

全国高职高专**石油化工类专业**“十二五”规划教材

□ □ □ □ □ □

免费提供电子教案

化工单元过程 及设备

HUAGONG DANYUAN GUOCHENG JI SHEBEI

丁玉兴 主编

方绍燕 副主编



化学工业出版社

全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材

化工单元过程及设备

丁玉兴 主编
方绍燕 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书以石油化工企业生产过程中最典型的单元操作过程为依据,精选了八个典型化工单元操作,即流体输送、传热、非均相物系分离、溶液的蒸馏、气体吸收、固体湿物料的干燥、物料的萃取和溶液的蒸发。在每个单元操作中以一种典型工艺过程为载体,分别介绍了该单元操作过程的基本原理、设备结构、工艺计算和设备的启动、运行维护、停止及事故处理的基本操作技术,并在基础知识和知识拓展中讲述了操作中必需够用的理论知识和跨专业的拓展知识。

本书适合作为高等职业院校石油化工相关专业教材,也可供生物工程、制药、材料、冶金、环保、食品等相关专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元过程及设备/丁玉兴主编. —北京:化学工业出版社, 2011.8

全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-11940-7

I. 化… II. 丁… III. ①化工单元操作-高等职业教育教材②化工设备-高等职业教育-教材 IV. ①TQ02②TQ05

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第147777号

责任编辑: 窦臻 张双进 提岩
责任校对: 宋玮

文字编辑: 刘砚哲
装帧设计: 王晓宇

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张23¼ 字数617千字 2011年9月北京第1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: 43.00 元

版权所有 违者必究

全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材

编审委员会

主任 曹克广

副主任 陈炳和 潘正安 张方明 徐继春 杨永杰

秘书长 温守东

委员 (按姓氏汉语拼音排列)

曹克广	陈炳和	丁玉兴	方绍燕	冯文成
甘黎明	康明艳	郎红旗	冷士良	李晓东
李 勇	李志贤	刘建成	刘琼琼	刘耀鹏
刘振河	卢永周	马长捷	潘正安	齐向阳
尚秀丽	沈发治	孙乃有	索陇宁	王芳宁
王 伟	王英健	温守东	徐继春	徐忠娟
杨兴锴	杨永杰	尹兆明	张方明	郑哲奎

序

高等职业教育是随着社会经济的发展而逐步成熟起来的现代高等教育形式。经过 20 多年的实践和建设，特别是近十年随着我国教育的不断深入，高等职业教育发展迅速，已经发展成为一种重要的教育类型，进入到一个新的发展阶段，为我国经济建设培养了一批急需的技术应用型人才和高技能型人才。

石油化学工业是基础性产业，它为农业、能源、交通、机械、电子、纺织、轻工、建筑、建材等工农业和人民生活提供配套和服务，是化学工业的重要组成部分，是国民经济最重要的支柱产业之一，关系到国家的经济命脉和能源安全，在国民经济、国防建设和社会发展中具有极其重要的地位和作用。世界经济强国无一不是石油化工工业强国。近年来，我国石油化学工业发展迅速，2010 年全行业总产值已位居世界第二位，仅次于美国。石油化学工业规模的扩大和技术水平的提高，对石油化工类的专业技术人才培养提出了新的要求，需要我们高等职业院校为之培养一大批实用型、操作型技术应用人才，这不仅为我们石油化工类高职院校的大力发展提供了良好机遇，更是对我们提出了更高的要求和挑战。

然而我们也清醒地认识到高职高专院校所培养的人才与行业企业的需求还存在一定的偏差。虽然很多学校校园面积、建筑面积、教学仪器设备、图书等硬件办学条件得到大大改善，一批院校形成了相当优质的教学资源，为培养高素质、高水平的人才奠定了物质基础。但是影响教学质量提高的核心——专业建设、课程建设这些软件条件却不能完全满足人才培养的需要，其中作为课程建设和专业建设重要内容的教材建设滞后于高等职业教育发展的步伐，是造成这种偏差的直接原因之一。教材是教学思想与教学内容的重要载体，是教学经验的结晶，体现了教学方式与方法，也是提高教育教学质量的重要保证，具有广泛的辐射和带动作用。教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》（教高【2006】16 号）明确提出要“加强教材建设，重点建设好 3000 种左右国家规划教材，与行业企业共同开发紧密结合生产实际的实训教材，并确保优质教材进课堂。”纵观目前我国高职高专石油化工类专业教材建设主要存在：教材缺乏系统性，落后于教育教学改革；内容陈旧，先进性与针对性不强；缺乏以能力培养为核心的特色专业教材；没有形成高水平教材编写团队，编写人员实践经验缺乏，未能体现“工学结合”、“校企合作”的职业教育理念和“工作过程系统化”、“教学做一体”、“项目导向、任务驱动”等先进教学模式；教材没有立体化的教学资源相配套等问题。

为了适应我国高职高专石油化工类专业教学的需要，在总结近十年高职高专教学改革成果的基础上，组织建设一批满足我国石油化工行业高技能人才培养需要的高质量规划教材不仅必要而且非常迫切。因此，教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会、中国化工教育协会全国化工高等职业教育教学指导委员会联合化学工业出版社共同规划并组织了“全国高职高专石油化工类专业‘十二五’规划教材”。为保证本套规划教材编写工作有序高效和教材编写质量，教指委在广泛调研的基础上组织有关专家就教材建设方案进行了研讨，提出规划教材的建设原则与要求；出版社依据此编写原则与要求组织全国石油化工高职高专院校专业老师进行教材编写项目的申报，公开征集编写方案；并在教指委的指导下组织了高职教育领域的课程专家按照“工学结合，理论实践一体化设计思想”的教材建设评审标准，对申报的编写方案进行了答辩，最终在全国范围内遴选出 16 所院校从事石油化工职业教育的优

秀骨干教师编写这套规划教材。并在教指委的领导下成立了“全国高职高专石油化工类专业‘十二五’规划教材编审委员会”。

这套规划教材主要体现了如下特色：

1. 坚持理论实践一体化，避免了理论与实践相隔离的现象。重在基本概念的阐释、科学方法的结论和理论的应用方面，减少大篇幅的理论阐述和推导过程。教材编写符合高职高专学生实际，充分考虑学生学习能力之特长。

2. 以学生能力培养为核心，与“工学结合”、“校企结合”等先进教育模式相适应。

3. 以当前高职教育的课程改革为基础，突出教材编写体系的创新性，同时注意把握创新教材的通用性，便于教师的教学设计，教材的结构安排、编排方式，符合教师教学的需要和学生学习的需要。

4. 反映了生产实际中的新技术、新工艺、新方法、新设备、新规范和新标准，基本保证了教学过程与生产一线的技术同步。

5. 立体化教学资源配套齐全。本套规划教材均配有供教师使用的电子课件、课程标准、习题解答等教学资源。

本套教材根据教育部教高[2006]16号文件的精神，吸收了先进的高职高专教育教学改革理念，特别是石油化工、炼油等专业国家示范性高等职业院校建设的成果，汇集了全国众多石油化工类院校优秀教师的教学经验，也得到了行业企业专家、相关院校的领导和教育教学专家的指导与大力支持。相信它的出版不但能够满足高职高专当前石油化工类专业教学的需要，并且对于该类专业的课程建设与改革也能起到一定的示范和引领作用，对于提高职业教育教学质量将起到积极的推动作用。

总之，希望通过我们的工作能够为我国的高职高专教育工作和石油化学工业的发展贡献绵薄之力。在此向所有积极参与本套规划教材建设及给予热情支持的领导、专家和教师们表示衷心的感谢！殷切期望广大读者提出宝贵意见和建议！

曹克广

2011年7月

前 言

为适应培养化工生产第一线高素质技能型岗位专门人才的要求，编者对石油化工生产企业工艺操作工的典型工作任务进行了详细分析，作了教学化处理，设计了学习情境，编写出这本理论与实践一体化的工学结合教材。

本教材以石油化工企业生产现场装置的工艺操作为依据，精选了典型的单元操作过程作为教学的主体内容，并以具体的产品生产过程为载体介绍最典型化工单元操作的基本原理、过程描述、典型设备结构、设备操作与维护技术等。

本教材在编排顺序上既考虑了化工产品生产过程的逻辑规律，又考虑了学生们的认知规律。依此，安排了流体输送、传热、非均相物系分离、溶液的蒸馏、气体吸收、固体湿物料的干燥、物料的萃取和溶液的蒸发八个学习情境，每个学习情境分解为若干学习任务，内容包括生产案例、工艺参数确定、工艺操作和设备维护等。

本书在每个“学习任务”中明确了必须掌握的技能 and 知识；在“操作技能”中给出基本操作技能要求和操作顺序要求，作为学生行动领域工作的指导性操作规程；在“基础知识”中比较完整、系统地阐述了完成工作任务必须具备的基础理论知识，理论知识以必需够用为度；在“知识强化”中提供了完成工作任务过程中必须特别注意的关键点，或易出现误操作的环节，以一问一答的形式讲清为什么，挖掘理论根据，强化理论与实践的紧密结合。本书注重实践操作技能，理论突出重点和难点，内容上注意引入本领域中的新工艺和新技术，体现创造型和应用型人才培养的要求。本书有配套 PPT 课件，欢迎广大师生登陆 www.cipedu.com.cn 下载。授课教师可联系 ciphge@163.com 索取其他辅助教学资料。

本书由承德石油高等专科学校丁玉兴主编，山东胜利职业学院方绍燕副主编。参加编写工作的有山东科技职业学院任庚清，陕西国防工业职业技术学院张郢峰、宋桂贤，延安职业技术学院武存喜、张欢，天津职业大学胡兴兰，天津渤海职业技术学院孙玉春和天津石油职业技术学院刘凤花。其中流体输送、溶液的蒸馏由丁玉兴编写，传热和气体吸收由方绍燕编写，固体物料的干燥由任庚清和刘凤花编写，溶液的蒸发由张郢峰编写，溶液的萃取由宋桂贤编写，非均相物系分离由武存喜和张欢编写，绪论由胡兴兰编写，附录由孙玉春编写。徐州工业职业技术学院冷士良教授、扬州工业职业技术学院徐忠娟副教授对本书进行了审阅，并提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，难免存在不妥之处，敬请应用此书的同仁及读者指正。

编 者
2011 年 6 月

目 录

绪论	1	小结	4
一、本课程的性质、内容和任务	1	思考题	4
二、单元操作中常用的两个基本概念	1	练习题	5
三、物理量的单位及单位换算	3		
情境一 流体输送	6		
任务一 流体输送管路的认识	6	操作技能：管路拆装能力训练	42
操作技能：化工管路连接	6	一、训练目的	42
一、管路的连接方式	6	二、工具准备	42
二、化工管路的使用与防护	7	三、仪器设备、材料准备	42
流体输送案例分析	8	四、训练内容	43
基础知识（一）：流体输送管路及基本 构成	9	五、训练装置	43
一、管路的构成及标准化	9	六、安装注意事项	43
二、化工管材	11	七、管路常见故障及处理方法	44
三、管路布置与安装的一般原则	12	知识强化	45
四、管路安装前的准备	13	任务四 离心泵的操作	46
五、管路安装验收	13	操作技能：离心泵的试车与操作	46
基础知识（二）：流体力学基础	14	一、离心泵的试车	46
一、流体力学涉及的主要物理量	14	二、操作要点	47
二、静止流体的基本规律	17	三、日常运行与维护	47
三、流体流动的基本规律	21	基础知识：离心泵的运行与调节	47
四、流体系统中的能量衡算——柏努 利方程	23	一、流量调节	47
五、流体流动时阻力的计算	27	二、离心泵的串、并联操作	50
知识强化	29	知识强化	51
任务二 离心泵的选择	30	任务五 离心泵故障分析及排除	52
操作技能：离心泵的选用	30	操作技能：离心泵的操作及故障排除	53
一、离心泵的型号	30	一、离心泵性能测试实验操作步骤	53
二、离心泵的选用步骤	31	二、离心泵的故障原因及处理基本 方法	53
基础知识：离心泵的构造及特性	31	基础知识：其他类型泵及风机	54
一、离心泵的结构及工作原理	31	一、往复泵	54
二、离心泵的主要部件	32	二、齿轮泵	57
三、离心泵的能量方程	33	三、螺杆泵	57
四、离心泵的主要性能参数	36	四、旋涡泵	58
五、离心泵特性曲线	37	五、轴流泵	58
六、影响离心泵特性曲线的主要 因素	38	六、离心式通风机	59
七、汽蚀现象与安装高度	39	七、鼓风机	62
知识强化	41	八、真空泵	62
任务三 流体输送管路的安装	42	知识强化	63
		练习题	64

情境二 传热	66
任务一 列管式换热器结构的认识	66
操作技能：列管式换热器构造认识	66
一、列管式换热器结构	66
二、列管式换热器热胀补偿装置	67
传热过程案例分析	68
一、传热过程在化工生产中的应用	68
二、传热过程案例	69
基础知识（一）：工业换热方法概述	70
一、工业换热方法	70
二、常用的加热剂与冷却剂	71
三、稳定传热与非稳定传热	72
四、传热的基本方式	72
基础知识（二）：热传导过程原理	72
一、傅立叶定律	72
二、热导率	73
三、通过平壁的热传导	74
四、通过圆筒壁的稳定热传导	76
知识强化	79
任务二 换热过程热量计算	80
操作技能：换热器的清洗	80
一、化学清洗（酸洗法）	80
二、机械清洗	81
三、高压水清洗	81
四、海绵球清洗	81
基础知识（一）：对流传热原理	81
一、对流传热分析	81
二、对流传热速率方程和对流传热系数	82
基础知识（二）：传热过程计算	83
一、热量衡算	83
二、总传热速率微分方程	84
三、总传热系数	85
四、传热平均温度差	88
情境三 非均相物系分离	130
任务一 重力沉降分析	130
操作技能：降尘室结构及操作	130
非均相物系分离案例	132
基础知识：重力沉降	133
一、重力作用下的沉降速度	133
二、阻力系数	134
知识强化	137
任务二 旋风分离分析	138
操作技能：旋风分离器的结构与操作	138
基础知识：离心沉降	139
一、离心沉降速度	139
二、旋风分离器的性能参数	139
知识强化	141
任务三 板框过滤机的操作	143
操作技能：板框过滤机的操作	143
一、板框压滤机结构	143
二、板框式过滤机的操作注意事项	145
三、板框过滤机常见故障处理	145
基础知识：过滤	145
一、概述	146
二、过滤操作中液体通过颗粒层的流动	147
五、传热计算举例	92
知识强化	95
任务三 列管式换热器选型	98
操作技能：列管式换热器的选型	98
一、列管式换热器的系列标准	98
二、列管式换热器选型时需考虑的问题	99
三、列管式换热器选型的一般步骤	101
基础知识：对流传热系数经验关联式	102
一、影响对流传热系数的因素	102
二、对流传热系数经验公式的建立	102
三、流体无相变时的对流传热	103
四、蒸汽冷凝时的对流传热系数	109
知识强化	111
任务四 换热器操作	113
操作技能：换热器的操作	113
一、换热器的正确操作	113
二、操作注意事项	113
基础知识：辐射传热	114
一、热辐射的基本概念	114
二、物体的辐射能力	115
三、两固体间的辐射传热	117
四、对流和辐射的联合传热	119
知识强化	120
任务五 换热器故障分析及处理	121
操作技能：换热器的故障处理	121
一、列管式换热器的维护和保养	121
二、板式换热器的维护和保养	121
三、列管式换热器的常见故障与处理	122
基础知识：其他类型间壁式换热器	122
知识强化	126
练习题	127

三、过滤方程式	147	知识强化	153
四、其他过滤机的构造和操作	151	练习题	154
情境四 溶液的蒸馏			156
任务一 蒸馏过程及板式塔结构的认识	156	知识强化	197
操作技能：板式塔设备构造的认识	156	任务三 板式精馏塔操作	199
一、塔板类型	157	操作技能：精馏塔设备的操作与控制	200
二、塔板结构	159	一、开停车操作	200
蒸馏过程案例	160	二、影响精馏操作的因素与控制	
基础知识（一）：精馏流程	161	调节	200
一、连续精馏流程	161	基础知识：连续精馏的热量衡算	202
二、间歇精馏操作流程	161	一、再沸器的热量衡算	202
基础知识（二）：蒸馏过程原理	162	二、冷凝器的热量衡算	203
一、气-液相平衡关系	162	知识强化	203
二、精馏原理	166	任务四 特殊蒸馏过程的认识	205
知识强化	178	操作技能：塔设备的日常维护与保养	205
任务二 板式塔流体力学特性分析	179	一、塔设备日常维护的主要内容	205
操作技能：板式塔的设计指导	180	二、常用塔设备的巡检内容及方法	206
一、板式塔的流体力学性能	180	基础知识：特殊蒸馏	206
二、浮阀塔的设计原则	182	一、水蒸气蒸馏	206
基础知识：双组分连续精馏板式塔理论		二、恒沸蒸馏	207
塔板数的计算	190	三、萃取精馏	208
一、板式精馏塔塔板数的计算	190	知识强化	208
二、回流比的影响及其选择	194	练习题	210
情境五 气体吸收			213
任务一 填料塔结构的认识	213	二、吸收操作参数调节	232
操作技能：吸收设备结构认识	213	基础知识（一）：传质过程理论	233
一、填料塔	214	一、定态的一维分子扩散	233
二、填料	214	二、扩散系数	237
三、填料塔的辅助设备	216	三、对流扩散	238
吸收过程案例	219	四、双膜理论	238
基础知识：吸收操作简介	221	基础知识（二）：吸收速率	239
一、气体吸收的分类	221	一、气膜吸收速率方程式	239
二、吸收剂的选择	221	二、液膜吸收速率方程式	239
知识强化	222	三、总传质速率方程式	239
任务二 填料塔流体力学特性分析	224	四、总传质系数间的关系	241
操作技能：填料塔的流体力学特性		知识强化	242
分析	224	任务四 吸收塔故障处理	244
一、气体通过填料层的压强降	225	操作技能：吸收塔操作异常现象的	
二、压强降与液泛速度的确定	226	处理	245
基础知识：气-液相平衡关系	227	一、拦液和液泛	245
一、气体在液体中的溶解度	227	二、溶液起泡	245
二、亨利定律	228	三、塔阻力升高	245
知识强化	229	基础知识：吸收塔计算	245
任务三 填料吸收塔操作	231	一、全塔物料衡算及操作线方程	246
操作技能：吸收塔的操作	231	二、吸收剂消耗量	246
一、填料塔的开、停车操作	231	三、吸收塔填料层高度计算	248

四、塔径计算	253	练习题	254
知识强化	253		
情境六 固体湿物料的干燥	256		
任务一 常见干燥设备结构的认识	256	三、湿空气焓湿图的应用	275
操作技能：常见干燥器特性分析	256	知识强化	277
一、常用干燥器的结构和特点	256	任务三 流化床干燥设备操作	279
二、干燥器的选用	261	操作技能：流化床干燥器的操作与	
干燥过程案例	261	维护	280
基础知识：干燥操作简介	263	一、流化床干燥器的操作	280
一、湿物料的干燥方法	263	二、流化床干燥器的维护	280
二、对流干燥过程	263	基础知识：干燥过程的物料衡算和热量	
知识强化	264	衡算	281
任务二 喷雾干燥器的操作与维护	267	一、空气干燥器的操作过程	281
操作技能：喷雾干燥器的操作与维护	267	二、干燥过程的物料衡算	281
一、干燥操作条件的确定	267	三、干燥过程的热量衡算	283
二、喷雾干燥设备的操作	268	四、干燥器出口空气状态的确定	284
三、喷雾干燥设备的维护	268	五、干燥器的热效率和干燥效率	285
基础知识：湿空气的性质和湿度图	269	知识强化	287
一、湿空气的性质	269	练习题	289
二、湿空气的湿度图	275		
情境七 物料的萃取	291		
任务一 萃取过程及常见萃取设备的		三、直角坐标相图	299
认识	291	四、萃取概述	300
操作技能：常见萃取设备的认识	291	任务二 萃取塔的操作	301
一、混合-澄清槽	291	操作技能：萃取塔的操作	302
二、重力流动的萃取塔	292	一、萃取塔的开车	302
三、输入机械能量的萃取塔	293	二、维持正常操作要注意的事项	302
萃取过程案例	295	基础知识：萃取过程计算	303
基础知识：液-液相平衡及萃取操作		一、单级萃取的计算	303
概述	296	二、多级错流接触萃取的计算	305
一、三角形相图	296	三、多级逆流接触萃取的计算	309
二、相平衡关系在三角形相图上的表		练习题	314
示方法	298		
情境八 溶液的蒸发	316		
任务一 蒸发过程及常见蒸发设备的		操作技能：蒸发器的操作维护	324
认识	316	一、蒸发器的操作	324
蒸发过程案例	316	二、蒸发器的维护	325
基础知识：蒸发操作概述	318	三、蒸发系统常见事故处理	326
一、常见蒸发器	318	基础知识：蒸发计算	326
二、蒸发操作的特点	322	一、单效蒸发的计算	326
三、各类蒸发器的性能比较	323	二、温度差损失	329
四、冷凝器和除沫器	323	三、多效蒸发流程	331
任务二 蒸发器的操作与维护	324	练习题	333
附录	334		
一、单位换算	334	三、水的重要物理性质	336
二、水在不同温度下的黏度	335	四、某些液体的重要物质	337

五、气体的重要物理性质	338	十九、某些液体的热导率	356
六、干空气的物理性质 (101.33kPa)	339	二十、某些气体和蒸汽的热导率	357
七、液体比热容共线图	340	二十一、总传热系数的工业实例	358
八、气体比热容共线图	341	二十二、壁面污垢热阻	358
九、液体汽化潜热共线图	342	二十三、某些气体溶于水的亨利 系数	359
十、饱和水蒸气表 (按温度排列)	343	二十四、某些二元物系的气液平 衡组成	360
十一、饱和水蒸气表 (按压强排列)	344	二十五、管板式热交换器系列标 准 (摘录)	361
十二、管子规格	346	二十六、氟里昂-12 的物理性质	363
十三、常用泵的规格	347	二十七、几种制冷剂的物理性质	363
十四、4-72-11 型离心通风机规格 (摘录)	352	二十八、氯化钠溶液的物理性质	364
十五、无机物水溶液在大气压下的 沸点	353	二十九、氯化钙溶液的物理性质	365
十六、常用固体材料的密度和比 热容	354	三十、氯化钠溶液和氯化钙溶液的比 热容	365
十七、固体材料的热导率	354		
十八、某些固体材料的黑度	355		
参考文献			367

绪 论

《化工单元过程及设备》是以化学工业的生产过程为研究对象，研究和探讨化工生产过程中具有共性规律的操作技术及设备问题。尽管化学工业门类繁多，原料来源广泛，生产品种千差万别，各种产品的生产流程和设备型号不尽相同，但是人们经过长期的生产实践，总结归纳出在各种化工产品的生产过程中共同遵循的物理学定律，所用设备相似，原理上相同或相似，具有共同特点，所起的作用相同的基本过程和设备，提出了“化工单元操作”的概念。单元操作统一了通常被认为各不相同的独立的化工生产技术，使人们系统而深入地研究每一单元操作的内在规律和基本原理，而所有这些单元操作的综合，构成了化工的基础学科——化工单元过程及设备。

实际上，在化工、轻工类工厂所属设备中反应器并不多，绝大多数属于单元操作设备，主要进行着诸如流体输送、加热、蒸发、蒸馏、干燥等单元操作。各种单元操作占据着企业大部分设备费用和操作费用，由此可见单元操作在生产中的重要地位。

一、本课程的性质、内容和任务

本课程是在学习数学、物理、化学的基础上，运用质量守恒和能量守恒定律及平衡关系等，来研究化工生产中内在的共同规律，讨论生产过程中共有的基本过程——单元操作的基本原理、过程描述、典型设备的构造及其操作技术，是化工及其相关专业教学计划中具有承上启下作用的重要技术基础课，它为专业课的学习打好基础。

按照各个单元操作所遵循的基本规律，其内容归并为流体动力、传热、传质三个过程的基本理论及其应用。学习本课程的基本任务是掌握各个单元操作的基本规律及基本计算方法，熟悉典型设备的构造、性能及操作技术，并将这些知识应用于生产实践，寻求适宜的操作条件，探索强化生产的方向及改进设备的途径，以降低生产成本，提高生产效率，从而最大限度地获得经济效益。

二、单元操作中常用的两个基本概念

1. 物料衡算

在设计计算设备尺寸或确定所处理物料量的基本情况时，需要了解整个过程或某一步骤中原料、产物、副产物各量之间的关系。物料衡算依据质量守恒定律可确定进入系统（某一过程或设备）的物料量，必须等于离开该系统的物料量与积累于该系统设备中的物料量之和，即

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

即

$$G_1 = G_2 + G_{\text{积}} \quad (0-1)$$

式中 G_1 ——输入物料量；

G_2 ——输出物料量；

$G_{\text{积}}$ ——积累在设备中的物料量。

在连续生产过程中设备内不应有物料积存，进行物料衡算时，式(0-1)可简化为

$$\text{输入} = \text{输出}$$

即

$$G_1 = G_2 \quad (0-2)$$

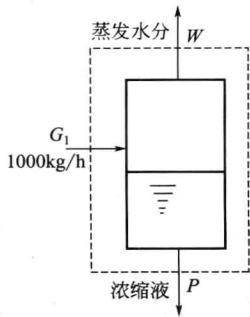


图 0-1 例 0-1 附图

【例 0-1】 将流量为 1000kg/h 的葡萄糖溶液送入一连续生产蒸发器，在 378K 的温度下从 8% 浓缩到 50%，请问该蒸发器在浓缩过程中的水分蒸发量 (W) 是多少？获得多少 50% 的葡萄糖浓缩液 (P)？

解：(1) 根据题意画出蒸发过程示意图，划定物料衡算范围，并标注过程数据，见图 0-1。

(2) 以 1h 为基准，列出物料衡算式。连续生产过程无物料的积累，由式(0-2) 可知

$$G_1 = G_2$$

式中， $G_1 = 1000\text{kg/h}$ ； $G_2 = \text{水分}$

蒸发量 + 浓缩液量 = $W + P$ ，求 W 、 P 。

进出蒸发器溶液总量为

$$G_1 = W + P$$

即

$$1000 = W + P$$

进出蒸发器溶质量为

$$1000(0.08) = W(0) + P(0.5)$$

解得：水分蒸发量 $W = 840(\text{kg/h})$ ，浓缩液量 $P = 160(\text{kg/h})$

2. 能量衡算

各类化工及相近企业在从原料到产品的生产过程中，处理物料需要消耗能量。要了解能量的消耗，以及与过程操作有关的各种形式能量之间的相互转换情况（如热能、机械能、电能、化学能），可根据能量守恒定律列出能量衡算式。但是，在化工生产中许多过程以热能为主，所以能量衡算便简化为热量衡算。热量衡算中需要考虑的项目是进出系统或设备的物料本身所携带的焓，包括物料的显热和潜热两部分；从外界加入以及向外界送出的热，包括透过设备、管道的壁面由外界传入或向外扩散到环境去的热量。在连续稳定过程中热量衡算的基本关系式为

输入热量 = 输出热量 + 热损失

$$\text{即} \quad Q_1 = Q_2 + Q_{\text{损}} \quad (0-3)$$

式中 Q_1 ——输入系统的热量；

Q_2 ——输出系统的热量；

$Q_{\text{损}}$ ——系统向环境散热时损失热量。

【例 0-2】 若例 0-1 中 8% 的葡萄糖溶液温度为 31℃，平均比热容为 3.4kJ/(kg·℃)；加热蒸汽绝对压力为 198kPa，温度为 120℃；溶液液面绝对压力为 120kPa，温度为 105℃；50% 葡萄糖溶液的温度为 111.4℃，平均比热容仍为 3.4kJ/(kg·℃)；冷凝水温度为 90℃，热损失可忽略不计。试求每小时加热蒸汽用量。

解：(1) 根据题意画出示意图，确定热量衡算范围（图 0-2 虚线框所示），并标注数据。由式(0-3) 得

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{损}}$$

设 $Q_{\text{糖}}$ ——8% 葡萄糖溶液的热量；

$Q_{\text{蒸汽}}$ ——加热蒸汽的热量；

$Q_{\text{蒸发水}}$ ——蒸发水蒸气的热量；

$Q_{\text{浓缩液}}$ ——浓缩液的热量；

$Q_{\text{冷凝水}}$ ——冷凝水的热量。

式中

$$Q_1 = Q_{\text{糖}} + Q_{\text{蒸汽}}$$

$$Q_2 = Q_{\text{蒸发水}} + Q_{\text{浓缩液}} + Q_{\text{冷凝水}}$$

$$Q_{\text{损}} = 0$$

(2) 仍以 1h 为基准, 查出 198kPa 加热蒸汽及 120kPa 蒸发水蒸气的潜热分别为 $r=2205.57\text{kJ/kg}$ 和 $r'=2246.8\text{kJ/kg}$ 。100℃ 时冷凝水比热容为 $4.187\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。设加热蒸汽及蒸发水蒸气的焓分别为 H 和 H' (kJ/kg), 加热蒸汽的消耗量为 D , 则

$$Q_1 = 1000c_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0) + DH$$

$$Q_2 = 840H' + 160c_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) + Dc_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

式中 $c_{\text{糖}}$ ——葡萄糖溶液的比热容;

$c_{\text{水}}$ ——冷凝水的比热容;

T_0 ——273K 时水的温度, 即 0℃;

$T_{\text{进}}$ 、 $T_{\text{出}}$ ——葡萄糖溶液的进、出口温度;

$T_{\text{水}}$ ——冷凝水的温度。

该浓缩过程的热量衡算式为

$$1000c_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0) + DH = 840H' + 160c_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) + Dc_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

加热蒸汽的焓

$$H = Dr + Dc_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

$$H' = r' + c_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

整理后得

$$Dr = 840r' + 840c_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) + 160c_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) - 1000c_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0)$$

因此, 加热蒸汽的用量为

$$D = \frac{840r' + 840c_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0) + 160c_{\text{糖}}(T_{\text{糖}} - T_0) - 1000c_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0)}{r}$$

$$= \frac{840 \times 2246.8 + 840 \times 4.18 \times 111.4 - 1000 \times 3.4 \times 31}{2205.57}$$

$$= 994.6 \text{ (kg/h)}$$

三、物理量的单位及单位换算

1. 单位制度

在描述单元操作时将会用到很多物理量, 物理量的大小都是用数字与单位的乘积来表示。物理量的单位可分为基本单位和导出单位两类。通常将几个独立的物理量称为基本量, 其单位称为基本单位, 例如, 长度、时间、质量为基本量, 其单位米、秒、千克为基本单位。非独立的众多物理量根据它们与基本量的关系来确定, 称为导出量, 其单位称为导出单位, 例如, 速度为路程与时间之比, 由长度与时间相除而导出, 是一个导出量, 其单位为米/秒, 是导出单位。

由于对基本量的基本单位规定得不同, 便产生了不同的单位制度。我国已广泛推行国际单位制 (SI 制), 它规定物理量的基本单位有 7 个: 长度单位, 米 (m); 质量单位, 千克 (kg); 时间单位, 秒 (s); 温度单位, 开尔文 (K); 物质的量单位, 摩尔 (mol); 发光强度单位, 坎德拉 (cd); 电流单位, 安培 (A)。在化工单元操作中常用的只有前 5 个, 即 m、kg、s、K、mol。

若规定上述基本单位中长度单位为厘米 (cm), 质量单位为克 (g), 时间单位为秒

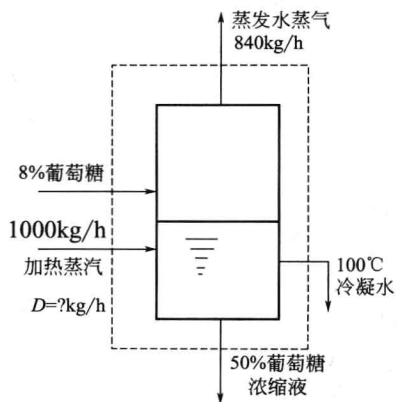


图 0-2 例 0-2 附图

(s), 称为物理单位制 (cgs 制)。国际单位制和物理单位制的特点都是以质量为基本单位, 属于绝对单位制系统。长期以来, 科技领域还使用工程单位制, 它以力作为基本单位, 而不是以质量作为基本单位, 属于重力单位制系统。工程单位制的基本单位是: 长度单位为米 (m), 力或重量单位为千克 (力) (kgf), 时间单位为秒 (s)。千克 (公斤) 在 SI 制中指质量, 在工程制中指的是力或重量, 容易混淆, 所以, 在工程制中的千克之后加注“力 (f)”字表示, 即公斤 (力), 用符号 kgf 表示。

2. 单位换算

我国已广泛使用法定计量单位, 但工程制在生产和设计中仍有使用, 许多物理、化学数据也还在用物理单位制表示。各种来源得到的数据, 不一定符合计算和使用要求, 必须进行单位换算。

物理量由一种单位换算成为另一种单位时, 量本身并无变化, 但数值要改变。进行单位换算时要乘以两单位之间的换算因素, 才能得到新单位的数字。所谓换算因素, 就是同等量的原单位与新单位大小之比。例如, 1atm (1 个标准大气压) 的压力和 760mmHg 的压力是两个相等的物理量, 但所用单位不同, 其数值就不同, 即 $1\text{atm}=760\text{mmHg}$ 。那么, 它们的换算因素就是 760。

常用单位间的换算因素可查本书附录。

【例 0-3】 已知一个标准大气压 (1atm) 的压力等于 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$, 试求此压力在 SI 制中为多少帕?

解: 在 SI 制中 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。因此, 应将工程单位制中 kgf/cm^2 的 kgf 转换为 N, cm^2 转换为 m^2 , 由附录查得各量在不同单位间的关系

$$1\text{kgf}=9.81\text{N} \quad 1\text{cm}=(1/100)\text{m}$$

因此得

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

【例 0-4】 在绝对单位制中 277K 时水的密度为 $1.0 (\text{g}/\text{cm}^3)$, 试将其换算为 SI 制单位表示的密度。

解: SI 制中密度的单位为 kg/m^3 。已知 $1\text{g}=0.001\text{kg}$, $1\text{cm}=0.01\text{m}$
则

$$1.0 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 1 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \left(\frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} \right) \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^3 = 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

小 结

尽管化工产品种类繁多, 生产流程、设备型号、工艺过程不尽相同, 但总可以抽象归纳出一些本质相同的物理操作过程, 即单元操作。使用“单元操作”的概念, 统一了生产流程中的一些基本过程。物料衡算和热量衡算方法是化工单元操作处理问题的基本方法, 而单位换算是学习本课程的一项基本功。

思 考 题

1. 本门课程的任务是什么?
2. 什么叫单元操作?
3. 物料衡算的理论依据是什么? 简述物料衡算的方法及步骤。

4. 热量衡算的理论依据是什么？简述热量衡算的方法及步骤。
5. 在国际单位制（SI制）中，常用的基本量有哪些？有几个基本单位？分别用什么符号表示？
6. 什么叫导出量、导出单位？试举例说明。

练习题

1. 某湿物料原始含水量为10%，在干燥器内干燥至含水量为1.1%（均为质量百分率）。求每吨湿物料除去的水量。
2. 在某一间壁式换热器中，利用冷却水将间壁另一侧1500kg/h、80℃的某有机液体冷却到40℃，冷却水的初温为30℃，出口温度为35℃，已知该有机液体的比热容为1.38kJ/(kg·℃)。试求冷却水用量。
3. 将下列各物理量以国际单位制表示：①压力1.5kgf/cm²；②密度1.23g/cm³；③气体常数82.06atm·cm³/(mol·K)。