

高等教育“十三五”规划教材



无机化学

张明霞 主编

Wuji Huaxue

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

University of Mining and Technology Press



高等教育“十三五”规划教材

无机化学

主 编 张明霞
副主编 王秀梅 郭增彩 杜彩云
蔡冬梅 母静波

China University of Mining and Technology Press

Wuji Huaxue

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书共 12 章,第 1 章衔接高中化学新课程的教材内容,介绍溶液和胶体的基础知识;第 2 至第 6 章以化学反应基本理论为主线,介绍化学热力学、化学动力学、酸碱平衡、沉淀-溶解平衡、氧化还原平衡与电化学;第 7 至第 8 章介绍物质结构理论,包括原子结构和分子结构;第 9 章在共价键理论上介绍配位化合物;第 10 章介绍重要元素及其化合物;第 11、12 章介绍化学与材料、化学与环境保护等无机化学拓展知识。各章后附有阅读材料、小结和习题,书后附有习题参考答案和附录等。

本书可用作高等院校环境、材料、勘探、给水、农林、生物等专业的基础课教材,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机化学/张明霞主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2019.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4079 - 8

I. ①无… II. ①张… III. ①无机化学—高等学校—教材 IV. ①O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 183516 号

书 名 无机化学

主 编 张明霞

责任编辑 周 红

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83884103 83885105

出版服务 (0516)83995789 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 19 字数 474 千字 彩插 1

版次印次 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价 36.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

无机化学是化学的一个重要分支,是高等院校材料工程、冶金工程、环境工程、采矿工程、生物工程、矿物加工和环境科学等专业的必修基础课程。其地位和作用主要体现在以下几个方面:① 它是培养上述各类专业工程技术人才的整体知识结构及能力结构的重要组成部分;② 通过学习,使学生掌握化学基本理论和基础知识,培养学生的化学观念和化学技能以及利用化学知识解决实际问题的能力,为后续化学课程和专业课程的学习打好基础;③ 化学作为素质教育的重要基础课程,对培养学生具备全面的科学素质具有重要作用。考虑材料、环境、农林、生物等专业对本课程的要求及大一新生的实际水平,本教材在内容选择和安排上保持了无机化学学科的科学性和系统性,教材内容力求精简,深入浅出,通俗易懂,便于自学。

本教材在内容选编上具有以下几个特色:① 内容体系上强调素质和能力的培养,难易程度适中。适应现行学时较少(32~64学时)的教学大纲,对教材各章节内容进行精简和调整,强化某些重要概念的应用(如熵和吉布斯自由能的应用),删减某些陈旧内容和过细的计算(如酸碱电离理论的陈述,缓冲容量的计算等)。通过本课程的学习,使学生掌握与环境、材料、勘探、给水、农林、生物等领域相关的化学基本原理和技能。运用化学知识,分析解决一些与化学有关的实际问题,关注环境、能源和生命科学中社会热点论题,培养学生正确的科学观和社会观。② 章节编排上从学生的认知规律出发,内容由浅到深,贯穿统一。从最简单易懂的溶液和胶体入门,引入热力学、动力学化学反应基本原理,从宏观角度上讨论化学反应规律。之后将这些原理、规律应用于各类化学平衡之中加以深化,解决生产生活中的实际问题。然后利用物质结构理论从微观角度解释物质性质不同,其反应类型不同的本质原因。最后用以上这些理论解释单质及其重要化合物的性质和变化规律,重视材料、环境领域的一些社会热点问题。

- ③ 习题编排上增加题量和题型,包括选择、填空、判断、计算和解答题,并附有习题参考答案,帮助学生掌握课程知识点和提高学生对知识的综合运用能力。
- ④ 充分考虑高校现行招生形式下大多数学生的基础理论水平和接受能力,在满足教学基本要求前提下,适当扩展学生知识面,以满足不同专业、不同层次学生的需要,教材增加了一些化学在工农业生产生活中的应用、科普知识和学科发展前沿介绍等内容,便于学生课后阅读。
- ⑤ 为帮助学生掌握本课程重点、难点内容,便于课后复习,每章后面添加了本章小结。

本书由张明霞教授主编,并负责全书的策划、统稿和复核工作,王秀梅老师协助审稿。编者均为长期工作在无机化学教学与科研第一线的骨干教师。本书共分为12章,具体编写分工如下:张明霞(绪论、第1、6、8、10章),王秀梅(第2~5章、附录一至七),郭增彩(第7章),杜彩云(第9章、附录八、九),蔡冬梅(第12章),母静波(第11章)。在本教材的编写过程中得到了河北工程大学教务处、材料科学与工程学院领导、基础化学教研室老师们以及中国矿业大学出版社相关人员的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!由于编者水平有限,书中仍难免有疏漏和不妥之处,敬请同行专家和读者批评指正。

编 者

2018年6月

目 录

绪论	1
习题	8
第 1 章 溶液和胶体	10
1.1 分散系统	10
1.2 稀溶液的依数性	12
1.3 胶体	18
1.4 表面活性物质和乳浊液	25
本章小结	26
知识延伸 免疫胶体金技术	27
习题	28
第 2 章 化学热力学基础	31
2.1 热力学基本概念	31
2.2 反应热和反应焓变	33
2.3 化学反应方向	38
2.4 化学反应限度	43
本章小结	51
知识延伸 趣话火柴	52
习题	53
第 3 章 化学动力学初步	56
3.1 概述	56
3.2 反应速率理论	59
3.3 影响化学反应速率的因素	60
本章小结	66
知识延伸 最美味的反应——美拉德反应	67
习题	68

第4章 酸碱平衡	72
4.1 酸碱理论概述	72
4.2 弱电解质的解离平衡	75
4.3 缓冲溶液	81
本章小结	84
知识延伸 代谢性酸中毒	84
习题	86
第5章 难溶电解质的沉淀-溶解平衡	89
5.1 溶度积规则	89
5.2 沉淀的生成和溶解	91
5.3 分步沉淀和沉淀的转化	93
本章小结	95
知识延伸 “吃”矿石的微生物	96
习题	97
第6章 氧化还原平衡与电化学基础	100
6.1 氧化还原反应概述	100
6.2 原电池与电极电势	104
6.3 电极电势的应用	110
6.4 电解及其应用	115
6.5 金属腐蚀与防护	117
本章小结	120
知识延伸 化学电源	121
习题	124
第7章 原子结构和元素周期表	128
7.1 核外电子的运动状态	128
7.2 原子核外电子排布和元素周期表	135
7.3 元素性质的周期性	142
本章小结	148
知识延伸 元素周期表的发现和发展	149
习题	151
第8章 化学键与分子结构	153
8.1 离子键	153

8.2 共价键理论	155
8.3 分子间作用力和氢键	165
本章小结	169
知识延伸 超分子化学	170
习题	172
第 9 章 配位化合物	175
9.1 配合物的组成与命名	175
9.2 配位平衡	180
9.3 配合物的价键理论	186
本章小结	191
知识延伸 配位化学的应用和发展前景	192
习题	194
第 10 章 重要元素选述	197
10.1 单质的性质	197
10.2 无机化合物的化学性质	202
10.3 重要无机化合物选述	204
本章小结	215
知识延伸 生命元素和污染元素	216
习题	217
第 11 章 化学与材料	219
11.1 材料概述	219
11.2 金属材料	220
11.3 无机非金属材料	223
11.4 高分子材料	225
11.5 复合材料	229
11.6 纳米材料	233
本章小结	237
知识延伸 未来最有潜力的 20 种新材料	238
习题	240
第 12 章 化学与环境保护	241
12.1 大气污染及其控制	241
12.2 水污染及其控制	249

12.3 固体废物污染及其资源化	258
12.4 环境保护与可持续发展	261
本章小结	264
知识延伸 当心海洋中的“PM _{2.5} ”	265
习题	267
附录	270
附录一 相对分子质量	270
附录二 一些物质的标准摩尔生成焓、标准摩尔生成自由能和 标准摩尔熵(298.15 K)	273
附录三 一些水合离子的标准摩尔生成焓、标准摩尔生成自由能和 标准摩尔熵(298.15 K)	275
附录四 一些弱电解质的解离常数	276
附录五 一些共轭酸碱的解离常数	276
附录六 一些难溶电解质的溶度积常数	277
附录七 标准电极电势(298.15 K)	278
附录八 一些常见配离子的稳定常数(298.15 K)	280
附录九 常见配合物的累积稳定常数	283
参考文献	286
部分习题参考答案	287

绪 论

0.1 化学研究的对象、作用 and 无机化学的任务

化学是研究物质变化的一门科学。世界是由物质组成的,物质有两种基本形态——实物和场(如电磁场、引力场等)。化学研究的对象是实物而不是场,包括大至宏观的天体、小到微观的粒子,如分子、原子、离子和超分子等。研究它们的化学变化,其主要特征是在原子核不变的前提下生成了新物质。核裂变和核聚变不是在原子水平上的反应,所以不属于化学变化。可以说,化学是在原子、分子或离子水平上研究物质的组成、结构、性质、变化规律 and 变化过程中能量关系的科学。

从开始使用火的原始社会到使用各种人造物质的现代社会,人类都在享用化学成果,化学在为人类提供食物、开发能源、防治疾病、保护环境、增强国防 and 保障国家安全方面都起着重要作用。当今人类社会面临的能源、粮食、环境、人口、资源等五大全球性问题中,新能源的开发、肥料、农药、环境保护、资源的合理开采与利用、人们的衣食住行都离不开化学。

化学在“数、理、化、天、地、生”六门传统自然科学中是承上启下的中心科学,也是与信息、生命、材料、环境、能源、地球、空间和核科学等八大新兴科学紧密联系、交叉 and 渗透的一门中心科学。现代社会的三大支柱产业——能源、信息和材料都与化学的基础研究密切相关,如太阳能的高效开发需要有高效率的太阳能集光和转换装置作基础,高能蓄电池、燃料电池的应用也需要特殊的固体材料,信息的产生、转化、存储、调制、传输、传感、处理和显示都要有相应的固体物质作为材料和器件,而这些都是化学新材料的研究内容。20 世纪化学家合成了数以千万计的新物质,几乎又创造了一个新的自然界:在设计合成的同时,发现了大量的新反应、新化合物、新方法和新理论。化学在能源利用方面的一项重大突破是核能的释放以及有效利用。化学与农业科学的发展也密切相关。土壤改良、作物栽培、良种繁育、农业环保、野生资源开发与利用、农副产品的加工与利用、动物检疫等都需要用到化学的理论和知识。总之,化学是与国民经济各部门、人民生活各方面、尖端科学技术各领域都密切相关的基础学科。

21 世纪化学面临的挑战是:解决资源与能源危机,治理环境与生态污染,提高人类健康水平与生活质量(衣、食、住、行、医),拓展人类活动时空(空间技术),发展高科技(生命、物质、信息)。要解决这些问题,化学就必须由基础研究延伸到应用研究,深入认识物理 and 化

学变化,创造和建立新物质与新方法。具体来说,要对物质世界有更新的了解与认识,开展与其他学科科学家的紧密合作,研究从物质到物系的过控和整体行为。

无机化学是除碳氢化合物及其衍生物外,对所有元素及其化合物的性质和反应进行实验研究和理论解释的科学,是化学学科中发展最早的一个分支学科,也是化学科学中最基础的部分。无机化学作为高等院校非化学化工类专业开设的基础课程之一,主要介绍对后续其他化学课程和专业课程有普遍意义的基本化学理论和化学知识。其任务是在中学化学的基础上,掌握近代化学基本理论、基本知识和基本技能,培养学生的科学思维能力,提高学生分析和解决问题的能力,为今后学习和工作打下一定的化学基础。

0.2 无机化学课程的学习方法

无机化学课程内容较多,对于高校非化学化工类专业来说,无机化学教学学时相对不足,导致教学难度增大,采用适当的学习方法是克服学习困难、提高教学效果的关键。

(1) 通过学习、归纳和思考,找出知识的内在联系,弄清问题的来龙去脉,总结建立完整的知识体系。

(2) 无机化学实验是训练化学基本操作技能、培养严谨的科学态度的重要环节。通过实验,掌握一些基本操作技能,学会如何分析处理数据,培养发现、分析和解决问题的能力,提高理论联系实践的能力。

(3) 课后及时复习,独立完成作业,巩固课堂所学知识。

(4) 充分利用参考书和网络资源,提高自学能力,拓宽知识面,提高化学素养,培养终身学习的好习惯。

0.3 物质的量

我们平常所见到的物质,都不是单个原子或分子,而是它们的聚集体,气态、液态和固态是三种常见的物质存在状态。许多物质在不同的温度和压强下,呈现不同的聚集状态,如何对这些不同聚集状态的物质进行计量,需要引入新的物理量——物质的量。

1971年10月,41个国家参加的第14届国际计量大会(CGPM)决定,在国际单位制(SI)中增加第7个物理量——物质的量(amount of substance),用符号“ n ”表示,单位为摩尔(简称摩),符号用 mol 表示。物质的量表示系统中所含基本单元(可以是分子、原子、离子、电子及其他天然存在的粒子,也可以是这些微粒的特定组合或分割)的量,该系统所包含的基本单元数与 $0.012\text{ kg }^{12}\text{C}$ 的原子数目相等时,其物质的量为 1 mol。1 mol ^{12}C 所含的原子数,叫作阿伏伽德罗常数(Avogadro constant),用符号“ N_A ”表示,其数值为 6.02×10^{23} 。故 1 mol 任何物质,均含有 N_A 个基本单元。使用物质的量时,基本单元一定要注明,因为基本单元改变,其表示意义不同。如:

1 mol H_2 表示含有 N_A 个 H_2 ,其摩尔质量为 $2.016\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

$1 \text{ mol}(\frac{1}{2} \text{H}_2)$ 表示含有 N_A 个 H 原子, 其摩尔质量为 $1.008 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

$1 \text{ mol}(2\text{H}_2 + \text{O}_2)$ 表示含有 $2N_A$ 个 H_2 和 N_A 个 O_2 , 其摩尔质量为 $36.03 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 相当于 2 mol H_2 和 1 mol O_2 。

再如, 求 KMnO_4 物质的量时, 若分别用 KMnO_4 、 $\frac{1}{5}\text{KMnO}_4$ 和 5KMnO_4 作为基本单元, 则相同质量的 KMnO_4 , 其物质的量之间有如下关系:

$$n(\text{KMnO}_4) = \frac{1}{5} n(\frac{1}{5}\text{KMnO}_4) = 5n(5\text{KMnO}_4)$$

由此可见, 基本单元的选择是任意的, 它既可以是实际存在的粒子, 也可以根据需要而人为设定。

0.4 气体的计量

关于气体的计量, 可以用物质的量来表示, 但实际上常用更容易测量的气体体积或压力来表示。由于气体具有扩散性和可压缩性, 因而一定量的气体在不同压力下具有不同的体积, 温度改变, 气体压力和体积有可能发生变化。气体的存在状态主要取决于四个因素: 压力、体积、温度和物质的量, 而几乎与它们的化学组成无关。反映这四个物理量之间关系的式子叫作气体状态方程式。

0.4.1 理想气体状态方程

理想气体是一种假设的气体模型。它假设分子间完全没有作用力, 分子只是一个几何点, 没有体积。实际上所碰到的气体都是真实气体, 都可以被液化, 说明气体分子之间存在相互作用。实际气体只有在温度不太低、压力不太高时, 分子间距离大大增加, 气体所占的体积远远超过分子本身的体积, 分子间作用力和分子本身的体积可忽略, 此时实际气体的存在状态才接近于理想气体, 可以用理想气体定律(the ideal gas law)进行计算, 即高温、低压下 p, V, T 之间的关系方程:

$$pV = nRT \quad (0-1)$$

式中, p 为气体压力(压强, Pa 或 kPa 或 atm); V 是气体体积(m^3 、 dm^3 、L 或 cm^3); n 为气体物质的量(摩尔, mol); T 是热力学温度(K); R 为摩尔气体常数, 由于 p, V 采用单位不同, R 的数值和单位也不一样(见表 0-1)。

理想气体状态方程是从大量实验中总结出的经验公式, 它反映了气体分子的共性和特殊性。由于实际气体的分子本身必然占有体积, 分子之间也具有引力, 因此应用该方程进行计算时, 不可避免地存在偏差。对于常温常压下的气体, 特别是那些不易液化的 He 、 H_2 、 O_2 、 N_2 等气体, 其偏差很小可以忽略, 随着温度的降低和压力的增大, 偏差逐渐增大, 故高压和低温的气体以及与其液体和固体共存的气体不遵守理想气体状态方程。

表 0-1

R 的单位和数值

单位	$\text{L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{L} \cdot \text{mmHg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
数值	0.082 06	8.314	8.314	62.36

式(0-1)可改写为:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad \text{或} \quad p = \frac{\rho}{M}RT \quad (0-2)$$

式(0-2)主要用来计算气体及易挥发性物质的相对分子质量。在一定温度下,测得气体压力 p 、体积 V 及质量 m 或密度 ρ ,就可根据公式求出气体的相对分子质量。上述公式也可用来计算气体的质量、压力或温度。此方程在化学热力学、化学动力学和溶液的四大平衡中都有应用。

【例 0-1】 在 298.15 K 下,一个体积为 50 m^3 的氧气钢瓶,当它的压力降为 1 500 kPa 时,试计算钢瓶中剩余的氧气质量为多少?

解:由理想气体状态方程 $pV = nRT$

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{1\,500\text{ kPa} \times 50\text{ m}^3}{8.314\text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 298.15\text{ K}} = 30.26\text{ mol}$$

氧气的摩尔质量为 32.00 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$,所剩余的氧气质量为:

$$30.26\text{ mol} \times 32.00\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 968.32\text{ g}$$

【例 0-2】 一汽车轮胎在 22 $^{\circ}\text{C}$ 时测得表压为 160 kPa。表压为轮胎内气体总压与大气压之差,大气压约为 101 kPa。若汽车在高速公路上行驶 2 h 后,轮胎容积不变,表压升至 205 kPa,问轮胎内空气的温度约为多少?

解:轮胎内气体物质的量不变,设为 $n\text{ mol}$,轮胎容积不变,设为 $V\text{ L}$ 。

根据理想气体,状态 1: $p_1V = nRT_1$, 状态 2: $p_2V = nRT_2$, 两式相除得

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

所以

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{(205+101)\text{ kPa}}{(160+101)\text{ kPa}} \times (273+22)\text{ K} = 346\text{ K}$$

0.4.2 道尔顿分压定律

在科学研究和生产实践中所遇到的气体往往是由几种气体组成的气体混合物。空气就是一种混合气体,它由 N_2 、 O_2 、少量 CO_2 、水蒸气 and 惰性气体组成。如果混合气体中各组分气体之间不发生反应,则在温度不太低、压力不太高情况下可看成理想气体混合物,仍符合理想气体方程。

由于气体具有扩散性,在混合气体中各组分气体总是均匀地充满整个容器,对容器内壁产生压力,并且互不干扰,如同它单独存在于容器中一样。各组分气体占有与混合气体相同体积时所产生的压力称作分压力(简称分压, partial pressures)。1801 年,英国科学家 Dalton(道尔顿)总结大量实验结果提出:两种或两种以上不会发生化学反应的气体混合,混

合气体的总压力等于各组分气体的分压力之和。该理论被称为道尔顿分压定律(Dalton's law of partial pressures)。

如:A、B、C 为三个体积相同的容器,在室温下,A 容器中注入 0.5 mol N_2 ,压力为 240 kPa;B 容器中注入 1.25 mol O_2 ,压力为 600 kPa;C 容器中注入 0.5 mol N_2 +1.25 mol O_2 ,压力为 840 kPa。由此,C 容器中混合气体的总压 $p=p(N_2)+p(O_2)$ 。

推广到任一混合气体则:

$$p_{\text{总}} = \sum p_i \quad (0-3)$$

其中 $p_{\text{总}}$ 为混合气体总压, p_i 为组分分压。上式为道尔顿分压定律的数学表达式。

根据状态方程

$$p_{\text{总}}V = n_{\text{总}}RT; \quad p_iV = n_iRT$$

两式相除得

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

其中 $n_{\text{总}}$ 表示混合气体中各组分气体物质的量之和, n_i 表示气体混合物中 i 气体物质的量,将 $n_i/n_{\text{总}}$ 称为摩尔分数,用 x_i 表示, $\sum x_i = 1$ 。

所以混合气体中各组分气体的分压和该气体的摩尔分数成正比。

$$p_i = p_{\text{总}}x_i \quad (0-4)$$

此式为道尔顿分压定律的另一种表达形式。分压定律在化学平衡和反应速率计算中多有应用, $p_{\text{总}}$ 可通过压力表测出, p_i 则很难被直接测出,可通过分压定律分析、计算求出。

【例 0-3】 已知在 250 °C 时 PCl_5 能全部汽化,并部分离解为 PCl_3 和 Cl_2 。现将 2.98 g PCl_5 置于 1.00 L 容器中,在 250 °C 时全部汽化后,测定其总压力为 113.4 kPa。求:其中有哪几种气体? 它们的分压各是多少?

解:设 PCl_5 反应了 x mol,反应开始时 PCl_5 物质的量为 $2.98/208.22=0.0143$ mol



反应开始时各物质的量/mol 0.0143 0 0

平衡时各物质的量/mol $0.0143-x$ x x

平衡时混合气体总物质的量

$$n_{\text{总}} = \frac{p_{\text{总}}V}{RT} = \frac{113.4 \text{ kPa} \times 1.00 \text{ L}}{8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273.15 + 250) \text{ K}} = 0.0261 \text{ mol}$$

$$n_{\text{总}} = 0.0143 - x + x + x = 0.0261 \text{ mol}, \text{ 所以 } x = 0.0118 \text{ mol}$$

则 $n(PCl_5) = 0.0143 - 0.0118 = 0.0025 \text{ mol}$, $n(PCl_3) = n(Cl_2) = 0.0118 \text{ mol}$

根据分压定律

$$p(PCl_5) = (0.0025 \text{ mol} / 0.0261 \text{ mol}) \times 113.4 \text{ kPa} = 10.9 \text{ kPa}$$

$$p(PCl_3) = p(Cl_2) = (0.0118 \text{ mol} / 0.0261 \text{ mol}) \times 113.4 \text{ kPa} = 51.27 \text{ kPa}$$

工业上常用各组分气体的体积分数表示混合气体的组成。由于同温同压下,气态物质的量与它的体积成正比,不难导出混合气体中组分气体 B 的体积分数等于物质 B 的摩尔分数:

$$V_i/V_{\text{总}} = n_i/n_{\text{总}}$$

式中, V_i 、 V 分别表示组分气体 i 和混合气体的体积。所以分压定律还可以写成

$$p_i = (V_i/V_{\text{总}}) \cdot p_{\text{总}} \quad (0-5)$$

【例 0-4】 有一煤气罐其容积为 30.0 L, 27 °C 时内压为 600 kPa。经气体分析, 储罐内煤气中 CO 的体积分数为 0.600, H_2 的体积分数为 0.100, 其余气体的体积分数为 0.300, 求该储罐中 CO、 H_2 的质量和分压。

解: 已知 $V=30.0 \text{ L}$ $p=600 \text{ kPa}$ $T=(273+27)\text{K}=300 \text{ K}$

$$n_{\text{总}} = \frac{p_{\text{总}} V}{RT} = \frac{600 \text{ kPa} \times 30.0 \text{ L}}{8.314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{ K}} = 7.21 \text{ mol}$$

$$n(\text{CO}) = 7.21 \text{ mol} \times 0.600 = 4.33 \text{ mol}$$

$$n(\text{H}_2) = 7.21 \text{ mol} \times 0.100 = 0.721 \text{ mol}$$

$$m(\text{CO}) = n(\text{CO}) \times M(\text{CO}) = 121 \text{ g}$$

$$m(\text{H}_2) = n(\text{H}_2) \times M(\text{H}_2) = 1.44 \text{ g}$$

再根据

$$p_i = (V_i/V_{\text{总}}) p_{\text{总}}$$

$$p(\text{CO}) = 0.600 \times 600 \text{ kPa} = 360 \text{ kPa}, p(\text{H}_2) = 0.100 \times 600 \text{ kPa} = 60 \text{ kPa}$$

分压定律适用于理想气体混合物, 对低压下的真实气体混合物近似适用。

0.5 溶液浓度的表示方法

溶液的浓度是指一定量溶液或溶剂中所含溶质的量。由于“溶质的量”可取物质的量、质量、体积, 溶液或溶剂的量可取质量、体积等, 所以在科学研究和工农业生产中我们所遇到的浓度表示方法是多种多样的。下面重点介绍几种常用的浓度表示方法。

0.5.1 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, 以符号 c_B 表示。

$$c_B = \frac{n_B}{V} \quad (0-6)$$

式中, n_B 表示溶液中溶质 B 的物质的量, V 表示溶液的体积, B 是溶质的基本单元。 c_B 的 SI 单位为摩尔每立方米 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), 常用摩尔每升 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 或 ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$) 表示。

【例 0-5】 用分析天平称取 1.234 6 g $K_2Cr_2O_7$ 基准物质, 溶解后转移至 100.0 mL 容量瓶中定容, 试计算 $c(K_2Cr_2O_7)$ 和 $c(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7)$ 。

解: 已知 $m(K_2Cr_2O_7) = 1.234 6 \text{ g}$ $M(K_2Cr_2O_7) = 294.18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$M(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7) = \frac{1}{6} \times 294.18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 49.03 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\begin{aligned} c(K_2Cr_2O_7) &= \frac{m(K_2Cr_2O_7)}{M(K_2Cr_2O_7) \cdot V} = \frac{1.234 6 \text{ g}}{294.18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 100.0 \text{ mL} \times 10^{-3}} \\ &= 0.041 97 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

$$c\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right) = \frac{m(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)}{M\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right) \cdot V} = \frac{1.2346\text{ g}}{49.03\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 100.0\text{ mL} \times 10^{-3}} \\ = 0.2518\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

由此可见,

$$c\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right) = 6c(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) \quad n\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right) = 6n(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)$$

0.5.2 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,用符号 b_B 表示,单位为 $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$,表达式为:

$$b_B = \frac{n_B}{m_A} \quad (0-7)$$

式中, n_B 表示溶质 B 的物质的量, m_A 为溶剂的质量。

【例 0-6】 取 49 g H_2SO_4 溶于 1 000 g 水中,求此溶液的质量摩尔浓度。

解:查表得 $M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$b(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{n(\text{H}_2\text{SO}_4)}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{m(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot m(\text{H}_2\text{O})} \\ = \frac{49\text{ g}}{98\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \times 1\text{ kg}} = 0.5\text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

质量摩尔浓度与体积无关,故不受温度变化的影响,常用于稀溶液依数性的研究和一些精密测定中。对于较稀的水溶液来说,质量摩尔浓度近似地等于其物质的量浓度。

0.5.3 摩尔分数

混合物中物质 B 的物质的量 n_B 与混合物总物质的量 $n_{\text{总}}$ 之比,称为该物质 B 的摩尔分数,符号为 x_B ,其量纲为 1,表达式为:

$$x_B = \frac{n_B}{n_{\text{总}}} \quad (0-8)$$

对于双组分系统的溶液来说,若溶质的物质的量为 n_B ,溶剂的物质的量为 n_A ,则其摩尔分数分别为:

$$x_B = \frac{n_B}{n_B + n_A} \quad x_A = \frac{n_A}{n_B + n_A}$$

显然, $x_A + x_B = 1$; 对于多组分系统来说,则有 $\sum x_i = 1$ 。

0.5.4 质量分数

混合物中溶质 B 的质量(m_B)与混合物总质量($m_{\text{总}}$)之比,称为物质 B 的质量分数,用符号 ω_B 表示,其量纲为 1,表达式为:

$$\omega_B = \frac{m_B}{m_{\text{总}}} \quad (0-9)$$

对于多组分系统来说,则有 $\sum \omega_i = 1$ 。

单位体积溶液中所含溶质 B 的质量,用符号 ρ 表示,单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 等,计算公式为:

实际工作中经常遇到一些极稀的溶液,如植物生长调节剂、环境中有害成分的含量等,常用 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 等表示。可看成是每克(或千克)溶液(或固体)中含溶质的质量为多少毫克、微克、纳克、皮克或微克。因为是稀溶液,其密度看成 $1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$,相应浓度可以用 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $\text{pg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示。

【例 0-7】 质量分数为 35.0% HClO_4 水溶液密度为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 已知 HClO_4 的摩尔质量为 $100.4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 求其物质的量浓度 $c(\text{HClO}_4)$ 。

$$c_B = \frac{n_B}{V} = \frac{m_B}{M_B V} = \frac{1\,000 \rho V \omega_B}{M_B V} = \frac{1\,000 \rho \omega_B}{M_B}$$
$$c_B = \frac{1\,000 \times 1.25 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} \times 0.350}{100.4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 4.36 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

1. pH=1.0 的硫酸溶液的物质的量浓度 $c(1/2\text{H}_2\text{SO}_4)$ 是()。

- A. $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ B. $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
C. $0.09 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ D. $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

2. 两个容积和质量完全相等的容器,各盛满理想气体 A 和 B,气体 A 的质量是气体 B 的两倍,气体 A 的摩尔质量是气体 B 的一半。若温度相同,则气体 A 和 B 的压力比 p_A/p_B 为()。

- A. 4 B. 1 C. $1/2$ D. $1/4$

3. 298 K下体积为 25 dm^3 的容器中盛有 22 g CO_2 和 8.0 g O_2 , 则混合气体总压为() kPa。

- A. 74.3 B. 32.0 C. 28.8 D. 66.2

4. 室温下某混合气体中含有 10.0 mol CO 和 12.5 mol O_2 , 加热该混合气体使其反应