



全国化工高教学会会刊
第31卷·第3期·总第137期

ISSN 1000-6168
CN 31-1043/G4

化工高等教育

HIGHER EDUCATION IN CHEMICAL ENGINEERING

“中国学术期刊综合评价数据库”来源期刊
“中国社会科学期刊精品数据库”入选期刊
“万方数据—数字化期刊群”和
“中国核心期刊（遴选）数据库”入选期刊

ISSN 1000-6168



06>

9 771000 616140

2014.3

目 录

2014年第3期
(总第一百三十七期)

HIGHER EDUCATION IN CHEMICAL ENGINEERING

实验与实践教学

- 51 有机化学实验教学改革模式的探索与实践 于秀兰
- 55 乙苯负压脱氢制苯乙烯大型实验装置自动控制系统设计 李秀军等
- 63 综合化学实验教学实践的调查分析 王玉芹等
- 66 MPT-AES 在实验教学中新的应用 杨明非等
- 69 对流给热系数测定实验装置的改进 杨荣榛等

教学经验交流

- 72 配备不同类型控制器 CSTR 反应器的动态模拟 刘宏超等
- 77 仿生群体智能算法的演示教学 邱 挺等
- 82 传质分离过程理论塔板数的简捷计算 宗 原 齐鸣斋
- 85 “熵判据”能用于判定非隔离系统过程的自发性吗? 王新平等
- 88 吸收-解吸过程的膜控制阻力 曹 睿 黄少杰
- 93 高分子物理教学几点思考和体会 余若冰等
- 96 美国物理化学教学特点浅析 沈 丽等
- 99 化工原理教学中建立良好学习氛围的研究 李 萍
- 102 云南地区工科物理化学课堂教学改革的探索 冯莉莉

高校管理

- 106 “双盲”评审制度在本科毕业设计(论文)中的研究探索 何 浩等

国际标准连续出版物号:
ISSN 1000-6168
国内统一连续出版物号
CN31-1043/G4

主管单位:
中华人民共和国教育部
主办单位:
华东理工大学
出版发行:
《化工高等教育》编委会、编辑部
地址:上海梅陇路 130 号
华东理工大学 343 信箱
电话:021-64252403
传真:021-64252242
邮编:200237
电子信箱:gjyj@ecust.edu.cn
网址:<http://hggz.chinajournal.net.cn>
<http://hggdjy.periodicals.net.cn>

印刷:上海图宇印刷有限公司
出版日期:2014年6月30日
定价:8.80元

Main Contents

Construction and Practice of Cultivation System for Applied Professional Talents in Chemical Engineering and Technology	Shen Yanming, et al. (1)
Current Situation and Countermeasures of Bilingual Teaching in Universities	Qian Jingzhu, Guan Guofeng (4)
On the Role of Humanistic Quality Education in Fostering the Creativity of Science and Engineering Postgraduates	Zhou Hongyan, Liuling (8)
Interactive Mechanism Research between Chemical Engineering Talents Training and Enterprise Innovation based on the Social Demand	Peng Guowen, et al. (12)
The Construction of Practical Education System for Special Energy Technology and Engineering Major	Wang Jianhua, et al. (14)
Research and Practice on Applied Chemistry Specialty Construction of Energy and Mining Universities	Jiang Rongli (17)
The Influence of Market Demand Changes on Environmental Science Professional Training System under the New Situation and Improvement Measures	Shan Aiqin, et al. (21)
Construction of Undergraduate Teaching Knowledge System in Basic Advanced Organic Chemistry	Wang Zhaoxia, Yu Ye (25)
Approaches of Developing Technology and Engineering Literacy for the Undergraduates in Process Equipment & Control Engineering	Liu Yan, et al. (28)
Application of "Three-in-One" Organic Chemistry Teaching Approach in Talent Training	Jiang Guofang, et al. (30)
Advanced Organic Chemistry Teaching Reform of "Teaching of Many Teachers" with a Main Teacher Leading	Cui Yu, et al. (34)
Simple Discussion on "Fine Chemical Technology" Course Teaching in the Background of Education Dream	Cao Yunli, et al. (37)
Optimizing Teaching Approach and Enhancing the Effectiveness of Classroom Teaching	Wang Lin, Xu Sheng (39)
Research on the Reconstruction of Money and Banking	Liu Jianguo (43)
Teaching Reform and Practice of C ₁ Chemical Industry	Wu Peng, et al. (47)
Research and Practice of Organic Chemistry Laboratory Education Reform	Yu Xiulan (51)
Design of Automatic Control System for Producing Styrene from Ethyl-benzene Dehydrogenation on a Large-scale Experiment Equipment under Negative Pressure	Li Xiujun, et al. (55)
The Investigation and Analysis of Comprehensive Chemical Experiment Teaching Practice	Wang Yuqin, et al. (63)
The New Application of MPT-AES in Teaching of Experiment	Yang Mingfei, et al. (66)
Improvement of Experimental Equipment for Determination of Convective Heat Transfer Coefficient	Yang Rongzhen, et al. (69)
The Dynamic Simulation on CSTR with Different Type of Controller	Liu Hongchao, et al. (72)
Demonstration Teaching of Swarm Intelligence Algorithm	Qiu Ting, et al. (77)
Simple Calculation of Theoretical Plate Number for the Process of Mass Transfer Separation	Zong Yuan, Qi Mingzhai (82)
Can "Entropy Criterion" Be Used to Assess Whether a Change Is Spontaneous in a Non-isolated System?	Wang Xiping, et al. (85)
<u>The Controlling Film Resistance in Absorption/Desorption Process</u>	<u>Cao Rui, Huang Shaojie (88)</u>
Some Thoughts and Experience on Polymer Physics Teaching	Yu Ruobing, et al. (93)
The Teaching Feature of Physical Chemistry in America	Shen Li, et al. (96)
Create an Atmosphere for Study in Teaching of Principles of Chemical Engineering	Li Ping (99)
Study on Teaching Reform in Physical Chemistry Course of Engineering Discipline in Yunnan Province	Feng Lili (102)
The Research and Exploration of Undergraduate Design and Thesis Double-blind Review	He Hao, et al. (106)

吸收—解吸过程的膜控制阻力*

曹睿,黄少杰

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室,北京 102249)

[摘要]膜阻力是传质工艺计算的基本特征量,反映了传递过程的动力学属性。为了说明气液传质机理,本文针对吸收操作中易混淆的控制阻力问题进行讨论,通过图解对比了易溶、难溶体系的阻力分配情况,对影响膜阻力大小和分配比例的热力学因素及动力学因素(如相平衡、流动状况、化学反应等)作了分析,结合算例说明了工业生产中膜阻力分配的可控性及确定控制阻力的工程意义,此外还评价了膜阻力在不同单元操作过程中的个性差异。

[关键词]吸收/解吸;膜阻力;气膜控制/液膜控制;相平衡;传质系数

The Controlling Film Resistance in Absorption/Desorption Process

Cao Rui, Huang Shaojie

Abstract: Film resistance is the basic characteristic parameter in the calculation of mass transfer process. It demonstrates the dynamic properties of the process. The controlling film resistance in absorption, which often results in misunderstanding, has been discussed to reinforce the comprehension of the gas-liquid mass transfer mechanism. The resistance distribution of soluble/dissoluble system has been analyzed by graphical method. It is helpful to evaluate the effects of the thermodynamic and kinetic influencing factors on film resistance, such as the equilibrium condition, flow behaviors, chemical reaction, and so on. The results have been validated by the cited example. It indicates that the film resistance distribution can be adjusted and controlled in industrial application, which interprets the meaning of engineering in determining the controlling film resistance. In addition, the distinct characteristics of the film resistance are compared among individual unit operations.

Key words: Absorption/Desorption; Film resistance; Gas-film controlling/Liquid-film controlling; Equilibrium; Mass transfer coefficient

吸收过程是工业上气体混合物的主要分离方法,广泛应用于石油、化工、食品、医药等领域,通常用于原料气提纯、产品精制、尾气的净化与回收。作为典型的单元操作,吸收在化工原理传质

部分占有相当大的比重,仅次于工业上最常用的精馏过程。吸收的重要地位,不仅在于应用的普遍性,更主要的是吸收中提出了很多对传质过程具有普适性的基本概念、理论和模型。

[作者简介]曹睿(1973-),女,副教授,硕士。

* 中国石油大学(北京)校青年基金(No. 2462012KYJJ0319)、中国石油大学(北京)化工原理教学改革项目资助。

在吸收章节中,双膜理论将吸收过程简化为溶质经过气膜、液膜的稳定分子扩散,用 Fick 定律定量描述吸收的传质速率,由此引出了膜阻力的概念,并且用总膜阻力及单相膜阻力之间的比例关系来描述传递过程进行的难易,得出传质过程的控制步骤,从而达到实现工艺过程、强化吸收(或解吸)的目的。膜阻力的概念在吸收计算中具有重要意义。但是教科书中对膜阻力的说明是比较基础的,仅限于速率方程。吸收内容指出,吸收和解吸并无本质差异,只是物质传递方向不同,因此在同一相平衡条件下很容易得出结论:“如果吸收是气膜控制,那么解吸也应该是气膜控制。”但在工业应用中,通常希望吸收是易溶的,而解吸是难溶的,才能达到良好效果。这显然与前面的结论相悖。教学中并没有深入解释这个问题,因为教科书中膜阻力的概念与吸收(或解吸)的影响因素是割裂开的。相平衡(操作温度、压力)、^[1,2] 流动条件(流量、搅拌、湍动程度)、^[2,3] 物性条件(溶解度、扩散系数等)如何影响膜阻力,缺乏贯穿联系,这些都限制了对膜阻力及控制阻力的理解。

确定膜控制阻力的意义不仅限于吸收,对蒸馏、萃取、吸附等单元操作也同样适用,同时具体单元操作又存在个体差异。从类比学习“三传”的角度看,传质膜阻力的重要地位等同于流动阻力和热阻,是所有传质过程的工艺计算和设备设计的基础,教学需要对膜阻力理论的共性特征及个体差异进行系统总结。这不仅可以使教学内容前后呼应,融会贯通,更有助于解决具体工业问题。鉴于吸收过程中膜阻力的特殊性(存在控制阻力),下面结合吸收内容中的双膜理论,对膜阻力问题进行讨论。

一、膜阻力的形式和控制阻力

传质速率方程的基本形式可表示为:

$$\begin{aligned} \text{传质速率} &= \frac{\text{传质推动力}}{\text{传质阻力}} \\ &= \text{传质系数} \times \text{传质推动力} \quad (1) \end{aligned}$$

传质速率方程以单相推动力表示如下(摩尔分率):

$$\begin{aligned} \text{气膜: } N_A &= k_y(y - y_i) \quad \text{或} \\ \text{液膜: } N_A &= k_x(x_i - x) \quad (2) \end{aligned}$$

相界面上的气、液相平衡服从亨利定律:

$$y_i = mx_i \quad (3)$$

以气相总推动力(或液相总推动力)表示的传质速率方程为:

$$N_A = K_y(y - y^*) \quad \text{或} \quad N_A = K_x(x^* - x) \quad (4)$$

由方程(2)可得式(5):

$$\frac{y - y_i}{x - x_i} = -\frac{k_x}{k_y} \quad (5)$$

式(5)与式(3)联立,得到总阻力与单相阻力之间的关系(以气相形式为例):

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \quad (6)$$

当某单相阻力占总阻力的绝大部分时,其他相阻力可忽略,该相阻力称为控制阻力。对易溶气体,如水吸收 NH_3 、 HCl 等可视为气膜控制, m 很小, $\frac{1}{k_y} \gg \frac{m}{k_x}$, $K_y \approx k_y$, $N_A \approx k_y(y - y_i)$; 难溶气体,如水吸收 O_2 、 H_2 或 CO_2 , 属液膜控制, m 很大, $\frac{1}{k_x} \gg \frac{1}{mk_y}$, $K_x \approx k_x$, $N_A \approx k_x(x_i - x)$ 。若要提高气膜(或液膜)控制过程的传质速率,在选择吸收设备型式及确定操作条件时应注意减小起控制作用的膜阻力。

二、膜控制阻力的判断

图 1 以易溶气体为例,在 $y-x$ 相图中说明了吸收(或解吸)中单相阻力在总阻力中的分配。A 为操作点,对应塔内任一截面的气、液组成(x, y), x (或 y)的平衡组成为 y^* (或 x^*),相界面组成为(x_i, y_i),则 AI 表示气相推动力 $y - y_i$ (或气相阻力),IB 表示液相阻力 $y_i - y^*$,AB 表示总阻力 $y - y^*$ 。 $y > y^*$ 时发生吸收;反之解吸。

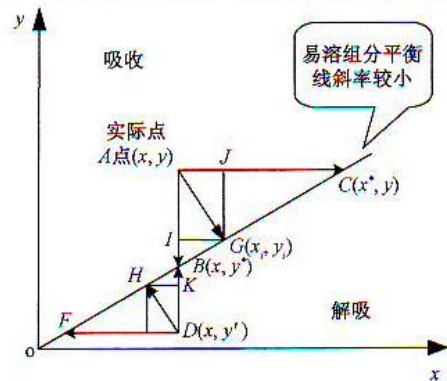


图 1 膜控制阻力示意图(易溶)

图 1 是典型的气膜控制体系, $AI \gg IB$, 说明气膜阻力远大于液膜阻力,在同一相平衡条件下,如果 y 降低到低于 y^* , 则吸收变为解吸。由图可知, BD 为解吸总阻力, BK 为解吸液相阻力, KD 为解吸气相阻力。因为 AD 与 x 轴垂直, IG 、 HK

与 x 轴平行,且 k_x, k_y 在低浓条件下不变,所以 $\Delta AGB \sim \Delta DHB, \Delta AGI \sim \Delta DHK, \Delta IGB \sim \Delta KHB$, 可得式(7),说明解吸过程的控制阻力同样为液膜阻力。

$$\frac{|AI|}{|AB|} = \frac{|DK|}{|DB|} \quad (7)$$

教学中认为吸收与解吸无本质区别,只是推动力相反,很容易得出“吸收与解吸的膜控制阻力一致”的结论。吸收生产中,通常需要吸收和解吸联合使用,吸收希望溶质易溶,而解吸希望溶质难溶,因此上面的结论将不利于工业实施。

实际上,从工艺条件来看,吸收塔与解吸塔的操作温度、压力有很大差别,将显著改变溶质的溶解度(低温高压对吸收有利,高温低压有利于解吸)。下面用图2说明不同相平衡条件下相控制阻力的转变。当 T 升高、 P 降低后,相平衡线的斜率增大, $DK \ll KB$, 体系难溶,变为液膜控制,原来吸收状态下的操作点甚至可能变为解吸。很显然,前述“吸收与解吸控制阻力一致”的认识过于片面,没有考虑到相平衡对阻力大小及分配的影响,而且改变 T, P 在工业上是较容易实施的。

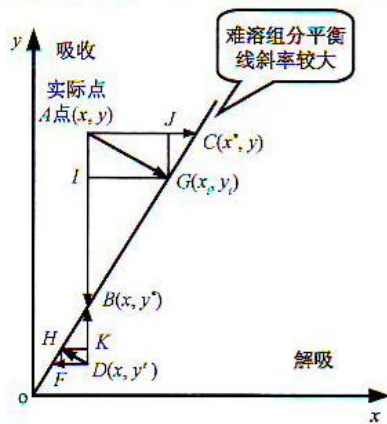


图2 膜控制阻力示意图(难溶)

三、膜阻力影响因素

传质是一个复杂的过程,与流体物性、流动状况、相平衡及有无化学反应有关。了解体系的阻力形式和在两相中的分配比例,对于确定工艺条件和设备型式至关重要。由式(6)可以看出,相阻力的影响因素可分为两类, k_x, k_y 代表动力学因素, m 代表热力学因素。下面分析在哪些条件下,何种因素的影响占主导地位。

(一)相平衡为控制因素

热力学相平衡是传质的极限,决定了传质方向和推动力,属于体系极限。工业上要求吸收剂:

1. 应具有良好的选择性,对溶质有良好的溶解能力,而对其他组分不溶或微溶;
2. 对被分离组分溶解度大,以提高吸收速率,减少吸收剂用量和设备尺寸;
3. 吸收剂能循环使用,对于化学吸收,化学反应必须是可逆的;对于物理吸收,溶质的溶解度应随操作条件改变而有显著的差异,易于再生。

第1、2点属特定相平衡下的溶解性,而第3点要求改变温度、压力后,溶质在气、液相中阻力的比例产生本质变化,即吸收为易溶,解吸为难溶。如果温度、压力变化以后,并不能使溶质的溶解度由易溶变为难溶,那么这种溶剂不适合吸收/解吸联合操作,如 NaCl 、离子液体等。通常利用其难挥发的特性,采用蒸发等方法回收。

(二)传质系数为控制因素

动力学因素代表传质进行的快慢,反映了实际过程趋向热力学极限的程度。传质系数可以通过试验测定,也可由经验关联或准数关联获得,式(8)和(9)为气相和液相传质系数的准数关联式:

$$Sh_G = \theta \cdot Re_G^{0.7} \cdot S_G^{1/3} \cdot (a_i d_p)^{-2.0} \quad (8)$$

式中: $S_G = \frac{\mu_G}{\rho_G D_G}$, $Sh_G = \frac{k_G R T}{a_i D_G} \left(\frac{p_{Bm}}{p} \right)$, $Re_G = \frac{G'}{a_i \mu_G}$

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_{L,g}} \right)^{1/3} = 0.0095 (Re'_L)^{2/3} \cdot (S_{d,L})^{-1/2} \cdot \psi^{0.4} \quad (9)$$

式中: $Re'_L = \frac{W'}{a \mu_L}$, $S_{d,L} = \frac{\mu_L}{\rho_L D_L}$

由上述公式可知,特定相平衡下 $k_x a$ (或 $k_y a$) 的影响因素主要可归结为三类:物性条件,如扩散系数 D 、黏度 μ 、密度、表面张力等;设备结构,如填料或塔板的类型、结构、分布等;操作条件,如流量大小、流动状态、是否加入搅拌、剪切或脉冲扰动等。改变流体的湍动程度,可以减少层流底层厚度,降低膜阻力,强化传质,特别是对控制膜阻。

传递速率造成的实际过程与理想平衡状态的偏离程度可归结为传质效率,从点效率到板效率的计算可以采用混合池模型、涡流扩散模型、循环流模型、液体喷溅模型和液体微元停留时间测量模型等。国内外对效率模型的研究主要为 FRI 模型、Bennett 模型及余国琮等提出的二维定态混合池模型,^[4]平衡级法仍然是传质计算的主导方法。

(三) 化学反应的作用

化学吸收属于传质与反应同时进行的过程, 化学反应只影响液相的传质阻力, 使 k_L 显著增加, 对 k_G 无影响, 也不改变相平衡。化学反应具有较强的选择性, 可以通过反应消耗液相主体的溶质, 使有效溶解度增加, 液膜阻力显著降低, 也是强化传质的重要方法。

四、膜控制阻力的意义

(一) 三传膜阻力类比

从三传的共性特征来看, 传质过程中气膜和液膜传质阻力的分配, 与动量传递过程中边界层与流体主体的阻力分配、传热过程中不同导热或对流层的热阻分配是类似的。动量传递和传质的基本方式都是流体质点的转移, 强化流动的同时也强化了传质。但是传质过程在达到热力学极限时, 气、液相组成之间需满足相平衡, 不像动量传递达到平衡时速度相等或热平衡时温度相等, 所以传质膜阻力的分配更复杂。

(二) 设计单相传递系数实验

利用吸收中单相阻力起控制作用的特点可以设计单相传质系数试验, 因为试验中只能测得相主体组成, 不易测相界面组成, 如果总阻力接近某个单相阻力, 相界面组成就会接近于阻力较小侧的主体组成, 用总传质系数代替单相传质系数。这种控制阻力的设计试验对动量传递过程测定层流底层阻力, 以及传热过程中的控制热阻也有同样适用。

(三) 传质速率法的适用范围

膜阻力是否起控制作用, 决定于传质计算方法。确定塔的传质有效段高度时, 可以采用速率法, 也可以采用平衡级法。吸收中, 速率法综合考虑了物料衡算、相平衡、速率方程(常温省略了热量衡算), 在低浓或控制膜阻力下可以很容易计算出板数或填料层高; 而平衡级法将动力学影响考虑到传质效率中, 以实际板与理论板的偏差体现, 所以速率法比平衡级法可以更“真实”地反应吸收/解吸的工艺计算。对于难溶或易溶吸收体系, 因为可以用单相控制阻力描述整个吸收过程, 在常温下单相的传质系数和相平衡恒定, 可以假定总传质系数为恒定值, 所以对这类吸收过程, 速率法和平衡级法都适用。而在精馏计算中, 气膜和液膜中传质阻力之比为 30%~70%, 不能以膜控制阻力来描述; 精馏塔沿塔高的温度都不相同, 不

同位置气、液相中的扩散系数都不是定值, 由于体系、过程复杂, 单相传质系数不易求取; 而且相平衡关系也是非线性的, 总传质系数沿着塔高都是变化的, 所以无法实现简便的解析计算, 目前还不能采用速率法。

五、算例分析

吸收塔内用洗油吸收煤气中的苯(见图 3), 苯初始含量 $y_{1,吸}$ 为 0.02(mol%, 下同), 吸收相平衡为 $y_e = 0.125x$, 两相逆流接触。液气比 $(L/G)_{吸}$ 为 0.16、循环洗油入口含量 x_2 为 0.0075 时, 尾气中苯的含量 $y_{2,吸}$ 可降至 0.001。吸收塔底排出的吸收液升温后, 解吸塔内用过热蒸气解吸, 解吸塔内的气液比 $(G/L)_{解}$ 为 0.365, 相平衡为 $y_e = 3.16x$ 。吸收塔可看作气膜控制, 解吸塔可看作液膜控制, 且 $k_L a \propto L^{0.66}$ 。现欲降低尾气中苯的含量, 将吸收剂循环量增加 1 倍, 其他条件不变, 比较尾气中苯组成的变化。

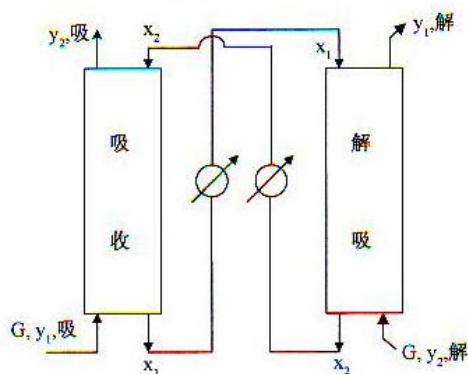


图 3 吸收—解吸流程示意图

解: 1. 原工况:

$$\text{吸收塔液体出口含量: } x_1 = (G/L)_{吸} (y_1 - y_2) + x_2 = 0.126$$

$$\text{吸收塔的传质单元数: } N_{OG,吸} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta y_m} = \frac{y_1 - y_2}{\frac{(y_1 - mx_1) - (y_2 - mx_2)}{\ln[(y_1 - mx_1)/(y_2 - mx_2)]}} = 19.1$$

$$\text{解吸塔的气体出口含量: } y_{1,解} = (L/G)_{解} (x_1 - x_2) + y_{2,解} = 0.325$$

$$\text{解吸塔的平均推动力: } \Delta y_m = \frac{(mx_1 - y_{1,解}) - (mx_2 - y_{2,解})}{\ln[(mx_1 - y_{1,解})/(mx_2 - y_{2,解})]} = 0.0439$$

$$\text{解吸过程的传质单元数: } N_{OG,解} = \frac{y_{1,解} - y_{2,解}}{\Delta y_{m,解}} = 7.403$$

2. 新工况:

吸收塔的 $(L/G)'_{\text{吸}} = 2 \times 0.16 = 0.32$, 解吸塔的 $(G/L)'_{\text{解}} = 0.365/2 = 0.1825$ 。因吸收为气膜控制, 循环液量加倍后, $N'_{\text{OG,吸}} = N_{\text{OG,吸}}$ 不变。解吸为液膜控制, 且 $k_r a \propto L^{0.66}$, 故:

$$\begin{aligned} H'_{\text{OG,解}} &= \frac{G_{\text{解}}}{K'_{r,a}} \approx \frac{mG_{\text{解}}}{k'_{r,a}} = \frac{1}{2^{0.66}} \times \frac{mG_{\text{解}}}{k_r a} \\ &= \frac{H_{\text{OG,解}}}{2^{0.66}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N'_{\text{OG,解}} &= N_{\text{OG,解}} \frac{H_{\text{OG,解}}}{H'_{\text{OG,解}}} = 7.403 \times 2^{0.66} \\ &= 11.7 \end{aligned}$$

吸收塔:

$$x'_1 - x'_2 = (G/L)'_{\text{吸}} (y_{1,\text{吸}} - y'_{2,\text{吸}}) = \frac{0.02 - y'_{2,\text{吸}}}{0.32} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{OG,吸}} &= \frac{1}{1 - m_{\text{吸}}(G/L)'_{\text{吸}}} \ln \frac{y_{1,\text{吸}} - mx'_1}{y'_{2,\text{吸}} - mx'_2} \\ &= 1.134 \times 10^3 (y'_{2,\text{吸}} - 0.125x'_2) = \\ &= 0.02 - 0.125x'_1 \end{aligned} \quad (11)$$

解吸塔:

$$y'_{1,\text{解}} = (L/G)'_{\text{解}} (x'_1 - x'_2) + y_{2,\text{解}} = \frac{x'_1 - x'_2}{0.1825} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} N'_{\text{OG,解}} &= \frac{y'_{1,\text{解}} - y_2}{(m_{\text{解}} x'_1 - y'_{1,\text{解}}) - (m_{\text{解}} x'_2 - y_{2,\text{解}})} \\ \ln \frac{m_{\text{解}} x'_1 - y'_{1,\text{解}}}{m_{\text{解}} x'_2 - y_{2,\text{解}}} &= \frac{1}{m_{\text{解}} (G/L)'_{\text{解}} - 1} \\ &= \frac{\ln \frac{m_{\text{解}} x'_1 - y'_{1,\text{解}}}{m_{\text{解}} x'_2 - y_{2,\text{解}}}}{0.0223x'_2} = 3.16x'_1 - y'_{1,\text{解}} \end{aligned} \quad (13)$$

联立求解式(10)~式(13)得: $y'_{2,\text{吸}} = 0.00448$, $x'_2 = 0.0358$, $x'_1 = 0.0843$, $y'_{1,\text{解}} = 0.266$ 。

P 降低、 T 升高后传质阻力在两相中分配比例的变化可见图4。吸收/解吸联合生产中, 吸收在低温下 m 很小, 属气膜控制, 体系易溶; 解吸在高温下 m 较大, 属液膜控制, 体系难溶。由此说明, 工业吸收/解吸生产中, 相平衡对膜控制阻力调控具有重要作用。该例题中, 吸收/解吸的溶剂用量和组成是两塔的联系, 因为吸收塔是气膜控制, 溶剂用量增加对气膜阻力影响不大, 虽然会使液膜阻力变小, 有利于吸收, 但是原工况下液膜在总阻力中占的比重很小, 而且原工况尾气已接近平衡状态, 增加溶剂循环量对降低吸收塔尾气作用不大; 相反, 解吸塔因溶剂循环量增大导致负荷过重, 解吸不完全, 解吸气用量显著增加。因此, 气、液物流量和设备结构等应以能够显著改变相

控制阻力为依据。

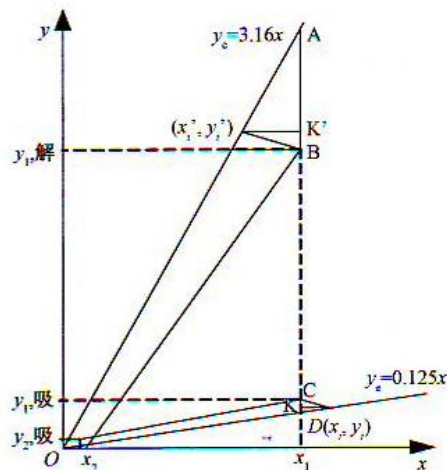


图4 传质推动力和传质阻力图示

六、结束语

传质阻力是吸收/解吸工艺计算和设备设计的关键, 综上所述, 图解分析及算例验证说明传质阻力受热力学条件和动力学条件的影响, 包括相平衡、物性、设备、流动和化学反应等, 这些因素对吸收/解吸的影响是交互作用的。对特定工况, 装置的物流量和浓度基本固定, 操作温度和压力的改变相对更容易实施, 对膜阻力的改变也更显著。工业上通常选用对温度、压力条件比较敏感的体系作为吸收剂, 以操作条件的变化引发控制阻力的改变, 实现工业目的。而通过优化设备类型、尺寸、改善气液流动状况, 以及引入化学反应等来改变工艺条件, 也是对固定相平衡条件下降低膜阻力、强化传质的根本手段。

因为气液相平衡关系比热量平衡和动量平衡更复杂, 传质系数的计算不如流动阻力系数和传热系数计算成熟。利用吸收/解吸过程的单相控制特点, 可用于单相传质系数的测定; 也可以通过控制条件改变相阻力分配比例, 使工业生产更容易实现, 达到高效、节能的目的; 膜控制阻力的概念, 设计控制热阻和流动控制阻力也可以借鉴, 这将会进一步深化传热和流动设计; 教学中给学生以系统的和全面的膜控制阻力认识, 将有助于强化学生对三传的整体理解、培养学生的工程概念。

(文字编辑: 吴文水)

参考文献:

- [1] Teramoto M, Tai S, Nishii K, Teranishi H. Effect of pressure on liquid-phase mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Journal, 1974, 8(3): 223-226. (下转第105页)

但这种教学方法易于给学生一种考试前随便看看多媒体课件就可以将物理化学知识掌握良好的假象。因此,我在教学中加强了板书的作用,并将板书作为工科物理化学教改探索的一个方向。结合我校的实际情况,我个人认为板书教学不应该被削弱,而是应该加强。因为从学情特点看,我校的学生基础薄弱,又属于少数民族教育,采用板书教学,可以对主要物理化学知识进行提要,以及对重要公式进行推导,进而引导学生思考,加深他们对所授知识的理解,抓住物理化学课程的主要知识内容,降低学习物理化学的难度。需要关注的是,多媒体课件具有形象直观的特点,在讲授较为抽象的概念上,具有独到的优势。例如,教学中将化学动力学过渡理论的势能面部分采用多媒体进行教学,学生很清晰地理解了“鞍点”“能垒”等概念。

(四) 理论教学与科研相结合

物理化学的教学中存在理论性较强、学习枯燥、学生学习兴趣不高的问题。对此,我通过现代物理化学实验的研究发展前沿引导学生。例如,同学中绝大多数在本科教育接触到物理化学后,简单地将物理化学等价为计算化学。为此,我在教学中,在学生听讲疲劳时,为调动学生积极性,将现代物理化学的科研成果作为科普小故事进行简单讲解,起到让同学们正确认识物理化学的作用,同时也起到放松上课疲劳的作用。

当今的学生思维活跃,个性鲜明。让他们学习好物理化学的一个驱动力是变被动学习为自主学习。因此,在物理化学实验中,学院针对一些研究兴趣强烈的学生开设了综合物理化学实验课程。在这一课程中,本科生被纳入到科研课题组中,和研究生

一起学习物理化学科研实验(包括课题设计、查阅文献、确定实验方法、选择仪器、测量数据、处理结果到书写实验报告)。我们发现,尽管学生学习本科实验时主动性不高,但是面对新奇的科研实验时,却表现出了较大的兴趣。因此,将物理化学的科学研究内容适时的引入到理论教学中,可以激发学生对于新事物的好奇心,诱发学生的自主学习兴趣。

四、小结

通过教学实践,我体会到在不断探索物理化学教学改革的方法时,要根据不同地域和阶段的实际学情进行调整。例如,在东部文化经济发达地区,探究式教学和形象生动的多媒体教学更加能够激发学生自主学习的动力,但是在西部欠发达地区,加强高校基础教育,使用启发式教学与传统教学方法相结合的路子,努力调动学生的学习积极性,引导学生在实践中学以致用,是培养和发展学生物理化学基础知识以及智能的有效途径。物理化学课教师应不断努力,与时俱进,因材施教,把物理化学教学质量提高到新的层次,建设成深受学生欢迎的课程。(文字编辑:吴文水)

参考文献:

- [1] 石月丹,刘春光,关晓. 浅谈“物理化学”教学改革与实践[J]. 中国电力教育,2011,(9):202-203.
- [2] 叶天旭,张子辉. 物理化学课堂教学改革探索[J]. 广州化工,2010,(1):231-233.
- [3] 姚思童,张进,刘利等. 工科物理化学课程教学改革实践[J]. 化工高等教育,2010,(2):29-31.
- [4] 周静. 物理化学教学改革的几点建议[J]. 化学工程与装备,2009,(3):127-128.

(上接第 92 页)

- [2] Haslam R T, Hershey R L, Keen R H. Effect of gas velocity and temperature on rate of absorption[J]. Industrial & Engineering Chemistry,1924,16(12):1224-1230.
- [3] 马友光,杨雄文,冯惠生等. 界面湍动对气液传质的影响[J]. 化学工程,2004,32(4):1-3.

(上接第 101 页)会自动将设备与书本知识联想起来,容易理解原理,增强自信心,浓厚的学习氛围随之形成。(文字编辑:吴文水)

参考文献:

- [1] 田萍,金力. 良好学习氛围对提高教学质量的影响[J]. 商丘职业技术学院学报,2004,(1):52-54.

- [4] 余国琮,顾芳珍. 大型塔板的模拟与板效率的研究——二维定数混合池模型[J]. 化工学报,1981,(2):97-108.
- [2] 王娟,钟秦,杜炳华. 化工原理习题课教学方法的探讨[J]. 化工高等教育,2004,(3):86-87,92.
- [3] 潘晓萍. 网络环境下学习氛围的营造[J]. 成人教育,2007,(12):69-70.
- [4] 王任芳,郑廷成,李克华. 化工原理教学中学生学习兴趣的培养[J]. 科技信息(科学教研),2008,16:9.

化工高等教育

(双月刊 1984年创刊)

第31卷 第3期 2014年6月30日出版

主管单位：中华人民共和国教育部

主办单位：华东理工大学

主 编：于建国

常务副主编：谭文松

出版发行：《化工高等教育》编委会、编辑部

地 址：上海市梅陇路130号华东理工大学343信箱

邮 编：200237

电 话：021-64252403

传 真：021-64252242

电子邮箱：gjyj@ecust.edu.cn

网 址：<http://www.hggy.chinajournal.net.cn>

印 刷：上海图宇印刷有限公司

发行范围：国内外公开发行

定价：8.80元

ISSN 1000-6168

CN 31-1043/G4