫溶质，分散介质也叫溶剂，故溶液是由溶质和溶剂组成的。溶液可以是固态的（如合金）、液态的（如碘酒、稀硫酸）或气态的（如空气）。通常所指的溶液，是液态溶液。

溶质和溶剂是相对的。如果溶液是由固体和液体组成的（如碘和酒精），则固体是溶质，

液体是溶剂；若溶液是由气体和液体组成的（如氯化氢气体溶于水得盐酸溶液），则气体是溶质，液体是溶剂；若溶液是由两种液体组成的，一般把量少的叫溶质，量多的叫溶剂，如酒精与水互溶时，一般认为酒精是溶质，水是溶剂，如果少量的水溶解在酒精里，就可以把水作为溶质，酒精作为溶剂。

水是最常用的溶剂，能溶解许多固态、液态和气态物质，形成液态的溶液。其他的物质如汽油、酒精等也可以作为溶剂，用来溶解不易被水溶解的物质。如汽油能溶解油脂、酒精能溶解碘等。通常用得最多的是液态的溶液，在没有特殊说明的情况下，一般指的是水作为溶剂的（真）溶液。

(2) 浊液

分散相微粒的直径大于 10^{-7}m 的分散系称为浊液。浊液又分为悬浊液和乳浊液。

例如，当把淀粉置于水中，经过振荡便得到浑浊的液体，液体里悬浮着由很多分子集合成的固体小颗粒，直径大于 10^{-7}m 。这种由固体小颗粒悬浮于液体中形成的浊液叫悬浊液。因为固体小颗粒的直径较大，所以悬浊液很不稳定，静置一段时间后，就会出现小颗粒下沉的现象。又如，将植物油注入水中，用力振荡以后，得到乳状浑浊的液体，液体里分散着由很多分子集合而成的不溶于水的小液滴，其直径也大于 10^{-7}m 。这种由小液滴分散到液体中形成的浊液叫乳浊液。同样，乳浊液也很不稳定，小液滴会因为密度小而逐渐上浮，分为上下两层。

由上述两个例子可见，浊液具有浑浊的外观和不稳定的特性。浊液的应用也很广泛，如农药喷洒前，大多将农药制成悬浊液和乳浊液，这样可减少药液散失，喷洒均匀和药效维持时间长，以便提高其杀虫效力。

(3) 胶体溶液

在胶体溶液中，分散相微粒直径的大小介于（真）溶液分子或离子的直径（ $<10^{-9}\text{m}$ ）和浊液微粒的直径（ $>10^{-7}\text{m}$ ）之间。一般地，把分散相微粒的直径在 $10^{-9}\sim 10^{-7}\text{m}$ 之间的分散系叫作胶体溶液，简称胶体。其中的微粒是由很大数目的分子（各微粒中所含分子的数目并不相同）组成的集合体。例如，将硝酸银溶液滴入碘化钾溶液中可制得浅黄色的碘化银胶体，这种胶体中的微粒就是许多碘化银分子的集合体。

胶体溶液中的微粒是带有电荷的，这是由于胶体的微粒具有较大的表面积，能吸附阳离子或阴离子，因而带上正电荷或者负电荷，这种带电的微粒称为胶粒。下面的实验可以证明胶粒的带电性。在一个 U 形管中装入红褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体，从 U 形管的两个管口各插入一个电极，将其通直流电后，发现阴极附近的颜色逐渐加深，阳极附近的颜色逐渐变浅，这表明 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶粒带正电荷。这种在外电场的作用下，胶粒在分散介质中向阴（或阳）极做定向移动的现象，叫作电泳。如图 1-2 所示。

胶体的电泳现象证明了胶粒具有带电性，实际上是作为分子集合体的微粒吸附溶液中的带电离子后，形成了带电的微粒。下面以 AgI 胶体为例来说明胶粒的构造，其结构如图 1-3 所示。由图可见，胶体的微粒由胶核及吸附层和扩散层组成。

在 AgI 胶体中，核心是碘化银分子的集合体 $(\text{AgI})_m$ ，称其为胶核。 m 表示胶核中所含 AgI 的分子数， m 的数值很大，且每个胶核的 m 值各不相同。如果胶体溶液中只有胶核在分散介质中，那么它将是很不稳定的。胶核的颗粒小，表面积很大，它们有相互聚结起来变成较大的粒子而沉积下来的趋势，因此胶体中必须有稳定剂存在，通常是

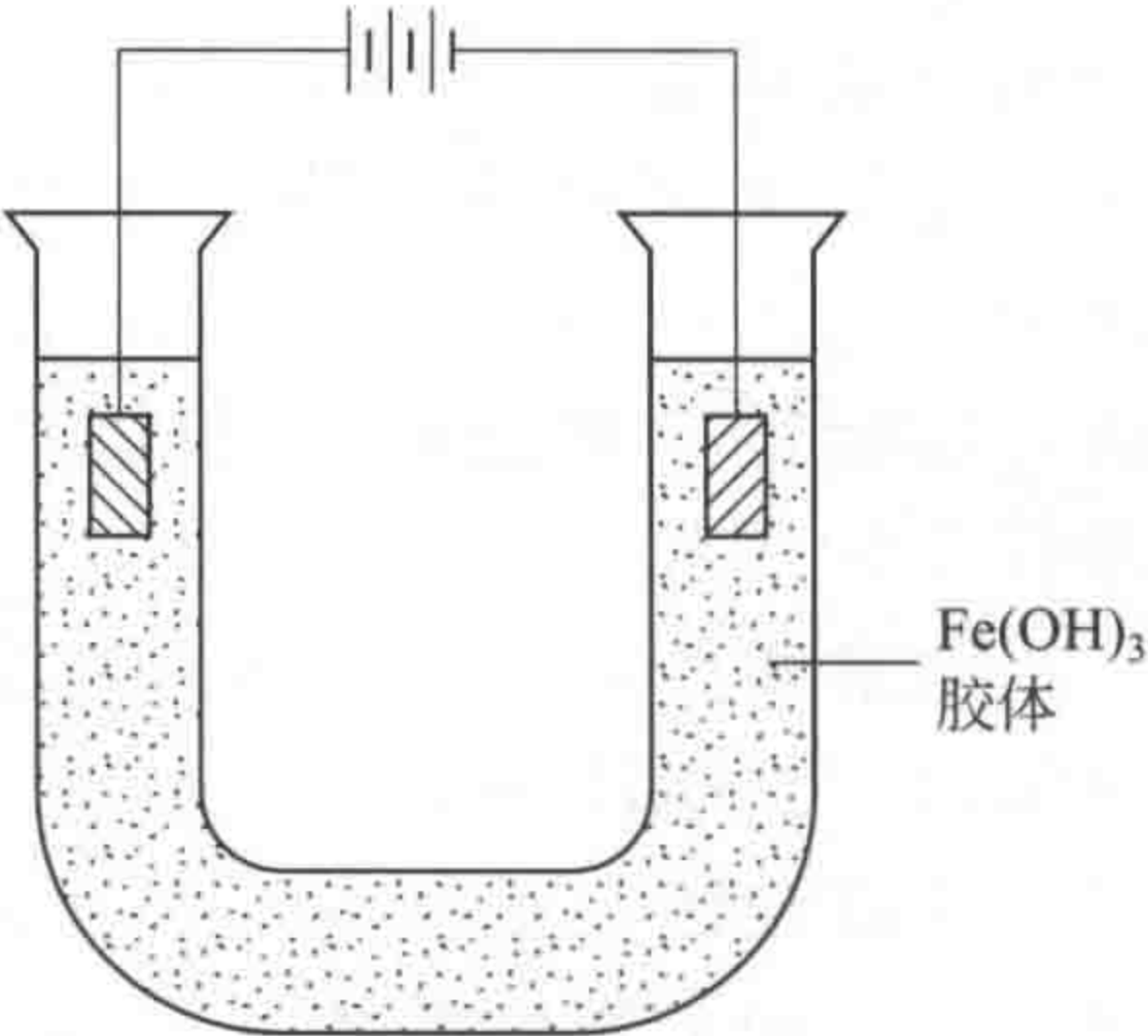


图 1-2 电泳现象