

高等学校试用教材

化学工程基础

北京大学化学系

《化学工程基础》编写组编

人民教育出版社

81.17
171
C.2

高等学校试用教材

化学工程基础

北京大学化学系《化学工程基础》编写组编

30210.17

人民教育出版社

高等学校试用教材

化学工程基础

北京大学化学系《化学工程基础》编写组编

◆

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
浙江临平印刷厂印装

◆

开本787×1092 1/16 印张23 字数518,000

1979年6月第1版 1982年3月第3次印刷

印数 38 501—46,500

书号 13012·0434 定价 1.90 元

编者的话

本书是根据 1977 年 10 月高等学校理科化学类教材会议制订的《化学工程基础》教材编写大纲编写的,可供综合性大学化学系作为试用教材。

编写中考虑到综合大学化学系教学的需要,按照化工生产中共同的特点,选取了较为典型的流体动力过程、传热过程、传质过程和化学反应过程等四部分内容,使学生通过这些内容的学习,能够掌握化学工程的基本原理和典型设备的基础知识,建立有关的技术经济观点,了解工程学中分析问题和解决问题的基本方法。各校在使用本书时可根据实际情况,对教材内容作适当选择。

本书绪论、第一章 § 1~§ 3 由金韵编写, § 4、§ 5 由王济群编写。第二章由吴毓秀编写。第三章第 I、II 部分由金韵编写, 第 III 部分由王济群编写。第四章 § 1~§ 4 及 § 7、§ 8 由王济群编写, § 5、§ 6 由金韵编写。

本书由南开大学化学系渠川瑾、解涛同志主审,经山东大学、四川大学、中山大学、吉林大学、兰州大学、武汉大学、复旦大学、厦门大学、上海师范大学、上海师范学院、北京师范大学等院校化学系的部分教师共同审定。在审查过程中,审阅人对书稿提出了很多宝贵意见,特此致谢。

北京大学化学系《化学工程基础》编写组

1979 年 3 月

目 录

绪 论

- § 1 化学工程的研究对象及任务 1 | § 2 物理量的因次与单位制 1

第一章 流体动力过程

- § 1 流体静力学 7
- 1-1 重度、密度、比重和比容
 - 1-2 压强(压力)
 - 1-3 流体静力学的基本方程
 - 1-4 流体静力学的应用实例
 - U型管压差计
 - 液面计
 - 液封
 - U型溢流管调节液面
- § 2 流体流动过程的物料衡算(流体的连续性方程) 15
- 2-1 流量与流速
 - 2-2 粘度
 - 2-3 流体流动的类型
 - 2-4 流体稳定流动时的连续性方程
- § 3 流体流动过程的能量守恒与转化 21
- 3-1 流体流动过程的能量与能量守恒
 - 3-2 用压头表示的能量守恒
 - 3-3 流体流动过程能量守恒与转化的实例
 - 孔板流量计原理
 - 转子流量计原理
 - 容器间相对位置的确定
- § 4 实际流体流动时的阻力 28
- 4-1 管路的沿程阻力
 - 沿程阻力的压头损失与剪应力强度的关系
 - 沿程阻力系数
 - 用无因次数群处理沿程阻力的实验数据
- 沿程阻力系数的计算公式
当量直径
管件、阀门的局部阻力
管路阻力计算的应用
- 4-2 球形颗粒在流体中运动时的阻力
- 球形颗粒在流体中运动时的阻力
 - 形状阻力系数与雷诺准数的关系
 - 颗粒重力沉降时受力的分析
 - 斯托克斯公式及其应用
- § 5 流体输送设备 44
- 5-1 离心泵和离心压缩机
 - 离心泵的原理
 - 根据生产要求确定所需要泵的扬程
 - 根据泵的特性曲线选用泵
 - 泵吸入端液面高度
 - 离心压缩机
 - 5-2 常用流体输送设备简介
 - 往复泵和往复压缩机
 - 旋涡泵
 - 齿轮泵
 - 螺杆泵
 - 水环泵
 - 喷射泵
 - 实验室用滑板式真空泵
- 本章符号说明
习题

第二章 传热过程

- § 1 传热方式 62
- 1-1 热传导
 - 平面壁的稳定热传导
 - 圆筒壁的稳定热传导
 - 1-2 对流传热
 - 1-3 热辐射
- § 2 热交换的计算 71
- 2-1 传热速率与传热系数
 - 2-2 传热平均温度差
 - 2-3 传热过程计算举例
- § 3 热交换设备 79
- 3-1 夹套式热交换器
 - 3-2 蛇管式热交换器
 - 3-3 套管式热交换器

3-4	列管式热交换器
3-5	板式热交换器
§ 4	热交换过程的强化途径.....82
4-1	增大传热面积 F

4-2	增大传热温差 Δt_m
4-3	提高传热系数 K
	本章符号说明
	习题

第三章 传质过程

第 I 部分 气-液相传质过程的机理与设备简介

§ 1	气-液相传质过程的机理.....87
1-1	单相中物质的传递
	分子扩散
	对流扩散
	单相传质方程式及单相传质系数
1-2	相间传质
	双膜理论及其他有关理论
	两相间的平衡关系
§ 2	传质设备.....95

2-1	填料式塔
2-2	板式塔
	泡罩塔
	筛板塔
	浮阀塔
	浮动舌形塔
2-3	喷射式传质装置
	第 I 部分符号说明

第 II 部分 吸 收

§ 1	吸收原理和装置流程.....104
§ 2	吸收的气液平衡关系.....105
§ 3	吸收速率方程式.....112
3-1	吸收速率方程式及各吸收传质系数之间的关系气膜及液膜吸收速率方程式
	总吸收速率方程式
	吸收传质总系数与吸收传质分系数之间的交换关系
3-2	以比分子分数差表示推动力的吸收速率方程式及吸收传质系数之间的变换关系
	以比分子分数差表示推动力的吸收速率方程式
	吸收传质分系数之间及总系数之间的变换关系
3-3	吸收传质系数的确定

§ 4	吸收过程的物料衡算及操作线方程式.....123
§ 5	吸收设备的计算.....125
5-1	吸收剂的比用量 $(\frac{L}{V})$
5-2	吸收塔塔径的确定
5-3	吸收塔填料层高度的确定
	填料层高度的基本计算方程式
	传质单元高度与传质单元数的计算方法
	[附] 效率放大法计算实际塔板数.....135
§ 6	多组分吸收的处理方法简介.....140
	第 II 部分符号说明

第 III 部分 精 馏

§ 1	精馏原理和流程装置.....149
1-1	精馏原理
1-2	精馏流程装置
§ 2	气-液相平衡.....150
2-1	气-液相平衡的几种表示方法
	理想溶液气-液相平衡关系的基本算式
	气-液相平衡的几种表示方法
2-2	纯组分饱和蒸气压的计算和估算
	由正常沸点和气化热计算任意温度时纯组分的饱和蒸气压
	由正常沸点估算任意温度时纯组分的饱和蒸气压
2-3	相对挥发度的计算和估算
	组分的挥发度和组分间的相对挥发度
	用相对挥发度计算气-液相平衡关系

	相对挥发度的估算
2-4	非理想二组分溶液的气-液相平衡数据
	理想溶液和非理想溶液的不同
	活度和活度系数
§ 3	精馏过程的物料衡算.....162
3-1	全塔的物料衡算
3-2	操作线方程
	精馏段的操作线方程
	提馏段的操作线方程
	加料板的操作线方程
3-3	操作线方程在 $y-x$ 相图上的表示
	精馏段操作线
	δ 线
	提馏段操作线

3-4	回流比	
	回流比与传质过程推动力的关系	
	最小回流比	
§ 4	理论塔板和理论塔板数	171
4-1	理论塔板的概念	
4-2	逐板算法求理论塔板数	
4-3	图解法求理论塔板数	
4-4	用芬斯克公式和吉利兰图计算理论塔板数	
	芬斯克公式	
	吉利兰图	
4-5	多组分精馏简介	
§ 5	最宜实际回流比的确定	179
§ 6	实际塔板的效率和实际塔板数	180
6-1	塔板效率	
6-2	影响塔板效率的因素	
6-3	强化塔板效率的途径	
6-4	塔板效率的测定和实际塔板数	

§ 7	简单蒸馏和间歇精馏	182
7-1	简单蒸馏	
	简单蒸馏的特点	
	简单蒸馏的计算	
7-2	间歇精馏	
	间歇精馏的特点	
	间歇精馏的计算	
	简单蒸馏和间歇精馏的比较	
§ 8	特殊精馏简介	188
8-1	共沸精馏	
8-2	萃取精馏	
§ 9	塔高、塔径和塔板压降的计算	192
9-1	塔高的计算	
9-2	塔径的计算	
9-3	塔板的压力降	
第 III 部分符号说明		
习题		

第四章 化学反应工程学——反应器基本原理

§ 1	反应器的类型及其选择	199
1-1	间歇操作的搅拌釜	
1-2	连续操作的管式反应器	
1-3	连续操作的搅拌釜	
1-4	连续操作搅拌釜串联	
§ 2	物料在反应器内的流动模型	203
2-1	理想混合流动模型	
2-2	活塞流流动模型	
2-3	轴向扩散流动模型和多釜串联流动模型	
§ 3	物料在反应器内的停留时间和停留时间分布	205
3-1	分布函数的意义和性质	
	分布和分布函数	
	分布函数的性质	
3-2	停留时间分布函数的测定	
	脉冲法	
	阶梯输入法	
3-3	典型反应器的停留时间分布函数	
	间歇操作搅拌釜	
	活塞流管式反应器	
	连续操作的理想搅拌釜	
	连续操作的理想搅拌釜串联	
3-4	停留时间分布函数在分析解决反应器问题中的作用	
	判断物料在反应器里的流动类型	
	计算化学反应的转化率	
§ 4	典型反应器的计算	221

4-1	流动体系的动力学模型	
	气相反应的体积变化系数	
	流动体系的停留时间、空间速度和转化率	
	流动体系的动力学方程	
4-2	间歇操作的理想搅拌釜的计算	
4-3	活塞流管式反应器的计算	
4-4	连续操作的理想搅拌釜的计算	
	利用分布函数的性质求 $\bar{x}_A \sim \bar{\tau}$ 关系	
	利用物料衡算求 $\bar{x}_A \sim \bar{\tau}$ 关系(解析法)	
	利用图解法求 $\bar{x}_A \sim \bar{\tau}$ 关系	
	连续搅拌釜体积的计算	
4-5	多釜串联的计算	
	利用分布函数直接积分的方法	
	用物料衡算求 $\bar{x}_A \sim \bar{\tau}$ 关系(解析法)	
	图解法计算 $\bar{x}_A \sim \bar{\tau}$ 关系	
	多釜串联反应器体积的计算	
4-6	小结	
§ 5	气固相固定床催化反应器	244
5-1	固定床催化反应器的结构和类型	
	圆筒绝热式反应器	
	多段绝热式反应器	
	非绝热外部换热式列管反应器	
	非绝热自热式列管反应器	
5-2	固定床催化反应器的计算方法	
	等温反应器	
	非等温反应器	

绝热反应器计算举例	
5-3 反应器的最佳化	
最适宜的温度	
适宜的压力	
适宜的空间速度和接触时间	
§ 6 流化床反应器	269
6-1 基本现象与名称	
流态化过程	
两种流态化	
沟流	
大气泡和腾涌	
流化床膨胀比	
流化数	
流化质量参数	
6-2 流化床的基本结构	
基本构件	
多层流化床	
两器流化床	
6-3 流化床主体尺寸的确定方法	
流化床直径 D 的确定	
扩大段直径 D' 的确定	
流化床总高度的确定	
流化床反应器主体尺寸计算举例	

一、单位换算表	
二、气体常数 R 的几种单位和数值	
三、化学工程中常用的无因次数群	
四、国际原子量表(1975)	
五、水的重要物理性质(0~370°C)	
六、空气的重要物理性质(绝对压强为 760 毫米汞柱, -50~1200°C)	
七、某些气体的重要物理性质	
八、某些液体的重要物理性质	
九、常用固体材料的重度、导热系数和比热	
十、水的饱和蒸汽压(-20~100°C)	
十一、饱和水蒸气表(0~300°C)	
十二、某些液体比重共线图	
十三、某些液体比热(热容)共线图	

§ 7 反应器的稳定性	291
7-1 反应器稳定性的判断	
7-2 反应器的生热曲线	
7-3 反应器的去热曲线	
7-4 分析反应器稳定性举例	
7-5 确保反应器稳定的途径	
采用活塞流管式反应器	
加大传热面积、强化传热系数	
液相产品打回流	
采用过量溶剂蒸发带热的方法	
§ 8 反应器放大过程简介	301
8-1 数学模拟放大的过程	
8-2 反应器数学模拟放大实例	
由丙烯制异戊二烯的工业化	
甲醇合成塔的数学模拟	

[附]

- 一、 $E(t)$ 的矩母函数推导
- 二、可逆的一级反应在不同类型反应器中的 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
- 三、可逆的二级反应在不同类型反应器中的 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
- 四、平行的反应在不同类型反应器中的 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
- 五、连串的反应在不同类型反应器中的 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系

本章符号说明

习题

附 录

十四、某些气体比热共线图(等压下, 且为常压)
十五、某些液体汽化潜热共线图
十六、某些液体粘度共线图(常压下)
十七、某些气体粘度共线图(常压下)
十八、某些液体的表面张力
十九、某些气体及液体的导热系数
二十、管内流体常用流速范围
二十一、管子规格
二十二、管壁的绝对粗糙度
二十三、管内流体流动摩擦系数曲线图
二十四、工业上换热器中传热系数的大致范围
二十五、烃类的 $P-T-K$ 图
二十六、常用对数表

绪 论

§1 化学工程的研究对象及任务

化学工业,例如生产酸、碱、盐的无机工业,生产醇、醚、合成塑料、橡胶、纤维等的有机工业和高分子工业,以及与化学工业有关的一些工业,如从石油中提取各种化工产品的石油化学、天然气加工、冶金、食品、造纸、海水综合利用和原子能工业等等,其生产中所进行的化学过程并不相同,从原料到产品的工艺程序也不一样,可是在这些工业生产中的化学过程和工艺程序之间存在着共同性和普遍的规律。化学工程就是探讨在化工生产装置中所进行的这些过程和程序的规律性,并根据对这些规律性的认识来解决化工生产中的工程问题,例如实验工作的组织,过程的工程放大,设备的化工设计及操作等等。

化学工程是怎样描述生产装置中所进行的过程的规律性的呢?它常运用“物料衡算”、“能量衡算”、“平衡关系”及“过程速率”等概念来反映物料的变化规律,从理论上探索它的可能性,同时还要考虑它在技术上的可能性与经济上的合理性,力求使化工生产整个系统在物质转换、能量利用方面最合理,管理操作上最安全可靠,获得的产品质量好、数量多而成本低,即化工生产达到最佳化。简言之,化学工程的任务是:从理论上阐明化工生产过程,并使其在技术上获得实现。

§2 物理量的因次与单位制

化学工程既面向大规模生产,又和小型科学实验密切相连,它需要用到多种物理量,如长度、面积、体积、密度、粘度、导热系数、温度、压强等等。这些物理量可通过几个彼此独立的基本量来表示,其大小则用各种单位来量度。常用的基本量为长度 $[L]$,力 $[F]$ 或质量 $[M]$,时间 $[T]$ 和温度 $[\theta]$ 等。基本量以外的其他物理量,可通过物理量之间的规律(定义或定律)从基本量导出来,称为导出量,它们的单位称为导出单位。应用这些基本量以表示物理量特性的式子称为因次(或量纲)式。因次式中各物理量的指数称为它的因次或量纲(有时也把物理量的量纲式简称为物理量的量纲)。因次可以是正、负整数或分数。例如流体流速 w ,其定义为流体流动所通过的路程 l 和通过这段路程所用的时间 t 之比。它的因次式为:

$$[w] = [l]/[t] = LT^{-1}$$

由上式可知, L 的指数为1, T 的指数为-1,此1和-1即称为因次(或量纲)。

用以表示各个物理量的大小的单位,有各种不同的度量衡制度,如公制(或称米制)、英制、新的国际单位制等。公制中又有绝对单位制和工程单位制。

绝对单位制是在物理学和化学中常采用的。它以长度、质量、时间作为基本量,单位则分为两种。其一为厘米·克·秒制(简称CGS制),又称物理单位制。在此制中,长度的单位是[厘米],

质量的单位是[克],时间的单位是[秒]。其他物理量的单位可以通过物理或力学的定律,由这些基本量导出来,比如,力的单位由牛顿第二定律 $F=ma$ 导出,其单位为[克·厘米/秒²],称为达因。其二为米·公斤·秒制(简称 MKS 制),又称绝对实用单位制。在此制中,长度的单位是[米],质量的单位是[公斤]^①,时间的单位是[秒]。同理,其他物理量的单位均由这三个基本量导出,比如,力的单位是[公斤·米/秒²],称为牛顿。

在工程技术上,因为经常要考虑物料的重量或所受的力,以力作为一个基本量就比较方便,故我国长期以来广泛地采用重力单位制,也称工程单位制。它是以长度、力和时间作为基本量,以[米],[公斤(力)],[秒]作为基本单位。

工程单位制中 1[公斤(力)]相当于在真空中以 MKS 制量度的质量为 1[公斤] 的物料在重力加速度为 9.80665[米/秒²]处所受的重力,也就是其重量。

上面的这个关系,也就是质量(m)和重量(G)之间存在的关系:

$$G = mg$$

其中: g 是重力加速度,可近似地取为 9.81[米/秒²]; m 是质量,它是物质的根本属性; G 是重量,如上所述,它是质量在重力场中所受的力。按上面的关系式把 981000 达因定义为 1 公斤(力)^②,或 9.81 牛顿定义为 1 公斤(力)。下面我们看一看质量的工程单位是什么?

根据公斤(力)的定义和力学定律。得:

$$\begin{aligned} 1[\text{公斤(力)}] &= 1[\text{公斤(质)}] \times 9.81[\text{米/秒}^2] \\ &= 9.81[\text{公斤(质)}] \times [\text{米/秒}^2] \\ 1[\text{公斤(质)}] &= \frac{1}{9.81}[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}^2/\text{米}] \end{aligned}$$

所以,质量在工程单位制中的单位是[公斤(力)·秒²/米]。它在工程单位里是一个导出单位。

从上所述,可以进一步体会到,由于在物理学、化学中与在化学工程中惯用质量与重量这两个不同的概念,所以它们惯用的单位制也不同。在物理学和化学中常用的是以质量-长度-时间为基本的单位,在化学工程中则常用的是力-长度-时间为基本的单位制。

自 1960 年以来,国际计量会议以米、公斤(质)、秒(MKS 制)为基础,逐步加上其他单位,并作了一些规定、命名,制定了国际单位制(The International System of Units; 简称 SI)。它采用了七个基本单位,如表 1 所示。

在这七个基本单位中,化学工程里经常用到的是 m、kg、s、K、mol 这五个基本单位。把 mol 列为基本单位是于 1971 年才通过的。

此外,化学工程中还常用到一些国际制导出单位,如表 2 所示。

表 2 中有几个导出单位具有专门名称。如力的单位称为牛顿,符号 N,它是使 1 公斤(千克)质量的物体产生每秒每秒 1 米加速度的力[公斤·米/秒²],即[kg·m/s²]。压强的单位称为帕斯卡,

① 这里指的是公斤(质),公斤也称千克。

② $G = mg$

1[克(力)] = 1[克(质)] × 981[厘米/秒²] = 981[克(质)·厘米/秒²] = 981[达因]

1[公斤(力)] = 1[公斤(质)] × 9.81[米/秒²] = 9.81[牛顿] = 9.81 × 10⁵[达因] = 981000[达因]

表1 SI 基本单位

物 理 量	英 文 名 称	中 文 名 称	国 际 符 号
长 度	metre	米	m
质 量	kilogram	千克(公斤)	kg
时 间	second	秒	s
电 流 强 度	ampere	安 培	A
热 力 学 温 度	kelvin	开 尔 文	K
发 光 强 度	candela	坎 德 拉	cd
物 质 的 量	mole	摩 尔	mol

表2 化学工程中常用的一些国际制导出单位

物 理 量	单 位	单位专门名称	单位专门符号	用 专 门 符 号 表 示 的 单 位
面积	m ²			
体积	m ³			
速度	m/s			
加速度	m/s ²			
比容	m ³ /kg			
密度	kg/m ³			
浓度	mol/m ³			
力	kg·m/s ²	牛 顿	N	
压强、应力	kg/m·s ²	帕 斯 卡	Pa	N/m ²
动量	kg·m/s			
能量、功、热	kg·m ² /s ²	焦 耳	J	Nm
功率	kg·m ² /s ³	瓦	W	J/s
表面张力	kg/s ²			N/m
扩散系数	m ² /s			
绝对粘度	kg/m·s			Pa·s 或 N·s/m ²
比热	m ² /s ² ·K			J/kg·K
导热系数	kgm/s ³ ·K			W/m·K
传热系数	kg/s ³ ·K			W/m ² ·K
传质系数 (浓度推动力)	m/s 或 kmol/m ² ·s(kmol/m ³)			

符号 Pa, 就是每平方米面积上受力 1 牛顿[牛顿/米²], 即 [N/m²], 用国际制基本单位表示为 [kg/ms²]. 能量、功和热都归结为力与距离的乘积, 它们的单位便是 Nm, 而这个单位又有一个专门名称叫焦耳, 符号 J, 用国际基本单位表示为 [kg·m²/s²]. 功率的单位是 [焦耳/秒] 即 [J/s], 这个单位又有一个专门名称叫瓦, 符号 W.

国际单位制还规定了倍数和分数单位。当使用上述单位所表示的物理量值嫌太大或太小时, 可以在单位符号之前加上词冠, 化学工程中常用的词冠如表 3 所示。

目前国际单位制在我国及一些国家中正在逐步推广采用。本书基本上采用的是工程单位制。

为了便于阅读已采用 SI 单位的书刊及使用 SI 单位进行计量和计算, 将化学工程中常用的

表3 化学工程中常用的一些表示倍数或分数的国际制词冠

国际符号	英文名称	中文名称	因数
d	deci	分	10^{-1}
c	centi	厘	10^{-2}
m	mili	毫	10^{-3}
μ	micro	微	10^{-6}
da	deca	十	10
h	hecto	百	10^2
k	kilo	千	10^3

物理量工程单位与 SI 单位间换算关系举例如下。

1. 质量: $1[\text{公斤} \cdot \text{秒}^2/\text{米}] = (\quad)[\text{公斤(质)}]$

因为 $1[\text{公斤}^\text{①}] = 1[\text{公斤(质)}] \times 9.807[\text{米}/\text{秒}^2]$

所以 $1[\text{公斤} \cdot \text{秒}^2/\text{米}] = 9.807[\text{公斤(质)}]$

2. 力: $1[\text{公斤}] = (\quad)[\text{牛顿}]$

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 1[\text{公斤(质)}] \times 9.807[\text{米}/\text{秒}^2]$

$1[\text{公斤(质)} \cdot \text{米}/\text{秒}^2] = 1[\text{牛顿}]$

所以 $1[\text{公斤(力)}] = 9.807[\text{牛顿}]$

3. 压强(压力): $1[\text{公斤(力)}/\text{米}^2] = (\quad)[\text{牛顿}/\text{米}^2] = (\quad)[\text{帕斯卡}]$

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 9.807[\text{牛顿}]$

所以 $1[\text{公斤(力)}/\text{米}^2] = 9.807[\text{牛顿}/\text{米}^2]$

又因为每平方米受力 1 牛顿称为 1 帕斯卡, 所以

$1[\text{公斤(力)}/\text{米}^2] = 9.807[\text{帕斯卡}]$

又因为 $1[\text{厘米}^2] = \frac{1}{100^2}[\text{米}]$, 所以

$1[\text{公斤(力)}/\text{厘米}^2] = 9.807 \times 10^4[\text{牛顿}/\text{米}^2] = 9.807 \times 10^4[\text{帕斯卡}]$

4. 功: $1[\text{公斤(力)} \cdot \text{米}] = (\quad)[\text{牛顿} \cdot \text{米}] = (\quad)[\text{焦}]$

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 9.807[\text{牛顿}]$

又因 1[焦耳] 等于 1[牛顿(力)] 作用 1[米] 距离所做的功, 即 $1[\text{焦耳}] = 1[\text{牛顿} \cdot \text{米}]$, 所以

$1[\text{公斤(力)} \cdot \text{米}] = 9.807[\text{牛顿} \cdot \text{米}] = 9.807[\text{焦耳}]$

5. 功率: $1[\text{公斤(力)} \cdot \text{米}/\text{秒}] = (\quad)[\text{牛顿} \cdot \text{米}/\text{秒}] = (\quad)[\text{焦耳}/\text{秒}] = (\quad)[\text{瓦}]$

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 9.807[\text{牛顿}]$

$1[\text{焦耳}/\text{秒}] = 1[\text{瓦}]$

所以 $1[\text{公斤(力)} \cdot \text{米}/\text{秒}] = 9.807[\text{牛顿} \cdot \text{米}/\text{秒}] = 9.807[\text{焦耳}/\text{秒}] = 9.807[\text{瓦}]$

6. 绝对密度: $1[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}^2/\text{米}^4] = (\quad)[\text{公斤(质)}/\text{米}^3]$

① 一定要注意区别公斤(或千克)所代表的是力(重量)还是质量, 一般多不附加注明。

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 1[\text{公斤(质)}] \times 9.807[\text{米/秒}^2]$

$$1[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}^2/\text{米}] = 9.807[\text{公斤(质)}]$$

所以 $1[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}^2/\text{米}^4] = 9.807[\text{公斤(质)}/\text{米}^3]$

7. 绝对粘度: $1[\text{公斤(力)秒}/\text{米}^2] = (\quad)[\text{牛顿} \cdot \text{秒}/\text{米}^2]$
 $= (\quad)[\text{帕斯卡} \cdot \text{秒}]$

因为 $1[\text{公斤(力)}] = 9.807[\text{牛顿}]$

$$1[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}/\text{米}^2] = 9.807[\text{牛顿} \cdot \text{秒}/\text{米}^2]$$

又因为

$$1[\text{帕斯卡}] = 1[\text{牛顿}/\text{米}^2]$$

所以

$$1[\text{公斤(力)} \cdot \text{秒}/\text{米}^2] = 9.807[\text{帕斯卡} \cdot \text{秒}]$$

8. 温度: $0[^\circ\text{C}] = (\quad)[\text{K}]$

由于热力学温度 $T[\text{K}] = 273.15 + t[^\circ\text{C}]$, 故

$$0[^\circ\text{C}] = 273.15[\text{K}]$$

9. 热量: $1[\text{千卡}] = (\quad)[\text{千焦}]$

由于热功当量为 $427[\text{公斤} \cdot \text{米}/\text{千卡}]$, 又 $1[\text{焦}]$ 等于 $1[\text{牛顿}]$ 力作用 $1[\text{米}]$ 距离所做的功, 即 $1[\text{牛顿} \cdot \text{米}] = 1[\text{焦}]$, 所以

$$\begin{aligned} 1[\text{千卡}] &= 427[\text{公斤} \cdot \text{米}] = 427 \times 9.807[\text{牛顿} \cdot \text{米}] \\ &= 4187[\text{焦}] = 4.187[\text{千焦}] \end{aligned}$$

10. 比热: $1[\text{千卡}/\text{公斤} \cdot ^\circ\text{C}] = (\quad)[\text{千焦}/\text{公斤} \cdot \text{K}]$

因为 $1[\text{千卡}] = 4.187[\text{千焦}]$

$$\text{温差 } 1[^\circ\text{C}] = 1[\text{K}]$$

所以

$$1[\text{千卡}/\text{公斤} \cdot ^\circ\text{C}] = 4.187[\text{千焦}/\text{公斤} \cdot \text{K}]$$

11. 导热系数: $1[\text{千卡}/\text{米} \cdot \text{秒} \cdot ^\circ\text{C}] = (\quad)[\text{千焦}/\text{米} \cdot \text{秒} \cdot \text{K}]$

$$1[\text{千卡}] = 4.187[\text{千焦}]$$

$$\text{温差 } 1[^\circ\text{C}] = 1[\text{K}]$$

所以

$$1[\text{千卡}/\text{米} \cdot \text{秒} \cdot ^\circ\text{C}] = 4.187[\text{千焦}/\text{米} \cdot \text{秒} \cdot \text{K}]$$

12. 传热系数: $1[\text{千卡}/\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot ^\circ\text{C}] = (\quad)[\text{千焦}/\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{K}] = (\quad)[\text{千瓦}/\text{米}^2 \cdot \text{K}]$

$$1[\text{千卡}] = 4.187[\text{千焦}]$$

$$\text{温差 } 1[^\circ\text{C}] = 1[\text{K}]$$

$$1[\text{焦}/\text{秒}] = 1[\text{瓦}]$$

所以 $1[\text{千卡}/\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot ^\circ\text{C}] = 4.187[\text{千焦}/\text{米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{K}] = 4.187[\text{千瓦}/\text{米}^2 \cdot \text{K}]$

将以上结果列表如下(见下页)。

现在使用的单位,除了上述几种外,还有一种称作习用单位的,例如表示时间的单位用小时(h),表示压强的用大气压(atm)或毫米汞柱(mmHg)等,称为制外单位,它们或者因为大小适中

工程单位换算为 SI 单位

质量	1[公斤·秒 ² /米] = 9.807[千克(质)]
力	1[公斤(力)] = 9.807[牛顿]
压强	1[公斤(力)/米 ²] = 9.807[牛顿/米 ²] = 9.807[帕斯卡] 1[公斤(力)/厘米 ²] = 9.807 × 10 ⁴ [牛顿/米 ²] = 9.807 × 10 ⁴ [帕斯卡]
功	1[公斤(力)·米] = 9.807[牛顿·米] = 9.807[焦耳]
功率	1[公斤(力)·米/秒] = 9.807[牛顿·米/秒] = 9.807[焦耳/秒] = 9.807[瓦]
绝对密度	1[公斤(力)·秒 ² /米 ⁴] = 9.807[千克(质)/米 ³]
绝对粘度	1[公斤(力)·秒/米 ²] = 9.807[牛顿·秒/米 ²] = 9.807[帕斯卡·秒]
温度	0°C = 273.15[K]
热量	1[卡] = 4.187[焦耳] 1[千卡] = 4.187[千焦耳]
比热	1[千卡/公斤·°C] = 4.187[千焦耳/公斤·K]
导热系数	1[千卡/米·秒·°C] = 4.187[千焦耳/米·秒·K]
传热系数	1[千卡/米 ² ·秒·°C] = 4.187[千焦耳/米 ² ·秒·K] = 4.187[千瓦/米 ² ·K]

使用方便, 或者因习惯关系沿袭下来普遍使用, 所以又叫做习用单位。

上面所提到的单位制, 都属于米制系统。此外还有另外一个系统, 即英制系统, 以英尺、磅、秒作基本单位。为了减少复杂性, 避免混淆, 本书内不再引进这个系统的单位制。其换算关系可以参看附录。

第一章 流体动力过程

在化工生产中所处理的物料大部分都是处于液态和气态状况下，这种状态下的物体通称为流体。这些物料在静止和运动时都遵循流体力学的规律。与流体力学有关的各化工基础过程称为流体动力过程。

流体与固体相区别的特性是流体流动时没有固定的形状，极易变形，其质点能在内部发生相对运动，这种特性称为流动性。

流体可分为气体和液体两类。在流体流动的研究中，压缩性的大小被看作是气体和液体的主要区别。在压强或温度变化时，气体的密度随着变化，而液体密度的变化并不明显。在处理流体流动问题时，液体也可看为不可压缩的流体，气体则为可压缩流体。但是，气体在输送过程中若压强改变不大(温度一般变化不大)，因而密度也变化不大，则可不考虑压缩性的变化；若过程中压强变化较大，则可取平均值或分段进行计算。

在这一章中，主要介绍有关流体动力过程的一些基本原理，比如流体在重力和压力作用下的平衡规律、流体流动时的能量转换规律和流体阻力等，以及如何应用这些原理去解决实践中的问题。

§1 流体静力学

流体静力学是研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系，而这些力的大小是与流体的重度、压强等性质有关，下面先分别介绍这些性质。

1-1 重度、密度、比重和比容

重度 单位体积的流体所具有的重量称为流体的重度，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中： γ ——流体的重度[公斤/米³];

G ——流体的重量[公斤];

V ——流体的体积[米³]。

密度 单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中： ρ ——密度[公斤·秒²/米⁴];

m ——质量[公斤·秒²/米];

V ——体积[米³]。

已知 $G = m \cdot g$ ，于是可以确定密度与重度之间的关系：

$$\gamma = \frac{m}{V} \cdot g = \rho \cdot g \quad (1-3)$$

由上式可见,重度和密度的关系实质上就是重量和质量的关系。

我们一定要注意,这种关系只适用于同一单位制中的换算^①,例如以[公斤/米³]为单位的重度和以[公斤·秒²/米⁴]为单位的密度之间的相互换算,这里都是采用工程单位制。

在手册中查到的密度 ρ' 常为绝对单位制的,它的单位为[克(质)/厘米³],而工程上又多用重度[公斤(力)/米³],我们可按如下方式进行换算。因质量为1[公斤(质)]的物体,在重力场的作用下(即受地心的吸引力)为1[公斤(力)],故它的重量为1[公斤]。所以,以工程单位表示的重度 γ [公斤(力)/米³]与以绝对实用单位制表示的密度 ρ [公斤(质)/米³]在数值上相等。因此将手册中查到的密度 ρ' [克(质)/厘米³]的值乘以1000,也就成为重度 γ [公斤(力)/米³]。

比重 流体的重度与纯水在4[°C]时的重度相比,所得的比率称为比重,以符号 S 表示。

比重是没有单位的。纯水在4[°C]时比重为1,重度为1000[公斤/米³],所以,任一流体的重度在数值上等于它的比重的1000倍,即某流体的重度等于比重 \times 1000[公斤/米³]。手册中也常列出比重的数据。

比容 单位重量流体的体积,称为流体的比容,即

$$v = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma} \quad (1-4)$$

式中: v ——比容[米³/公斤]。

式(1-4)指出,流体的比容是重度的倒数。

在以上这几个物理量中化工计算里常用的是重度。各种气体和液体的重度,可直接从手册里查得(本书附录中,列出了某些常用气体和液体的重度数据),或由查得的密度或比重换算而得。对流体混合物的重度可以通过不同的途径求出。当工业上不要求特别精确时,气体混合物的重度可由下式求得(假定混合时各组分的体积不变):

$$\gamma_m = \gamma_1 y_1 + \gamma_2 y_2 + \cdots + \gamma_n y_n \quad (1-5)$$

式中: γ_m ——混合物的重度;

$\gamma_1, \gamma_2, \cdots, \gamma_n$ ——各组分的重度;

y_1, y_2, \cdots, y_n ——各组分的体积分数(某组分的体积/混合气体总体积)。

液体混合物的组成通常用重量分数(x)来表示,要计算它的重度,可以1[公斤]混合物为基准。假定混合前后各组分的体积不变,在1[公斤]混合物里的各组分于单独存在时的体积分别等于 $x_1/\gamma_1, x_2/\gamma_2, \cdots, x_n/\gamma_n$,而1公斤混合物的体积是 $1/\gamma_m$,所以

$$\frac{1}{\gamma_m} = \frac{x_1}{\gamma_1} + \frac{x_2}{\gamma_2} + \cdots + \frac{x_n}{\gamma_n} \quad (1-6)$$

例 1-1 已知浓硫酸的比重 S 是1.84,试求它的重度和密度。

^① 物理量方程中各物理量在单位上总是一致的。在进行运算时,无论采用哪种单位制,均应始终采用同一种单位制,不应将不同的单位混合使用。

解 浓硫酸的重度:

$$\gamma = 1000 S = 1000 \times 1.84 = 1840 [\text{公斤/米}^3]$$

浓硫酸的密度:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1840 [\text{公斤/米}^3]}{9.81 [\text{米/秒}^2]} = 188 [\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4]$$

例 1-2 已知炼焦煤气的组成为: CO_2 , 1.8%; C_2H_4 , 2%; O_2 , 0.7%; CO , 6.5%; CH_4 , 24%; H_2 , 58%; N_2 , 7% (皆为体积%)。试求 20 mmHg (表压) 及 25°C 时炼焦煤气的重度和密度各为多少。

解 在标准状态下, 各组分气体的重度分别为:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{CO}_2} &= 1.965 [\text{公斤/米}^3] & \gamma_{\text{CH}_4} &= 0.714 [\text{公斤/米}^3] \\ \gamma_{\text{C}_2\text{H}_4} &= 1.250 [\text{公斤/米}^3] & \gamma_{\text{H}_2} &= 0.0895 [\text{公斤/米}^3] \\ \gamma_{\text{O}_2} &= 1.429 [\text{公斤/米}^3] & \gamma_{\text{N}_2} &= 1.250 [\text{公斤/米}^3] \\ \gamma_{\text{CO}} &= 1.250 [\text{公斤/米}^3] \end{aligned}$$

在标准状态下, 炼焦煤气的重度则为:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 1.965 \times 1.8\% + 1.250 \times 2\% + 1.429 \times 0.7\% + 1.250 \\ &\quad \times 6.5\% + 0.714 \times 24\% + 0.0895 \times 58\% + 1.250 \times 7\% \\ &= 0.462 [\text{公斤/米}^3] \end{aligned}$$

在所给条件下炼焦煤气的重度为:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \gamma_0 \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \\ &= 0.462 \times \frac{760 + 20}{760} \cdot \frac{273}{273 + 25} \\ &= 0.434 [\text{公斤/米}^3] \end{aligned}$$

在所给条件下炼焦煤气的密度为:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{0.434}{9.81} = 0.0442 [\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4]$$

例 1-3 计算 20°C 时 60% (重量%) 的酒精水溶液的重度。

解 20°C 时 $\gamma_{\text{水}} = 998.2 [\text{公斤/米}^3]$, $\gamma_{\text{酒精}} = 789 [\text{公斤/米}^3]$ 。在 20°C 时酒精水溶液的重度为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma_{\text{水溶液}}} &= \frac{x_{\text{水}}}{\gamma_{\text{水}}} + \frac{x_{\text{酒精}}}{\gamma_{\text{酒精}}} = \frac{1-0.6}{998.2} + \frac{0.6}{789} \\ \gamma_{\text{水溶液}} &= 862 [\text{公斤/米}^3] \end{aligned}$$

得

1-2 压强(压力)

流体每单位面积(A)上所受的力(F)称为压强, 以 P 表示, 即

$$P = \frac{F}{A} [\text{公斤(力)/米}^2]$$

静止流体的压强称为静压强。