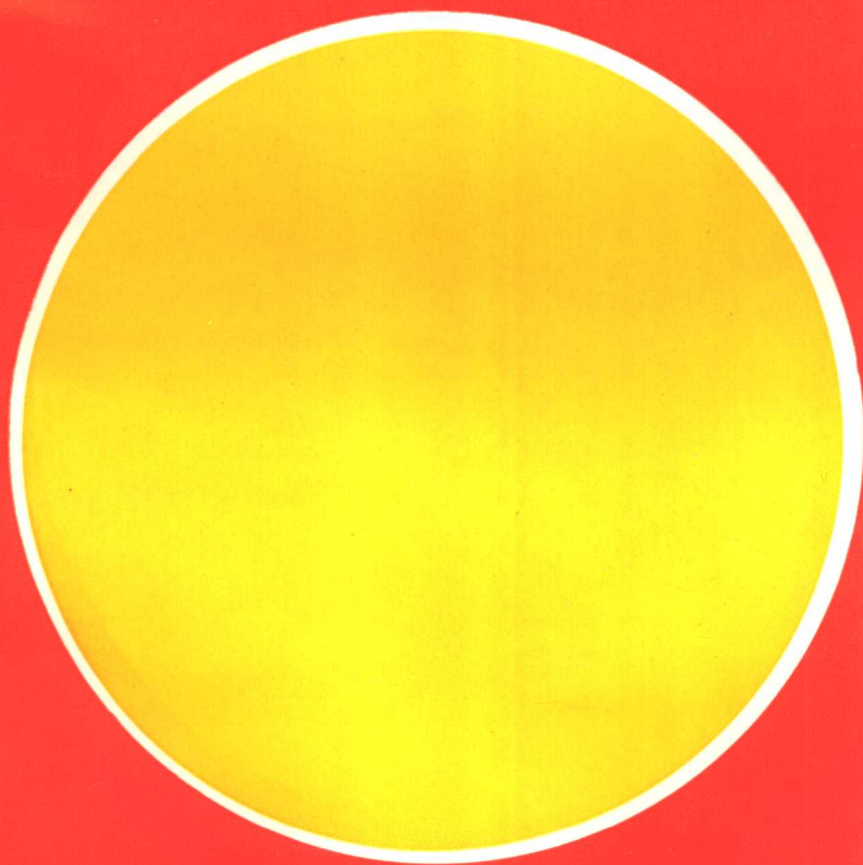


高等师范专科院校教材

主编 孙效正 李景崑

化学工艺学 简明教程



石油大学出版社

山东省师范专科院校
化学专业统编教材编委会

主 任 郭耀听

副主任 顾慰中

委 员 (以姓氏笔划为序)

丛恩同 刘书银 刘长增

刘绪良 齐登福 吴月顺

宋永生 张文圣 周西臣

顾慰中 郭耀听 高 峰

化学工艺学简明教程

主编 孙效正 李景嵩

*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

东营新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 15.375 印张 393 千字

1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—2400 册

ISBN 7-5636-0992-X/O · 51

定价:17.20 元

前 言

为了适应社会主义现代化建设和培养九年义务教育师资的需要,以及改变师范专科学校化学专业缺乏适用教材的状况,在山东省教委领导和高教处的帮助下,成立了由全省师专化学系组成的“山东省师专化学专业教材编委会”。经过充分的调查研究和分析论证,决定编写几种急需的教材。为了保证教材的质量,由教材编委会和各校推荐学术水平较高、教学经验丰富并一直从事教学工作的教授、副教授担任主编,报请省教委审批后,组织全省有关教师讨论编写提纲,分工撰稿。初稿经主编修改后,由省教委聘请专家主审、定稿出版。

《化学工艺学简明教程》是根据1988年国家教委师范教育司组织制订的“化学工艺学教学大纲”(1989年4月颁布)和1995年颁布的“高等师范专科教育二、三年制教学方案”(试用)编写的。

本书内容简明扼要、少而精,重点突出、层次分明、图文并茂,适应了师范理科学生学习工科知识的需要,解决了师专化学专业开设《化学工艺学》课程内容多、课时少的矛盾。

本书在选材和内容组织上,引用了最新资料和数据,所涉及的物理量均使用了我国法定计量单位。

参加本书编写的有孙效正(第一、二、八、十一、十二章);翟虎臣(第四、九章);李景崧(第三、八章);李相国(第四章);李军(第五章);刘瑞书(第六章);刘书银(第七章);赵建国(第八章);杨文海(第十章);吴精华(第十一章);王发刚(第十二章);郑中辉(第二章)。初稿由孙效正、翟虎臣、李景崧审阅、修改;全书由孙效正修改和汇编。孙效正、李景崧任主编,翟虎臣、李军任副主编。

本书在编写过程中,得到了山东省教委高教处的指导和支持,得到了石油大学出版社的支持;山东师范大学刘永铨教授审阅全稿,提出许多宝贵的修改意见;在撰稿中还参阅和引用了许多专家、学者的著作和论述,在此,对他们表示衷心的感谢!

由于编者的学识和写作水平有限,书中欠妥之处,恳请专家、老师、同学们提出修改意见。

编 者

1996年10月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 化学工艺学课程的性质和内容	1
§ 1.2 化学工艺学的学习目的和学习方法	1
§ 1.3 四个基本概念	2
1.3.1 物料衡算	2
1.3.2 能量衡算	3
1.3.3 平衡关系	3
1.3.4 过程速率	3
§ 1.4 我国法定计量单位简介	3
思考题	5
习题	5
第二章 流体的流动与输送	7
§ 2.1 流体静力学基本方程式	7
2.1.1 流体的密度与压强	7
2.1.2 流体静力学基本方程式	8
2.1.3 流体静力学基本方程式的应用	9
§ 2.2 流体稳定流动时的衡算	10
2.2.1 流体的流量与流速	10
2.2.2 稳定流动与不稳定流动	11
2.2.3 流体稳定流动时的物料衡算——连续性方程	12
2.2.4 流体稳定流动时的能量衡算——柏努利方程	12
2.2.5 柏努利方程式的应用	15
§ 2.3 实际流体的流动与阻力计算	16
2.3.1 流体的粘度	16
2.3.2 流体流动的类型	17
2.3.3 流体流动阻力的计算	19
§ 2.4 流体流量的测定	24
2.4.1 孔板流量计	24
2.4.2 转子流量计	26
§ 2.5 流体输送机械	26
2.5.1 离心泵	26
2.5.2 旋转泵	30
2.5.3 气体输送与压缩机械	31
思考题	32
习题	33

第三章 传热过程	35
§ 3.1 概述	35
3.1.1 化工生产中的传热过程	35
3.1.2 工业上的换热方法	35
3.1.3 传热的基本方式	36
3.1.4 稳定传热与不稳定传热	36
§ 3.2 传导传热	36
3.2.1 热传导基本方程——付立叶定律	36
3.2.2 平面壁的稳定导热	38
3.2.3 圆筒壁的稳定导热	40
§ 3.3 对流传热	42
3.3.1 对流给热分析	42
3.3.2 对流给热方程——牛顿冷却定律	42
3.3.3 对流给热系数的准数关联式	43
§ 3.4 热交换的计算	45
3.4.1 总传热速率方程	45
3.4.2 传热总系数	46
3.4.3 热负荷	47
3.4.4 传热平均温度差	48
§ 3.5 强化传热过程的途径	52
3.5.1 提高传热系数 K	52
3.5.2 增大传热温度差 Δt_m	53
3.5.3 增大传热面积	53
§ 3.6 热交换器	53
3.6.1 换热器的类型	53
3.6.2 列管式换热器	55
思考题	57
习题	58
第四章 吸收	60
§ 4.1 概述	60
4.1.1 吸收在化工生产中的应用	60
4.1.2 吸收的类型	60
§ 4.2 气液相平衡	61
4.2.1 吸收的相平衡和气体的溶解度	61
4.2.2 亨利定律	61
§ 4.3 吸收过程的机理与吸收速率	66
4.3.1 吸收过程的机理——双膜理论	66
4.3.2 吸收速率方程式	66
4.3.3 强化吸收过程的途径	72
§ 4.4 填料吸收塔及其计算	72

4.4.1 填料吸收塔的结构	72
4.4.2 填料吸收塔的计算	73
思考题	82
习题	82
第五章 精馏	85
§ 5.1 概述	85
5.1.1 蒸馏在化工生产中的应用	85
5.1.2 蒸馏的类型	85
§ 5.2 双组分溶液的气液相平衡	85
5.2.1 理想溶液的气液相平衡	85
5.2.2 相对挥发度	86
5.2.3 双组分气液相平衡图	88
5.2.4 非理想溶液的气液相平衡	88
§ 5.3 双组分连续精馏	89
5.3.1 精馏原理	89
5.3.2 全塔物料衡算	92
5.3.3 理论塔板数的计算	93
5.3.4 实际塔板数的计算	101
§ 5.4 其它蒸馏类型与板式精馏塔	101
5.4.1 其它蒸馏类型	101
5.4.2 板式精馏塔	103
思考题	105
习题	106
第六章 化学反应器	107
§ 6.1 概述	107
6.1.1 化学反应工程的内容和任务	107
6.1.2 化学反应器的分类	107
6.1.3 流体在反应器内的流动	109
6.1.4 反应器的物料衡算	110
§ 6.2 间歇釜式反应器	111
6.2.1 反应时间的计算	111
6.2.2 反应器容积的计算	113
§ 6.3 连续理想管式反应器	114
§ 6.4 连续理想釜式反应器	116
§ 6.5 多釜串联反应器	117
§ 6.6 均相反应器的型式和操作方法的评比与选择	120
6.6.1 简单反应的反应器容积的比较	120
6.6.2 复杂反应产物收率的比较	122
§ 6.7 气固相催化反应器	123
6.7.1 气固相催化反应过程与控制步骤	124

6.7.2 固定床反应器	125
6.7.3 流化床催化反应器	126
思考题	128
习题	128
第七章 硫酸工业	131
§ 7.1 概述	131
7.1.1 硫酸产品的规格和用途	131
7.1.2 硫酸工业的发展状况	132
§ 7.2 生产硫酸的原料及原则流程	132
7.2.1 生产硫酸的原料	132
7.2.2 原则流程	132
§ 7.3 二氧化硫炉气的制备	133
7.3.1 硫铁矿的焙烧原理与操作条件	133
7.3.2 沸腾焙烧炉	134
§ 7.4 二氧化硫炉气的净化	135
7.4.1 炉气净化的目的	135
7.4.2 净化方法及流程	135
7.4.3 二氧化硫炉气的干燥	137
§ 7.5 二氧化硫的催化氧化	138
7.5.1 二氧化硫催化氧化的基本原理	138
7.5.2 二氧化硫催化氧化的最佳工艺条件	140
7.5.3 二氧化硫催化氧化的工艺流程和设备	141
§ 7.6 三氧化硫的吸收	143
7.6.1 三氧化硫的吸收原理及操作条件	143
7.6.2 三氧化硫吸收成酸工艺流程	144
§ 7.7 接触法生产硫酸的总流程	145
思考题	145
第八章 合成氨工业	146
§ 8.1 概述	146
8.1.1 氨在国民经济中的作用与发展概况	146
8.1.2 生产方法简介	146
§ 8.2 原料气的生产——造气	147
8.2.1 制取合成氨原料气	147
8.2.2 固定层煤气发生炉	149
§ 8.3 原料气的净化	149
8.3.1 原料气的脱硫	149
8.3.2 CO 的变换	150
8.3.3 变换气中 CO ₂ 的脱除	152
8.3.4 原料气的精制	152
§ 8.4 氨的合成	154

8.4.1	氨合成的热力学与动力学基础	154
8.4.2	氨合成的最佳工艺条件的选择	156
8.4.3	氨合成的工艺流程	157
8.4.4	氨合成的主要设备——合成塔	157
§ 8.5	氨的加工	158
8.5.1	尿素生产简介	158
8.5.2	氨氧化法制硝酸	160
	思考题	161
第九章	氯碱工业	162
§ 9.1	概述	162
9.1.1	氯碱工业的重要性	162
9.1.2	电解方法简介	162
§ 9.2	食盐水溶液电解的基本原理	163
9.2.1	法拉弟电解定律	163
9.2.2	电极反应及副反应	163
9.2.3	槽电压和电能效率	165
§ 9.3	隔膜电解的工艺流程	166
9.3.1	饱和食盐水溶液的制备和精制	166
9.3.2	隔膜电解槽的结构、电解工艺流程及操作条件	167
§ 9.4	隔膜法电解产物的处理及加工	168
9.4.1	稀碱液的蒸发	168
9.4.2	氯、氢气的处理和液氯的生产	169
9.4.3	合成盐酸	170
§ 9.5	氯碱工业的发展趋势	171
	思考题	173
第十章	纯碱工业	174
§ 10.1	概述	174
10.1.1	纯碱工业在国民经济中的地位	174
10.1.2	纯碱工业的发展简史	174
10.1.3	我国的制碱工业	175
§ 10.2	氨碱法生产纯碱	175
§ 10.2.1	氨碱法生产纯碱的反应原理及工艺流程	175
§ 10.2.2	氨碱法制纯碱的主要工序	177
§ 10.3	联合制碱法	184
10.3.1	联合制碱法的生产原理	184
10.3.2	联合制碱法的工艺流程	185
	思考题	186
第十一章	石油化学工业	187
§ 11.1	概述	187
11.1.1	石油化学工业在国民经济中的地位	187

11.1.2 石油化学工业的发展概况	187
11.1.3 石油化学工业的原料资源	188
§ 11.2 石油炼制	189
11.2.1 常、减压蒸馏	191
11.2.2 催化裂化	192
11.2.3 延迟焦化	193
§ 11.3 催化重整	195
11.3.1 催化重整的化学反应	195
11.3.2 催化重整的工艺流程	195
§ 11.4 裂解	196
11.4.1 裂解反应	197
11.4.2 裂解操作条件	198
11.4.3 管式炉裂解工艺流程	198
11.4.4 裂解气的净化与分离	199
思考题	200
第十二章 高分子化学工业	201
§ 12.1 塑料	201
12.1.1 概述	201
12.1.2 聚乙烯(PE)	202
12.1.3 聚氯乙烯(PVC)	204
§ 12.2 合成纤维	207
12.2.1 概述	207
12.2.2 聚酰胺纤维(锦纶)的生产	208
12.2.3 聚酯纤维(涤纶)	210
§ 12.3 合成橡胶	212
12.3.1 概述	212
12.3.2 顺丁橡胶	213
思考题	215
附录	216
一、化工生产见习指南	216
二、常用单位的换算	221
三、水的重要物理性质	224
四、饱和水蒸气压(按 kPa 顺序排列)	225
五、干空气的物理性质(101.33 kPa)	226
六、某些气体的重要物理性质	227
七、某些液体的重要物理性质	228
八、常用固体材料的密度和比热	230
九、管子规格	231
十、双组分体系的气液相平衡	233
主要参考书目	235

第一章 绪 论

§ 1.1 化学工艺学课程的性质和内容

化学工艺学是高等师范专科学校化学专业必修课中唯一一门联系生产实际的技术基础课程。本课程包括:“化工单元操作”、“基本化学反应器”和“化工生产工艺”三部分内容。

化工单元操作是化工生产和其他行业中共有的物理操作,研究这些物理操作过程的基本原理、典型设备及其选用、计算方法的学科一般称为“化工原理”,是我国工科化工院校目前开设的技术基础课程。本书限于篇幅,仅简单介绍流体的流动与输送、传热、气体吸收和液体精馏四种单元操作的基本原理及设备。

基本化学反应器属于化学反应工程的内容。化学反应工程以化学热力学、动力学及化工单元操作为基础,研究工业规模化学反应的规律,为反应器设计和生产控制提供理论依据。本书第六章仅讨论了四种基本反应器 and 气固相催化反应器的结构、基本原理。

化学工艺学^①是研究如何将原料或半成品通过适当的化学和物理方法加工成化工产品的生产过程的科学。其任务是依据化学、物理化学、化学工程(单元操作和反应)的基本原理,探索技术上先进、经济上合理的生产方法、工艺流程、最佳操作条件和设备构型。化工产品种类繁多,生产工艺各异,但无论何种产品的生产过程,都是由若干种单元操作和特定的化学反应过程按照不同的工艺要求,以不同的方式组合而成的。本书介绍了硫酸、合成氨等几个有代表性的生产工艺。

§ 1.2 化学工艺学的学习目的和学习方法

高等师范专科学校的任务是培养合格的初中教师,要求培养对象毕业后具有较丰富的知识。因此,在师专化学系开设的《化学工艺学》课程,除学习化学工程的基本理论和基础知识外,还学习硫酸、合成氨、氯碱、纯碱和石油化工等典型工艺,这对改善化学专业学生的知识结构,无疑是有益的。通过本课程的学习,使学生理解化学工程规律在化工生产中的应用,获得化工计算及设计的初步训练,掌握如何运用所学基础理论和技术知识分析、评价生产工艺流程、工艺条件和生产设备,从而使获得对化工生产及化学科研工作处理问题的方法,适应了目前初中教育改革的需要,为今后在教学中更密切地联系化工生产实际及改进化学实验技术等打下良好基础。

本课程是一门基础技术课,具有工程性、应用性,与基础理论课程(如无机化学、有机化学、物理化学等)有很大区别,因此,师范理科学生学习本课程,在学习方法、处理问题和分析问题的思想上要注意以下两个特点:一是经验公式多。这是因为化学工程中不以说明问题为目标,而是要解决实际生产和工程问题。工程技术中常会遇到所研究的现象过于复杂,虽然已知其影

^① 根据国家教委制定的师专化学专业教学计划,把“化工基础”课定名为“化学工艺学”。此处指的是工科院校化工工艺专业开设的专业课,如无机化工工艺学、有机化工工艺学等,统称为化学工艺学。

响因素,但不能建立数学表达式;或者虽然建立了数学表达式,但无法用数学方法求解。因此,常需通过实验建立经验关系式或者由合理简化得半经验关系式。二是要建立技术经济观点。这是一般理科学生由于先行课未予培养而易忽视的重要观点。工程技术中许多优化指标或操作条件不但要遵循理论上和技术上的规范,而且还要由经济核算来确定。这是因为设计某种设备和确定某些操作条件,在理论和技术允许的范围内,往往可以提出多种不同的方案,需要用经济核算的方法进行比较,即从设备的造价、耐用年限、操作的难易、人力、水、电和燃料的消耗等多方面作综合评价,从中选择经济上最有利的方案。

§ 1.3 四个基本概念

在研究处理化学工程和工艺问题时,经常用到物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率这四个基本概念来描述过程的变化规律和特征。下面先对上述四个基本概念作简要介绍,读者应通过后续的各章具体应用加深理解。

1.3.1 物料衡算

根据质量守恒定律,在化工操作过程中,单位时间输入设备的物料量必等于离开此设备的物料量与设备内积存物料增量之和,即:

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积存增量}$$

对于多数连续操作的稳定过程,设备内物料积存增量为零,此时,上式可简化为:

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

作物料衡算时,要确定衡算范围、衡算对象和衡算基准。衡算范围可以是一台设备或设备的某一部分,也可以是几台相关设备乃至整个生产过程。衡算对象可以是全部物料或者是其中的某一组分。衡算基准一般取过程中某个不变的量,例如,连续稳定操作过程常以单位时间物料的处理量作基准。

例 1-1 由电解食盐水溶液得到的稀碱液含 NaOH 为 10%,以 10 000 kg/h 的流量送入蒸发器蒸发除去一部分水分后,浓缩成含 NaOH 30% 的产品,求此蒸发器的产品量和蒸发水量。

解:首先按题意画出流程示意图,如附图所示。

衡算范围:以图中虚线框表示,即为蒸发器

衡算基准:单位时间 1h

衡算对象:对全部物料作衡算,得:

$$F = W + P$$

即

$$10\,000 = W + P \quad (1)$$

对 NaOH 作衡算时得:

$$F x_0 = P x_1$$

即

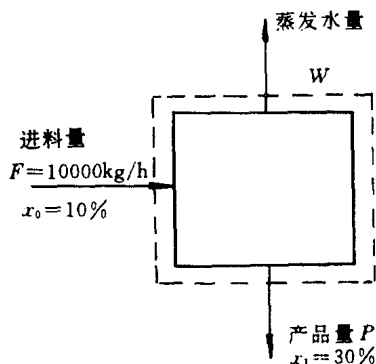
$$10\,000 \times 10\% = P \times 30\% \quad (2)$$

由(2)式计算得

$$P = 3.33 \times 10^3 \text{ kg/h}$$

将 P 值代入(1)式得

$$W = 6.67 \times 10^3 \text{ kg/h}$$



例 1-1 附图

1.3.2 能量衡算

能量有机械能、电能、热能等多种形式,在操作中如有几种形式能量之间相互转化时,应采用能量衡算确定它们之间的关系。在化工生产中,多数情况下参与过程的各股物料之间交换的能量形式主要涉及到热量,这时可简化为热量衡算。

在稳定操作过程中,依据能量守恒定律,输入衡算系统的热量等于输出的热量,即:

$$\text{输入热量} = \text{输出热量}$$

式中输入、输出的热量包括进、出设备(或衡算范围)的各股物料带进与带出的热量(包括显热和潜热,统称为焓)及外界加给设备的热量和设备向外界散失的热量。

作热量衡算时,也要确定衡算范围和衡算基准。热量衡算的基准包括数量基准、温度和相态基准。对于连续操作一般以单位时间的进料量作为数量基准。物料的焓值与温度有关,只有确定温度基准后,方可从手册中查取有关数据。

1.3.3 平衡关系

物理或化学变化过程中,物系的变化必趋于一定方向和极限,此极限即谓达到平衡状态。例如,当两个温度不同的物体互相紧密接触时,热量便由温度较高的一方传向温度较低的另一方,直至两物体各部分的温度相等,热量传递过程就达到平衡。必须指出,由于物质的运动是绝对的,静止是相对的,所以物系的平衡总是动态平衡,都是有条件的,当条件发生变化时,原来的平衡状态就被破坏,在新条件下达到新的平衡。平衡关系在工程上有其实际意义,根据它可推知过程能否进行及可能进行到何种程度。

1.3.4 过程速率

物系在单位时间内,由不平衡态向平衡态变化的快慢程度称为过程的速率。速率也可表示为单位时间、单位传递面积的变化量,又称为通量。影响过程速率的因素很多,但可以近似地表示为:

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

推动力的意义是指直接导致过程进行的动力,即物系的状态偏离平衡的程度,按不同过程可具体理解为压强差、温度差、浓度差等。阻力的含义比较复杂,它包括了推动力以外的各种因素的总概括,不同过程阻力的因素亦各不相同,此处不再详述。

§ 1.4 我国法定计量单位简介

任何一个物理量的量值都是由数值和计量单位两部分构成的,缺一都不能正确表示其量值的大小。物理量分为基本量和导出量。基本量是在量制中所选定的彼此独立的量,导出量是根据物理定义或定律由基本量表达的。不同单位制的区别是规定的基本物理量和基本单位不同。在化学工程中曾主要使用过工程单位制(也称重力单位制),所采用的基本量和基本单位是:长度(m)、时间(s)、力(kgf),为了解决多种单位制并行使用造成的混乱,国务院于1984年2月27日发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,规定我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。我国的法定计量单位包括:

- (1) 国际单位制的基本单位(见表1-1);
- (2) 国际单位制的辅助单位(见表1-2);
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位;

(4) 国家选定的非国际单位制单位(见表 1-3);

(5) 由以上单位构成的组合形式的单位,表 1-4 列出了化工中常用的部分具有专门名称的导出单位和组合单位;

(6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表 1-5)。

由此可知,我国的法定计量单位的主体是国际单位制(SI),适用于全部科学领域。

表 1-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	Cd

表 1-2 SI 辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
[平面]角	弧 度	rad
立体角	球面度	sr

表 1-3 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	1 min = 60 s
	[小]时	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	天(日)	d	1 d = 24 h = 86 400 s
平 面 角	[角]秒	($''$)	$1'' = (\pi/648\,000)\text{rad}$
	[角]分	($'$)	$1' = 60''$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ} = 60'$
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{ r/min} = (1/60)\text{ s}^{-1}$
长 度	海里	n mile	1 n mile = 1 852 m (只用于航行)
速 度	节	kn	1 kn = 1 n mile/h (只用于航行)
质 量	吨	t	1 t = 10^3 kg
	原子质量单位	u	$1\text{ u} \approx 1.6\,605\,655 \times 10^{-27}\text{ kg}$
体 积	升	L(l)	1 L = $1\text{ dm}^3 = 10^{-3}\text{ m}^3$
能	电子伏	eV	$1\text{ eV} = 1.602\,177 \times 10^{-19}\text{ J}$
级 差	分贝	dB	
线 密 度	特[克斯]	tex	1 tex = 1 g/km

表 1-4 化工中常用的 SI 导出单位举例

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位表示的单位
面积	平方米	m ²	m ²
体积	立方米	m ³	m ³
速度	米每秒	m/s	m/s
密度	千克每立方米	kg/m ³	kg/m ³
浓度	摩尔每立方米	mol/m ³	mol/m ³
力	牛[顿](Newton)	N	kg · m/s ²
压强, 应力	帕[斯卡](Pascal)	Pa (= N/m ²)	kg/(m · s ²)
能, 功, 热量	焦[耳](Joule)	J (= N · m)	kg · m ² /s ²
功率	瓦[特](Watt)	W (= J/s)	kg · m ² /s ³
动力粘度	帕[斯卡]秒	Pa · s	kg/(m · s)
扩散系数	平方米每秒	m ² /s	m ² /s
热容, 嫡	焦[耳]每开[尔文]	J/K	kg · m ² /(s ² · K)
导热系数	瓦[特]每米开[尔文]	W/(m · K)	kg · m/(s ³ · K)
传热系数	瓦[特]每平方米开[尔文]	W/(m ² · K)	kg/(s ³ · K)

表 1-5 SI 词头

表示的因数	词头名称	词头符号	表示的因数	词头名称	词头符号
10 ¹⁸	艾[可萨]	E	10 ⁻¹	分	d
10 ¹⁵	拍[它]	P	10 ⁻²	厘	c
10 ¹²	太[拉]	T	10 ⁻³	毫	m
10 ⁹	吉[咖]	G	10 ⁻⁶	微	μ
10 ⁶	兆	M	10 ⁻⁹	纳[诺]	n
10 ³	千	k	10 ⁻¹²	皮[可]	p
10 ²	百	h	10 ⁻¹⁵	飞[母托]	f
10 ¹	十	da	10 ⁻¹⁸	阿[托]	a

注: 1. [] 内的字, 是在不致混淆的情况下, 可以省略的字。

2. () 内的字为前者的同义语。

思 考 题

1. 何谓单元操作? 本书介绍了哪些单元操作?
2. 物料衡算的依据是什么? 怎样建立衡算关系式?
3. 何谓中华人民共和国法定计量单位? 写出 SI 的基本物理量和基本单位。
4. 1 kgf 约等于 9.81 N 是怎样定义的?

习 题

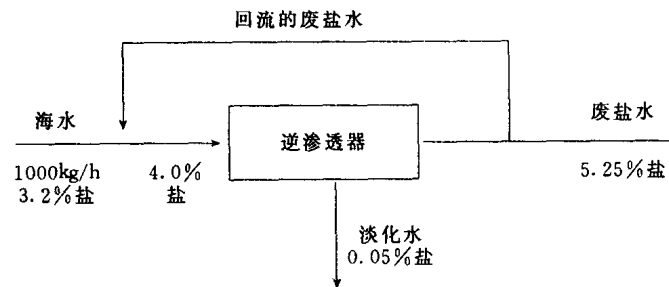
1. 质量为 1.00 kg 的水, 体积为 1.00 dm³。其重量、密度用 SI 表示各为多少?

2. 一标准大气压(1 atm)的压强等于 1.033 kgf/cm^2 , 换算成 N/m^2 。

3. 通用气体常数 $R=82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 将其换算成 SI 单位: $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

4. 在生产 KNO_3 的过程中, 1000 kg/h 的 $20\% \text{ KNO}_3$ 溶液送入蒸发器中, 在 422 K 温度下浓缩成 50% 的 KNO_3 浓溶液, 然后再进入结晶器中冷却到 310 K , 得含量为 96% 的 KNO_3 结晶。结晶器中的 37.5% 的 KNO_3 母液送入蒸发器中循环使用。计算循环的母液量与产品 KNO_3 的结晶量。

5. 采用逆渗透器进行海水淡化, 其流程及各流股的流量、浓度如本题附图所示, 求: (1) 淡化水的产量; (2) 回流的废盐水在排出的废盐水中所占的分率。



习题5附图

第二章 流体的流动与输送

气体和液体统称为流体。流体的流动规律是本课程的重要基础,这是因为:化工生产过程中所处理的物料(包括原料、半成品、成品等)大多数是流体,流体在管道内的输送问题与流体的流动规律有关;有些化工单元操作如传热、传质的操作大多是在流动状态下进行的,流体的流动状况影响这些过程的速率;流体的流动状况影响物料在反应器内的停留时间,即影响反应物的转化率。

在工程上对流体的运动,通常只需考虑其宏观的机械运动规律,而不研究流体单个分子的微观运动。为了避开复杂的分子微观运动,可取流体的质点作为研究流体的最小单元。所谓质点,就是指一个含有大量分子的流体微团,其粒度尺寸与设备相比微不足道。这样,可以假设流体是由大量质点组成、彼此间没有空隙、完全充满所占空间的连续介质。实践证明,这样的连续性假设,除高度真空的稀薄气体外,在绝大多数情况下是合适的。

§ 2.1 流体静力学基本方程式

流体在重力与压力作用下达到平衡状态,便呈静止状态。根据本章的要求,只讨论流体在重力作用下内部压力变化的平衡规律。

2.1.1 流体的密度与压强

1. 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,其表达式为:

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

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 。

流体的密度可在物理化学手册中查得,本教材附录中也列出几种常见流体的密度。

液体的密度基本上不随压强而变(极高压强下除外),但与温度有关,查取密度值时,要注意其所指温度。

气体的密度与压强、温度有关。因此,气体的密度必须标明其状态。一般当压强不太高、温度不太低时,某状态下气体的密度可按理想气体状态方程式计算。

2. 压强

流体垂直作用于单位面积上的压力,称为流体的静压强,简称压强,其表达式为:

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-2)$$

式中: p ——流体的压强, N/m^2 , 称为帕斯卡, 符号为 Pa ;

F ——垂直作用于流体表面上的压力, N ;

A ——作用面的面积, m^2 。

根据表示压强的基准不同,压强有两种表示方法。以绝对零压(即绝对真空时压强为零)为

起点计算的压强,称为绝对压强。以当时当地大气压为起点计算的压强,称为表压强,也就是测压仪表所指示的压强,如图 2-1(a),U 形管压强计读数 R 所表示的压强称为表压强,设备内流体的绝对压强为:

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强}(P_a) + \text{表压强}$$

当被测流体的绝对压强低于外界大气压强时,所用测压仪表称为真空表,其读数表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值,称为真空度,如图 2-1(b),设备内流体的绝对压强为:

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

显然,设备内流体的绝对压强愈低,则它的真空度就愈高。真空度就是负的表压强。如真空度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa}$,则表压强是 $-5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

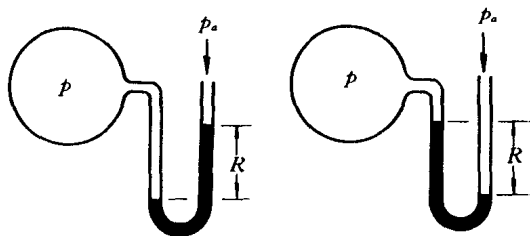


图 2-1 表压强与真空度的区别

绝对压强、表压强、真空度之间的关系,可以用图 2-2 表示。当压强数值用表压强或真空度表示时,必须分别注明,以免混淆。

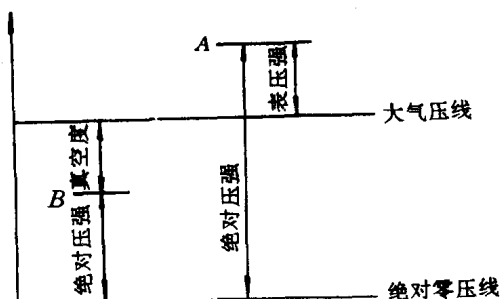


图 2-2 绝对压强、表压强和真空度的关系

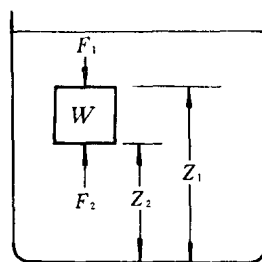


图 2-3 流体静力学基本方程的推导

2.1.2 流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式描述静止流体内部压力(压强)的变化规律。图 2-3 所示的容器中盛有密度为 ρ 的静止液体。现于液体内部任意划出一底面积为 A 的垂直液柱,取容器底为基准水平面,则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 ,作用在上、下底面上的压力分别为 F_1 和 F_2 ,液柱的重力为 W 。当液柱处于相对静止状态时,说明作用于此液柱上诸力的合力为零。那么,在垂直方向上的力有:

$$F_1 + W = F_2$$

或

$$p_1 A + \rho g A (Z_1 - Z_2) = p_2 A$$

上式中各项除以 $\rho \cdot A$,整理得:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (2-3)$$

式(2-3)称为流体静力学基本方程式。式中各项的单位皆是 J/kg ,由此知, gZ 、 $\frac{p}{\rho}$ 的物理意义是表示单位质量流体所具有的能量, gZ 称为位能, $\frac{p}{\rho}$ 称为静压能。流体静力学基本方程式表