

高等学校“十三五”规划教材

无机及分析化学

第二版

焦琳娟 主编



WUJI JI FENXI HUAXUE



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

无机及分析化学

第二版

焦琳娟 主编

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1

ISBN 978-7-132-33021-1



化学工业出版社

·北京·

ISBN 978-7-132-33021-1

《无机及分析化学》(第二版)共十一章,系统介绍了气体、溶液和胶体,化学反应基础,物质结构,定量分析概论,酸碱平衡和酸碱滴定分析,配位平衡和配位滴定分析,氧化还原平衡和氧化还原滴定分析,沉淀溶解平衡和沉淀滴定分析,吸光光度分析法,分析化学中常用的分离和富集方法简介及现代仪器分析方法简介等内容,将无机化学理论及化合物性质与分析化学中的应用有机地结合在一起。

《无机及分析化学》(第二版)可作为高等院校农业、林学、生物、食品、医学、环境等专业的教材,也可供科研、生产部门有关科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

无机及分析化学/焦琳娟主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2018.6

高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-32057-5

I. ①无… II. ①焦… III. ①无机化学-高等学校-教材②分析化学-高等学校-教材 IV. ①O61②O65

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第084182号

责任编辑:宋林青

文字编辑:刘志茹

责任校对:宋玮

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张18 $\frac{1}{4}$ 彩插1 字数446千字 2018年9月北京第2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:42.00元

版权所有 违者必究

《无机及分析化学》（第二版）编写组

主 编 焦琳娟

副主编 高 岐 洪显兰 丘秀珍

编 者 （以姓名笔画为序）

龙来寿 丘秀珍 任健敏 洪显兰

莫云燕 徐先燕 高 岐 黄冬兰

焦琳娟 蒋荣华

前言

随着科学技术和经济的飞速发展，以及高等教育改革的日益深化，“无机化学和分析化学”的课程体系、教学内容、教学方法等也在不断地进行调整与改革。韶关学院坚持教育改革，早在 21 世纪初期就开始“无机及分析化学”课程改革的探索与实践，2008 年获校级教学成果奖二等奖，2013 年高岐、任健敏两位教授结合轻工、食品、生物工程、农业、材料等专业的培养要求，以“少而精、精而新”、培养 21 世纪应用型人才提供较为广泛的知识平台为原则，主编出版了高等学校“十一五”规划教材《无机及分析化学》并使用至今。

为了适应国家经济发展和地方高校培养应用型、创新性、创业型“三型”人才的需要，根据我们多年使用本教材的教学体会，在认真分析国内外同类教材的基础上，我们对第一版教材进行了修改和更新。在编写中，我们传承了削枝强干、去粗存精、突出重点、加强基础的编写宗旨，力求科学性、先进性、系统性、启发性和教育性的统一，反映无机化学及分析化学的时代特点。本书注重对基本原理、基本知识、基本概念和基本技能的透彻理解和掌握，着力培养学生主动学习获得新知识的能力、高层次思考问题的能力和勇于探索创新的认识，强调严谨细致的分析推理。全书共分十一章，介绍了气体、溶液和胶体，化学反应基础，物质结构，定量分析概论，酸碱平衡和酸碱滴定分析，配位平衡和配位滴定分析，氧化还原平衡和氧化还原滴定分析，沉淀溶解平衡和沉淀滴定分析，分光光度分析法，分析化学中常用的分离和富集方法简介及现代仪器方法简介等内容。主要修订内容如下：

1. 每章增加“本章小结”部分。
2. 简化公式推导。
3. 调整章与章之间的顺序，将“沉淀溶解平衡和沉淀滴定分析”调整到四大平衡和四大滴定分析的最后部分进行介绍。
4. 第一章由原来的两节增加为三节，补充介绍气体基本知识。同时，重新梳理有关胶体的知识。
5. 将原来的第二章和第三章整合为一章——化学反应基础，淡化反应进度。
6. 在定量分析概论一章中，将判断离群值取舍的 $4\bar{d}$ 法置换为格鲁布斯法。
7. 在化学反应定量计算中，用计量数比规则代替等物质的量规则。
8. 在酸碱平衡和酸碱滴定分析中补充介绍物料平衡式和电荷平衡。
9. 围绕原理—仪器—条件选择—应用这条线索，理顺分光光度分析法这章的知识结构。
10. 将固相萃取、固相微萃取、超临界流体萃取等内容作为绿色分离富集技术的代表补充到分析化学中常用的分离和富集方法简介一章中。

11. 在现代仪器方法简介中增加介绍高效液相色谱分析法。

12. 对各章的插图、例题和习题进行了修订和部分更新。

参加本教材编写的有：焦琳娟（前言、第十章、第十一章第六节），黄冬兰（第一章），丘秀珍（第二章、第六章），洪显兰（第三章、第九章），任健敏、焦琳娟（第四章），徐先燕（第五章），龙来寿（第七章），莫云燕（第八章），蒋荣华（第十一章第一至五节）。本书承蒙韶关学院高岐教授和任健敏教授的大力支持，提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平、教学经验有限，加之编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2017年11月

第一版前言

随着经济和科技的飞速发展, 教育的不断深化, 高等院校的教学内容和体系改革也有了更高的要求。21 世纪, 我国高等院校教育以培养具有综合素质的人才为主要目标。作为高等院校基础教育的组成部分——无机及分析化学, 是对学生进行素质和能力教育的重要内容。通过本课程的学习, 使学生在无机及分析化学的基本知识、基本理论、基本技能方面受到良好培训, 并能将其很好地运用到今后的学习和工作中去。

本教材面向新世纪的化学课程, 以适应高等院校对本科生人才化学素质、知识结构和创新能力的要求以及我国经济、科技和学生个性发展的需要。在编写过程中, 我们除了注意分析化学知识的覆盖面以外, 尽可能的联系实际, 给学生留下一些回味的东西, 使其体会化学的奥妙和涵义, 对基本原理产生更深一步的认识, 拓宽学生的解题思路, 对学生学习能力和学习素质的培养有所帮助, 使学生能够很好地掌握无机及分析化学的基本理论、基本知识和基本技能及其在生产实际、科学研究中的应用, 培养学生严谨的科学态度, 提高学生分析问题、综合解决问题和创新思维的能力, 为后继课程的学习及将来的工作奠定基础。

参加本书编写的作者均是长期从事无机及分析化学教学和科研的一线教师, 具有丰富的教学实践经验和较高的学术水平。在编写过程中, 查阅了大量的相关资料, 吸取了近年来国内外出版的同类教材的优点, 使之具有以下特点:

1. 注重理论联系实际, 重视基本原理、基本知识和基本实验技能。文字叙述简明扼要, 注意启发性。力求削枝强干、优化内容、突出重点、加强基础, 以符合学生的认知规律, 强化早期渗透应用的意识, 联系当前普遍关注的资源、能源、环境、材料、生物技术、生命科学等实际问题, 有利于学生分析问题、解决问题能力的培养。

2. 立足于本课程的基本知识点, 结合工、农、林、生物、食品、医学等专业学生的特点, 为适应化学学科的发展和 21 世纪教学改革的要求, 反映最新科技进步与发展动态, 增加新的科技信息并扩大学生的知识面, 教材中增加了仪器分析、无机及分析化学中常用分离方法的应用等内容。为学生将来在学科交叉领域进行创新打下基础。

3. 以“无机化学课程教学基本要求”和“分析化学课程教学基本要求”为依据, 编写时力求抓住重要的基本理论和知识, 将无机化学和分析化学的内容有机糅合在一起, 内容相同的地方相统一, 对相关内容删繁就简, 突出重点, 加强基础, 并从统一的角度做更为精炼的论述。以掌握概念、强化应用为重点, 扩大实际应用性。

4. 贯彻我国法定计量单位, 用“物质的量”及其单位来处理化学反应中物质之间量的关系。

参加本教材编写的有韶关学院高岐（前言、第六章、第七章的第二节、第八章的第五、六、七节、第九章的第四节、第十章、第十一章、第十二章、第十三章）；黄冬兰（第一章）；丘秀珍（第二章、第三章、第九章的第一、二、三节）；任健敏（第五章）；河南农业大学胡晓娟（第四章、第七章的第一节）；长江大学胡琳莉（第八章的第一、二、三、四节）。

本书旨在为农、林、工、生物、食品、医学等专业提供一本内容新颖、适于教与学的无机及分析化学教材。在编写过程中，我们努力做到内容深入浅出，循序渐进，重点突出，文字通俗易懂，概念准确清晰。根据专业不同，教学内容可适当进行调整。但限于编者水平，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2010年4月

目录

第一章 气体、溶液和胶体	1
第一节 气体	1
第二节 溶液	3
第三节 胶体	12
本章小结	18
思考题与习题	19
第二章 化学反应基础	21
第一节 化学热力学基本概念	21
第二节 化学反应热	23
第三节 吉布斯自由能	28
第四节 化学反应速率	31
第五节 化学平衡	36
本章小结	44
思考题与习题	45
第三章 物质结构	48
第一节 原子结构	48
第二节 分子结构	61
本章小结	72
思考题与习题	72
第四章 定量分析概论	74
第一节 定量分析方法	74
第二节 定量分析的过程	76

第三节	定量分析误差	77
第四节	提高分析结果准确度的方法	81
第五节	有限测定实验数据的统计处理	82
第六节	滴定分析法概述	86
本章小结	.....	93
思考题与习题	.....	94

第五章 酸碱平衡和酸碱滴定分析 96

第一节	酸碱质子理论	96
第二节	弱电解质的解离平衡	97
第三节	缓冲溶液	100
第四节	酸度对水溶液中弱酸(碱)型体分布的影响	104
第五节	酸碱溶液 pH 值的计算	108
第六节	酸碱指示剂	112
第七节	酸碱滴定曲线和指示剂的选择	115
第八节	酸碱滴定分析的应用	121
本章小结	.....	124
思考题与习题	.....	126

第六章 配位平衡和配位滴定分析 128

第一节	配位化合物的基本概念	128
第二节	配位化合物的化学键理论	132
第三节	配位平衡	134
第四节	配位滴定分析	138
第五节	配位滴定分析的应用	152
本章小结	.....	154
思考题与习题	.....	154

第七章 氧化还原平衡和氧化还原滴定分析 156

第一节	氧化还原反应的基本概念	156
第二节	原电池和电极电势	158
第三节	电极电势的应用	165
第四节	元素电势图及其应用	168
第五节	氧化还原滴定分析	170
第六节	氧化还原滴定的预处理	173

第七节 氧化还原滴定方法及应用	174
本章小结	182
思考题与习题	183

第八章 沉淀溶解平衡和沉淀滴定分析 186

第一节 沉淀溶解平衡	186
第二节 沉淀滴定分析	194
本章小结	199
思考题与习题	200

第九章 分光光度分析法 202

第一节 概述	202
第二节 分光光度分析的基本原理	202
第三节 分光光度计的构成和类型	206
第四节 显色反应及其条件的选择	208
第五节 光度分析误差及测量条件的选择	211
第六节 其他分光光度法	213
第七节 分光光度法的应用	215
本章小结	217
思考题与习题	218

第十章 分析化学中常用的分离和富集方法简介 220

第一节 概述	220
第二节 沉淀分离法	220
第三节 液-液萃取分离法	222
第四节 液相色谱分离法	225
第五节 绿色分离富集技术	227
本章小结	231
思考题与习题	231

第十一章 现代仪器方法简介 233

第一节 原子吸收光谱分析法	233
第二节 原子发射光谱分析法	236
第三节 分子荧光分析法	241

第四节	红外光谱分析	243
第五节	气相色谱分析法	247
第六节	高效液相色谱分析法	253
	本章小结	258
381	思考题与习题	259

附录 261

001	一、一些基本物理常数	261
010	二、一些物质的 $\Delta_f H_m^\ominus$ 、 $\Delta_f G_m^\ominus$ 和 S_m^\ominus (298.15K)	261
	三、元素的原子半径 (pm)	266
010	四、元素的第一电离能 ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	267
	五、一些元素的电子亲和能 ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	268
010	六、元素的电负性	268
010	七、一些化学键的键能 ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; 298.15K)	269
010	八、鲍林离子半径 (pm)	269
010	九、弱酸在水中的解离常数 (25°C)	270
110	十、弱碱在水中的解离常数 (25°C)	271
010	十一、常用缓冲溶液的 pH 范围	271
010	十二、金属离子与 EDTA 配合物的 $\lg K_f^\ominus$ (25°C)	272
010	十三、配离子的积累稳定常数	272
010	十四、标准电极电势 (25°C)	273
	十五、部分氧化还原电对的条件电极电势 (25°C)	274
050	十六、难溶化合物的溶度积常数 (25°C)	275
	十七、化合物的分子量	276

参考文献 279

050	1. 无机化学	279
050	2. 物理化学	279
050	3. 分析化学	279
050	4. 仪器分析	279
050	5. 无机合成	279
050	6. 无机材料	279
050	7. 无机物性质表	279
050	8. 无机物合成手册	279
050	9. 无机物性质表	279
050	10. 无机物合成手册	279
050	11. 无机物性质表	279
050	12. 无机物合成手册	279
050	13. 无机物性质表	279
050	14. 无机物合成手册	279
050	15. 无机物性质表	279
050	16. 无机物合成手册	279
050	17. 无机物性质表	279
050	18. 无机物合成手册	279
050	19. 无机物性质表	279
050	20. 无机物合成手册	279
050	21. 无机物性质表	279
050	22. 无机物合成手册	279
050	23. 无机物性质表	279
050	24. 无机物合成手册	279
050	25. 无机物性质表	279
050	26. 无机物合成手册	279
050	27. 无机物性质表	279
050	28. 无机物合成手册	279
050	29. 无机物性质表	279
050	30. 无机物合成手册	279

第一章

气体、溶液和胶体

第一节 气 体

一、理想气体

气体具有流动性，无固定形状，随容器的形状不同而变化，在外力作用下其内部会发生相对运动，工业上把它称为可压缩性流动。为方便研究，假定气体分子本身不占体积，分子间没有相互作用力，此即为理想气体 (ideal gas)。

事实上理想气体是不存在的，但当实际气体处于高温 (高于 273.15K)、低压 (小于 101.325kPa) 时，气体分子之间几乎没有相互吸引和排斥，分子本身的体积相对于气体所占体积完全可以忽略，可视为理想气体。

在描述气体状态时常用物质的量 (n)、体积 (V)、压力 (p) 和热力学温度 (T) 四个物理量，其 SI (国际单位制) 单位依次为 mol、 m^3 、Pa、K。这些物理量之间的联系可以用理想气体状态方程来描述。

$$pV = nRT \quad (1-1)$$

式中， R 称为摩尔气体常数， $R = 8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 或 $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在应用式(1-1)时，也常用它的一些变换形式：

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad p = \frac{n}{V}RT \quad \text{和} \quad pM = \rho RT$$

式中， m 是气体的质量； M 是气体的摩尔质量； ρ 是气体的密度。

若把几种互不发生化学反应的气体放在同一容器内，混合物中每一种气体叫做组分气体，某组分气体在同一温度下单独占有混合气体容积时所产生的压力，称为该组分气体的分压力。1801年，英国科学家道尔顿 (J. Dalton) 通过实验提出气体分压定律：在温度和体积一定时，混合气体的总压力等于组分气体压力之和。其数学表达式为：

$$p_{\text{总}} = p_1 + p_2 + \cdots + p_i + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-2)$$

式中， $p_{\text{总}}$ 为气体混合物的总压力； p_i 为任一组分的分压力。

对于理想气体，各组分气体的分压满足理想气体状态方程式：

$$p_i = \frac{n_i RT}{V} \quad (1-3)$$

由气体分压定律可知:

$$p_{\text{总}} = p_1 + p_2 + \cdots + p_i + \cdots + p_n = (n_1 + n_2 + \cdots + n_i + \cdots + n_n) \frac{RT}{V} = n_{\text{总}} \frac{RT}{V} \quad (1-4)$$

式(1-3)和式(1-4)相除,得:

$$\frac{p_i}{p_{\text{总}}} = \frac{n_i}{n_{\text{总}}}$$

故:
$$p_i = p_{\text{总}} \frac{n_i}{n_{\text{总}}} \quad (1-5)$$

【例 1-1】 将一定量的固体氯酸钾和二氧化锰混合物加热分解后,称得其质量减少了 0.480g,同时测得用排水取气法收集起来的氧气的体积为 0.377L,压力为 $9.96 \times 10^4 \text{ Pa}$,此时温度是 294K,试计算氧气的相对分子质量。

解: 用排水取气法得到的是氧气和水蒸气的混合气体,水蒸气的分压与该温度下水的饱和蒸气压相等,查表得,294K 时水的饱和蒸气压为 $2.94 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

根据分压定律 $p_{\text{总}} = p(\text{O}_2) + p(\text{H}_2\text{O})$

故 $p(\text{O}_2) = p_{\text{总}} - p(\text{H}_2\text{O}) = 9.96 \times 10^4 \text{ Pa} - 2.94 \times 10^3 \text{ Pa} = 9.71 \times 10^4 \text{ Pa}$

$$n(\text{O}_2) = \frac{p(\text{O}_2)V_{\text{总}}}{RT} = \frac{9.71 \times 10^4 \text{ Pa} \times 0.377 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 294 \text{ K}} = 0.015 \text{ mol}$$

$$M(\text{O}_2) = \frac{m(\text{O}_2)}{n(\text{O}_2)} = \frac{0.48 \text{ g}}{0.015 \text{ mol}} = 32.0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

二、实际气体

如前所述,当实际气体处于高温低压时可视为理想气体,符合上述各气体定律;相反,若是在低温高压条件下,就会发生偏离。

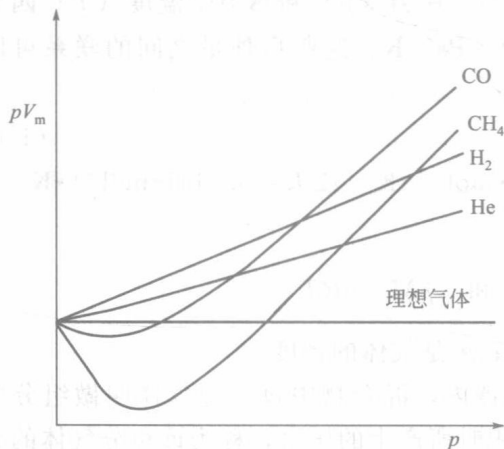


图 1-1 一些实际气体的 pV_m-p 等温线

图 1-1 以压力 p 为横坐标,气体的摩尔体积与压力的乘积 pV_m 为纵坐标,绘制 CO、CH₄、H₂、He 的 pV_m-p 等温线。由图得知,对于理想气体, $pV_m = RT$, 即在一定温度下,理想气体的 pV_m 是一常数,不随 p 的变化而变化;当气压接近于零时,各种气体的性质都接近于理想状态,随着压力的升高,各气体偏离理想的情况不同,CH₄ 偏离最多,He 偏离最少。

1873 年荷兰科学家范德华 (Vander Walls) 在研究大量实际气体的基础上,引入了两个修正项 a 和 b ,使理想气体状态方程式更符合实际气

体,其状态方程为:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (1-6)$$

式中, a 是与分子间引力有关的常数; b 是与分子自身体积有关的常数,统称为范德华常数,均可由实验确定(见表 1-1)。

表 1-1 几种常见气体的范德华常数

气体	$a/L^{-2} \cdot Pa \cdot mol^{-2}$	$b/L \cdot mol^{-1}$	沸点/ $^{\circ}C$	液态的摩尔体积
He	3.46	0.0238	-268.93	0.0320
H ₂	24.52	0.0265	-252.87	0.0285
O ₂	138.2	0.0319	-182.95	0.0280
N ₂	137.0	0.0387	-195.79	0.0347
CO ₂	365.8	0.0429	-78.4(升华)	—
C ₂ H ₂	451.8	0.0522	-84.7	—
Cl ₂	634.3	0.0542	-34.04	0.0453

修正后的气态方程比理想气体状态方程式在更为广泛的温度和压力范围内得到应用，计算结果也更接近于实际情况。

第二节 溶 液

广义地说，两种或两种以上的物质均匀混合而且彼此呈现分子（或离子）状态分布者均称为溶液，溶液可以气、液、固三种聚集态存在。通常所说的溶液都是指液态溶液。溶液由溶质和溶剂组成，被溶解的物质叫溶质，溶解溶质的物质叫溶剂。人们常把含量较少的组分称为溶质，含量较多的组分称为溶剂。

一、溶液浓度的表示方法

在讨论溶液时往往需要知道溶液的确切浓度，一定量的溶液或溶剂中所含溶质的量称为溶液的浓度（concentration of solution）。根据科研和生产的不同需要，溶液的浓度可以用不同的方法表示，常见的有质量分数、物质的量浓度和质量摩尔浓度等。

1. 质量分数

混合系统中，某组分 B 的质量 $[m(B)]$ 与混合物总质量 (m) 之比，称为组分 B 的质量分数，用符号 $w(B)$ 表示，其量纲为 1，表达式为：

$$w(B) = \frac{m(B)}{m} \quad (1-7)$$

质量分数，也常称为质量百分浓度（用百分率表达则再乘以 100%）。

2. 物质的量浓度

物质的量浓度是指单位体积溶液中所含溶质 B 的物质的量，用符号 $c(B)$ 表示。即

$$c(B) = \frac{n(B)}{V} \quad (1-8)$$

式中，B 为溶质的化学式； $n(B)$ 为溶质 B 的物质的量，单位是 mol； V 为溶液的体积，单位是 L； $c(B)$ 为物质的量浓度，单位是 $mol \cdot L^{-1}$ 。

若溶质 B 的质量为 $m(B)$ ，摩尔质量为 $M(B)$ ，则

$$n(B) = \frac{m(B)}{M(B)} \quad (1-9)$$

将式(1-9)代入式(1-8)中，得：

$$c(B) = \frac{m(B)}{M(B)V} \quad (1-10)$$

【例 1-2】 已知 80% 的硫酸溶液的密度为 $1.74\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，求该硫酸溶液的物质的量浓度。

解：1000mL 该硫酸溶液的质量为

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1000\text{mL} \times 1.74\text{g}\cdot\text{mL}^{-1} \times 80\% = 1392\text{g}$$

其物质的量浓度为：

$$c(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{m(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M(\text{H}_2\text{SO}_4)V} = \frac{1392\text{g}}{98.08\text{g}\cdot\text{mol}^{-1} \times 1.000\text{L}} = 14.19\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

3. 质量摩尔浓度

每千克溶剂中所含溶质 B 的物质的量称为溶质 B 的质量摩尔浓度，用 $b(\text{B})$ 表示，单位是 $\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其数学表达式为：

$$b(\text{B}) = \frac{n(\text{B})}{m(\text{A})} = \frac{m(\text{B})}{M(\text{B})m(\text{A})} \quad (1-11)$$

式中， $m(\text{A})$ 为溶剂的质量。由于物质的质量不受温度的影响，故溶液的质量摩尔浓度与温度无关，对于溶剂是水的稀溶液 [$b(\text{B}) < 0.1\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$]，质量摩尔浓度 b_{B} 近似地等于其物质的量浓度 c_{B} 。

【例 1-3】 50g 水中溶解 0.585g NaCl，求此溶液的质量摩尔浓度。

解：NaCl 的摩尔质量 $M(\text{NaCl}) = 58.44\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，则

$$\begin{aligned} b(\text{NaCl}) &= \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})m(\text{H}_2\text{O})} \\ &= \frac{0.585\text{g}}{58.44\text{g}\cdot\text{mol}^{-1} \times 50\text{g}} \times 1000\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} = 0.20\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

4. 摩尔分数（或物质的量分数）

溶液中某一组分 i 物质的量占全部溶液的物质的量的分数，称为组分 i 的摩尔分数，也常称为组分 i 的物质的量分数，用 x_i 表示。

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (1-12)$$

式中， x_i 为 i 的物质的量分数，量纲为 1； n_i 为 i 的物质的量； n 为溶液的总物质的量，二者单位都为 mol。

如果溶液是由溶质 B 和溶剂 A 两组分所组成，则 A 和 B 的物质的量分数可表示如下：

$$x_{\text{A}} = \frac{n_{\text{A}}}{n_{\text{A}} + n_{\text{B}}} \quad (1-13)$$

$$x_{\text{B}} = \frac{n_{\text{B}}}{n_{\text{A}} + n_{\text{B}}} \quad (1-14)$$

溶液各组分物质的摩尔分数之和等于 1，即 $x_{\text{A}} + x_{\text{B}} = 1$ ，对于多组分系统来说，则有 $\sum x_i = 1$ 。

【例 1-4】 在 100g 溶液中溶有 10.0g KCl，求水和 KCl 的摩尔分数。

解：依题意，100g 溶液中含有 10.0g KCl 和 90.0g 水，则

$$n(\text{KCl}) = \frac{m(\text{KCl})}{M(\text{KCl})} = \frac{10.0\text{g}}{74.6\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}} = 0.134\text{mol}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{O})} = \frac{90.0\text{g}}{18.0\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}} = 5.0\text{mol}$$

$$x(\text{KCl}) = \frac{n(\text{KCl})}{n(\text{KCl}) + n(\text{H}_2\text{O})} = \frac{0.134 \text{ mol}}{0.134 \text{ mol} + 5.0 \text{ mol}} = 0.026$$

$$x(\text{H}_2\text{O}) = \frac{n(\text{H}_2\text{O})}{n(\text{KCl}) + n(\text{H}_2\text{O})} = \frac{5.0 \text{ mol}}{0.134 \text{ mol} + 5.0 \text{ mol}} = 0.974$$

5. 质量浓度

每升溶液中所含溶质 B 的质量 (g), 用符号 $\rho(\text{B})$ 表示, 单位为 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 计算公式为:

$$\rho(\text{B}) = \frac{m(\text{B})}{V} \quad (1-15)$$

【例 1-5】 在常温下取 NaCl 饱和溶液 10.00 mL, 测得其质量为 12.003 g, 将溶液蒸干, 得 NaCl 固体 3.173 g。求: (1) 物质的量浓度; (2) NaCl 饱和溶液的质量分数; (3) 质量浓度。

解: (1) NaCl 饱和溶液的物质的量浓度为

$$\begin{aligned} c(\text{NaCl}) &= \frac{n(\text{NaCl})}{V} = \frac{m(\text{NaCl})}{M(\text{NaCl})V} \\ &= \frac{3.173 \text{ g}}{58.44 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1} \times 10.00 \times 10^{-3} \text{ L}} = 5.430 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \end{aligned}$$

(2) NaCl 饱和溶液的质量分数为

$$w(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{m(\text{NaCl}) + m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{3.173 \text{ g}}{12.003 \text{ g}} = 0.2644$$

(3) NaCl 饱和溶液的质量浓度为

$$\rho(\text{NaCl}) = \frac{m(\text{NaCl})}{V} = \frac{3.173 \text{ g}}{10.00 \times 10^{-3} \text{ L}} = 317.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$$

二、溶液的依数性

溶质的溶解过程是个物理化学过程。溶解的结果是溶质和溶剂的某些性质相应地发生了变化, 这些性质变化可分为两类: 一类是由溶质本性决定的, 如溶液的密度、颜色、体积、导电性和酸碱性等; 另一类性质只与溶液的浓度有关, 而与溶质的本性无关, 如蒸气压、熔沸点、凝固点、渗透压等。后一种性质也称为溶液的通性或依数性 (colligative properties), 在难挥发非电解质的稀溶液中, 溶液的依数性表现得更有规律, 而且溶液越稀, 其依数性的规律性越强。下面着重讨论难挥发非电解质稀溶液的依数性。

1. 溶液的蒸气压下降

物质分子在不断地运动着。在一定温度下, 将纯液体放在密闭的容器中, 液体表面一部分能量较高的分子会克服其他分子对它的吸引而逸出, 成为蒸气分子, 这个过程称为蒸发。在液体分子不断蒸发的同时, 液面上方的蒸气分子也可以被液面分子吸引或受外界压力的作用重新回到液体中, 这个过程称为凝聚。开始时, 因空间没有蒸气分子, 蒸发速度较快, 随着蒸发的进行, 液面上方的蒸气分子逐渐增多, 凝聚速度随之加快。一定时间后, 当蒸发速度和凝聚速度相等时, 该液体和它的蒸气处于两相平衡状态 [见图 1-2(a)]。在平衡时, 单位时间内由液面蒸发的分子数和由气相返回液体的分子数相等, 此时的蒸气称为饱和蒸气, 饱和蒸气所产生的压力称为饱和蒸气压 (saturated vapor pressure), 简称蒸气压。

一定的温度下, 纯液体的蒸气压是一个定值。若在纯溶剂中溶解少量难挥发非电解质 (如葡萄糖溶于水, 萘溶于苯中), 则可发现在同一温度下, 稀溶液的蒸气压总是低于纯溶剂的蒸气压。这种现象称为溶液的蒸气压下降。产生这种现象的原因是由于在纯溶剂中加入