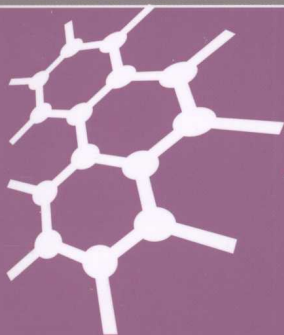


高等 教育 规划 教材

化工原理课程设计



HUAGONG YUANLI
KECHENG SHEJI

申迎华 郝晓刚 主编



化学工业出版社

高等教育规划教材

化工原理课程设计

申迎华 郝晓刚 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以精馏塔（浮阀塔和筛板塔）设计为主，附以换热器、离心泵及管道设计和选型。主要介绍了板式精馏塔的设计计算，并就有关流程方案的确定以及附属设备的选型作了介绍，此外给出了设计时所使用的现行技术标准和一些基础数据。

本书为化工原理课程教学的配套教材，可作为化工原理课程设计、化工类专业毕业设计的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

化工原理课程设计/申迎华，郝晓刚主编．—北京：
化学工业出版社，2009.5
高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-04974-2

I. 化… II. ①申…②郝… III. 化工原理-课程设计-
高等学校-教学参考资料 IV. TQ02-41

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 026309 号

责任编辑：何 丽
责任校对：战河红

文字编辑：陈 雨
装帧设计：周 遥

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 9 1/4 字数 211 千字 2009 年 5 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：18.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理课程设计是化学工程与工艺类相关专业学生学习化工原理课程必修的三大环节之一，起着培养学生运用综合基础知识解决工程问题和独立工作能力的重要作用。

本书以精馏塔（浮阀塔和筛板塔）设计为主，附以换热器、离心泵及管道设计和选型。主要介绍板式精馏塔的设计计算，并就有关流程方案的确定以及附属设备的选型作了介绍，此外给出了设计时所使用的现行技术标准和一些基础数据。为提高教学质量，增加学生的学习兴趣，本书还编写了换热器设计及板式精馏塔多媒体教学仿真设计软件，这对培养学生的创新思维能力、分析判断能力和设计能力起到了良好的促进作用。

本书为化工原理课程教学的配套教材，可作为化工原理课程设计、化工类专业毕业的参考资料，也可作为化工原理课程教学的参考用书。

本书共分5章。全书由申迎华、郝晓刚统稿。第1、2章由申迎华编写；第3章的3.1至3.3由郝晓刚编写，其余部分由王韵芳编写；第4章由邱丽编写；第5章由段东红编写；附录由申迎华、王韵芳和邱丽编写。

本书在编写过程中得到太原理工大学化工原理教研室各位同仁的帮助。张忠林、王忠德、朱全红和李林屿等在图表的绘制方面给予了大力帮助，在此一并表示感谢。

由于我们经验不足，水平有限，其中难免有不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2009年1月于太原

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 化工原理课程设计的目的	1
1.2 化工原理课程设计的内容和步骤	1
1.2.1 课程设计的基本内容	1
1.2.2 课程设计的方法与步骤	2
1.3 化工原理课程设计的任务要求	2
1.3.1 设计说明书的编排和要求	3
1.3.2 设计图纸要求	3
1.3.3 设计的有关说明	3
1.4 CAD 及仿真技术在化工设计中的应用	4
1.4.1 模拟计算	4
1.4.2 图形绘制	4
1.4.3 智能 CAD 与专家系统	5
1.4.4 化工过程仿真技术	5
第 2 章 化工设计计算及绘图基础	6
2.1 化工设计计算基础	6
2.1.1 物料衡算	6
2.1.2 热量衡算	6
2.1.3 物性数据的查取和估算	7
2.2 化工设计绘图基础	11
2.2.1 工艺流程图的分类	12
2.2.2 带控制点工艺流程图的绘制	13
2.2.3 主体设备工艺条件图	20
2.2.4 设备装配图	20
第 3 章 板式塔的设计	23
3.1 概述	23
3.1.1 精馏操作对塔设备的要求	23
3.1.2 板式塔的类型	23
3.1.3 精馏塔设计的内容及要求	24
3.2 设计方案的确定	25
3.2.1 流程的确定	25
3.2.2 操作条件的确定	26

3.2.3 确定设计方案的原则	26
3.3 板式精馏塔的工艺计算	27
3.3.1 物料衡算与操作线方程	27
3.3.2 塔主要部位(塔顶、进料板和塔底)的压力和温度	29
3.3.3 理论塔板数的求取	31
3.3.4 实际塔板数的确定	33
3.4 板式塔主要尺寸的设计计算	34
3.4.1 塔的有效高度和板间距的初选	34
3.4.2 塔径	35
3.4.3 溢流装置的设计	37
3.4.4 塔板布置	40
3.4.5 浮阀塔的设计计算	40
3.4.6 筛板塔的设计计算	46
3.5 板式塔的结构	49
3.5.1 塔的总体结构	49
3.5.2 塔体总高度	49
3.5.3 塔板结构	50
3.6 精馏塔的附件及附属设备	56
3.6.1 封头和法兰的选型	56
3.6.2 接管直径	56
3.6.3 回流冷凝器	57
3.6.4 再沸器	58
3.6.5 离心泵的选择	59
3.7 精馏塔的设计计算实例	60
实例一 苯-甲苯精馏塔设计	60
实例二 乙醇-水精馏塔设计	71
第4章 列管式换热器的设计	84
4.1 概述	84
4.1.1 换热器的类型	84
4.1.2 设计主要内容	85
4.2 换热器的工艺设计	86
4.2.1 设计方案的确定	86
4.2.2 换热器的工艺设计步骤	87
4.2.3 换热器的工艺设计计算	88
4.3 换热器结构设计	89
4.3.1 换热管	89
4.3.2 壳体直径	91
4.3.3 折流挡板	92
4.3.4 其他部件	93

4.3.5 材料选用	93
4.4 换热器的校核	93
4.4.1 流体通过换热器阻力的校核	93
4.4.2 传热面积的校核	94
4.5 换热器的设计计算实例	97
第 5 章 化工原理课程设计仿真	103
5.1 仿真技术简介	103
5.1.1 仿真技术概念及其发展	103
5.1.2 化工过程仿真技术	103
5.1.3 化工原理课程设计仿真	104
5.2 板式精馏塔设计仿真操作要点	105
5.2.1 软件功能特点简介	105
5.2.2 软件的组成部分	105
5.2.3 软件操作说明	105
5.3 列管式换热器设计仿真操作要点	109
5.3.1 软件功能特点简介	109
5.3.2 软件操作说明	109
附录	111
附录 1 常用有机物质的 Antoine 方程常数	111
附录 2 典型二元物系溶液气液平衡数据	112
附录 3 常见二元物系的物性数据	113
附录 4 常见物质的物性共线图	115
附录 5 板式塔塔板结构参数	124
附录 6 压力容器常用零部件	125
附录 7 钢管规格	130
附录 8 列管式换热器中传热系数 K 值范围推荐值	134
附录 9 壁面污垢热阻的数值范围	135
附录 10 换热器有关参数	136
参考文献	139

第 1 章 绪 论

化工工艺设计指生产方式的选择、生产工艺流程设计、工艺计算（物料平衡和能量平衡）、非标准化工设备的设计、标准设备的选型及管线的配置，并对公用工程（水、电、汽等）提出工艺要求。

设计是一项创造劳动，是设计者对许多构思加以综合、应用基础知识和专业知识去实现设计目标的一个过程。设计是一门综合学科，涉及面很广，它要求设计者要有扎实的理论基础、较强的实践能力和高度的责任感，应用正确的设计思想，从国情出发、从实际出发，采用先进的科学技术，有效利用资源，做到技术上先进、经济上合理，使设计处于多方位优化状态。

1.1 化工原理课程设计的目的

化工原理课程设计是化工类相关专业的本科生运用化工原理及有关先修课程的基本知识去完成某一设计任务的一次较为全面的化工初步设计训练，是化工原理课程最后一个重要的教学环节，其基本目的包括：

- （1）使学生初步掌握化工单元操作设计的基本方法和程序；
- （2）训练学生的基本技能，如计算、绘图、运用设计资料（手册、标准和规范）、使用经验数据，进行经验估算和处理数据等；
- （3）提高学生运用工程语言（简洁的文字、清晰的图表、正确的计算）表达设计思想的能力；
- （4）培养学生理论联系实际的正确设计思想，训练综合运用已学过的理论和实际知识去分析和解决工程问题的能力。

1.2 化工原理课程设计的内容和步骤

1.2.1 课程设计的基本内容

化工原理课程设计的基本内容如下。

- （1）设计方案简介 对给定或选定的工艺流程、主要的设备型式进行简要的论述。
- （2）主体设备的工艺设计计算 包括工艺参数的选定、物料衡算、热量衡算、设备的工艺尺寸计算及结构设计、流体力学验算。
- （3）典型辅助设备的选型和计算 包括典型辅助设备的主要工艺尺寸计算和设备型号规格的选定。
- （4）带控制点的工艺流程简图 以单线图的形式绘制，标出主体设备和辅助设备的物

料流向、物流量、能流量和主要化工参数测量点。

(5) 主体设备工艺条件图 图面上应包括设备的主要工艺尺寸, 技术特性表和接管表及组成设备的各部件名称等。

1.2.2 课程设计的方法与步骤

(1) 明确设计任务与条件

① 原料(或进料)与产品(或出料)的流量、组成、状态(温度、压力、相态等)、物理化学性质、流量波动范围;

② 设计目的、要求和设备功能;

③ 公用工程条件, 如冷却水温度, 加热蒸汽压力, 气温和湿度等;

④ 其他特殊要求。

(2) 调查待设计设备的国内外状况及发展趋势, 有关新技术及专利状况, 所涉及的计算方法等。收集有关物料的物性数据及材料的腐蚀性质等。

(3) 确定操作条件和流程方案

① 确定设备的操作条件, 如温度、压力和物流比等;

② 确定设备结构型式, 评比各类设备结构的优缺点, 结合本设计的具体情况, 选择高效、可靠的设备型式;

③ 热能的综合利用、安全和环保措施等;

④ 确定单元设备的工艺流程。

(4) 主体设备的工艺设计计算 化工原理课程设计主要强调工艺流程中主体设备的设计。主体设备是指在每个单元操作中处于核心地位的关键设备, 如传热中的换热器, 蒸发中的蒸发器, 蒸馏和吸收中的塔设备(板式塔和填料塔), 干燥中的干燥器等。

① 主体设备的物料与热量衡算;

② 设备特性尺寸计算, 如精馏、吸收设备的塔径、塔高, 换热设备的传热面积等, 可根据有关设备的规范和不同结构设备的流体力学, 传质、传热动力学计算公式来计算;

③ 流体力学验算, 如流动阻力与操作范围验算。

(5) 结构设计 在设备型式及主要尺寸确定的基础上, 根据各种设备常用结构, 参考有关资料与规范, 详细设计设备各零部件的结构尺寸。如填料塔要设计液体分布器、再分布器、填料支承、填料压板、各种接口等; 板式塔要确定塔板布置、溢流管、各种进出料口结构、塔板支承、液体收集箱与侧线出入口、破沫网等。

(6) 编写设计说明书。

(7) 备好绘图工具, 绘制带控制点的工艺流程简图和主体设备工艺条件图。

1.3 化工原理课程设计的任务要求

完整的课程设计由设计说明书和图纸两大部分组成。化工原理课程设计的任务要求每一位学生编写设计说明书 1 份, 绘制图纸 2 张。各部分的具体要求如下。

1.3.1 设计说明书的编排和要求

说明书是设计的书面总结,也是后续设计工作的主要依据,说明书的编排顺序一般如下:

- (1) 封面(课程设计题目、班级、姓名、指导教师、时间)
- (2) 目录
- (3) 设计任务书
- (4) 设计方案简介
- (5) 设计条件及主要物性参数表
- (6) 工艺设计计算
- (7) 辅助设备的计算及选型
- (8) 设计结果汇总表
- (9) 设计评述及设计收获
- (10) 参考资料

设计说明书要求内容完整,条理清晰,书面清洁,字迹工整;误差小于设计要求,计算要求方法正确,计算公式和所用数据必须注明出处;图表应能简要表达计算的结果。

1.3.2 设计图纸要求

(1) 工艺流程图 本设计要求画“带控制点的工艺流程图”一张,采用A2(594mm×420mm)或A3(420mm×293mm)图纸。以单线图的形式绘制,标出主体设备和辅助设备的物料流向、物流量、能流量和主要化工参数测量点。

(2) 主体设备工艺条件图 通常化工工艺设计人员的任务是根据工艺要求通过工艺条件确定设备结构型式、工艺尺寸,然后提出附有工艺条件图的“设备设计条件单”。设备设计人员据此对设备进行机械设计,最后绘制设备装配图。

本设计要求画“主体设备工艺条件图”一张,采用A1(841mm×594mm)或A2(594mm×420mm)图纸。一般按1:100比例绘制,图面上应包括设备的主要工艺尺寸、技术特性表和接管表。

图纸要求:布局美观,图面整洁,图表清楚,尺寸标识准确,字迹工整,各部分线形粗细符合国家化工制图标准。

1.3.3 设计的有关说明

(1) 课程设计不同于解习题,设计计算时的依据和答案往往不是唯一的。故在设计过程中选用经验数据时,务必注意从技术上的可行性与经济上的合理性两个方面进行分析比较。一个合理的设计往往必须进行多方案的比较,必须进行反复多次设计计算方能得到。

(2) 在设计过程中指导教师原则上不负责审核运算数字的正确性。因此学生从设计一开始就必须以严肃认真的态度对待设计工作,要训练自己独立分析判断结果正确性的能力。

(3) 整个设计由论述、计算和绘图三部分组成,所以只有计算,缺少论述或绘图草率的设计是不允许的。

(4) 设计中, 每人在完成规定任务的同时, 各人还可以酌情在某些方面加深、提高。如可以对精馏方案的选定, 多查阅一些参考资料以便充实设计方案的论证材料; 塔板结构的设计计算进行多种方案的选择比较; 还可适当增加辅助设备的设计计算内容, 或增加自行编程计算等。

1.4 CAD 及仿真技术在化工设计中的应用

随着计算机技术的飞速发展, 计算机在化工设计领域中的应用日益扩大。对化工设计而言, 从分子结构出发预测物质的物性到工艺过程的设计、分析直至绘图, 以及环境评价, 经济效益和社会效益分析等大量的工作, 均可借助计算机辅助设计 CAD(computer aided design) 完成。CAD 在化工设计中的应用可以概括为: 模拟计算、绘图和智能系统。化工仿真技术也是当今化学工程技术发展趋势之一, 它是以现有的计算机软件为基础, 在深入了解具体化工生产过程、设备结构、工作原理、控制系统及各种工艺条件的基础上, 充分研究化工生产过程中所发生的物理、化学现象, 通过建立数学模型, 对生产过程进行的动态模拟。

1.4.1 模拟计算

化工设计中工艺计算、结构计算的计算量大, 计算复杂, 且必须经多次反复计算, 如逐板法计算理论塔板数目, 试差法确定灵敏板位置等, 计算时若数据选取不当或某一部分有错, 整个计算必须重新进行。因此在实际设计过程中, 人们只能采用各种简化方法计算, 但由此引起的误差可能对设计结果产生严重影响。利用计算机不仅能够解算化工设计中大量的复杂计算问题, 而且由于电子计算技术的应用, 还在化学的深入研究、摸清化工过程内在规律方面引起了质的飞跃。这样就在化工放大中为数学模拟放大方法的采用提供了可行性, 使化学工业的发展产生了一个崭新的变革, 也大大丰富了化学工程的内容。

过去一个新的化工流程的发展, 往往要从实验室的试验到小试再到中间试验, 甚至要经过工业规模的试验, 最后才能应用到工业生产上去。这样一个复杂烦琐的过程, 不但周期非常长, 而且还消耗大量的人力物力。与此同时, 虽然在化工流程发展上出现了“相似模拟放大”和“规模效应放大”的理论, 然而应用并不广泛, 尤其是“规模效应放大”方法很少见实例。另外, 在某些情况下如一些复杂的化学反应器, 由于相似放大不研究化学变化规律, 很难实现完全相似。后来也有人提出过用“数学模拟放大”解决, 但由于受计算工具的限制也无法实现, 这些问题在电子计算技术广泛应用之后得到了解决。所谓“数学模拟放大”, 就是用分析的方法来研究化工过程, 并将分析的结果用数学方程式来表示化工过程的内在规律, 再借助于电子计算机, 进行化工放大设计。

作为在化工计算方面的应用主要有: ①基础数据如化工原料的特性数据计算; ②单元操作的设备结构计算; ③单元操作工艺计算, 包括系统最优化计算; ④流程计算。

1.4.2 图形绘制

所谓计算机绘图, 狭义地理解即为用计算机驱动绘图仪或打印机画出所需的图形。而

事实上,在绘图输出之前,通常要把所画图形预先显示在计算机显示器上,以便人们对所画图形是否正确加以判断,一旦发现错误,即重新调试。这样就可将很多错误消灭在绘图输出之前,以保证所绘图形正确无误。所以计算机绘图可广泛地应用在化学工业中。

随着微电子技术的飞速发展,超大规模集成电路的成本不断降低,图形输出设备的种类和功能日益增强,价格也不断下降。图形输出设备按输出平台大体可分为图像显示器、数字化绘图仪和打印机。目前,市场上有各种规模适合各种需要的计算机图形软件出售,这些图形往往具有交互功能,操作者可利用鼠标、键盘方便地与计算机进行对话、输入和修改。

在化工设计中,计算机辅助设计绘图不但可以画工艺流程图、设备总装图、零件图,还可画设备布置图、工艺管线配管图,甚至可以画设备管线的三维图像和任一角度的投影。画图快速,图形工整、清晰,线条尺寸误差在 0.3mm 以内。

1.4.3 智能 CAD 与专家系统

CAD 不但能代替设计者的手工计算和绘图,而且计算速度快,精确度高,图纸质量好,代替大量人工劳动,能够完成人工所不能达到的复杂运算,而且某些软件能“辅导”一般设计人员进行分析、判断、决策,这就是智能 CAD。

专家系统是将设计专家的知识、经验加以分类,形成规划(软件),存入计算机,因此可以用计算机模拟设计专家的推理、判断、决策过程来解决设计问题。

1.4.4 化工过程仿真技术

化工生产行业具有显著的特殊性:工艺过程复杂、工艺参数较多、工艺条件要求十分严格,并伴有高温、高压、易燃、易爆、有毒、腐蚀等不安全因素。化工仿真技术是通过在计算机上进行开车、停车、事故处理等过程实现的操作方法和操作技能的仿真模拟手段。应用这一技术,可以模拟流程在不同工艺条件下运行时可能得到的结果,并对结果进行分析、优选,确定最佳工艺条件或最佳方案。因此,可大大节省过去由试验(小试与中试)探索最佳工艺条件所耗费的大量资金与时间。

第2章 化工设计计算及绘图基础

2.1 化工设计计算基础

2.1.1 物料衡算

物料衡算是化工设计计算中最基本、最重要的内容之一。设计设备决定其尺寸之前，要定出所处理的物料量。整个过程或其某一步骤中，原料、产物、副产物等量之间的关系，可通过物料衡算确定。

2.1.1.1 物料衡算式

根据质量守恒定律可得，进入任何过程的物料质量，应等于从该过程离开的物料质量与积存于该过程中的物料质量之和，即：

$$\text{输入} = \text{输出} + \text{累积} \quad (2-1a)$$

若此过程为稳态过程，其物料衡算关系便简化为：

$$\text{输入} = \text{输出} \quad (2-1b)$$

上述关系，可在整个过程的范围内使用，亦可在一个或几个设备的范围内使用。它既可针对全部物料运用，在没有化学反应发生时还可针对混合物的任一组分来运用。

2.1.1.2 衡算步骤

- ① 画出简单过程流程图，用箭头指明进出料流，把有关的已知量、未知量标在图上；
- ② 写出化学方程式（如果有的话）；
- ③ 用一虚线框标明物料衡算范围；
- ④ 确定衡算对象，并选择计算基准；
- ⑤ 建立方程式求解。

2.1.2 热量衡算

化工生产中所需的能量以热能为主，用于改变物料的温度与聚集状态，以及提供反应所需热量等。若操作中有几种能量相互转化，则其间的关系可通过能量衡算确定；若只涉及到热能，能量衡算便简化为热量衡算。

2.1.2.1 热量衡算式

根据能量守恒定律，对热量衡算可写成：

$$\sum Q_i = \sum Q_o + \sum Q_L \quad (2-2)$$

式中 $\sum Q_i$ ——随物料进入系统的总热量；

$\sum Q_o$ ——随物料离开系统的总热量；

ΣQ_L ——向系统周围散失的热量。

热量衡算中需要考虑的项目是进出设备的物料本身的焓与从外界加入或向外界输出的热量，有化学反应时则还包括反应所吸收或放出的热（反应热）。

2.1.2.2 衡算基本方法及步骤

热量衡算有两种情况：一种是在设计时，根据给定的进出物料量及已知温度求另一股物料的未知物料量或温度，常用于计算换热设备的蒸汽用量或冷却水用量；另一种是在原有的装置上，对某个设备，利用实际测定（有时也要作一些相应的计算）的数据，计算出另一些不能或很难直接测定的热量或能量，由此对设备作出能量上的分析。如根据各股物料进出口量及温度，找出该设备的热利用和热损失情况。

热量衡算也需要确定基准，画出流程图，列出热量衡算表等。此外，由于焓值的大小与温度有关，因而热量衡算还要指明基准温度。物料的焓值常从 0°C 算起，若以 0°C 为基准，亦可不再指明。有时为方便计算，以进料温度或环境温度作为基准温度，或采用数据资料的基温（例如反应热的基温是 25°C ），此时一定要指明。

2.1.3 物性数据的查取和估算

设计计算中的物性数据应尽可能使用实验测定值，此类数据从有关手册和文献中查取。有时手册上也以图表的形式提供某些物性的推算结果。常用的物性数据可由《化工原理》附录、《化工工艺手册》、《化工工艺算图》等工具书中查取。有些物性，特别是混合物的性质，查取困难，此时可用经验的方法估算和推算。在此着重介绍混合物物性数据的求法。

2.1.3.1 密度

(1) 混合液体的密度 混合液体的密度 ρ_m 用下式计算：

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (2-3)$$

式中 w_i ——混合液中 i 组分的质量分数；

ρ_i ——混合液中 i 组分的密度， kg/m^3 。

(2) 纯气体和混合气体密度

① 纯气体的密度。若纯气体的密度从手册中查不到时，可进行估算。压力不高时，就工程计算而言，可用 $pV=nRT$ 来计算纯气体（或蒸汽）的密度：

$$\rho = \frac{M}{22.4} \times \frac{273}{T} \times \frac{p}{1.013 \times 10^5} \quad (2-4)$$

式中 ρ ——气体或蒸汽的密度， kg/m^3 ；

M ——气体或蒸汽的摩尔质量， kg/kmol ；

p ——气体或蒸汽的绝对压力， Pa ；

T ——气体或蒸汽的温度， K 。

如压力较高或要求更高的精度，可用压缩因子法或其他方法进行处理，可参阅有关文献。

② 混合物气体的密度。混合物气体的密度可用下式计算：

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n y_i \rho_i \quad (2-5)$$

式中 y_i ——混合气体 i 组分的摩尔分数;

ρ_i ——混合气体 i 组分的密度, kg/m^3 。

当混合气体压力不太高时,可按下式计算:

$$Q_m = pM_m / (RT) \quad (2-6)$$

式中 p ——混合气体压力, Pa;

M_m ——混合气体的平均摩尔质量, kg/kmol ;

T ——混合气体热力学温度, K;

R ——气体常数, $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

2.1.3.2 黏度

(1) 混合液的黏度 对于互溶非缔合性混合液体,可用下列公式:

$$\lg \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \lg \mu_i \quad (2-7)$$

式中 μ_i ——与液体混合物同温度下 i 组分的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

x_i ——液体混合物中 i 组分的摩尔分数。

也可用下列公式进行简单估算:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i \quad (2-8)$$

(2) 纯气体黏度和混合气体的黏度

① 若纯气体的黏度从手册中查不到时,可采用下列工程估算式:

$$\mu = 5.29 \times 10^{-4} M^{0.5} p_c^{0.667} T_r \quad (2-9)$$

式中 μ ——低压下纯气体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

p_c ——临界压力, MPa;

T_r ——对比温度;

M ——纯气体的摩尔质量, kg/kmol 。

② 低压下混合物气体的黏度可用平方根规律估算:

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i M_i^{0.5}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{0.5}} \quad (2-10)$$

式中 μ_m ——气体混合物的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

M_i —— i 组分的摩尔质量, kg/kmol ;

y_i —— i 组分的摩尔分数;

μ_i —— i 组分的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

2.1.3.3 比热容

混合物的摩尔比热容用下述公式计算:

$$c_{pm} = \sum_{i=1}^n x_i M_i c_{pi} \quad (2-11)$$

式中 c_{pm} ——混合物的比热容, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M_i —— i 组分的摩尔质量, kg/kmol ;

x_i —— i 组分的摩尔分数；

c_{pi} —— i 组分的比热容，kJ/(kg·K)。

2.1.3.4 汽化潜热

混合液体汽化潜热可按叠加法计算：

$$\gamma_m = \sum_{i=1}^n x_i \gamma_i \quad (2-12)$$

式中 x_i —— i 组分的摩尔分数；

γ_i —— i 组分的汽化潜热，kJ/kmol。

2.1.3.5 热导率

(1) 混合液体热导率

① 有机化合物的互溶混合物的热导率估算式为：

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n w_i \lambda_i \quad (2-13)$$

式中 λ_m ——混合液体的热导率，W/(m·K)；

w_i —— i 组分的质量分数；

λ_i —— i 组分的热导率，W/(m·K)。

② 有机化合物的水溶液的热导率估算式为：

$$\lambda_m = 0.9 \sum_{i=1}^n w_i \lambda_i \quad (2-14)$$

(2) 混合气体的热导率 低压混合气体的热导率估算式为：

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i y_i M_i^{1/3}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{1/3}} \quad (2-15)$$

式中 λ_i ——按系统总压力及温度考虑的 i 组分的热导率，W/(m·K)；

M_i ——混合气体中 i 组分的摩尔质量，kg/kmol；

y_i ——混合气体中 i 组分的摩尔分数。

2.1.3.6 表面张力

(1) 非水溶液混合物 非水溶液混合物的表面张力一般用快速估算法：

$$\sigma_m = \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i \quad (2-16)$$

式中 σ_i ——混合物中 i 组分的表面张力， 10^{-3} N/m；

x_i ——液相中 i 组分的摩尔分数。

对于大多数混合物 $\gamma=1$ ，若为了更好符合， γ 可在 $-3 \sim +1$ 之间选择。

(2) 含水溶液的表面张力 有机分子中烃基是疏水性的，有机物在表面的浓度小于主体部分的浓度，因而当少量的有机物溶于水时，足以影响水的表面张力，如有机溶质含量不超过 1% 时，可应用下式求取溶液的表面张力 σ ：

$$\sigma/\sigma_w = 1 - 0.411 \lg \left(1 + \frac{x}{a} \right) \quad (2-17)$$

式中 σ_w ——纯水的表面张力, 10^{-3}N/m ;

x ——有机溶质的摩尔分数;

α ——物性常数, 见表 2-1。

表 2-1 式 (2-17) 中的物性常数 α 值

化合物	$\alpha \times 10^4$	化合物	$\alpha \times 10^4$	化合物	$\alpha \times 10^4$
丙酸	26	异丁醇	7	异戊酸	1.7
正丙醇	26	甲醇丙酯	8.5	正戊醇	1.7
异丙醇	26	乙酸乙酯	8.5	异戊醇	1.7
乙酸甲酯	26	丙酸甲酯	8.5	丙酸丙酯	1.0
正丙胺	19	二乙酮	8.5	正己酸	0.75
甲乙酮	19	丙酸乙酯	3.1	正庚酸	0.17
正丁酸	7	乙酸丙酯	3.1	正辛酸	0.034
异丁酸	7	正戊酸	1.7	正癸酸	0.0025
正丁醇	7				

二元有机物-水溶液的表面张力在宽浓度范围内可用下式求取:

$$\sigma_m^{1/4} = \varphi_{sw} \sigma_w^{1/4} + \varphi_{so} \sigma_o^{1/4} \quad (2-18)$$

式中 $\varphi_{sw} = x_{sw} V_w / V_s$, $\varphi_{so} = x_{so} V_o / V_s$ 。

并以下列关联式求出 φ_{sw} 、 φ_{so} :

$$B = \lg(\varphi_w^q / \varphi_o) \quad (2-19)$$

$$\varphi_{sw} + \varphi_{so} = 1 \quad (2-20)$$

$$A = B + Q \quad (2-21)$$

$$A = \lg(\varphi_{sw}^q + \varphi_{so}) \quad (2-22)$$

$$Q = 0.441(q/T) \left(\frac{\rho_o V_o^{2/3}}{q} - \rho_w V_w^{2/3} \right) \quad (2-23)$$

$$\varphi_w = x_w V_w / (x_w V_w + x_o V_o) \quad (2-24)$$

$$\varphi_o = x_o V_o / (x_w V_w + x_o V_o) \quad (2-25)$$

式中下角 w、o、s 分别指水、有机物及表面部分; x_w 、 x_o 指主体部分的摩尔分数; V_w 、 V_o 指主体部分的摩尔体积; σ_w 、 σ_o 为纯水及有机物的表面张力。 q 值决定于有机物型式与分子的大小, 见表 2-2。

表 2-2 某些物质的 q 值

物 质	q	举 例
脂肪酸、醇	碳原子数	乙醇 $q=2$
酮类	碳原子数减一	丙酮 $q=2$
脂肪酸的卤代衍生物	碳原子数乘以卤代衍生物与原脂肪酸摩尔体积之比	氯代乙醇 $q=2 \frac{V_s(\text{氯代乙醇})}{V_s(\text{乙酸})}$

若用于非水溶液, q =溶质体积/溶剂摩尔体积。本法对 14 个水系统, 2 个醇-醇系统,