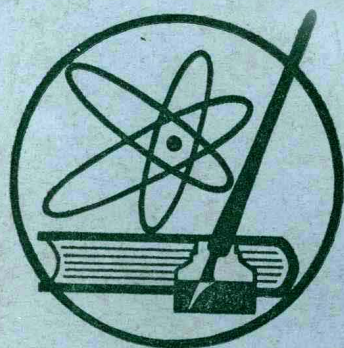




高等学校试用教材

制药化工过程及设备

沈阳药学院等合编 徐志远 主编

化学工业出版社

高等学校试用教材

制药化工过程及设备

沈阳药学院等合编

徐志远主编

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是高等学校化学制药专业的试用教材。全书除绪论及附录(包括单位换算表及各种重要数据)外,由第一章流体力学基础,第二章流体输送机械,第三章非均一系分离,第四章传热,第五章蒸发与结晶,第六章冷冻,第七章气体吸收,第八章液体蒸馏,第九章溶剂萃取,第十章固体干燥组成。

本书由沈阳药学院徐志远(绪论、第一、二章),上海化工学院徐匡时(附录)缪志康(第十章),上海第一医学院张方宜(第四、五、六章)郭梦骅(第四章)杨志华(第五章)四川医学院姜继祖(第七章),北京医学院张培方(第八章)肖振彰(第九章),南京药学院盛以虞、金祖德(第三章)等同志参加编写。

本书还可供化工或药学等有关专业师生参考,对从事化学制药专业的生产、科研、设计工作的技术人员也有参考价值。

高等学校试用教材 制药化工过程及设备

沈阳药学院等合编
徐志远主编

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

*

开本787×1092¹/₁₆印张33插页1字数831千字印数1—3,150

1980年12月北京第1版1980年12月北京第1次印刷

书号15063·3196(K-212)定价3.40元

目 录

绪论	1
----------	---

第一章 流体力学基础

第一节 流体静力学	9	1-11 产生流动阻力的原因及其 影响因素	26
1-1 流体的密度、比容和相对 密度	9	1-12 粘度	26
1-2 流体的压力 (压强)	10	1-13 流体流动的类型	28
1-3 流体静力学方程	11	1-14 阻力计算的通式	30
1-4 静压力的测量	11	1-15 流体在直管中作层流流动时的 阻力	31
第二节 流体动力学	13	1-16 流体力学相似	33
1-5 流量与流速	14	1-17 流体在圆形直管中流动时的阻力 关系曲线	36
1-6 稳定流动与不稳定流动	14	1-18 局部阻力的计算	39
1-7 流体稳定流动的物料衡算—— 连续性方程	15	1-19 管路计算	41
1-8 流体稳定流动的能量衡算—— 柏努利方程	16	第四节 流速与流量的测量	45
1-9 柏努利方程应用举例	21	1-20 测速管 (毕托管)	45
第三节 阻力计算	25	1-21 孔板流量计	46
1-10 流动阻力的表现——压力降	25	1-22 转子流量计	48

第二章 流体输送机械

第一节 离心泵	52	第三节 各种泵的比较与选择	66
2-1 离心泵的构造和作用原理	52	第四节 通风机和鼓风机	67
2-2 离心泵的主要性能参数	53	2-12 离心通风机和轴流通风机 介绍	68
2-3 离心泵的性能曲线	54	2-13 离心通风机的性能参数与性能曲线	69
2-4 离心泵的允许吸上真空高度 $H_{s\text{允许}}$ 与 允许气蚀余量 Δh	56	2-14 离心通风机的无因次性能 曲线	70
2-5 离心泵的操作分析和调节	58	2-15 鼓风机	72
2-6 药厂常用离心泵的型号和 特点	60	第五节 压缩机	74
2-7 旋涡泵	61	2-16 往复压缩机	74
2-8 离心泵的安装与运转	62	2-17 离心压缩机	75
第二节 其它类型泵	63	第六节 真空泵	76
2-9 往复泵	63	2-18 往复真空泵	76
2-10 旋转泵	65	2-19 旋转真空泵	76
2-11 流体作用泵	66	2-20 喷射式真空泵	78

第三章 非均一系的分离

第一节 概述.....79	3-6 电除尘90
3-1 非均一系及其分离方法79	第三节 液相非均一系的分离.....91
第二节 气相非均一系的分离.....80	3-7 过滤基本概念91
3-2 重力沉降80	3-8 过滤机94
3-3 旋风分离器及分离原理83	3-9 离心机.....101
3-4 空气过滤87	3-10 过滤介质的选择及滤饼的洗涤和 卸除104
3-5 湿法除尘89	

第四章 传 热

第一节 概述107	4-14 换热器的热损失及其保温133
4-1 传热过程在制药生产中的 应用107	第五节 传热计算134
4-2 传热的三种基本方式.....107	4-15 热负荷计算134
4-3 传热过程分析.....108	4-16 传热温度差与流体流向的 选择135
第二节 热传导109	4-17 传热系数141
4-4 傅立叶 (Fourier) 定律109	第六节 换热器简介145
4-5 导热系数.....110	4-18 药厂常用换热器145
4-6 平壁的热传导.....112	4-19 高效换热器简介153
4-7 圆筒壁的热传导.....115	4-20 强化传热过程的途径155
第三节 对流传热117	第七节 列管换热器的设计157
4-8 牛顿冷却定律.....117	4-21 列管换热器设计的基本原则157
4-9 传热膜系数.....119	4-22 列管换热器设计的基本步骤和 举例160
4-10 热相似119	第八节 制药生产中常用的加热、冷却与 冷凝的方法165
4-11 计算传热膜系数的主要准数 关联式122	4-23 加热方法165
第四节 热辐射131	4-24 冷却与冷凝方法169
4-12 热辐射基本定律131	
4-13 两固体间的相互辐射132	

第五章 蒸发与结晶

第一节 概述171	5-6 蒸发器的附属设备.....181
5-1 蒸发与结晶过程在制药生产中的 应用.....171	5-7 蒸发器的生产强度及其影响 因素.....182
第二节 蒸发171	5-8 单效蒸发的计算.....185
5-2 基本概念.....171	5-9 升膜式蒸发器设计简介.....188
5-3 单效蒸发与多效蒸发.....172	第三节 结晶191
5-4 真空蒸发.....172	5-10 基本概念191
5-5 药厂常用蒸发器的种类及 选用.....173	5-11 结晶的工业方法与药厂常用的 结晶设备194

第六章 冷 冻

第一节 概述	198	第三节 压缩蒸气冷冻装置及其选用	208
6-1 冷冻技术在制药生产中的 应用	198	6-7 压缩机	208
6-2 冷冻过程的基本原理	198	6-8 冷凝器	209
第二节 压缩蒸气冷冻循环	200	6-9 蒸发器	209
6-3 理想压缩蒸气冷冻循环	200	6-10 膨胀阀及其他设备	210
6-4 实际压缩蒸气冷冻循环	202	第四节 其它型式冷冻装置	211
6-5 冷冻能力	204	6-11 蒸汽喷射式汽化冷冻装置	211
6-6 冷冻剂和载冷体	206	6-12 吸收冷冻装置	211

第七章 气体吸收

第一节 概述	213	7-10 吸收系数及传质单元高度的 确定方法	255
7-1 吸收操作的基本概念及其在制药 生产中的应用	213	7-11 填料层的压力降	259
7-2 吸收操作中的主要问题	214	7-12 填料塔的附属结构	261
第二节 基本原理	215	第四节 其它吸收设备	265
7-3 吸收中的相平衡	215	7-13 吸收操作的强化	265
7-4 吸收速率	225	7-14 制药工业中常见的几种其它吸收 设备	266
第三节 填料吸收塔的工艺设计	236	7-15 设备流程	270
7-5 填料	237	第五节 化学吸收	271
7-6 物料衡算及吸收操作线方程	240	7-16 基本概念及特点	271
7-7 吸收剂的选择及用量计算	241	第六节 解吸	272
7-8 填料塔的直径	244	7-17 基本概念及主要方法	272
7-9 填料层高度	248		

第八章 液体蒸馏

第一节 概述	273	8-10 操作线方程	287
8-1 蒸馏过程在制药生产中的 应用	273	8-11 理想板数的逐板计算法	290
第二节 基本概念	274	8-12 理想板数的 $y-x$ 图解法	291
8-2 完全互溶液体混合物的 相平衡	274	8-13 简捷法求理想板数介绍	303
8-3 挥发度与相对挥发度	281	8-14 实际板数与塔效率 η	306
第三节 精馏过程	282	8-15 塔径与塔高的计算	309
8-4 精馏过程的流程	282	8-16 精馏塔的热量衡算—确定再沸器和 冷凝器的热负荷 Q	315
8-5 理想板概念	283	第五节 精馏塔主要操作因素的分析	317
8-6 精馏段和回流的作用	284	8-17 进料状态的影响	317
8-7 提馏段和再沸器的作用	284	8-18 操作压力的影响	321
第四节 二元溶液连续精馏的计算	285	8-19 现成塔的操作分析	321
8-8 设计要求和所需数据	285	第六节 间歇蒸馏	322
8-9 全塔物料衡算	285	8-20 简单蒸馏的原理及计算	322
		8-21 间歇精馏及其计算	324

第七节	多组分精馏和特殊蒸馏	334	8-27	填料塔	358
8-22	多元系精馏的方案与流程	334	8-28	乳化填料塔(或充泡填料塔)	367
8-23	恒沸蒸馏	336	8-29	多管塔	369
8-24	萃取蒸馏	337	8-30	塔板性能的评价及其类型的 选择	369
8-25	水蒸汽蒸馏	339	8-31	精馏设备的强化途径	372
第八节	塔设备	341			
8-26	板式塔	342			

第九章 溶剂萃取

第一节	概述	375	9-7	萃取过程的速度	400
9-1	基本概念	375	9-8	溶剂(萃取剂)的选择	402
9-2	萃取在制药工业中的应用	376	第三节	液-液萃取设备	404
9-3	液-液萃取中常见的物系和萃取 流程	377	9-9	液-液萃取设备概述	404
第二节	液-液萃取的原理和计算	380	9-10	萃取设备的主要类型	406
9-4	萃取剂与原溶剂不互溶的三元系液- 液萃取	380	9-11	液-液萃取设备的选择	415
9-5	一对部分互溶三元系的 液-液萃取	386	9-12	萃取塔计算简述	416
9-6	复杂物系连续逆流萃取实验	399	第四节	固-液萃取	417
			9-13	固-液萃取概述	417
			9-14	影响固-液萃取的诸因素	417
			9-15	固-液萃取方法及设备	418

第十章 固体干燥

第一节	概述	424	10-12	恒定干燥情况下干燥时间的 计算	454
10-1	固体干燥在制药生产中的 应用	424	第五节	干燥器	457
10-2	干燥设备的分类	425	10-13	气流干燥器	457
10-3	对流干燥的流程及固体干燥 机理	426	10-14	流化床干燥器	460
第二节	湿空气的性质及焓湿图	427	10-15	喷雾干燥器	464
10-4	湿空气的性质	427	10-16	厢式干燥器	467
10-5	湿空气的焓湿图及其应用	434	10-17	耙式真空干燥器	468
第三节	干燥器的物料衡算和热量 衡算	439	10-18	滚筒干燥器	469
10-6	物料衡算	439	10-19	冷冻干燥器	469
10-7	热量衡算	442	10-20	红外干燥器	470
10-8	干燥器出口空气状态的确定	443	10-21	微波干燥器	470
10-9	干燥器的热效率	445	10-22	干燥器的选型	471
第四节	干燥速率和干燥时间	447	第六节	干燥器的计算	472
10-10	物料中所含水分的性质	448	10-23	气流干燥器的计算	472
10-11	干燥速率及其影响因素	450	10-24	卧式多室流化床干燥器的 计算	478
			10-25	干燥器的设计程序	486

附录

附录一	单位换算表	489	1. 长度	489
-----	-------	-----	-------	-----

2. 面积	489	7. 饱和水蒸汽的物理性质	
3. 容积, 体积	490	(以温度为准)	503
4. 质量	490	8. 饱和水蒸汽的物理性质	
5. 力	490	(以压力为准)	504
6. 温度	491	9. 液体粘度共线图	506
7. 密度	491	10. 气体粘度共线图	508
8. 体积流量	491	11. 液体比热共线图	509
9. 压力	492	12. 气体比热共线图 (常压下用)	510
10. 能量, 热, 功	492	13. 液体气化潜热共线图	511
11. 功率	493	14. 某些液体的导热系数	512
12. 动力粘度	493	15. 某些水溶液的导热系数	512
13. 运动粘度, 扩散系数	494	16. 某些液体的气化潜热	513
14. 导热系数	494	17. 液体表面张力共线图	514
15. 传热系数, 传热膜系数	494	18. 某些水溶液的表面张力	515
16. 比热, 热容	494	19. 有机高温载热体的物理性质	515
17. 表面张力	495	20. 气体与蒸气在空气中的扩散系数	
18. 传质系数	495	($T_0=273\text{K}$, $P_0=101.3\text{kPa}$)	516
19. 重力加速度	495	21. 298K, 101.3kPa下气体与蒸气在空	
20. 通用气体常数	495	气中的扩散系数	516
附录二 各种重要数据	496	22. 293K时, 扩散入液体中的扩散	
1. 某些液体的重要物理性质	496	系数	517
2. 干空气的重要物理性质	498	23. 管内各种流体常用流速	518
3. 某些气体的重要物理性质	499	24. 有缝钢管(即水、煤气管)规格	
4. 水的重要物理性质	500	(摘自YB234-63)	518
5. 水在不同温度下的粘度	502	25. 标准筛目	519
6. 水的饱和蒸汽压($-20\sim 100^\circ\text{C}$)	502		

绪 论

(一)《制药化工过程及设备》课程的性质及研究对象

《制药化工过程及设备》课程是化学制药专业的一门技术基础课。它研究化学制药（包括植化药品）生产中常用的化工基本过程（亦称单元操作）及其设备的构造、操作、工艺计算与发展趋势。

本课程和其他技术科学一样，是来源于生产实践，并随着生产和科学的发展而不断发展的。

化学工业（包括制药工业）的特点是品种多，原料复杂，生产中均有化学反应，而反应条件苛刻，产品质量要求高。在对各种化工生产过程进行分析、对比后得知，虽然原料、工艺条件不同，但在生产过程中都要应用一些具有共同特点的基本过程和设备，例如：流体流动、传热、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、干燥等单元操作。而这些单元操作的基本原理（即内部规律），并不因原料与操作条件不同而改变。人们还认识到，如果要最有效、最迅速、最经济地发展化学工业，就必须研究这些基本过程的规律性，并根据这些规律性来解决化工生产中的问题，如组织实验工作、过程的工程放大、选用或设计设备、以及拟定其操作条件和强化途径等。《制药化工过程及设备》就是这么一门课程，它所研究的正是《化学制药工艺学》和《化学制药厂反应设备及设计概论》等课程的重要基础。所以在化学制药专业教学计划中，本课程为技术基础课。在其他专业与此相似的课程称为《化工原理》、《单元操作》或《化学工程》。随着生产斗争与科学实验的发展，对“单元操作”的认识也不断深化，发现各“单元操作”不是孤立无关的，而是可以归纳到一些基本的共同规律中去，从而提出新的分类方法，即把各单元操作看成是密切联系的三种传递现象——动量传递、热量传递与质量传递。既然三种传递现象同属传递过程，就必然有其内在的共同联系。用类似的方法（类似律）来研究它们之间的内在联系，认识其共同本质，则使我们的认识大为深化。

同时，由于生产过程是一个整体，而且希望在尽可能的高效率和低成本下进行生产，因此只孤立地研究每个单元操作及设备就不能达到这一目的，而必须将生产过程作为一个综合系统，建立这一系统的数学模型，应用电子计算机，进行整个系统的物质和能量转变过程的最优化研究。这又发展了化工系统工程学。

(二)《制药化工过程及设备》课程的内容及分类

由上述情况可知本课程所研究的内容在不断发展，各种分类方法尚未统一。但根据目前化学制药工业生产的需要，选择常用“单元操作”作为基本内容，并根据其遵循规律，分为以下几部分。

一、流体流动过程及设备——遵循流体力学规律，包括下列三章：

1. 流体力学基础
2. 流体输送机械

3. 非均一系分离

二、传热过程及设备——遵循传热规律，包括下列二章：

1. 传热

2. 蒸发与结晶

三、传质过程及设备——遵循传质规律，包括下列四章：

1. 气体吸收

2. 液体蒸馏

3. 溶剂萃取

4. 固体干燥

四、热力过程及设备——遵循热力学规律，包括冷冻一章。

学习本课程时，必须树立实践第一的观点，联系生产实际，总结生产实践的规律性，并提高到理性认识，再以此指导生产实践活动，如此逐步培养分析问题与解决问题的能力。

(三) 物理量的单位制

生产中常遇到各种单位制度表示各种物理量，如密度、粘度、导热系数、吸收系数等。因此，应该熟悉各种单位制度和单位换算。

物理量的大小，除了列出数值，还要列出这个数值所计量的单位。例如流体的速度是一个物理量，它的大小可以用2米/秒来表示，若是“2”这个数值离开米/秒这个单位就毫无意义。所以物理量的大小是用数值与单位两者的乘积来表示。说它是个乘积，因为在计算中，单位与数值都应同样看待，可以一起纳入运算。

为了把各种物理量的单位表示清楚，人们把物理量划分为基本量与导出量。并给每一个基本量规定出一个单位，称为基本单位；其余的物理量都可以从基本量导出，称为导出量，导出量的单位称为导出单位。至于选定哪几个物理量作基本量，给基本量规定什么基本单位，可从不同角度考虑。由于基本量选择的不同，或对基本量所规定的基本单位不同，便产生了不同的单位制度。常见的米制单位制所用的基本量与基本单位如下：

单 位 制	基 本 量			
	长 度	质 量	力	时 间
绝对单位制				
CGS制	厘米cm	克g	—	秒s
MKS制	米m	千克kg	—	秒s
工程单位制	米m	—	千克力kgf	秒s

注：与米制对应的还有英制，以英尺、磅、秒作基本单位（f·p·s制）。

由上表可以看出，绝对单位制（CGS制与MKS制）以长度、质量和时间作为基本单位，力的单位则是导出单位；工程单位制以长度、力和时间作为基本单位，质量单位则是导出单位。在自然科学里多采用CGS制，所以CGS制又称物理单位制。工程单位制则用于工程技术中。

这样，通常所称米制（即“公制”），实际是并用多种基本单位。例如一个压力单位就有千克力/厘米²、克力/厘米²、千克力/米²、标准大气压、毫米汞柱、毫米水柱、米水柱、巴、

达因/厘米²等，这就造成了应用上的混乱。为了消除这些缺点，1954年第十届国际计量大会提出，经过征求意见后，于1960年第十一届国际计量大会补充修订，批准建立一种比较先进的计量单位制，称为国际单位制。其代号为SI，它是法文 *Système International* (国际制) 的缩写，我国简称国际制。国际单位制的构成原则比较合理，大部分单位都很实用，并且涉及所有的专业领域，采用国际单位制可以废除几乎所有其它单位制和单位。例如，只用一个单位“帕斯卡” Pa N/m²，就可以代替上述所有压力单位。从而避免由于多种单位制并用而引起的混乱现象和不必要的换算，有利于促进经济建设和国际交往。

目前绝大部分工业发达国家都积极推广国际单位制，原来采用英制的国家也大部分决定放弃英制，采用或准备采用国际单位制。我国1977年5月27日由国务院颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》第三条规定：“我国的基本计量制度是米制(即“公制”)，逐步采用国际单位制。”所以熟悉应用国际单位制，并了解与其他单位制的换算关系，就显得十分必要。本课程采用国际单位制，适当介绍其他单位制，一般用中文代号表示，以示区别。

国际单位制(SI)是由米-千克-秒制(MKS制)发展起来的，它一共采用七个物理量为基本单位，其名称、代号见下表：

基 本 单 位	名 称	代 号	
		中 文	国 际
长 度	米	米	m
质 量	千克(公斤)	千克(公斤)	kg
时 间	秒	秒	s
电 流	安 培	安	A
热力学温度	开 尔 文	开	K ^①
物质的量	摩 尔	摩	mol
光 强 度	坎 德 拉	坎	cd

① 也使用按式 $t = T - 273.15K$ 所得的摄氏温度，式中 t 为摄氏温度， T 为热力学温度。摄氏温度用摄氏度代号℃表示。

各基本单位的定义，见国家标准计量局“国际单位制及使用方法”。采用国际制的主要优点是：1. 科技各部门所用的所有计量单位都可以从上述七个基本单位导出，也就是都可以采用一套共同的单位。2. 任何导出单位由基本单位相乘、相除而导出时，都不引入比例常数，或者说比例常数都等于1。例如力的单位采用牛顿N表示，而

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \times 1\text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

又如能量、热、功三者的单位都采用焦耳J。

$$1\text{ J} = 1\text{ N} \times 1\text{ m} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

其他单位制采用卡cal或千卡 kcal作热的单位，采用〔焦耳〕或〔千克力·米〕(kgf·m)作功或能量的单位。从热的单位转换为功的单位便要通过所谓“热功当量”这个比例常数。

$$1[\text{千卡}] = 4.1868\text{ kJ} = 427 [\text{千克力} \cdot \text{米}]$$

国际制各单位之间的换算无需通过比例常数，使运算简便而不易发生错误。

国际单位制还规定用一套字头(即词冠)来表示十进倍数单位与分数单位，并规定对最常用的从千到毫的各位数按十进、十退定名，其它按千进、千退定名，国际制词冠见下表：

因数	词 冠	代 号		因数	词 冠	代 号		因数	词 冠	代 号	
		中文	国际			中文	国际			中文	国际
10^9	吉咖(giga)	吉	G	10^1	十 (déca)	十	da	10^{-3}	毫 (milli)	毫	m
10^6	兆 (méga)	兆	M	10^{-1}	分 (déci)	分	d	10^{-6}	微 (micro)	微	μ
10^3	千 (kilo)	千	k	10^{-2}	厘 (centi)	厘	c	10^{-9}	纳诺(nano)	纳	n
10^2	百(hecto)	百	h								

注: 10^9 以上与 10^{-9} 以下词冠从略。

国际计量委员会(1969年)认为,在应用国际制的同时,有必要采用国际制以外的具有重要作用和广泛使用的单位与国际制并用,这些与国际单位制并用的单位列表如下:

名 称	代 号		相当于国际制单位的值	名 称	代 号		相当于国际制单位的值
	中 文	国 际			中 文	国 际	
分	分	min	1分=60秒	分	分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800)$ 弧度
小时	时	h	1时=60分=3600秒	秒	秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000)$ 弧度
日	日	d	1日=24时=86400秒	升	升	l	1升=1分米 ³ = 10^{-3} 米 ³
度	度	°	$1^\circ = (\pi/180)$ 弧度	吨	吨	t	1吨= 10^3 千克

还有标准大气压与巴暂时与国际制并用。

1标准大气压, atm=101325帕或Pa

1巴, bar=0.1兆帕= 10^5 帕或Pa

现将常用的一些物理量的国际单位制与其他单位制的单位列表如下:

物 理 量	国 际 单 位 制 (SI)				物理单位制 (CGS制)	工程单位制 (m·kgf·s制)
	名 称	代 号		用基本单位表 示的关系式		
		中 文	国 际			
力	牛顿	牛	N	$\text{mkg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{g}\cdot\text{cm}/\text{s}^2=\text{dyn}$	kgf
压力 (压强)	帕斯卡	帕	Pa	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}/\text{cm}^2=10^{-6}\text{bar}$	kgf/m ²
能·功	焦耳	焦	J	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}\cdot\text{cm}=\text{erg}$	kgf·m
热量	焦耳	焦	J	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	cal	kcal
功率	瓦特	瓦	W	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$	erg/s	kgf·m/s
密度	千克每立方米	千克/米 ³	kg/m ³	m^{-3}kg	g/cm^3	kgf·s ² /m ⁴
粘度	帕斯卡秒	帕·秒	Pa·s	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2=\text{P}$	kgf·s/m ²
力矩	牛顿米	牛·米	N·m	$\text{m}^2\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	dyn·cm	kgf·m
表面张力	牛顿每米	牛/米	N/m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	dyn/cm	kgf/m
热容、嫡	焦耳每开尔文	焦/开	J/K	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/℃	kcal/℃
比热容·比嫡	焦耳每千克开尔文	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/g·℃	kcal/kgf·℃
扩散系数	平方米每秒	米 ² /秒	m ² /s	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	cm ² /s	m ² /s
导热系数	瓦特每米开尔文	瓦/(米·开)	W/(m·K)	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/cm·s·℃	kcal/m·s·℃
传热系数	瓦特每平方米开尔文	瓦/(米 ² ·开)	W/(m ² ·K)	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/cm ² ·s·℃	kcal/m ² ·s·℃

(四) 单位的正确运用

化工计算公式种类不同, 使用物理量单位的方法也不同。

一类是根据物理规律建立的公式, 其中的符号除掉比例系数以外, 都代表物理量, 因此又称作物理量方程。例如牛顿第二定律 ($F=ma$) 或柏努利方程等。既然物理量是数值与单位的乘积, 把物理量的数据代入这一类公式时, 就应当把数值和单位一起代进去。而解出的结果总是属于相同单位制度。所以物理量方程在单位上总是一致的。

使用物理量方程进行计算时, 开始便应选定一种单位制, 并贯彻到底, 中途不能改变。求得的结果若不能保持单位的一致或得出不合理的单位, 这表明计算中混进不一致的单位, 或者是所用的公式本身单位不一致, 有必要检查公式是否正确。

另一类纯粹根据实验结果整理出来的公式, 称为经验公式。这类公式中的每一个符号都要用指定单位的数值代入, 计算结果的单位也是指定的。经验公式往往不符合单位的一致性。所以严格的说, 这种公式中的符号并不能代表完整的物理量, 只是代表物理量中的数值部分, 所以又称数字公式。

使用经验公式时, 代入前要核实每个物理量数据所用的单位是否合乎公式的规定, 但代入时只需把数值代入, 算出的结果则附上公式所规定的单位。经验公式的使用是有局限性的。

化工过程所研究的现象十分复杂, 一般用微分方程描述。但由于涉及很多物理量, 这些微分方程很难求得积分通式。故借助相似理论和实验得出具有一定物理意义的相似准数组成的准数方程, 这类准数方程在化工计算中十分重要。

使用准数方程求物理量时, 对包含所求物理量的相似准数选用的单位, 应与求取物理量的单位一致。而其他相似准数可以采用任意单位, 但必须注意它的物理量单位能消去, 这些以后还要讨论。

(五) 单位换算

在化工计算中, 从各种来源得到的数据, 其单位不一定符合公式要求, 需要预先换算好。若在运算过程中临时换算, 很容易发生错误。

物理量由一种单位换算成另一种单位时, 其数值也跟着改变, 换算时需用换算因数。所谓换算因数就是两种单位大小的比值。例如, 因为 $1\text{m}=100\text{cm}$, 故由 m 换算成 cm 的换算因数就是 $\text{m}/\text{cm}=100/1=100$, 这样把长度从若干 m 换算成 cm 就应该把这个长度乘以 cm/m 。

化工常用单位的换算因数可以从附录中查到。比较复杂的单位换算因数无表可查时, 可以把复杂单位分解成若干简单的单位, 逐个换算。下面通过几个例题来说明换算方法和步骤。

例题 1 4°C 时水的密度用物理单位制表示是 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$, 换成以国际单位制和工程单位制表示。

解: (1) 先找出各单位的换算关系

因为

$$1\text{m}=100\text{cm}, 1\text{kg}=1000\text{g}$$

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.81\text{m}/\text{s}^2$$

这些关系可以改写成

$$\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}=1, \quad \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}=1, \quad \frac{1\text{kgf}}{9.81\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2}=1$$

(2) 把密度的单位由 g/cm^3 换算成 kg/m^3 及 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

$$1.00\text{g}/\text{cm}^3 = \frac{\text{g} \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}}{\text{cm}^3 \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^3} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ (国际制)}$$

$$\begin{aligned} 1.00\text{g}/\text{cm}^3 &= 1000\text{kg}/\text{m}^3 = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{kgf}}{9.81\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2} \\ &= 102 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4 \text{ (工程制)} \end{aligned}$$

例题2 将CGS制粘度单位〔泊〕(P), 换算成SI制粘度单位〔帕·秒〕(Pa·s)

解: (1) 写出泊的基本单位

根据粘度的定义得出

$$1\text{P} = 1 \frac{\text{dyn}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}, \text{ 而 } 1\text{dyn} = 1\text{g}\cdot\text{cm}/\text{s}^2$$

$$1\text{P} = 1\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$$

(2) 找出cm与m, g与kg的换算关系

$$1\text{m} = 100\text{cm}, \quad 1\text{kg} = 1000\text{g}$$

改写成

$$\frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 1, \quad \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 1$$

(3) 因为任何数值乘以1, 这个数值并没有改变, 故

$$\begin{aligned} 1\text{P} &= \frac{\text{g} \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}}{\text{cm} \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \text{s}} = \frac{100}{1000} \times \frac{\text{g} \frac{\text{kg}}{\text{g}}}{\text{cm} \frac{\text{m}}{\text{cm}} \text{s}} \\ &= 0.1 \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

到此已换算成SI制, 但为了要用Pa表示粘度, 而 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$, $1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$, 所以上式的分子、分母均乘以 m/s^2 , 则得

$$1\text{P} = 0.1 \frac{\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}\cdot\text{s} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

例题3 将1〔马力〕(hp)换算成〔千瓦〕(kW)

解: (1) 写出kW的单位

$$1\text{kW} = 10^3\text{W} = 10^3\text{J}/\text{s} = 10^3\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$$

(2) 找出英制与米制间换算关系

$$1\text{〔英尺〕} = 0.3048\text{m}, \quad 1\text{〔磅〕} = 4.448\text{N}$$

$$1\text{〔马力〕} = 550\text{〔英尺}\cdot\text{磅}/\text{秒〕}$$

可以改写成

$$\frac{0.3048\text{m}}{1\text{英尺}} = 1, \quad \frac{4.448\text{N}}{1\text{磅}} = 1$$

(3) 将换算因数代入

$$1[\text{马力}] = 550 \frac{\text{英尺} \cdot \text{磅}}{\text{秒}} = 550 \frac{\text{英尺} \frac{0.3048 \text{ m}}{1 \text{ 英尺}} \text{磅} \frac{4.448 \text{ N}}{1 \text{ 磅}}}{\text{秒}}$$

$$= 550 \times 0.3048 \times 4.448 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 746 \text{ W}$$

所以 $1[\text{马力}] = \frac{746}{1000} = 0.746 \text{ kW}$

或 $1 \text{ kW} = 1.34[\text{马力}]$

例题 4 水分自静止的水面蒸发到空气中的速率 G , 可用下式计算:

$$G = 2.45 w^{0.8} \Delta p \quad [\text{磅/英尺}^2 \cdot \text{小时}]$$

式中 w ——水面上空气流动的速度, $[\text{英尺/秒}]$;

Δp ——在空气的湿球温度下水的饱和蒸汽压与空气中水蒸汽分压之差, $[\text{大气压}]$ 。

试将上式加以转换, 使 G 以 $[\text{千克/米}^2 \cdot \text{小时}]$ 、 w 以 $[\text{米/秒}]$ 、 Δp 以 $[\text{毫米汞柱}]$ 表示。

解: 经验公式中各符号都要用规定单位的数据代入。如果有些数据单位与公式规定的单位不一致, 而公式又要反复使用, 可以将此公式进行单位换算。这样使用起来就方便得多。

原来 w 是以 $[\text{英尺/秒}]$ 表示的, 如果我们要用 $[\text{米/秒}]$ 表示的 w' 值代入, 应将这个数值乘以 $\frac{1}{0.3048}$, 因为 $1[\text{英尺}] = 0.3048 \text{ m}$; 同样, 设 $\Delta p'$ $[\text{毫米汞柱}]$ 表示, 则应以 $\frac{\Delta p'}{760}$ 替换式中之 Δp 。

即 $w = \frac{w'}{0.3048} \quad [\text{英尺/秒}]$

$$\Delta p = \frac{\Delta p'}{760} \quad [\text{大气压}]$$

代入公式

$$G = 2.45 \left(\frac{w'}{0.3048} \right)^{0.8} \left(\frac{\Delta p'}{760} \right)$$

这样算出来的单位仍然是 $[\text{磅/英尺}^2 \cdot \text{小时}]$, 还要将其换算成 $[\text{千克/米}^2 \cdot \text{小时}]$, 而 $1[\text{磅}] = 0.454[\text{千克}]$

$$G' = 2.45 \left(\frac{w'}{0.3048} \right)^{0.8} \left(\frac{\Delta p'}{760} \right) \left[\frac{0.454 \text{ 千克}}{(0.3048 \text{ 米})^2 \cdot \text{小时}} \right]$$

所以 $G' = 0.0406 w'^{0.8} \Delta p' \quad [\text{千克/米}^2 \cdot \text{小时}]$

值得注意的是, 原公式右侧各项的单位换算是从新单位换成原有单位, 以适合原来公式的规定; 但表示公式结果的单位, 仍按普通单位换算的规则进行。

(六) 因次与因次一致性原则

任何物理量都可以用几个基本量来表示, 若用 L 、 M 、 F 、 θ 、 T 依次代表长度、质量、力、时间、温度等基本量, 并把它称为因次, 那么别的物理量的因次便可以表示成这几个符号 (因次) 的组合。例如面积的因次就是 L^2 , 速度的因次就是 $L\theta^{-1}$ 。复杂一点的物理量因次可以根据一定的物理规律导出。象导出它的单位一样, 可得到绝对单位制表示力的因次是

$LM\theta^{-2}$ ，工程单位制表示的质量因次是 $L^{-1}F\theta^2$ 。而单位制度不同则一个物理量因次也会不同。

既然物理量方程的单位必须一致，它的因次也必然是一致的，更具体的说，一个物理量方程等号两侧各项的因次必然相同，这称为因次一致性原则。导出一个方程式如果怀疑其是否合理，首先可以用这个原则来检验。检查因次比检查单位方便。如果无法从理论上导出一个方程式，利用因次一致性原则也可以找出一个整理实验数据用的关系式，这个方法称为因次分析。

例题 5 液体的饱和蒸气压随温度而变的关系为

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{Tv}$$

式中 P ——液体的饱和蒸气压力；

T ——液体的热力学温度；

λ ——液体的气化潜热；

v ——蒸气比容，即单位质量蒸气的体积。

利用因次一致性原则，检验此公式是否正确。

解：按绝对单位制得出上式物理量的因次如下：

$$p = [L^{-1}M\theta^{-2}]$$

$$T = [T]$$

$$\lambda = [L^2\theta^{-2}]$$

$$v = \left[\frac{L^3}{M} \right] = [L^3M^{-1}]$$

由此算出关系式等号两侧各项的因次如下：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{[L^{-1}M\theta^{-2}]}{[T]} = [L^{-1}M\theta^{-2}T^{-1}]$$

$$\frac{\lambda}{Tv} = \frac{[L^2\theta^{-2}]}{[T][L^3M^{-1}]} = [L^{-1}M\theta^{-2}T^{-1}]$$

各项因次相同，所以这个公式符合因次一致性原则。因此，也说明了关系式正确。

第一章 流体力学基础

制药生产中所处理的物料很多是流体（气体与液体），经常遇到流体在管道中的输送问题。而生产中的传热、传质和化学反应等过程也与流体流动密切相关，故流体流动过程在制药生产中占有重要地位，而流体力学的一些基本理论亦是本课程的一个重要基础。

图1-1为制药生产中氯化氢气体的吸收流程示意图。用泵将循环水输送到吸收塔顶，经喷淋装置喷洒后，在填料塔中将氯化氢气体吸收。氯化氢气体用鼓风机从塔底送入，吸收后的气体由塔顶排出。

建立这套设备需要解决的问题：

1. 选择输送流体的管径；
2. 计算输送流体所需要的能量，正确选择输送机械；
3. 合理配备计量装置。

这套设备中循环水与氯化氢气体的输送以及流速计、压差计、液封等都是流体力学所要研究的问题。其中流体在压差计中处于静止状态，属于流体静力学问题。而泵与鼓风机功率计算，流速计以及流体在导管中流动等，则属于流体动力学问题。

下面将分别叙述。

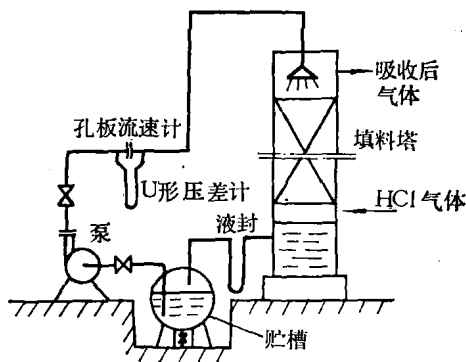


图 1-1 氯化氢气体吸收流程示意图

第一节 流体静力学

1-1 流体的密度、比容和相对密度

单位体积流体的质量称为密度，用符号 ρ 表示，若设 m 为流体的质量， V 为流体的体积，则流体的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1)$$

密度的CGS单位为[克/厘米³]，SI单位为 kg/m^3 ，工程单位为[千克力·秒²/米⁴]，其间换算关系如下：

$$1[\text{克/厘米}^3] = 1000\text{kg/m}^3 = 102[\text{千克力} \cdot \text{秒}^2/\text{米}^4]$$

单位质量流体的体积称为比容，用符号 v 表示。

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-2)$$

显然，比容就是密度的倒数，比容的单位也是密度单位的倒数。

流体的密度与水的密度之比称为相对密度（工程制中称比重），用符号 d 表示。相对密度是一个比值，没有单位。粗略计算中，水的密度可取1[克/厘米³]，所以物料的相对密度在数值上等于它以CGS单位制表示的密度。例如浓硫酸的相对密度为1.84，它的密度就是