

周荣琪 雷良恒 编著

化工原理学习指引



化学工业出版社

TQ02

二, 85

化工原理学习指引

周荣琪 雷良恒 编著

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

2439/07

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理学习指引/周荣琪, 雷良恒编著. —北京: 化学工业出版社, 1996

ISBN 7-5025-1731-6

I. 化… II. ①周… ②雷… III. 化工原理-教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 08323 号

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

发 行: 新华书店北京发行所

印 刷: 北京市昌平振南印刷厂

装 订: 三河市欣荣装订厂

版 次: 1996 年 12 月第 1 版

印 次: 1996 年 12 月第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16

字 数: 400 千字

印 数: 1—2000

定 价: 24.00 元

前 言

化工原理是一门技术基础课程，其主要任务是研究化工单元操作的基本原理、典型设备的构造及工艺计算和设备选型。这门课工程性强，内容多，教与学很有讲究。

本书是作者根据多年的教学经验，在历届备课资料的基础上整理汇编而成的。全书力图以一种新颖的体系和方式，对化工原理的概念及其理解作一个清晰的阐述，对化工原理课的教与学起一定的指导作用。

本书主要包括讨论题、练习题、联系图及试题与解答等几个部分，并附有数篇教学论文。

化工原理作为一门工程性、实践性强的课程，在教学过程中安排大量的讨论课是十分必要的。本书以讨论课的内容为重点，32道讨论题遍及各章，对重点内容作了重点安排。在十多年的教学改革尝试中，这些讨论题不断地被补充和更新。出题力求联系化工生产实际背景，联系化工基本原理，并尽可能在易错、易混淆的问题上安排一些辨析，使份量轻重和难易程度恰到好处。讨论题的参考解答比较详尽，小结和注意事项对正确地掌握概念和基本原理有较强的启发和指导作用。总之，在多年的教学改革经验的积累中，讨论题已成为一套具有一定独创性和系统性的知识体系。

作者在十多年的教学实践里，一直将讨论课作为很重要的环节。课堂上坚持以学生为主体、充分调动学生的积极性是讨论课的关键。本书所附的关于讨论课和讲评课的教学论文，对于上好讨论课、提高教学水平是很有意义的。

本书的另一特色是各章内容均以联系图的形式来归纳总结。化工原理联系图，是用方块加箭头，把每一章的基本内容、主要公式简明地反映出来的一种表达方法。它表达了每一章的重点，表明了各章的脉络，以及各部分的相互关系。联系图重点突出，直观明了，简明而系统，便于查阅和记忆。

另外，本书还配备了一系列难度递进的习题和试题，共15套。每套习题均有参考解答，供读者练习和复习用。这些习题是从多年的教学练习中精选而成的，对于巩固知识会起到一定的作用。

本书对于高校化工类各专业师生教学、考研和化工企业技术人员复习、查阅化工原理基本知识将起积极作用。

作者在本书的编写过程中，得到清华大学核能技术设计研究院马栩泉教授的大力帮助，谨向他致以深切的谢意。

本书是首次汇编成册，限于作者的水平和经验，难免有错误或不足之处，恳请读者批评指正。

周荣琪 雷良恒

一九九五年七月于清华园

内 容 简 介

本书是作者根据多年教学经验,在历届备课资料的基础上整理汇编而成的一套有特色的化工原理教学参考书。

全书包括涉及化工原理课全部内容的12份联系图、32道讨论题和几十道复习题(其中7组练习题、8组试题),并附有5篇教学论文。讨论题和练习题均有详细的分析和解答。联系图简单明了,引伸处有注释。教学论文是作者有关指导思想和教学实践的总结。这些内容对领会化工原理各章的内容和实质都有重要作用。

本书的主要特点是有创新性,全书以一种新颖的体系对化工原理的内容做了系统、简捷而清晰的阐述,讨论课、联系图、练习讲评课等内容都是以往同类书籍没有过的。

本书的另一特点是理论联系实际,一些讨论题带有生产背景,对于提高学生的工程实践能力起到较好的作用。

本书讨论课、联系图的部分内容在有关高校化工类专业曾进行过交流,获得好评。

本书可作为高校化工类各专业师生的参考书,也可供考研和化工企业技术人员复习和查阅化工原理基本知识参考。

目 录

第一篇 讨 论 题

说明	1	七、精馏	51
一、流体流动	1	17. 精馏过程的相平衡	51
1. 物料衡算、热量衡算及单位换算	1	18. 物料平衡在精馏操作中的应用	53
2. 流体静力学方程的应用——油水分离器	6	19. 直接蒸汽加热与间接蒸汽加热精馏的比较	56
3. 柏努利方程的要点及应用	8	20. 回流比的概念及其对精馏过程的影响	58
4. 流体流动中各参数关系及复杂管路的计算	11	21. 有侧线精馏过程的回流比	61
二、流体输送设备	16	22. 进料状态对汽液负荷的影响	64
5. 泵安装位置的选择	16	八、吸收	67
6. 泵的调节	19	23. 吸收过程的相平衡——传质方向与传质极限	67
7. 泵的特性曲线、管道性能曲线与工作点	20	24. 最大吸收率与最小液气比	68
三、过滤	25	25. 气膜控制与液膜控制的概念及其影响因素	71
8. 过滤速度及其影响因素	25	26. 吸收与解吸联合过程	74
9. 过滤方程的应用及设备选型	27	九、塔设备	81
四、流体与颗粒的相对运动	30	27. 新型塔板结构的分析	81
10. 除尘流程的选择原则	30	28. 某厂塔设备实例分析及调整	83
11. 颗粒床层的阻力降及其影响因素	34	十、液-液萃取	86
五、传热	37	29. 萃取的基本概念	87
12. 几个传热基本概念的比较 (α 、 K 、 Δt 等)	37	30. 精馏萃取联合过程节能的估算及比较	90
13. 传热基本原理及影响因素	39	十一、干燥	94
六、蒸发	43	31. 湿空气的性质及各参数之间的关系	94
14. 蒸发器与换热器的比较	44	32. 干燥速度的影响因素分析	97
15. 蒸发经验公式的比较	46		
16. 蒸发器的设计	47		

第二篇 练习与讲评

说明	101	五、塔设备课堂练习题及答案	114
一、流体流动课堂练习题及答案	101	六、萃取课堂练习题及答案	116
二、传热课堂练习题及答案	105	七、干燥课堂练习题及答案	119
三、精馏课堂练习题及答案	107	八、练习讲评课示范	122
四、吸收课堂练习题及答案	112		

第三篇 联系图

说明	127	七、蒸发联系图	157
一、化工原理总联系图	128	八、精馏联系图	158
二、流体流动联系图	129	九、吸收联系图	163
三、流体输送设备联系图	136	十、塔设备联系图	168
四、流体通过颗粒层流动联系图	144	十一、萃取联系图	172
五、流体与颗粒间的相对运动联系图	148	十二、干燥联系图	177
六、传热联系图	153		

第四篇 试题与解答

说明	181	试题五	195
试题一	181	试题六	198
试题二	183	试题七	201
试题三	188	试题八	207
试题四	191		

第五篇 教学研究论文

一、在《化工原理》课中坚持理论与实践相结合的方向	213	“度”	223
二、在《化工原理》讨论课中注意开发学生智力	219	四、提高学生工程能力的重要教学环节——大作业	226
三、《化工原理》讨论课中的“题”与		五、在《化工原理》教学中坚持课程内容和方法的改革	228

附 录

一、常用的单位换算	232	九、蒸发潜热	241
二、干空气的物理性质	234	十、某些有机液体相对密度	243
三、水的物理性质	234	十一、1 大气压下溶液的沸点升高与浓度的关系	244
四、水在不同温度下的粘度	235	十二、泵规格	245
五、某些固体材料的导热系数	236	十三、4-7-11 型离心通风机规格	248
六、液体的粘度和密度	237	十四、某些物质的阿托因常数	248
七、气体的粘度	239	十五、几种常用体系汽液平衡数据	248
八、液体的比热容	240		

第一篇 讨 论 题

说 明

化工原理讨论课是教学改革的一种尝试,它以开发学生智力为主要目的。化工原理讨论课教学,对于培养学生分析问题的能力,锻炼运用科学语言表达问题,提高口头表达能力,都很有好处,自1980年以来,我们先后在十多届学生中进行了试验,在出讨论题、组织课堂讨论及小结三方面积累了一定的经验,取得了良好的效果。

本书收集了我们编写的大部分讨论题,共32题。这些题大致可分为三类:

1. 以化工生产实际背景编写的理论联系实际的题目;
2. 运用基本原理巩固一章内容的系列综合题(一道大题中套有若干道互相联系的小题);
3. 是非判断题(对一个重点概念并列出四、五个小题,有各种易犯的错误,通过区别正确与错误达到透彻地掌握某个概念和基本原理的目的)。每道题大致包括:题目,参考解答,小结与注意事项。这些讨论题有一定深度,有一定的独创性和系统性。

我们对于化工原理一些重点章节,如流体流动、精馏、吸收等,每章安排两次讨论课,其他章节每章安排一次讨论课。每次讨论课大致是2道讨论题。在十多年的实践中,大多数学生反映题目内容鲜明紧凑,课堂讨论组织合理,课堂气氛十分活跃,小结内容条理清楚。

一、流 体 流 动

流体流动这一章内容较多,题目灵活多变,实际应用也很广泛,因此,这一章讨论题的份量较其他章节重一些。讨论题有以下四方面的内容:

1. 物料衡算及热量衡算(包括物性计算和单位换算);
2. 流体静力学方程及其应用;
3. 流体动力学方程及其应用;
4. 阻力计算及影响阻力的因素。

本章有4道题目,这些题目分为两种类型,一类是综合性总结性题目,如第一、三两题,另一类是为搞清一个概念,用一组相互有关的、可以比较的、能启发同学展开讨论的题目,如第二、四题。

1. 物料衡算、热量衡算及单位换算

[题1] 如图1.1所示;将酒精-水混合物料送至高位槽,经预热器加热后送精馏塔进行分离。高位槽直径为1m,槽底流出管内径为0.025m。当管内流速恒定为 $u=1.85\text{m/s}$ 时,物料经预热器温度由 20°C 升高到 85°C 。进料浓度含酒精40%(质量分率)。

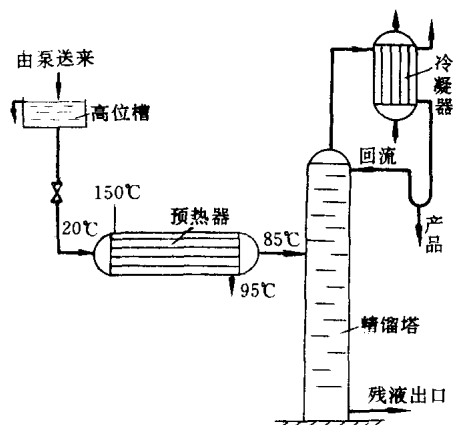


图 1.1 题 1 图

(1) 问: ①预热器混合液的平均密度为多少? ②进料处, 塔内表压为 0.1 kg/cm^2 , 绝压为多少 Pa? ③酒精-水混合液在进料温度下的比热容是多少?

(2) 预热器加热介质为 150°C 的饱和蒸汽, 冷凝水温为 95°C , 求每小时加热料液所需的加热蒸汽量为多少? (不考虑管道及预热器的热损失)

(3) 塔顶产品含酒精 90%, 冷凝后的液体一部分作产品, 一部分回流入塔, 回流量与产品量之比为 2.5:1 (质量比), 塔底残液中含酒精 5% (以上均为质量分率)。求每小时产品量、残液量和进入冷凝器的蒸汽量。

(4) 若输送泵突然损坏时, 高位槽中液位高 $Z=2\text{m}$, 小管流出速度 u (单位: m/s) 与高位槽液位高 Z (单位: m) 的关系为 $u=1.3\sqrt{Z}$, 问高位槽所存料液经多少时间流完?

(5) 泵损坏后立即在高位槽上另外引入一股进料, 进料管内径为 0.025m , 料液以 0.62m/s 的速度匀速加入, 料液从槽底部小管连续流出, 问高位槽中液位下降到 1.1m 需要多少时间?

[解] (1) ①求预热器中混合液的平均密度

预热器中混合液的平均温度:

$$t = \frac{20 + 85}{2} = 52.5^\circ\text{C}$$

由物理性质表中查得密度:

$$\rho_{\text{水}52.5^\circ\text{C}} = 989 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{乙醇}52.5^\circ\text{C}} = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_{\text{水}}} + \frac{a_2}{\rho_{\text{乙醇}}} = \frac{0.6}{989} + \frac{0.4}{800} = 0.0011$$

$$\text{平均密度 } \rho_m = 903.9 \text{ kg/m}^3$$

②求进料处塔内的绝对压力 $P_{\text{绝压}}$

$$P_{\text{绝压}} = \text{表压} + \text{大气压} = (0.1 + 1.033) \text{ kgf/cm}^2$$

$$= 1.133 \times 9.81 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$= 1.11 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.11 \times 10^5 \text{ Pa}$$

③求混合液的比热容

查手册, 在 85°C 下各物质比热容如下:

$$C_{P,\text{水}} = 1 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K} = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{P,\text{乙醇}} = 0.715 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K} = 2.99 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{混合物比热容 } \bar{C}_p = \sum_{i=1}^n C_{Pi} a_i = 0.715 \times 0.4 + 1 \times 0.6 = 0.886 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K} \\ = 3.72 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(2) 预热器的热量衡算

体系: 预热器

基准: 时间: 1h

物态: 0°C 液态

在稳定流动时每 1h 流过预热器的质量流量：

$$F = \rho u S = 904 \times 1.85 \times \frac{\pi}{4} (0.025)^2 \times 3600 = 2960 \text{ kg/h}$$

进入预热器的热量：

20℃时酒精-水混合料液比热为 $0.824 \text{ kcal/kg} \cdot \text{K} = 3.446 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

蒸汽带入热量 $Q'_1 = G \cdot i_1 = 2750G \text{ kJ/h}$

(i_1 —150℃的饱和水蒸气的焓)

料液带入的热量 $Q'' = FC\Delta t = 2960 \times 3.446 \times 20$
 $= 204300 \text{ kJ/h}$

离开预热器的热量：

冷凝水带出之热量 $Q'_2 = G \cdot i_2 = 398G \text{ kJ/h}$

(i_2 —95℃水的焓)

加热后料液带出之热量 $Q'' = 2960 \times 3.70 \times 85 = 933000 \text{ kJ/h}$

进入热量 = 离开热量

$$2750G + 204300 = 398G + 933000$$

蒸汽流率 $G = \frac{933000 - 204300}{2750 - 398} = 310 \text{ kg/h}$

(3) 求精馏塔塔顶产量 D ；塔底产量 W

体系：精馏塔及冷凝器（见图 1.2）

基准：1h

全塔物料衡算：

$$F = D + W$$

$$Fa_F = Da_D + Wa_w \quad (\text{易挥发组分})$$

$$W = \frac{F(a_D - a_F)}{a_D - a_w} = \frac{2960(0.9 - 0.4)}{0.9 - 0.05} = 1740 \text{ kg/h}$$

$$D = 2960 - 1740 = 1220 \text{ kg/h}$$

求进入冷凝器的蒸汽量 V ：

体系：冷凝器，见图 1.2 虚线

基准：1h

物料衡算： $V = L + D$

$$L/D = 2.5$$

$$V = 3.5D = 4270 \text{ kg/h}$$

(4) 求高位槽中液体流完所需时间 t

以槽为体系

基准：1h

高位槽流动为不稳定流动。设某瞬时液面高度为 Z ，经过 dt 时间，下降 dZ 。

根据图 1.3 列衡算式

进入量 — 流出量 = 槽的液体积累量

$$0 - \frac{\pi}{4} d^2 \times 1.3 \sqrt{Z} \times \rho \times dt = \frac{\pi}{4} \Phi^2 dZ \cdot \rho$$

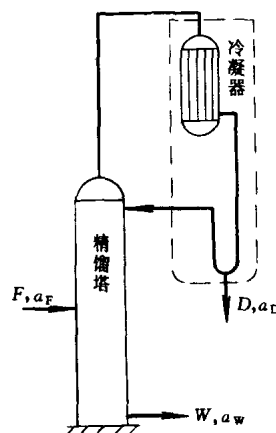


图 1.2

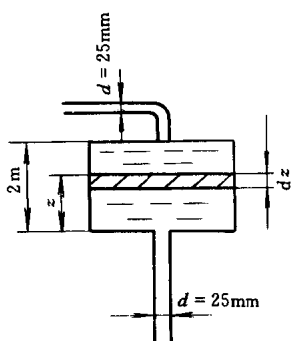
$$\frac{dZ}{\sqrt{Z}} = -\frac{d^2}{\Phi^2} \times 1.3 \times dt$$

当时间从 $0 \rightarrow t$ 时, 液面从 $2 \rightarrow 0\text{m}$

$$\begin{aligned} \int_2^0 \frac{dZ}{\sqrt{Z}} &= -\frac{d^2}{\Phi^2} \times 1.3 \times \int_0^t dt \\ t &= -\frac{\Phi^2}{d^2 \times 1.3} \times \frac{1}{(-\frac{1}{2} + 1)} Z^{-\frac{1}{2} + 1} \Big|_2^0 \\ &= \frac{2\Phi^2}{d^2 \times 1.3} \sqrt{2} = 3480\text{s} = 0.967\text{h} \end{aligned}$$

(5) 若高位槽中有进有出, 出入不平衡, 此类问题亦为不稳定过程的物料衡算:

进入量 - 流出量 = 槽内流体积累量。取高位槽为体系 (图 1.3); 基准: 1h 。在 dt 时间内



$$\frac{\pi}{4} d_{\text{管}}^2 u_{\text{进}} dt - \frac{\pi}{4} d_{\text{管}}^2 u_{\text{出}} dt = \frac{\pi}{4} \Phi^2 dZ$$

$$d_{\text{管}}^2 (u_{\text{进}} - u_{\text{出}}) dt = \Phi^2 dZ$$

$$dt = \frac{\Phi^2 dZ}{d_{\text{管}}^2 (0.62 - 1.3 \sqrt{Z})}$$

求下降到 1.1m 所需时间, 积分限 $t: 0 \rightarrow t$; $Z: 2 \rightarrow 1.1$

$$\int_0^t dt = \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} \int_2^{1.1} \frac{dZ}{(0.62 - 1.3 \sqrt{Z})}$$

解法一:

图 1.3

用变量置换法求解

设 $0.62 - 1.3 \sqrt{Z} = y$

则 $dy = -1.3 \times \frac{1}{2} Z^{-\frac{1}{2}} dZ$

$$Z^{\frac{1}{2}} = \frac{0.62 - y}{1.3}$$

$$\begin{aligned} dZ &= -\frac{2}{1.3} Z^{\frac{1}{2}} dy = -\frac{2}{1.3} \left(\frac{0.62 - y}{1.3} \right) dy = \frac{-2(0.62 - y)}{1.3^2} dy \\ &= -1.18 (0.62 - y) dy \end{aligned}$$

将 dZ , $Z^{\frac{1}{2}}$ 代入以上积分式

$$\int_0^t dt = \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{-1.18(0.62 - y) dy}{y}$$

重新确定积分限

当 $Z = 2\text{m}$, $y_1 = 0.62 - 1.3 \sqrt{2} = -1.22$

当 $Z = 1.1\text{m}$, $y_2 = 0.62 - 1.3 \sqrt{1.1} = -0.74$

$$\begin{aligned} \int_0^t dt &= \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} \int_{-1.22}^{-0.74} \frac{-1.18(0.62 - y) dy}{y} \\ &= \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} 1.18 \int_{-1.22}^{-0.74} \frac{(y - 0.62)}{y} dy = \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} 1.18 \int_{-1.22}^{-0.74} \left(1 - \frac{0.62}{y} \right) dy \\ &= \frac{\Phi^2}{d_{\text{管}}^2} 1.18 \left[(-0.74 + 1.22) - 0.62 \ln y \right]_{-1.22}^{-0.74} \\ &= \frac{1.18}{0.025^2} \left[0.48 - 0.62 \ln \frac{0.74}{1.22} \right] \end{aligned}$$

$$= 1490\text{s} = 0.414\text{h}$$

解法二:

$$\begin{aligned} \text{由 } \int_0^{\infty} dt &= -\frac{\Phi^2}{d^2_{\text{管}}} \int_2^{1.1} \frac{2\sqrt{Z} d\sqrt{Z}}{1.3\sqrt{Z} - 0.62} \\ &= -\frac{\Phi^2}{d^2_{\text{管}}} \int_2^{1.1} \frac{2/1.3(1.3\sqrt{Z} - 0.62 + 0.62)}{1.3\sqrt{Z} - 0.62} d\sqrt{Z} \\ &= -\frac{\Phi^2}{d^2_{\text{管}}} \times \frac{2}{1.3} \left[\sqrt{Z} \Big|_2^{1.1} + \frac{0.62}{1.3} \ln(1.3\sqrt{Z} - 0.62) \Big|_2^{1.1} \right] \\ &= -\frac{1}{0.025^2} \times \frac{2}{1.3} \left[(\sqrt{1.1} - \sqrt{2}) + \frac{0.62}{1.3} \ln \left(\frac{1.3\sqrt{1.1} - 0.62}{1.3\sqrt{2} - 0.62} \right) \right] \\ &= 1480\text{s} = 0.411\text{h} \end{aligned}$$

答案有些误差,是由于取三位有效数字造成的。

[小结] 化工基本计算的公式、概念虽然简单,但要使计算结果正确并不容易,在进行化工基本计算时应注意以下几个问题:

1. 正确选用单位,正确使用物性数据

如果题目所给单位或查阅手册所得数据的单位不属同一单位制时,应先把它们换算成同一单位制。同一道题应采用一种单位制(经验公式除外),并贯彻到底,不能将不同单位制的单位混合使用。例如本题第(2)问中从手册中查得比热容数值是 $0.824\text{kcal/kg} \cdot \text{K}$,在求加热蒸汽量 G 时采用国际单位制,这时就不能将上面查得的比热容值直接代入计算,而必须将其换算成国际单位 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 才能得到正确结果。

密度、比热容、潜热等物性都与温度有关,所以在利用它们进行计算时,必须注意它们的值是在什么温度下的。例如本题计算料液带入热量时要用 20°C 下的比热容值,而计算热料液带出之热量时则要用 85°C 下的比热容值,否则计算结果误差会很大。

2. 正确地选择衡算系统

正确地选择系统对于计算是否简便有很大关系。取得不好会使计算十分复杂,并容易出错。正确选择系统一般应作到:(1)所选系统的进出物料中包括所求的未知量;(2)对所选系统建立的物料平衡方程中包括尽可能少的未知数,最好就是所求的一个未知量。例如本题第(3)问求塔顶、塔底产物的产量 D 、 W 时要将精馏塔及冷凝器合在一起作为系统;而求上升蒸汽量 V 时则只要以冷凝器为系统即可。

3. 正确选择衡算基准

在解题一开始就应当指明所用的基准。在一个物料衡算(或热量衡算)式中不能采用两个不同的基准。

在连续操作中,物料不断地送入和排出系统。如果计算的时间不一致,便无法对各物料进行比较。通常以 1h 为基准,间歇操作通常以一次或一批加入的某种物料为基准。

对热量衡算,为要确定物料的焓值,还必须定出基准温度,当有相变时应规定基准状态。通常以 273K 液态为基准。

4. 关于非稳态物料衡算

当系统内物料量随时间而变化,系统中有物料积累时是非稳态过程,非稳态物料衡算的关键是找出物料平衡式中的各项与时间的关系。非稳态物料衡算问题所列方程是微分方程,在解微分方程时特别要注意积分上下限的对应关系,例如本题第(4)问中时间这个变量从 $0 \rightarrow t$,则液面高度必须与之对应为从 $2 \rightarrow 0$,若写成从 $0 \rightarrow 2$,则计算结果就完全错了。

2. 流体静力学方程的应用——油水分离器

[题 2] 油水混合物互不相溶，油的密度为 800kg/m^3 ，水的密度为 1000kg/m^3 ，混合液以很小的流量流过容器，流体在管中流动阻力可以忽略，油水将分层。问：

- (1) 使油水界面在顶部液面以下 1m 处，导管口应放在什么位置 (图 1.4a)?
- (2) 在图 1.4b、c、d 三种情况下，油水界面距顶部液面距离 h 各为多少米?

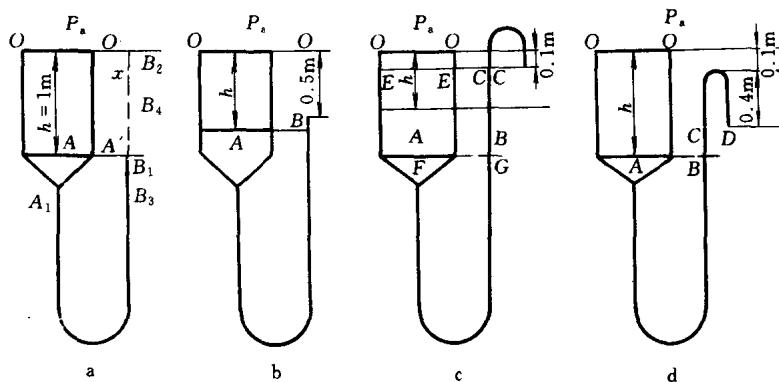


图 1.4 题 2 图

[解] (1) 要使油水界面距顶部液面 $h=1\text{m}$ ，导管口距容器顶面 $x=1$ ， $x=0$ ， $x>1$ ， $0<x<1$ 四种情况何者错误，何者正确？为什么？

答：前三种不对，最后一种正确。分析：设容器顶端 $0-0$ 面为基准面，其高度为 0 （由上至下为正值），容器顶端压强为 P_a （绝压）。

①若 $x=1$ ，即导管口在图 1.4a 中 B_1 处，那么 AB_1 就是等压面，应 $P_A=P_{B_1}$ 。

但实际上 $P_{B_1}=P_a$

并由静力学方程 $P_A=P_a+\rho_o gh$

比较上两式，得出 $P_{B_1}\neq P_A$ ， $P_A>P_{B_1}$ ， $\therefore$ 为要保持 $h=1\text{m}$ ，使 $x=1$ 的假设是错误的，或者反过来说，若导管口距容器顶部等于 1m ，则容器中油水界面不可能维持在 1m 处，界面必然会下移。

②若 $x=0$ ，即导管口在 B_2 处，根据连通器原理应 $P_{B_1}=P_A$

但实际上 $P_A=P_a+\rho_o hg$

$$P_{B_1}=P_a+\rho_w hg$$

当 $h=1$ 时，比较上二式， $\because \rho_o < \rho_w$

$$\therefore P_{B_1}\neq P_A, \quad P_{B_1}>P_A$$

$\therefore x=0$ 的假设也是错误的

换句话说，若导管口与容器顶部一样高，则容器中的油水界面也不可能维持在 1m 处，此时，容器中将不分相，即没有油相，只有单一的水相。

③若 $x>1$ 即导管口在 B_3 处，根据连通器原理 B_3A_1 为等压面，此时应有 $P_{A_1}=P_{B_3}$ 而实际上 $P_{B_3}=P_a$

$$P_{A_1}=P_a+\rho_o gh+\rho_w gh_{B_1B_3}$$

$$\text{比较以上二式可知 } P_{B_3}\neq P_{A_1}, \quad P_{A_1}>P_{B_3}$$

$\therefore x>1$ 的假设也不对。

由以上分析, 要使 $h=1\text{m}$, x 不可能等于 0, 不可能等于 1, 也不可能大于 1, 故导管口与容器顶部距离的范围应是 $0 < x < 1$

求 x 的值:

找等压面 AB_1 , $P_A = P_{B_1}$, 由静力学方程:

$$P_A = P_a + \rho_o h g$$

$$P_{B_1} = P_a + (1-x) \rho_w g$$

联立上二式, $P_a + 800g = P_a + (1-x)1000g$, 得 $x = 0.2\text{m}$ 。即导管口距容器顶部以下 0.2m 处时, 容器中油水分界面正好维持在距顶部 1m 处。

(2) 图 1.4b 中 AB 为等压面

$$P_A = P_a + \rho_o h g = P_a + 800h g$$

$$P_B = P_a + \rho_w g h_{BB_1} = P_a + 1000g (h - 0.5)$$

联立以上二式, 得

$h = 2.5\text{m}$ 。即导管口距容器顶部 0.5m 时, 容器中油水分界面与顶部距离为 2.5m , 如果容器高度为 1.5m , 则在容器上将看不见界面, 界面会移到细管中。

(3) 图 1.4c 中 AB 为等压面

$$P_A = P_a + \rho_o h g = P_a + 800h g$$

$$P_B = P_C + (h - 0.1) \rho_w g$$

$$\because P_C = P_a$$

$$\text{联立上二式, } P_a + h800 = P_a + (h - 0.1) 1000$$

$$800h = 1000h - 100$$

$$\text{得 } h = 0.5\text{m}$$

即当导管口距容器顶部 0.1m 时 (如图 1.4c 所示), 则容器内油水界面在距容器顶端 0.5m 处。

(4) 图 1.4d 中 AB 为等压面

$$P_A = P_a + h \rho_o g$$

$$P_B = P_C + h_{CB} \rho_w g$$

$$P_C = P_a, P_D = P_A, h_{CB} = h - 0.5, \text{由连通器原理, } P_A = P_B$$

$$P_a + h \rho_o g = P_C + h_{CB} \rho_w g = P_a + (h - 0.5) \rho_w g$$

$h = 2.5\text{m}$, 与第 (2) 问结果相同, 可见, 虽然导管口所放方式不同 (见图 1.4b, d), 但油水界面是相同的。

[小结]

1. 应用流体静力学方程的关键是正确选取流体内的等压面, 其基本概念是在连续、静止、均一的流体中, 同一水平面上的静压强相等。例如图 1.4c 中 AB 是等压面, CD 也是等压面, 但 EC 却不是等压面, $E-E$ 面虽与 $C-C$ 面等高, 但却不是等压面, 因为从 O 面至 C 面的流体虽然连续但不是均一流体, 而是二种流体。所以等高面不一定是等压面。如果找错了等压面, 联立二个静力学方程所得到的答案就是错误的。

2. 当已知流体内任一点的压强时, 可由静力学方程来求流体内另一点的压强。求解的基本步骤是: ①定基准面; ②列静力学方程; ③解方程。

在用连通器原理计算时, 所取等压面的位置 (指高度) 可以不同, 这仅涉及计算是否简

便,而不影响计算结果。例如图 1.4c 中等压面可以不取 AB 面而取 FG 面,如果容器高度 OF 已知,那么用 FG 面为等压面同样可求出 h 值,但要繁杂一些。此外,计算时应注意各物理量的单位制要统一。

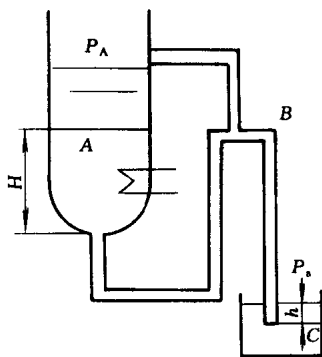


图 1.5

3. 静力学方程反映静止流体内压强 P 、位置 h 、密度 ρ 之间的关系。此方程在工程上常有二方面的应用: ①求设备间的相对位置,如确定油水分层器的界面以及测量液封高度等; ②测压差。举以下例子说明测液封高度: 某塔底部用蛇管加热,采用 Π 形管与塔内蒸汽空间有一细管连通,如图 1.5 所示,假设出料量很小,塔内流体可近似为静止,要使釜内液面保持 H 米高,问 Π 形管应设计多高? 由连通器原理很容易定出 Π 形管顶应距塔底 H 米高,塔内压增大可能将釜液压出 Π 形管,为了防止塔内蒸汽由连通管逸出,应在 Π 形管出口处装一液封,问液封高度 h 至少应为多少? 用静力学方程和连通管原理可知首先必须使管段 BC 内液面压至 C 点 (见图 1.5), C 点压强 $P_C = P_A$, 由静力学方程

$$P_A = P_C = P_a + \rho_L gh$$

故液封的最小高度 $h = \frac{P_A - P_a}{\rho_L g}$ 。

[应注意的问题]

1. 本讨论题供一次讨论课用,约 2 学时。在组织讨论时,可先讨论题 2,后讨论题 1,因为题 2 是就单个概念,通过分析比较使同学加深理解的题目,而题 1 则是一道综合性的题目,对解决实际生产问题或进行化工设计会有所启发,此题比较实际,但比较繁杂,例如在计算时有时必须考虑温度对物性数据的影响,否则会带来很大的误差。又如在实际流动中会有不稳定流动的情况,在处理实际问题或设计计算时,要先分析一下是属于稳定流动还是非稳定流动,这样才能正确列出物料衡算方程。可要求学生在讨论课前先做第一道题的有些内容,讨论课上,就几种容易出现的错误和问题进行分析,例如对同学取体系、取基准的几种不同取法进行比较,指出谁的做法更为简单正确,指出化工计算作为一种化工基本训练,要求准确、熟练。希望同学不要怕繁琐,而要有一套正确的步骤。这是很有实用价值的工作。

2. 如果将第 2 题变为一道选择题,即使 $h=1\text{m}$ 时,选择 (a) $x=1$, (b) $x=0$, (c) $x>1$, (d) $0<x<1$ 四种情况中哪种正确? 在正确答案上打对勾 ($\checkmark$)。那么同学们的答案往往是五花八门的。因此我们设计了这道简单的题目,组织同学讨论,启发同学分析哪个答案正确,哪个错误,关键是要启发同学讲出为什么。为了帮助同学掌握使用静力学方程的条件及解题思路,在讨论中可以再出几个小思考题。例如: (a) 为什么要强调混合液以很小的流量流过容器? (b) 在第 (1) 问中要使 $h=1$ 时, AB_1 面、 AB_2 面、 AB_3 面是否为等压面? 为什么? (c) 在图 1.4c 中选 EC 为等压面和选 AB 为等压面是否都行,为什么?

通过讨论,要使同学们明确如果选错了等压面,前提错了,即使用正确的静力学方程求解,也不会得到正确的结果。

3. 柏努利方程的要点及应用

[题 3.1] 图 1.6 所示的马利奥特容器,内径为 500mm,其上端封闭。在容器侧面接一通大气的小管 B ,流体从下端一直径 10mm 的小管 C 流出。流体流出后容器上端造成了真空,

外界的空气可以从 B 管吸入, 补充容器内的真空区。

设流体的密度为 1000kg/m^3 , 流体由小管流出时有阻力, 其孔流系数为 0.8 。

(1) 容器上方的压力为多少, $C-C$ 截面上压力为多少? 当液面下降了 200mm 时, 问容器上方压力为多少? 此时 $C-C$ 截面上压力为多少? 为什么?

(2) 从液面 $O-O$ 降到 $C-C$ 面, 出口管 C 流出速度的变化趋势是什么? 流出时间怎样计算, 是多少?

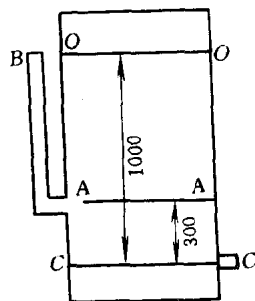


图 1.6 题 3.1 图

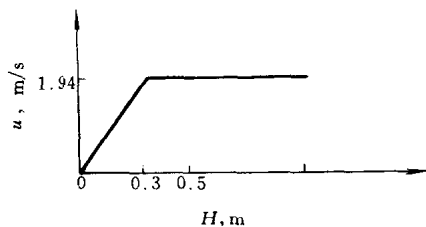


图 1.7

[解] (1) 在流体流出的过程中, 液面上方压力逐渐上升, 所以液面上方压力始终在变化, 但 $A-A$ 压力恒为大气压。最初 $P_{\text{上方}} = P_A - \rho gh = 101300 - 1000 \times 0.7 = 94433\text{Pa}$, $C-C$ 处的压力 $P_C = P_{\text{大气压}} + 1000 \times 9.81 \times 0.3 = 104243\text{Pa}$, 当液面下降了 200mm 的瞬间 $P_{\text{上方}} = P_A - \rho gh = \text{大气压} - 1000 \times 9.81 \times 0.5 = 96395\text{Pa}$, 此时 $C-C$ 处压力没有变化, 仍为 104243Pa 。

(2) 容器内水的流动极为缓慢, 所以容器内的流速近似为零, 可以看作为静止流体, 此时在 $A-A$ 截面以上各截面的总势能相等。故水的流出速度为恒定, 可由机械能守恒定律求出。取 $A-A$ 和 $C-C$ 截面, 列机械能守恒 (柏努利) 方程

$$Z_{AG} + \frac{u_A^2}{2} + \frac{P_A}{\rho} = Z_{CG} + \frac{u_C^2}{2} + \frac{P_C}{\rho} + h_{A-C}$$

$$\frac{P_A}{\rho} = \frac{P_C}{\rho}, \quad u_A = 0$$

$$u_C^2 = 2(Z_A - Z_C)g - h_{A-C}$$

$$u_C = C \sqrt{2g(Z_A - Z_C)} = 0.8 \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3} = 1.94\text{m/s}$$

液面从 $A-A$ 降到 $C-C$ 是一个不稳定过程, 容器内液面上压力为大气压而位头在不断地变化, 利用不稳定流动, 当液面距 $C-C$ 面为 h 时列柏努利方程, 得

$$u_0 = C \sqrt{2gh} = 0.8 \sqrt{2gh}$$

到流体下降到 $A-A$ 截面以下, 速度与 $\sqrt{h}$ 成正比, 随着液面下降, C 管的流出速度不断下降。

综上所述, 可得流速 u 与液面高度 H 的关系如图 1.7 所示。计算流出时间应考虑分两段进行:

等速阶段即从 $O-O$ 到 $A-A$ 面所需时间为 τ_1 :

$$\tau_1 = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 (Z_0 - Z_A)}{u_0 \times \frac{\pi}{4} d^2} = \frac{0.5^2 (1 - 0.3)}{0.01^2 \times 1.94} = 902.1\text{s}$$

减速阶段即从 A—A 到 C—C 面所需时间为 τ_2 ：

列微分物料平衡方程式：

$$-\frac{\pi}{4}D^2dh = u_0 \frac{\pi}{4}d^2d\tau$$

$$d\tau = \frac{-D^2dh}{d^2 \times 0.8 \sqrt{2gh}} = \frac{-0.5^2dh}{0.01^2 \times 0.8 \sqrt{2 \times 9.81} \sqrt{h}}$$

$$\tau_2 = 2 \times 688.2 \times \sqrt{0.3} = 753.8s$$

$$\tau_{总} = \tau_1 + \tau_2 = 902.1 + 753.8 = 1655.9s = 0.46h$$

[小结]

1. 本题的目的在于了解稳定与不稳定流动的特点及取截面的技巧。当液面高于 A—A 面，在 A—A 面以上流体各点的静压能和位能之和为常数，因而在列柏努利方程求流速时选 A—A、C—C 截面最方便。

2. 一旦液面下降到 A—A 以下，则流体随着液面的下降各点总动能不是常数，此时为不稳定流动，要列微分式来求流速和流完所需的时间。

3. 马利奥特容器由于具有恒速流出的特性，因而常用作稳定加料装置。

[题 3.2] 用一虹吸管将 20℃ 的苯（密度为 800kg/m³）从池中吸出，虹吸管用直径为 d 的玻璃管制成，装置如图 1.8。设管中流动按理想流体处理，假设池的直径很大，流动时液面不变。

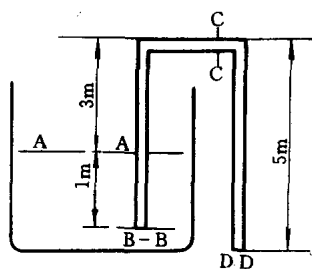


图 1.8 题 3.2 图

(1) 水在管中流动时，比较 A—A、B—B、C—C、D—D 面压力大小？

(2) 管中流速大小与哪些因素有关？欲增加管中流速，可采取什么措施？管中流速的极限值是多少？

[解] (1) A—A、D—D 截面处压力为大气压，B—B 处压力为大气压加上 1m 苯柱，而 C—C 截面为负压，当虹吸管流动阻力忽略不计时，C—C 面压力为 -3m 苯柱（表压）。因此压力最低点在 C—C 面处。在输液时，要注意当压力太低时，容易产生气缚而中断输液。

(2) A—A、D—D 面的位差与流动流体的物性等因素有关，如果是真实流体，还与流动时管道阻力有关，故增加管中流速可以用增加位差或改变管子材料等方案来实现。在本题所设范围内，增加管长最简单可行。

列 A—A 与 D—D 面柏努利方程，得

$$u_D = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 2} = 6.26m/s$$

求 C—C 处的压力：

$$gZ_C + \frac{P_C}{\rho} + \frac{u_C^2}{2} = gZ_D + \frac{P_D}{\rho} + \frac{u_D^2}{2} + \Sigma h_f$$

根据假设 $\Sigma h_f = 0$

$$u_C = 6.26m/s, u_D = 0$$

$$\frac{P_C}{\rho} = \frac{P_D}{\rho} + g(Z_D - Z_C) - \frac{u_C^2}{2}$$

$$P_C = \text{大气压} - 9.81 \times 800 \times 5 - \frac{6.26^2}{2}$$