

邓传芸 范文元 编著



化工单元过程

HUAGONGDANYUANGUOCHENG

安徽教育出版社

化工单元过程

邴传芸 范文元 编著

安徽教育出版社

前 言

本书重点在于阐述概念，并适当地进行公式推导，讨论其应用，力求做到分析问题明确，正确解决化工过程的计算问题。关于题解部分，一个题目往往可以从不同的角度进行分析并解答，本书所给出的解题方法，不能说是最好的和唯一的，仅供参考。

本书一、二章由范文元同志编写，三、四、五、六章由邓传芸同志编写。全书习题和题解由邓传芸同志整理并选解，参加部分解题工作的还有李宜柱和昂盛新两同志，许煜汾同志参加了“传热过程”的部分内容编写工作。

本书各章内容均由天津大学化工系王绍亭教授审校、定稿。书中的插图由虞文良同志绘制。在此一并深表谢意。

由于编者水平有限，经验不足，错误和欠妥之处，在所难免，诚恳希望读者指正。

序

由邓传芸、范文元两同志合编的《化工单元过程》一书终于问世了。近几年来,许多高等化工院校的毕业生都希望考取研究生,他们在复习《化工原理》课程时,往往遇到很多困难。第一是无合适的教材可循;第二是即使有了自己认为合适的教材,但大多篇幅过于冗长,复习颇耗时日;第三是《化工原理》课程的考题中,习题占有很大的比重,如何寻找典型的习题作为复习的依据是一件颇为困难的事情。

本书就是在这样的情况下,为满足广大读者的需要而编写的。它具有如下两个特点:第一是篇幅较短,又突出重点,作者根据多年的教学经验,只编写了流体流动、传热过程、气体吸收、液体蒸馏、液液萃取,固体干燥六章,掌握了这六章的内容,可以说已掌握了《化工原理》课程内容的百分之七十至八十。第二是题解部分,作者花了很大力气收集了1982年至1983年全国部分高等院校研究生《化工原理》课程的考题,并作了选解。这样的考题和作出的题解自然具有一定的典型性。

我通览了本书的全部内容,认为这本书还可以作为化工院校本科生、化工领域工程技术人员的一本参考书。

由于作者在编写过程中,时间仓促,难免有不足之处,但能够编写出这样一本较为新颖的书,也是难得的,故乐为序。

天津大学化工系教授 王绍亭

目 录

前 言	i
序	ii
第一章 流体流动	1
1-1 欧拉(Euler)平衡微分方程	3
1-2 流体静力学基本方程	5
1-3 静压力的测量	6
1-4 连续性方程	8
1-5 柏努利方程	9
1-6 流体流动中的动量守恒	14
1-7 均匀流方程	16
1-8 圆管中的层流流动	19
1-9 圆管中湍流速度分布的经验式	22
1-10 湍流时沿程损失的经验式——因次分析法	23
1-11 局部阻力计算	29
1-12 流体边界层	30
1-13 管路计算中试差法的应用	37
1-14 并联管路的流量分配问题	40
1-15 分支与汇合管路的计算	42
1-16 管路特性曲线——图解算法	46
1-17 不稳定流动的物料衡算	56
1-18 测速管(皮托管)	61
1-19 孔板流量计	63

1-20	文丘里流量计	65
1-21	转子流量计	66
	例题与习题	68
第二章	传热过程	109
2-1	傅立叶定律	111
2-2	平壁的稳定热传导	112
2-3	圆筒壁的稳定热传导	115
2-4	空心球壁的稳定热传导	118
2-5	具有内热源的热传导	119
2-6	牛顿冷却定律	120
2-7	传热膜系数 α 的计算	121
2-8	热辐射的基本定律	129
2-9	物体之间的辐射换热	140
2-10	传热基本方程	151
2-11	壁温的计算	165
2-12	比热和传热系数改变时传热面积的计算	166
2-13	换热器的 $e-NTU$ 图解算法	167
2-14	热损失的计算	175
2-15	热绝缘层厚度的计算	177
2-16	采用饱和蒸气间歇加热液体	180
2-17	反应釜内液体的加热与冷却	182
2-18	采用饱和蒸气加热循环液体	186
	例题与习题	192
第三章	气体吸收	219
3-1	双膜理论	223
3-2	相际平衡关系	226
3-3	传质过程的定律与计算	232

3-4	吸收过程传质速率方程	245
3-5	吸收塔的计算	255
3-6	板效率	293
	例题与习题	293
第四章	液体蒸馏	323
4-1	双组份混合液蒸馏过程的相平衡	325
4-2	蒸馏过程	328
4-3	精馏塔的计算	332
4-4	解析法求理论塔板数	342
4-5	带冷凝器和直接蒸气加热时理论板数的求算法	354
4-6	带侧线出料的精馏塔	357
4-7	填料精馏塔的计算	362
4-8	实际板数和板效率	363
4-9	板式塔的负荷性能图	373
	例题与习题	375
第五章	液液萃取	398
5-1	基本概念	399
5-2	单级萃取过程的计算	401
5-3	多级错流萃取过程的计算	404
5-4	多级逆流萃取过程的计算	408
5-5	最小溶剂耗用量 S_{min}	415
5-6	萃取塔的计算	418
	例题与习题	422
第六章	固体干燥	432
6-1	概述	434
6-2	湿空气的性质和湿度图	436
6-3	干燥过程的物料衡算和热量衡算	447
6-4	干燥时间的计算	456

6—5	增湿法与减湿法	466
6—6	干燥过程中空气与物料接触的方式	468
6—7	空气干燥器的计算	470
	例题与习题	474
附录		488
一、	单位换算关系	488
二、	准数关系及意义	493
三、	气相压缩因子 Z 的计算	496
四、	理想混合液相对挥发度的估算	498
五、	蒸馏塔性能参数	499
六、	塔顶、塔底产品中，轻、重组份组成的近似估算法	501
七、	恩德伍德求最小回流比的理论推导	503
八、	确定文丘里或孔板直径的计算图	506
九、	平均值	509
主要参考文献		515

第一章 流体流动

本章符号说明

A	积累量	kg
C_v, C_r	孔流系数	无因次
D	出料量	kg
D'	出料速率	kg/s, kg/h
d	直径	m
d_0	孔径	m
F	进料量	kg
F'	进料速率	kg/s, kg/h
G	重力	N
g	重力加速度	m/s ²
h	高度, 深度	m
H_e	泵的有效压头	m
H_f	流动系统内的压头损失	m
$\sum h_f$	摩擦损失能量	J/kg
J	压力坡度	
L	长度因次	
l	长度	m
l_e	当量长度	m
m	质量	kg

p	压力	$\text{N/m}^2, \text{kN/m}^2$
R	液柱压差计读数	m
R	半径	m
Re	雷诺准数	
r	半径	m
S	截面积	m^2
T	绝对温度	K
u	流速	m/s
u^*	摩擦速度	m/s
u_{\max}	最大流速	m/s
u_r	点速度	m/s
u_s	外流速度	m/s
V	体积流量	$\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^3/\text{h}$
W_e	泵的有效功	J/kg
x, y, z	空间坐标	
x_c	临界距离	m
y	距壁面距离	m
z	高度	m
δ	边界层厚度	m
δ_s	层流内层厚度	m
μ	粘度	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
ν	运动粘度	m^2/s
ρ	密度	kg/m^3
e	壁面粗糙度	m
ζ	阻力系数	无因次
λ	摩擦系数	无因次

τ	剪应力	N/m^2
τ_w	壁面剪应力	N/m^2

1-1 欧拉 (Euler) 平衡微分方程

在平衡状态的流体中任取一微元六面体 $dV = dx dy dz$ (图1-1), 因流体处于平衡状态, 故 x 、 y 及 z 轴 诸力的代数和为零。

作用于静止流体上的力有重力和流体静压力。

首先研究沿 z 轴的各种力。

设流体的密度为 ρ , 则此微元六面体的重量作用于底面积上的力应为

$$f_1 = -mg = -\rho g dV \\ = -\rho g dx dy dz$$

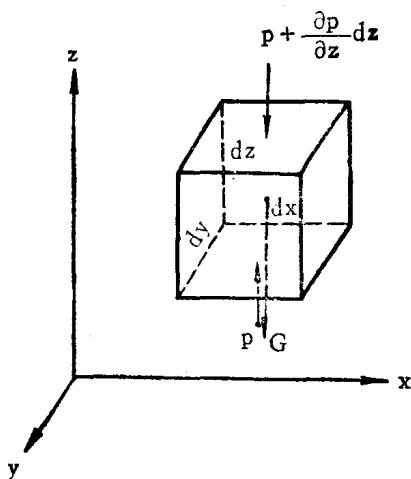


图1-1 静止流体中的微元六面体

式中负号系因力的作用方向向下, 与所取的 z 轴正方向相反。

另外作用于底面积的有流体静压力 p , 作用面积为 $dx dy$, 因此作用于底面积的总压力为

$$f_2 = p dx dy$$

作用于顶面积的静压力，由于距离变化了 dz ，而发生了静压力的变化，此变化应为压力随此距离的变化率 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 乘距离的变化 dz 。静压力的作用面积仍为 $dx dy$ ，故顶面积所受的力应为

$$f_2 = -\left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz\right) dx dy$$

此三力的代数和应为零。

$$\sum f_z = f_1 + f_2 + f_3 = -\rho g dV + p dx dy$$

$$-\left(p dx dy + \frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz\right)$$

$$= -\rho g dV - \frac{\partial p}{\partial z} dV = 0$$

$$\text{故 } \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1)$$

此式表示当流体的密度愈大时，静压力随垂直距离的变化率 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 亦愈大，负号表示某点的位置愈高时，即 z 值愈大，其静压力愈小。

同理，列出作用于 x 及 y 轴诸力的平衡式可得

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\text{及 } \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

此三式称为欧拉平衡微分方程。表明了此微元六面体在流体

中的平衡条件。为了能够得到在整个静止流体内静压力分配规律的方程，还必须将(1)、(2)和(3)这一组微分式积分，以便得到流体静力学基本方程。

1—2 流体静力学基本方程

在欧拉平衡微分方程中偏导数 $\frac{\partial p}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial p}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 规定了

流体静压力在相应坐标轴各点上的变化。为了求出沿此微元六面体各边 dx 、 dy 、 dz 的变化，可将(1)、(2)、(3)三式各乘以其对应的微分边长然后相加，即

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = -\rho g dz \quad (4)$$

此式左侧即静压力对 x 、 y 、 z 三轴总变化 dp 的全微分。

将 $dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$ 代入式(4)可得

$$dp = -\rho g dz \quad (5)$$

将式(5)分离变量后积分，得

$$\int \frac{dp}{\rho} + g \int dz = 0 \quad (6)$$

设流体不可压缩，即密度 ρ 与压力无关，式(6)的积分结果为

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-1)$$

如图1—2所示，对于静止流体中任意两点，上式可写成

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-1a)$$

或

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) = p_1 + \rho gh \quad (1-1b)$$

式(1-1)、(1-1a)及(1-1b)

称为流体静力学基本方程。

上列各式表明静压力只与垂直位置有关，而与水平位置无关。

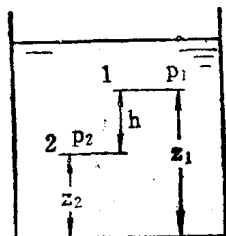


图1-2 静止流体中的静压力分布

1-3 静压力的测量

一、测两点静压差

如图1-3所示，可用U形管液柱差压计测定管内孔板流量计前后的压差。U形管差压计内指示液为汞，汞上方的测压管内充满水。

由静力学原理可知：静止状态下，连通器中同种流体在同一水平面上的静压力相等。因此 $p_A = p_{A'}$ 。由式(1-1b)

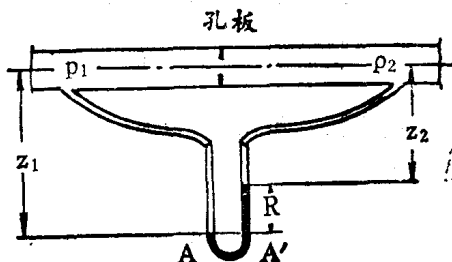


图1-3 U形管液柱差压计

$$p_A = p_1 + \rho g z_1$$

$$p_{A'} = p_2 + \rho g z_2 + \rho_0 g R$$

即

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 + \rho_0 g R$$

$$p_1 - p_2 = \rho g z_2 + \rho_0 g R - \rho g(z_2 + R)$$

于是可得

$$p_1 - p_2 = Rg(\rho_0 - \rho) \quad (1-2)$$

由上式可见，对于同样的压差 ($p_1 - p_2$)，若所选用指示液的密度 ρ_0 大，读数 R 就小；反之 ρ_0 小 R 就大。实际使用时要求读数 R 不太大或太小，太大读数不方便，太小则相对误差大。因此可根据压差的大小，选用合适的指示液。

二、测一点的静压力

据图1-4，依式 (1-1b) 可以列出

$$p_A = p_1 + \rho g z$$

$$p_{A'} = p_a + \rho_0 g R$$

因 $p_A = p_{A'}$ ，故

$$p_1 = p_a + \rho_0 g R - \rho g z$$

或写成

$$p_1 - p_a = Rg(\rho_0 - \rho) - (z - R)\rho g \quad (1-3)$$

上式表明指示液读数 R 并不只是表示 ($p_1 - p_a$) 之差，后者还与 $(z - R)\rho g$ 这段液柱的作用有关。

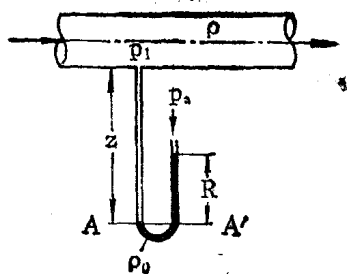


图1-4 测一点的静压力

1-4 连续性方程

如图1-5所示，流体在非等径的管段中流动。根据质量守恒定律，单位时间内流进和流出该管段质量的差值，应等于单位时间内该管段内流体的增量，即

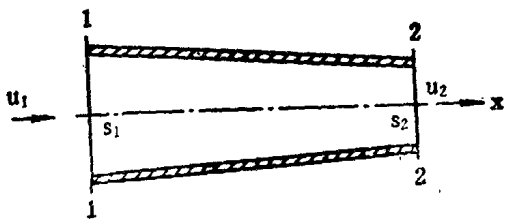


图1-5 连续方程式的推导

$$\rho_1 u_1 s_1 - \rho_2 u_2 s_2 = \frac{d}{d\tau} \int_{s_1}^{s_2} \rho s dx$$

当流体在管内作稳定流动时，上式右端为零，即

$$\rho_1 u_1 s_1 = \rho_2 u_2 s_2 \quad (1-4)$$

对于不可压缩流体， $\rho = \text{常数}$ ，于是上式可简化为

$$u_1 s_1 = u_2 s_2 \quad (1-5)$$

式(1-4)及(1-5)说明不可压缩流体不仅流经各截面的质量流量相等，它们的体积流量也相等。以上两式都称为稳定流动条件下的连续性方程。它反映了在稳定流动系统中，流量一定时，管路各截面上流速的变化规律，此规律与管路上是否装有管件、阀门或输送设备等无关。如上图所示，水在一变径圆管中由左向右流动时，式(1-5)可写成

$$u_1 \frac{\pi}{4} d_1^2 = u_2 \frac{\pi}{4} d_2^2$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (1-6)$$

式(1-6)说明液体在管路中的流速与管径的平方成反比。

1-5 柏努利方程

关于流体流动的柏努利方程，其推导的方法很多，通常采用两种方法：一是以流动系统作为衡算对象，按热力学第一定律列出能量衡算式而得出；另一种方法是以微元流体作为衡算对象，列出欧拉流动微分方程，然后积分求得。本节采用流管积分法导出柏努利方程。如图1-6所示，在不可压缩流体的流场中取一流管，在稳定流动条件下，流管的形状不变，流体在流管中的流动与在真实管中流动的情况一样。

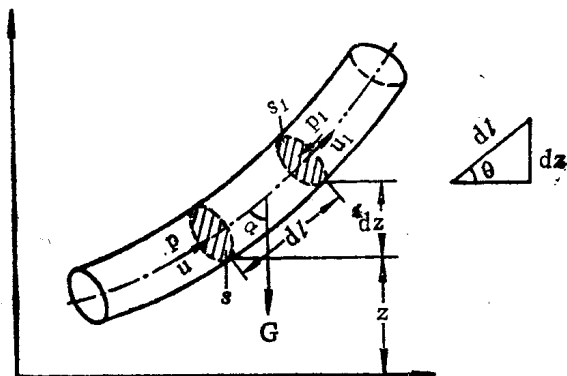


图1-6 柏努利方程式的推导

沿流管取一微段 dl ，此微段两端的截面积分别为 s 及 s_1 ，设截面 s 处的流速为 u ，压力为 p 。截面 s_1 处的流速为 u_1 ，