

★ 中等职业教育化学工艺专业规划教材 ★

全国化工中等职业教育教学指导委员会审定

化工生产单元操作

侯丽新 主编 周立雪 主审



化学工业出版社

中等职业教育化学工艺专业规划教材
全国化工中等职业教育教学指导委员会审定

化工生产单元操作

侯丽新 主编
周立雪 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本教材的内容涉及了化工生产中的常见单元操作,还涉及了单元操作实训以及化工单元仿真操作实训。在内容的安排上,以任务的形式贯穿全部单元,每个单元的内容分解成为若干个任务,每一个任务主要解决一个或两个问题,每个任务之间构成了整个单元的主体内容。本书内容浅显易懂,通过“思考与练习”、“想一想”、“小调研”、“拓展知识”等板块,给学生一定的自学空间,从而进行更为广泛的学习。

本书可作为中等职业学校化学工艺专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工生产单元操作/侯丽新主编. —北京: 化学工业出版社, 2009.8
中等职业教育化学工艺专业规划教材
ISBN 978-7-122-05930-7

I. 化… II. 侯… 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 (2009) 第 108667 号

责任编辑: 旷英姿
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 管景岩
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: 北京白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 384 千字 2009 年 8 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: 25.00 元

版权所有 违者必究

中等职业教育化学工艺专业规划教材编审委员会

主 任 邬宪伟

委 员 (按姓名笔画排列)

丁志平	王小宝	王建梅	王绍良	王新庄
王黎明	开俊	毛民海	乔子荣	邬宪伟
庄铭星	刘同卷	苏勇	苏华龙	李文原
李庆宝	杨永红	杨永杰	何迎建	初玉霞
张荣	张毅	张维嘉	陈炳和	陈晓峰
陈瑞珍	金长义	周健	周玉敏	周立雪
赵少贞	侯丽新	律国辉	姚成秀	贺召平
秦建华	袁红兰	贾云甫	栾学钢	唐锡龄
曹克广	程桂花	詹镜青	潘茂椿	薛叙明

序

“十五”期间我国化学工业快速发展，化工产品和产量大幅度增长，随着生产技术的不断进步，劳动效率不断提高，产品结构不断调整，劳动密集型生产已向资本密集型和技术密集型转变。化工行业对操作工的需求发生了较大的变化。随着近年来高等教育的规模发展，中等职业教育生源情况也发生了较大的变化。因此，2006年中国化工教育协会组织开发了化学工艺专业新的教学标准。新标准借鉴了国内外职业教育课程开发成功经验，充分依靠全国化工中职教学指导委员会和行业协会所属企业确定教学标准的内容，注重国情、行情与地情和中职学生的认知规律。在全国各职业教育院校的努力下，经反复研究论证，于2007年8月正式出版化学工艺专业教学标准——《全国中等职业教育化学工艺专业教学标准》。

在此基础上，为进一步推进全国化工中等职业教育化学工艺专业的教学改革，于2007年8月正式启动教材建设工作。根据化学工艺专业的教学标准以核心加模块的形式，将煤化工、石油炼制、精细化工、基本有机化工、无机化工、化学肥料等作为选用模块的特点，确定选择其中的十九门核心和关键课程进行教材编写招标，有关职业教育院校对此表示了热情关注。

本次教材编写按照化学工艺专业教学标准，内容体现行业发展特征，结构体现任务引领特点，组织体现做学一体特色。从学生的兴趣和行业的需求出发安排知识和技能点，体现出先感性认识后理性归纳、先简单后复杂，循序渐进、螺旋上升的特点，任务（项目）选题案例化、实战化和模块化，校企合作，充分利用实习、实训基地，通过唤起学生已有的经验，并发展新的经验，善于让教学最大限度地接近实际职业的经验情境或行动情境，追求最佳的教学效果。

新一轮化学工艺专业的教材编写工作得到许多行业专家、高等职业院校的领导和教育专家的指导，特别是一些教材的主审和审定专家均来自职业技术学院，在此对专业改革给予热情帮助的所有人士表示衷心的感谢！我们所做的仅仅是一些探索和创新，但还存在诸多不妥之处，有待商榷，我们期待各界专家提出宝贵意见！

邬宪伟
2008年5月

前 言

2007年8月《全国中等职业教育化学工艺专业教学标准》由化学工业出版社正式出版，这个标准是在中国化工教育协会的组织安排下，由全国化工中等职业教育教学指导委员会主任、上海信息技术学校校长邬宪伟总体策划和组织编制完成的，在标准编制的过程中，对教学改革及教材建设进行了大量的研究与探讨，并根据专业标准的课程设置情况，提出了共计19本教材的编写任务，《化工生产单元操作》就是其中的一本。本书依照标准提出的“体现出先感性认识后理性归纳、先简单设备后复杂系统的循序渐进、螺旋上升特点的课程学习计划，获得最大的教学效率”教学设计思想，精心组织了本教材的编写。

本教材在编写过程中，着力突出以学生为主体，引导学生学习的主导思想，在内容的安排上，将所学的内容以任务的形式贯穿全部单元，每个单元的内容分解成为若干个任务，每一个任务主要解决一个或两个问题，每个任务之间看似独立，却构成了整个单元的主体内容。为了更好地引导学生学习，在编写时注重突出几个要点：一是要让学生能够读懂书，所以要浅显易懂，在读懂的情况下引导学生进行学习；二是通过参与性的练习与学生产生互动，让学生在边读边练中学习；三是启发学生思考，通过“想一想”、“小调研”等作业，给学生一定的自学空间，进行更为广泛的学习。

本教材的内容涉及化工生产中的常见单元操作，还涉及单元操作实训以及化工单元仿真操作实训。在编写单元操作实训的内容时，考虑到各个学校的实训装置不尽相同，所以安排的训练内容基本上是通用的，因此在装置不同的情况下，各校仍可根据自己的实训装置并结合教材中的训练要求进行训练。

本教材共分为四个主要单元操作，每个主要单元操作中又包含若干个拓展单元。单元操作1由傅爱华编写，其中任务13由赵刚编写；单元操作2和单元操作4由储则中编写，其中单元操作2中任务1、2、3由侯丽新编写；单元操作3由薛彩霞编写。全书由侯丽新统稿，徐州工业职业技术学院周立雪与冷士良审阅书稿。

本书在编写过程中，得到许多领导及同行的支持和关心，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，不完善或疏漏之处在所难免，敬请读者和同仁指正。

编者
2009年5月

目 录

单元操作 1 流体输送	1
任务 1 了解流体的密度	1
任务 2 学习流量的计算方法与测量方法	2
任务 3 了解流体的压力以及压力的测量方法	6
任务 4 认识液位计、液封及分液器	11
任务 5 学习高位槽输送流体的方法	14
任务 6 学习用输送机械输送流体的方法	16
任务 7 了解流体输送的其他方法	17
任务 8 认识离心泵	22
任务 9 了解离心泵的安装高度对运行的影响	28
任务 10 认识往复式压缩机	32
任务 11 认识化工管路	32
任务 12 流体输送操作技能训练	35
任务 13 离心泵单元操作仿真训练	40
练习	45
拓展单元 1 过滤操作	47
任务 14 学习过滤操作的基本原理	47
任务 15 认识板框压滤机	50
任务 16 认识转筒真空过滤机	51
任务 17 了解其他过滤设备	51
拓展单元 2 沉降分离操作	55
任务 18 认识降尘室	55
任务 19 了解重力沉降和离心沉降	57
任务 20 认识连续沉降槽	57
任务 21 认识旋风分离器	58
练习	59
拓展单元 3 水洗操作	60
任务 22 认识泡沫除尘器	60
任务 23 认识湍球塔	60
任务 24 认识文丘里除尘器	61
单元操作 2 传热	62
任务 1 了解传热现象	62
任务 2 认识各种类型的换热器	63
任务 3 学习热量的计算方法	70

任务 4	学习换热器传热速率的计算方法	72
任务 5	学习有效温度差的计算方法	73
任务 6	学习强化传热过程的方法	76
任务 7	换热过程操作技能训练	79
任务 8	换热单元操作仿真训练	83
练习		89
拓展单元 1	蒸发	91
任务 9	了解蒸发方法在生产中的应用	91
任务 10	认识蒸发装置及流程	92
任务 11	学习溶剂蒸发量的计算方法	95
任务 12	了解蒸汽消耗量、蒸发器的生产能力的计算方法	95
任务 13	认识各种蒸发设备	97
拓展单元 2	冷冻	102
任务 14	了解冷冻技术在工业生产中的应用	102
任务 15	认识制冷设备及制冷方法	105
任务 16	了解其他形式的制冷方法	106
任务 17	学习冷冻能力的计算方法	109
单元操作 3	吸收	112
任务 1	了解气体吸收在工业生产中的应用	112
任务 2	认识吸收流程	114
任务 3	学习吸收质浓度的表示方法及换算方法	116
任务 4	学习吸收剂用量的计算方法	116
任务 5	了解吸收剂用量对吸收过程的影响	118
任务 6	了解吸收过程的操作条件	121
任务 7	了解影响吸收速率的因素	122
任务 8	了解其他类型的吸收操作	124
任务 9	认识各类吸收设备	126
任务 10	认识解吸操作流程	131
任务 11	学习解吸过程中气体用量的计算方法	133
任务 12	了解解吸过程的影响因素	133
任务 13	吸收过程操作技能训练	134
任务 14	吸收解吸单元操作仿真训练	142
练习		150
拓展单元	干燥	153
任务 15	了解干燥在化工生产中的应用	153
任务 16	认识干燥生产装置及工艺流程	154
任务 17	学习干燥过程水分蒸发量与空气耗用量的计算	155
任务 18	了解干燥过程进行的条件	158
任务 19	了解干燥速率的影响因素	163
任务 20	认识工业上常用的干燥设备	165
任务 21	洞道式干燥器操作技能训练	169

任务 22 流化床干燥器操作技能训练	171
练习	173
单元操作 4 蒸馏	174
任务 1 认识蒸馏装置, 了解蒸馏原理	174
任务 2 认识精馏装置	176
任务 3 学习产品量及产品组成的计算方法	179
任务 4 了解回流及回流比的计算	181
任务 5 了解精馏过程的运行状况	183
任务 6 了解精馏装置正常运行的条件	185
任务 7 了解精馏塔混合物进料的热状况及进料位置对精馏过程的影响	187
任务 8 认识其他类型的精馏塔	190
任务 9 精馏过程操作技能训练	193
任务 10 精馏单元操作仿真训练	198
练习	205
拓展单元 1 萃取	208
任务 11 通过实验观察如何用四氯化碳提纯溴水	208
任务 12 了解萃取原理及萃取过程	208
任务 13 认识萃取装置	210
任务 14 了解影响萃取效果的因素	212
任务 15 了解萃取的应用	214
任务 16 液-液萃取塔操作技能训练	218
拓展单元 2 膜分离	220
任务 17 认识膜并了解膜的作用	220
任务 18 了解膜分离技术	222
附录	228
参考文献	240

2 | 单元操作 1 流体输送

在 373K 时是 958.4 kg/m^3 。

(2) 气体的密度 因为气体的体积在温度升高时会增大，这是气体的热膨胀性；在压力增大时体积会明显减小，这是气体的可压缩性。那么当温度或压力发生变化时，气体的密度将发生怎样的变化呢？通过下面的计算式，我们就能找到答案。

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的压力，kPa；

M ——气体的摩尔质量，kg/kmol；

R ——通用气体常数，在国际单位制中（SI 制）中， $R=8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；

T ——气体的温度，K。

这个密度的计算式是通过理想气体状态方程式推出的。

从气体密度的计算式中可以看出，当气体的压力增大时，密度就会增大，当温度升高时，密度就会降低。

❓ 问题 是不是在任何温度和压力下，气体的密度都能够用计算式(1-2) 进行计算呢？答案是：不行。同学们可参考相关的书籍，进行深入学习。

4. 查取流体密度的方法

液体和气体纯净物的密度通常可以从《化学工程手册》或《物理化学手册》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。

练习 3 请在附录中查出以下数据并填写在空格内：50℃ 水的密度是_____；50℃ 干空气的密度是_____。

5. 气体混合物与液体混合物密度的计算方法

气体和液体混合物的密度也可以通过计算来得到。

对于气体混合物，将式(1-2) 中的 M 用气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替， M_m 由下式计算：

$$M_m = M_1 \varphi_1 + M_2 \varphi_2 + \cdots + M_i \varphi_i + \cdots + M_n \varphi_n = \sum_{i=1}^n M_i \varphi_i \quad (1-3)$$

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，kg/kmol；

φ_1 、 φ_2 、 φ_i 、 φ_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。

液体混合物的密度可以由下式计算：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{w_i}{\rho_i} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-4)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_i 、 ρ_n ——混合物中各组分的密度，kg/m³；

w_1 、 w_2 、 w_i 、 w_n ——混合物中各组分的重量分数。



任务 2

学习流量的计算方法与测量方法

流体流动时，流量是一个非常重要的参数，它既是表示输送任务的一个指标，又常常是过程控制的重要参数。因此我们必须掌握流量的计算方法、流量的测量方法，并且要学会正确地表示流量。

一、流量的计算方法

见图 1-2, 某种流体流过一圆形管道, 已知流体的流速 u 是 1.5m/s , 圆形管的截面积 A 是 0.002m^2 , 流量 q_V 是多少呢? 先学习下面的计算公式, 然后完成填空练习。

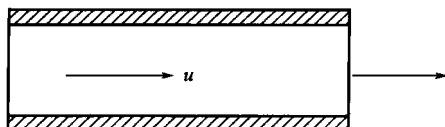


图 1-2 流体在圆形管道内的流动

体积流量计算公式: $q_V = uA$ (1-5)

练习 1 在图 1-2 中表示的流体流动中, 体积流量是_____, 流量的单位是_____。
当流量的单位是 m^3/s 时, 我们称之为体积流量。

那么质量流量应该怎样计算呢? 若已知圆管内流体的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 如何用密度将体积换算成质量呢? 请同学们思考一下并完成下面的练习。

练习 2 在图 1-2 中表示的流体流动中, 质量流量是_____; 流量的单位是_____。
质量流量计算公式: _____ (1-6)

综合练习

流量有两种表示方法, 一种是体积流量, 另一种是_____。

体积流量的单位是_____; 质量流量的单位是_____。

将体积流量换算成质量流量的公式为_____;

将质量流量换算成体积流量的公式为_____。

二、流量的测量方法

流量计是测量流量的仪表, 根据测量原理的不同, 可以将流量计分成许多种类。例如有差压式流量计、转子流量计、涡轮流量计、电磁流量计、超声波流量计、涡街流量计等, 下面我们来认识这些流量计。

1. 孔板流量计 (orifice plate flowmeter)

这是一种差压式流量计, 它是依靠安装于管道中的流量检测件产生的压差来测量流量的。流量检测件是一块带孔的金属薄板, 被称为孔板, 见图 1-3。孔板用法兰连接在水平的被测管路上, 孔板的中心线与管路中心线重叠, 它的配件是 U 形管压差计, 压差计的两端分别与孔板的两侧相接, 管内装有指示液。

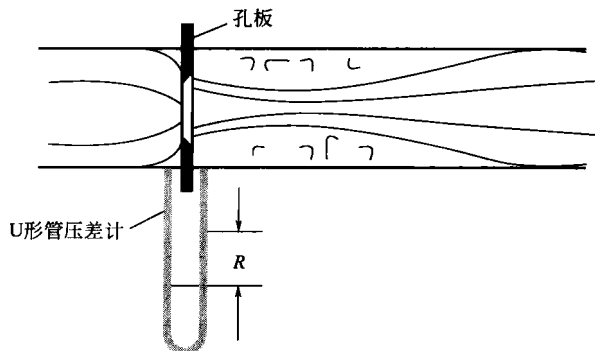


图 1-3 孔板流量计结构示意图

孔板流量计测量流量利用的是力学原理, 也就是柏努利方程原理, 这个原理告诉我们, 当流体流过孔板时, 在孔板前与孔板后流体的压力会发生比较大的变化, 这个压力的变化通

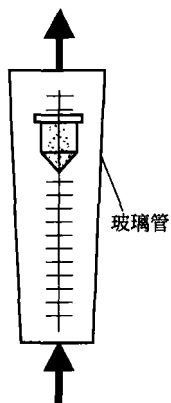


图 1-4 转子流量计结构示意图

过 U 形管内指示液的高度变化反映出来，就是从图中看到的高度差 R ，根据高度差 R 就可以计算出流体的流量。通过计算可以得出：压差越大，高度差就越大，流量也就越大。

孔板流量计的特点是结构简单，安装方便，价格低廉，但流体能量损失大，不适宜在流量变化很大的场合使用，而且不能直接得到流量数值，需要经过计算才能得到流量。

目前这种类型的产品还有：楔形流量计、文丘里管流量计、平均皮托管流量计等。

2. 转子流量计 (rotameter)

转子流量计如图 1-4 所示。它是由一个截面积自下而上逐渐扩大的锥形玻璃管构成的，玻璃管上标有刻度，管内装有一个由金属或其他材料制作的转子，转子可以在锥形玻璃管内自由地上升和下降，当流体流过转子时，能推转子旋转，因此称为转子流量计。

在锥形流道中的转子受到流动流体的作用力而开始向上移动，当转子受到的力平衡时，转子就不再移动，而是原地旋转，这时转子对应的刻度就是流量的大小。转子停留的位置越高，则流量越大。

转子流量计是工业上和实验室最常用的一种流量计。它具有结构简单、直观、能量损失小、维修方便等特点，它的最大优点就是可以直接读出流量。

转子流量计适用于测量通过管道直径 $D < 150\text{mm}$ 的小流量，也可以测量腐蚀性介质的流量。使用时流量计必须安装在垂直走向的管段上，流体介质自下而上地通过转子流量计。

但玻璃管不耐高压、高温，且必须防止受冲击导致玻璃破碎，安装时必须保持垂直。

需要说明的是，转子流量计的读数是生产厂家在一定条件下用空气或水标定的，当条件变化或用于其他流体时，应重新进行标定，其方法可参阅产品手册或有关书籍。

3. 涡轮流量计 (turbine flowmeter)

这种流量计要在管道内安装一个涡轮，流体流过时冲击叶轮，使涡轮产生旋转，通过叶轮旋转的快慢就可以反映流量的大小。我们家庭中使用的水表就是这种流量计。

涡轮流量计的外形如图 1-5 所示。涡轮流量计是一种速度式流量仪表，涡轮的转速随流量的变化而变化，经磁电转化装置把涡轮转速转化为相应频率电脉冲，经放大后送入显示仪表进行计数和显示，根据单位时间内的脉冲数和累计脉冲数，即可求出瞬时流量和累计流量。

涡轮流量计具有测量精度高、反应速度快、测量范围广、价格低廉、安装方便等优点，广泛用于石油、各种液体、液化气、天然气、煤气和低温流体等。在欧洲和美国，涡轮流量计是继孔板流量计之后第二个法定天然气流量计。

4. 电磁流量计 (electromagnetic flowmeter)

电磁流量计是 20 世纪 50~60 年代随着电子技术的发展而迅速发展起来的新型流量测量仪表，用来测量导电液体的体积流量。它的外形见图 1-6。在结构上，电磁流量计由电磁流量传感器和转换器两部分组成。传感器的作用是将流进管道内的液体体积流量转换成感应电势信号，并通过传输线送到转换器。转换器再将信号放大，并转换成流量信号输出。

电磁流量计是根据法拉第电磁感应定律制成的，导体在磁场中运动产生感应电动势，而感应电动势又和流量大小成正比，通过测量电动势来反映管道内的流量大小，根据管径、介质的不同，就可以转换成流量。

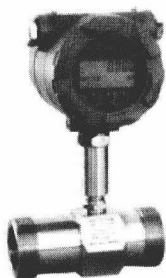


图 1-5 涡轮流量计



图 1-6 电磁流量计

电磁流量计的测量精度和灵敏度都较高。工业上多用以测量水、矿浆等介质的流量。可测最大管径达 2m，而且能量损失极小。但电导率低的介质，如气体、蒸汽等则不能应用。

电磁流量计目前已被广泛地应用于工业过程中各种导电液体的流量测量，如各种酸、碱、盐等腐蚀性介质，各种浆液流量测量，形成了独特的应用领域。

5. 涡街流量计 (vortex flowmeter)

这种流量计是 20 世纪 70 年代开发和发展起来的，属于流体振荡式流量计，它的外形如图 1-7 所示。它是利用流体在特定流道条件下流动时将会产生振荡，而且振荡的频率与流速成比例这一原理设计的，当通流截面一定时，流速又与流量成正比，因此，测量振荡频率即可测得流量。

由于它兼有无转动部件和脉冲数字输出的优点，很有发展前途。它在流量测量方面有许多优点，例如使用比较方便，量程比较宽，能量损失小，不需要重新标定，不仅可用于封闭的管道，还可用于开放的沟槽等，在现代流量测量中应用越来越广泛。

与涡轮流量计相比，涡街流量计没有可动的机械部件，维护工作量小，仪表常数稳定；与孔板式流量计相比，涡街流量计测量范围大，能量损失小，准确度高，安装与维护都比较简单。

6. 超声波流量计 (ultrasonic flowmeter)

超声波流量计也是在 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型流量计，它的外形见图 1-8。超声波流量计是通过检测流体流动对超声束（或超声脉冲）的作用来测量流量的仪表，它也是由测量流速来反映流量大小的。

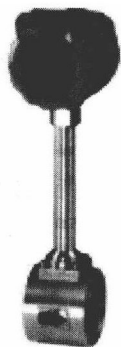


图 1-7 涡街流量计

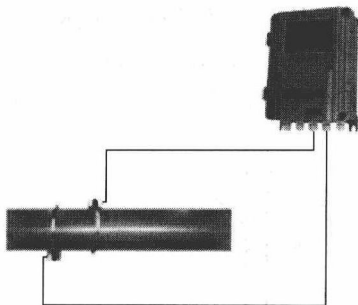


图 1-8 超声波流量计

超声波流量计和电磁流量计一样，因仪表流通通道未设置任何障碍件，均属无阻碍流量计，是用于解决流量测量困难的一类流量计，特别在大口径流量测量方面有较突出的优点。

它安装简单、操作方便、通用性好、几乎不需维修，广泛用于石油、化工、冶金、采矿、水电等行业。

由于超声波流量计可以制成非接触形式，对流体又不产生扰动和阻力，所以很受欢迎，是一种很有发展前途的流量计。

填空练习 下面的表格将 6 种流量计的有关知识进行了归纳，请在空格处填上你的答案。

序号	流量计名称	测量原理	特 点
1	孔板流量计		优点：结构简单，安装方便，价格低廉；缺点：流体能量损失大，不宜在流量变化很大的场合使用，且不能直接得到流量数值
2		电磁感应原理，即导体在磁场中运动时产生感应电动势，而感应电动势又和流量大小成正比	
3	涡街流量计		
4	转子流量计	转子受到流动流体的作用力时开始向上移动，当向上的推力与转子的重力平衡时，转子就不再移动，转子停止的位置与流量的大小有关	
5			优点：测量精度高，反应速率快，测量范围广，价格低廉，安装方便
6	超声波流量计		

小调研 由于流体的体积受温度、压力等参数的影响，用体积表示流量大小时需要给出介质的参数。在介质参数不断变化的情况下，往往难以达到这一要求，因此会造成仪表显示值失真。因此，质量流量计就得到广泛的应用和重视。质量流量计分直接式和间接式两种。直接式质量流量计利用与质量流量直接有关的原理进行测量，间接式质量流量计是用密度计与容积流量直接相乘求得质量流量的。你能查找到有关质量流量计的相关资料吗？

任务 3

了解流体的压力以及压力的测量方法

观察与思考 流体的“力量”

我们把气体和液体统称为流体。而流体的一个重要特征就是它们都有压力，这种压力就是流体的“力量”。让我们通过下面的实例来感受流体压力的存在。

当生活在平原的人来到有一定海拔高度的山上时，可能会出现头晕、胸闷等高山反应，

这是为什么呢？这就是大气压变化的原因。我们生活的环境，总是处在一定的大气压力下，而大气压力的大小是与海拔高度有关系的。这种现象说明气体是有压力的。

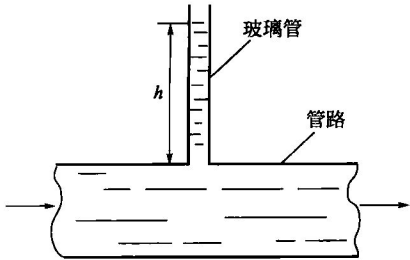


图 1-9 流动流体压力的表现

我们再来看这样一个现象：见图 1-9，在管路上安装一根垂直的玻璃管，这时可以看到管路中的流体进入到了玻璃管内，并且上升到一定的高度，这个上升的液柱高度就表明液体也是有压力的。

一、什么是压力

流体在地球重力场的作用下，都具有一定的压力，我们把流体垂直作用在单位面积上的压力称为流体的压强，在生产中又简称为压力，其定义式为：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-7)$$

式中 p ——流体的压力，Pa；

F ——垂直作用在面积 A 上的力，N；

A ——流体的作用面积， m^2 。

二、静止流体压力的计算

1. 计算容器内静止液体的压力

如图 1-10，容器内盛有某种液体，该液体处于静止状态，在深度为 h 的截面上压力 p 是多少，怎样计算呢？我们可以用流体静力学方程进行计算。

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-8)$$

式中 p ——深度为 h 处的压力，Pa；

p_0 ——液层表面的压力，Pa；

ρ ——液体的密度， kg/m^3 ；

h ——液层深度，m。

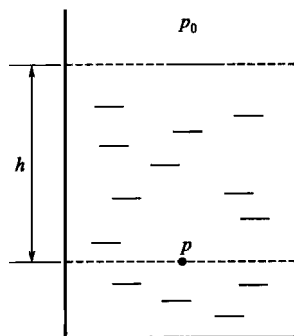


图 1-10 静止流体内部压力与高度的关系

流体静力学方程表明了静止流体内部压力的变化规律。

下面让我们通过练习来掌握液体压力的变化规律：

(1) 当容器内的液体静止时，越深的地方液体的压力_____；深度相同时，越重的液体（密度越大的液体）产生的压力_____。所以，在静止的液体内，压力的大小与液体的_____和深度有关。

(2) 当液面上方的压力 p_0 改变时，这个压力会向液体内部传递，使各点的压力发生同样大小的改变，这正是液压传递的基本原理。所以在静止的同一流体内部， p_0 改变时， p 会发生_____的变化。

练习 已知图 1-10 中的容器中装有 20°C 的水，水面上的压力为大气压，数值为 101300Pa ，请你计算在深度为 2m 处的压力 $p(\text{Pa})$ 。



计算向导

(1) 查附录中的数据表，得到 20°C 时水的密度为_____；

(2) g 是重力加速度，数值为_____；

(3) 将已知数据代入公式(1-8)，计算出 2m 深的地方压力 p 等于_____ Pa ()。



想一想 思考下面的问题，并将答案填入空格中。

在 2m 深的地方，压力 p 比大气压大多少？_____ Pa ()。

在工业生产中，表示压力的大小可以有不同的方法，在“练习 1”中算出的压力 p 称为绝对压；在“想一想”中算出的压力 p 称为表压。为了让答案更加清楚，请在上面两个圆括号中分别填入“表压”或“绝对压”。

归纳练习 现在你能写出表压的计算公式了吧，请你一定完成下面的填空练习，因为在后面的学习中要用到这两个公式。



图 1-11 贮气
钢瓶

$$\text{表压} = \text{绝对压} - \text{大气压} \quad (1-9)$$

$$\text{绝对压} = \text{大气压} + \text{表压} \quad (1-10)$$

2. 容器内静止气体的压力

当一个密闭的容器内装有气体时，见图 1-11，贮气钢瓶内气体的压力是多少？我们可以看到钢瓶上有一个压力表，所以很简单，从压力表上就可以读出钢瓶内气体的压力。

想一想 读出的压力代表钢瓶内什么地方气体的压力呢？

你的答案是：读出的压力代表钢瓶内 任意一点 地方的气体压力，因为对于气体来说，容器内任一点的压力都是相同的。

提醒你注意：压力表测出的都是表压，如果要想得到绝对压，只要用公式 (1-10) 就可以算出来了。

三、压力的单位

在前面的计算中，我们只是接触到压力单位“Pa”，但在工业生产中，压力的单位还有许多常用的表示方法。

物理大气压：用符号“atm”表示；

工程大气压：用符号“at”表示；

汞柱高度：用符号“mmHg”表示；

水柱高度：用符号“mH₂O”表示；

压力的国际单位：用符号“Pa（帕）”表示。

这些表示方法之间有一定的换算关系：

$$1 \text{ atm} = 101300 \text{ Pa} = 1.033 \text{ at} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$



知识学习 式(1-10)也可以改写为

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g} \quad (1-11)$$

这个公式表明，压力差的大小可以用一定高度的液体柱来表示，或者说压力的大小也可以用一定高度的液体柱表示。从式(1-11)我们知道了大气压是可以用水柱高度或汞柱高度来表示的。

但必须注明液体的种类，如前面所介绍的压力可以用 mmHg、mH₂O 等单位来计量。

四、压力的表示方法

表压是压力的一种表示方法。从前面“练习 1”的学习中我们了解到，当绝对压大于大气压时，可以把高出大气压的部分称为表压。那么在生产中当绝对压小于大气压时，应该如何表示呢？下面让我们学习一个新的概念：真空度。

看图 1-12。我们用一个数学坐标来表示压力的大小，从图中可以看出绝对压小于大气压，真空度就表示比大气压小了多少。

想一想 如果用公式来表示真空度、绝对压和大气压三者之间的关系，你能写出真空度的计算式吗？

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝对压} \quad (1-12)$$

显然，设备内流体的绝对压力越低，则它的真空度就越高。

同样我们可以用数学坐标来表示表压的大小，见图 1-13。下面来总结压力的表示方法，请同学完成下面的填空练习。

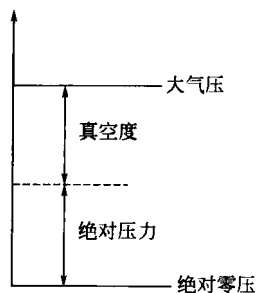


图 1-12 真空度、绝对压与大气压

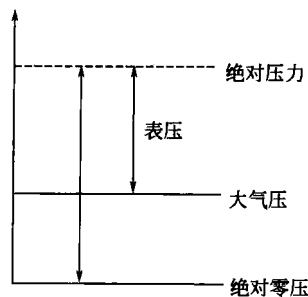


图 1-13 表压、真空度与绝对压力的关系

表压 = 绝对压力 - _____
真空度 = 大气压 - _____

有很多化工生产过程都不是在常压（大气压力）下进行的，它们或者是在正压系统（压力高于大气压力）下操作，或者是在负压系统（压力低于大气压力）下操作。化工生产中广泛应用的测压仪表主要有两种，一种叫压力表，一种叫真空表，但它们的读数都不是系统内的绝对压力。从压力表上读出的数据叫表压，它是设备内的绝对压力比大气压高出的数值；从真空表上读出的数据叫真空度，它是设备内的绝对压力低于大气压的数值。

为了使用时不至于混淆，压力用绝对压力表示时可以不加说明，但用表压和真空度表示时必须注明。

例如：600kPa 表示绝对压力；
0.2GPa（表压）表示系统的表压；
30kPa（真空度）表示系统的真空度。

五、压力的测量方法

1. U 形管压差计

U 形管压差计是一种非常简单的常用的压力测量仪器，是液柱式测压计中最普通的一种，它的外形如图 1-14 所示。主要部件是一个两端开口的垂直 U 形玻璃管，管内装有指示液。指示液要与被测流体不互溶，不起化学作用，而且其密度要大于被测流体的密度。

从图 1-14 中你一定注意到一个现象，当 U 形管的两端开口与大气相通时，即作用在两支管内指示液液面上的压力是相等的，此时两支管内的指示液液面在同一水平面上。下面我们来讨论 U 形管压差计如何测量流体的压力。

测量原理：见图 1-15。我们将 U 形管的两个端口分别与管路中的两个测压口相连接，这时会发现一个明显的现象，指示液出现了高度差，如图中 R 代表的高度差，这是什么原因造成的呢？

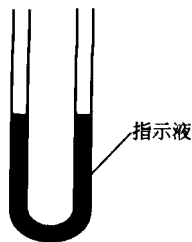


图 1-14 U 形管压差计

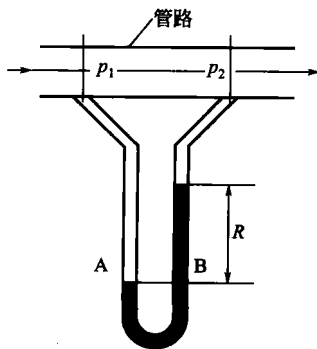


图 1-15 测量压力差