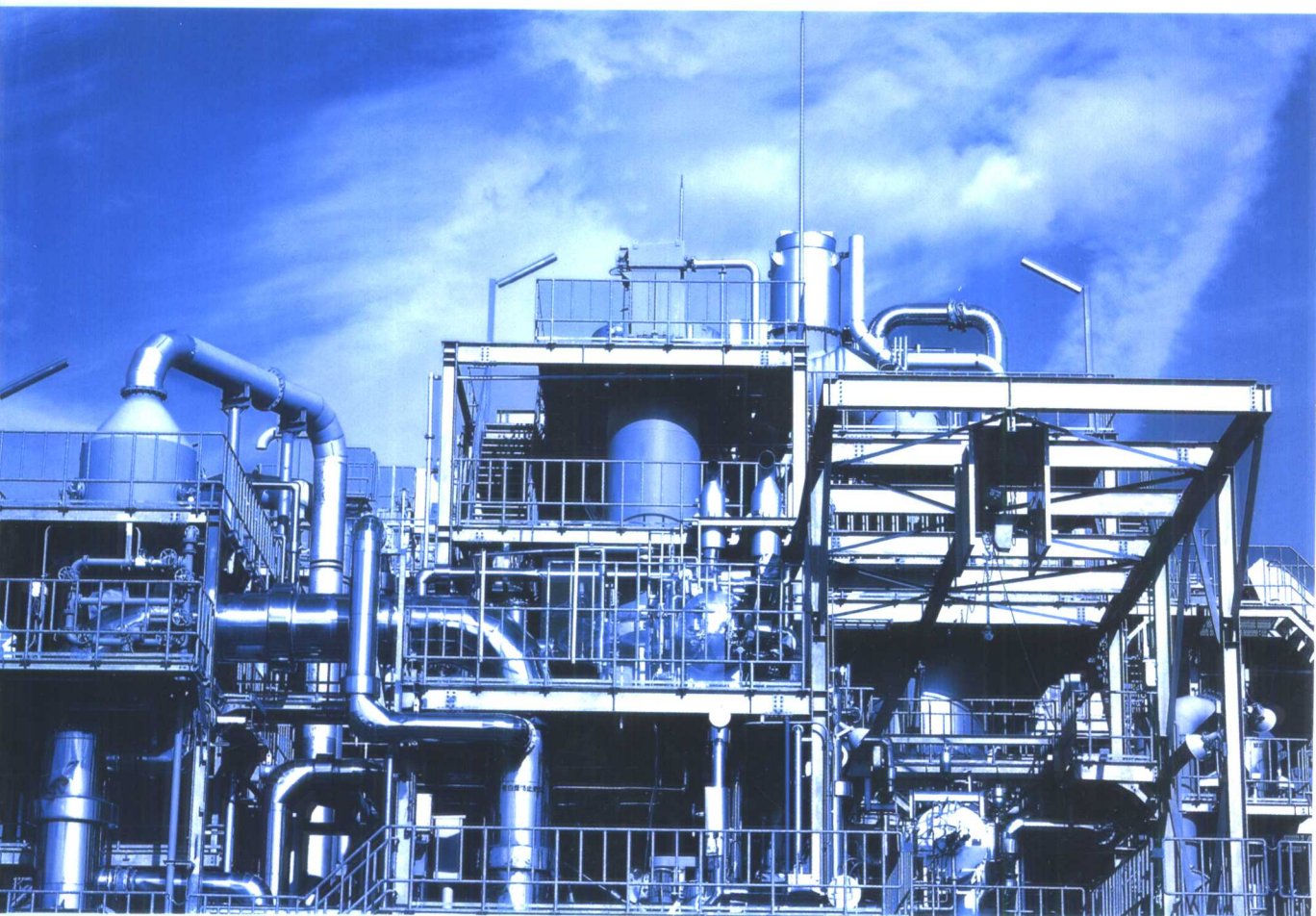


高等学校理工科规划教材

化工原理

HUAGONG YUANLI

李凤华 于士君/主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校理工科规划教材

化工原理

主编	李风华	于士君
编著	李风华	于士君
	李素君	赵薇

大连理工大学出版社

© 李凤华,于士君 2004

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 李凤华,于士君主编. — 大连:大连理工大学出版社,
2004.9

ISBN 7-5611-2651-4

I. 化… II. ①李… ②于… III. 化工原理—高等学校—教材
IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 089222 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84707961

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:21.25 字数:505千字

印数:1~3000

2004年9月第1版

2004年9月第1次印刷

责任编辑:吴孝东

责任校对:梁殿亮

封面设计:宋 蕾

定 价:29.80元

前 言

化工原理是以单元操作为研究内容的一门技术基础课程,是高等院校化工类各专业骨干课之一。其主要任务是研究化工单元操作的基本原理,典型设备的结构、原理、操作性能及设计计算。

本书适合于本科少学时、高职高专等化工类各专业学生使用。本书具有如下特色:

1)体系完整,内容精练。本教材在保证课程内容体系完整的前提下,充分体现“理论必需够用为度,注重应用技能培养”的原则,最大程度上优化了课程内容。

2)语言通俗,易教易学。为了便于实施目标教学和学生自学,教材内容按“重点掌握”、“掌握”和“了解”三个层次编写,在每章开始的“教学基本要求”中对层次的划分均有明确的说明,便于学生有的放矢,重点掌握基本内容,并可根据学时安排学生自学。

3)例题、复习思考题、习题选题典型。本书精选了例题、复习思考题和习题,学生可通过反复练习,加深理解并熟练掌握课程内容。

4)单位选用尽量采用国家标准。本教材中的计量单位除特别指明外,统一使用我国的法定计量单位。但考虑到工程实践的需要,在部分章节和习题中对常用的物理参数,特别是压强(压力)、粘度、能量等不同单位制换算进行了介绍,并在附录中给出了部分物理量的换算关系。设备及材料的规格、型号尽可能采用最新标准,以利于实际应用。

本书共8章,由李风华、于士君主编。其内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均相混合物的分离、传

热、气体吸收、蒸馏、液液萃取、固体物料的干燥、附录。于士君编写绪论、第6章，赵薇编写第1章，李凤华编写第2、5、6、7、8章，附录，李素君编写第2、3、4章、附录。在本书编写中得到了教研室全体同志的关心和支持，得到了沈国良教授的大力帮助，匡国柱教授审阅了教材，并提出了宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

目前国内已有许多版本的《化工原理》教材，而且各具特色。本书力求汲取各家之长，在有限的学时内，介绍较多的单元操作内容。但是，由于编者学识有限，书中错误疏漏之处在所难免。恳请专家、读者予以赐正，以便再版时订正。

编著者

2004年8月

目 录

绪论 / 1

第1章 流体流动 / 5

1.1 概述 / 5

1.2 流体静力学 / 6

1.2.1 流体的物理性质 / 6

1.2.2 流体的压力 / 8

1.2.3 流体静力学基本方程式及应用 / 9

1.3 流体动力学 / 13

1.3.1 流量与流速 / 13

1.3.2 流体流动的质量衡算 / 14

1.3.3 流体流动的能量衡算 / 15

1.4 流体流动的阻力 / 19

1.4.1 牛顿粘性定律 / 19

1.4.2 流体流动类型与雷诺数 / 20

1.4.3 流体在圆管内的速度分布 / 21

1.4.4 管、管件及阀门 / 22

1.4.5 流体在直管中的流动阻力 / 23

1.4.6 流体流动局部阻力的计算 / 30

1.4.7 流体在管内流动的总阻力损失计算 / 32

1.5 管路计算 / 33

1.5.1 简单管路 / 34

1.5.2 复杂管路 / 35

1.6 流速和流量的测量 / 36

1.6.1 测速管 / 36

1.6.2 孔板流量计 / 37

1.6.3 文氏流量计 / 39

1.6.4 转子流量计 / 40

复习思考题 / 41

习 题 / 41

习题参考答案 / 45

主要符号说明 / 46

第2章 流体输送机械 / 47

2.1 概述 / 47

2.1.1 对流体输送机械的基本要求 / 47

2.1.2 流体输送机械的分类 / 47

2.2 离心泵 / 48

2.2.1 离心泵的工作原理 / 48

2.2.2 离心泵的主要部件 / 49

2.2.3 离心泵的主要性能参数 / 51

2.2.4 离心泵的特性曲线及其影响因素 / 52

2.2.5 离心泵的工作点与流量调节 / 54

2.2.6 离心泵的气蚀现象与安装高度 / 58

2.2.7 离心泵的类型与选用 / 61

2.3 其他类型化工用泵 / 64

2.3.1 往复泵 / 64

2.3.2 计量泵 / 67

2.3.3 齿轮泵 / 67

2.3.4 螺杆泵 / 67

2.3.5 漩涡泵 / 68

2.4 气体输送机械 / 68

2.4.1 离心式通风机、鼓风机和压缩机 / 69

2.4.2 往复式压缩机 / 72

2.4.3 真空泵 / 74

复习思考题 / 75

习 题 / 75

习题参考答案 / 76

主要符号说明 / 77

第3章 非均相混合物的分离 / 78

3.1 概述 / 78

3.2 重力沉降 / 79

3.2.1 球形颗粒的自由沉降 / 79

3.2.2 重力沉降设备 / 82

3.3 离心沉降 / 85

3.3.1 离心沉降速度 / 85

3.3.2 旋风分离器 / 86

3.3.3 旋液分离器 / 88

3.3.4 离心沉降机 / 89

3.4 过滤 / 90

3.4.1 过滤基本概念 / 90

3.4.2 过滤基本方程式 / 91

3.4.3 恒压过滤 / 93

3.4.4 过滤设备 / 96

复习思考题 / 100

习 题 / 101

- 习题参考答案 /101
主要符号说明 /102
- 第4章 传热 /103**
- 4.1 概述 /103
- 4.1.1 传热过程在化工生产中的应用 /103
4.1.2 传热的基本方式 /104
4.1.3 间壁换热过程的剖析 /104
- 4.2 热传导 /106
- 4.2.1 傅里叶定律 /106
4.2.2 导热系数 /107
4.2.3 平壁的稳态热传导 /109
4.2.4 圆筒壁的稳态热传导 /112
- 4.3 对流传热 /115
- 4.3.1 对流传热方程与对流传热系数 /115
4.3.2 对流传热系数的经验关联式 /116
4.3.3 流体无相变时对流传热系数的经验关联式 /117
4.3.4 流体有相变时的对流传热 /122
4.3.5 选用对流传热系数关联式的注意事项 /127
- 4.4 传热计算 /127
- 4.4.1 热量衡算 /127
4.4.2 传热平均温度差的计算 /128
4.4.3 总传热系数 /132
4.4.4 壁温的计算 /136
- 4.5 热辐射 /137
- 4.5.1 基本概念 /137
4.5.2 物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律 /138
4.5.3 克希霍夫定律 /139
4.5.4 两固体间的辐射传热 /139
- 4.6 换热器 /140
- 4.6.1 换热器的分类 /140
4.6.2 间壁式换热器 /141
4.6.3 强化传热的途径 /148
4.6.4 列管式换热器的设计与选用 /149
- 复习思考题 /155
习题 /155
习题参考答案 /157
主要符号说明 /158
- 第5章 气体吸收 /159**
- 5.1 概述 /159
- 5.1.1 吸收操作在化工生产中的应用 /159
5.1.2 吸收操作必须解决的问题 /160
5.1.3 吸收操作的分类 /161
- 5.2 气液相平衡 /162
- 5.2.1 气体在液体中的溶解度 /163
5.2.2 亨利定律 /163
5.2.3 相平衡关系在吸收过程中的应用 /166
- 5.3 传质机理与吸收过程的速率 /167
- 5.3.1 分子扩散与费克定律 /167
5.3.2 等摩尔反向扩散 /168
5.3.3 单向扩散 /169
5.3.4 分子扩散系数 /170
5.3.5 单相内对流传质 /170
5.3.6 两相间传质的双膜理论 /172
5.3.7 总传质速率方程式 /172
- 5.4 填料吸收塔的计算 /174
- 5.4.1 物料衡算与操作线方程 /175
5.4.2 吸收剂用量与最小液气比 /176
5.4.3 填料层高度的计算 /178
- 5.5 填料塔的结构及特性 /185
- 5.5.1 填料塔的结构 /185
5.5.2 填料的种类与特性 /185
5.5.3 填料塔内气液两相流动特性 /187
5.5.4 塔径的计算 /189
5.5.5 填料塔的内件 /190
- 5.6 解吸操作 /192
- 5.6.1 解吸方法 /192
5.6.2 气提解吸的计算 /193
- 复习思考题 /195
习题 /195
习题参考答案 /198
主要符号说明 /198
- 第6章 蒸馏 /199**
- 6.1 概述 /199
- 6.1.1 蒸馏过程的分类 /199
6.1.2 蒸馏操作的特点 /200
- 6.2 双组分溶液的气液相平衡 /200
- 6.2.1 双组分理想物系的气液相平衡 /200
6.2.2 双组分非理想物系的气液相平衡 /203
- 6.3 蒸馏与精馏原理 /204
- 6.3.1 简单蒸馏和平衡蒸馏 /204
6.3.2 精馏原理 /205
- 6.4 双组分连续精馏塔的计算 /206
- 6.4.1 全塔物料衡算 /206

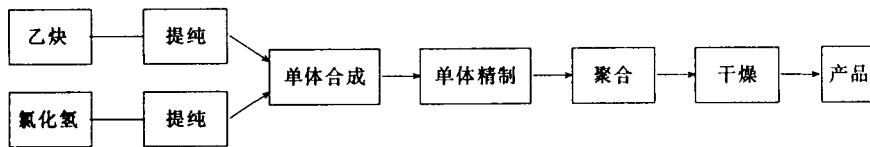
- 6.4.2 理论板的概念及恒摩尔流假定 /207
- 6.4.3 操作线方程 /208
- 6.4.4 进料热状态的影响及 q 线方程 /210
- 6.4.5 理论板数的计算 /213
- 6.4.6 回流比的影响与选择 /217
- 6.4.7 理论板数的简捷计算 /220
- 6.4.8 其他蒸馏方式简介 /222
- 6.4.9 精馏操作分析 /223
- 6.5 间歇精馏 /224
 - 6.5.1 恒定回流比的间歇精馏 /225
 - 6.5.2 馏出液组成恒定的间歇精馏 /225
- 6.6 恒沸精馏和萃取精馏 /226
 - 6.6.1 恒沸精馏 /226
 - 6.6.2 萃取精馏 /227
- 6.7 板式塔 /228
 - 6.7.1 塔板结构 /228
 - 6.7.2 塔板的类型及性能评价 /230
 - 6.7.3 板式塔的流体力学性能与操作特性 /232
 - 6.7.4 塔板效率 /235
 - 6.7.5 塔高及塔径的确定 /236
- 复习思考题 /238
- 习 题 /239
- 习题参考答案 /241
- 主要符号说明 /241
- 第7章 液液萃取 /242**
 - 7.1 概述 /242
 - 7.1.1 液液萃取原理 /242
 - 7.1.2 液液萃取在工业中的应用 /243
 - 7.2 液液萃取相平衡 /244
 - 7.2.1 三角形坐标图及杠杆定律 /244
 - 7.2.2 三角形相图 /246
 - 7.2.3 萃取剂的选择 /249
 - 7.3 液液萃取过程的计算 /251
 - 7.3.1 单级萃取计算 /251
 - 7.3.2 多级错流萃取的计算 /253
 - 7.3.3 多级逆流萃取的计算 /255
 - 7.3.4 微分接触式逆流萃取的计算 /259
 - 7.3.5 回流萃取 /260
 - 7.4 超临界气体萃取简介 /261
 - 7.5 液液萃取设备 /262
 - 7.5.1 萃取设备的基本要求与分类 /262
 - 7.5.2 常用萃取设备简介 /263
 - 7.5.3 萃取设备的选择 /268
- 复习思考题 /269
- 习 题 /269
- 习题参考答案 /271
- 主要符号说明 /272
- 第8章 固体物料的干燥 /273**
 - 8.1 概述 /273
 - 8.1.1 固体去湿方法 /273
 - 8.1.2 干燥过程的分类 /274
 - 8.1.3 对流干燥过程的传热与传质 /275
 - 8.2 湿空气的性质及湿度图 /275
 - 8.2.1 湿空气的性质 /275
 - 8.2.2 湿空气的湿度图 /279
 - 8.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算 /282
 - 8.3.1 干燥过程的物料衡算 /282
 - 8.3.2 干燥过程的热量衡算 /285
 - 8.3.3 空气通过干燥器时的状态变化 /285
 - 8.4 干燥速率和干燥时间 /289
 - 8.4.1 物料中所含水分的性质 /289
 - 8.4.2 固体物料的干燥机理 /290
 - 8.4.3 恒定干燥条件下的干燥速率 /291
 - 8.4.4 恒定干燥条件下干燥时间的计算 /292
 - 8.5 干燥设备 /294
 - 8.5.1 干燥器简介 /294
 - 8.5.2 干燥器的选用 /297
- 复习思考题 /298
- 习 题 /298
- 习题参考答案 /300
- 主要符号说明 /300
- 附录 /301**
 - 附录1 常用物理量SI单位和因次 /301
 - 附录2 SI制与其他单位制的换算关系 /301
 - 附录3 某些液体的重要物理性质 /302
 - 附录4 某些气体的重要物理性质 /303
 - 附录5 水的物理性质 /304
 - 附录6 干空气的物理性质(101.3kPa) /305
 - 附录7 I 饱和水蒸气表(按温度排列) /306
 - II 饱和水蒸气表(按压强排列) /307
 - 附录8 有机液体相对密度(液体密度与4℃水的密度之比)共线图 /309
 - 附录9 液体粘度共线图 /311
 - 附录10 气体粘度共线图(常压下用) /313
 - 附录11 气体比热容共线图 /314

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 附录 12 液体比热容共线图 /316 | 附录 18 管子规格(摘录) /322 |
| 附录 13 液体汽化热共线图 /317 | 附录 19 泵规格(摘录) /324 |
| 附录 14 某些液体的表面张力及常压下的沸点 /318 | 附录 20 9-19 型离心通风机规格(摘录) /326 |
| 附录 15 某些气体和蒸气的导热系数 /319 | 附录 21 管壳式热交换器系列标准 /328 |
| 附录 16 某些液体的导热系数 /320 | 附录 22 某些二元物系气液平衡数据 /330 |
| 附录 17 某些固体材料的导热系数 /321 | 参考文献 /332 |

绪 论

1. 化工过程与单元操作

在化学工业中,对原料进行大规模的加工处理,使其不仅在状态与物理性质上发生变化,而且在化学性质上也发生变化,最后成为合格的产品,此过程即为化学工业的生产过程,简称为化工过程。例如,乙炔法制取聚氯乙烯的生产是以乙炔和氯化氢为原料进行加成反应以制取氯乙烯单体,然后在 0.8MPa、55℃左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。具体生产过程可用如下简图表示:



在以上生产过程中,除单体合成、聚合属化学过程外,原料和反应物的提纯、精制等工序均属物理过程。

在化学工程学科形成之前,每一类化学工艺均被视为一专门知识,后来人们发现不管化工生产的工艺如何千差万别,它们在很多典型设备中进行着原理相同的物理过程,人们将不同化学工艺中相同或类似的物理过程放在一起研究,这就形成了单元操作概念。所谓的单元操作,是指在各类不同化工工艺中通用的物理操作“单元”。化工生产中的物理操作过程是由各个操作单元组成,同一单元遵守的原理是相同的。例如,无论是在制糖工业中,还是在化肥工业中,都有溶液蒸发操作,这就是蒸发单元操作,虽然是在两个不同过程中的操作,但都遵守蒸发操作原理。像这样的操作还有流体流动、流体输送机械、过滤、传热、蒸馏、吸收、萃取、结晶、干燥等 20 余种。常用的单元操作如表 0-1 所示。

表 0-1 化工过程中常用单元操作

单元操作	目的	物 态	原 理	传递过程
流体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气-液;液-液; 固-液	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固;气-固	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固;气-固	密度差引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温、改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	质量传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分间挥发度的不同	质量传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	质量传递
干燥	去湿	固体	供热汽化物料内的湿分	热、质同时传递
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	质量传递

当人们对单元操作了解得更加深入后,又发现各单元操作之间存在着共性。例如,蒸发

是热量传递的一种形式,萃取和吸收属于质量传递,干燥和蒸馏属于热量传递与质量传递同时进行的过程等。因此,按单元操作依据的原理可以分为以下几类:

(1) 流体动力过程

以动量传递为主要理论基础的单元操作,主要包括流体输送、非均相物系分离等单元操作。

(2) 传热过程

以热量传递为主要理论基础的单元操作,主要包括传热、蒸发等单元操作。

(3) 传质分离过程

以质量传递为主要理论基础的单元操作,主要包括蒸馏、吸收、萃取等单元操作。

(4) 热质传递过程

由热量传递和质量传递两种规律共同决定的单元操作,主要包括增湿、减湿、干燥、结晶等单元操作。

2. 化工原理课程的内容、性质、特点及教学基本要求

在化工过程中,物料经历了化学变化过程和物理变化过程。在化工过程中,对物料的物理处理过程正是化工原理研究的内容,它包括物料的混合、分离及改变物理状态和性质的各种过程。例如,将原油分离成渣油、柴油、汽油等挥发性不同的各种馏分,制糖工业中的糖水浓缩,酿造工业中的酒精提纯等,都属于化工原理研究的范畴。

化工原理是研究化工单元操作的基本原理、典型设备的结构和工艺尺寸计算的一门技术基础课,化工原理的学习必须以高等数学、物理学和物理化学等课程为基础。化工原理将具有共性的物理操作过程归纳成为数不多的若干单元操作,从而使单元操作在一定程度上具有“通用”的性质,它具有以下特点:

(1) 化工原理是一门工程学科,学习它的目的不只是认识一些自然现象,更重要的是培养学生建立起工程概念,培养学生的实际动手能力,培养学生在单元操作中运用基础理论去分析、解决化工实际问题的能力。

(2) 化工原理课程中所采用的研究方法有其自身的特点。一种是经验方法,另一种是半经验半理论方法,而不是纯粹的公式或逻辑推理。

化工原理课程的教学基本要求是:

(1) 掌握各单元操作的基本原理,并具有一定的“过程和设备”的选择能力;

(2) 掌握各单元操作的基本计算方法,包括过程的计算和设备的设计和选型计算;

(3) 根据生产的要求和变化,能根据实际情况对操作参数进行调节,对于常见故障,能找到产生故障的原因并具有一定的排除故障能力;

(4) 了解过程强化的方向及改进设备的途径。

3. 物理量的单位制

化工原理课程采用国际单位制(简称SI制)。在国际单位制中,规定了7个基本单位:长度单位米、质量单位千克、时间单位秒、温度单位开尔文、物质的量单位摩尔、电流强度单位安培、发光强度单位坎德拉,其他单位均由这7个基本单位导出。化工计算中常用前5个基本单位。

在化工生产中,经常使用一些非SI的法定计量单位,如时间单位中的min(分)、h(小时)、d(日)、a(年);温度单位还常使用 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏温度),旋转速度用r/min(转/分)等。由于历

史原因,年代久远一点的化工文献、手册、资料中的数据常常是一些非 SI 或非法定计量单位,如压力单位使用物理大气压(atm)、工程大气压(at)、巴(bar)、毫米汞柱(mmHg)、毫米水柱(mmH₂O)等。

在化工原理使用的数据中,过去常用的非国际单位制有:工程单位制、厘米·克·秒制和米·千克·秒制。

在工程单位制中(又称重力单位制),选长度单位米、时间单位秒、力的单位千克作为基本单位,质量是导出单位。在厘米·克·秒制(简称 CGS 制,又称物理单位制)中,选长度单位厘米、质量单位克、时间单位秒作为基本单位,其他物理量的单位可以通过物理或力学的定律导出。在米·千克·秒制中(简称 MKS 制),选长度单位米、质量单位千克、时间单位秒作为基本单位,其他单位均由这三个基本单位导出。

在化工计算中,计算前必须把不同的单位换算成统一的单位。在单位换算时,根据换算因数进行换算。

4. 单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到下面四个基本概念,即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系及过程速率。这四个基本概念贯穿于本课程的始终,在这里仅作简要说明,详细内容见各章中的叙述。

(1) 物料衡算

根据质量守恒定律,某一化工系统输入与输出的物料质量之差,必等于积累在该系统中的物料质量,即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{积累量}$$

上式称为物料衡算式。该式适用于任何指定的系统,如一个化工厂、一个车间或一个设备等。过程所涉及系统中,可以对全部物料进行衡算,也可以对物料中的某一个组分(无化学反应时)进行衡算。

对于连续操作过程,若各个物理量不随时间改变,即处于稳定操作状态时,系统中不应该有物料的积累,物料衡算式可写成:

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

通过物料衡算可由系统的已知量求出未知量。

(2) 能量衡算

根据能量守恒定律,对于连续稳定系统,进入系统的总能量,必等于系统输出的总能量。能量的形式很多,如机械能、热能、电能、化学能等。各种能量之间可以相互转换,如机械能转换成热能等。但在化工单元操作中,绝大多数场合不考虑能量相互转换问题,能量衡算主要指机械能衡算和热能衡算。本教材将在第 1 章流体流动中介绍机械能衡算,关于热量衡算将在传热、蒸馏、干燥等章节中结合具体单元操作详细说明。

(3) 物系的平衡关系

平衡关系是自然界中广泛存在的现象。例如,在一定温度下,不饱和糖溶液与固体糖接触,糖向溶液中溶解,直至糖溶液饱和,此时,固体糖表面与溶液呈动态平衡。若溶液中糖的浓度大于饱和溶液浓度,则溶液中的糖就会析出,直至达到平衡为止。一定温度下糖的饱和浓度,就是这个物系的平衡浓度。

传热过程中,只要两种流体的温度不相等,热量就会从高温流体传给低温流体,直至两

种流体的温度相等,达到热量平衡为止。

任何一个不平衡系统都有达到平衡的趋势,不平衡系统在一定条件下都能达到平衡。系统的平衡关系可用于判断一个过程在一定条件下能否进行、进行的方向及进行的极限。

(4)过程速率

平衡关系只能反映过程进行的方向和极限,并不能反映过程进行的快慢,而后者对实际生产过程更为重要,过程进行的快慢用过程速率表示。单位时间内,过程的变化量称为过程速率。如传热过程的速率为单位时间内传递的热量,称为传热速率;传质过程的速率为单位时间内传递的物质质量,称为传质速率。过程速率可用下式表示:

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

过程的推动力是指在某一瞬间,过程的实际状态与平衡状态的差距。如传质过程的推动力,通常用某一瞬间过程的实际组成与平衡组成之差来表示;传热过程的推动力为进行传热的温度差。构成过程阻力的因素很多,其值因过程的性质不同而异。

在生产实际中,人们不仅仅关注过程进行的极限,更关注过程进行的速率。过程速率越大,设备的生产能力越大,在完成同样产量的情况下,设备的尺寸越小。具体的速率问题,在单元操作中结合实例进行讨论。

第 1 章 流体流动

教学基本要求

重点掌握:(1)流体静力学基本方程式及应用;

(2)各种形式的伯努利方程式,并能熟练地运用伯努利方程解题;

(3)雷诺数的表达式,并根据 Re 判断流动类型;

(4)直管阻力与局部阻力的计算。

掌握:(1)液体、气体的密度计算,粘度的单位及单位换算;

(2)压力的定义及表压、真空度、绝对压力的定义;

(3)流量、流速的定义及连续性方程。

了解:(1)牛顿粘性定律;

(2)流体在圆管内的速度分布;

(3)简单与复杂管路,并能作简单的计算;

(4)测速管、孔板流量计、转子流量计的测量原理,并能作简单的计算。

1.1 概 述

气体和液体统称为流体。在化工生产中所处理的物料有很多是流体,根据生产要求,往往需要将这些流体按照生产程序从一个设备输送到另一个设备。除了流体输送外,化工生产中的传热、传质过程以及化学反应大都是在流体流动状态下进行的,流体流动状态对这些单元操作有着很大影响。为了能深入理解这些单元操作的原理,就必需掌握流体流动的基本原理。因此,流体流动的基本原理是本课程的重要基础。

在研究流体流动时,常将流体视为由无数流体微团组成的连续介质。所谓流体微团或流体质点是指这样的小块流体:它的大小与容器或管道相比是微不足道的,但是比起分子自由程长度却要大得多,它包含足够多的分子,能够用统计平均的方法来求出宏观的参数(如压力、温度),从而可以观察这些参数的变化情况。连续性的假设首先意味着流体介质是由连续的流体质点组成的;其次还意味着质点运动过程的连续性。例如,高度真空下的气体,就不再视为连续性介质了。

流体的体积如果不随压力及温度变化,这种流体称为不可压缩流体;如果随压力及温度变化,则称为可压缩流体。实际流体都是可压缩的,当流体的体积随压力及温度变化很小时,一般把它看作不可压缩流体;气体比液体有较大的压缩性,当压力及温度改变时,气体的体积会有很大的变化,应当属于可压缩流体。但是,如果压力或温度变化很小时,气体通常也可以当作不可压缩流体处理。

1.2 流体静力学

1.2.1 流体的物理性质

1. 密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,其表达式为

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

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 。

流体的密度随流体的种类、温度、压力的变化而变化,对一定流体,密度是压力(或压强) p 和温度 T 的函数,可用下式表示

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

式中 p ——流体的压力, Pa ;
 T ——流体的温度, K 。

液体的密度随压力的变化甚小(极高压力下除外),可忽略不计,故常称液体为不可压缩流体,但其随温度的变化稍有改变。气体的密度随压力和温度的变化较大,当压力不太高、温度不太低时,气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算,由

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-3)$$

得
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的压力, Pa ;
 T ——气体的温度, K ;
 M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;
 R ——通用气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

气体密度也可按下式计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5)$$

式中, ρ_0 为标准状态下气体的密度, T_0 、 p_0 分别为标准状态下气体的温度和压力。

生产中遇到的流体常常不是单一组分,而是由若干组分所构成的混合物。当气体混合物的温度、压力接近理想气体时,可按理想气体计算密度。但式中气体的摩尔质量 M ,应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替,即

$$M_m = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \cdots + M_n x_n \quad (1-6)$$

式中 M_1, M_2, \cdots, M_n ——气体混合物中各组分的摩尔质量;
 x_1, x_2, \cdots, x_n ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

气体混合物的组成通常以体积分数表示。对于理想气体,体积分数与摩尔分数相等。

液体混合时,体积往往有所改变。若混合前后体积不变,则 1kg 混合液的体积等于各组

分单独存在时的体积之和,则可由下式求出混合液体的密度 ρ_m 。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-7)$$

式中 w_1, w_2, \dots, w_n —— 液体混合物中各组分的质量分数;
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ —— 液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 ;
 ρ_m —— 液体混合物的平均密度, kg/m^3 。

2. 比容

单位质量流体的体积,称为流体的比容,用符号 ν 表示,单位为 m^3/kg ,则

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-8)$$

亦即流体的比容是密度的倒数。

【例 1-1】 某重油燃烧的尾气,分析其中含 CO_2 8.6%, O_2 7.5%, N_2 75%, H_2O 8.9% (均为体积分数),试求 500°C , $101.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时,该混合气体的密度。

解 由式(1-6)求混合气体的平均摩尔质量,得

$$M_m = 44 \times 8.6\% + 32 \times 7.5\% + 28 \times 75\% + 18 \times 8.9\% = 28.786 \text{ kg/kmol}$$

则其密度为

$$\rho_m = \frac{\rho M_m}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3 \times 28.786 \times 10^{-3}}{8.314 \times (500 + 273.15)} = 0.45 \text{ kg/m}^3$$

3. 粘度

流体具有粘性,表征流体粘性的物理性质称为粘滞系数,简称粘度,用符号 μ 表示。液体的粘度随温度升高而减小,气体的粘度则随温度升高而增大。压强变化时,液体的粘度基本不变;气体的粘度随压强增加而增加得很少,在一般工程计算中可忽略不计,只有在极高或极低的压强下,才需考虑压强对气体粘度的影响。

国际单位制中粘度的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,厘米克秒制中粘度的单位为 P(泊)和 cP(厘泊),它们的换算关系如下:

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$$

粘度与密度之比称为运动粘度,以 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

运动粘度的单位为 m^2/s ,厘米克秒制中运动粘度的单位为 cm^2/s ,计为 St(斯),斯的 1/100 称为厘斯(cSt)。换算关系为

$$1 \text{ St} = 100 \text{ cSt} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

粘度的数据来源有数据手册、实验测定和经验公式。本书附录中列出了常见液体和气体在常温下的粘度数值及不同温度下某些物质的粘度图表。

对于混合物的粘度,可按经验公式进行计算。如对分子不缔合的混合液,可计算如下

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-10)$$

式中 μ_m —— 混合液的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

x_i —— 液体混合物中第 i 组分的摩尔分数;

μ_i —— 与液体混合物同温度下第 i 组分的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

常压下气体混合物的粘度,可用下式计算

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-11)$$

式中 μ_m ——气体混合物的粘度, Pa·s;
 y_i ——气体混合物中第 i 组分的摩尔分数;
 μ_i ——与气体混合物同温度下第 i 组分的粘度, Pa·s;
 M_i ——气体混合物中第 i 组分的摩尔质量, kg/kmol。

1.2.2 流体的压力

1. 定义

流体垂直作用于单位面积上的力,称为流体的压强,简称压强,习惯上称为压力。在静止流体中,从各方向作用于某一点的压力大小均相等。

流体压力具有以下两个重要特性:

- (1) 流体压力处处与它的作用面垂直,并总是指向流体的作用面;
- (2) 流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。

例如,当测定流体内某点的压力时,不论将测压管按水平、垂直还是其他方向插入,只要管的管端正好与该点接触,则压力表上所显示的读数都是相同的。

2. 压力的单位和单位换算

在国际单位制中,压力的单位是 N/m^2 ,称为帕斯卡,以 Pa 表示。但长期以来采用的单位为 atm(标准大气压)、某流体柱高度或 kgf/cm^2 等。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ 标准大气压(atm)} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

3. 压力的基准

压力可以有不同的计量基准,如果以绝对真空(即零大气压)为基准,称为绝对压力,若以当地大气压为基准,则称为表压。

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

当被测流体的绝对压力小于大气压时,其低于大气压的数值称为真空度,即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

注意,此处的大气压力均应指当地大气压,在本章中如不加说明时均可按标准大气压计算;压力的数值如不加特殊说明,均指绝对压力。

绝对压力、表压和真空度的关系,如图 1-1 所示。

【例 1-2】某离心泵进口真空表读数为 88 kPa,出口压力表读数为 220 kPa,试求离心泵进出口间压差。

解 离心泵进口表压为 -88 kPa ,则两表间压差为

$$220 - (-88) = 308 \text{ kPa}$$

评析 求取压差时,相减的两压强基准必须统一,同为绝对压力或表压。

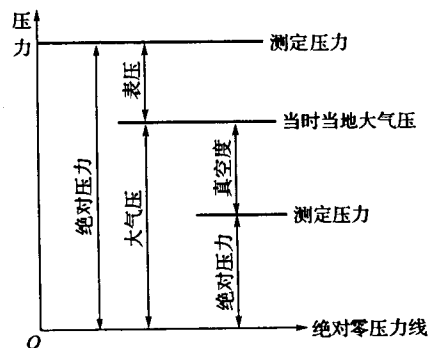


图 1-1 绝对压力、表压和真空度的关系