

# 无机化学



# 前 言

无机化学不但是高等学校化学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。

教育部“十二五”规划规定，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都进行了适当调整，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，以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地削减无机化学课程学时，但现已出版的多数无机化学教材篇幅较大，难以适应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，编写了这本教材，其有下列特点：

(1) 本教材突出基本知识、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、生活和生产更加紧密联系。其旨在开阔视野、增长知识，激发学生的学习兴趣。

# 目 录

## 第一章 绪论

- 1.1 化学的概念
- 1.2 物质的聚集状态
- 1.3 物质的量及其单位
- 1.4 用物质的量进行有关化学方程式的计算

## 第二章 溶液

- 2.1 溶液的概念
- 2.2 溶液的组成标度
- 2.3 溶液的浓度
- 2.4 溶液浓度换算
- 2.5 非电解质稀溶液的依数性

## 第三章 化学反应速率和化学平衡

- 3.1 化学反应速率
- 3.2 影响反应速率的因素
- 3.3 化学反应速率理论及活化能
- 3.4 化学平衡
- 3.5 化学平衡的移动
- 3.6 反应速率与化学平衡的综合应用

## 第四章 电解质溶液

- 4.1 电解质溶液理论
- 4.2 酸碱理论
- 4.3 水的电离平衡和溶液的酸碱性
- 4.4 缓冲溶液
- 4.5 弱酸、弱碱的离解平衡
- 4.6 难溶强电解质的沉淀—溶解平衡

## 第五章 氧化和还原

- 5.1 氧化还原反应的基本概念
- 5.2 电极电势

5.3 电极电势的应用

**第六章 原子结构和元素周期律**

6.1 原子核与同位素

6.2 元素周期律与元素周期表

6.3 原子结构和元素性质的递变规律

**第七章 化学键与分子结构**

7.1 离子键和离子化合物

7.2 共价键

7.3 金属键理论

7.4 分子间的力和氢键

7.5 晶体类型

**第八章 配位化合物**

8.1 配位化合物的基本概念及命名

8.2 配位化合物的结构

8.3 配位平衡

8.4 配合物的稳定性

8.5 配合物的应用

**第九章 主族元素选述**

9.1 s 区元素

9.2 p 区元素

**第十章 副族元素选述**

10.1 d 区、ds 区元素通性

10.2 d 区元素

10.3 ds 区元素

10.4 f 区元素

**第十一章 无机物的某些性质变化规律**

11.1 无机酸的酸性

11.2 无机物的颜色

**参考文献**

# 第一章 绪论

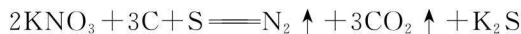
## 1.1 化学的概念

### 1.1.1 化学是一门古老的基础学科

所谓古老，是指自从有了人类就有了化学知识。例如，钻木取火——温度对化学反应速率的影响；炼剑——初期的冶金化学；炼丹术——初期的药物化学；陶器——陶瓷化学，以及其他一些领域。早在公元前 8000 年的新石器时代早期，我国就已经开始制造陶器；在公元前 5000 至公元前 3000 年的仰韶文化时期，已有图案美丽的细泥彩陶制品；1962 年在江西万年县大源仙人洞发现了有夹砂的红陶残片；汉朝开始就有很精致的彩陶，其所用染料均是无机物。公元前 4 世纪战国时期，我国关于青铜的制造原则“六齐”是世界上最早对合金规律的认识；1957 年和 1959 年两次在甘肃武威县距今 4000 余年的新石器晚期遗址中发现的 20 多件铜器，已经充分地证明我们祖先掌握铜的冷锻和熔铸技术的时间要比欧洲早几百年。我国汉代（公元前 100 多年）就有了点金术和炼丹术，用汞制轻粉（氯化亚汞）就是其中一个很好的实例，其化学反应式为：



公元 8 世纪后，我国的点金术和炼金术才通过商人传入波斯（今土耳其）和欧洲。公元 7 世纪唐代，药王孙思邈所著的《伏硫磺法》中记载有类似“一硫二硝三木炭”的黑火药配方：



所谓基础，是指很多学科以化学为基础，如目前发展较快的一些前沿学科——生命科学、材料科学、信息科学、环境科学等，它们都是以化学为基础，与化学密不可分。

### 1.1.2 化学是一门应用科学

所有生物的生存都依赖于物质，而化学正是研究物质的组成、结构、性质、合成、分离及其应用的学科。截至 20 世纪末，物质的种类已经达到 2300 多万种，其中绝大多

数是由化学家合成的。正是基于这些物质的利用，人类的生活才会不断得到改善，社会才会不断进步。

### 1. 1. 3 化学是一门以实验为主，理论和实验相结合的学科

在理论化学飞速发展之前，所有的化学成果都来源于化学实验。随着近几年理论化学特别是量子化学的发展，有些研究已经能够仅通过理论计算来实现，但其计算结果仍然离不开化学实验的辅助和佐证。因此，一个真正的化学家需要掌握深厚的化学基础理论知识和熟练的化学实验技能，具有敏锐和广阔的思路、一定的数理和计算机知识。

### 1. 1. 4 化学研究的层次

唯物辩证法认为，物质是无限可分的。物质可以分割为分子、原子、电子或其他“基本粒子”，它们都是物质无限分割序列中的各个不同层次，各具不同的特点。化学研究的是由分子层次分割为原子这个层次的过程中所表现出来的某些规律。恩格斯在《自然辩证法》一书中称化学为“关于原子运动的科学”，又称化学变化为“永恒的分子变化”，其极为深刻地阐明了物质化学运动的特殊本质。可以说，化学主要是在分子、原子、离子层次上研究物质的组成、结构、性质、变化以及变化过程中能量变化的一门科学。

### 1. 1. 5 化学研究的对象

化学研究的对象是物质，包括实物和场（如晶体场理论、配位体场理论等）。具体地说，化学研究的是物质的组成、结构、性质及其相互关系、化学变化及其变化中的能量变化；研究物质的合成、分离和提纯方法；研究物质的应用。化学重点研究内容有：（1）新物质（特别是新型功能材料、新型药物、新型肥料、新型农药、添加剂、染色剂、保健品等）的制备、分离和应用；（2）物质的化学变化及其伴随的能量变化；（3）生命中的化学现象。

## 1. 2 物质的聚集状态

在常温、常压下，物质通常有气态、液态和固态这三种存在形式，物质总是以一定的聚集状态存在并具有各自的特征。在一定的条件下，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。

## 1.2.1 气体

气体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、均匀地充满整个容器。通常气体的存在状态和它们的化学组成无关，这使得气体具有许多共同性质，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。而反映这四个物理量之间关系的方程式为气体状态方程式。

## 1.2.1.1 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，它只能看作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。而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，分子间的距离很大，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，气体的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，用理想气体的定律来进行计算，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， $p$  为气体压力，SI 单位为 Pa(帕)； $V$  为气体体积，SI 单位为  $\text{m}^3$ (立方米)； $n$  为气体物质的量，SI 单位为 mol(摩)； $T$  为气体的热力学温度，SI 单位为 K(开)； $R$  为摩尔气体常数，又称气体常数，实验证明其值与气体种类无关。

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

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

**【例 1】** 一氧气贮罐体积为  $0.024 \text{ m}^3$ ，温度为  $25^\circ\text{C}$ ，压力为  $1.5 \times 10^6 \text{ kPa}$ ，则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  $\text{O}_2$  的质量， $M(\text{O}_2)$  为  $\text{O}_2$  的摩尔质量]，所以

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

## 1.2.1.2 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，可将其看作理想气体混合物，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，如同它单独存在于容器中。各组分气体占有与混合气体相同体积时所产生的压力叫作分压力 ( $p_i$ )。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。这一关系被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

$$p = p(A) + p(B) + p(C)$$

式中， $p$  为混合气体总压； $p(A)$ 、 $p(B)$ 、 $p(C)$  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) 中的砝码表示由 A、B、C 三种气体组成的混合气体所产生的总压力。

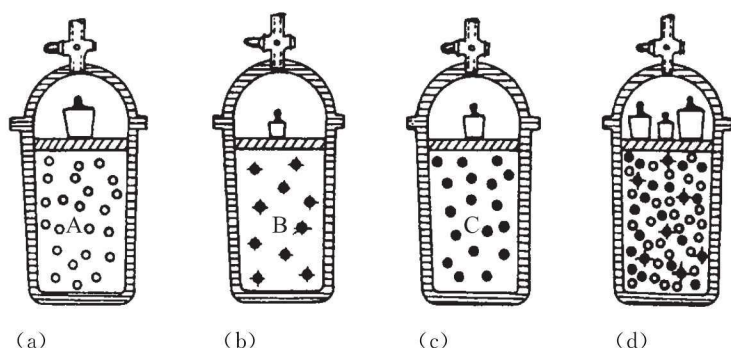


图 1-1 分压定律的示意图

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  $n_{\text{总}}$ ，温度为  $T$  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， $p_i$  表示气体中气体  $i$  的分压， $V$  表示混合气体体积，温度为  $T$ ，则

$$p_i V = n_i RT$$

将此式除以上式，得

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



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  $p_{\text{总}}$  之比（压力分数）等于混合气体中组分气体  $i$  的摩尔分数；混合气体中组分气体的分压等于总压乘以该组分气体的摩尔分数。

**【例 2】** 在  $0.010 \text{ m}^3$  容器中含有  $2.50 \times 10^{-3} \text{ mol H}_2$ ， $1.00 \times 10^{-3} \text{ mol He}$  和  $3.00 \times 10^{-4} \text{ mol Ne}$ ，则在  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时总压为多少？

$$\text{解： } p(\text{H}_2) = \frac{n(\text{H}_2)RT}{V}$$

=

$$\frac{2.50 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{ K}}{0.010 \text{ m}^3} = 640 \text{ Pa}$$

$$p(\text{He}) = \frac{n(\text{He})RT}{V}$$

=

$$\frac{1.00 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{ K}}{0.010 \text{ m}^3} = 256 \text{ Pa}$$

$$p(\text{Ne}) = \frac{n(\text{Ne})RT}{V}$$

=

$$\frac{3.00 \times 10^{-4} \text{ mol} \times 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 35) \text{ K}}{0.010 \text{ m}^3} = 77 \text{ Pa}$$

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

$$= (640 + 256 + 77) \text{ Pa}$$

$$= 973 \text{ Pa}$$

**【例 3】** 用锌与盐酸反应制备氢气： $\text{Zn(s)} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2(\text{g})$ ，如果在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时用排水法收集氢气，总压为  $98.6 \text{ kPa}$ （已知  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时水的饱和蒸气压为  $3.17 \text{ kPa}$ ），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  $3.17 \text{ kPa}$ ，根据分压定律：

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

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

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

$$m(\text{H}_2) = \frac{p(\text{H}_2)VM(\text{H}_2)}{RT}$$

$$\frac{95.4 \times 10^3 \text{ Pa} \times 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 2.02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273 + 25) \text{ K}}$$

$$= 0.194 \text{ g} \text{ ⑩}$$

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：

$$V_{\text{总}} = V_{\text{A}} + V_{\text{B}} + V_{\text{C}} + \dots$$

图 1-2 为分体积示意图，图中 (a)、(b)、(c) 分别表示 A、B、C 三种组分气体的分体积，(d) 表示混合气体的总体积。

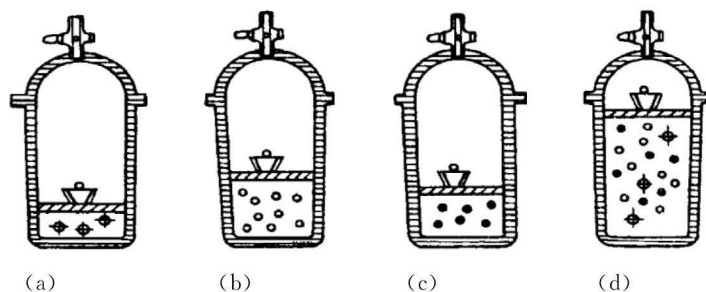


图 1-2 分体积示意图

例如，在某一温度和压力下，CO 和 CO<sub>2</sub> 混合气体的体积为 100 mL。将混合气体通过 NaOH 溶液，其中 CO<sub>2</sub> 被吸收，量得剩余的 CO 在同温、同压下的体积为 40 mL，则 CO<sub>2</sub> 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：

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

上述混合气体中，CO 的体积分数为  $\varphi = \frac{40}{100} = 0.40$ ，CO<sub>2</sub> 的体积分数  $\varphi = \frac{60}{100} = 0.60$ 。

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， $p_{\text{总}}$  为混合气体的总压力； $V_i$  为组分气体 *i* 的分体积； $n_i$  为组分气体 *i* 的物质的量。用上式除以  $p_{\text{总}} V_{\text{总}} = n_{\text{总}} RT$ ，则得

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

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

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

或

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

由此说明，混合气体中某一组分气体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。

混合气体中组分气体压力分数和体积分数与其摩尔分数均相等。

**【例 4】** 在 27 °C，101.3 kPa 下，取 1.00 L 混合气体进行分析，各组分气体的体积分数是：CO 为 60.0%，H<sub>2</sub> 为 10.0%，其他气体为 30.0%。求混合气体中：(1) CO 和 H<sub>2</sub> 的分压；(2) CO 和 H<sub>2</sub> 的物质的量。

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

$$(1) p(\text{CO}) = p_{\text{总}} \times \frac{V(\text{CO})}{V_{\text{总}}} = 101.3 \text{ kPa} \times 0.60 = 60.8 \text{ kPa}$$

$$p(\text{H}_2) = p_{\text{总}} \times \frac{V(\text{H}_2)}{V_{\text{总}}} = 101.3 \text{ kPa} \times 0.10 = 10.1 \text{ kPa}$$

$$(2) n(\text{H}_2) = \frac{p(\text{H}_2) V_{\text{总}}}{RT} = \frac{10.1 \times 10^3 \text{ Pa} \times 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+27) \text{ K}} \\ = 4.05 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n(\text{CO}) = \frac{p(\text{CO}) V_{\text{总}}}{RT} = \frac{60.8 \times 10^3 \text{ Pa} \times 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+27) \text{ K}} \\ = 2.44 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$$\text{或 } n(\text{H}_2) = \frac{p_{\text{总}} V(\text{H}_2)}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \text{ Pa} \times 0.10 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+27) \text{ K}} \\ = 4.06 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$n(\text{CO}) = \frac{p_{\text{总}} V(\text{CO})}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \text{ Pa} \times 0.60 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times (273+27) \text{ K}} \\ = 2.44 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

## 1.2.2 液体

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

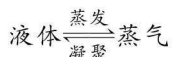
### 1.2.2.1 液体的蒸气压

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”，水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，液态分子会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，情况就会有所不同：一方面，液体分子进行蒸发而变成气体分子；另一方面，一些气体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，由于没有气体分子，凝聚速度为零。而随着气体分子逐渐增多，凝聚速度也逐渐增大，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，常用来表示液体分子在一定温度下蒸发成气体分子的倾向大小。在某温度下，蒸气压大的物质为易挥发物质，蒸气压小的物质则为难挥发物质。液体的蒸气压表示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 °C 时，水的蒸气压为 3.24 kPa，酒精的蒸气压为 5.95 kPa，故酒精比水易挥发。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。

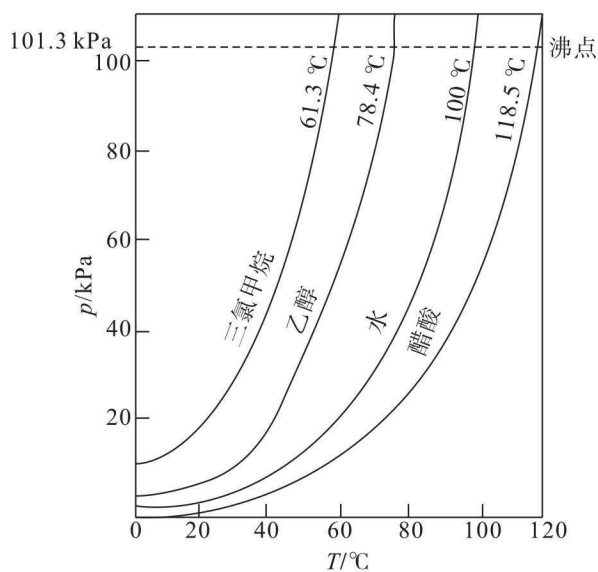


图 1—3 液体物质的蒸气压与温度的关系

还需指出，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。

### 1.2.2.2 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，这种现象是由溶解在液体中的气体因温度升高，溶解度减小引起的。

当达到一定温度时，整个液体内部都会冒出大量气泡，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（对敞口容器而言即为大气压），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 101.3 kPa 时，液体的沸点称为正常沸点。如水的正常沸点为 100 °C，乙醇的正常沸点为 78.4 °C。

据图 1-3，从四条蒸气压曲线与一条平行于横坐标的压力为 101.3 kPa 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 32 kPa，水在 71 °C 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 °C 左右；而在气压高达 1000 kPa 时，水的沸点约为 180 °C。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。书上或手册中所给出的液体沸点，若未注明外压，则一般指的是外界压力为 101.3 kPa 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，而沸腾则是在液体表面和内部同时发生。沸腾时，可以看到液体内部逸出气泡，即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，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，常常要加入沸石和进行搅拌，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 3.2 kPa 时，水在 25 °C 就能沸腾。利用这一性质，针对在正常沸点下易分解的物质，可将其在减压下进行蒸馏，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。

### 1.2.3 固体

固体不仅具有一定体积，而且具有一定形状。固体由原子、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（化学键或分子间作用力），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熔化成液体，但有少数固体物质并不经过液体阶段而直接变成气体，这种现象称为升华。如放在箱子里的樟脑精，过一段时间就会变少或者消失，而箱子里却充满其特殊气味。在寒冷的冬天，冰和雪会因升华而消失。

一些气体在一定条件下也能直接变成固体，这一过程称为凝华。晚秋降霜就是凝华

过程。与液体一样，固体物质也有饱和蒸气压，并随温度升高而增大。但绝大多数固体的饱和蒸气压很小。利用固体的升华现象可以提纯一些挥发性固体物质，如碘、萘等。

固体可分为晶体和非晶体（无定形体）两大类，多数固体物质是晶体。与非晶体比较，晶体有以下特征。

1. 有一定的几何外形。

晶体具有规则的几何外形。例如，明矾 [硫酸铝钾  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ] 晶体为八面体形，食盐晶体为立方体形，石英( $\text{SiO}_2$ )晶体为六角柱体等，如图 1-4 所示。

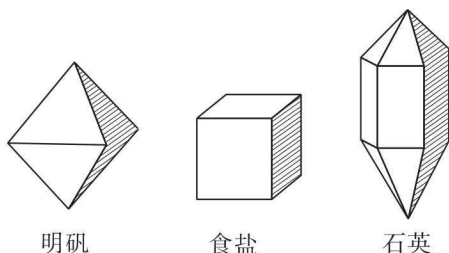


图 1-4 一些晶体的形状

有些物质在外观上并不具备整齐的外形，但经结构分析证明其是由微晶体组成的，这些物质仍属晶体范畴。常见的炭黑就是这类物质。

2. 有固定的熔点。

每种晶体在一定压力下加热到某一温度（熔点）时，就开始熔化。继续加热，在它没有完全熔化以前温度不会再上升（这时外界供给的热量用于晶体从固体转变为液体），故晶体有固定的熔点。

3. 各向异性。

晶体的特征之一是各向异性，许多物理性质，如导电性、传热性、光学性质、力学性质等，在晶体的不同方向表现出明显的差别。例如，石墨晶体是层状结构，在平行各层的方向上其导电性、传热性好，易滑动。又如，云母沿着某一平面的方向很容易裂成薄片。这些都是晶体各向异性表现。晶体的各向异性也是它内部粒子有规则排列的反映。

另一类固体是非晶体（无定形体）。有些物质如玻璃、橡胶、塑料和石蜡等从熔融状态冷却下来时，其内部的粒子还来不及排列整齐，就被冻结在无规则的状态之中成为过冷的液体。与晶体相反，非晶体没有固定的几何外形，又称无定形体。它们的外形是随意性的。其次，非晶体没有固定的熔点。如将玻璃加热，它先变软，然后慢慢地熔化成黏滞性很大的流体。在这一过程中温度是不断上升的，从软化到熔化，有一段温度范围。非晶体没有各向异性的特点。

但是，晶体和非晶体并非不可互相转变。在不同条件下，同一种物质可以形成晶体，也可以形成非晶体。例如，二氧化硅能形成石英晶体（也称水晶），也能形成非晶体燧石及石英玻璃；玻璃在适当条件下，也可以转化为晶态玻璃。

## 1.3 物质的量及其单位

我们知道，原子、分子和离子等粒子是物质进行化学反应的基本粒子。这些粒子是肉眼看不见的，它们的质量都非常小，也是难以称量的。从实际应用考虑，参加化学反应的粒子是按一定的数目比进行反应的，参加反应的这些粒子不是几个，而是大量粒子的集合体。众多粒子的集合体是可以称量的。为了计量这些粒子集合体的数量或质量，给我们进行科学研究和计算带来方便，国际上引进一种可以把粒子与粒子集合体联系起来的物理量，即“物质的量”。

“物质的量”是国际单位制中7个基本物理量之一。在国际单位制中规定它的基本计量单位是“摩[尔]”，国际符号为“mol”，中文符号为“摩”。

### 1.3.1 摩尔的定义

“摩尔是一系统的物质的量，该系统中所含的基本单元数目与0.012 kg 碳-12 ( $^{12}\text{C}$ )的原子数目相等”。在使用摩尔时，应指明其基本单元，它可以是分子、原子、离子、电子及其他粒子或这些粒子的特定组合。

根据实验测定：0.012 kg 碳-12中所含的碳原子数为  $6.02 \times 10^{23}$  个。

由摩尔的定义可知：凡物质中所含的粒子数为  $6.02 \times 10^{23}$  个时，该物质的量就是1 mol。也就是说，1 mol的任何物质都含有  $6.02 \times 10^{23}$  个粒子。 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  称为阿伏加德罗常数，用符号  $N_A$  表示。若某物质所含粒子的数目( $N$ )为  $N_A$  的若干倍时，该物质的量( $n$ )就是若干摩尔，即：

$$n = \frac{N}{N_A}$$

例如：

- 1 mol 氢原子含有  $6.02 \times 10^{23}$  个氢原子；
- 1 mol 水分子含有  $6.02 \times 10^{23}$  个水分子；
- 2 mol 氢氧根离子含有  $2 \times 6.02 \times 10^{23}$  个氢氧根离子；
- 0.5 mol 电子含有  $0.5 \times 6.02 \times 10^{23}$  个电子；
- $6.02 \times 10^{23}$  个硫酸分子为 1 mol 硫酸分子；
- $2 \times 6.02 \times 10^{23}$  个氧分子为 2 mol 氧分子；
- $0.5 \times 6.02 \times 10^{23}$  个钠离子为 0.5 mol 钠离子。

应当注意：摩尔是物质的量的单位，而不是质量的单位。在SI中，物质的质量的单位是千克。此外，物质的量的单位是摩尔，而不是  $N_A$ ， $N_A$  不是基本单位。

### 1.3.2 摩尔质量

单位物质的量物质所具有的质量叫作摩尔质量，常用单位为  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

因为 1 mol 碳-12 的质量即  $6.02 \times 10^{23}$  个碳-12 的质量是 12 g，所以碳-12 的摩尔质量是  $12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。由此很容易推算出任何物质的摩尔质量。

例如，根据元素的相对原子质量可知：1 个碳原子和 1 个铝原子的质量比是 12 : 27，1 mol 碳原子与 1 mol 铝原子具有相同数目的原子，所以 1 mol 碳原子和 1 mol 铝原子的质量比也必定是 12 : 27。已知 1 mol 碳原子的质量是 12 g，则 1 mol 铝原子的质量应为 27 g，即铝原子的摩尔质量为  $27 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

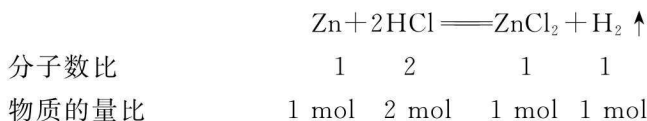
同理，硫的相对原子质量为 32，则硫原子的摩尔质量为  $32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

由此可以得出：任何原子的摩尔质量，在数值上等于该原子的相对原子质量。

用同样的方法可以推出：任何物质的摩尔质量，在数值上等于该物质的相对分子质量。

需要说明的是，对离子来说，由于电子的质量极其微小，原子失去或得到的电子的质量可以忽略不计，所以各离子的摩尔质量，仍等于相应的原子或原子团的摩尔质量。例如， $\text{H}^+$  的摩尔质量是  $1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； $\text{OH}^-$  的摩尔质量是  $17 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； $\text{Cl}^-$  的摩尔质量是  $35.5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； $\text{NH}_4^+$  的摩尔质量是  $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

用摩尔作物质的量的单位，在研究化学反应中各物质间量的关系时非常方便。因为化学方程式中各物质的分子数之比就是它们的物质的量之比。例如：



### 1.3.3 有关物质的量的计算

物质的质量( $\text{m}$ )、物质的摩尔质量( $M$ )和物质的量( $n$ )之间的关系可表示为：

$$n = \frac{m}{M}$$

**【例 5】** 90 g 水的物质的量是多少摩？它含有多少个水分子？

解： $\text{H}_2\text{O}$  的摩尔质量是  $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$\text{① } n = \frac{m}{M} = \frac{90 \text{ g}}{18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 5 \text{ mol}$$

② 含水分子的个数为：

$$N = n \cdot N_A = 5 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 3.01 \times 10^{24}$$

答：90 g 水的物质的量是 5 mol，它含有  $3.01 \times 10^{24}$  个水分子。

**【例 6】** 1.5 mol 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的质量是多少克？

解： $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的摩尔质量是  $106 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$\text{① } m = n \cdot M = 1.5 \text{ mol} \times 106 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 159 \text{ g}$$

答：1.5 mol 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的质量是 159 g。

**【例 7】** 已知 1.5 mol 的某物质的质量是 42 g，求该物质的相对分子质量。

解：物质的摩尔质量，在数值上等于该物质的相对分子质量。



$$M = \frac{m}{n} = \frac{42 \text{ g}}{1.5 \text{ mol}} = 28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

答：该物质的相对分子质量是 28。

**【例 8】** 多少克铁与 3 g 碳所含的原子个数相同？

解：铁和碳的摩尔质量分别为  $56 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。当两种物质的物质的量相同时，它们所含的基本单元数也相同。

$$n(\text{C}) = \frac{m(\text{C})}{M(\text{C})} = \frac{3 \text{ g}}{12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0.25 \text{ mol}$$

$$m(\text{Fe}) = n(\text{Fe}) \cdot M(\text{Fe}) = 0.25 \text{ mol} \times 56 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 14 \text{ g}$$

答：14 g 铁和 3 g 碳所含的原子个数相同。

**【例 9】** 多少克氧气中所含的氧气分子数与 0.5 mol 的硫酸分子中所含的氧原子数相同？

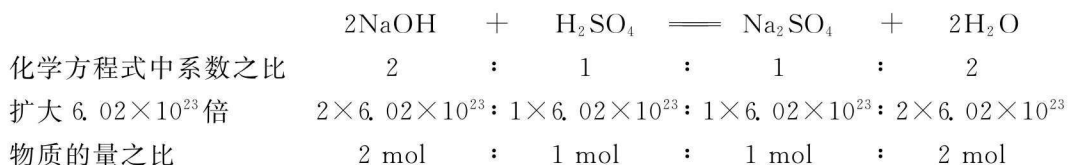
解：氧气的摩尔质量为  $32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。因每个硫酸分子中含 4 个氧原子，所以 0.5 mol 的硫酸中应含  $4 \times 0.5 \text{ mol}$  的氧原子。

$$m(\text{O}_2) = n(\text{O}_2) \times M(\text{O}_2) = 4 \times 0.5 \text{ mol} \times 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 64 \text{ g}$$

答：64 g 氧气中所含的氧气分子数与 0.5 mol 的硫酸分子中所含的氧原子数相同。

## 1.4 用物质的量进行有关化学方程式的计算

物质之间的化学反应是原子、分子或离子等微粒按一定的数目关系进行的。化学方程式可以明确地表示出化学反应中这些微粒数之间的数目关系。这些数目关系也就是化学方程式各项前的系数关系。例如：



可以看出，化学方程式中的各项系数之比，等于组成各物质的微粒数之比，也等于各物质的物质的量之比。因此，用物质的量( $n$ )、摩尔质量( $M$ )、摩尔体积( $V_m$ ) 等进行有关化学方程式的计算，更加方便。

**【例 10】** 多少克的氢氧化钠才能和 0.05 mol 的硫酸完全反应？

解：设需要氢氧化钠的物质的量为  $n$ 。



$$2 \text{ mol} \quad 1 \text{ mol}$$

$$n \quad 0.05 \text{ mol}$$

$$n = 0.1 \text{ mol}$$

0.1 mol 氢氧化钠的质量：