

江苏省中等职业教育试用教材

化工专业

化工基础

第二册



21

江苏教育出版社

江苏省中等职业教育试用教材

化 工 基 础

第 二 册

李文希 等

江苏教育出版社出版

江苏省新华书店发行 徐州新华印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/32 印张6.125 字数121,000

1986年1月第1版 1986年1月第1次印刷

印数1—3,700册

书号: 7351·255 定价: 0.74元

责任编辑 朱宝栋 王瑞书

编写说明

一、本书是根据江苏省教育厅1984年制订的职业高中化工类专业教学计划和化工基础教学大纲（试行）编写的，共三册，供职业高中化工类各专业使用；也可供化工企业技术培训及具有高中文化水平的化工工人、技术人员自学参考。

二、本书注意从职业高中和化工工人技术培训的实际出发，贯彻少而精和理论联系实际的原则，内容精炼，结构严谨，概念清楚，文字流畅。

三、根据职业高中化工类专业教学计划的规定，本课程开设三个学期，共204学时。考虑到化工类各专业的特点，本书在编写时赋予较大的灵活性。有少数内容，与最基本要求相比稍难，改用正楷字体排印，各专业可根据教学大纲选讲其中部分内容；有些公式的推导过程涉及到简单的微积分，可在课前补充必要的基础知识，或略去公式的推导过程，只讲结论。

四、本书第二册第五、六、七章由徐州师范学院李文希同志编写，第八章由江苏省太仓县中学程时华同志编写。初稿写成后，由李文希同志统稿，并经上海师范大学诸询治副教授审阅全文。

五、成书过程中，除得到江苏省教育厅和徐州市教育局的大力支持外，编者所在单位亦给予多种方便，编者对此深表谢意。

限于编者的水平和时间仓促，书中不妥之处，敬请读者提出宝贵意见，以助日后修订。

一九八五年七月

目 录

第五章 吸收	1
第一节 气液相平衡关系	2
5-1 相和相组成的表示法	2
5-2 气液相平衡关系	6
第二节 吸收速率	14
5-3 传质的基本方式	15
5-4 气液相传质的机理	17
5-5 吸收速率方程式	19
第三节 吸收设备和吸收流程	22
5-6 填料吸收塔	22
5-7 吸收流程	25
第四节 吸收剂的选择及用量	27
5-8 吸收剂的选择	27
5-9 吸收剂的用量	28
第五节 吸收塔的内径和填料层高度	34
5-10 填料吸收塔的内径	34
5-11 填料吸收塔的填料层高度	35
第六节 化学吸收简介	41
习 题	
第六章 蒸馏	46
第一节 双组分溶液的气液平衡关系	47
6-1 理想溶液的气液平衡关系	47
6-2 真实溶液	50
6-3 $t-x$ 图与蒸馏的原理	52
6-4 $x-y$ 图和相对挥发度	57

第二节	简单蒸馏	60
6-5	简单蒸馏的操作和应用	60
6-6	简单蒸馏的计算	61
第三节	精馏的原理及设备	64
6-7	精馏的原理和流程	64
6-8	板式塔	66
第四节	精馏塔的材料衡算	71
6-9	全塔物料衡算	71
6-10	精馏段的物料衡算—精馏段操作线方程式	72
6-11	提馏段的物料衡算—提馏段操作线方程式	74
6-12	进料状态对操作线的影响— q 线方程式	76
第五节	理论塔板数的计算和回流比的选择	81
6-13	图解法求理论塔板数	81
6-14	回流比的选择	83
第六节	多元精馏和特殊精馏	85
6-15	多元精馏	85
6-16	特殊精馏	87
习 题		
第七章	干燥	93
第一节	湿空气的性质和湿度图	94
7-1	湿空气的性质	94
7-2	湿度图及其应用	101
第二节	对流干燥过程的物料衡算和热量衡算	107
7-3	对流干燥流程	107
7-4	物料衡算	109
7-5	热量衡算	112
第三节	干燥速率和干燥时间	115
7-6	物料中所含水分的性质	116

7-7	干燥速率和干燥时间	119
第四节	干燥器	124
7-8	厢式干燥器	125
7-9	转筒干燥器	126
7-10	沸腾床干燥器	127
7-11	气流干燥器	128
7-12	喷雾干燥器	130
习 题		
第八章	化学反应过程	133
第一节	化学反应速度	134
8-1	化学反应速度的表示法	134
8-2	影响化学反应速度的因素	136
第二节	化学平衡	147
8-3	可逆反应和化学平衡	147
8-4	化学平衡的移动	152
第三节	最适宜反应条件的选择	159
8-5	可逆反应	160
8-6	平行反应	162
8-7	顺序反应	164
第四节	工业反应器	166
8-8	基本反应器	167
8-9	气-固非均相催化反应器	176
习 题		

第五章 吸 收

吸收是属于传质过程的一种单元操作。在这种操作中，气体溶质溶解于液体溶剂（吸收剂）。吸收在化工生产中的应用很广，主要包括以下几个方面：

1. 进行化学反应时，将气体溶解在液体中制成溶液，以加快化学反应速度，并且使反应进行得均匀、平稳、易于控制。例如，将氨气溶解在水中制成氨水，然后再与二氧化碳进行碳（酸）化反应。

2. 用液体吸收气体制取化工产品。例如，用水吸收氯化氢气体以制造盐酸；用硫酸吸收氨气以制造硫酸铵；用水吸收甲醇氧化产物中的甲醛制造福尔马林等。

3. 用液体吸收混合气体中的一个或几个组分，以分离气体混合物。例如，用洗油吸收焦炉气中的苯和甲苯蒸气；用丙酮吸收石油烃类裂解气 C_2 馏分中的乙炔等。在这种情况下，所选用的吸收剂必须有很强的选择性，即对于要吸收的溶质组分有较大的溶解度，而对于混合气体中的其它组分（惰性组分）的溶解度极小，甚至根本不溶解。这样，当气体混合物与液体吸收剂接触时，混合气体中的溶质组分即被吸收而转入溶液，其它（惰性）组分由于不溶解或溶解极少，仍留在气相中，结果就把气体混合物分离开来了。

4. 净化气体，以满足工艺要求或排放要求，或者从废气中回收有价值的组分，达到综合利用的目的。例如，用碳酸钾溶液吸收合成氨原料气中的二氧化碳；用水吸收脱除生产

磷肥的废气中的氟化氢；用碳酸钠溶液吸收硝酸生产尾气中的二氧化氮等。此时也是将混合气体分离开来，只不过得到的吸收液往往不是目的产物，而是再生后循环使用、废弃或者用来回收副产品。

从以上所列举的吸收实例看出，吸收操作可分成两大类。一类是物理吸收，溶质组分与吸收剂之间不发生化学反应，如乙炔溶解在丙酮中，苯类蒸气溶解在洗油中；另一类吸收操作伴随着化学反应，例如用硫酸吸收氨气，用碳酸钾溶液吸收二氧化碳等，这类吸收称为化学吸收。化学吸收比物理吸收复杂得多，在化工生产中的应用也比较广泛。

本章先讨论物理吸收的气液相平衡关系和吸收速率，然后介绍填料吸收塔的结构及其简单计算，最后简单介绍化学吸收。

第一节 气液相平衡关系

5-1 相和相组成的表示法

所谓相，就是体系中具有相同物理性质和化学性质的任何均匀部分。相与相之间有界面，可以用机械方法将它们分开。相的概念与物质聚集状态（物态）的概念不同，且也和它的量无关。例如一杯水，各部分都具有相同的物理性质和化学性质，就整个一杯水来说，它是均匀的，不论水的量是多少，它都是一个相。但就液体水和它上方的蒸汽来说，虽然它们的分子式都是 H_2O ，化学性质相同，但物理性质却不一样，水和蒸汽之间有界面，可以用气液分离器将它们分开，所以这时体系中有两个相——液相和气相。如果水中

溶有氨气，就形成了氨水，各部分仍具有相同的物理性质和化学性质，所以仍然是一个相（液相）；而氨水上方的水蒸气和氨气的混合物是另一个相（气相）。若将汽油和水混合在一起，静置以后则分成两层，上层是汽油，下层是水，两层的物理性质和化学性质皆不相同，而且有界面，可用分液漏斗将它们分离开来，虽然它们都是液体，却是两个液相，若连上方的汽油蒸气和水蒸气的混合物考虑在内，则体系中有三个相。一般地说，气体混合物为一相，溶液为一相，部分互溶的液体达到平衡状态时，分成几层就是几相，固体混合物除固溶体（合金）以外，有几种组分就是几个相。

当一个相由几种组分组成时，常用以下几种方法表示相的组成：

一、质量分率 混合物中某组分的质量与混合物的总质量之比，称为该组分的质量分率，一般用符号 a 表示。质量分率常用来表示液相或固相的组成。

若混合物的总质量为 m ，其中所含组分 A 、 B 、 C ……的质量分别为 m_A 、 m_B 、 m_C ……，则各组分的质量分率：

$$a_A = \frac{m_A}{m}, a_B = \frac{m_B}{m}, a_C = \frac{m_C}{m} \dots\dots$$

显然，任一组分的质量分率都小于 1，而各组分的质量分率之和等于 1，即

$$\sum_{i=1}^n a_i = a_A + a_B + a_C + \dots\dots = 1$$

二、摩尔分率 混合物中某一组分的摩尔数与混合物的总摩尔数之比，称为该组分的摩尔分率。组分在液相中的摩尔分率一般用符号 x 表示；在气相中的摩尔分率一般用符号 y 表示。

若混合物的总摩尔数为 n ，其中所含组分 A 、 B 、 C …… 的摩尔数分别为 n_A 、 n_B 、 n_C ……，则各组分的摩尔分率：

$$x_A = \frac{n_A}{n}, \quad x_B = \frac{n_B}{n}, \quad x_C = \frac{n_C}{n} \dots\dots$$

显然，任一组分的摩尔分率都小于 1，而各组分的摩尔分率之和等于 1，即

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_A + x_B + x_C + \dots\dots = 1$$

对于理想气体混合物来说，根据道尔顿分压定律，混合物的总压力 p 等于各组分的分压 p_A 、 p_B 、 p_C …… 之和，即

$$P = \sum_{i=1}^n p_i = p_A + p_B + p_C + \dots\dots$$

因为各组分都是理想气体，根据理想气体状态方程式 $pV = nRT$ ，对于每一组分有

$$p_A = \frac{n_A RT}{V} \qquad V_A = \frac{n_A RT}{P}$$

$$p_B = \frac{n_B RT}{V} \qquad V_B = \frac{n_B RT}{P}$$

$$p_C = \frac{n_C RT}{V} \qquad V_C = \frac{n_C RT}{P}$$

所以，

$$\frac{p_A}{P} = \frac{\frac{n_A RT}{V}}{\frac{n RT}{V}} = \frac{n_A}{n} = y_A \qquad \frac{V_A}{V} = \frac{\frac{n_A RT}{P}}{\frac{n RT}{P}} = \frac{n_A}{n} = y_A$$

同理,

$$\frac{p_B}{P} = y_B \quad \frac{p_C}{P} = y_C \cdots \cdots$$

$$\frac{V_B}{V} = y_B \quad \frac{V_C}{V} = y_C \cdots \cdots$$

上述各式说明, 理想气体混合物中某一组分的摩尔分率等于其分压分率, 也等于其体积分率。

三、摩尔浓度 单位体积溶液中某一组分的摩尔数, 称为该组分的摩尔浓度, 一般用符号 C 表示, 单位为摩尔/升或千摩尔/米³。

四、比摩尔分率 混合物中某两个组分的摩尔分率之比, 称为比摩尔分率。当用比摩尔分率表示液相 (溶液) 组成时, 习惯上用溶质组分 A 的摩尔分率 x_A 与溶剂 B 的摩尔分率 x_B 之比, 符号为 X_A 。若液相中只含有一个溶质组分 A 和一个溶剂 B , 则

$$X_A = \frac{x_A}{x_B} = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad (5-1)$$

当用比摩尔分率表示气体混合物的组成时, 习惯上用溶质组分 A 的摩尔分率 y_A 与惰性组分 B 的摩尔分率 y_B 之比, 符号为 Y_A 。若气相中只含有一个溶质组分 A 和一个惰性组分 B , 则

$$Y_A = \frac{y_A}{y_B} = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (5-2)$$

同是一个相的组成, 若用不同的方法表示, 其数值和单位也不相同, 在表示相的组成时, 必须注意各种表示法的定义和单位, 同时要了解各种表示法之间的换算关系。

例5-1 质量分率为 0.6 的酒精水溶液, 密度为 890 千克/米³。试用摩尔分率、比摩尔分率和摩尔浓度表示该溶

液的组成。

解 酒精 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 的分子量 $M_A = 46$

水 (H_2O) 的分子量 $M_B = 18$

用摩尔分率表示该溶液的组成:

$$x_A = \frac{\frac{a_A}{M_A}}{\frac{a_A}{M_A} + \frac{1-a_A}{M_B}} = \frac{\frac{0.6}{46}}{\frac{0.6}{46} + \frac{1-0.6}{18}} = 0.37$$

用比摩尔分率表示该溶液的组成:

$$X_A = \frac{x_A}{1-x_A} = \frac{0.37}{1-0.37} = 0.587$$

设有 1 米^3 该溶液, 其质量 $m = \rho V = 890 \times 1 = 890$ 千克, 其中含酒精 $890 \times 0.6 = 534$ 千克, 相当于 $534/46 = 11.6$ 千摩尔。所以, 该溶液的摩尔浓度 $C_A = 11.6$ 千摩尔/ 米^3 。

表 5-1 列出了几种相组成表示法之间的换算关系, 表中所涉及的体系都只包含 A、B 两种组分。

5-2 气液相平衡关系

气液相平衡关系指的是气体溶质在液体溶剂中的溶解度, 即气液两相达到平衡时, 溶质组分在气液两相中的浓度关系。例如, 我们把氨-空气混合物与水共同封存在一个密闭的容器里, 并保持整个体系的温度和压力恒定不变, 由于氨易溶于水, 氨分子便越过气液两相的界面进入水中, 同时溶解在水中的氨分子也会返回气相。水中溶解的氨愈多, 浓度愈大, 氨从液相返回气相的速率也愈快。当氨分子从气相进入液相的速率等于它从液相返回气相的速率时, 在表面上氨就不再溶解了, 此时氨在气相和液相中的浓度便不再变化, 我们说气液两相达到了平衡状态。所谓气液相平衡关系

表 5—1 相组成表示法之间的换算关系

	质量分率 a_A	摩尔分率 x_A	比摩尔分率 X_A	摩尔浓度 C_A
质量分率 a_A	—	$\frac{a_A}{\frac{a_A}{M_A} + \frac{1-a_A}{M_B}}$	$\frac{a_A}{1-a_A} \frac{M_B}{M_A}$	$\frac{a_A}{M_A} \rho$
摩尔分率 x_A	$\frac{x_A M_A}{x_A M_A + (1-x_A) M_B}$	—	$\frac{x_A}{1+x_A}$	$\frac{x_A \rho}{M_B - x_A (M_B - M_A)}$
比摩尔分率 X_A	$\frac{X_A M_A}{M_B + X_A M_A}$	$\frac{X_A}{1+X_A}$	—	$\frac{X_A \rho}{M_B + X_A M_A}$
摩尔浓度 C_A	$\frac{C_A M_A}{\rho}$	$\frac{C_A M_B}{C_A M_B + \rho - C_A M_A}$	$\frac{C_A M_B}{\rho - C_A M_A}$	—

[注] 表中的 M_A 、 M_B 分别为组分A、B的分子量， ρ 为混合物的密度，千克/米³。

实质上就是气液两相达到平衡状态时，溶质组分在两相中浓度的一种定量表示方法。

气液相平衡关系一般随体系、温度、压力而异，通常都是用实验方法测定出来的。图 5-1 是根据实验数据绘制出来的 SO_2 和 NH_3 在水中的溶解度曲线，又称为气液相平衡曲线。图中的横坐标为溶质组分(SO_2 、 NH_3)在液相中的摩尔

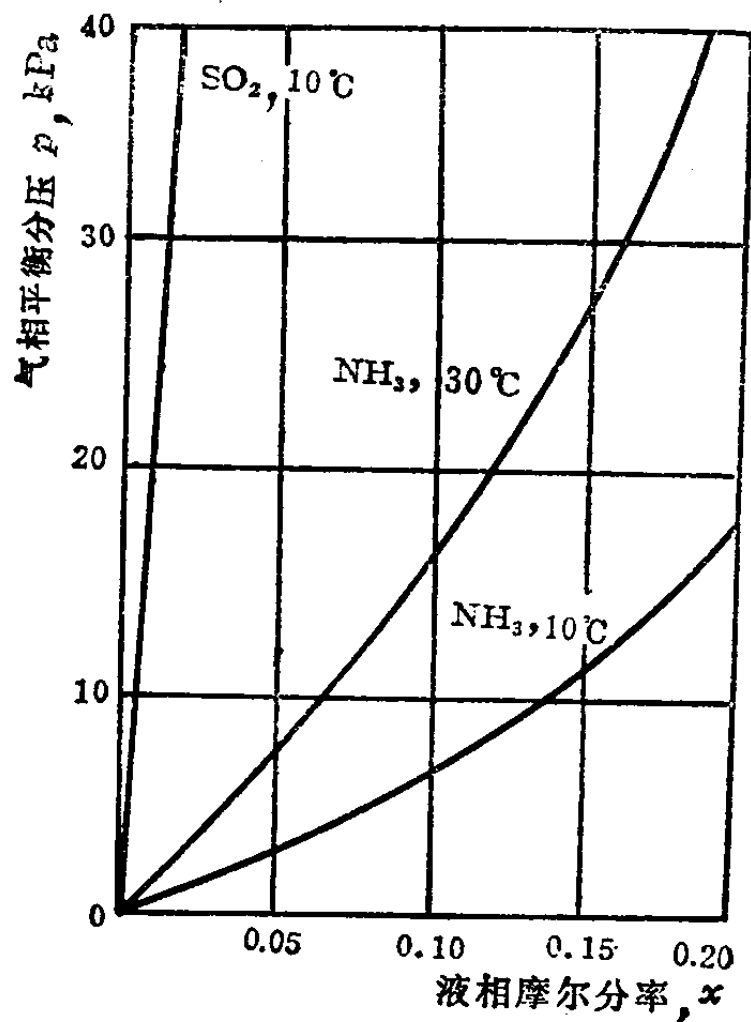


图 5-1 气体的溶解度曲线

分率 x ，纵坐标为平衡时溶质组分在气相中的分压，即平衡分压 p_e ，单位是千帕。从图中看出，在相同的温度和压力下，氨在水中的溶解度比二氧化硫的大。对于某一特定的体系来说，温度较高的平衡曲线总是位于温度较低的平衡曲线

上方，这说明气体的溶解度随温度升高而减小。例如，当气相中氨的分压为10千帕时，若体系的温度为10℃，则平衡时氨在水溶液中的摩尔分率大约为0.138，但若体系的温度升高到30℃，则氨在水溶液中的摩尔分率将减小至0.065。在一定的温度下，气体的溶解度随该气体在气相中分压的增大而增大。例如在30℃下，若氨在气相中的分压为10千帕，平衡时它在液相中的摩尔分率为0.065，若氨在气相中的分压增大到20千帕，则平衡时它在液相中的摩尔分率增大到0.118。显然，在较高的压力和较低的温度下进行吸收操作是比较有利的。

溶于液体溶剂中的溶质组分返回到气相中去，必然要在气相中产生一定的压力。当气液两相达到平衡时，溶质组分在气相中的分压称为平衡分压，一般用符号 p_e 表示。平衡分压的大小，意味着该溶质组分由液相返回气相的趋势大小。如果溶质组分在气相中的分压 p 高于其平衡分压 p_e ，吸收便会产生，溶质组分由气相转入液相，直到气液两相平衡为止。当溶质组分在气相中的分压 p 等于其平衡分压 p_e 时，气液两相达到平衡，吸收溶解过程即在宏观上停止了，此时所得到的溶液即为该条件下最浓的溶液。例如在30℃和101.3千帕的总压下，含氨20%的氨-空气混合物，与摩尔分率为0.10的氨水相接触，由于氨在气相中的分压 $p = 101.3 \times 20\% = 20.26$ 千帕，大于摩尔分率为0.10的氨水的平衡分压 p_e （16.1千帕），气相中的氨将转入液相，使氨水的浓度增大，直到氨在水溶液中的摩尔分率达到0.12时为止。在此条件下，氨在液相中的摩尔分率不会超过0.12，除非提高混合气体中氨的分压或者降低温度。若在同样条件下，含氨20%的混合气与摩尔分率为0.15的氨水接触，因氨在气相中的分压（20.26

千帕) 小于该条件下氨的平衡分压 (26.5千帕), 传质方向就要逆转, 液相中的氨转入气相, 氨水的浓度减小, 这种现象称为解吸或脱吸。不言而喻, 解吸操作应在较高的温度和较低的压力下进行。

应当指出, 对于不同的溶质气体来说, 制取相同浓度的溶液所需要的气相分压是不同的。易溶气体在气相分压较低的情况下就能制得较浓的溶液, 而难溶气体则需要较高的气相分压, 才能制得同样浓度的溶液。例如在10℃时, 要想制得摩尔分率为0.05的水溶液, 对氨来说, 只要气相中的分压高于2.9千帕即可, 而对于二氧化硫来说, 所需要的气相分压已大大超出了图5-1所示的范围。

随着气液相平衡实验数据的积累, 人们发现在溶液的浓度较稀时, 许多气体的溶解度曲线都可以看作是通过坐标原点的直线, 也就是说, 对于稀溶液, 在一定温度下, 当气液两相平衡时, 溶质气体在气相中的平衡分压 p_e 与它在液相中的摩尔分率 x 成正比。即

$$p_e = Hx \quad (5-3)$$

式(5-3)又称为亨利定律。式中的比例系数 H 称为亨利系数, 其单位与压力 p_e 的单位相同, 下标 e 表示平衡状态。

亨利系数 H 因体系、温度而异。在同一温度下, 易溶气体的亨利系数较小, 难溶气体的亨利系数较大。对于特定的体系, 亨利系数随温度升高而增大。某些气体水溶液的亨利系数值可从有关手册或本书末的附录中查得。

由于相组成的表示法不同, 亨利定律也可以写成其它形式, 如:

$$p_e = H' C \quad (5-4)$$

$$y_e = mx \quad (5-5)$$

上两式中: C ——溶质组分在液相中的摩尔浓度, 摩尔/升
或千摩尔/米³;

y ——溶质组分在气相中的摩尔分率;

H' ——溶解度系数, 帕·米³/千摩尔;

m ——相平衡常数, 无单位。

其余符号同式(5-3)。

气体水溶液的溶解度系数 H' 和相平衡常数 m 可从有关手册中查取, 也可由亨利系数 H 换算得到。由式(5-3)和式(5-4)得

$$Hx = H'C$$

根据表5-1,

$$C = \frac{x\rho}{M_B - x(M_B - M_A)}$$

所以,

$$H' = \frac{M_B - x(M_B - M_A)}{\rho} H \quad (5-6)$$

式中: M_A ——溶质气体的分子量;

M_B ——液体溶剂的分子量;

ρ ——溶液的密度, 千克/米³。

由式(5-3)和式(5-5)得

$$m = \frac{H}{P} \quad (5-7)$$

式中: P ——体系的总压, 帕。

例5-2 在 293 K 和 1.013×10^5 帕的总压下, 摩尔分率为 0.05 的氨水的亨利系数 $H = 2.78 \times 10^5$ 帕, 设此氨水的密度 $\rho = 980$ 千克/米³, 试求其溶解度系数和相平衡常数。

解 氨(NH_3)的分子量 $M_A = 17$, 水(H_2O)的分子量 $M_B = 18$ 。根据式(5-6), 溶解度系数