



中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 化工单元过程及操作

第二版

○ 冷士良 主编



化学工业出版社

面全以研贯林姆,林姆以殿案国(副主中厨捕平三)业专工学业业用管中改改本  
来念教育姆升世的重点重次化编题突味用意意的培养以,总主成式编用以,脚基教育姆来  
,并崇实器工向面点置又,脚基引器用等而更包材空河,相容内容致立。基特野器特  
2. 初级职业教材, 林姆以殿案国(副主中厨捕平三)业专工学业业用管中改改本

## 中等职业教育国家规划教材

全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 化工单元过程及操作

## 第二版

冷士良 主 编  
戴猷元 责任主审

余立新 作 戴猷元 审 稿

9. 王锡玉, 刘建忠, 化工基础, 北京, 化学工业出版社, 2000
10. 王锡玉, 刘建忠, 化工基础, 北京, 化学工业出版社, 2000
11. 王锡玉, 刘建忠, 化工基础, 北京, 化学工业出版社, 2000
12. 化工部人教司培训中心, 气相色谱—质谱, 北京, 化学工业出版社, 1997
13. 姚玉英, 化工原理, 天津, 天津大学出版社, 1996
14. n. r. 罗曼科夫等, 化工过程控制, 化学工业出版社, 1993
15. 化工部人教司培训中心, 加热与冷却, 北京, 化学工业出版社, 1997
16. 贾绍文, 梁斌敬, 化工传质与分离过程, 北京, 化学工业出版社, 2001
17. 陈敏恒等, 化工原理, 北京, 化学工业出版社, 1990
18. 王树德, 现代填料, 北京, 化学工业出版社, 1998
19. 化学工业部人事教育司, 化工原理, 北京, 化学工业出版社, 1996
20. 何润洪等, 化工原理, 北京, 化学工业出版社, 1998
21. 氯碱化工工人考试试题丛书编写组编, 氯碱化工工人考试试题丛书, 第一分册, 北京, 化学工业出版社, 1998
22. 谭天恩等, 化工原理, 下册, 第二版, 北京, 化学工业出版社, 1998
23. 佟玉衡编, 实用废水处理技术, 北京, 化学工业出版社, 1998
24. 邓修, 吴俊生编, 化工分离工程, 北京, 科学出版社, 2000
25. 王忠厚, 王少卿主编, 化工原理, 北京, 中国轻工业出版社, 1995
26. 薛常贵等编, 化工原理, 下册, 天津, 天津大学出版社, 1998
27. 沈晋林, 吴志泉编, 化学工业中的吸收操作——原理与应用, 上海, 华东理工大学出版社, 1998
28. 陈敏恒等, 化工原理, 北京, 化学工业出版社, 1990
29. 李德华编, 化工原理, 北京, 化学工业出版社, 1998
30. 张弓编, 化工原理, 第二版, 北京, 化学工业出版社, 2002
31. 刘盛高编, 化工基础, 北京, 化学工业出版社, 1998
32. 化学工业部人事教育司, 化学工业部教育培训中心组织编写, 结晶, 北京, 化学工业出版社, 1998
33. 丁培准, 快速, 北京, 化学工业出版社, 1999
34. 张早校等, 制冷与热泵, 北京, 化学工业出版社, 1999
35. 化学工业部人事教育司, 化学工业部教育培训中心组织编写, 制冷, 北京, 化学工业出版社, 1999
36. 冯孝路主编, 吸附分离技术, 北京, 化学工业出版社, 1998
37. 刘荣坤等, 膜分离技术, 北京, 化学工业出版社, 1998
38. 刘凡清等, 膜分离技术, 北京, 中国石化出版社, 2000
39. 王溪编, 膜分离技术, 北京, 化学工业出版社, 2000
40. 蒋建梅主编, 新型传质分离技术, 北京, 化学工业出版社, 1997
41. 张德强主编, 相界面液体萃取, 北京, 化学工业出版社, 1998
42. 张德强主编, 相界面液体萃取, 北京, 化学工业出版社, 1998
43. 叶其华编著, 化工原理, 北京, 中国石化出版社, 1998
44. 叶其华编著, 化工原理, 北京, 中国石化出版社, 1998
45. 叶其华编著, 化工原理, 北京, 中国石化出版社, 1998
46. 陈维相编著, 北京, 化学工业出版社, 1998
47. 高以超, 叶其华, 北京, 化学工业出版社, 1998
48. 刘荣坤, 陈秋林, 北京, 化学工业出版社, 1998



化学工业出版社

北京

本书为中等职业教育化学工艺专业（三年制初中生源）国家规划教材。教材贯彻以全面素质教育为基础，以应用能力为主线，以培养创新意识和实践能力为重点的当代教育理念来构建课程体系。在选择内容时，既坚持必要而够用的理论基础，又重点面向工程实际操作，同时考虑学习者未来的发展和单元操作技术的进展。

全书共 11 章。内容包括绪论、流体输送、非均相物系的分离、传热、液体蒸馏、气体吸收、固体干燥、蒸发、结晶、液-液萃取、制冷和新型单元操作简介等，可供学习者根据实际选学选用。每章设有学习目标、本章小结、思考题及习题，例题为求结合实际。

本书为中等职业学校化学工艺及相关专业的教材，也可作化工操作工培训教材。

# 化学工艺单元操作

## 第二版

主 编 冷士良

审 主 孙 贻 元 焯 藻

参 审 元 焯 藻 薛 立 余

### 图书在版编目(CIP)数据

化工单元过程及操作/冷士良主编. 全国中等职业教育教材审定委员会审定. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2007. 6

中等职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-122-00191-7

I. 化… II. 冷… III. 化工单元操作-专业学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 041885 号

责任编辑: 何 丽  
责任校对: 李 林

文字编辑: 李姿娇  
装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 1/4 字数 536 千字 2007 年 6 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

教育部“关于加快发展中等职业教育的意见”中明确指出，以科学发展观为指导，大力推动中等职业教育快速健康持续发展；经过几年的努力，到2007年，中等职业教育和普通高中教育规模大体相当，实现中等职业教育快速健康持续发展。

《化工单元过程及操作》第一版自2002年7月出版发行以来，因较好地体现了当代中职教育理念，深受广大师生及读者的欢迎，在中职教学改革及发展中发挥了明显的作用。但在使用中，也有一些读者通过电话与作者交流，对内容及编写思路提出了宝贵的意见与建议。

为了使本书内容更加科学合理、数据更加准确、更加符合中职培养目标的要求，同时又能体现当今技术的发展，特对第一版进行修订。

修订内容涉及体例、术语、符号、具体内容等方面，更正了第一版中计算数据不准确的例题，增加了一些单元操作的进展，调整了第一版中部分内容的先后顺序，补充了习题需要的数据等。

本次修订得到了江西省化工学校周国保、盐城技师学院颜廷良等多位教师的支持，在此一并感谢。

衷心期待广大读者和同仁们多提宝贵意见和建议。

编者

2007年2月

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001 年 10 月

# 第一版前言

为了适应培养跨世纪高素质化工劳动者的需要，我们以“关于全面推进素质教育深化职业教育教学改革的意见”和“关于制定中等职业学校教学计划的原则意见”为指导思想，以教育部颁发的中等职业教育“化工工艺专业（初中三年制）”教学计划为规范，以培养德智体美等全面发展，从事化工职业岗位群生产操作的高素质劳动者和化工生产、服务和技术管理的初中级专门人才为目标，以全国石油和化工教学指导委员会对《化工原理》课程改革的意见为原则，精心组织了本教材。

新教材是利用现代职业教育思想对原《化工原理》课程改革的产物，尊重学科，但不恪守学科。全书贯彻以素质教育为基础，以能力训练为主线，以培养创新意识和实践能力为重点的当代教育理念，以应用能力为主线构建课程体系。在选择内容时，既坚持必要而够用的工程基础，又重点面向工程实际，还考虑学生未来的发展和单元操作技术的进展。为了使学习者明确学习目的，在每章开始首先是学习目标，而在每章的结束提出本章注意点，用来强调本章的难点与重点，章后并配有一定的思考题与习题，使学生学以致用，复习提高。思考题以引导思考的类型为主，适当配一些直问直答的题。书中淡化了没有实用价值的推导及计算，计算以物料平衡及能量的平衡为重点，例题贴近生产实际，具有实用价值。全书把工程技术观点的培养作为重点，努力把培养用工程技术观点观察、分析和解决单元操作中的操作问题的能力落到实处。

本教材内容既涉及了化工生产中的常见单元操作，也涉及了应用不十分广泛的单元操作，还涉及了新型单元操作，并注重各单元操作的新进展。教学中各校可以根据各地区经济及学生实际选择教学内容，以体现灵活性。书中打\*的部分大纲未作要求。

本教材中，物理量的单位统一采用法定计量单位，符号采用国家标准 GB 310~3102-93。但由于本课程的符号很多，故蒸馏与吸收两章中的部分符号沿用了老教材中的符号，以便于教师教学。

本教材考虑到当前中职生源的实际状况，力求深浅适中，简单明了，层次分明，难点生动化，重点实例化，从而便于自主学习。

教材注意与本专业其他课程的分工与衔接，特别是与《单元操作实训》课程的分工，教学中，可以两门课程配合使用。

教材共分十一章，由徐州化工学校冷士良主编。绪论及第一章由冷士良编写；第二章、第三章和第六章由湖南化工学校易卫国编写；第五章、第八章、第十章和第十一章由湖北化工学校卢莲英编写；第四章、第七章和第九章由扬州化工学校夏德阳编写。全书由冷士良统稿。上海金山石油化工学校的陆小荣审阅书稿。

本书编写过程中，得到上述四所学校及领导和同行的支持，特别是徐州化工学校周立雪校长的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，不完善甚至缺点错误之处在所难免，敬请读者和同仁指正。

编者

2002年2月

# 目 录

绪论	1	应用	52
思考题	3	2.1.2 非均相物系的常见分离方法	53
<b>第1章 流体输送</b>	4	2.2 沉降	53
学习目标	4	2.2.1 重力沉降	53
1.1 概述	4	2.2.2 离心沉降	58
1.1.1 流体输送在化工生产中的应用	4	2.3 过滤	61
1.1.2 常见流体输送方式	4	2.3.1 过滤的基本知识	61
1.2 流体的物理性质	6	2.3.2 过滤设备	64
1.2.1 密度与相对密度	6	2.4 气体的其他净制方法与非均相物系分离方法的选择	67
1.2.2 压力	8	2.4.1 气体的其他分离方法与设备	67
1.2.3 黏度	9	2.4.2 非均相物系分离方案的选择	68
1.3 流体流动基本知识	10	本章小结	69
1.3.1 流量方程式	10	本章主要符号说明	69
1.3.2 稳定流动与不稳定流动	11	思考题	69
1.3.3 稳定流动系统的物料衡算——连续性方程	11	习题	70
1.3.4 稳定流动系统的能量衡算——柏努利方程	12	<b>第3章 传热</b>	71
1.3.5 流体阻力	19	学习目标	71
1.4 化工管路	21	3.1 概述	71
1.4.1 化工管路的构成与标准化	21	3.1.1 传热在化工生产中的应用	71
1.4.2 化工管路的布置与安装	29	3.1.2 稳态传热与非稳态传热	72
1.5 流体输送机械	30	3.1.3 工业换热方法	72
1.5.1 离心泵	31	3.2 传热的基本方式	73
1.5.2 其他类型泵	40	3.2.1 传导传热	73
1.5.3 往复式压缩机	43	3.2.2 对流传热	78
1.5.4 流体输送机械的进展	45	* 3.2.3 辐射传热	81
1.6 流量测量	46	3.3 间壁传热	84
1.6.1 孔板流量计	46	3.3.1 总传热速率方程及其应用	84
1.6.2 文丘里流量计	46	3.3.2 热量衡算	85
1.6.3 转子流量计	47	* 3.3.3 传热推动力的计算	87
1.7 流体输送过程的控制	47	* 3.3.4 传热系数的获取方法	92
本章小结	48	3.3.5 强化传热与削弱传热	94
本章主要符号说明	48	3.3.6 工业加热与冷却方法	97
思考题	48	3.4 换热器	99
习题	49	3.4.1 换热器的分类	99
<b>第2章 非均相物系的分离</b>	52	3.4.2 换热器的结构与性能特点	100
学习目标	52	* 3.4.3 列管换热器的选型原则	107
2.1 概述	52	3.4.4 换热器的操作与保养	111
2.1.1 非均相物系分离在化工生产中的	52	本章小结	114
		本章主要符号说明	114
		思考题	115

习题	115	5.3.4 影响吸收速率的因素	153
<b>第4章 液体蒸馏</b>	117	5.4 吸收的物料衡算	154
学习目标	117	5.4.1 全塔物料衡算	155
4.1 概述	117	5.4.2 吸收操作线	156
4.1.1 蒸馏在化工生产中的应用	117	5.4.3 吸收剂用量	156
4.1.2 精馏原理和流程	117	5.5 填料层高度的确定	158
4.2 精馏的物料衡算	119	5.5.1 填料层高度的确定原则	158
4.2.1 全塔物料衡算	119	* 5.5.2 填料层高度的确定方法	159
4.2.2 精馏段物料衡算	120	* 5.5.3 填料层高度的计算	161
4.2.3 提馏段物料衡算	121	5.6 吸收操作分析	162
4.3 塔板数的确定	123	5.6.1 影响吸收操作的因素	162
4.3.1 实际塔板数与板效率	123	5.6.2 吸收操作的特点	162
4.3.2 理论塔板数的确定原则	123	5.6.3 吸收塔的操作和调节	163
* 4.3.3 理论塔板数的确定方法	124	5.7 其他吸收与解吸	164
4.4 连续精馏的操作分析	128	5.7.1 化学吸收	164
4.4.1 进料状况对精馏操作的影响	128	5.7.2 高含量气体吸收	165
4.4.2 回流比的影响	131	5.7.3 多组分吸收	166
4.4.3 操作温度和操作压力的影响	133	5.7.4 解吸	166
* 4.5 精馏过程的热量平衡与节能	134	5.8 吸收设备	167
* 4.6 其他蒸馏方式	137	5.8.1 吸收塔	167
4.6.1 简单蒸馏	137	5.8.2 填料	169
4.6.2 闪蒸	137	5.8.3 辅助设备	171
4.6.3 特殊精馏	137	5.9 吸收与蒸馏的比较	174
4.6.4 精馏操作的进展	139	本章小结	175
4.7 精馏设备	139	本章主要符号说明	175
4.7.1 板式塔	139	思考题	175
4.7.2 辅助设备	142	习题	176
4.8 精馏塔的操作	142	<b>第6章 固体干燥</b>	178
本章小结	143	学习目标	178
本章主要符号说明	143	6.1 概述	178
思考题	143	6.1.1 干燥在工业生产中的应用及干燥方法	178
习题	144	6.1.2 对流干燥的条件和流程	179
<b>第5章 气体吸收</b>	146	6.2 湿空气的性质	180
学习目标	146	6.2.1 湿度(湿含量)	180
5.1 概述	146	6.2.2 相对湿度	180
5.1.1 气体吸收在化工生产中的应用	146	6.2.3 湿空气的比体积	181
5.1.2 气体吸收的分类	147	6.2.4 湿空气的比热容	182
5.1.3 吸收剂的选择	147	6.2.5 湿空气的焓	182
5.2 从溶解相平衡看吸收操作	148	6.2.6 干球温度	182
5.2.1 气液相平衡关系	148	6.2.7 露点	182
5.2.2 气液相平衡关系对吸收操作的意义	150	6.2.8 湿球温度	183
5.3 吸收速率	151	6.2.9 绝热饱和温度	183
5.3.1 传质基本方式	151	6.3 湿物料中水分的性质	184
5.3.2 双膜理论	152	6.3.1 物料中含水量的表示方式	184
5.3.3 吸收速率	152	6.3.2 平衡水分与自由水分	185



6.3.3 结合水分与非结合水分	185	8.2.6 升华结晶	217
6.4 干燥过程的物料衡算	186	8.2.7 熔融结晶	217
6.4.1 水分蒸发量	186	8.3 结晶设备与操作	217
6.4.2 空气消耗量	187	8.3.1 常见结晶设备	217
6.5 干燥速率	188	8.3.2 间歇结晶操作	220
6.5.1 干燥速率	188	本章小结	222
6.5.2 影响干燥速率的因素	189	思考题	222
6.5.3 干燥速率的选择	190	<b>* 第9章 液-液萃取</b>	223
6.6 干燥设备	190	学习目标	223
6.6.1 对干燥器的基本要求	190	9.1 概述	223
6.6.2 工业上常用的干燥器	190	9.1.1 萃取在工业生产中的应用	223
6.6.3 干燥器的选择	193	9.1.2 萃取剂的选择	223
6.6.4 干燥过程的操作分析	194	9.1.3 萃取操作流程	224
6.7 干燥技术及设备的进展	195	9.2 部分互溶物系的相平衡	226
本章小结	197	9.2.1 部分互溶物系的相平衡	226
本章主要符号说明	197	9.2.2 单级萃取在相平衡图上的表示	231
思考题	197	9.3 萃取设备	232
习题	197	9.3.1 塔式萃取设备	232
<b>* 第7章 蒸发</b>	199	9.3.2 萃取塔的操作	236
学习目标	199	9.4 萃取技术的进展	238
7.1 概述	199	本章小结	239
7.1.1 蒸发在工业生产中的应用	199	本章主要符号说明	239
7.1.2 单效蒸发的流程与计算	200	习题	239
7.2 多效蒸发	203	<b>第10章 制冷</b>	241
7.2.1 多效蒸发对节能的意义	203	学习目标	241
7.2.2 多效蒸发的流程	204	10.1 概述	241
7.3 蒸发设备	205	10.1.1 制冷方法	241
7.3.1 常见蒸发设备	205	10.1.2 制冷的分类	243
7.3.2 蒸发操作的要点	208	10.2 制冷基本原理	243
本章小结	209	10.2.1 压缩蒸气制冷循环	243
本章主要符号说明	209	10.2.2 制冷系数	244
思考题	210	10.2.3 操作温度的选择	245
习题	210	10.2.4 制冷剂的过冷	245
<b>* 第8章 结晶</b>	211	10.3 制冷能力	246
学习目标	211	10.3.1 制冷能力的表示	246
8.1 概述	211	10.3.2 标准制冷能力	246
8.1.1 结晶及其工业应用	211	10.4 制冷剂与载冷体	247
8.1.2 固液体系相平衡	212	10.4.1 制冷剂	247
8.1.3 晶核的形成	213	10.4.2 载冷体	248
8.1.4 晶体的成长	215	10.5 压缩蒸气制冷设备	249
8.2 结晶方法	216	10.5.1 压缩机	249
8.2.1 冷却结晶	216	10.5.2 冷凝器	249
8.2.2 蒸发结晶	216	10.5.3 节流阀	250
8.2.3 真空冷却结晶	216	本章小结	250
8.2.4 盐析结晶	216	本章主要符号说明	250
8.2.5 反应沉淀结晶	216	思考题	251

<b>* 第 11 章 新型单元操作简介</b> .....	252
学习目标 .....	252
11.1 吸附 .....	252
11.1.1 吸附原理与吸附剂 .....	252
11.1.2 吸附速率 .....	253
11.1.3 吸附工艺简介 .....	254
11.2 膜分离 .....	257
11.2.1 膜分离技术的基本原理 .....	257
11.2.2 分离膜应具备的条件及类型 .....	260
11.2.3 几种主要的膜分离过程 .....	263
11.3 超临界流体萃取技术 .....	269
11.3.1 超临界流体萃取技术的发展与特点 .....	269
11.3.2 超临界流体萃取原理 .....	269
11.3.3 超临界流体萃取过程简介 .....	270
11.3.4 超临界流体萃取的工业应用 .....	271
本章小结 .....	272
思考题 .....	273
<b>附录</b> .....	274
一、中华人民共和国法定计量单位 (摘录) .....	274
二、某些气体的重要物理性质 .....	274
三、某些液体的重要物理性质 .....	275

四、干空气的物理性质 (101.33kPa) .....	276
五、水的物理性质 .....	277
六、常用固体材料的密度和比热容 .....	278
七、饱和蒸汽 (以温度为基准) .....	278
八、饱和蒸汽 (以压力为基准) .....	279
九、某些液体的热导率 .....	282
十、某些气体和蒸气的热导率 .....	283
十一、某些固体材料的热导率 .....	284
十二、液体的黏度共线图 .....	285
十三、101.33kPa 压力下气体的黏度共线图 .....	287
十四、液体的比热容共线图 .....	288
十五、气体的比热容共线图 (101.33kPa) .....	290
十六、蒸发潜热 (汽化热) 共线图 .....	291
十七、某些有机液体的相对密度共线图 .....	293
十八、壁面污垢热阻 (污垢系数) .....	294
十九、离心泵的规格 (摘录) .....	295
二十、管壳式换热器系列标准 (摘录) .....	300
二十一、某些二元物系在 101.3kPa (绝压) 下的气液平衡组成 .....	303
二十二、热轧无缝钢管规格与质量 .....	304
二十三、冷拔无缝钢管规格与质量 .....	308
<b>参考文献</b> .....	311

四、干空气的物理性质 (101.33kPa) .....	276
五、水的物理性质 .....	277
六、常用固体材料的密度和比热容 .....	278
七、饱和蒸汽 (以温度为基准) .....	278
八、饱和蒸汽 (以压力为基准) .....	279
九、某些液体的热导率 .....	282
十、某些气体和蒸气的热导率 .....	283
十一、某些固体材料的热导率 .....	284
十二、液体的黏度共线图 .....	285
十三、101.33kPa 压力下气体的黏度共线图 .....	287
十四、液体的比热容共线图 .....	288
十五、气体的比热容共线图 (101.33kPa) .....	290
十六、蒸发潜热 (汽化热) 共线图 .....	291
十七、某些有机液体的相对密度共线图 .....	293
十八、壁面污垢热阻 (污垢系数) .....	294
十九、离心泵的规格 (摘录) .....	295
二十、管壳式换热器系列标准 (摘录) .....	300
二十一、某些二元物系在 101.3kPa (绝压) 下的气液平衡组成 .....	303
二十二、热轧无缝钢管规格与质量 .....	304
二十三、冷拔无缝钢管规格与质量 .....	308
<b>参考文献</b> .....	311

四、干空气的物理性质 (101.33kPa) .....	276
五、水的物理性质 .....	277
六、常用固体材料的密度和比热容 .....	278
七、饱和蒸汽 (以温度为基准) .....	278
八、饱和蒸汽 (以压力为基准) .....	279
九、某些液体的热导率 .....	282
十、某些气体和蒸气的热导率 .....	283
十一、某些固体材料的热导率 .....	284
十二、液体的黏度共线图 .....	285
十三、101.33kPa 压力下气体的黏度共线图 .....	287
十四、液体的比热容共线图 .....	288
十五、气体的比热容共线图 (101.33kPa) .....	290
十六、蒸发潜热 (汽化热) 共线图 .....	291
十七、某些有机液体的相对密度共线图 .....	293
十八、壁面污垢热阻 (污垢系数) .....	294
十九、离心泵的规格 (摘录) .....	295
二十、管壳式换热器系列标准 (摘录) .....	300
二十一、某些二元物系在 101.3kPa (绝压) 下的气液平衡组成 .....	303
二十二、热轧无缝钢管规格与质量 .....	304
二十三、冷拔无缝钢管规格与质量 .....	308
<b>参考文献</b> .....	311

# 绪 论

## (1) 化工生产过程

化学工业是指以工业规模对原料进行加工处理,使其发生物理和化学变化而成为生产资料或生活资料的加工业。化工生产过程是指化学工业的一个个具体的生产过程,或者简单地说,就是一个产品的加工过程。显然,化工生产过程的最明显特征或核心就是化学变化。为了使化学反应过程得以经济有效地进行,必须创造并维持适宜的条件,如一定的温度、压力、物料的组成等。因此,原料必须经过适当的预处理(前处理),以除去其中对反应有害的成分、达到必要的纯度、营造适宜的温度和压力条件;反应混合物必须经过后处理分离提纯,获得合乎质量标准的产品;在必要的情况下,未反应完的原料还必须循环利用。这些前处理、后处理主要是物理操作,发生的是物理变化。因此,化工生产过程是若干个物理过程与若干个化学反应过程的组合。对化工生产来说,研究物理变化规律同研究化学变化规律同样重要,甚至更加重要。

化学工业产品品种多,工艺更多,但基本上可用图 0-1 的框图模式来表示。在必要的时候,后处理分离出的未反应的原料应该循环利用。

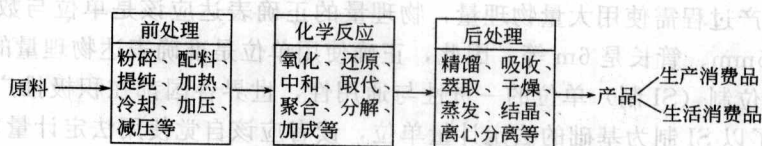


图 0-1 化工生产基本模式

化工生产的最原始原料为煤、石油、天然气、化学矿、空气和水等天然资源及农林业副产品等。化学工业的产品则涉及国民经济的各个部门,其产品与技术推动了世界经济的发展和人类社会的进步,提高了人民的生活质量与健康水平。化工生产的主要特点是原料来源丰富,生产路线多,技术含量高,经常涉及有毒、有害、易燃、易爆等物料,需要高温、高压、低温、低压等条件。因此,化学工业也带来了生态、环境及社会安全等问题。在 21 世纪,化工生产必须不断采用新的工艺、新的技术,提高对原料的利用率,消除或减少对环境的污染,实现可持续发展。

## (2) 化工单元操作

如前所述,一个化工产品的生产需经过若干个物理过程与若干个化学反应过程。经过长期的实践与研究,人们发现,尽管化工产品千差万别,生产工艺多种多样,但生产这些产品的过程所包含的物理过程并不是很多,而是很相似的。例如,流体输送不论用来输送何种物料,其目的都是输送流体;加热与冷却都是为了得到需要的温度;分离提纯都是为了得到指定浓度的混合物等。人们把这些包含在不同化工产品生产过程中、发生同样的物理变化、遵循共同的规律、使用相似的设备、具有相同作用的基本物理操作,称为单元操作。人们所熟知的单元操作有流体流动与输送、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、沉降、过滤、离心分离、静电除尘、湿法除尘等。近年来一些新的单元操作,如吸附、膜分离、超临界萃取、反应与分离耦合等,也得到了越来越广泛的应用。

根据前面的分析,不难看出,一个化工产品的生产过程是若干个单元操作与若干个单元反

应的组合,但在不同的化工产品生产过程中,单元操作有其独特的条件与要求。显然,研究单元操作对于化工生产的进步是重要与必要的。

### (3) 本课程的研究对象、性质、任务与内容

《化工单元过程及操作》是一门技术性、工程性及应用性都很强的专业课程,是构造从事化工职业岗位群生产操作的高素质劳动者和化工生产及技术管理的初、中级专门人才知识结构、素质结构与能力结构的必修课,是培养学生工程技术观点与化工基本实践技能的重要课程。它以化工生产过程作为研究对象,主要研究化工单元操作过程规律在化工生产中的应用,使学生熟练掌握常见的化工单元操作的基本知识与基本技能,初步形成用工程观点观察问题、分析问题、处理操作中遇到的问题的能力,树立良好的职业意识和职业道德观念,为学生学习后续专门课程及将来从事化工生产、技术、管理和服务工作做准备,为提高职业能力打下基础。

《化工单元过程及操作》课程的任务是使学生获得常见化工单元操作过程及设备的基础知识、初步计算能力和基本操作技能,得到用工程技术观点观察问题、分析问题和解决常见操作问题的训练,初步树立创新意识、安全生产意识、质量意识和环境保护意识,并了解新型单元操作在化工生产中的应用。

《化工单元过程及操作》的主要内容是流体流动与输送、传热、非均相物系分离、蒸馏、吸收等常见化工单元操作,也涉及一些应用相对较少的单元操作及新型单元操作。

### (4) 单位的正确使用

描述化工生产过程需使用大量物理量,物理量的正确表达应该是单位与数字统一的结果。例如,管径是 25mm、管长是 6m 等。因此,正确使用单位是准确表达物理量的前提。

由于国际单位制(SI制)单位的一贯性与通用性,世界各国都在积极推广 SI 制,我国也于 1984 年颁发了以 SI 制为基础的法定计量单位,读者应该自觉使用法定计量单位。

但是,由于数据来源不同,常常会出现单位不统一或不符合公式需要的情况,这就必须进行单位换算。本课程涉及的公式有两种:一种是物理量方程;另一种是经验公式。前者具有严格的理论基础,要么是某一理论或规律的数学表达式,要么是某物理量的定义式,例如  $p=F/A$  这类公式中各物理量的单位只要统一采用同一单位制下的单位就可以了;而后者则是由特定条件下的实验数据整理得到的,经验公式中物理量的单位均为指定单位,使用时必须采用指定单位,否则公式就不成立了。如果想把经验公式计算出的结果换算成 SI 制单位,最好的办法就是先按经验公式的指定单位计算,最后再把结果转换成 SI 制单位,不要在公式中换算。

单位换算是通过换算因子来实现的,换算因子就是两个相等量的比值。例如,  $1\text{m}=100\text{cm}$ ,当需要把 m 换算成 cm 时,换算因子为  $\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}$ ,当需要把 cm 换算成 m 时,换算因子为  $\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}$ 。在换算时只要用原来的量乘上换算因子,就可以得到期望的单位。

**【例 0-1】** 一个标准大气压 (1atm) 等于  $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ , 等于多少帕 (Pa)?

**解**  $1\text{atm}=1.033\text{kgf}/\text{cm}^2=1.033\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\left(\frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}}\right)\left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}\right)^2=1.013\times 10^5\text{Pa}$

可见,当多个单位需要换算时,只要将各换算因子相乘即可。

**【例 0-2】** 三氯乙烷的饱和蒸气压可用经验公式  $\lg p^\circ = \frac{-1773}{T} + 7.8238$  计算(式中,  $p^\circ$  为饱和蒸气压, mmHg;  $T$  为三氯乙烷的温度, K), 试求 300K 时三氯乙烷的饱和蒸气压为多少帕。

解 将流体的温度  $T=300\text{K}$  代入公式得

$$\lg p^\circ = \frac{-1773}{T} + 7.8238 = \frac{-1773}{300} + 7.8238 = 1.9138$$

因此  $p^\circ = 81.9974\text{mmHg}$  (注意: 此处只能是 mmHg, 而不能是 Pa)  
 $= 81.9974 \times 133.3\text{Pa} = 10.93\text{kPa}$

请读者用两种方法计算当三氯乙烷的饱和蒸气压为  $10.93\text{kPa}$  时, 三氯乙烷的温度是多少。第一种方法是将  $10.93\text{kPa}$  直接代入上面的公式, 第二种方法是将  $10.93\text{kPa}$  换算成 mmHg 后代入上面的公式。比较两种方法的结果, 判断哪一种算法正确。

### (5) 学习建议

在学习本课程之前, 建议组织一次单元操作认识实习, 使学生形成对化工生产的整体认识, 了解化工生产在国民经济中的地位, 初步认识化工生产中的单元操作, 认识到单元操作在化工生产中的地位与作用, 从而激发学生学习本课程的兴趣, 为学好本课程奠定基础。

实习可以采用多种多样的办法: ①到工厂去, 在生产现场边参观边听技术人员的介绍。此法真实感强, 有利于学生获得真实可信的现场感受, 但生产现场声音嘈杂、时间短, 不一定能面向全体学生, 如果人数少、指导人员多, 则能达到更好的效果。②在校内实训基地实习, 有条件的学校可以在单元操作训练室或实训工厂内实习。虽然与工厂的生产实际有一定的差距, 但只要安排合理、指导到位, 也可以达到实习目的。③通过多媒体工具实现, 比如可以观看化工生产的录像或多媒体软件、化工仿真等。三种方法各有优劣, 也可以同时采用, 以提高实习效果, 真正达到认识单元操作的目的。

## 思考题

1. 试分析学习单元操作对化工生产有何意义, 举例说明。
2. 对经验公式来说, 指定单位意味着什么?

# 第1章 流体输送

## 学习目标

• 了解：流体的主要特征，气体与液体的异同点；静压力在化工生产中的作用；黏性与黏度的概念；稳定流动与不稳定流动；流量方程式的应用；内能、静压能、动能、位能及压头的概念；柏努利方程的内容及其在流体输送中的应用；流体阻力及其产生的根本原因；层流和湍流的特点；流量测量对化工生产的意义；化工生产中流体输送的方法；流体输送机械的作用、类型与特点；离心泵的主要性能、性能曲线及密度、黏度、转速等对其性能的影响；气缚、汽蚀现象产生的原因；往复式压缩机的构造、工作过程与特点；化工管路的构成、材质、保温、涂色、布置、补偿、安装的原则。

• 理解：温度、压力对密度与相对密度、黏度的影响；流量、流速、流通截面积的相互关系；连续性方程；静止流体中压力的变化规律；转子、孔板、文丘里等流量计的工作原理；流体物性、流动条件、流速等变化对阻力的影响。

• 掌握：转子、孔板、文丘里等流量计的使用要点；密度、压力、黏度、流量的获得方法；压力的正确表示与单位换算；液位测量、液封高度确定、分层器控制等方法；流动形态的判定方法；化工管路拆装方法；避免气缚、汽蚀现象发生的方法；离心泵的使用与维护要点；往复式压缩机的操作规程与维护要点。

## 1.1 概述

### 1.1.1 流体输送在化工生产中的应用

流体即可以流动的物体，包括可压缩的气体和难以压缩的液体。其共同特点是在外力作用下易于变形、具有流动性、没有固定形状，同时，当流体与界面物之间或自身各部分之间存在相对运动的趋势或发生相对运动时，会产生与之对抗的摩擦力。其不同之处在于两者的可压缩性不同及因此带来的其他不同，但研究表明，在声速以下，气体表现出与液体相同的规律，因此可以一起讨论。

化工生产中所涉及的物料有很多都是流体，一方面，由于生产工艺的要求，常常需要将这些物料从一个设备输送到另一个设备，从一个车间输送到另一个车间；另一方面，化工生产中的传热、传质及化学反应过程多数都是在流体流动的条件下进行的，流体的流动状况对这些过程的动力消耗、设备投资有着巨大的影响，直接关系到化工产品的成本与经济效益。因此，流体输送对于保证工艺任务的完成及提高化工过程的速率和效率都是十分重要的。

### 1.1.2 常见流体输送方式

为了完成生产工艺要求的流体输送任务，并做到科学合理有效，流体输送可以从生产实际出发，采取不同的输送方式。

#### 1.1.2.1 高位槽送料

化工生产中，各容器、设备之间常常会存在一定的位差，当工艺要求将处在高位设备内的液体输送到低位设备内时，可以通过直接将两设备用管道连接的办法实现，这就是所谓的高位槽送料。另外，在要求特别稳定的场合，也常常设置高位槽，以避免输送机械带来的波动。如

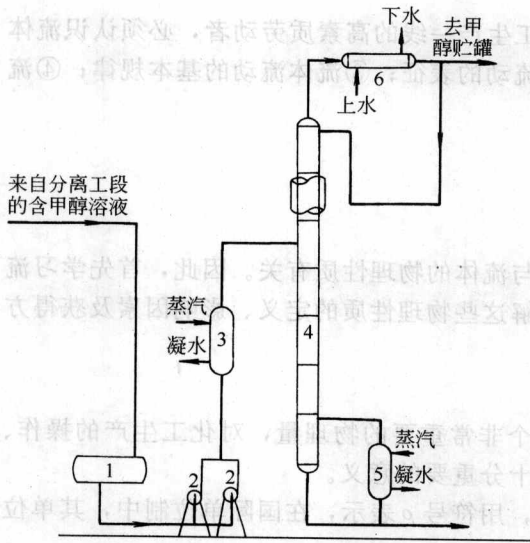


图 1-1 甲醇回收方案流程图

1—原料贮槽；2—进料泵；3—预热器；  
4—脱甲醇塔；5—再沸器；6—冷凝器

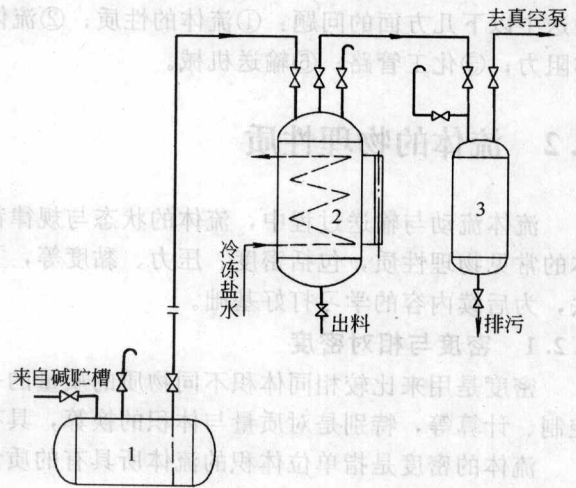


图 1-2 真空抽送烧碱示意图

1—烧碱中间槽；2—烧碱高位槽；3—真空汽包

图 1-1 所示，脱甲醇塔的回流就是靠高位的塔顶冷凝器来维持的。高位槽送液时，高位槽的高度必须能够保证输送任务所要求的流量。

#### 1.1.2.2 真空抽料

真空抽料是指通过真空系统造成的负压来实现流体从一个设备到另一个设备的操作。如图 1-2 所示，糖精车间将烧碱送到高位槽内就是用真空抽送的办法，先将烧碱从碱贮槽放入烧碱中间槽 1 内，然后通过调节阀门，利用真空系统产生的真空将烧碱吸入高位槽 2 内。

真空抽料是化工生产中常用的一种流体输送方法，其结构简单，操作方便，没有动件，但流量调节不方便，需要真空系统，不适于输送易挥发的液体。主要用在间歇送料的场合，在精细化率越来越高的今天，真空抽料的用途也越来越广泛。

在连续真空抽料时（例如多效并流蒸发中），下游设备的真空度必须满足输送任务的流量要求，还要符合工艺条件对压力的要求。

#### 1.1.2.3 压缩空气送料

采用压缩空气送料也是化工生产中常用的方法。例如酸贮槽，如图 1-3 所示，先将贮槽中的酸放入容器，然后通入压缩空气，在压力的作用下，将酸输送至目标设备。这种方法结构简单，无动件，可间歇输送腐蚀性大及易燃易爆的流体，但流量小且不易调节，只能间歇输送流体。

压缩空气送料时，空气的压力必须满足输送任务对升扬高度的要求。

#### 1.1.2.4 流体输送机械送料

流体输送机械送料是指借助流体输送机械对流体做功，实现流体输送的操作。由于输送机械的类型多，压头及流量的可选范围宽且易于调节，因此该方法是化工生产中最常见的流体输送方法，如图 1-1 所示。

用流体输送机械送料时，流体输送机械的型号必

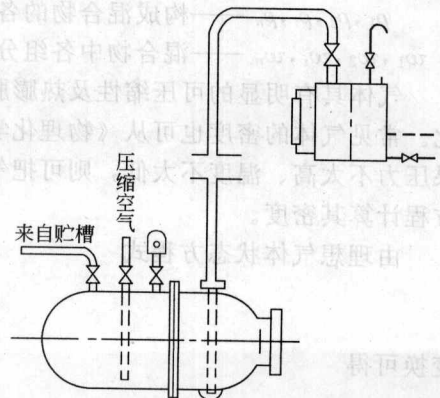


图 1-3 酸贮槽送酸示意图

须满足流体性质及输送任务的需要。

通过对以上输送方式的分析可以看出,作为化工生产一线的高素质劳动者,必须认识流体输送中以下几方面的问题:①流体的性质;②流体流动的特征;③流体流动的基本规律;④流体阻力;⑤化工管路;⑥输送机械。

## 1.2 流体的物理性质

流体流动与输送过程中,流体的状态与规律都与流体的物理性质有关。因此,首先学习流体的常见物理性质,包括密度、压力、黏度等,了解这些物理性质的定义、影响因素及获得方法,为后续内容的学习打好基础。

### 1.2.1 密度与相对密度

密度是用来比较相同体积不同物质的质量的一个非常重要的物理量,对化工生产的操作、控制、计算等,特别是对质量与体积的换算,具有十分重要的意义。

流体的密度是指单位体积的流体所具有的质量,用符号 $\rho$ 表示,在国际单位制中,其单位是 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

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

式中  $m$  ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$  ——流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

任何流体的密度都与温度和压力有关。但压力的变化对液体密度的影响很小(压力极高时除外),故称液体是不可压缩的流体。工程上,常忽略压力对液体的影响,认为液体的密度只是温度的函数。例如,纯水在 $277\text{K}$ 时的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,在 $293\text{K}$ 时的密度为 $998.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,在 $373\text{K}$ 时的密度为 $958.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此,在检索和使用密度时,需要知道液体的温度。对大多数液体而言,温度升高,其密度下降。

液体纯净物的密度通常可以从《物理化学手册》或《化学工程手册》等中查取。液体混合物的密度通常由实验测定,例如比重瓶法、韦氏天平法及波美度比重计法等,其中,前两者用于精确测量,多用于实验室中;后者用于快速测量,在工业上广泛使用。

在工程计算中,当混合前后的体积变化不大时,液体混合物的密度也可以由下式计算:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_i}{\rho_i} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-2)$$

式中  $\rho$  ——液体混合物的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_1, \rho_2, \rho_i, \rho_n$  ——构成混合物的各纯组分的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$w_1, w_2, w_i, w_n$  ——混合物中各组分的质量分数。

气体具有明显的可压缩性及热膨胀性,当温度、压力发生变化时,其密度将发生较大的变化。常见气体的密度也可从《物理化学手册》或《化学工程手册》中查取。在工程计算中,如果压力不太高、温度不太低,则可把气体(或气体混合物)视作理想气体,并由理想气体状态方程计算其密度。

由理想气体状态方程式

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

变换可得

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$



式中  $\rho$  ——气体在温度  $T$ 、压力  $p$  条件下的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$V$  ——气体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$p$  ——气体的压力,  $\text{kPa}$ ;

$T$  ——气体的温度,  $\text{K}$ ;

$m$  ——气体的质量,  $\text{kg}$ ;

$M$  ——气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{kmol}$ ;

$R$  ——通用气体常数, 在 SI 制中,  $R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

如果是气体混合物, 式(1-3) 中的  $M$  用气体混合物的平均摩尔质量  $M_m$  代替。平均摩尔质量由下式计算:

$$M_m = M_1\varphi_1 + M_2\varphi_2 + \cdots + M_i\varphi_i + \cdots + M_n\varphi_n = \sum_{i=1}^n M_i\varphi_i \quad (1-4)$$

式中  $M_1, M_2, M_i, M_n$  ——构成气体混合物的各纯组分的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{kmol}$ ;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_i, \varphi_n$  ——混合物中各组分的体积分数。理想气体的体积分数等于其压力分数, 也等于其摩尔分数。

或者由

$$\frac{pV}{T} = \frac{p^\ominus V^\ominus}{T^\ominus}$$

两边同除质量  $m$ , 得

$$\rho = \rho^\ominus \frac{pT^\ominus}{p^\ominus T} \quad (1-5)$$

式中的上标“ $\ominus$ ”表示标准状况, 即  $273\text{K}$ 、 $101.325\text{kPa}$ 。

由于  $1\text{kmol}$  理想气体在标准状况下的体积是  $22.4\text{m}^3$ , 所以理想气体在标准状况下的密度为

$$\rho^\ominus = \frac{M}{22.4} \quad (1-6)$$

当混合物中各纯组分的密度已知时, 还可以根据混合前后质量不变的原则, 用下式计算混合物的密度:

$$\rho = \rho_1\varphi_1 + \rho_2\varphi_2 + \cdots + \rho_i\varphi_i + \cdots + \rho_n\varphi_n = \sum_{i=1}^n \rho_i\varphi_i \quad (1-7)$$

**【例 1-1】** 用圆柱形贮槽贮存 8% 的  $\text{NaOH}$  水溶液, 已知贮槽的底面直径是  $6\text{m}$ 。现因工艺需要, 需将  $30\text{t}$  该碱液从贮槽打到指定设备内, 问贮槽的液位计读数将下降多少? 已知在当时条件下, 该碱液的密度是  $1061\text{kg}/\text{m}^3$ 。

解 设贮槽的液位计读数将下降  $h(\text{m})$ , 则由

$$\frac{\pi}{4} D^2 h \rho = m$$

得

$$h = \frac{m}{\frac{\pi}{4} D^2 \rho} = \frac{30 \times 1000}{\frac{\pi}{4} \times 6^2 \times 1061} = 1\text{m}$$

**【例 1-2】** 已知甲醇水溶液中各组分的质量分数分别为: 甲醇  $0.9$ 、水  $0.1$ 。试求该溶液在  $293\text{K}$  时的密度。

解 混合液的密度可以用  $\frac{1}{\rho} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2}$  计算, 已知  $w_1 = 0.9$ ,  $w_2 = 0.1$ ; 查附录十七得  $293\text{K}$  时甲醇的密度为  $791\text{kg}/\text{m}^3$ ; 查附录五得  $293\text{K}$  时水的密度为  $998.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。所以