

高等学校教材

化学工程基础

(第二版)

北京大学化学系《化学工程基础》编写组编

高等教育出版社

高等学校教材

化学工程基础

(第二版)

北京大学化学系《化学工程基础》编写组编

高等教育出版社

本书是在1979年出版的《化学工程基础》第一版的基础上参照1980年5月审订的综合大学化学专业《化学工程基础》教学大纲及广大读者的意见进行修订的。

在第二版中,将原用的工程单位制改为国际单位制;第一章至第三章增补了因次分析法,边界层概念,化学吸收;第四章增加了反应器类型的选择,轴向扩散模型及其应用等等。为了便于教学,尽可能控制教材篇幅,对一些内容作了适当调整和删减,并将一些次要内容改为小字。

本书可用作综合大学化学专业化学工程基础课程的教材,也可供高等院校其他有关专业师生参考。

本书第二版经1983年于上海召开的审稿会议审稿,同意作为高等学校教材出版。

高等学校教材
化学工程基础
(第二版)

北京大学化学系《化学工程基础》编写组编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
二二〇七印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 490,000
1979年5月第1版 1983年9月第2版 1984年3月第1次印刷
印数 00,001—17,250
书号 13010·0936 定价 2.10 元

第二版前言

《化学工程基础》第二版是在第一版的基础上参照 1980 年 5 月审定的综合大学化学专业《化学工程基础》教学大纲和 1981 年 11 月在广州召开的全国高等学校理科《化学工程基础》教学经验交流会上对本书第一版所提意见修改而成。本版内容的编排与第一版基本相同。

与第一版相比,本版主要作了如下的修改:将原用的工程单位制改为国际单位制;在第一章到第三章中增补了因次分析方法、边界层概念、化学吸收;第四章中增加了反应器类型的选择、轴向扩散模型及其应用,以及流化床放大的简介;各章习题亦有所增加,增加的总数约占原有的 57%;为了便于教学,尽可能控制教材篇幅,对一些内容作了适当调整和删减;对有关名词术语和物理量符号尽可能予以统一。

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,例如精馏和吸收这两部分可任选其一,小字部分可不讲或适当选讲。

本版第一章 § 1~§ 3 由金韵修订, § 4、§ 5(包括 3-3) 由王济群修订。第二章由金韵修订。第三章第 I、II 部分由金韵修订, 第 III 部分由王济群修订。第四章 § 1~§ 4 及 § 7~§ 8 由王济群修订, § 5~§ 6 由金韵修订。

修订稿经理科化学工程基础教材临时编审工作小组召开的审稿会议审定, 参加审稿的有南开大学(主审)、北京师范大学、上海师范学院、中山大学、吉林大学、华东师范大学、武汉大学、福建师范大学、四川大学、华中师范学院等院校的代表。在审阅过程中, 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
1983 年 7 月

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 化学工程学的研究对象及任务.....(1)
- § 2 化学工程学的发展.....(1)
- § 3 化学工程基础课的教学目的.....(1)
- § 4 物理量的单位制.....(2)

第一章 流体动力过程

- § 1 流体静力学.....(6)
 - 1-1 流体的密度和比容
 - 1-2 流体的压强
 - 绝对压强, 表压, 真空度
 - 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 动力粘度
 - 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和能量守恒与转化
 - 3-2 用压头表示的能量守恒与转化
 - 3-3 应用流体动力学方程的注意事项
 - 3-4 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.....(29)
 - 4-1 管路的沿程阻力
 - 沿程阻力的压头损失与剪应力的关系
 - 沿程阻力系数
 - 用因次分析法整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
 - 4-2 管件、阀门的局部阻力
 - 4-3 管路阻力计算的应用
 - 4-4 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.....(47)
 - 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 其他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.....(57)
- 习题.....(59)

第二章 传热过程

- § 1 传导传热.....(64)
 - 1-1 传导传热
 - 1-2 平面壁的稳定热传导
 - 多层平面壁的稳定热传导

1-3 圆筒壁的稳定热传导 多层圆筒壁的稳定热传导	§ 5 热交换设备..... (83)
§ 2 对流传热..... (69)	5-1 夹套式热交换器
2-1 对流给热	5-2 蛇管式热交换器
2-2 用因次分析法求无相变时流体的给热系数	5-3 套管式热交换器
2-3 圆管内流体在湍流条件下的给热系数	5-4 列管式热交换器
§ 3 辐射传热..... (74)	5-5 板式热交换器
§ 4 热交换器的计算..... (76)	§ 6 热交换过程的强化途径..... (87)
4-1 传热速率与传热系数	增大传热面积 A
平面壁的总传热速率方程式	增大传热温差 Δt_m
圆筒壁的总传热速率方程式	提高传热系数 K
4-2 传热的平均温度差	本章符号说明..... (88)
4-3 传热过程计算举例	习题..... (89)

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..... (92)	2-1 填料式塔
1-1 单相中物质的扩散	2-2 板式塔
分子扩散	泡罩塔
对流扩散	筛板塔
单相传质方程式及单相传质系数	浮阀塔
1-2 相间传质	浮动舌形塔
双膜理论及其他有关理论	2-3 喷射式传质装置
§ 2 传质设备..... (101)	第 I 部分符号说明..... (107)

第 II 部分 吸 收

§ 1 吸收原理和装置流程..... (108)	3-3 吸收传质系数的确定
§ 2 吸收的气液平衡关系..... (109)	§ 4 吸收过程的物料衡算及操作线方程式..... (123)
§ 3 吸收传质速率方程式..... (115)	§ 5 吸收设备的计算..... (124)
3-1 吸收传质速率方程式及各吸收传质系数之间的关系	5-1 吸收剂的比用量
气膜及液膜吸收传质速率方程式	5-2 吸收塔塔径的确定
总吸收传质速率方程式	5-3 吸收塔填料层高度的确定
吸收传质总系数与吸收传质分系数之间的交换关系	填料层高度的基本计算方程式
3-2 以比摩尔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	传质单元高度与传质单元数的计算方法
以比摩尔分数差表示推动力的吸收速率方程式	§ 6 多组分吸收的处理方法简介..... (136)
不同表示方式的吸收传质分系数之间及总系数之间的变换关系	§ 7 化学吸收..... (141)
	第 II 部分符号说明..... (142)
	习题..... (144)

第 III 部分 精 馏

§ 1 精馏原理和流程装置..... (147)	2-1 气-液相平衡及其表示方法
1-1 精馏原理	理想溶液气-液相平衡关系的基本算式
1-2 精馏流程装置	表示气-液相平衡的几种相图
§ 2 气-液相平衡..... (148)	2-2 相对挥发度与气液相平衡的关系

组分的挥发度及其物理意义	用相对挥发度计算气-液相平衡数据	芬斯克公式	吉利兰图
2-3 理想溶液相平衡数据的估算	由正常沸点估算任意温度时纯组分的饱和蒸气压	4-5 多组分精馏简介	§ 5 最宜实际回流比的确定 (177)
相对挥发度的估算	估算气液相平衡数据举例	§ 6 实际塔板的效率和实际塔板数 (178)	6-1 板式塔的效率
2-4 非理想二组分溶液气-液相平衡数据的估算	理想溶液和非理想溶液的不同	6-2 影响板式塔效率的因素	6-2 影响板式塔效率的因素
活度和活度系数	§ 3 精馏过程的物料衡算 (160)	6-3 提高板式塔效率的途径	6-3 提高板式塔效率的途径
3-1 全塔物料衡算	3-1 全塔物料衡算	6-4 实际塔板数	6-4 实际塔板数
3-2 操作线方程	3-2 操作线方程	§ 7 简单蒸馏和间歇精馏 (181)	7-1 简单蒸馏
精馏段的操作线方程	精馏段的操作线方程	简单蒸馏的特点	简单蒸馏的特点
提馏段的操作线方程	提馏段的操作线方程	简单蒸馏的计算	简单蒸馏的计算
加料处的操作线方程	3-3 操作线方程在 $y-x$ 相图上的表示	7-2 间歇精馏	7-2 间歇精馏
3-3 操作线方程在 $y-x$ 相图上的表示	精馏段操作线	间歇精馏的特点	间歇精馏的特点
精馏段操作线	δ 线	间歇精馏的计算	间歇精馏的计算
δ 线	提馏段操作线	简单蒸馏和间歇精馏的比较	简单蒸馏和间歇精馏的比较
3-4 回流比	3-4 回流比	§ 8 特殊精馏简介 (187)	8-1 共沸精馏
回流比与传质过程推动力的关系	回流比与传质过程推动力的关系	8-2 萃取精馏	8-2 萃取精馏
最小回流比	§ 4 理论塔板和理论塔板数 (169)	§ 9 塔高、塔径和塔板压力降的计算 (191)	§ 9 塔高、塔径和塔板压力降的计算 (191)
4-1 理论塔板的概念	4-1 理论塔板的概念	9-1 塔高的计算	9-1 塔高的计算
4-2 逐板计算法求理论塔板数	4-2 逐板计算法求理论塔板数	9-2 塔径的计算	9-2 塔径的计算
4-3 图解法求理论塔板数	4-3 图解法求理论塔板数	9-3 塔板的压力降	9-3 塔板的压力降
4-4 用芬斯克公式和吉利兰图计算理论塔板数	4-4 用芬斯克公式和吉利兰图计算理论塔板数	第 III 部分符号说明 (194)	第 III 部分符号说明 (194)
		习题 (195)	习题 (195)

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 (200)	§ 3 物料在反应器内的停留时间分布 (208)
1-1 反应器的类型	3-1 分布函数的意义和性质
间歇操作的搅拌釜	分布和分布函数
连续操作的管式反应器	分布函数的性质
连续操作的搅拌釜	3-2 停留时间分布函数的测定
串联的连续操作搅拌釜	脉冲法
1-2 反应器类型的选择	阶梯输入法
不同类型反应器中反应物浓度特点	3-3 典型反应器的停留时间分布函数
根据动力学特点选择反应器类型	间歇操作搅拌釜
§ 2 物料在反应器内的流动模型 (206)	活塞流管式反应器
2-1 理想混合流动模型	连续操作的理想搅拌釜
2-2 活塞流流动模型	串联的连续操作的理想搅拌釜
2-3 轴向扩散流动模型和多釜串联流动模型	3-4 停留时间分布函数在分析解决反应器问题中的作用
活塞流叠加轴向扩散的流动模型	确定实际流动体系的 N 或 D_z
多釜串联流动模型	判断物料在反应器里的流动情况

计算化学反应的转化率

§ 4 流动体系的动力学模型..... (225)

4-1 流动体系中的化学反应速度和空间时间

4-2 气相反应的体积膨胀系数
分子总数变化率
连续操作过程的转化率
气相反应的体积膨胀系数

4-3 流动体系的动力学方程

§ 5 典型反应器的计算..... (232)

5-1 间歇操作的理想搅拌釜的计算

5-2 活塞流管式反应器的计算

5-3 连续操作的理想搅拌釜的计算
利用分布函数的性质求 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
利用物料衡算求 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
利用图解法求 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
连续搅拌釜体积的计算

5-4 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 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
图解法计算 $\bar{x}_A-\bar{\tau}$ 关系
多釜串联反应器体积的计算

5-5 带有轴向扩散的管式反应器的计算

5-6 小结

§ 6 气固相固定床催化反应器..... (251)

6-1 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
非绝热外部换热列管式反应器
非绝热自热式列管反应器

6-2 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

6-3 反应器的温度最佳化
不可逆的化学反应
可逆吸热反应
可逆放热反应
可逆放热反应的最佳温度及其分布
最佳温度分布的实施

§ 7 流化床反应器..... (273)

7-1 基本现象与名称
流态化过程
两种流态化
沟流
腾涌
流化床膨胀比
流化数
流化质量参数

7-2 流化床的基本结构
基本构件
多层流化床
两器流化床

7-3 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

7-4 流化床反应器的放大问题简介

§ 8 反应器的稳定性..... (289)

8-1 反应器稳定性的判断

8-2 反应器的生热曲线

8-3 反应器的去热曲线

8-4 分析反应器稳定性举例

8-5 确保反应器稳定的途径
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走热的方法

§ 9 反应器放大过程简介..... (297)

[附]

一、扩散模型的 $E(\theta)$

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

六、临界流化速度 w_{mf} 的推导

本章符号说明..... (308)

习题..... (309)

附 录

- 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

- 五、水的物理性质
- 六、一些液体的物理性质
- 七、一些有机物的蒸气压
- 八、一些气体的物理性质

九、一些固体材料的比重、导热系数和比热容

十、列管换热器的传热系数 K 的参考值

十一、管内流体常用流速范围

十二、管子规格

十三、管壁的绝对粗糙度

十四、管内流体流动沿程阻力系数曲线图

十五、烃类的 $P-T-m$ 图

绪 论

§ 1 化学工程学的研究对象及任务

化学工程学是研究大规模地改变物料的化学组成和物理性质的工程技术学科。它研究的对象不但包括在化工生产装置中进行的化学变化过程,而且还包括把混合物分离为纯净组分的过程,以及改变物料物理状态和性质的各种过程。

化学工程学的任务是:从理论上阐明化工生产中的各个过程,找到其中具有规律性的问题,以求得在化工技术开发中减少盲目性,增加自觉性。它的任务不是制作某一个具体的设备或是生产某一种产品,化学工程学所涉及的领域是工程技术中的基础理论。

§ 2 化学工程学的发展

作为一门独立的学科,化学工程学始于二十世纪初,到现在已有八十年的历史^①。1893年在芝加哥化学家会议上就有人谈及“化工、食品工业,尽管其物料不同,但都具有共同的基础”。之后,陆续有人提出了单元操作的概念,即把千变万化的化工产品生产过程分解为若干种单元操作。此后二十年,化学工程学主要是对单元操作,尤其是对于流体流动、传热、传质等单元操作进行研究,并把它们归纳于传递过程的理论之中。到了四十年代,流化床催化裂化、丁苯橡胶合成,以及原子能工程三项重大技术的崛起,开始了从工程上对化学反应过程的研究,至五十年代正式形成了“反应工程学”分支。自那时以后,化学反应工程学至今方兴未艾,与早先发展起来的“传递工程”共同成为化学工程学的两大支柱。

七十年代以后,由于计算技术的发展和化工生产日益趋向于大型化、连续化,化学工程学的研究不再限于单个的单元操作,而是深入到整个工厂、甚至是整个行业的大系统的研究,从而形成了化工系统工程学。时至今日,化学工程学已经开始进入到新近发展起来的生物工程、环境工程等崭新的领域。

§ 3 化学工程基础课的教学目的

本课程的教学目的是对学生进行化学工程学的教育,进一步提高学生在今后工作中分析问题和解决问题的能力。

从化学系的培养目标和我国今后的科学技术发展方针来看,理科化学系的学生,他们中的不少人将从事与国民经济有关的技术开发工作。这就是说,他们一定要能与工程技术人员搞好“接

^① O. A. Hougen, Chemical Engineering Progress, Vol. 73, No. 1, 89~104(1977).

力”或“互相渗透”，只有这样，才能把科研成果尽快地转化为生产力。因此，对于理科化学系的学生进行一定的化学工程教育是完全必要的。具体地说，通过本课程的学习，学生在与工程技术人员相互配合的能力以及将化学工程学的有关知识用于自己的科研与教学的能力，应有所提高。

对于理科学生进行化学工程教育，并不是要把化学系的学生也培养成一个工程技术人员，而主要是使理科化学系的学生能与工程技术人员有一定的共同语言。至于什么是共同语言，这主要就是要了解和掌握化学工程学中的主要观点和方法。即速率及效率的观点、最佳化的观点和与流动体系有关的观点，以及物料衡算方法、能量衡算方法、相似放大方法和数学模型放大方法。这些观点和方法是化学工程学中极为重要的内容，但又是化学系其它课程很少涉及的内容，理科化学系学生应予掌握。

§ 4 物理量的单位制

化学工程既面向大规模生产，又和小型科学实验密切相连，因此它需要涉及多种物理量，如长度、面积、体积、密度、粘度、导热系数、温度、压强等等。尽管这些物理量种类繁多，但都可用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。常用的基本量有长度，力或质量，时间和温度等。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，称为导出量，它们的单位称为导出单位。

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，过去很长一段时间曾主要采用公制(或称米制)、英制。公制中又有绝对单位制和工程单位制。

绝对单位制是过去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，单位制则分为两种。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，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[千克]^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[千克·米/秒²]，称为牛顿。

在工程技术上，过去很长一段时间，由于经常要考虑物料的重量或所受的力，以力作为一个基本量比较方便，习惯上广泛地采用了重力单位制，也称工程单位制。它是以长度、力和时间作为基本量，以[米]、[千克(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[千克]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，

^① 这里指的是千克(质)，千克也称公斤。同样，在工程单位制中的公斤也称千克。

如上所述，它是质量在重力场所受的力。按上面的关系式把 981000 [达因] 定义为 1 [千克(力)]^①，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：

$$1 \text{ [千克(力)]} = 1 \text{ [千克(质)]} \times 9.81 \text{ [米/秒}^2\text{]}$$

$$= 9.81 \text{ [千克(质)]} \cdot \text{[米/秒}^2\text{]}$$

$$1 \text{ [千克(质)]} = \frac{1}{9.81} \text{ [千克(力)]} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}$$

所以，质量在工程单位制中的单位是 [千克(力)·秒²/米]。它在工程单位里是一个导出单位。

多种计量单位制度并行使用，在科学技术上和国际交往中造成很大的不便。随着科学技术的发展和国际交往的日益频繁，统一度量单位制度的要求日益迫切，因此，1875 年十七国签订“米制公约”，1889 年第一届国际计量会议确定了米(长度单位)、千克(质量单位)、秒(时间单位)三个基本单位。至 1960 年，第十一届国际计量会议又以米、公斤(质)、秒(MKS 制)为基础，加上其他单位，并作了一些规定、命名，制定了国际单位制(SI)。这种单位制采用了七个基本单位，如表 1 所示。

表 1 SI 基本单位

物 理 量	英 文 名 称	单 位 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

在这七个基本单位中，化学工程学中经常用到的是 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，化学工程学中还常用到一些国际单位制导出单位，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，符号为 N，它是使 1 千克(公斤)质量的物体产生每秒每秒 1 米加速度的力，即 [kg·m/s²]。压强的单位称为帕斯卡，符号为 Pa，就是每平方米面积上受力 1 牛顿，即 [N/m²]，用国际制基本单位表示为 [kg/m·s²]。能量、功和热都归结为力与距离的乘积，它们的单位便是 [N·m]，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 [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，化学工程学中常用的词冠如表 3 所示。

① $G = mg$

$1 \text{ [克(力)]} = 1 \text{ [克(质)]} \times 981 \text{ [厘米/秒}^2\text{]} = 981 \text{ [克(质)]} \cdot \text{厘米/秒}^2 = 981 \text{ [达因]}$

$1 \text{ [千克(力)]} = 1 \text{ [千克(质)]} \times 9.81 \text{ [米/秒}^2\text{]} = 9.81 \text{ [牛 顿]} = 9.81 \times 10^5 \text{ [达因]} = 981000 \text{ [达因]}$

表2 化学工程学中常用的一些国际单位制导出单位

物理量	单位	单位专门名称	单位专门符号	用其他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	N·m
功率	kg·m ² /s ³	瓦[特]	W	J/s
表面张力	kg/s ²			N/m
扩散系数	m ² /s			
动力粘度	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)			

表3 化学工程学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

* 允许用, 但不提倡用。

我国于1977年颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》中明确规定“我国的基本计量制度是米制(即公制), 逐步采用国际单位制”。为适应科技发展的需要, 本书第二版采用了国际单位制。

为了便于阅读采用工程单位的书刊及使用SI单位进行计量和计算, 我们将化学工程学中常用的物理量工程单位与SI单位间换算关系列表如下(见下页)。

目前使用的单位, 除了上述几种外, 还有一些习用的单位, 例如用小时(h)作为时间的单位, 用大气压(atm)或毫米汞柱(mmHg)作为压强的单位等, 这些单位称为制外单位, 它们或者因为大小适中使用方便, 或者因习惯关系沿袭下来普遍使用, 所以又叫做习用单位。

工程单位换算为 SI 单位

质量	1[千克·秒 ² /米]=9.807[kg(质)]
力	1[千克(力)]=9.807[N]
压强	1[千克(力)/米 ²]=9.807[N/m ²]=9.807[Pa]
	1[千克(力)/厘米 ²]=9.807×10 ⁴ [N/m ²]=9.807×10 ⁴ [Pa]
功	1[千克(力)·米]=9.807[N·m]=9.807[J]
功率	1[千克(力)·米/秒]=9.807[N·m/s]=9.807[J/s]=9.807[W]
密度	1[千克(力)·秒 ² /米 ⁴]=9.807[kg(质)/m ³]
动力粘度	1[千克(力)·秒/米 ²]=9.807[N·s/m ²]=9.807[Pa·s]
温度	0[°C]=273.15[K]
热量	1[卡]=4.187[J]
	1[千卡]=4.187[kJ]
比热	1[千卡/千克·°C]=4.187[kJ/kg·K]
导热系数	1[千卡/米·时·°C]=4.187[kJ/m·h·K]=1.163[W/m·K]
传热系数	1[千卡/米 ² ·时·°C]=4.187[kJ/m ² ·h·K]=1.163[W/m ² ·K]

上述单位制基本上属于米制系统。此外还有英制单位，是以英尺、磅、秒作基本单位的。换算时可以参阅有关手册。

此外，由于我国正在逐步试行国际单位制，因此还规定了与国际单位制暂时并用的一些单位，如力的单位也可用达因(dyn)，热量的单位也可以用卡(cal)，温度的单位也可用摄氏度[°C]等等^①。

^① 中国国际单位制推行委员会：《中华人民共和国计量单位名称与符号方案(试行)》第一版 1981-03-31。

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。以流体力学规律为基础规律的化工过程称为流体动力过程。

流体的特性是, 流体流动时没有固定的形状, 其质点易发生相对运动, 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, 液体也可看作不可压缩的流体, 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, 以及如何应用这些原理去解决实践中的问题, 等等。

§ 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密度、压强等性质有关, 下面先分别介绍这些性质。

1-1 流体的密度和比容

密度 单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度, 即

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

式中: ρ ——流体的密度[kg/m^3];

m ——流体的质量[kg];

V ——流体的体积[m^3].

值得注意的是, 不同的书籍中由于使用了不同的单位制, 密度的单位和数值往往都不相同。例如目前在手册中查到的密度 ρ' 常常是绝对单位制的, 它的单位为[克(质)/厘米³], 由于 1 [克/厘米³]相当于 1000 [千克/米³], 因此把从手册中查得的 ρ' [克/厘米³]的值乘以 1000, 就可求得用 SI 单位表示的密度 ρ [kg/m³].

为了查取数据方便, 以及便于区分密度和工程单位制中惯用的比重、重度, 下面再介绍比重和重度这两个物理量。

比重 SI 中并不采用比重这个物理量, 但过去在物理、化学以及工程技术工作中却常用到它。它是指物料的密度(或重度)与 277 K (4°C) 时纯水的密度(或重度)之比, 以符号 d 表示。比重是没有单位的。纯水在 277 [K] 时比重为 1, 而密度以国际制单位表示时为 1000 [kg/m³], 所以任一流体物料的密度在数值上等于它的比

重的1000倍,即某流体的密度等于比重 $\times 1000$ [kg/m³]。

重度 这是工程单位制中的一个专用的且极其重要的物理量,是指单位体积的流体所具有的重量,即

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

式中: γ ——流体的重度 [千克^①/米³];

G ——流体的重量 [千克];

V ——流体的体积 [米³]。

由于 $G = mg$,因而重度和密度的关系实质上就是重量和质量的关系。但必须注意,这种关系只适用于同一单位制中的换算^②,例如以 [千克/米³] 为单位的重度和以 [千克·秒²/米⁴] 为单位的密度之间的相互换算,这里采用的都是工程单位制的单位。

再有一点应该着重说明的,同一流体用工程制单位表示的重度和用国际制单位表示的密度在数值上是相同的。这是由于在工程单位制中已经把 9.81 牛顿定义为 1 千克(力),产生 9.81 牛顿力(或重量)的质量是 1 千克(质),因此可认为 SI 中的 1 千克(质量)与工程单位制中的 1 千克(力)(重量)在数值上是相等的。因此国际制单位表示的密度 ρ [kg/m³],也就成为用工程单位表示的重度 γ [千克(力)/米³]。

各种流体的密度是不相同的。任何一种流体的密度又随其所具有压力和温度而变化:

$$\rho = f(P, T)$$

压力对液体的密度的影响很小,常可忽略不计,故常称液体为不可压缩的流体。温度对液体的密度有一定的影响,故在手册或书刊中,对液体密度的数据都注明了温度条件。

气体因具有可压缩性及膨胀性,其密度随温度和压力有较大的变化,通常在温度不太低,压力不太高的情况下,气体的密度可近似地用理想气体状态方程式进行计算:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (1-2)$$

式中: P ——气体的压力 [kN/m²] 或 [kPa];

T ——气体的绝对温度 [K];

M ——气体分子的千摩尔质量 [kg/kmol];

R ——气体常数, 8.314 [kJ/kmol·K]。

若在所给温度、压力条件下气体偏离理想气体较大,则应用上式进行计算时需加以校正。

比容 单位质量流体的体积,称为流体的比容,即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

式中: v ——比容 [m³/kg]。

式(1-3)指出,流体的比容是密度的倒数。

各种气体和液体的密度,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密度数据),或由查得的比重或重度换算而得。化工生产中所遇到的流体,多为 n 个组分的混合物。对流体混合物的密度可以用不同的方法求出。当工业上不要求特别精确时,气体混合物的密度

① [千克/米³]中的千克指的是[千克(力)],有时写做[kgf],但一般多不注出 f 。读者要注意区分不同单位制中 kg 的含意。

② 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。