

中等职业学校化工类专业课程改革试验教材

化工单元操作

李祥新 朱建民 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

中等职业学校化工类专业课程改革试验教材

化工单元操作

李祥新 朱建民 主编

高等教育出版社

内容简介

本书根据教育部颁发的中等职业学校现行化工类及相关专业教学指导方案,结合中等职业学校化工类专业课程改革,并参照《化工行业常见技术工种操作规范与国家职业技能鉴定标准》进行编写。

本书主要介绍化工单元操作的基本原理和典型设备的结构及其操作方法。内容包括走近化工厂、流体输送操作、非均相物系分离、传热操作、溶液蒸发操作、液体精馏操作、气体吸收操作和固体干燥操作等七个模块。

本书采用出版物短信防伪系统,用封底下方的防伪码,按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作,可查询图书真伪并可赢得大奖。登录 <http://sv.hep.com.cn>,可获得图书相关信息及资源。

本书可作为中等职业学校化工类及相关专业教学用书,也可作为化工行业相关从业人员培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作/李祥新,朱建民主编. —北京:高等教育出版社,2009.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 025789 - 2

I. 化… II. ①李…②朱… 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 013495 号

策划编辑 李新宇 责任编辑 刘佳 封面设计 张楠 责任绘图 尹莉
版式设计 张岚 责任校对 杨雪莲 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	煤炭工业出版社印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	850 × 1168 1/16	版 次	2009 年 3 月第 1 版
印 张	13.5	印 次	2009 年 3 月第 1 次印刷
字 数	340 000	定 价	23.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25789 - 00

前 言

本书根据教育部颁发的中等职业学校现行化工类及相关专业教学指导方案,结合中等职业学校化工类专业课程改革,并参照《化工行业常见技术工种操作规范与国家职业技能鉴定标准》进行编写。

“化工单元操作”是中等职业学校化工技术类专业的一门核心专业课程,其功能是使学生掌握化工单元操作的基本技能和相关知识,并为学习其他专业课程打下坚实基础。

本书是中等职业学校化工技术类专业教材,以化工生产相关岗位需要和职业标准为依据,根据社会需求和中职学生特点,按照化工专业的知识目标和技能要求编写,力争体现行业和职业教育的发展趋势,满足学生未来职业发展和适应社会经济发展的要求。

本书主要介绍化工单元操作的基本原理和典型设备的结构及其操作方法。内容包括走近化工厂、流体输送操作、非均相物系分离、传热操作、溶液蒸发操作、液体精馏操作、气体吸收操作、固体干燥操作等七个模块。

本书的主要特色:

(1) 突出工作任务,引领实践导向的课程思想,将每个教学模块分为若干个工作项目,教学过程通过各个项目的实施来完成。根据知识目标和技能要求来设计训练项目,强调学生动手能力的培养。

(2) 教学内容注意保证专业技能的系统性,每个项目均列出所需的“相关知识”,强调应用型、操作型知识的介绍,摒弃复杂的公式推导和工程计算,真正体现理论知识以“必需、够用”为度的课程理念。

(3) 每个项目是一种任务式的教学内容,在“工艺卡片”中按工序列出了详尽的操作步骤,并做了要点提示,“数据记录”栏由学生在实训时填写,学训一体,可操作性强。

(4) 插图以实物图为主,直观性强。相关知识叙述中以“想一想”、“做一做”等小标题形式,随时拓展学生视野,激发学习兴趣和创造性思维的形成。

(5) 教学内容同时注意培养学生重视实践、尊重科学的职业理念,安全生产意识和合作、交流、协调的能力。

本教材适用于中等职业学校化工技术类及相关专业教学,也可供化工及相关行业技术人员参考。

教学建议:

(1) 在教学过程中,要紧密切联系生产实际,可在生产装置上进行实训,也可采用仿真系统进行实训。各学校可根据专业方向及教学培训条件,选择相应模块和项目进行教学。

(2) 课程最适宜采用模块化教学,理论课和实践课的课时安排控制在1:1左右。

(3) 提倡在实训室或专业教室上课,采用现场式、小班化教学,由具备较强实践能力的双师型教师任教。教学中宜采用讲练结合的教学方法,理论与实践教学一体化。

(4) 教学中应特别注重基本技能的训练,培养学生具有良好的工作素养和动手能力,并紧密结

|| 前 言

合相关工种职业技能鉴定,加强相应实训项目的训练。

学时分配建议如下:

序号	教 学 内 容	学 时 数
1	走近化工厂	2
2	模块 1 流体输送操作	46
3	模块 2 非均相物系分离	12
4	模块 3 传热操作	24
5	模块 4 溶液蒸发操作	16
6	模块 5 液体精馏操作	32
7	模块 6 气体吸收操作	24
8	模块 7 固体干燥操作	24
合 计		180

本书采用出版物短信防伪系统,用封底下方的防伪码,按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作,可查询图书真伪并可赢得大奖。登录 <http://sv.hep.com.cn>,可获得图书相关信息及资源。

参加本书编写人员有:李祥新(走近化工厂、模块 1、模块 2)、刘爱武(模块 3)、张如海(模块 4)、朱建民(模块 5、模块 6、附录)、吕晓莉(模块 7)。其中李祥新、朱建民担任主编,负责统稿工作。

石贞芹审阅了本书,为本书的编写提出了许多改进意见。书中部分图片由北京东方仿真软件技术有限公司友情提供,浙江中控科教仪器设备有限公司提供了部分实训装置图片,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,缺点和错误之处在所难免,敬请使用本书的教师及广大读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

走近化工厂	1	三、往复式压缩机	47
模块一 流体输送操作	2	四、罗茨鼓风机	48
项目 1 观察流体流动	2	五、真空泵	48
【工艺卡片】	2	【练习与扩展】	49
【相关知识】	3	模块二 非均相物系分离	51
一、流体流动的基础知识	3	项目 1 板框压滤机操作	51
二、管内流体的流动型态	13	【工艺卡片】	51
【练习与扩展】	14	【相关知识】	52
项目 2 化工管路的安装	15	一、过滤分离	53
【工艺卡片】	16	二、沉降分离	55
【相关知识】	17	【练习与扩展】	57
一、化工管路的构成	17	项目 2 三足式离心机操作	57
二、管子的选用与管路安装	21	【工艺卡片】	58
三、流体阻力	23	【相关知识】	59
【练习与扩展】	25	一、离心分离	59
项目 3 拆装离心泵	25	二、气固分离	60
【工艺卡片】	26	【练习与扩展】	61
【相关知识】	27	模块三 传热操作	63
一、离心泵的结构与工作原理	27	项目 1 认识换热器	63
二、离心泵的特性	28	【工艺卡片】	63
三、离心泵的类型	31	【相关知识】	64
四、其他类型的泵	33	一、换热器的分类	64
【练习与扩展】	36	二、间壁式换热器的结构	65
项目 4 离心泵操作	37	【练习与扩展】	71
【工艺卡片】	37	项目 2 测定套管式换热器的总传	
【相关知识】	39	热系数	71
一、离心泵的安装高度	39	【工艺卡片】	72
二、离心泵的选用与安装	40	【相关知识】	73
三、离心泵的操作	41	一、传热的基础知识	73
【练习与扩展】	43	二、换热器的计算	77
项目 5 离心式通风机操作	43	【练习与扩展】	83
【工艺卡片】	44	项目 3 换热器的操作	84
【相关知识】	45	【工艺卡片】	85
一、离心式通风机	45	【相关知识】	85
二、离心式压缩机	46	一、列管式换热器的选型	85

目 录

二、换热器的操作	87	【工艺卡片】	141
【练习与扩展】	90	【相关知识】	142
模块四 溶液蒸发操作	92	一、吸收塔	142
项目 1 认识蒸发器	92	二、吸收的基础知识	147
【工艺卡片】	92	三、吸收原理	148
【相关知识】	93	【练习与扩展】	151
一、蒸发器的分类	93	项目 2 填料塔流体力学特性的	
二、常见蒸发器结构	94	测定	152
【练习与扩展】	100	【工艺卡片】	153
项目 2 蒸发器操作	100	【相关知识】	154
【工艺卡片】	101	一、填料塔的流体力学性能	154
【相关知识】	102	二、吸收计算	155
一、蒸发流程	102	【练习与扩展】	159
二、蒸发器的计算	105	项目 3 填料吸收塔的操作	160
三、蒸发器的操作	107	【工艺卡片】	160
【练习与扩展】	109	【相关知识】	161
模块五 液体精馏操作	111	一、吸收塔操作	161
项目 1 认识精馏装置	111	二、解吸	163
【工艺卡片】	111	【练习与扩展】	164
【相关知识】	112	模块七 固体干燥操作	166
一、精馏塔	112	项目 1 认识干燥装置	166
二、精馏的基础知识	115	【工艺卡片】	166
【练习与扩展】	120	【相关知识】	167
项目 2 精馏基本操作	121	一、干燥器	167
【工艺卡片】	122	二、干燥的基础知识	169
【相关知识】	123	【练习与扩展】	174
一、精馏操作流程	123	项目 2 沸腾床干燥操作	175
二、精馏塔的操作	123	【工艺卡片】	175
【练习与扩展】	126	【相关知识】	176
项目 3 正庚烷-甲基环己烷混合液的		一、典型干燥器的操作	176
精馏	127	二、干燥过程的物料衡算	178
【工艺卡片】	127	【练习与扩展】	180
【相关知识】	129	项目 3 干燥器干燥曲线的测定	181
一、精馏塔的物料衡算	129	【工艺卡片】	181
二、精馏的操作线方程	130	【相关知识】	182
三、理论塔板数与塔板效率	134	一、干燥速率与干燥时间	182
四、回流比的选择	136	二、干燥操作条件的确定	186
【练习与扩展】	139	【练习与扩展】	187
模块六 气体吸收操作	141	附录	189
项目 1 认识气体吸收装置	141	参考文献	209

走近化工厂

化学工业及其产品在国民经济和日常生活中占有重要地位。化工生产是将自然界中的各种物质,经过化学和物理方法的处理,制成生产资料(如汽油、橡胶、化肥、农药等)和生活资料(如合成纤维、医药、化妆品等)的工业。

化工生产的门类很多。初走近化工厂,我们会被化工厂密密麻麻的管路和设备搞得晕头转向(如图0-1),但是不要着急,经过仔细观察你会发现,在复杂多样的加工过程中,除化学反应外,其余步骤都是一些类似的基本加工过程。如流体的输送、固体的干燥、液体的蒸馏、气体的吸收等,我们将这些基本的加工过程称为化工单元操作。将化学反应过程与若干个单元操作串联起来,就构成了一个化工产品的生产过程。

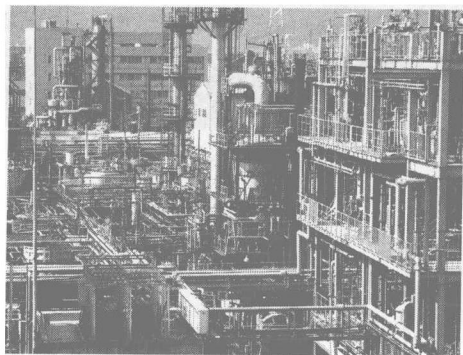


图0-1 化工厂的管路及设备

化工产品有成千上万种,但化工单元操作只有为数不多的几种。单元操作好像英语字母的作用那样,26个英语字母可以组合成无数的字、词和文章,数个单元操作按不同的方式连接,也可组合出许许多多的生产工艺。

不同生产过程中的同一种化工单元操作,遵循的原理相同,所使用的设备也相似。因此,只要我们熟练掌握化工单元操作的基础理论、设备操作和有关计算,便能很快适应化工生产中的各个操作岗位。

化工单元操作有十几种,按照操作原理,可以将它们归纳为五类:

- (1) 流体动力传递过程 如流体的输送、过滤、沉降、固体流态化等;
- (2) 传热过程 如加热、冷却、蒸发、冷凝等;
- (3) 传质过程 如蒸馏、吸收、干燥、萃取等;
- (4) 热力过程 如冷冻等;
- (5) 机械过程 如固体的粉碎、筛分、搅拌等。

在本课程学习过程中,要求我们掌握化工单元操作的基本原理、规律和相关计算,熟悉各种典型设备的结构和工作原理,掌握其操作调控方法,并能正确判断设备运行中出现的故障,解决生产中的实际问题。

模块一 流体输送操作

项目 1 观察流体流动

自然界中存在着大量的流动现象,如河水流动、刮风等。

流体有不同的流动状态。本项目借助雷诺实验装置,认识流体在管内流动的两种不同型态,学会雷诺数的计算,并用雷诺数判断流体流型。

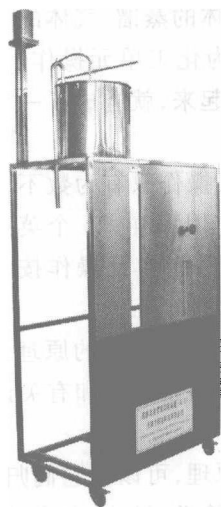


图 1-1 雷诺实验装置



【工艺卡片】

化工单元操作工艺卡片	实训班级	实训场地	学时	指导教师
				8
实训项目	观察液体的流动状态			
实训内容	通过雷诺实验装置(如图 1-1),观察流体在管内流动的两种不同型态			
设备与工具	雷诺实验装置			

续表

序号	工序	操作步骤	要点提示	现象及数据记录
1	水箱加水	打开进水阀,使水注满水箱;调节进水量,使水面维持在溢流口处	不要使设备震动,否则影响观察效果	
2	调节流量	慢慢打开出水阀、打开红墨水出口阀。从小到大调节流量,观察水在玻璃管中的流动状态	调节阀门时应尽量慢	
3	记录流量	记下层流和过渡流临界点的流量;过渡流和湍流的临界点流量	红水是一条界限分明的直线为层流;红水与清水混合为湍流	层流: 过渡流: 湍流:
4	计算雷诺数	查出操作温度下水的密度和黏度,计算两个临界点玻璃管的流速,算出临界点的雷诺数	计算时各单位制要一致	
5	验证雷诺判据	根据观察到的状态和计算的雷诺数,验证雷诺判据是否相符。雷诺判据: $Re \leq 2\,000$, 层流; $Re \geq 4\,000$, 湍流; $2\,000 < Re < 4\,000$ 时,可能为层流,也可能为湍流,与流动环境有关	该判据适用于圆形直管道	
数据处理 与结果计算		雷诺数计算公式: $Re = \frac{du\rho}{\mu}$		



【相关知识】

一、流体流动的基础知识

具有流动性的物质称为流体,包括气体和液体。一般液体的体积随压力变化很小,可认为是不可压缩性流体。对于气体,当压力变化时,其体积会有较大的变化,为可压缩性流体。

1. 液体内部不同位置的压强

我们都知道,人在水下会受到水的压力。那么人处在水下不同位置时,所受的压力相同吗?有经验的人都会知道,人潜入水下越深,受到的压力越大。潜水艇潜在水下几百米深时,其外壳会受到水对它施加的极大的压力,如图 1-2 所示。

(1) 压力的表示方法 什么是压力呢?这里所说的压力实际上指的是液体的压强,化工生产中习惯上将压强称为压力,是指垂直作用于流体单位面积上的压力,以 p 表示。

在国际单位制(SI)中,压力的单位是 N/m^2 ,专用名称为帕[斯卡],简称帕,用符号 Pa 表示。生产上还采用其他单位:MPa(兆帕);kPa(千帕);atm(标准大气压);at 或 kgf/cm^2 (工程大气压); mH_2O (米水柱);mmHg(毫米汞柱)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

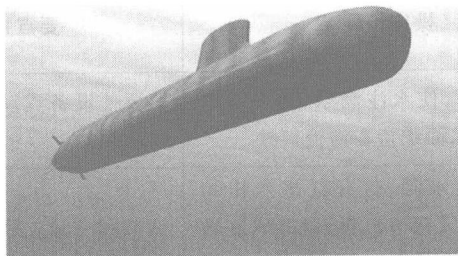


图 1-2 潜水艇外壳的各个方向均承受水的压力

$$1 \text{ atm} = 0.1013 \text{ MPa} = 101.3 \text{ kPa} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

流体的压力可以用压力表来测量。压力表上反映出的压力是设备内的实际压力与大气压力之差,称为表压,而设备内的实际压力称为绝对压力,即

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

当设备内的实际压力小于大气压力时,表上测出的压力叫真空度,即

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

绝对压力与表压、真空度的关系如图 1-3 所示。

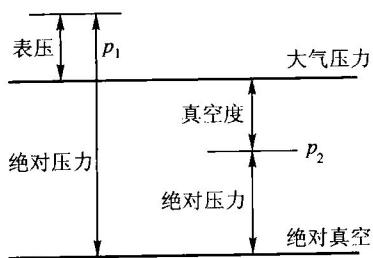


图 1-3 绝对压力、表压与真空度的关系

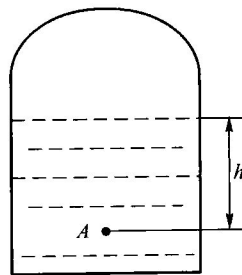


图 1-4 容器内液体示意图

用液柱高度表示压力单位时,液柱名称不能漏掉,如 760 mmHg, 10.33 mH₂O; 为避免混淆,对表压、真空度等应加以标注,如 2000 Pa(表压), 10 mmHg(真空度)等,另外还应指明当地的大气压力。

算一算 某设备进、出口测压仪表的读数分别为 3 kPa(真空度)和 67 kPa(表压),两处的压力差是多少?

(2) 静止流体内的压力计算——静力学基本方程式 如图 1-4 所示,容器内装有密度为 ρ 的液体,液面上方的压力为 p_0 ,距液面高度(深度)为 h ,则 A 点的压力为

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

式中 p ——液体内部任意一点的压力, Pa;

p_0 ——液面上方的压力, Pa;

ρ ——液体的密度, kg/m³;

h ——该点距离液面的高度, m 。

公式(1-1)称为静力学基本方程式,可计算液体内部任意水平面上的压力。

静力学基本方程式表明:在静止的、连通着的同种液体内,处于同一水平面上各点的压力相等。压力相等的面称为等压面。液体内部任意一点或液面上方的压力发生变化时,液体内部各点的压力也发生同样大小的变化。

读一读 流体密度

单位体积流体的质量称为密度,如以 m 表示流体的质量, V 表示流体的体积, ρ 表示流体的密度,单位为 kg/m^3 。则

$$\rho = \frac{m}{V}$$

不同单位制中,密度的单位不同。

任何流体的密度都随它的温度和压力而变化。压力对液体的密度影响很小,可忽略,温度对液体的密度有一定的影响。气体密度随压力和温度有较大的变化。在一定压力和温度下,气体密度可近似地用理想气体状态方程式计算,即

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

式中 p ——气体的压力, kPa ;

T ——气体的热力学温度, K ;

M ——气体的摩尔质量, $kg/kmol$;

R ——摩尔气体常数, $8.314 kJ/(kmol \cdot K)$ 。

常见液体和气体的密度可以从本书附录或有关手册上查得。在选用时,要注意测定时的温度。

(3) 利用静力学基本方程式解决实际问题

① 通过液柱高度可进行压力及压差测量。图 1-5 是常用的 U 形管压差计。当用 U 形管压差计测量设备内两点的压差时,可将 U 形管两端与被测两点直接相连,利用 R 的数值就可以计算出两点间的压力差。

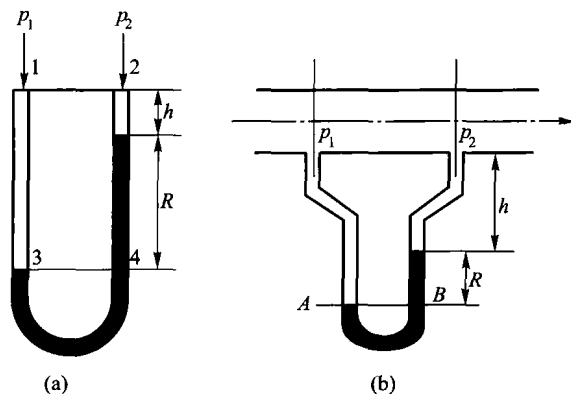


图 1-5 U 形管压差计

【例 1-1】 如图 1-5(b) 所示,已知管内流体为水,指示液为汞,压差计上读数为 40 mm,求两测压点的

6 模块一 流体输送操作

压差。

解 已知 $\rho_{H_2O} = 1\,000\text{ kg/m}^3$, $\rho_{Hg} = 13\,600\text{ kg/m}^3$

$$p_1 - p_2 = R(\rho_{Hg} - \rho_{H_2O})g = 0.04 \times (13600 - 1000) \times 9.81\text{ Pa} = 4\,944\text{ Pa}$$

② 用于了解化工生产中高位槽、储槽、塔器及地下容器内液位的高度。如图 1-6 和图 1-7。

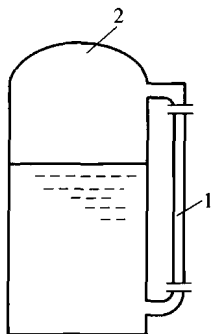


图 1-6 容器上的玻璃液位计
1—玻璃管;2—容器

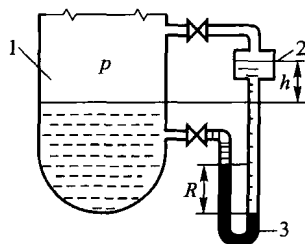


图 1-7 压差法测量液位
1—容器;2—平衡室;3—U 形管压差计

③ 计算液封高度。在化工生产中,为了控制设备内气体压力不超过规定的数值,常常使用安全液封(或称水封)装置,如图 1-8 所示。其作用是:当设备内压力超过规定值时,气体从水封管排出,以确保设备操作的安全,或防止气柜内气体泄漏。

若要求设备内的压力不超过 p (表压),则水封管的插入深度 h 为

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-2)$$

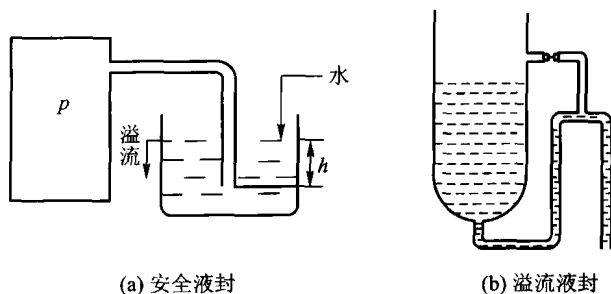


图 1-8 液封装置

2. 流量和流速

(1) 流量 单位时间内流过管道任一截面的流体量,称为流量。流量常用以下两种表示方法。

体积流量 单位时间内流体流经管路任一截面处流体的体积,称为体积流量,用符号 q_v 表示,单位为 m^3/s 。

质量流量 单位时间内流体流经管路任一截面处流体的质量,称为质量流量,用符号 q_m 表示,单位为 kg/s 。

体积流量与质量流量的关系为

$$q_m = q_v \rho \quad (1-3)$$

(2) 流速 流体流动时会有不同的速度,如图 1-9 所示。单位时间内流体质点在流动方向上所流过的距离,称为流速,用符号 u 表示,其单位为 m/s 。

由于流体具有黏性,流体流经管道任一截面上各点速度沿管径而变化,在管中心处最大,随管径加大而变小,在管壁面上流速为零。通常取管截面上的平均流速——单位流通面积上流体的体积流量,即

$$u = \frac{q_v}{A} \quad (1-4)$$

式中 A ——与流动方向相垂直的管道截面积, m^2 。

流速、体积流量、质量流量之间的关系为

$$q_v = uA \quad (1-5)$$

$$q_m = uA\rho \quad (1-6)$$

单位时间内流体流过管道单位截面积的质量,称为质量流速,以 G 表示,其单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其表达式为

$$G = \frac{q_m}{A} = \frac{q_v \rho}{A} = u\rho \quad (1-7)$$

由于气体的体积随温度和压强而变化,在管道截面积不变的情况下,气体的流速也要发生变化,采用质量流速为计算带来方便。

(3) 管径、流量和流速之间的关系 对于圆形管道,以 d 表示其内径,则有

$$q_v = uA = u \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \quad (1-8)$$

于是

$$d = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi u}} = \sqrt{\frac{q_v}{0.785u}} \quad (1-9)$$

式(1-9)称为流量方程,它描述了流体的流速、流量与管径三者之间的关系。

3. 稳定流动系统的质量守恒——连续性方程

(1) 稳定流动和不稳定流动 如图 1-10(a)所示的水槽,因上面不断加水,又有溢流装置,使槽内水位维持不变,则排水管任一截面处的流速、压力等都不随时间而变,这种情况称为稳定流动。

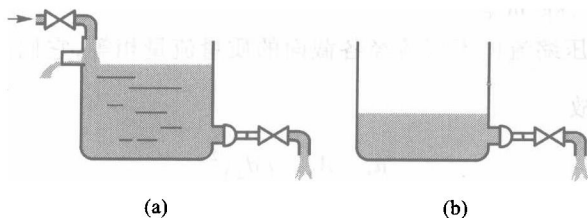


图 1-10 稳定流动和不稳定流动

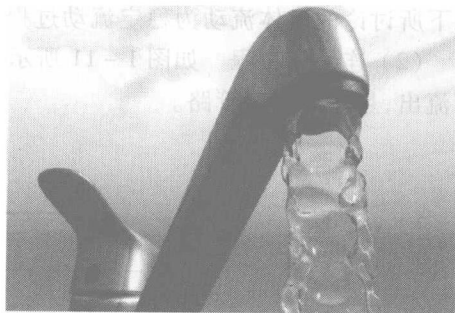


图 1-9 自来水的流速大约为 $1 \sim 1.5 \text{ m/s}$

而图 1-10(b) 所示的水槽, 因上面没有水补充, 随着槽中的水放出, 槽内水位不断降低, 所以排水管中水的流速、压力等也逐渐降低, 则称为不稳定流动。

化工厂中, 连续生产的开、停车阶段, 属于不稳定流动, 而正常连续生产时, 均属于稳定流动。以下所讨论的流体流动为稳定流动过程。

(2) 连续性方程 如图 1-11 所示的稳定流动系统, 流体连续地从 1-1' 截面流入, 从 2-2' 截面流出, 且充满全部管路。

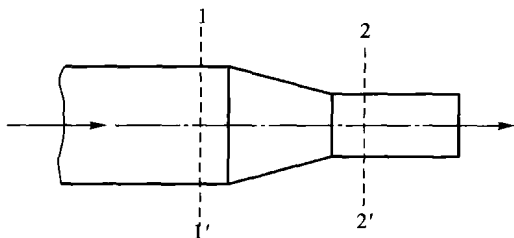


图 1-11 稳定流动系统

根据质量守恒定律: 输入的物质质量 = 输出的物质质量 + 物质的损失量

若以 1-1'、2-2' 截面为衡算范围, 在此范围内流体没有增加和流失的情况下, 在单位时间内进入截面 1-1' 的流体的质量流量与单位时间内流出截面 2-2' 的流体质量流量相等。即

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (1-10)$$

因为

$$q_m = uA\rho$$

故

$$q_m = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \dots = uA\rho = \text{常数} \quad (1-11)$$

式(1-10)、式(1-11)称为连续性方程。

若流体为不可压缩流体, 即 ρ 为常数, 则

$$q_v = uA = \text{常数} \quad (1-12)$$

式中 q_m ——流体的质量流量, kg/s ;

q_v ——流体的体积流量, m^3/s ;

u ——流体在管道任一截面的平均流速, m/s ;

A ——管道的有效截面积, m^2 ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

式(1-12)说明不可压缩流体不仅流经各截面的质量流量相等, 它们的体积流量也相等。

对于圆管, $A = \frac{\pi}{4}d^2$, 故

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (1-13)$$

式(1-13)说明不可压缩流体在管道内的流速 u 与管道内径的平方 d^2 成反比。管径越小, 流速越大, 管径最小的地方, 流速最大。

想一想 在稳定流动系统中,水从粗圆管流入细圆管,粗管内径为细管的两倍,则细管内水的流速为粗管内的几倍?

【例 1-2】 如图 1-11 所示的串联变径管路中,已知小管规格为 $\phi 57 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,大管规格为 $\phi 89 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$,水在小管内的平均流速为 2.5 m/s ,水的密度可取为 1000 kg/m^3 。试求:(1) 水在大管中的流速;(2) 管路中水的体积流量和质量流量。

解 (1) 小管内径 $d_1 = (57 - 2 \times 3) \text{ mm} = 51 \text{ mm}$, $u_1 = 2.5 \text{ m/s}$,

大管内径 $d_2 = (89 - 2 \times 3.5) \text{ mm} = 82 \text{ mm}$ 。

$$u_2 = u_1 \frac{A_1}{A_2} = u_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 2.5 \times \left(\frac{51}{82} \right)^2 \text{ m/s} = 0.967 \text{ m/s}$$

$$(2) \quad q_v = u_1 A = u_1 \left(\frac{\pi}{4} d_1^2 \right) = 2.5 \times 0.785 \times (0.051)^2 \text{ m}^3/\text{s} = 0.0051 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_m = q_v \rho = 0.0051 \times 1000 \text{ kg/s} = 5.1 \text{ kg/s}$$

4. 稳定流动系统的能量守恒——伯努利方程

流体流动过程中会有能量变化,流动系统中涉及的能量有多种形式。若系统不涉及温度变化及热量交换,热力学能为常数,则系统中所涉及的能量只有机械能、功及损失能量。

(1) 流体所具有的能量——机械能 流体在管内做稳定流动时,由于管路条件(如位置的高低、管径的大小)的变化,会引起流动过程中三种形式机械能——位能、动能、静压能的相应改变及相互转换。

① 位能。流体受重力作用,在不同高度处所具有的能量称为位能。如图 1-12 所示,瀑布上方的水较下面的水有更大的位能。若质量为 $m(\text{kg})$ 的流体与基准水平面的垂直距离为 $Z(\text{m})$,则位能为 $mgZ(\text{J})$,其单位为 J/kg 。位能是相对值,计算时须规定一个基准水平面,如 $0-0'$ 面。



图 1-12 瀑布上方的水较下面的水有更大的位能



图 1-13 水电站利用水流的动能推动巨大的发电机

② 动能。流体以一定流速流动,便具有动能。如图 1-13 所示,水电站利用水流的动能推动巨大的发电机。 $m(\text{kg})$ 流体的动能为 $\frac{1}{2}mu^2$,其单位为 J/kg 。

③ 静压能。流体内部任一点都有一定的压力,也就具有一定的能量,这种能量称为静压能。图 1-14 是某城市水管破裂后,静压能使水管破裂处喷出高高的水柱。质量为 $m(\text{kg})$ 的流体的静

压能为 $m \frac{p}{\rho}$ (J), 其单位为 J/kg。

上述三种机械能都可以用测压管中的一段液体柱高度来表示, 称为“压头”。位压头表示 1 N 流体的位能; 动压头表示 1 N 流体的动能; 静压头表示 1 N 流体的静压能。

对于理想流体, 在系统内任一截面处, 这三种机械能的总和是相等的。对于实际流体, 由于存在内摩擦, 流体在流动中总有一部分机械能随摩擦和碰撞转化为热能而损耗, 因此任意两截面上机械能总和并不相等, 两者的差值即为机械能损失。

(2) 系统与外界交换的能量 流动系统与外界交换的能量主要有功和损失能量。

在一个流动系统中, 还有流体输送机械(泵或风机)向流体做功, 1 kg 流体从流体输送机械所获得的能量称为外功或有效功, 用 W_e 表示, 其单位为 J/kg。

损失能量是指流体在系统流动时因克服系统阻力所损耗的能量, 以 Σh_f 表示, 单位为 J/kg。



图 1-14 静压能使水管破裂处
喷出高高的水柱

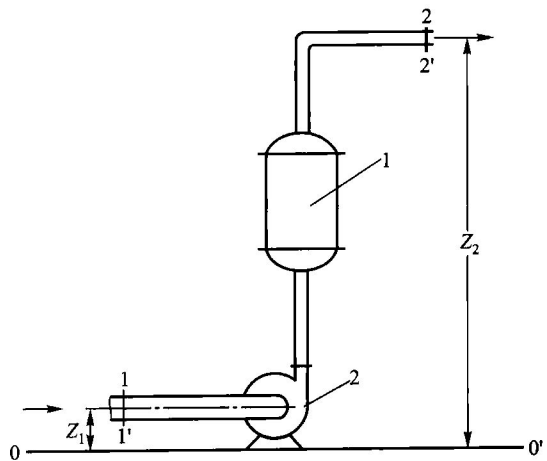


图 1-15 流体流动的总能量衡算
1—热交换器; 2—流体输送机械

(3) 伯努利方程 如图 1-15 所示, 不可压缩流体在系统中稳定流动, 流体从截面 1-1' 经泵输送到截面 2-2'。根据稳定流动系统的能量守恒, 输入系统的能量应等于输出系统的能量。

输入系统的能量包括由截面 1-1' 进入系统时带入的自身能量, 以及由输送机械中得到的能量。

输出系统的能量包括由截面 2-2' 离开系统时带出的自身能量, 以及流体在系统中流动时因克服阻力而损失的能量。

若以 0-0' 面为基准水平面, 两个截面距基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 、 Z_2 , 两截面处的流速分别为 u_1 、 u_2 , 两截面处的压力分别为 p_1 、 p_2 , 流体在两截面处的密度为 ρ , 单位质量流体从泵所获得的外加功为 W_e , 从截面 1-1' 流到截面 2-2' 的全部能量损失为 Σh_f 。则根据能量守恒定律, 1 kg 流体在两截面 1-1' 与 2-2' 处所具有的能量守恒与转化关系为