

“十二五”上海重点图书
※ 高等院校应用型化工人才培养丛书

化工原理 课程设计

吴 俊 宋孝勇 韩粉女 丁建飞 © 编著

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

“十二五”上海重点图书

高等院校应用型化工人才培养丛书

化工原理课程设计

吴俊 宋孝勇 编著
韩粉女 丁建飞



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

化工原理课程设计/吴俊等编著. —上海:华东理工大学出版社, 2011. 7

(高等院校应用型化工人才培养丛书)

ISBN 978-7-5628-2698-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 110854 号

内 容 提 要

本书为高等院校应用型化工人才培养丛书之一,是结合课程教学内容的深度和广度的要求及教学目标,为化工专业的化工原理课程设计教学而编写的。书中主要介绍了换热器、板式精馏塔、填料吸收塔、流化床干燥器等的设计以及计算机辅助设计,并给出了相关的设计实例。

本书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,也可作为化工原理课程教学的参考用书。

“十二五”上海重点图书

高等院校应用型化工人才培养丛书

化工原理课程设计

编 著 / 吴 俊 宋孝勇 韩粉女 丁建飞

责任编辑 / 焦婧茹

责任校对 / 金慧娟

封面设计 / 陆丽君 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社

社 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部) 64252344(编辑室)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 16.25

字 数 / 402 千字

版 次 / 2011 年 7 月第 1 版

印 次 / 2011 年 7 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-2698-9/TB·42

定 价 / 35.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

化工原理课程设计是化学工程与工艺及相关专业学生的一门重要实践课程,能够培养学生运用综合知识解决工程问题,提高学生的实际工作能力。本书结合了我们近年来的教学经验,参考了部分化工方面的设计教材编写而成。为了使读者能够系统、全面、方便地掌握有关设计内容,除了较详细地介绍各单元设备设计的设计原理、方法及步骤外,选编了一些参考数据及图表,附有详细的具有工业生产或科研实践背景的设计示例,并附设计任务数则,可供不同专业学生课程设计时选用,便于他们较快地掌握设计的基本方法和技巧。书中主要介绍了列管式换热器及板式换热器的设计、板式精馏塔的设计、填料吸收塔的设计、流化床干燥器的设计等内容。为了增加学生的学习兴趣,提高教学质量,本书引入计算机技术编写了“计算机辅助设计”一章,主要介绍 Aspen Plus、PRO/II 模拟软件、计算机辅助编程及设计实例,这对培养学生的科学素质、创新思维能力、分析判断能力和综合设计能力将起到良好的促进作用。

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、化工类专业毕业设计的参考资料,也可作为化工原理课程教学的参考用书。作为教材使用时,各专业可根据课程设计要求 and 学时的不同而灵活选择设计内容。

全书由吴俊统稿。第 1、2、6 章由吴俊编写,第 3、4、5 章及附录由韩粉女、宋孝勇、丁建飞共同编写。本书在编写过程中得到盐城工学院化工系各位同仁的关心和帮助,刘珊珊参加了本书的校对工作,在此一并表示感谢。

由于编者学识水平有限,经验不足,书中难免有不足之处,敬请各位读者批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 化工原理课程设计的目的和要求	1
1.2 化工原理课程设计的内容和步骤	2
1.2.1 课程设计的基本内容	2
1.2.2 课程设计的步骤	2
1.2.3 带控制点的工艺流程图的绘制	3
1.2.4 主体设备工艺条件图	6
1.3 化工原理课程设计的参数	6
1.3.1 物性参数	6
1.3.2 过程参数	10
1.3.3 结构参数	11
2 换热器的设计	12
2.1 换热器的分类	13
2.1.1 直接接触式换热器(或称混合式换热器)	13
2.1.2 蓄热式换热器	13
2.1.3 间壁式换热器	13
2.2 换热器设计与选型的原则	14
2.3 管壳式换热器的设计	15
2.3.1 设计方案的确 定	15
2.3.2 管壳式换热器的结构	21
2.3.3 管壳式换热器的设计计算	25
2.3.4 管壳式换热器设计示例	32
2.4 板式换热器的设计	39
2.4.1 板式换热器的基本结构	40
2.4.2 板式换热器设计的一般原则	43
2.4.3 板式换热器的设计计算	45
2.4.4 板式换热器设计示例	48
3 板式精馏塔的设计	53
3.1 概述	54
3.1.1 塔设备的类型	54

3.1.2	板式塔与填料塔的比较及选型	55
3.2	板式塔的设计	56
3.2.1	设计方案的确定	56
3.2.2	塔板的类型与选择	57
3.2.3	板式塔的塔体工艺尺寸计算	60
3.2.4	板式塔的塔板工艺尺寸计算	64
3.2.5	筛板的流体力学验算	72
3.2.6	塔板的负荷性能图	76
3.2.7	板式塔的结构与附属设备	77
3.2.8	筛板塔设计示例	81
4	填料吸收塔的设计	95
4.1	概述	96
4.2	设计方案的确定	97
4.2.1	吸收装置的流程	97
4.2.2	吸收剂的选择	99
4.2.3	吸收操作条件的选择	100
4.3	填料的选择	101
4.3.1	工业填料的分类及其特点	101
4.3.2	填料类型的选择	108
4.3.3	填料规格的选择	108
4.3.4	填料的材质选择	109
4.4	吸收操作中的气液平衡	110
4.4.1	等温吸收	110
4.4.2	非等温吸收气液平衡线的确定	111
4.5	填料吸收塔的工艺设计	112
4.5.1	物料衡算与操作线方程	112
4.5.2	最小吸收剂用量和吸收剂用量	114
4.5.3	塔径计算	115
4.5.4	填料层高度计算	119
4.5.5	填料层的压降	125
4.6	塔内件	126
4.6.1	液体分布装置	127
4.6.2	液体再分布装置	130
4.6.3	填料支承装置	131
4.6.4	填料压紧装置	134
4.6.5	气体和液体的进出口装置	134
4.6.6	除沫器的设置	135
4.7	填料吸收塔设计示例	137

5 流化床干燥器的设计	142
5.1 概述	143
5.1.1 流态化现象	143
5.1.2 流化床干燥器的特性和使用条件	145
5.1.3 流化床干燥器的分类及型式	146
5.1.4 干燥器选型时应考虑的因素	153
5.2 流化床干燥器的设计	154
5.2.1 流化床干燥装置的设计步骤	155
5.2.2 干燥条件的确定	155
5.2.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算	157
5.2.4 流化床干燥器主要技术参数的确定	160
5.2.5 流化床干燥器的设计计算	166
5.2.6 流化床干燥器的内部结构设计	170
5.3 附属设备的设计选型	175
5.3.1 空气加热器的选择	175
5.3.2 风机的选择	176
5.3.3 供料器	180
5.3.4 气固分离器的选择	188
5.4 卧式多室流化床干燥器的设计示例	189
6 计算机辅助设计	196
6.1 化工过程模拟软件	196
6.1.1 Aspen Plus 软件	198
6.1.2 PRO/II 软件	212
6.2 化工过程计算机辅助编程	220
6.2.1 精馏塔物料衡算与平衡数据计算	221
6.2.2 精馏塔塔顶温度的计算	222
6.2.3 精馏塔塔釜温度、全塔效率和实际板数的计算	222
6.2.4 精馏塔进料温度的计算	223
6.2.5 精馏塔内两段的物性数据及上升蒸气量和下降液体量的计算	224
附录	228
参考文献	252

1 绪 论

1.1 化工原理课程设计的目的和要求

化工原理课程设计是学生在掌握基础课程及化工原理课程内容之后,进一步学习化工设计的相关知识,培养学生化工设计能力的重要教学环节,也是学生综合运用化工原理和相关选修课程知识,联系化工生产实际,完成以化工单元操作为主的化工设计实践。通过这一环节,使学生初步掌握化工单元操作设计的基本程序和方法,熟悉查阅技术资料和标准,正确选用公式和数据,运用简洁文字和工程语言正确表述设计思想和结果,进行制图以及计算机辅助计算,并在此过程中使学生养成尊重实际、实事求是的科学态度,逐步树立正确的设计思想、经济观点和严谨、认真的工作作风,提高学生综合运用所学知识独立解决实际问题的能力。

课程设计不同于平时的作业,在设计中需要学生自己做出决策,即自己确定方案,选择流程,查取资料,进行过程和设备计算,并要对自己的选择做出论证和核算,经过反复的分析比较,择优选定最理想的方案和最合理的设计。所以,课程设计是培养学生独立工作能力的有益实践。

在课程设计中,学生应该注重以下几种能力的训练和培养:

1. 查阅资料,选用公式和搜集数据的能力。通常设计任务书给出后,有许多数据需由设计者去搜集,有些物性参数要查取或估算,计算公式也由设计者自行选用,这就要求设计者运用各方面的知识,通过详细而全面的考虑后才能确定。数据可以从已发表的文献中搜集,也可以从生产现场中搜集。

2. 树立在正确的设计思想的指导下去分析和解决实际问题的能力。在设计过程中,树立技术上的先进性与可行性及经济上的合理性的工程观点,并注意操作时的劳动条件和环境保护的要求。即对于课程设计不仅要求计算正确,还要求从工程的角度综合考虑各种因素,从总体上得到最佳结果。

3. 准确、迅速地进行工程计算的能力。设计计算是一个反复试算的过程,计算工作量很大,因此准确与迅速(含必要的编程能力)必须同时强调。

4. 掌握化工设计的基本程序和方法,学会用简洁的文字和适当的图表表达自己的设计思想。

1.2 化工原理课程设计的内容和步骤

主要围绕以某一典型单元设备(板式塔、填料塔、换热器、萃取塔、干燥器、蒸发器等)的设计为中心,训练学生非定型设备的设计和定型设备的选型能力。

1.2.1 课程设计的基本内容

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. 主要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;
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、物料流量、能量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。

完整的化工原理课程设计报告应由设计说明书和图纸两部分组成。设计说明书应包括所有论述、原始数据、计算、表格等,是设计的书面总结,也是后续设计工作的主要依据,编排顺序如下:

1. 封面(包括课程设计题目、班级、姓名、指导教师、时间等,见本书附录 I 所示的标题页示例);
2. 设计任务书;
3. 目录;
4. 设计方案简介;
5. 工艺流程简图及流程说明;
6. 设计条件及主要物性参数表;
7. 工艺设计计算及主体设备设计;
8. 辅助设备的计算及选型;
9. 设计结果汇总一览表;
10. 设计小结(设计评述及设计者的学习体会);
11. 附图(工艺流程简图及主体设备工艺条件图);
12. 参考资料;
13. 符号说明。

1.2.2 课程设计的步骤

化工原理课程设计的步骤如下:

1. 动员和布置任务；
2. 阅读指导书和查阅资料；
3. 现场调查；
4. 设计计算，绘图和编写说明书；
5. 考核和答辩。

整个设计主要由论述、计算和绘图三部分组成。论述应该条理清晰，观点明确；计算要求方法正确，误差小于设计要求，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结果。

设计后期的答辩，是及时了解学生设计能力的补充过程，也是提高设计水平、交流心得和扩大收获的重要过程。答辩通常包括个别答辩和公开答辩两种形式。个别答辩的目的不仅是对学生进行全面考核，更主要的是促进学生开动脑筋，提高设计水平。所以，在个别答辩后，允许学生修改补充自己的图纸和说明书。公开答辩是在个别答辩的基础上，选出几个有代表性的学生在全班公开答辩，实际上是以他们的中心发言来引导全班性的讨论，目的是交流心得、探讨问题和扩大收获。

1.2.3 带控制点的工艺流程图的绘制

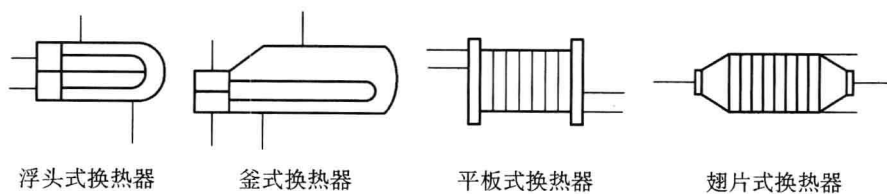
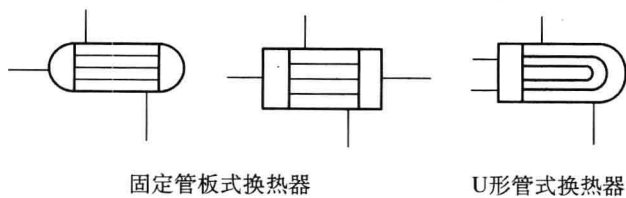
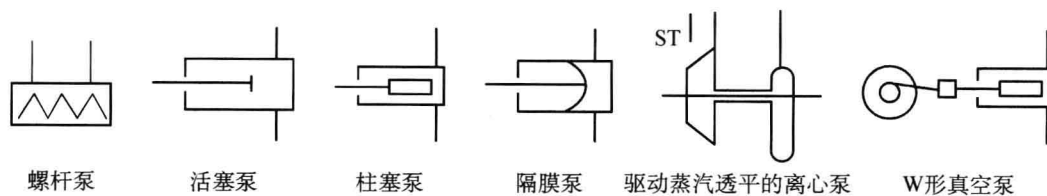
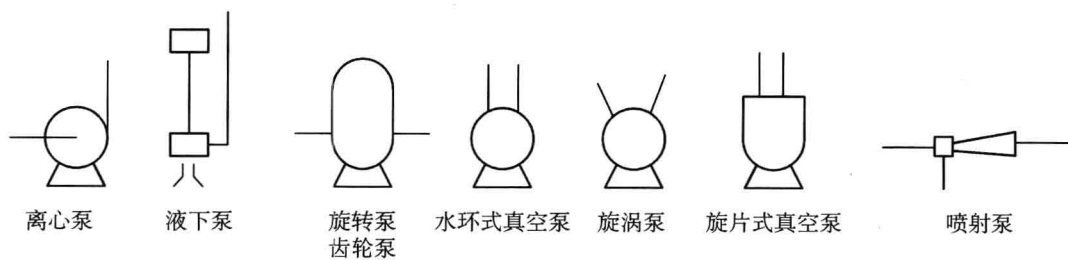
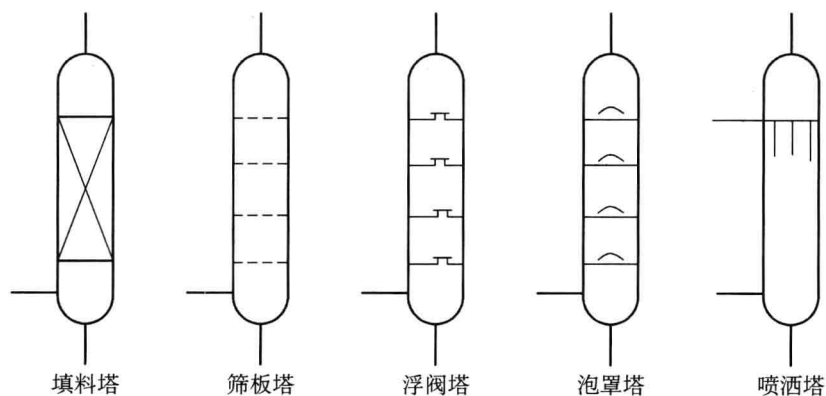
带控制点的工艺流程图是一种示意性的图样，它以形象的图形、符号、代号表示化工设备、管路、附件和仪表自控等，借以表达一个生产中物料及能量的变化始末。

工艺流程图绘制范围如下：

1. 必须反映全部工艺物料和产品所经过的设备；
2. 应全部反映主要物料管路，并表达进出装置界区的流向；
3. 冷却水、冷冻盐水、工艺用的压缩空气、蒸气（不包括副产品蒸气）及蒸气冷凝液系统等整套设备和管线不在图内表示，仅示意工艺设备使用点的进出位置；
4. 标出有助于用户确认及上级或有关领导审批用的一些工艺数据（如温度、压力、物料的质量流量或体积流量、密度、换热量等）；
5. 包括绘制图例，图画上必要的说明和标注，并按图签规定签署；
6. 必须标注工艺设备，工艺物流线上的主要控制点符及调节阀等。这里的控制点符包括被测变量的仪表功能（如调节、记录、指示、积算、联锁、报警、分析、检测及集中，就地仪表等）。

工艺流程图的绘制步骤如下：

1. 用细实线（0.2 mm）画出设备简单外形，设备一般按 1：100 或 1：50 的比例绘制，如某种设备过高（如精馏塔）、过大或过小，则可适当放大或缩小；
2. 常用设备外形可参照图 1.1，对于无示例的设备可绘出其象征性的简单外形，表明设备的特征即可；
3. 用粗实线（0.7 mm）画出连接设备的主要物料管线，并注出流向箭头；
4. 物料平衡数据可直接在物料管道上用细实线引出并列成表；
5. 辅助物料管道（如冷却水、加热蒸汽等）用中粗实线（0.5 mm）表示；
6. 设备的布置原则上按流程图从左至右，图上一律不标示设备的支脚、支架和平台等，一般情况下也不标注尺寸。



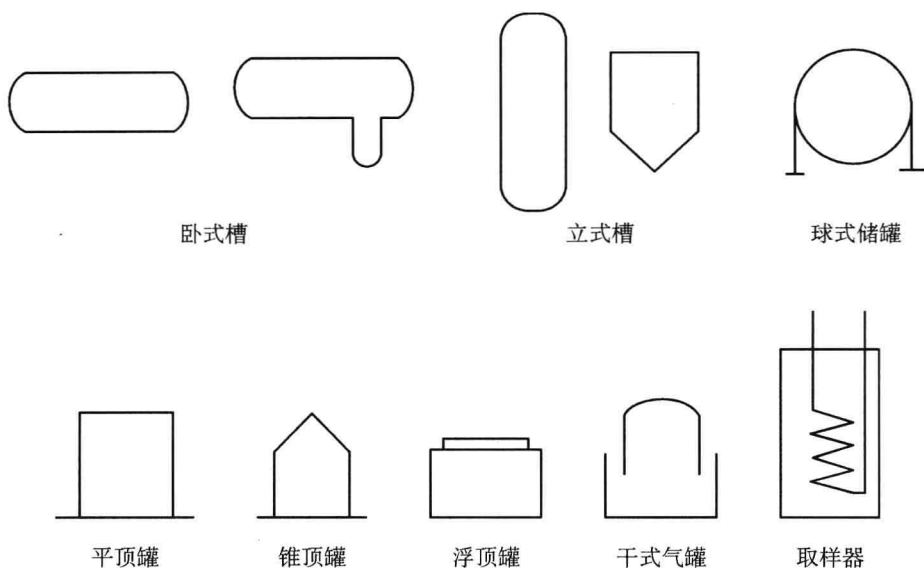


图 1.1 流程图设备外形图例

工艺物料的介质代码自行编制,一般以分子式及其编写字母表示。辅助物料和公用系统介质代号规定见表 1.1。

表 1.1 辅助物料和公用系统介质代号

代号	中文名称	代号	中文名称
W	水	S	蒸汽
BW	锅炉给水	HS	高压蒸汽
BR	盐水	LS	低压蒸汽
BRR	盐水回水	MS	中压蒸汽
BRS	盐水补给水	C	冷凝液
CW	(循环)冷却水	PWW	生产废水
CWR	(循环)冷却回水	CS	化学污水
RW	冷却水(用于零度以上)	RW	冷冻回水

图上应标注单元设备的代号,单元设备分类代号见表 1.2。

表 1.2 单元设备分类代号

单元设备	代号	单元设备	代号
现场装置、基础、混凝土构件	A	炉子	B
转化器、反应器、再生器	D	换热器	C
槽、贮罐	F	塔	E
泵、压缩机、风机、驱动器、鼓风机	J	管道	M
特殊装置	L	电气	N
仪表	Q		

1.2.4 主体设备工艺条件图

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。

一般主体设备在不同单元操作中是不同的,即使同一设备在不同单元操作中其作用也不相同,如某一设备在某个单元操作中为主体设备,而在另一单元操作中就可能变为辅助设备。例如,换热器在传热中为主体设备,而在精馏或干燥操作中就变为辅助设备。泵、压缩机等也有类似情况。

主体设备工艺条件图是将设备的结构设计和工艺尺寸的计算结果用一张总图表示出来。图面上应包括如下内容:

1. **设备图形** 指主要尺寸(外形尺寸、结构尺寸、连接尺寸)、接管、人孔等;

2. **技术特性** 指装置的用途、生产能力、最大允许压强、最高介质温度、介质的毒性和爆炸危险性;

3. **设备组成一览表** 注明组成设备的各部件的名称等。

需要指出的是,以上设计全过程统称为设备的工艺设计。完整的设备设计,应在上述工艺设计基础上再进行机械强度设计,最后提供可供加工制造的施工图。

1.3 化工原理课程设计的参数

在化工原理课程设计过程中,将涉及众多的物理量和生产控制指标,将其统称为设计参数。

1.3.1 物性参数

在化工原理课程设计中,既涉及化工过程,又涉及化工设备及材料等。所以在搜集和查阅文献时,不能只限于教材及化工类资料,而应从多方面查寻,才能备齐所用的数据和资料。当制订过程工艺方案时,应从物系所属生产和加工的专业类书籍中查寻;当深入了解单元操作过程时,应从查阅单元操作的专著入手;当考虑设备结构时,则应参考机械制造类手册确定所用规范等;当进行工艺设计计算时,则要涉及系统物系的物性参数。从物性数据手册中收集到的物性数据,常常是纯组分的物性,而设计所遇到的物系一般为混合物。有些混合物的热力学参数可通过热力学方程进行推算,此类工作繁琐,专业性太强,实现难度较大,而通过实验研究,常常又受到条件限制。所以,通常均采用一些经验混合规则作近似处理,获取混合物的物性参数。下面将对部分常规物系经验混合规则加以介绍。

1. 密度 ρ (单位 kg/m^3)

1) 混合气体密度 ρ_{gm}

当压力不太高时,混合气体的密度可近似地由式(1.1)或式(1.2)求得。

$$\rho_{\text{gm}} = \sum_{i=1}^n \rho_{\text{gi}} y_i \quad (1.1)$$

$$\rho_{\text{gm}} = \frac{m}{V} = \frac{pM_m}{RT} \quad (1.2)$$

式中, ρ_{gi} , y_i 分别为混合气体中组分 i 的密度和摩尔分数; M_m 为混合气体的平均相对分子质量。对压力较高的混合气体应引入压缩因子 Z_i 予以校正。

2) 混合液体的密度 ρ_{Lm}

混合液体的密度可由式(1.3)求得。

$$\frac{1}{\rho_{\text{Lm}}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{w_i}{\rho_{\text{Li}}} \right) \quad (1.3)$$

式中, w_i 、 ρ_{Li} 分别为液体混合物中组分 i 的质量分数和密度。

2. 黏度 μ (单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$)

1) 互溶液体的混合物黏度 μ_{Lm}

由 Kendall - Mouroe 混合规则得:

$$\mu_{\text{Lm}}^{1/3} = \sum_{i=1}^n (x_i \mu_{\text{Li}}^{1/3}) \quad (1.4)$$

式中, μ_{Li} 为混合液中组分 i 的黏度; x_i 为组分 i 的摩尔分数。

式(1.4)适用于非电介质、非缔合性液体, 两组分的相对分子质量差及黏度差不大 ($\Delta\mu < 15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) 的液体。对油类计算误差为 2%~3%。

2) 混合气体黏度 μ_{gm}

(1) 常压下纯气体黏度 μ_{gi} 的计算

常压下纯气体黏度可由式(1.5)求得。

$$\mu_{\text{gi}} = \mu_{0\text{gi}} \left(\frac{T}{273.15} \right)^m \quad (1.5)$$

式中, $\mu_{0\text{gi}}$ 为气体 i 在 0°C 、 1 atm ^① 下的黏度, 单位 $\text{mPa} \cdot \text{s}$; m 为关联指数。

某些常用气体的 $\mu_{0\text{gi}}$ 可由表 1.3 查得, m 值由表 1.4 查得。

表 1.3 0°C 、 1 atm 下的气体的黏度 ($\mu_{0\text{gi}}$ 值)

气体	$\mu_{0\text{gi}} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	气体	$\mu_{0\text{gi}} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$
CO_2	1.34×10^{-2}	CS_2	0.89×10^{-2}
H_2	0.84×10^{-2}	SO_2	1.22×10^{-2}
N_2	1.66×10^{-2}	NO_2	1.79×10^{-2}
CO	1.66×10^{-2}	NO	1.35×10^{-2}
CH_4	1.20×10^{-2}	HCN	0.98×10^{-2}
O_2	1.87×10^{-2}	NH_3	0.96×10^{-2}
H_2S	1.10×10^{-2}	空气	1.71×10^{-2}

表 1.4 μ_{gi} 计算式的 m 值

气体	m 值	气体	m 值
CH_4	0.8	CO	0.758
CO_2	0.935	NO	0.89
H_2	0.771	NH_3	0.981
N_2	0.756	空气	0.768

① $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$

(2) 压力对气体黏度的影响

有压力时的气体黏度 μ_p , 可用对比态原理从压力对气体黏度的影响图中查出。在对比温度 T_r 和对比压力 p_r 大于 1 的情况下, 可由图 1.2 求得。多数情况下, 误差小于 10%。

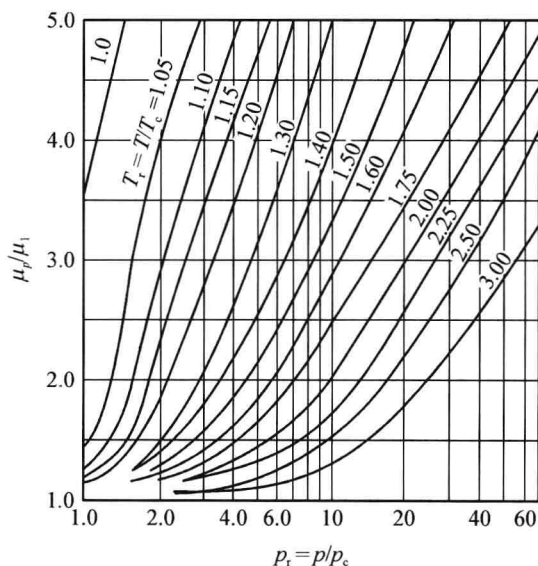


图 1.2 压力对气体黏度的影响

图 1.2 中, μ_1 为压力等于 1 atm 时纯组分气体的黏度, μ_p 为压力 p 下的黏度。

(3) 气体混合物黏度 μ_{gm}

在低压下混合气体黏度由式(1.6)求得。

$$\mu_{gm} = \frac{\sum y_i \mu_{gi} (M_i)^{1/2}}{\sum y_i (M_i)^{1/2}} \quad (1.6)$$

式中, μ_{gi} 为组分 i 的黏度; M_i 为组分 i 的相对分子质量。式(1.6)对含 H_2 量较高的混合气体不适用, 误差高达 10%。式(1.6)中各组分的黏度 μ_{gi} 由图 1.2 估算获得, 或查物性手册获得。

3. 导热系数

1) 液体混合物导热系数 λ_{Lm}

(1) 有机液体混合物导热系数

有机液体混合物导热系数 λ_{Lm} 可近似地由式(1.7)求得。

$$\lambda_{Lm} = \sum_{i=1}^n w_i \lambda_{Li} \quad (1.7)$$

(2) 有机液体水溶液导热系数

有机液体水溶液导热系数 λ_{Lm} 可近似地由式(1.8)求得。

$$\lambda_{Lm} = 0.9 \sum_{i=1}^n w_i \lambda_{Li} \quad (1.8)$$

(3) 胶体分散液及乳液

胶体分散液及乳液 λ_{Lm} 可近似地由式(1.9)求得。

$$\lambda_{1,m} = 0.9\lambda_c \quad (1.9)$$

式中, λ_c 为连续相组分的导热系数。

2) 气体混合物的导热系数 λ_{gm}

(1) 非极性气体混合物

由式(1.10)Broraw 法估算非极性气体混合物的导热系数 λ_{gm} 。

$$\lambda_{gm} = 0.5(\lambda_{sm} + \lambda_{gm}) \quad (1.10)$$

式中, $\lambda_{sm} = \sum_{i=1}^n \lambda_{gi} y_i$; $\lambda_{gm} = 1 / \sum_{i=1}^n (y_i / \lambda_{gi})$ 。

(2) 一般气体混合物

对一般气体混合物,可由式(1.11)求得。

$$\lambda_{gm} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{gi} y_i (M_i)^{1/3}}{\sum_{i=1}^n y_i (M_i)^{1/3}} \quad (1.11)$$

式中, λ_{gi} 为组分 i 的导热系数。

4. 比热容

气体或液体混合物的比热容由式(1.12)或式(1.13)估算。

$$c_{pm} = \sum_{i=1}^n x_i c_{pi} \quad (1.12)$$

$$c'_{pm} = \sum_{i=1}^n w_i c'_{pi} \quad (1.13)$$

式中, c_{pi} 为组分 i 每千摩尔的比热容, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$; c'_{pi} 为组分 i 每千克的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

式(1.12)和式(1.13)的使用条件是:

- ① 各组分不互混;
- ② 低压气体混合物;
- ③ 相似的非极性液体混合物(如碳氢化合物、液体金属);
- ④ 非电介质水溶液(有机物水溶液);
- ⑤ 有机溶液;
- ⑥ 不适用于混合热较大的互溶混合液。

5. 汽化潜热

混合物汽化潜热可由式(1.14)或式(1.15)估算。

$$r_m = \sum_{i=1}^n x_i r_i \quad (1.14)$$

$$r'_m = \sum_{i=1}^n w_i r'_i \quad (1.15)$$

式中, r_m 为组分 i 每千摩尔的汽化潜热, kJ/kmol ; r'_m 为组分 i 每千克的汽化潜热, kJ/kg 。

6. 表面张力

混合物表面张力 σ 由式(1.16)求得。

$$\sigma_m = \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i \quad (1.16)$$

式中, x_i 为液相组分 i 的摩尔分数; σ_i 为组分 i 的表面张力。本式仅适于系统小于或等于大气压的条件。当大于大气压时, 则参考有关数值手册。由于混合物系种类繁多, 性质差异较大, 一种混合规则难以适应各种混合物的需要, 对于一些特殊混合物的性质还应查阅专用物性数据手册。

1.3.2 过程参数

表明过程进行的状态和特征的物理量称为过程参数, 常见的有温度(T)、压强(p)、体积流量(V)、组成(c)等。其中温度、压强又称状态参数。过程参数也常作为控制生产过程进行的主要操作控制指标。

设计时, 过程参数一般由任务书给定, 少数是由设计者根据设计目的和条件经反复调整后确定, 有时也可由算图查得或用经验公式计算得到。

度量物体温度的温标有以下四种。

1. 热力学温度(Kelvin Scale) 习惯上又称绝对温度。规定水的三相点温度为 273.16 K。K 代表开尔文, 简称“开”, 是热力学温度单位。每 1 K 是水的三相点热力学温度的 1/273.16。这一温度实际上是以理想气体定律与热力学定律为基础而得出的最低可能温度, 并以此作为零点, 而水的三相点温度则为 273.16 K。

开氏温度被定为 SI 制温度单位, 也是我国法定单位制单位。

2. 摄氏温度(Celsius Scale) 以水的三相点温度作为 0°C , 水的正常沸点为 100°C 而规定的温标。它作为一个具有专门名称的导出单位而引入 SI 制, 也是我国法定单位制规定可同时使用的温度单位。

当表示温度差和温度间隔时, $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。

3. 华氏温度(Fahrenheit Scale) 是英制采用的温标。它是以一种冰-盐混合物的温度作为零点, 以健康人的血液温度为 96°F 的温标。其单位为华氏度($^{\circ}\text{F}$)。

4. 兰金温度(Rankine Scale) 与开氏温标相类似, 也是以热力学最低可能温度作为零点的一种绝对温标, 其温度间隔与华氏温度相同, 单位为兰金度($^{\circ}\text{R}$)。华氏 0°F 为 -459.58°R (常取 -460°R)。

不同温标间的换算关系如式(1.17)所示。

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.16 = \frac{5}{9}[t(^{\circ}\text{F}) + 459.58] = \frac{5}{9}t(^{\circ}\text{R}) \quad (1.17)$$

资料、手册中常用的压强单位有: 标准大气压(又称为物理大气压, atm), 工程大气压(at^①), 毫米汞柱(mmHg), 毫米水柱(mmH₂O), 磅/英寸²(lb/in²)及 kgf/cm²。SI 制单位为

① 1 at = 98 066.5 Pa