



高等学校试用教材

化学工程

第一册

上海化工学院 成都科技大学 大连工学院 编

化学工业出版社

高等学校试用教材

化 学 工 程

第 一 册

上海化工学院
成都科技大学 编
大连工学院

化 学 工 业 出 版 社

本书为化工部教育司组织编写的教材《化学工程》第一册。内容包括：流体流动、流体力学基础、流体输送设备、流体通过颗粒层的流动、流体与颗粒间的相对运动、传热以及蒸发等共七章；可供各院、校化工类各专业作教材之用，也可供化工部门研究、设计和生产单位技术人员参考。

参加本书（第一册）编写单位有：上海化工学院、成都科技大学和大连工学院。第一至第五章编写人员有：张洪沅、周少义、王能勤、陈书鑫（成都科技大学）。第六与第七章编写人员有：丁惠华、郑轩荣、沙庆云、向惟蛟（大连工学院）。绪论、附录编写及全稿统编人员有：王承明、施亚钧、黄圣惠、江体乾、孙象兴（上海化工学院）。

本书（第一册）由苏元复、张洪沅、林纪方三教授审阅。

高等学校试用教材
化 学 工 程
第 一 册

上海化工学院
成都科技大学 编
大连工学院

化学工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆印张23¹/₂字数589千字印数1—31,000
1980年3月北京第1版1980年3月北京第1次印刷
书号15063·3177(K-208)定价2.40元

目 录

绪论	1
----------	---

第一章 流体流动

本章符号说明	7
1-1 概述	9
第一节 流体的性质	9
1-2 密度	9
1-3 粘度	10
第二节 流体的压力与流体静力学基本方程式	14
1-4 流体的压力	14
1-5 流体静力学基本方程式	14
第三节 流体在管道内的流动	16
1-6 流体的流量和流速	16
1-7 流体的稳定和不稳定流动	17
1-8 流体流动的总物料衡算	18
1-9 流体流动的总能量衡算柏努利方程	20
第四节 流体在管内流动时的阻力	27
1-10 流动类型	27
1-11 流动阻力	29
1-12 在直管中的流体流动阻力	30
1-13 局部阻力	37
1-14 可压缩流体的流动阻力	42
1-15 流体在管内流动时的流速分布	45
第五节 管路的计算	47
1-16 管路计算	47
第六节 流量的测量	54
1-17 流量测量	54
第七节 非牛顿型流体阻力计算	58
1-18 非牛顿型流体的定义和类型	58
1-19 流变指数和稠度指数	60
1-20 非牛顿型流体的阻力损失和速度分布	60
参考文献	63
习 题	63

第二章 流体力学基础

本章符号说明	67
2-1 概述	68

第一节 流体流动的基本微分方程	69
2-2 流体的速度、加速度和流线	69
2-3 流体流动的连续性微分方程	72
2-4 欧拉流动微分方程	73
2-5 奈维-斯托克方程	74
2-6 流动微分方程求解举例	77
第二节 边界层流动	80
2-7 边界层概念	81
2-8 滞流边界层方程	82
2-9 边界层积分动量方程	83
2-10 卡曼积分动量方程应用举例	85
第三节 湍流流动	90
2-11 湍流流动	90
2-12 湍流流动的各种速度定义	92
2-13 湍流应力(雷诺应力)	93
2-14 涡流粘度和混合长	94
2-15 圆管内湍流流动的速度分布	97
2-16 圆管内湍流流动的摩擦阻力	102
2-17 滞流底层厚度	104
参考文献	106
习 题	106

第三章 流体输送设备

本章符号说明	108
3-1 概述	109
第一节 液体输送设备	110
3-2 离心泵	110
3-3 其它类型化工用泵	130
第二节 气体压缩和输送设备	137
3-4 离心通风机、鼓风机与压缩机	138
3-5 旋转鼓风机与压缩机	142
3-6 往复压缩机	143
3-7 真空泵	147
参考文献	149
习 题	149

第四章 流体通过颗粒层的流动

本章符号说明	151
4-1 概述	152
第一节 流体通过固定床的流动	152
4-2 颗粒床层的特性	153
4-3 通过颗粒床层的滞流和湍流流动	156

第二节 过滤	160
4-4 过滤操作的基本概念	160
4-5 过滤设备	162
4-6 过滤基本方程	166
4-7 恒压过滤	168
4-8 恒速过滤与先升压后恒压过滤	173
4-9 过滤常数的测定	174
第三节 离心分离	178
4-10 离心分离的一般概念	178
4-11 影响离心分离的主要因素	179
4-12 固体物料自液体中的分离	180
4-13 两种不互溶液体的分离	181
4-14 离心机的类型	181
参考文献	184
习 题	184

第五章 流体与颗粒间的相对运动

本章符号说明	187
5-1 概述	188
5-2 流体中的颗粒运动	188
第一节 沉降	189
5-3 重力沉降	190
5-4 重力沉降器	193
5-5 离心力作用下的沉降速度	194
5-6 离心沉降设备	195
第二节 固体流态化	200
5-7 固体流态化的基本概念	200
5-8 实际流化床与理想状况的差异	201
5-9 最小流化速度与带出速度	203
5-10 流化床的膨胀高度与分离高度	206
第三节 气力输送	207
5-11 概述	207
5-12 气力输送的气速和压降	208
参考文献	215
习 题	216

第六章 传 热

本章符号说明	217
第一节 概述	219
6-1 传热在化工生产中的应用	219
6-2 传热的三种基本方式	219
第二节 间壁两侧流体的传热	220

6-3	传热基本方程	220
第三节	热传导	221
6-4	热传导的基本概念和傅立叶定律	221
6-5	导热系数	222
6-6	单层及多层平壁的热传导	225
6-7	单层及多层圆筒壁的热传导	227
6-8	具有内热源的热传导	230
第四节	对流传热	231
6-9	对流传热的基本概念	231
6-10	传热膜系数的影响因素	232
6-11	用因次分析法求无相变化时的传热膜系数 α	233
6-12	流体作强制对流时的传热膜系数	234
6-13	自然对流膜系数	241
6-14	蒸汽冷凝时的传热膜系数	242
6-15	液体沸腾时的传热膜系数	247
6-16	非牛顿型流体的传热	251
第五节	传热边界层	252
6-17	传热边界层和能量方程	252
6-18	流体经过壁面作滞流流动时的对流传热	253
6-19	流体经过壁面作湍流流动时的对流传热	256
第六节	热辐射	256
6-20	热辐射的基本概念	256
6-21	物体的发射能力	257
6-22	两固体间的相互辐射	259
6-23	气体的热辐射	261
6-24	设备热损失的计算	263
第七节	传热计算	265
6-25	平均温度差的计算	265
6-26	传热系数	268
6-27	壁温的计算	271
6-28	传热效率和传热单元数	272
第八节	换热器	276
6-29	换热器的类型	276
6-30	列管式换热器	278
6-31	其他类型换热器	288
6-32	换热器的强化途径和方法	295
参考文献		296
习 题		296

第七章 蒸 发

本章符号说明	302
第一节 概述	304

第二节 单效蒸发和真空蒸发	305
7-1 单效蒸发的计算	305
7-2 溶液的沸点和温度差损失	309
7-3 真空蒸发	313
第三节 多效蒸发	313
7-4 多效蒸发的流程和加料方法	314
7-5 多效蒸发的计算	315
7-6 提高加热蒸汽经济性的其它措施	325
7-7 蒸发器的生产能力、蒸发强度和多效蒸发中效数的限制	327
第四节 蒸发设备	328
7-8 蒸发器的结构及特点	328
7-9 除沫器、冷凝器和真空装置	335
第五节 影响蒸发器生产强度的因素	336
参考文献	339
习 题	339

附 录

一、单位换算	341
二、干空气的物理性质 ($P=760$ [毫米汞柱])	345
三、水的物理性质	347
四、水在不同温度下的粘度	348
五、水的饱和蒸汽压 (-20 至 100°C)	349
六、饱和水蒸汽表 (以温度为准)	349
七、饱和水蒸汽表 (以压力为准)	350
八、液体粘度共线图	353
九、气体粘度共线图 (常压下用)	355
十、液体比热共线图	356
十一、气体比热共线图 (常压下用)	358
十二、液体汽化潜热共线图	359
十三、常用固体材料的重要性质	360
十四、管子规格	361
十五、泵规格	363
十六、离心通风机规格	365
十七、管壳式热交换器系列标准 (摘录)	366
十八、无机溶液在大气压下的沸点	368

绪 论

一、化学工程及其发展

化学工程是研究大规模地改变物料的化学组成及机械和物理性质的工程技术学科。它研究的内容，不但包括具有化学变化的过程，而且还包括分离混合物为较纯净的不同组分以及改变物理状态和性质的各种过程。例如，从油井开采出来的石油，首先经过精馏操作，分离为不同挥发性的各种馏分；若把其中的石脑油作为继续加工的原料，经高温裂解，得到主要为烯烃的混合物，再用低温分离，可得乙烯、丙烯等中间产物。乙烯或丙烯通过高压或催化聚合反应，就可得到聚乙烯或聚丙烯。上述例子中的各项工序，都属于化学工程的研究范畴。

因此，化学工程必须以化学、物理学、数学为基础，研究化学、石油、冶金、轻工、原子能等工业中具有共同特点的单元操作和化学反应工程等，以及有关的流体力学、热量传递和物质传递的原理、热力学和化学动力学等等，以指导上述各种工业过程及设备的改进和发展，使之技术上更趋先进，经济上更趋合理，对国民经济建设和国防建设的发展具有重要的作用。

国外高等学校在十九世纪九十年代开始设置“化学工程系”，开出的课程大都是按照不同化工行业编写各自的生产工艺学。直到二十世纪初才明确认识到各行各业通用的物理操作的共性，并于二十年代出版了第一部“化工原理”教科书。我国于本世纪二十年代也创办了“化学工程系”，开出的这一课程也叫“化工原理”，三十年代出版了《化学工程机械》。解放后，在党的领导下，为了适应社会主义建设的需要，我国先后出版了《化工原理》、《化工过程及设备》和《化工操作原理及设备》等教材。

化学工程在其发展过程中，起初归纳成为若干单元操作，尔后又陆续发展形成下列几个分支：

“化工热力学”，它将热力学中各项基本定律应用来讨论各单元操作中的极限和有关能量问题。

“化学反应工程”，它是二十世纪五十年代至七十年代逐渐形成的，迄今尚处于继续发展阶段。主要是以流体力学、热量传递和物质传递原理及化学动力学为基础，研究上述各项因素间的相互关系和影响，以阐明工业反应过程的实质，目的在于控制生产规模的化学反应过程，并对设计工作者提供理论依据，使能结合具体工艺要求进行最佳反应器的设计。

“化工系统工程”，它是“化学工程”中新近发展起来的一个分支。它的内容是将影响化工过程的有关参数列出简化的数学模型，由实验验证并求出模型中未知参数，用数学方法求解微分方程和代数方程，并在约束条件下使之最优化。其目的使所研究的系统能较好地运转，并获得最佳经济效益。一个工业过程可以是一个很大或较小的系统。几个较小系统应当设计达到有机地配合而完成总的指标。系统工程的主要任务是研究系统的设计、控制和管理。

二、单元操作

前面简单地介绍了“化学工程”有关的几个分支。其中发展最早而且最基本的是“单元操作”，它是讨论化工和其有关的各行业中通用物理操作的共同原则和设备。以“干燥”这个单

元操作为例，在造纸、制皂、染料、制药等有机工业中使用，也在陶瓷、制碱、制盐等无机工业中使用。在不同的行业中处理不同物料所用的“干燥”技术都遵循统一的原则。本书所讨论的，主要是作为化学工程基础的“单元操作”。其内容可分为三大部分：流体力学及其应用，传热学及其应用，分离过程。

(一) 流体力学讨论流体流动所遵循的自然法则，以及流体流动时与它相互接触的固体之间的关系。流体输送、过滤、离心分离、沉降和固体流态化等，都是流体力学中各法则的应用。

(二) 传热学讨论物质间热量的交换过程。因此，热传导、对流和辐射三种方式是主要内容。蒸发、结晶等主要也是应用传热学中各法则的过程。

(三) 分离过程主要是指物质通过相界面的扩散分离，例如气体吸收、蒸馏、干燥、萃取、离子交换、逆渗析等。随着科学技术的发展及国民经济和国防上的需要，新的分离过程将会不断出现。

在许多单元操作的发展过程中，人们逐渐认识到它们物理作用的共同原则，可进一步归纳为动量传递、热量传递和质量传递三种“传递过程”，它们有类似的特性，可以推导出其间的关系。本世纪二十年代起逐渐形成“三传理论”。

三、四个基本概念

在分析单元操作或化工过程中，常常用到下列四个基本概念：质量守恒、能量守恒、平衡关系和过程速率。化工计算中的物料衡算和热量衡算便是前两概念的应用。

物料衡算——根据“质量守恒定律”说明在一个化工过程中，进入的物料量必等于排出物料量和过程中的累积量。由此对总物料或其中某一组分可列出方程求解，这种运算称为物料衡算。如果在过程中累积量等于零，它是稳定操作。反之，将是不稳定操作。

进行物料衡算时，首先确定计算对象所包括的范围。它可以在一个单一的设备或其中一部分进行，也可以包括几个设备或几个处理阶段的全流程。其次，要规定出衡算的基准。至于选用哪一范围，应视具体情况而定。对有化学变化的过程，衡算对象以未发生变化的物质（惰性物质）或某一化学元素为基准。例如，若进入的物料是一氧化碳，出来的是二氧化碳，则碳原子量并不发生变化，于是进出的碳原子量必然相等。

例 1 燃烧某种含碳 79%（重量）和灰分 6%（重量）的煤，所得的煤渣中含灰分 90%（重量）和碳 10%（重量）。试计算燃烧 100kg 煤所得的煤渣重和未利用的可燃物的百分数。

解：因灰分在燃烧前后都无变化，所以在物料衡算中，灰分可作为联系物质，煤中的碳一部分在燃烧后变化成碳的氧化物，另一部分碳和灰分共存于煤渣中，所以解此题时，可以利用灰分将煤的总量和煤渣总量联系起来。

基准——100kg 煤

$$\text{煤渣总量} = 6 \div 0.90 = 6.67 \text{ kg}$$

$$\text{煤渣中所含未燃烧的碳} = 6.67 - 6.00 = 0.67 \text{ kg}$$

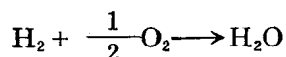
$$\text{未利用的可燃烧物（碳）百分率} = \frac{0.67}{79} \times 100 = 0.85\%$$

例 2 设有含氢 15%（重量）和碳 85%（重量）的柴油，燃烧时所用的空气是理论量加过量 50%，使柴油可以完全燃烧。试计算燃烧 100kg 柴油时所用的空气量及烟道气的组分量。

解：此题中的柴油以重量计算，但燃烧的化学反应用 kmol 来作计算单位较为便利。所以 100kg 柴油中的碳和氢的含量应当换算成 kmol 再计算。

基准——100kg柴油

化学反应: $C + O_2 \longrightarrow CO_2$



柴油中含有: $15\text{kg氢} = \frac{15}{2}\text{kmol氢} = 7.5\text{kmol氢}$

$85\text{kg碳} = \frac{85}{12}\text{kmol碳} = 7.08\text{kmol碳}$

形成水和二氧化碳所需的氧是

$$7.5 \times \frac{1}{2} + 7.08 = 10.83\text{kmol氧}$$

连同过量所需的总氧量是

$$10.83 \times 1.50 = 16.25\text{kmol氧}$$

送入空气的总重量是

$$16.25 \div 0.21 = 77.35\text{kmol空气}$$

送入空气中的氮重量是

$$77.35 - 16.25 = 61.10\text{kmol氮}$$

所以干烟道气的组分是

$$N_2: 61.10 \text{ kmol}$$

$$O_2: 5.42 \text{ kmol}$$

$$CO_2: 7.08 \text{ kmol}$$

烟道气中还有 $7.5\text{kmol } H_2O$, 但在烟道气分析时, 此值并不出现。但若物料衡算时是对氢或氧作衡算, 则不能忽视水的存在。

上面所举的两例只是最简单物料衡算, 它表明了在进行物料衡算首先应当注意: 1. 基准的选择, 2. 联系物质的选择, 3. 单位的选择。在例2中业已指出选用 kmol 作计算单位的重要性。在此还应当指出, 该例中是以 100kg 柴油作基准, 倘若采用了 100kmol 空气或 100kmol 干烟道气作基准, 则计算将大为复杂。

热量衡算——根据“能量守恒定律”, 稳定过程中, 进入的能量必等于排出能量。而化工过程通常涉及的能量衡算是热量衡算。在热量衡算中基准温度的选定是最重要的。这个基准温度应当与参考资料上所常用的基准温度相一致。

例3 设在一管壳加热器中, 用压力为 136kN/m^2 的饱和蒸气加热空气, 蒸汽流量是 0.01kg/s , 空气流量是 1kg/s , 冷凝液在饱和温度 (361K) 下排出。若在这温度范围内, 空气的平均比热是 $1.005\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。试计算空气的出口温度 (忽略热损失)。

解: 取1秒为计算基准。

由蒸汽表查出, 136kN/m^2 饱和蒸气的焓是 2689kJ/kg , 361K 水的焓是 368kJ/kg 。

蒸汽放出的热 $= 0.01 (2689 - 368)$

$$= (0.01 \times 2321)\text{kJ/s} = 23.2\text{kW}$$

设空气的出口温度为 T , 可列出热量衡算, 取基准温度为 297K , 于是进口空气的焓为0。

出口空气的焓 $= 1.005(T - 297)\text{kJ/kg}$

空气获得的热 $= 1 \times 1.005(T - 297)\text{kJ/s}$

$$= (1.005T - 298.5) \text{ kW}$$

热量衡算：蒸汽放出的热 = 空气获得的热 + 热损失

$$23.2 = 1.005T - 298.5$$

所以

$$T = 321.7 \div 1.005 = 320 \text{ K}$$

上述物料衡算和热量衡算的例题是最简单的情况，使读者能够获得最基本的概念。生产实际中的这两种衡算，所需要考虑的问题复杂得多。读者可参阅后列文献^[1,2,3,4]。

平衡关系 若组成不同的两相互相接触，则各组分将在两相间进行传递，直到每一组分在两相间相互传递速率相等，两相的组成才不再发生变化，此时称为动平衡。例如，将一撮食盐放入一杯水中，盐即逐渐溶解，若温度维持不变，而且有过量食盐存在，溶液中食盐的浓度即达到一个定值（饱和溶液），此即平衡状态。这种平衡状态是自然界广泛存在的现象，只有当与物系有关的条件（如温度）改变时，再建立新平衡。

有关气体和液体的平衡关系，将在蒸馏、吸收和萃取各章中分别讨论。这些平衡关系实质上是热力学法则的应用。

过程速率——可近似用推动力除以阻力表示。在实际工作中，一个过程以多快的速率由不平衡向平衡移动，是极为重要的问题。如果一个过程以极慢的速率进行，那么生产过程所需的设备将极为庞大。

一个过程的速率与“推动力”或“推动势”成正比。推动力的性质决定于过程的内容。传热过程的推动力是温度差，流体流动的推动力是压力差，传质过程的推动力是浓度差。

与推动力相对应的是阻力。过程的速率与推动力成正比，又与阻力成反比，所以这三者的相互关系，类似于电学中的欧姆定律。

四、单位制和单位换算

由于历史原因，化学工程中使用的数据常用不同单位表示，因而在计算之前必须把它换算成统一的单位。为了在全国逐步采用国际单位制，适应实现四个现代化的需要，1977年国务院计量管理条例规定：“我国的基本计量制度是米制（即公制），逐步采用国际单位制”。本书采用国际单位制。鉴于本门课程过去二十余年中多采用工程单位制，所以熟悉各种不同单位制度，并且能熟练地相互换算，是非常重要的。

国际单位制 国际单位制是一九六〇年第十一届国际计量大会通过的，其国际代号为SI，我国简称为国际制。它是在米制基础上发展起来的。原来的米制，实际上是多种单位并用，例如压力单位就有：〔公斤/厘米²〕、〔公斤/米²〕、标准大气压、〔毫米汞柱〕、〔巴〕、〔达因/厘米²〕等等。为了消除这些混乱，国际计量大会吸取了米制的优点，制定了国际制，只用一个“帕斯卡”或 N/m^2 代替上述所有的压力单位。

国际单位制以米制原来的“米”、“千克”（公斤）、“秒”三个基本单位为基础，并将电流强度单位——“安培”、热力学温度单位——“开尔文”、发光强度单位——“坎德拉”（烛光）和物质的量单位——摩尔，明确规定为七个基本单位，其它单位都由这七个基本单位导出，这些单位称为导出单位。此外还有辅助单位，它们是属于基本单位还是导出单位并无规定。国际制中构成一贯体系的基本单位、辅助单位和导出单位称为国际制单位（SI单位）。而用来构成国际单位十进倍数单位和分数单位的词冠，称为国际制词冠（SI词冠）。

米制（即公制） 1959年我国政府正式确定米制为我国的基本计量制度，逐步取消了英制和旧有的杂乱计量制度，有力地促进了我国社会主义经济建设和科学技术的发展。米制中我们经常用到的有绝对单位制和工程单位制（重力单位制）。

绝对单位制 常用的绝对单位制有两种:

(1) 厘米·克·秒制 (简称 CGS 制), 又称物理单位制。在此制中, 长度单位是〔厘米〕, 质量单位是〔克〕, 时间单位是〔秒〕。其它物理量的单位可以通过物理或力学的定律导出, 例如, 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〕。在科学实验和物化数据手册中常用此制。

(2) 米·千克 (公斤)·秒制 (简称 MKS 制), 又称绝对实用单位制。在此制中, 长度单位是〔米〕, 质量单位是〔千克〕 (公斤), 时间单位是〔秒〕。同理, 其他物理量单位均由这三个基本量导出。例如, 力的单位是〔千克·米/秒²〕, 称为〔牛顿〕。

工程单位制 它选用长度〔米〕·力〔公斤〕和时间〔秒〕作为基本量, 这样, 质量就变为导出量。为区别起见, 当〔公斤〕作为质量单位时, 则用〔公斤(质)〕表示。本门课程, 以往二十余年均采用此制, 鉴于目前工农业生产和工程技术界多采用此制, 本书虽以 SI 单位为主, 但为了适应向国际制过渡时期的实际情况, 同时也适当采用工程单位制。工程单位制中力的单位〔公斤〕是这样规定的: 它相当于在真空中以 MKS 制量度的〔公斤〕质量的物体, 在重力加速度为 9.80665 〔米/秒²〕下所受的重力。所以重量与质量间的联系可根据牛顿第二定律 $F=ma$ 导出:

$$\begin{aligned} 1[\text{公斤}] &= 1[\text{公斤(质)}] \times 9.81[\text{米/秒}^2] = 9.81[\text{公斤(质)} \cdot \text{米/秒}^2] \\ &= 9.81[\text{牛顿}] \\ &= 1000[\text{克(质)}] \times 9.81 \times 100[\text{厘米/秒}^2] \\ &= 981000[\text{克(质)} \cdot \text{厘米/秒}^2] = 981000[\text{达因}] \end{aligned}$$

由此可见, 质量单位是〔公斤·秒²/米〕, 并无专门名称, 它的数值相当于 SI 单位的 9.81 倍。这显然与米制的十进原则相违背, 同属米制的各单位并存, 使科学技术和生产无法摆脱一些不必要麻烦。

单位换算 单位换算在化工计算中非常重要, 实践证明: 不仅初学者常常造成混乱, 就是很有经验的人, 如在运算中不遵守一定的规则, 也会发生错误。然而, 只要在运算前知道各种物理量在不同单位制中的换算因数, 先在一个式子中换算成同一种单位制, 再进行计算, 就能避免差错。各单位的换算因数参见附录。

例 4 $1[\text{公斤/厘米}^2]$ 等于多少 Pa? 1 标准大气压等于多少 Pa?

$$\begin{aligned} \text{解: } 1[\text{公斤/厘米}^2] &= \frac{9.81[\text{牛顿}]}{\left(\frac{1}{100} \text{米}\right)^2} = 9.81 \times 10^4[\text{牛顿/米}^2] \\ &= 9.81 \times 10^4 \text{Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1[\text{标准大气压}] &= 1.033[\text{公斤/厘米}^2] = \frac{9.81 \times 1.033[\text{牛顿}]}{\left(\frac{1}{100}\right)^2 [\text{米}]^2} \\ &= 1.013 \times 10^5[\text{牛顿/米}^2] = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} \end{aligned}$$

例 5 $1[\text{千卡/小时}]$ 等于多少 W? 1kW 等于多少〔千卡/小时〕?

$$\begin{aligned} \text{解: } 1[\text{千卡/小时}] &= \frac{4.187 \times 10^3 \text{J}}{3600\text{s}} = 1.163 \text{W} \\ 1\text{kW} &= 1\text{kJ/s} = \frac{1/4.18}{\frac{1}{3600}} [\text{千卡/小时}] = 860[\text{千卡/小时}] \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] Backburst J. R., J. H. Harker and J. E. Parter, "Problems in Heat and Mass Transfer" (SI Units), Arnold 1974.
- [2] Henley E. J. and H. Bieber, "Chemical Engineering Calculations", McGraw 1959.
- [3] Henley E. J. and J. Ernest, "Material and Energy Balance Computations" Wiley 1969.
- [4] Lewis W. K., A. H. Radasch and H. C. Lewis, "Industrial Stoichiometry", McGraw, 1959.

第一章 流体流动

本章符号说明

符号及意义	SI单位	工程单位
A——两流体层间接触面积	m^2	[米 ²]
A——积累量	kg	[公斤]
a——加速度	m/s^2	[米/秒 ²]
C——无因次常数, 系数		
C_0, C_v ——孔流系数		
c_p ——定压比热	$kJ/kg \cdot K$	[千卡/公斤·℃]
c_v ——定容比热	$kJ/kg \cdot K$	[千卡/公斤·℃]
ν ——厘泊	$\frac{1}{1000} Ns/m^2$	1.02×10^{-4} [公斤·秒/米 ²]
D——出料量	kg	[公斤]
D' ——出料速率	$kg/s, kg/h$	[公斤/秒][公斤/小时]
d, d_1, d_2 ——管道直径	m	[米]
d_0 ——孔径	m	[米]
Eu——欧拉准数($=\frac{\Delta P}{\rho u^2}$)		
F——流体的内摩擦力, 作用力	N	[公斤]
F——进料量	kg	[公斤]
F' ——进料速率	$kg/s, kg/h$	[公斤/秒][公斤/小时]
f ——范宁摩擦系数($=\frac{\lambda}{4}$)		
G——质量流速	$kg/m^2 \cdot s$	[公斤/米 ² ·秒]
g——重力加速度	m/s^2	[米/秒 ²]
h——流体层高度	m	[米]
$h_f, h_{f1}, h_{f2}, \dots$ ——摩擦损失能量	J/kg	[公斤·米/公斤]
K——稠度指数	$N \cdot s^n/m^2$	[公斤·秒 ⁿ /米 ²]
K' ——稠度指数	$N \cdot s^{n'}/m^2$	[公斤·秒 ^{n'} /米 ²]
L——长度因次		
l——管道长度	m	[米]
l_e ——当量长度	m	[米]
M——质量因次		
M, M_A, M_B, M_C, M_1 ——分子量	kg/kmol	[公斤/公斤分子]
M_n ——平均分子量	kg/kmol	[公斤/公斤分子]
m——流体质量	kg	[公斤·秒 ² /米]
N——功率	W, kW	[公斤·米/秒]
n, n' ——流变指数		
p, p_A, p_A', p_1, p_2 ——流体压力	$N/m^2, kN/m^2$	[公斤/米 ²]

P——泊	$\frac{1}{10} \text{ N/m}^2$	0.0102〔公斤·秒/米 ² 〕
Q ₁ , Q ₀ ——由加热器加入能量	J/kg	〔千卡/公斤〕
R——气体常数	8.314 kJ/kmol·K	848〔公斤/公斤分子·K〕
R——半径	m	〔米〕
Re——雷诺准数 $\left(-\frac{du\rho}{\mu}\right)$		
Re*——通用雷诺数 $\left(=\frac{d^{1/2}u^{1/2}\rho}{\mu}\right)$		
r——半径	m	〔米〕
r _H ——水力半径	m	〔米〕
S, S ₁ , S ₂ ——截面积	m ²	〔米 ² 〕
T——时间因次	K	K
T——绝对温度		
U, U ₁ , U ₂ ——单位质量流体的内能	J/kg	〔公斤·米/公斤〕
u, u ₁ , u ₂ ——流体流速	m/s	〔米/秒〕
u _{max} ——最大流速	m/s	〔米/秒〕
u _c ——点速度	m/s	〔米/秒〕
V——流体体积	m ³	〔米 ³ 〕
v——流体比容	m ³ /kg	〔米 ³ /公斤〕
V, V ₁ , V ₂ , V ₃ ……——体积流量	m ³ /s, m ³ /h	〔米 ³ /秒〕〔米 ³ /小时〕
W——外加能量	J/kg	〔公斤·米/公斤〕
w——质量流量	kg/s, kg/h	〔公斤/秒〕〔公斤/小时〕
X _{VA} , X _{VB} , X _{VD} ——体积分率		
X _{WA} , X _{WB} , X _{WD} ——质量分率		
x _i ——液相摩尔分率		
y _A , y _B , y _O , y ₁ , y ₂ ——气相摩尔分率		
γ——比热比 (C _P /C _V)		
ε——绝对粗糙度	mm	〔毫米〕
ζ——阻力系数		
η——设备的效率		
κ——多变指数		
λ——摩擦系数		
μ, μ _i ——流体的粘度	Ns/m	〔公斤/秒·米 ² 〕
μ _m ——流体混合物的粘度	Ns/m ²	〔公斤/秒·米 ² 〕
μ _a ——表观粘度	Ns/m ²	〔公斤/秒·米 ² 〕
ν——运动粘度	m ² /s	〔米 ² /秒〕
Π——浸润周边	m	〔米〕
ρ, ρ _A , ρ _B , ρ _a , ρ ₀ , ρ ₁ , ρ ₂ ——流体密度	kg/m ³	〔公斤·秒 ² /米 ³ 〕
ρ ₀ ——平均密度	kg/m ³	〔公斤·秒 ² /米 ³ 〕
σ——表面张力	N/m	〔公斤/米〕
τ——时间		〔秒〕〔分〕〔小时〕
τ——剪应力		〔公斤/米 ² 〕
τ _w ——壁面剪应力		〔公斤/米 ² 〕

1-1 概 述

气体和液体都具有流动性, 并且几乎可以毫无阻力地改变其形状或任意分裂, 故统称为流体。

在化学工业生产中, 所用的原料或加工后得到的半成品及成品等, 很多都是流体。为了制得产品, 常需将流体物料按照生产工艺的要求, 依次输送到各种设备中(如反应设备、换热设备、塔设备等)进行化学反应或物理变化, 而且这些过程进行的好坏与流体在设备内的流动状况也密切相关。通常在设备之间用管道连接, 有时并需借助于流体输送设备(如泵和风机等), 使流体物料从一个设备输送到另一个设备, 或由上一工序送往下一工序, 连接成生产流程。

现代化工厂中, 一般都有大量的流体输送管道纵横密布, 流体输送设备到处可见。因此流体输送管路和流体输送设备在化工生产中起着很重要的作用。

此外, 化工生产的各个单元操作, 无论是传热、传质、多相混合物的分离和化学反应等过程, 大都是在流体流动状态下进行的。流体流动的状态, 直接影响着这些操作过程。因此流体的流动是化工生产中的一个重要的基本过程。

第一节 流体的性质

流体是由不断运动着的分子所构成的, 流体除了由于内部分子所引起的运动外, 还存在着由于外部原因例如重力、离心力、压力差等的作用而引起的流体运动。但是在工程实际中, 一般主要是研究流体的宏观运动规律, 即研究由于外部原因而引起的流体运动, 而不研究流体分子的运动。因此, 在研究流体力学时, 就是把流体作为是由无数微团(或质点)所组成的连续介质, 流体所占的空间全部为这种连续介质所充满。

应当指出, 这并不是在所有流体运动现象的领域里, 都可以把流体看作是连续介质, 如在高度真空时, 气体稀薄, 显然在这种情况下, 气体就不能视为连续介质了。

1-2 密 度

流体单位体积内所具有的质量称为密度, 通常以符号 ρ 表示。若以 m 表示流体的质量, V 表示流体的体积, 则

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

ρ 的单位为 kg/m^3 。

用不同的单位制, 密度的单位和数值都不同。一般常见流体的密度, 可由有关手册或资料中查得。通常在物理或化学手册中查得的密度 ρ , 单位多以 (克/厘米³) 表示, 由于 1 (克/厘米³) 相当于 1000 kg/m^3 , 因此, 从手册中查得的 ρ (克/厘米³), 只须将其数值乘以 1000 就可求得用 SI 单位制表示的密度 $\rho \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

各种流体的密度是不同的。对于任何一种流体, 其密度又随其所具有的压力和温度而变化

$$\rho = f(P, T) \quad (1-2)$$

压力对液体的密度影响很小, 可忽略不计, 故常称液体为不可压缩的流体。温度对液体的密度则有一定的影响, 故在有关手册或书刊中, 介绍液体的密度的实测值时, 皆注有温度条件。