

无机化学

史文权 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

无机化学

主 编 史文权
副主编 周萃文



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无机化学/史文权主编. —武汉:武汉大学出版社,2011.3
ISBN 978-7-307-08542-8

I. 无… II. 史… III. 无机化学 IV. O61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 025259 号

责任编辑:谢文涛 责任校对:刘 欣 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)
(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:486千字 插页:1 插表:1

版次:2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷

ISBN 978-7-307-08542-8/O·445 定价:36.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

无机化学是高职高专石油化工类专业的第一门重要的专业基础课,也是环境保护、材料科学、冶金地质、轻纺食品和生物医药类专业的第一门化学基础课。本课程对于高职高专院校全面实施素质教育,培养应用型高技能专门人才具有重要作用。

根据教育部“十二五”规划确定的高等职业教育要以培养生产、建设、管理、服务第一线的高素质技能型专门人才为根本任务。各院校在专业设置上必须紧密结合地方经济和社会发展的需要,根据市场对各类人才的需求和学校的办学条件,有针对性地调整和设置专业。本书结合近几年开展的国家示范性院校建设项目对石化类专业人才培养方案改革的要求,从培养技术应用型、技能型和服务型人才的需要出发,积极适应了高职高专专业教学改革的不断深入,对课程体系和教学内容进行了适当调整,在突出职业技术特点的同时,注重实践技能的培养,并加强了针对性和实用性。本书内容思路清晰,编排上重视基本概念和基本原理的叙述,并与具体实际案例紧密结合,帮助学生加深对基本知识的理解和掌握。目前许多高职院校大幅度削减无机化学课程学时,但市面上多数无机化学教材篇幅较大,难以适合少学时无机化学课程的教学需要。鉴于这种情况,我们依据知识理论“必须、够用”的原则,编写了这本适用于少学时的《无机化学》。本教材有下列特点:

(1)突出基本知识、基本理论、基本技能以应用为目的的思想。

(2)本教材篇幅大大压缩,删减了部分偏深、不常用、应用性差的内容。

(3)本教材通过阅读材料增加了有关绿色化学的一些新知识和前沿科技成果,使化学与社会、生活和生产紧密联系。旨在开阔视野、增长知识、激发学生学习的兴趣。

本书第1、2、3、5、6、7章由史文权(兰州石化职业技术学院)编写,第4、8、9、10章由周萃文(兰州石化职业技术学院)编写,部分附录内容由孙国禄(甘肃工业职业技术学院)编写。全书由史文权统稿,张国福教授(兰州城市学院)主审。

本书的编写与出版得到了武汉大学出版社的支持和同行的帮助,在此谨向他们表示感谢。

高职教育发展速度很快,教学改革也在不断深化,我们在教材编写方面做了一些尝试,限于编者的水平,错误和不妥之处在所难免,恳请专家及使用本书的师生提出宝贵意见。

编 者

2011年1月

目 录

第1章 物质及其变化	1
1.1 物质的聚集状态	1
1.1.1 气体	1
1.1.2 液体	5
1.1.3 固体	7
1.2 化学反应中的质量关系和能量关系	9
1.2.1 质量守恒定律	9
1.2.2 反应热效应 焓变	9
1.2.3 热化学方程式	10
1.2.4 热化学定律	11
1.2.5 标准摩尔生成热(生成焓)	12
1.3 溶液	14
1.3.1 溶液浓度表示法	14
1.3.2 溶液配制原则	15
1.3.3 溶液浓度换算	15
【阅读材料1】环境保护与绿色化学	16
思考题	17
习 题	18
第2章 化学反应速率和化学平衡	21
2.1 化学反应速率	21
2.2 影响反应速率的因素	23
2.2.1 浓度对反应速率的影响 经验速率方程	23
2.2.2 温度对反应速率的影响	24
2.2.3 催化剂与反应速率	25
2.2.4 影响反应速率的其他因素	26
2.3 活化能	26
2.3.1 碰撞理论 活化能	26
2.3.2 过渡状态理论	29
2.4 化学平衡	30
2.4.1 化学反应的可逆性与化学平衡	31

2.4.2	标准平衡常数	32
2.4.3	多重平衡的平衡常数	35
2.4.4	平衡常数与平衡转化率	35
2.5	化学平衡的移动	37
2.5.1	浓度对化学平衡的影响	38
2.5.2	压力对化学平衡的影响	39
2.5.3	温度对化学平衡的影响	41
2.5.4	催化剂与化学平衡	41
2.5.5	平衡移动原理——吕·查德里原理	41
2.6	反应速率与化学平衡的综合应用	42
	【阅读材料2】催化剂在石油化工生产中的应用	43
	思考题	44
	习题	46
第3章	电解质溶液和离子平衡	50
3.1	强电解质溶液	50
3.2	水的离解和溶液的 pH	51
3.2.1	水的离解平衡与水的离子积	51
3.2.2	溶液的酸碱性和 pH	52
3.2.3	酸碱指示剂	53
3.3	弱酸、弱碱的离解平衡	54
3.3.1	一元弱酸、弱碱的离解平衡	54
3.3.2	多元弱酸的离解平衡	57
3.4	同离子效应和缓冲溶液	58
3.4.1	酸碱平衡移动——同离子效应	58
3.4.2	缓冲溶液	59
3.5	盐类的水解	63
3.5.1	盐的水解 水解常数 水解度	64
3.5.2	盐溶液 pH 的简单计算	66
3.5.3	影响水解平衡的因素	68
3.5.4	盐类水解平衡的移动及其应用	68
3.6	酸碱质子理论	68
3.6.1	酸碱定义	69
3.6.2	酸碱共轭关系	69
3.6.3	酸碱的强弱	69
3.6.4	酸碱反应	70
	【阅读材料3】盐类水解的应用规律	70
	思考题	71

习 题	73
第4章 沉淀反应	76
4.1 沉淀溶解平衡	76
4.1.1 溶度积	76
4.1.2 溶解度与溶度积的相互换算	77
4.2 溶度积规则及其应用	79
4.2.1 溶度积规则	79
4.2.2 溶度积规则的应用	80
4.2.3 分步沉淀	84
4.2.4 沉淀的溶解	85
【阅读材料4】水污染和水体富营养化	87
思考题	89
习 题	90
第5章 氧化和还原	92
5.1 氧化还原反应的基本概念	92
5.1.1 氧化值	92
5.1.2 氧化还原电对	93
5.1.3 常见的氧化剂和还原剂	94
5.1.4 氧化还原反应方程式的配平	95
5.2 氧化还原反应与原电池	98
5.2.1 原电池的组成	98
5.2.2 原电池的电动势	100
5.3 电极电势	100
5.3.1 标准电极电势及其测定	100
5.3.2 影响电极电势的因素	102
5.4 电极电势的应用	105
5.4.1 氧化剂和还原剂的相对强弱	106
5.4.2 氧化还原反应进行的方向	106
5.4.3 氧化还原反应进行的程度	107
5.4.4 元素电势图及其应用	108
【阅读材料5】关于废旧电池	110
思考题	111
习 题	114
第6章 原子结构	119
6.1 核外电子的运动状态	119

6.1.1 氢原子结构	119
6.1.2 电子的波粒二象性	120
6.1.3 核外电子运动的近代描述	120
6.1.4 四个量子数	122
6.2 原子中电子的排布	125
6.2.1 多电子原子的能级	125
6.2.2 核外电子排布规则	127
6.3 原子结构和元素周期表	132
6.3.1 周期与能级组	132
6.3.2 族与电子构型	134
6.3.3 分区与价层电子构型	134
6.4 元素某些性质的周期性变化规律	135
6.4.1 有效核电荷(Z^*)	135
6.4.2 原子半径(r)	136
6.4.3 电离能(I)	138
6.4.4 电子亲和能(Y)	138
6.4.5 电负性(X)	139
6.4.6 元素的氧化值	140
【阅读材料6】化学元素周期律的发现	141
思考题	142
习 题	143
第7章 化学键与分子结构	147
7.1 共价键理论	147
7.1.1 价键理论	147
7.1.2 共价键的特征	148
7.1.3 共价键的类型	149
7.1.4 键参数	151
7.2 杂化轨道理论与分子几何构型	153
7.2.1 杂化理论概要	154
7.2.2 杂化轨道类型	154
7.2.3 离域 π 键	157
7.3 分子间力	157
7.3.1 分子的极性	158
7.3.2 分子间力	161
7.3.3 氢键	163
7.4 离子键与离子晶体	164
7.4.1 离子键的形成	164

7.4.2 离子的结构特征	165
7.4.3 离子极化	166
7.5 其他类型晶体	170
7.5.1 分子晶体	171
7.5.2 离子晶体	171
7.5.3 原子晶体	173
7.5.4 金属晶体	173
7.5.5 混合型晶体	174
【阅读材料7】氢键的形成对物质性质的影响	175
思考题	175
习 题	178
第8章 配位化合物	181
8.1 配位化合物的基本概念	181
8.1.1 配位化合物的组成	181
8.1.2 配位化合物的命名	183
8.2 配位化合物的结构	184
8.2.1 配位物中的化学键	184
8.2.2 杂化轨道与配合物的空间构型	185
8.2.3 内轨配合物与外轨配合物	187
8.3 配位平衡	188
8.3.1 配位平衡及平衡常数	188
8.3.2 配位平衡的移动	191
8.4 螯合物	194
8.4.1 螯合物的概念	194
8.4.2 螯合物的特性	194
8.4.3 配合物形成体在周期表中的分布	195
8.5 配位化合物的应用	196
8.5.1 在分析化学方面的应用	196
8.5.2 在生物化学方面的应用	196
8.5.3 在无机化学方面的应用	196
【阅读材料8】茶叶中的化学成分	197
思考题	198
习 题	200
第9章 主族元素选述	203
9.1 s 区元素	203
9.1.1 氢	203

9.1.2 碱金属和碱土金属	205
9.2 p 区元素	214
9.2.1 卤素	215
9.2.2 氧和硫	223
9.2.3 氮、磷、砷	234
9.2.4 碳、硅、硼	244
9.2.5 P 区主要金属元素	250
【阅读材料 9】土壤污染	261
思考题	262
习 题	266
 第 10 章 副族元素选述	270
10.1 d 区、ds 区元素通性	270
10.2 d 区元素	272
10.2.1 铬及其化合物	272
10.2.2 锰及其化合物	276
10.2.3 铁系元素	280
10.3 ds 区元素	284
10.3.1 铜副族元素	284
10.3.2 锌副族元素	289
【阅读材料 10】化学在可持续发展中的作用与地位	293
思考题	295
习 题	297
 附 表	300
 参考文献	321

第1章 物质及其变化

【学习目标】

- (1)掌握理想气体状态方程、气体分压定律，理解理想气体与实际气体的区别；
- (2)掌握液体的蒸气压、液体沸点的含义及应用；
- (3)熟悉赫斯定律和标准生成焓；
- (4)会利用理想气体状态方程、气体分压定律进行有关计算；
- (5)会正确计算化学反应的反应热；
- (6)掌握溶液浓度的基本表示法。

1.1 物质的聚集状态

在常温、常压下，通常物质有气态、液态和固态三种存在形式，物质总是以一定的聚集状态存在并具有各自的特征。在一定条件下同一物质的这三种状态可以相互转变。例如固体通过加热熔化成液体，液体进一步加热可变成气体。

1.1.1 气体

气体的最基本特征是具有扩散性和可压缩性。物质处在气体状态时，分子彼此相距甚远，分子间的引力非常小，各个分子都在无规则地快速运动，所以能自动扩散而均匀地充满整个容器。通常气体的存在状态几乎和它们的化学组成无关，致使气体具有许多共同性质，这为研究其存在状态带来了方便。气体的存在状态主要决定于四个因素，即体积、压力、温度和物质的量。反映这四个物理量之间关系的方程式为气体状态方程式。

1. 理想气体状态方程式

理想气体是一种假设的气体模型，是一个科学的抽象概念，客观上并不存在理想气体，它只能看做是实际气体在压力很低时的一种极限情况。它要求气体分子之间完全没有作用力，气体分子本身也只是一个几何点，只具有位置而不占有体积。实际使用的气体都是真实气体。只有在压力不太高温度不太低的情况下，分子间的距离甚大，气体所占的体积远远超过分子本身的体积，分子间的作用力和分子本身的体积均可忽略时，存在状态才接近于理想气体，实际气体的压力、体积、温度以及物质的量之间的关系可近似地用理想气体状态方程来描述，用理想气体的定律进行计算，才不会引起显著的误差。

理想气体状态方程式的表达式为

$$pV=nRT$$

式中： p ——气体压力，SI单位为Pa(帕)；

V ——气体体积, SI 单位为 m^3 (立方米);

n ——气体物质的量, SI 单位为 mol (摩);

T ——气体的热力学温度, SI 单位为 K (开);

R ——摩尔气体常数, 又称气体常数。实验证明其值与气体种类无关。

气体常数可由实验测定。如测得 1.000mol 气体在 273.15K 、 101.325kPa 的条件下所占的体积为 $22.414 \times 10^{-3}\text{m}^3$, 代入上式则得

$$\begin{aligned} R &= \frac{pV}{nT} = \frac{101.325 \times 10^3 \text{ Pa} \times 22.414 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1.000 \text{ mol} \times 273.15 \text{ K}} \\ &= 8.314 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} (\text{或 } 8.314 \text{ 牛} \cdot \text{米} \cdot \text{摩}^{-1} \cdot \text{开}^{-1}) \\ &= 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} (\text{或 } 8.314 \text{ 焦} \cdot \text{摩}^{-1} \cdot \text{开}^{-1}) \end{aligned}$$

【例 1】 一氧气贮罐体积为 0.024m^3 , 温度为 25°C , 压力为 $1.5 \times 10^6 \text{ Pa}$, 问罐中贮有氧气的质量为多少?

解: 因 $n = \frac{pV}{RT}$, 又 $n = \frac{m(\text{O}_2)}{M(\text{O}_2)}$ [$m(\text{O}_2)$ 为 O_2 的质量, $M(\text{O}_2)$ 为 O_2 的摩尔质量], 所以

$$m(\text{O}_2) = \frac{M(\text{O}_2)pV}{RT} = \frac{0.032 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \times 1.5 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0.024 \text{ m}^3}{8.314 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+25) \text{ K}} = 0.46 \text{ kg}$$

2. 气体分压定律

在科学实验和工业生产中, 实际遇到的气体大多数是由几种气体组成的气体混合物。空气就是一种混合气体, 它含有 O_2 、 N_2 、少量 CO_2 和数种稀有气体。如果混合气体的各组分之间不发生化学反应, 则在高温低压下, 可将其看做理想气体混合物, 混合后的气体作为一个整体, 仍符合理想气体定律。

气体具有扩散性。在混合气体中, 每一种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, 不受其他组分气体的影响, 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叫做分压力(p_i)。1801 年英国科学家道尔顿(Dalton)从大量实验中归纳出组分气体的分压与混合气体总压之间的关系: 混合气体总压等于分压之和。这一关系称为道尔顿分压定律。分压定律有如下两种表示形式:

第一种表示形式: 混合气体中各组分气体的分压之和等于该混合气体的总压力。

例如, 混合气体由 A, B, C 三种气体组成, 则分压定律可表示为

$$p = p(\text{A}) + p(\text{B}) + p(\text{C})$$

式中, p 为混合气体总压; $p(\text{A})$, $p(\text{B})$, $p(\text{C})$ 分别为 A, B, C 三种气体的分压。

图 1-1 是分压定律的示意图((a), (b), (c), (d)为体积相同的四个容器)。

图中(a), (b), (c)中的砝码表示 A, B, C 三种气体单独存在时所产生的压力。(d)表示 A, B, C 混合气体所产生的总压。

理想气体定律同样适用于气体混合物。如混合气体中各气体物质的量之和为 $n_{\text{总}}$, 温度 T 时混合气体总压为 $p_{\text{总}}$, 体积为 V , 则

$$p_{\text{总}} V = n_{\text{总}} RT$$

如以 n_i 表示混合气体中气体 i 的物质的量, P_i 表示分压, V 为混合气体体积, 温度为 T ,

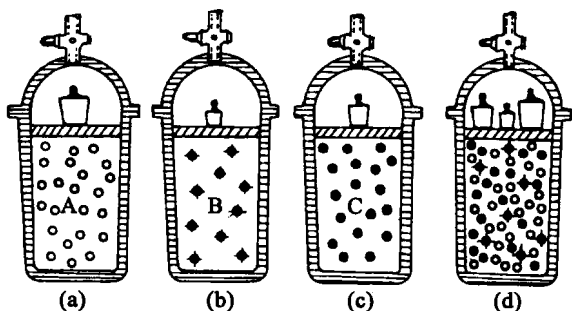


图 1-1 分压定律的示意图

则

$$p_i V = n_i RT$$

将此式除以上式，得

$$\text{压力分数} \text{——} p_i/p_{\text{总}} = n_i/n_{\text{总}} \text{——} \text{摩尔分数}$$

或

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

第二种表示形式：混合气体中组分气体 i 的分压 p_i 与混合气体总压之比（即压力分数）等于混合气体中组分气体 i 的摩尔分数；或混合气体中组分气体的分压等于总压乘以组分气体的摩尔分数。

【例 2】在 0.010m^3 容器中含有 $2.5 \times 10^{-3}\text{mol H}_2$ ， $1.00 \times 10^{-3}\text{mol He}$ 和 $3.00 \times 10^{-3}\text{mol Ne}$ ，则在 35°C 时总压为多少？

$$\begin{aligned} \text{解：} p(\text{H}_2) &= \frac{n(\text{H}_2)RT}{V} \\ &= \frac{2.50 \times 10^{-3} \text{mol} \times 8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{K}}{0.0100 \text{m}^3} = 640 \text{Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(\text{He}) &= \frac{n(\text{He})RT}{V} \\ &= \frac{1.00 \times 10^{-3} \text{mol} \times 8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{K}}{0.0100 \text{m}^3} = 256 \text{Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p(\text{Ne}) &= \frac{n(\text{Ne})RT}{V} \\ &= \frac{3.00 \times 10^{-4} \text{mol} \times 8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{K}}{0.0100 \text{m}^3} = 76.8 \text{Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{\text{总}} &= p(\text{H}_2) + p(\text{He}) + p(\text{Ne}) \\ &= (640 + 256 + 76.8) \text{Pa} \\ &= 973 \text{Pa} \end{aligned}$$

【例 3】用锌与盐酸反应制备氢气： $\text{Zn}(\text{s}) + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2(\text{g})$ ，如果在 25°C 时用排水法收集氢气，总压为 98.6kPa （已知 25°C 时水的饱和蒸气压为 3.17kPa ），体积为 $2.50 \times 10^{-3}\text{m}^3$ 。求：

(1) 试样中氢的分压是多少?

(2) 收集到的氢的质量是多少?

解: (1) 用排水法在水面上收集到的气体为被水蒸气饱和了的氢气, 试样中水蒸气的分压为 3.17 kPa, 根据分压定律:

$$p_{\text{总}} = p(\text{H}_2) + p(\text{H}_2\text{O})$$

$$p(\text{H}_2) = p_{\text{总}} - p(\text{H}_2\text{O}) = (98.6 - 3.17) \text{ kPa} = 95.4 \text{ kPa}$$

$$(2) \quad p(\text{H}_2)V = n(\text{H}_2)RT = \frac{m(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2)}RT$$

$$m(\text{H}_2) = \frac{p(\text{H}_2)VM(\text{H}_2)}{RT} = \frac{95.4 \times 10^3 \text{ Pa} \times 0.00250 \text{ m}^3 \times 2.02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 298 \text{ K}} = 0.194 \text{ g}$$

在工农业生产和实验室的实际应用中, 经常用体积分数来表示混合气体的组成。因为在同温、同压下, 气体的物质的量与它的体积成正比。在实际工作中, 进行混合气体组分分析时, 常采用量取组分气体体积的方法。

当组分气体的温度和压力与混合气体相同时, 组分气体单独存在时所占有的体积称为分体积, 混合气体的总体积等于各组分气体的分体积之和:

$$V_{\text{总}} = V_A + V_B + V_C + \cdots$$

图 1-2 中(a), (b), (c)分别表示 A, B, C 三种组分气体的分体积, (d)为混合气体的总体积。

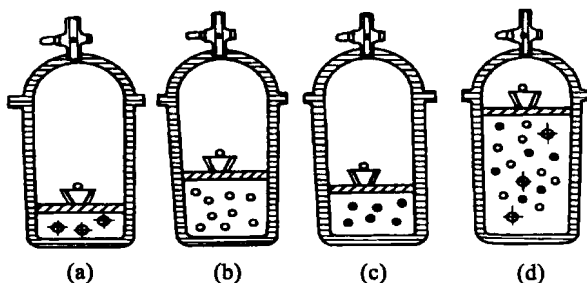


图 1-2 分体积示意图

例如, 在某一温度和压力下, CO 和 CO₂ 混合气体的体积为 100 mL。将混合气体通过 NaOH 溶液, 其中 CO₂ 被吸收, 量得剩余的 CO 在同温同压下的体积为 40 mL, 则 CO₂ 的分体积为 (100 - 40) mL = 60 mL。定义混合气体中组分气体 i 的体积分数为

$$\text{体积分数}(\varphi) = \frac{\text{组分气体 } i \text{ 的分体积}(V_i)}{\text{混合气体的总体积}(V)}$$

上述混合气体中 CO 的体积分数为 $\frac{40}{100} = 0.40$, CO₂ 的体积分数为 $\frac{60}{100} = 0.60$ 。

将分体积概念代入理想气体方程式得

$$p_{\text{总}} V_i = n_i RT$$

式中, $p_{\text{总}}$ 为混合气体总压力; V_i 为组分气体 i 的分体积; n_i 为其物质的量。用 $p_{\text{总}} V = n_{\text{总}} RT$ 除以上式, 则得

$$\text{体积分数——} V_i/V_{\text{总}} = n_i/n_{\text{总}}$$

与上式联系得

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

或

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

说明混合气体中某一组分的体积分数等于其摩尔分数, 组分气体分压等于总压乘以该组分气体的体积分数。

混合气体的压力分数、体积分数与其摩尔分数均相等。

【例4】在 27℃, 101.3kPa 下, 取 1.00L 混合气体进行分析, 各气体的体积分数: CO 为 60.0%, H_2 为 10.0%, 其他气体为 30.0%。求混合气体中: (1) CO 和 H_2 的分压; (2) CO 和 H_2 的物质的量。

解: 根据 $p_i = p_{\text{总}} \times V_i/V_{\text{总}}$

$$(1) p(\text{CO}) = p_{\text{总}} \times \frac{V(\text{CO})}{V_{\text{总}}} = 101.3\text{kPa} \times 0.600 = 60.8\text{kPa}$$

$$p(\text{H}_2) = p_{\text{总}} \times \frac{V(\text{H}_2)}{V_{\text{总}}} = 101.3\text{kPa} \times 0.100 = 10.1\text{kPa}$$

$$(2) n(\text{H}_2) = \frac{p(\text{H}_2) V_{\text{总}}}{RT} = \frac{10.1 \times 10^3 \text{Pa} \times 1.00 \times 10^{-3} \text{m}^3}{8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{K}} \\ = 4.00 \times 10^{-3} \text{mol}$$

$$n(\text{CO}) = \frac{p(\text{CO}) V_{\text{总}}}{RT} = \frac{60.8 \times 10^3 \text{Pa} \times 1.00 \times 10^{-3} \text{m}^3}{8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{K}} \\ = 2.40 \times 10^{-2} \text{mol}$$

$$n(\text{H}_2) = \frac{p_{\text{总}} V(\text{H}_2)}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \text{Pa} \times 0.100 \times 10^{-3} \text{m}^3}{8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{K}} \\ = 4.00 \times 10^{-3} \text{mol}$$

$$n(\text{CO}) = \frac{p_{\text{总}} V(\text{CO})}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \text{Pa} \times 0.600 \times 10^{-3} \text{m}^3}{8.314 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 300 \text{K}} \\ = 2.40 \times 10^{-2} \text{mol}$$

1.1.2 液体

液体的物理性质介于气体和固体之间。液体内部分子之间的距离比气体小得多, 分子之间的作用力较强。液体具有流动性, 有一定的体积而无一定形状。与气体相比, 液体的可压缩性小得多。

1. 液体的蒸气压

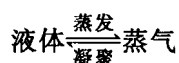
在液体中分子运动的速度及分子具有的能量各不相同, 速度有快有慢, 大多处于中间状态。液体表面某些运动速度较大的分子所具有的能量足以克服分子间的吸引力而逸出液面, 成为气体分子, 这一过程称为蒸发。例如, 水壶中的水被烧“干”, 是在水沸腾的条

件下，变成水蒸气；湿衣服可以晾干，水是在没有沸腾的条件下变成水蒸气。在该过程中，液体分子变成动能较大的气体分子，需要从周围环境中吸收热量，所以蒸发过程是一个吸热过程。

在一定温度下，蒸发将以恒定速度进行。液体如处于一敞口容器中，液态分子不断吸收周围的热量，使蒸发过程不断进行，液体将逐渐减少。

若将液体置于密闭容器中，情况就有所不同，一方面，液体分子进行蒸发变成气态分子；另一方面，一些气态分子撞击液体表面会重新返回液体，这个与液体蒸发现象相反的过程称为凝聚。

初始时，由于没有气态分子，凝聚速度为零，随着气态分子逐渐增多，凝聚速度逐渐增大，直到凝聚速度等于蒸发速度，即在单位时间内，脱离液面变成气体的分子数等于返回液面变成液体的分子数，达到蒸发与凝聚的动态平衡：



此时，在液体上部的蒸气量不再改变，蒸气便具有恒定的压力。在恒定温度下，与液体平衡的蒸气称为饱和蒸气，饱和蒸气的压力就是该温度下的饱和蒸气压，简称蒸气压。

蒸气压是液体的特征之一，常用来表征液态分子在一定温度下蒸发成气态分子的倾向大小。在某温度下，蒸气压大的物质为易挥发物质，蒸气压小的为难挥发物质。液体的蒸气压表达了一定温度下液体蒸发的难易程度。它是液体分子间作用力大小的反映。

如 25℃ 时，水的蒸气压为 3.24kPa，酒精的蒸气压为 5.95kPa，则酒精比水易挥发。皮肤擦上酒精后，由于酒精迅速蒸发带走热量而感到凉爽。

液体的蒸气压随温度的升高而增大。图 1-3 表示几种液体物质的蒸气压与温度的关系。

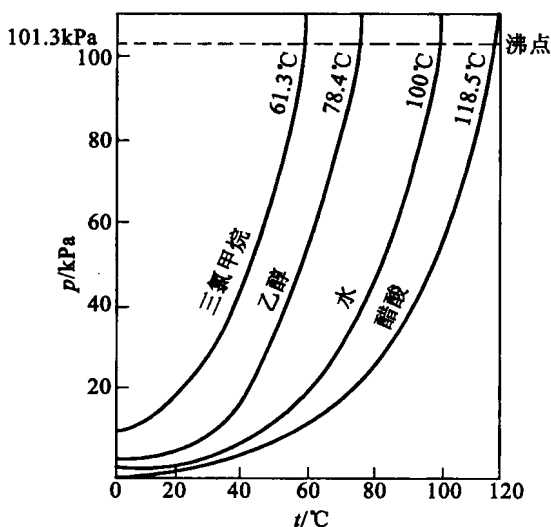


图 1-3 液体物质的蒸气压与温度的关系示意图

还须指出，只要某物质处于气-液共存状态，则该物质蒸气压的大小就与液体的质量

及容器的体积无关。

2. 液体的沸点

在敞口容器内加热液体，最初会看到不少细小气泡从液体中逸出，这种现象是由于溶解在液体中的气体因温度升高，溶解度减小所引起的。

当达到一定温度时，整个液体内部都冒出大量气泡，气泡上升至表面，随即破裂而逸出，这种现象称为沸腾。此时，气泡内部的压力至少应等于液面上的压力（对敞口容器即为大气压）。而气泡内部的压力为蒸气压。

液体沸腾的条件是液体的蒸气压等于外界大气压，沸腾时的温度称为该液体的沸点。或液体的蒸气压等于外界大气压时的温度即为该液体的沸点。外界压力为 101.3kPa 时液体的沸点称为正常沸点。如水的正常沸点为 100℃，乙醇的正常沸点为 78.4℃。

由图 1-3 中，从四条蒸气压曲线与一条平行于横坐标的压力为 101.3kPa 的直线的交点，就能找到四种物质的正常沸点。

显然，液体的沸点随外界压力而变化。若降低液面上的压力，液体的沸点就会降低。在我国的珠穆朗玛峰，大气压力约为 32kPa，水在 71℃ 就沸腾了，食品难煮熟；在压力锅里，压力可达常压锅的 2 倍，水的沸点甚至可达 120℃ 左右；而在气压高达 1000kPa 时，水的沸点约为 180℃。因此，在提到液体的沸点时，必须同时指明外界压力条件，否则是不明确的。一般书上或手册中所给出的液体沸点若未注明外压，指的是外界压力等于 101.3kPa 时的正常沸点。

需要指出的是，沸腾和蒸发既有联系又有区别。蒸发主要是在液体表面上发生，而沸腾是在液体表面和内部同时发生，伴随着沸腾，就可以看到液体内部逸出的气泡，即在整个液体中的分子都能发生汽化。

实验中常碰到把液体加热到沸点时并不沸腾，必须超过沸点后才能沸腾的现象，这一现象称为过热，其液体称为过热液体。过热液体一旦沸腾便相当剧烈，液体往往大量溅出，造成事故，所以过热现象对生产和实验是有害的。实验中给液体加热时，常常要加入沸石和搅拌，这些都是减少过热现象的有效措施。

工业生产和实验室中常利用沸点和外界压力的关系，将在常压下蒸馏易于分解或被空气氧化的物质进行减压蒸馏。将容器内液体表面上的压力降低，如用真空泵将水面上的压力减至 3.2kPa 时，水在 25℃ 就能沸腾。利用这一性质对在正常沸点下易分解的物质，可在减压下进行蒸馏，以达到分离或提纯的目的。即可使液体在较低的温度下沸腾而被蒸馏出来，这种在低于大气压下进行蒸馏的操作过程称为减压蒸馏。减压蒸馏是分离和提纯液体或低熔点固体有机物的一种主要方法。

1.1.3 固体

固体不仅具有一定体积，而且具有一定形状。固体可由原子、离子或分子等粒子组成。这些粒子排列紧密，彼此间有强烈的作用力（化学键或分子间力），使固体表现出一定程度的坚实性。固体的可压缩性很小。固体内部的粒子不能自由移动，只能在一定的平衡位置上振动。

多数固体物质受热时能融化成液体，但有少数固体物质并不经过液体阶段而直接变成