



GAODENG ZHIYE JIAOYU JIAOCAI

• 高等职业教育教材 •

化工原理

H U A G O N G Y U A N L I

主编 黄亚东



高等职业教育教材

化工原理

主 编 黄亚东

副主编 李继友

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/黄亚东主编. —北京: 中国轻工业出版社,
2006. 9

高等职业教育教材

ISBN 7-5019-5520-4

I. 化... II. 黄... III. 化工原理 - 高等学校: 技
术学校 - 教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081014 号

责任编辑:李海燕

策划编辑:白洁 李海燕

责任终审:劳国强

封面设计:王佳芃

版式设计:马金路

责任校对:李靖

责任监印:胡兵 张可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印刷:三河市世纪兴源印刷有限公司

经销:各地新华书店

版次:2006年9月第1版第1次印刷

开本:720×1000 1/16 印张:28.25

字数:569千字

书号:ISBN 7-5019-5520-4/TQ·283 定价:48.00元

读者服务部邮购热线电话:010—65241695 85111729 传真:85111730

发行电话:010—85119817 65128898 传真:85113293

网址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

51065J4X101ZBW

前 言

《化工原理》是高职高专院校食品工程、生物工程类专业开设的一门重要的技术基础课，具有很强的实用性。在人才培养过程中，该课程起着承上启下、由理及工的桥梁作用。其内容是关于动量传递、热量传递及质量传递（简称“三传”）理论在有关单元操作中的应用，主要包括流体流动与输送、传热、沉降、过滤、压榨、离心分离、混合、乳化、蒸发、结晶、冷冻浓缩、蒸馏、吸收、萃取、吸附、浸出、离子交换、膜分离、干燥、制冷等单元操作。

本教材通过理论学习与技能训练，使学生了解常用单元操作的基本概念，理解常用单元操作的基本原理及基本工艺计算，掌握典型设备的组成、结构、工作原理、性能特点、操作要点及选用方法，并能灵活运用所学的知识和技能分析、解决单元操作中的一般性技术问题，同时培养学生的工程意识、岗位意识和责任意识。

本书采纳了多所高职院校的意见和建议，根据高职高专生物技术、食品工程类专业的教学特点编写而成，涉及面较广，深入浅出，注重应用，强化训练。为了便于教学，教材内容按“重点掌握”、“一般掌握”和“理解”三个层次编写，并在每章的“教学目标”中提出基本要求。

本书的绪论、第一、三、五、七、十章及附录由江苏食品职业技术学院黄亚东编写，第二、九章由天津渤海职业技术学院李继友编写，第六章由洛阳大学李月红编写，第四章由江苏食品职业技术学院严群芳与天津渤海职业技术学院李继友合作编写，第八章由湖北荆门职业技术学院高松与江苏食品职业技术学院严群芳合作编写。最后由江苏食品职业技术学院院长、教育部高职高专生物技术专业教学指导委员会委员王仁雷教授主审。

本书的编写得到了中国轻工业出版社和参编者所在学校领导的大力支持和帮助，书中引用和借鉴了一些已发表的文献资料，在此向相关作者和提供过帮助的同志表示感谢。

由于编写时间仓促，作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2006年6月

目 录

绪论	1
一、《化工原理》课程的性质、内容和任务	1
二、单元操作的计算基础	1
三、单位制及单位换算	6
思考题	8
习题	8
第一章 流体的流动与输送	9
第一节 流体力学基础	9
一、流体的物理性质与作用力	9
二、静止流体的基本规律	12
三、流体流动的基本规律	15
第二节 流体在管内流动时的阻力	24
一、流体阻力产生的原因及影响因素	24
二、管内流体流动时的速度分布	26
三、边界层分离	27
四、化工管路的构成	28
五、直管阻力的计算	32
六、局部阻力的计算	34
七、管路系统的总阻力计算	35
八、管路系统的计算	37
第三节 流量测定	41
一、毕托管	41
二、孔板流量计	42
三、转子流量计	43
第四节 液体输送机械	44
一、泵的种类及作用	44
二、对液体输送机械的基本要求	44
三、常用的液体输送机械	44
第五节 气体输送机械	63
一、气体输送机械的种类及作用	63
二、常用气体输送设备	63

三、压缩机	66
四、真空泵	67
实训一 阀门的使用与维护	68
实训二 离心泵操作技能训练	70
实训三 往复式压缩机操作技能训练	74
思考题	76
习题	77
第二章 传热	79
第一节 传热的基本概念和理论	79
一、传热的基本方式	79
二、工业中的换热方式	80
三、稳定传热和不稳定传热	82
第二节 热传导	82
一、热传导的基本定律——傅立叶定律	82
二、导热系数	83
三、平壁的热传导	84
四、圆筒壁的热传导	87
第三节 对流传热	89
一、对流传热速率方程	89
二、对流传热系数	91
三、流体无相变时的强制对流传热系数	92
四、流体有相变时的强制对流传热	95
第四节 稳定传热过程的计算	98
一、传热的基本方程	98
二、热负荷的计算	99
三、传热平均温度差的计算	100
四、传热系数 K 值的计算和测定	105
五、强化传热过程的途径	109
第五节 换热器	110
一、夹套式换热器	110
二、蛇管式换热器	110
三、套管式换热器	111
四、列管式换热器	112
五、翅片式换热器	113
六、板式换热器	114
七、螺旋板式换热器	115

实训 换热岗位操作训练	116
思考题	119
习题	119
第三章 非均相混合物的分离	122
第一节 沉降	122
一、沉降的基本概念和理论	122
二、沉降设备	126
第二节 过滤	128
一、过滤的基本概念和理论	129
二、过滤操作计算	132
三、过滤设备	135
四、滤饼洗涤	141
五、过滤机的生产能力计算	142
第三节 离心分离	144
一、离心分离的基本概念和理论	144
二、离心分离设备	146
第四节 压榨	150
一、压榨的基本概念和理论	150
二、典型的压榨设备	151
实训一 板框压滤机操作技能训练	153
实训二 离心机操作技能训练	155
思考题	157
习题	157
第四章 混合、乳化	159
第一节 混合	159
一、混合的基本概念和理论	159
二、常用的混合设备	161
第二节 乳化	170
一、乳化的基本概念和理论	171
二、乳化设备	173
三、常用乳化系统简介	177
实训 高剪切均质机的安装及操作技能训练	178
思考题	181
习题	181
第五章 蒸发、结晶、冷冻浓缩	183
第一节 蒸发	183
一、蒸发的基本概念和理论	183

二、蒸发装置及其选型	185
三、单效蒸发	191
四、多效蒸发	199
第二节 结晶	202
一、结晶的基本概念和理论	202
二、结晶方法与设备	206
第三节 冷冻浓缩	208
一、冷冻浓缩的基本概念和理论	208
二、冷冻浓缩的装置系统	211
三、冷冻浓缩的应用	213
实训 蒸发岗位操作技能训练	215
思考题	216
习题	216
第六章 蒸馏 吸收 萃取	218
第一节 蒸馏	218
一、概述	218
二、双组分溶液的气液相平衡	219
三、蒸馏与精馏原理	225
四、双组分连续精馏操作计算	228
五、蒸馏设备	237
六、连续精馏塔的操作和调节	243
第二节 吸收	245
一、概述	245
二、吸收的分类	247
三、吸收设备	247
四、气液相平衡	248
第三节 液-液萃取	251
一、概述	251
二、萃取操作原理	252
三、液-液萃取在生物化工中的应用	253
四、萃取剂的选择	253
五、萃取流程	254
六、超临界气体萃取简介	256
七、液-液萃取设备	258
实训 精馏操作技能训练	261
思考题	264

习题	265
第七章 液体吸附 浸出 离子交换	267
第一节 液体吸附	267
一、液体吸附的基本概念	267
二、吸附剂	268
三、液体吸附的方法	270
四、常用的吸附装置及操作	271
第二节 浸出	273
一、浸出的基本概念和理论	273
二、浸出操作方式与浸出器分类	275
三、浸出设备及操作要点	276
四、浸出的基本工艺计算	279
第三节 离子交换	281
一、离子交换的基本概念和原理	281
二、离子交换剂的分类	282
三、离子交换树脂的基本性能	283
四、离子交换的操作循环过程	285
五、离子交换装置	287
实训 混合床离子交换操作技能训练	289
思考题	291
习题	292
第八章 膜分离	293
第一节 概述	293
一、膜的分类	293
二、常用的膜分离过程及基本特性	294
三、膜材料的基本要求	295
四、膜分离的特点	295
第二节 超滤	296
一、超滤的基本概念和理论	296
二、超滤装置及流程	298
第三节 反渗透	303
一、反渗透的基本概念和理论	303
二、反渗透设备	304
三、反渗透操作的应用	306
四、超滤与反渗透比较	307
第四节 电渗析	307

一、离子交换膜	307
二、电渗析的基本原理	309
三、电渗析装置及操作要点	310
实训一 超滤法分离明胶蛋白水溶液	313
实训二 微滤-离子交换-反渗透组合工艺制备超纯水	316
思考题	318
第九章 干燥	319
第一节 概述	319
一、去湿方法	319
二、常用的干燥方式	319
三、干燥过程	320
第二节 湿空气的热力学基础	321
一、湿空气的性质	321
二、湿空气的温度-湿度 ($T-H$) 图	326
三、湿空气的增湿和减湿	330
第三节 干燥器的物料衡算和热量衡算	331
一、湿物料中含水量的表示方法	332
二、干燥过程的物料衡算	332
三、干燥过程的热量衡算	334
四、空气通过干燥器时的状态变化	336
五、干燥器的热效率和干燥效率	338
第四节 干燥过程的机理	339
一、物料中水分的分类	339
二、固体物料的干燥机理	341
三、干燥速率及其影响因素	342
四、干燥速率和干燥速率曲线	343
第五节 干燥设备	345
一、常见的干燥器	345
二、干燥器的选用	350
第六节 冷冻干燥	351
一、冷冻干燥的基本原理	351
二、冷冻干燥的步骤	352
三、冷冻干燥的装置系统	352
实训一 洞道式干燥器操作技能训练	354
实训二 对苯二甲酸干燥岗位操作技能训练	356
思考题	359

习题	360
第十章 制冷	362
第一节 制冷的基本概念和理论	362
一、人工制冷的热力学原理	362
二、单位制冷量	364
三、制冷机的制冷能力	365
四、制冷系数	365
第二节 制冷剂与载冷剂	366
一、制冷剂	366
二、载冷剂	371
第三节 蒸汽压缩式制冷	373
一、单级蒸汽压缩式制冷	373
二、双级蒸汽压缩式制冷	373
三、串级制冷循环	374
第四节 其他制冷方法	375
一、吸收式制冷	375
二、蒸汽喷射式制冷	376
第五节 典型制冷系统简介	376
第六节 制冷机械与设备	379
一、压缩机	379
二、冷凝器	380
三、膨胀阀	382
四、蒸发器	383
五、贮液罐	385
六、气液分离器	386
七、空气分离器	386
八、油氨分离器	387
第七节 绝热材料及结构	389
一、绝热材料	389
二、防潮隔汽层	390
三、绝热结构	391
第八节 制冷机械运行与维护	393
一、制冷系统的常见故障及排除方法	393
二、制冷装置的维护和保养	395
实训 制冷设备的调试	396
思考题	400

习题	401
附录	402
附录一 常用法定计量单位	402
附录二 单位换算和物理常数	403
附录三 物理性质数据	405
附录四 型号、规格、规范	426

绪 论

教学目标

[重点掌握] 物料衡算、能量衡算、过程速率等基本概念；单位制及单位换算。

[一般掌握] 物料衡算与能量衡算的方法及步骤。

[了解] 《化工原理》课程的性质、主要内容及学习方法。

在食品、发酵、化工、制药等生产中，常需使用流体输送、传热、过滤、沉降、离心分离、混合、乳化、蒸发、结晶、冷冻浓缩、浸出、吸附、离子交换、蒸馏、吸收、萃取、干燥等操作，通常将这些相对独立的操作过程称为单元操作。多个单元操作结合，便可构成一种产品的生产过程。我们把生产中常用的单元操作理论，在实践的基础上加以概括和总结，进而应用到生产实际中去，并将其作为一门课程，称为《化工原理》。

一、《化工原理》课程的性质、内容和任务

《化工原理》是食品、发酵、化工、制药等专业的一门重要的技术基础课，它属于工程类学科，具有很强的工程性、实用性。在教学计划中，本课程起着承上启下、由理及工的桥梁作用。其内容是关于动量传递、热量传递及质量传递（简称“三传”）理论在有关单元操作中的应用。学生将从本课程开始进入专业领域的学习。本课程的主要任务是通过理论学习与技能训练，帮助学生树立牢固的工程观点，使学生了解常用单元操作的基本概念，理解常用单元操作的基本原理，掌握典型设备的组成、结构、工作原理、性能特点、操作要点及选型方法。并能灵活运用所学知识和技能分析，解决单元操作中的一般性技术问题。

二、单元操作的计算基础

1. 物料衡算

物料衡算的理论依据是质量守恒定律。在任何一个生产过程中，输入该过程的物料总质量必等于从该过程输出的物料总质量与积累于该过程中的物料质量之和，即：

$$\sum m_1 = \sum m_0 + m_A \quad (0-1)$$

式中 $\sum m_1$ ——输入物料质量的总和，kg

$\sum m_0$ ——输出物料质量的总和，kg

m_A ——积累物料量, kg

式(0-1)是物料衡算的通式。根据此式可对总物料或其中某一组分列出物料衡算式。式(0-1)既适用于间歇过程,也适用于连续过程。在连续稳定过程中,一般不考虑物料的积累,即 $m_A=0$,式(0-1)可简化为:

$$\Sigma m_i = \Sigma m_o \quad (0-2)$$

例 0-1 两股物流 a 和 b 混合后得到产品 c , 每股物流均由两个组分组成。物流 a 的质量流量为 $m_a=4\ 000\text{kg/h}$, 其中组分 1 的质量分数 $X_{a1}=70\%$; 物流 b 中组分 1 的质量分数 $X_{b1}=20\%$; 要求混合后产品 c 中组分 1 的质量分数 $X_{c1}=50\%$ 。试求:

- (1) 需要加入的物流 b 的质量流量 m_b (kg/h);
- (2) 产品量 c 的质量流量 m_c (kg/h)。

解: ①按题意, 画出混合过程的示意图, 如图 0-1 所示。标出各物流的方向、已知量与未知量, 并用闭合虚线划定衡算系统。

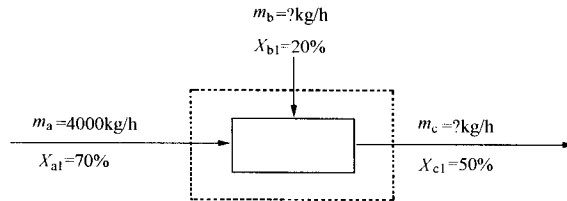


图 0-1 例 0-1 附图

②由于过程为连续稳定, 故以 1h 为衡算基准。

③列出衡算式:

总物料衡算 $m_a + m_b = m_c$, 代入已知数据得

$$4\ 000 + m_b = m_c \quad (1)$$

组分 1 衡算式 $m_a X_{a1} + m_b X_{b1} = m_c X_{c1}$, 代入已知数据得

$$4\ 000 \times 0.7 + m_b \times 0.2 = m_c \times 0.5 \quad (2)$$

联立①、②式求解得

$$m_b = 6667\text{kg/h}, m_c = 2667\text{kg/h}.$$

例 0-2 若用表 0-1 所列出的甲、乙、丙三种原料酒配制含酒精 16.0%、糖 3% 的成品酒 100kg, 问需要甲、乙、丙三种原料酒各多少?

表 0-1 甲、乙、丙三种原料酒的组成

	甲	乙	丙
含酒精/%	14.6	16.7	17.0
含糖/%	0.2	1.0	12.0

解：

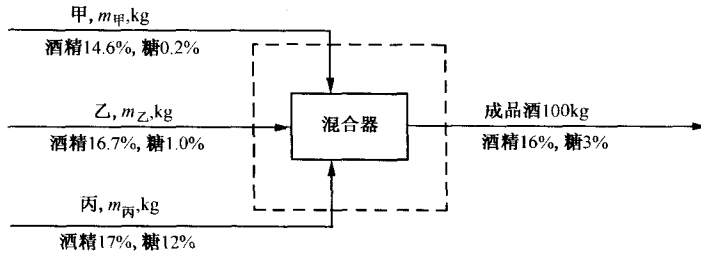


图 0-2 例 0-2 附图

如图 0-2 所示，物料衡算的基本步骤为：

以成品酒的质量 100kg 作为计算基准。

$$\text{总物料衡算：} m_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} + m_{\text{丙}} = 100 \quad \text{①}$$

$$\text{对酒精组分进行衡算：} 0.146m_{\text{甲}} + 0.167m_{\text{乙}} + 0.170m_{\text{丙}} = 0.16 \times 100 \quad \text{②}$$

$$\text{对糖组分进行衡算：} 0.002m_{\text{甲}} + 0.01m_{\text{乙}} + 0.12m_{\text{丙}} = 0.03 \times 100 \quad \text{③}$$

将①、②、③式联立求解得

$$m_{\text{甲}} = 36.31\text{kg}; m_{\text{乙}} = 42.87\text{kg}; m_{\text{丙}} = 20.82\text{kg}$$

综上所述，物料衡算的基本步骤为：

(1) 根据衡算对象，选定适当的衡算系统。衡算系统可以是一个单元设备，也可以是设备的某一部分。

(2) 根据问题的类型和性质，确定需要补充哪些数据，并设法通过各种途径获得这些数据。

(3) 用流程图表示衡算对象。画出过程框图，用进入的箭头表示输入的物料，用引出的箭头表示输出的物料。在每个箭头上注明进、出系统各物流及其组分的名称或代号、相状态、流量和组成（包括已知量和未知量，必要时将它们换算为统一单位）。

(4) 确定衡算基准。对于间歇过程，常以一次（或一批）操作为基准，即式（0-1）中各项分别代表每次操作输入、输出及积累的物料的质量；对于连续过程，则常以单位时间为基准，即式（0-1）中各项分别代表单位时间内输入、输出及积累的物料量。

(5) 作物料衡算。按划定的衡算范围，列出独立的物料衡算式。

2. 热量衡算

热量衡算的依据是能量守恒定律。热量衡算的方法与物料衡算的方法基本相同，也必须首先明确衡算范围与衡算基准，但对热量衡算还有两个值得注意的问题：

①进、出系统的各股物料所携带的热量，包括物料的显热与潜热两部分，称

为物料的焓。物料的焓值与其状态有关，而且是相对值。所以，在进行热量衡算时，为确定物料的焓值，必须首先规定基准温度。当有相变发生时，还必须规定基准状态。通常以 273K、液态为基准。本书附录中所列水蒸气的焓值是以 273K 的液体为基准求得的。例如，从附表中查得 398K 饱和水蒸气的焓值为 2 716. 5kJ/kg, 是因将 1kg 273K 的液态水加热至 398K (吸收 523. 4kJ 显热)，再令其汽化为饱和蒸汽 (吸收 2 193. 1kJ 潜热)，所吸收的总热量为 2 716. 5kJ。

②热量不仅可以随同物料进、出系统，还可以透过设备、管道的壁面而由外界传入系统，或由系统逸散到周围环境中去。因此，只要系统温度与环境温度有差别，就会有这种热量的输入或散失，应把这部分热量列入衡算式中。

于是，可写出连续稳定过程热量衡算的基本关系式，即：

$$\Sigma H_i = \Sigma H_o + Q' \quad (0-3)$$

式中 ΣH_i ——单位时间内进入系统的各股物料的总焓值

ΣH_o ——单位时间内离开系统的各股物料的总焓值

Q' ——单位时间内系统与环境交换的总热量。当系统向环境散热时，此值为正，并称为“热损失”

例 0-3 在换热器中，每小时将 950kg 平均比热容为 3. 8kJ/ (kg · K) 的某种溶液从 298K 加热至 353K。加热介质为 393K 的饱和水蒸气，消耗量为 95kg/h。蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算此换热过程的热损失占水蒸气所提供热量的百分率。

解：根据题意画出换热过程示意图，如图 0-3 所示。

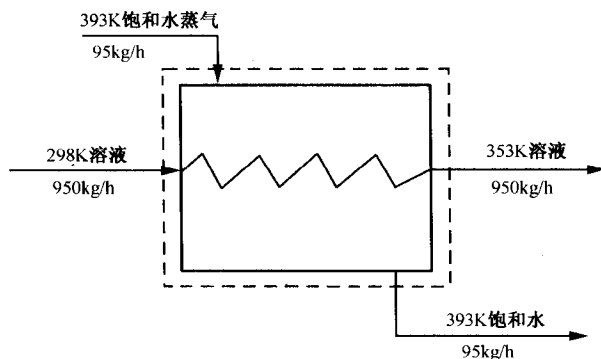


图 0-3 例 0-3 附图

划定热量衡算范围，如图中虚线方框所示。

以 1h 为计算基准，则

输入系统的溶液的焓 = $950 \times 3. 8 \times (298 - 273) = 90\ 250$ (kJ/h)

从系统输出的溶液的焓 = $950 \times 3. 8 \times (353 - 273) = 288\ 800$ (kJ/h)

由附录查得 393K 饱和水蒸气的焓值为 2 708. 9kJ/h
 393K 饱和水的焓值为 503. 67kJ/h。

输入系统的饱和水蒸气的焓 = 95 × 2 708. 9 = 257 345. 5 (kJ/h)

从系统输出的饱和水的焓 = 95 × 503. 67 = 47 848. 65 (kJ/h)

依式 (0-3) 列出热量衡算式, 即:

$$90\ 250 + 257\ 345.5 = 288\ 800 + 47\ 848.65 + Q'$$

则热损失速率 $Q' = 10\ 946.85$ (kJ/h)

$$\text{热损失百分率} = \frac{10\ 946.85}{257\ 345.5 - 47\ 848.65} \times 100\% = 5.23\%$$

例 0-4 将 2 000kg 温度为 15℃ 的液态药物引入加热锅中, 通入温度为 121℃ 的饱和水蒸气进行直接加热, 最后温度为 80℃, 若该溶液的比定压热容 $c_p = 3.6\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 求加热蒸汽的消耗量。

解:

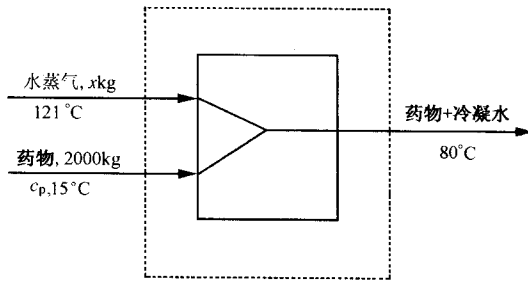


图 0-4 例 0-4 附图

如图 0-4 所示, 水蒸气冷凝时放出汽化潜热, 又降温至 80℃ 放出显热, 两步放热之和可由始、终态的焓差直接求得。查附录饱和水蒸气性质表可知, 121℃ 水蒸气的焓为 2 710. 4kJ/kg, 而 80℃ 液态水的焓为 334. 94kJ/kg。设加热蒸汽的消耗量为 $x\text{kg}$, 则

$$\text{蒸汽共放热 } Q_1 = x(2\ 710.4 - 334.94) = 2\ 375.46x \text{ (kJ)}$$

$$\text{而物料所吸热的热量 } Q_2 = 2\ 000 \times 3.6 \times (80 - 15) = 4.68 \times 10^5 \text{ (kJ)}$$

$$\text{因 } Q_1 = Q_2, \text{ 所以加热蒸汽的消耗量 } x = \frac{4.68 \times 10^5}{2\ 375.46} = 197.01 \text{ (kg)}$$

综上所述, 热量衡算的基本步骤为:

(1) 根据题意画出衡算示意图, 注明各物流的数量、组成、温度、相状态及焓值。一般热量衡算均在物料衡算的基础上进行。

(2) 确定衡算基准, 计算各物流的焓值。这里, 除确定物料衡算的基准(时间或物流量)外, 还要选择各物流组分焓的基准态。物流焓的基准态包括物