

卓越 工程师教育培养计划系列教材
ZHUOYUE GONGCHENGSHI
JIAOYU PEIYANG JIHUA XILIE JIAOCAI

化工原理

上册

王国胜 ◎ 主编

孙怀宇 王祝敏 ◎ 副主编

HUAGONG YUANLI



化学工业出版社

卓越

工程师教育培养计划系列教材

化工原理

上册

王国胜 ◎ 主编

孙怀宇 王祝敏 ◎ 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理》重点介绍了化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。全书分为上、下两册，上册主要内容为：绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系分离、传热和蒸发；下册主要内容为：蒸馏、气体吸收、干燥、液液萃取及其他分离技术。

《化工原理》理论联系实际，工程特点明显，以单元过程与装备为主线，着重讲述单元过程与装备的工作原理、设计与计算、优化与强化，并适当介绍本学科的新进展。内容简练，深入浅出，突出重点，有利于提高学生分析和解决工程实际问题的能力。

《化工原理》可作为高等院校化工及相关专业的教材，也可供化工及相关行业的科学技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理. 上/王国胜主编. —北京: 化学工业出版社, 2018. 4
卓越工程师教育培养计划系列教材
ISBN 978-7-122-31644-8

I. ①化… II. ①王… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 041267 号

责任编辑: 徐雅妮 丁建华

责任校对: 边 涛

装帧设计: 关 飞

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 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市耿发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 334 千字 2018 年 10 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: 35.00 元

版权所有 违者必究

前言

“卓越工程师教育培养计划”是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的重大改革项目，旨在培养造就一大批创新能力强，适应经济社会发展需要的高质量工程技术人才。卓越工程师教育培养计划的核心就是企业深度参与人才培养。高等工程教育要强化服务意识，创新培养机制，改革培养模式，提升学生的工程实践能力、创新能力和国际竞争力。

化工原理是化工类专业的专业基础课，工程特点明显，主要讲述化工单元操作的过程与装备，课程内容紧密联系化工生产实际。本书依照工程学习的认识规律，按理论基础、单元过程与装备的工作原理、设计与计算、优化与强化这样一条主线讲解各个单元过程，以利于学生学习和理解。本书增加了联系工程实际的设计和操作性案例式例题，并提供了部分过程与装备的三维工程图示，旨在理论联系实际，提高学生分析和解决工程实际问题的能力。

全书分上、下两册，上册包括绪论以及流体流动、流体输送机械、非均相物系分离、传热和蒸发5章；下册包括蒸馏、气体吸收、干燥、液液萃取及其他分离技术5章。本书可作为高等院校化工类专业教材，也可供有关科技人员参考。

本书由王国胜主编，孙怀宇、王祝敏副主编。第1章流体流动、第2章流体输送机械由孙怀宇编写，第3章非均相物系分离、第10章其他分离技术由高枫编写，第4章传热由裴世红编写，第5章蒸发、第9章液液萃取由陈立峰编写，绪论、第6章蒸馏、第7章气体吸收由王祝敏、王国胜编写，第8章干燥由范俊刚编写。

由于编者水平有限，书中难免有不当和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2018年6月

目 录

绪论 / 1

第 1 章 流体流动 / 2

1.1 概述	2
1.2 流体的物理性质	3
1.2.1 流体的密度	3
1.2.2 比体积	4
1.2.3 流体的黏度	4
1.3 流体静力学基本方程式及应用	6
1.3.1 流体的压力	6
1.3.2 流体静力学基本方程式	7
1.3.3 流体静力学基本方程式的应用	9
1.4 流体动力学	13
1.4.1 管路系统的构成	13
1.4.2 流量与流速	15
1.4.3 管道的选用	15
1.4.4 稳定流动与非稳定流动	17
1.4.5 连续性方程式	17
1.4.6 伯努利方程式	18
1.4.7 伯努利方程式的应用	22
1.5 流体流动的阻力	24
1.5.1 流体流动类型与雷诺数	24
1.5.2 流体在圆管内流动时的速度分布	25
1.5.3 边界层的概念	26
1.6 流动阻力计算	28
1.6.1 直管阻力计算式	28
1.6.2 摩擦系数计算方法	29
1.6.3 非圆形管内流动阻力	33
1.6.4 局部阻力的计算	34
1.6.5 流体在管内流动的总阻力损失计算	35
1.7 管路计算	38
1.7.1 简单管路	38

1.7.2 复杂管路	39
1.8 流速和流量的测量	40
1.8.1 测速管	40
1.8.2 孔板流量计	41
1.8.3 文丘里流量计	43
1.8.4 转子流量计	44
第2章 流体输送机械 / 48	
2.1 概述	48
2.1.1 流体输送机械的基本要求	48
2.1.2 流体输送机械的分类	48
2.2 离心泵	49
2.2.1 离心泵的工作原理	49
2.2.2 离心泵的主要部件	50
2.2.3 离心泵的主要性能参数	52
2.2.4 离心泵的特性曲线及其影响因素	53
2.2.5 离心泵的工作点与流量调节	56
2.2.6 离心泵的汽蚀现象与安装高度	60
2.2.7 离心泵的类型与选用	63
2.3 其他类型化工用泵	66
2.3.1 往复泵	67
2.3.2 计量泵	69
2.3.3 齿轮泵	69
2.3.4 螺杆泵	70
2.3.5 旋涡泵	70
2.4 气体输送机械	71
2.4.1 离心式通风机、鼓风机和压缩机	71
2.4.2 往复式压缩机	74
2.4.3 真空泵	76
第3章 非均相物系分离 / 80	
3.1 概述	80
3.1.1 混合物的分类	80
3.1.2 非均相混合物分离在化工生产中的应用	80
3.1.3 常见非均相物系的分类和分离方法	81
3.2 沉降	81
3.2.1 颗粒的特性	82
3.2.2 重力沉降	83
3.2.3 离心沉降	92
3.3 过滤	97
3.3.1 流体通过颗粒床层压降	97

3.3.2	过滤基本概念	100
3.3.3	影响过滤的因素	101
3.3.4	过滤基本方程式	102
3.3.5	过滤设备	111
3.3.6	滤饼洗涤	115
3.3.7	过滤机的生产能力	116
3.4	流态化	118
3.4.1	气-固流态化	118
3.4.2	液-固流态化	120
3.5	非均相物系分离过程强化	121
3.5.1	沉降过程的强化	121
3.5.2	过滤过程的强化	122
3.5.3	过滤技术进展	122

第4章 传热/ 128

4.1	概述	128
4.1.1	稳态传热与非稳态传热	129
4.1.2	冷热流体的接触方式	129
4.1.3	载热体及其选择	129
4.1.4	传热速率与热流密度	130
4.1.5	传热的基本方式	130
4.1.6	两流体通过间壁的传热过程	131
4.2	热传导	132
4.2.1	基本概念和傅里叶定律	132
4.2.2	平壁的热传导	134
4.2.3	圆筒壁的热传导	138
4.3	对流传热	141
4.3.1	对流传热过程分析	141
4.3.2	牛顿冷却定律和传热系数	142
4.3.3	无相变的对流传热系数的经验关联式	144
4.3.4	有相变的传热系数	147
4.4	热辐射	150
4.4.1	基本概念	150
4.4.2	基本定律	151
4.4.3	两固体间的辐射传热	152
4.5	传热过程的计算	153
4.5.1	传热过程的数学描述	153
4.5.2	传热平均温度差	155
4.5.3	总传热系数	157
4.5.4	壁温的计算	162
4.5.5	换热器的操作型计算	163

4.5.6	换热器的设计型计算	163
4.5.7	传热单元数法	164
4.6	换热器	165
4.6.1	换热器的类型	165
4.6.2	间壁式换热器	165
4.6.3	强化传热	170
4.6.4	列管式换热器的设计与选用	171
4.7	强化传热技术的工程应用	177
4.7.1	审核实验数据的适用性	177
4.7.2	制造问题	177
4.7.3	运行问题	178

第5章 蒸发 / 183

5.1	概述	183
5.2	蒸发过程与设备	184
5.2.1	循环型(非膜式)蒸发器	184
5.2.2	单程型(膜式)蒸发器	185
5.2.3	除沫器	187
5.3	单效蒸发	188
5.3.1	单效蒸发流程	188
5.3.2	溶剂的蒸发量	188
5.3.3	加热蒸汽的消耗量	189
5.3.4	蒸发器的传热面积	190
5.4	多效蒸发	190
5.4.1	多效蒸发的概念	190
5.4.2	多效蒸发的流程	190
5.4.3	多效蒸发的计算过程	191
5.4.4	蒸发效数的选择及工业应用注意事项	194

附录 / 197

附录1	部分物理量的SI单位及量纲	197
附录2	水与饱和水蒸气的物理性质	197
附录3	干空气的物理性质 ($p=101.33\text{kPa}$)	200
附录4	某些液体的重要物理性质	201
附录5	某些气体的重要物理性质	203
附录6	管子规格(摘录)	204
附录7	IS型单级单吸离心泵性能表(摘录)	205
附录8	管壳式换热器系列标准及型号表示方法	207
附录9	其他重要图表	213

参考文献 / 214

绪论

■化工过程

化学工业是过程工业，是一个将原料经过化学加工后获得工业化学品的过程。化工过程经常被描述为流体的流动、传热与传质过程以及化学反应过程，即“三传一反”，主要由传递过程及反应过程与装置组成。按照化学反应过程要求，原料的纯度、粒度等要符合质量指标要求，反应得到的产品（纯物质或混合物）也需要符合质量要求，所以化工过程经常分为：前处理（干燥、过滤等）、反应与后处理（精馏、吸收等）过程。现代化的大型化工企业设备林立，其核心装置是化学反应器，但是多数装置是为保证化学反应高效进行的前、后处理设备。前、后处理过程的设备投资与操作费用是化工企业生产过程中重要的经济效益因素。

■单元过程

除化学反应过程以外，化工生产过程可分为物料的压力与输送、物料的混合与分散、物料的加热与冷却、混合物的分离等。单元过程就是过程与装备，目标任务一个是设计，另一个是操作。研究各个单元过程就是为了掌握其规律，设计设备结构与尺寸，进而进行设备的操作和使用，最终实现对设备和过程的优化与强化，以利于化工生产系统高效化。

■化工原理课程

对化工企业或化学工业中的单元过程进行研究，最终服务于化工生产是化工原理课程的根本目的。各个单元过程虽然多种多样，但是从物理本质上化工单元过程基本属于动量、热量与质量的传递过程，传递过程的基本原理就是传递过程的速率等于传递过程的推动力与传递过程的阻力之比。流动、传热与传质过程的原理构成了化工原理课程的核心内容，在稳态条件下，单元过程的传递阻力分析与研究是化工原理课程的重点内容，也为正确理解化工原理课程内容、利用所学知识进行化工设计，实现稳定生产，以及优化和强化化工单元过程提供了正确方向。

■化工原理课程所回答的问题

化工原理课程要回答的问题源于化工实际生产，最终必然服务于化工实际生产。根据过程的目标要求，化工原理分为流动、传热与传质问题，继而分解为相应的单元过程，根据各个单元过程的特点，依据单元过程的原理，进行过程与装备的设计，确定设备结构与尺寸，选择和制作符合标准和要求的设备，按照工程设计图纸要求进行设备安装，有效地操作和调节过程与设备，适应生产的不同要求。最终达到利用所学知识开展技术创新，实现过程与装备优化和强化，高效进行化工生产。

第1章

流体流动

本章学习要求

1. 了解流体流动原理、流动状态、流动阻力的基本概念。
2. 掌握使用静力学方程解决实际问题的方法。
3. 掌握使用连续性方程、伯努利方程及阻力计算方程进行计算并解决实际问题的方法。
4. 了解管子的选用方法。
5. 了解基于流体流动原理的流量测量方法及设备。

1.1 概述

液体和气体统称为流体，流体的特征是具有流动性，即其抗剪和抗张的能力很小，无固定形状，随容器的形状而变化，在外力作用下其内部发生相对运动。

在研究流体流动时，常将流体视为由无数流体微团组成的连续介质。所谓流体微团或流体质点是指：大小与容器或管道相比是微不足道的，但是比起分子自由程长度却要大得多的小块流体。它包含足够多的分子，能够用统计平均的方法来求出宏观参数（如压力、温度），从而可以观察这些宏观参数的变化情况。连续性假设首先意味着流体介质是由连续的液体质点组成；其次还意味着质点运动过程的连续性。在本书的研究范围内，可以将流体视为连续介质。但对于高真空下的气体等特殊情况下，就不能将流体视为连续介质了。

在化工生产中所处理的物料很多是流体，有以下几个主要方面需要应用流体流动的基本原理及其流动规律。

① 流体的输送 通常设备之间是用管道连接的，要想把流体按所要求的条件，从一个设备送到另一个设备，需要选用适宜的流动速度，以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中，常常要采用流体输送设备，因此需要计算流体在流动过程中应加入的外功，为选用流体输送设备提供依据。这些都要应用流体流动规律的数学表达式以进行计算，即研究什么是推动流体流动的原因及流动中的特性。

② 压强、流速和流量的测量 为了解和控制生产过程，需要对管路或设备内的压强、流速及流量等一系列参数进行测定，以便合理地选用和安装测量仪表，而这些测量仪表的操作原理又多以流体的静止或流动规律为依据。

③ 除了流体输送外，化工生产中的传热、传质过程以及化学反应大都在流体流动状态

下进行, 流体流动状态对这些单元操作有着很大的影响。为了能深入理解这些单元操作原理及为强化设备提供适宜的流动条件, 就必须掌握流体流动的基本原理。

因此, 流体流动的基本原理是本课程的重要基础。本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律, 并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

1.2 流体的物理性质

1.2.1 流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度, 其表达式为

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

当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, $\Delta m / \Delta V$ 的极限值即为流体某点的密度, 即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1a)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ; m ——流体的质量, kg ; V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度随流体的种类、温度、压力的变化而变化。对一定流体, 密度是压强 p 和温度 T 的函数, 可用下式表示

$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

式中 p ——流体的压强, Pa ; T ——流体的温度, K 。

液体的密度随压强的变化甚小 (极高压强下除外), 可忽略不计, 故常称液体为不可压缩流体, 但其密度随温度的变化稍有改变。气体的密度随压强和温度的变化较大, 当压强不太高、温度不太低时, 气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-3)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的压强, Pa ; T ——气体的温度, K ; M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ; R ——通用气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

对于一定质量的理想气体, 其体积、压强和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

所以, 气体密度也可按下式计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5)$$

式中 ρ_0 ——标准状态下气体的密度; T_0 、 p_0 ——标准状态下气体的温度和压强。

化工生产中遇到的流体常常不是单一组分, 而是由若干组分构成的混合物。对于气体混合物, 可按理想气体计算密度。但式中气体的摩尔质量 M , 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替, 即

$$M_m = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \cdots + M_n x_n \quad (1-6)$$

式中 $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔质量；

$x_1, x_2, \cdots, x_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

气体混合物的组成通常以体积分数表示，对于理想气体，体积分数与摩尔分数相等。

对于液体混合物，各组分的组成常用质量分数表示。若混合前后体积不变，则 1kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和，混合液体的密度 ρ_m 可由下式求出

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-7)$$

式中 $x_{w1}, x_{w2}, \cdots, x_{wn}$ ——液体混合物中各组分的重量分数；

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度， kg/m^3 ；

ρ_m ——液体混合物的平均密度， kg/m^3 。

1.2.2 比体积

单位质量流体的体积称为流体的比体积（或称比容），用符号 ν 表示，单位为 m^3/kg ，则

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-8)$$

流体的比体积是密度的倒数。

1.2.3 流体的黏度

(1) 牛顿黏性定律

前已述及，流体具有流动性，即没有固定形状，在外力作用下其内部产生相对运动。流体在流动时其内部会产生摩擦力，即产生抗拒内在向前运行的特性，称为黏性。黏性是流动性的反面。

以水在管内流动为例，管内任一截面上各点的速度并不相同，中心处的速度最大，越靠近管壁速度越小，在管壁处水的质点附于管壁上，其速度为零。其他流体在管内流动时也有类似的现象。所以，流体在管内流动时，实际上是被分割成无数极薄的圆筒层，一层套一层，各层以不同的速度向前运动，如图 1-1 所示。

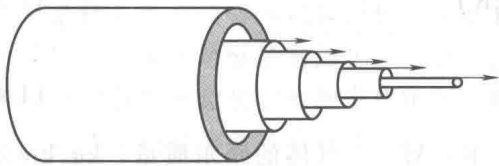


图 1-1 流体在圆管内分层流动示意图

由于各层速度不同，层与层之间发生了相对运动；速度快的流体层对相邻的速度较慢的流体层产生了一个推动其向前运动的力；同时，速度慢的流体层对速度快的流体层也作用一个大小相等、方向相反的力，从而阻碍较快流体层向前运动。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力，称为流体的内摩擦力或剪切力。流体的内摩擦力一方面与流体分子间力有关，另一方面与流体分子无规则热运动引起的动量传递有关。存在内摩擦力是流体黏性的表现，内摩擦力又称为黏滞力或黏性摩擦力。流体流动时的内摩擦，是流动阻力产生的原因，流体流动时必须克服内摩擦力而做功，从而使流体的一部分机械能转变为热而损失掉。下面通过一个实验来说明内摩擦力与哪些因素有关。

在两块面积很大而间距很小的大平板间充满某种静止流体，如图 1-2 所示，在某一时刻，使用力 F 以速度 u 水平移动上面一块大平板，紧贴在该板上的一层流体也必然以速度

u 随平板运动；而紧靠下层平板的流体，因附着于板面而静止不动。在两层平板之间流体形成上大下小的流速分布。两平板间的液体可看作许多平行于平板的流体层，层与层之间存在着速度差，即各液体层之间存在着相对运动，所以相邻两层之间存在着内摩擦力。

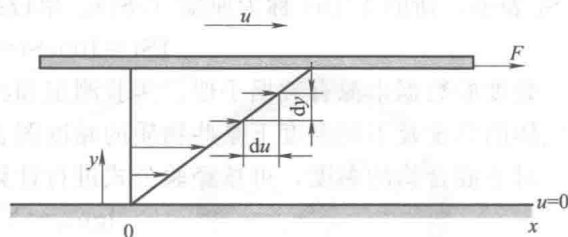


图 1-2 平板间液体速度变化

根据实验测定，内摩擦力 F 与黏度 μ 、平板面积 A 以及速度梯度 du/dy 有如下关系

$$\frac{F}{A} \propto \frac{du}{dy}$$

设比例系数为 μ ，则

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

令 $\tau = F/A$ ，则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 τ ——内摩擦应力，Pa； du/dy ——法向速度梯度， s^{-1} ； μ ——比例系数，其值随流体的不同而不同，流体的黏性越大，其值越大，所以称为黏滞系数或动力黏度，简称黏度，其单位为 $Pa \cdot s$ 。

式 (1-9) 表示的关系称为牛顿黏性定律。它的物理意义是流体流动时产生的内摩擦应力与法向速度梯度成正比。满足牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体，所有气体和大多数液体都属于这一类。反之称为非牛顿型流体，非牛顿型流体在化工过程中亦属常见。本章主要讨论牛顿型流体。

(2) 流体的黏度

式 (1-9) 可改写成

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-10)$$

所以黏度的物理意义是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力。由上式可知，速度梯度最大处的剪应力也最大，速度梯度为零处的剪应力亦为零。黏度总是与速度梯度相联系，只有在运动时才显现出来。所以分析静止流体的规律时就不需要考虑黏度因素。

国际单位制中黏度的单位为 $Pa \cdot s$ ，在厘米克秒制中黏度的单位为 P (泊) 和 cP (厘泊)，它们的换算关系如下

$$1Pa \cdot s = 10P = 1000cP$$

黏度是流体的物理性质之一，其值由实验测定。液体的黏度一般远大于气体的黏度。例如 $20^{\circ}C$ 时，水的黏度为 $1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ，而空气的黏度为 $18.1 \times 10^{-6} Pa \cdot s$ 。液体的黏度随温度升高而减小，气体的黏度则随温度升高而增大。压强变化时，液体的黏度基本不变；气体的黏度随压强增大而增加得很少，在一般工程计算中可忽略不计。只有在极高或极低的压强下，才需考虑压强对气体黏度的影响。

黏度与密度之比称为运动黏度，以 ν 表示，即

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-11)$$

运动黏度的单位为 m^2/s ，厘米克秒制中运动黏度的单位为 cm^2/s ，称为斯托克斯，简称斯，

以 St 表示, 斯的 1/100 称为厘斯 (cSt)。单位换算关系为

$$1\text{St}=100\text{cSt}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$$

黏度的数据来源有数据手册、实验测定和经验公式。本书附录中列出了常温下常见液体和气体的黏度及不同温度下某些物质的黏度图表。

对于混合物的黏度, 可按经验公式进行计算。如对分子不缔合的混合液, 可按下式计算

$$\lg\mu_m=\sum x_i\lg\mu_i \quad (1-12)$$

式中 μ_m ——混合液的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

x_i ——液体混合物中第 i 组分的摩尔分数;

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

常压下气体混合物的黏度, 可用下式计算

$$\mu_m=\frac{\sum y_i\mu_iM_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_iM_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-13)$$

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

y_i ——气体混合物中第 i 组分的摩尔分数;

μ_i ——与气体混合物同温度下第 i 组分的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

M_i ——气体混合物中第 i 组分的摩尔质量, kg/kmol 。

黏度对于流体的流动方式有很大的影响, 在本章后面将对其进行研究。

1.3 流体静力学基本方程式及应用

1.3.1 流体的压力

(1) 定义

流体垂直作用于单位面积上的总压力, 称为流体的压强, 简称压强, 俗称压力, 但压力更为通用。在静止流体中, 流体压力具有以下两个重要特性:

① 流体压力处处与它的作用面垂直, 并总是指向流体的作用面;

② 流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。

(2) 压力的单位和单位换算

在国际单位制中, 压力的单位是 N/m^2 , 称为帕斯卡, 以 Pa 表示。但习惯上还会采用其他单位, 如 atm (标准大气压)、某流体柱高度或 kgf/cm^2 等。它们之间的换算关系为

$$1\text{标准大气压(atm)}=1.013\times 10^5\text{Pa}=1.033\text{kgf}/\text{cm}^2=10.33\text{mH}_2\text{O}=760\text{mmHg}$$

(3) 压强的基准

压强可以有不同计量基准, 如果以绝对真空为基准, 称为绝对压强。若以大气压强为基准, 测量得到绝对压强高出大气压强的数值, 称为表压强, 俗称表压。

$$\text{表压}=\text{绝对压强}-\text{大气压强}$$

当被测流体的绝对压强小于大气压时, 其低于大气压的数值称为真空度, 即

$$\text{真空度}=\text{大气压强}-\text{绝对压强}$$

绝对压强、表压强和真空度的关系, 如图 1-3 所示。为避免混淆, 在以后的讨论中对表压及真空度均加以标注。

The diagram shows a vertical scale of pressure. At the top is a solid line labeled "大气压线" (Atmospheric Pressure Line). Below it is a dashed line labeled "绝对零压线" (Absolute Zero Pressure Line). The vertical distance between these two lines is labeled "大气压强" (Atmospheric Pressure). To the left of the scale, two vertical double-headed arrows indicate: "绝对压强" (Absolute Pressure) from the absolute zero line to a point above the atmospheric line, and "表压强" (Gauge Pressure) from the atmospheric line to that same point. To the right of the scale, two vertical double-headed arrows indicate: "真空度" (Vacuum Degree) from the atmospheric line down to a point below it, and "绝对压强" (Absolute Pressure) from the absolute zero line up to that same point.

【例 1-1】在兰州操作的苯乙烯真空蒸馏塔顶的真空表读数为 $80 \times 10^3 \text{ kPa}$ 。在沈阳操作时，若要求塔内维持相同的绝对压强，真空表的读数应为多少？已知兰州的平均大气压强为 $85.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ ，沈阳的平均大气压强为 $101 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} - \text{真空度} = 85300 - 80000 = 5300 \text{Pa}$$
$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} = 101000 - 5300 = 95700 \text{Pa}$$

1.3.2 流体静力学基本方程式

对于不可压缩流体，密度不随压力变化，其静力学基本方程可用下述方法推导。在静止液体中取一垂直液柱，如图 1-5 所示。液柱水平方向的横截面积为 A ，液体密度为 ρ ，以容器器底为基准水平面，则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 ，以 p_1 与 p_2 分别表示高度为 Z_1 及 Z_2 处的压力。

③ 该液柱的重力 $mg = \rho g A (Z_1 - Z_2)$ 。

$$p_2 A - p_1 A - \rho g A (Z_1 - Z_2) = 0$$
$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-14)$$

7

可改写为

$$p_2 = p_a + \rho g h \quad (1-15)$$

式 (1-14) 及式 (1-15) 均称为静力学基本方程式。由式 (1-14)、式 (1-15) 可知:

① 当液面上方的压力一定时, 在静止液体内任一点压力的大小, 与液体本身的密度和该点距液面的深度有关。因此, 在静止的、连续的同一种液体内, 处于同一水平面上的各点, 其压力亦相等。这些压力相等的点组成的水平面, 称为等压面。

② 当液面上方的压力 p_a 有变化时, 必将引起液体内部所有点的压力发生同样大小的变化。

③ 式 (1-15) 可改写为

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = h \quad (1-16)$$

由上式可知, 压力或压力差的大小可用液柱高度来表示, 但表示时必须注明是何种液体。

虽然静力学基本方程式是用液体推导的, 流体的密度可视为常数。而气体密度则随压力而改变, 但考虑到气体密度随容器高低变化甚微, 一般也可视为常数, 故静力学基本方程式也适用于气体。

值得注意的是, 上述方程式只能用于静止的、连通着的同一种流体。

解决静力学方程问题的要点是应用等压面及 $\Delta p = \rho g h$ 。

【例 1-2】 如图 1-6 所示, 开口容器内盛有油和水。油层高度 $h_1 = 0.7\text{m}$, 密度 $\rho_1 = 800\text{kg/m}^3$, 水层高度 $h_2 = 0.6\text{m}$, 密度 $\rho_2 = 1000\text{kg/m}^3$, 大气压为 p_a 。

(1) 判断 $p_A = p_{A'}$, $p_B = p_{B'}$ 是否成立; (2) 计算水在玻璃管内的高度 h 。

解: (1) 判断两关系式是否成立

$p_A = p_{A'}$ 的关系成立。因 A 及 A' 两点在静止的、连通着的同一种流体内, 并在同一个水平面上, 所以截面 A-A' 称为等压面。

$p_B = p_{B'}$ 的关系不成立。因 B 及 B' 两点虽在静止流体的同一水平面上, 但不是连通着的同一种流体, 所以截面 B-B' 不是等压面。

(2) 计算玻璃管内水的高度 h

由上面讨论可知, $p_A = p_{A'}$, 而 p_A 与 $p_{A'}$ 都可以用流体静力学基本方程式计算, 即

$$p_A = p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2$$

$$p_{A'} = p_a + \rho_2 g h$$

于是

$$p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 = p_a + \rho_2 g h$$

简化上式并将已知值代入, 得

$$800 \times 0.7 + 1000 \times 0.6 = 1000 h$$

$$h = 1.16\text{m}$$

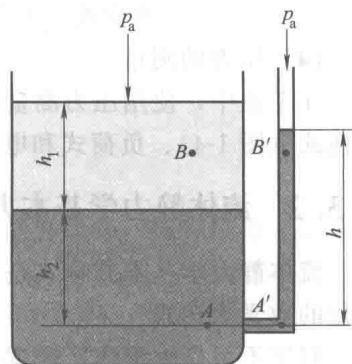


图 1-6 【例 1-2】附图

下面进一步讨论静力学基本方程式中各项的意义。将式 (1-14) 两边除以 ρg 并整理

可得

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (1-17)$$

上式中各项的单位均为米 (m)，其中 Z 为流体距基准面的高度，称为位压头。该流体所具有的位能为 mgZ ，单位重量流体的位能为 mgZ/mg ，所以位压头表示单位重量的流体从基准面算起的位能。

式 (1-17) 中的第二项 $p/\rho g$ 称为静压头，又称为单位重量流体的静压能。因而式 (1-17) 可表示为

$$\text{静压头} + \text{位压头} = \text{常数}$$

可将式 (1-17) 中各项均乘以 g ，得

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-18)$$

因质量为 m 的流体的位能为 mgZ ，所以单位质量流体的位能为 gZ 。故上式中第一项为单位质量流体的位能。同理，上式中第二项为单位质量流体的静压能。因此式 (1-18) 的物理意义为

$$\text{静压能} + \text{位能} = \text{常数}$$

也就是说，在静止的流体内，流体所具有的静压能和位能可以相互转换，在任何位置上，二者之和为常数。这是在流体保持静止时表现出的特征，也是保证流体保持静止的条件。如果流体内某一截面上的静压能与位能之和不同于另一截面上的静压能与位能之和，则流体会由两者之和较大的截面向两者之和较小的截面自发流动。

1.3.3 流体静力学基本方程式的应用

在化工生产中，有许多化工仪表的操作原理是以液体静力学基本方程式为依据的。下面介绍该方程式在压力和液面测量方面的应用。在处理流体静力学问题时，要使用等压面的定义及液柱压差 $\Delta p = \rho gh$ 共同解决。

1.3.3.1 压强与压强差的测量

(1) U 形管压差计

U 形管压差计的结构如图 1-7 所示，它是在一根 U 形透明管内装指示液，指示液的密度大于被测流体的密度。将 U 形管的两端与管道中的两截面相连通，若作用于 U 形管两端的压力 p_1 和 p_2 不等 (图中 $p_1 > p_2$)，则指示液在 U 形管两端形成高差 R 。利用 R 的数值，根据静力学基本方程式，就可计算出两点间的压力差。

在图 1-7 中，U 形管下部的液体是密度为 ρ_0 的指示液，上部为被测流体，其密度为 ρ 。根据静力学方程分析，因为 a 、 b 两截面处于同一种静止液体 (指示液) 并连通的同一水平面上，所以 $p_a = p_b$ 。

根据流体静力学基本方程式，从 U 形管的左侧计算，可得 $p_a = p_1 + (Z_2 + R)\rho g$ 。同

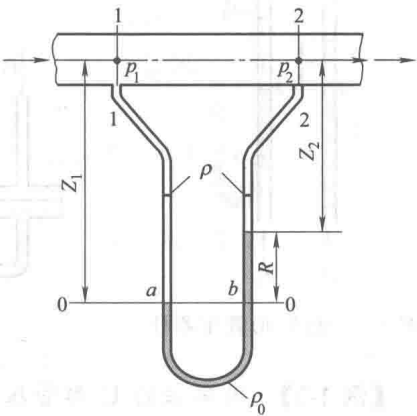


图 1-7 U 形管压差计