



高等学校教材

过程工程原理

(化工原理)

◆ 谭天恩 李伟 等编著



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

过程工程原理

(化工原理)

谭天恩 李 伟 等编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程工程原理 (化工原理)/谭天恩 李伟等编著. —北京:化学工业出版社, 2004.7

ISBN 7-5025-5760-1

I. 过… II. ①谭…②李… III. 过程工程原理 (化工原理)
IV. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 062734 号

高等学校教材
过程工程原理
(化工原理)

谭天恩 李 伟 等编著

责任编辑:何 丽

文字编辑:张双进

责任校对:吴桂萍

封面设计:潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 573 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5760-1/G·1530

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

化学工业一直与保障人类生活需要、发展生产力密不可分，在国民经济中占有重要地位。产业革命后，化工产品日益增多，生产工艺和设备也随之层出不穷。这些生产过程可以分成两大类。一类是在各种反应器内进行的化学反应过程，从本质上改变物质，是化工生产的核心；另一类以物理过程为主，同样为生产过程所必需。如为反应提供所需的压力、温度和物料组成等，为此原料必需经过系列的前处理，以达到其纯度、状态等要求；对于反应产物也需要经过后处理，以使产品（或中间产物）符合规格，未反应的原料及副产物能充分利用；同时，对各过程排出的“三废”应进行处理，以消除或减轻其对环境的危害，并尽可能地将污染物资源化。这类过程通常占有工厂投资和运行费用的主要部分，而对整个生产的经济效益具有决定意义。

20世纪初，从事化工生产和教学的工程师、教授们通过分析，从这些多种多样的物理过程找出其间的共性，归纳成为数不多（常见的为十多种）的“单元操作”；所形成的这一学科，促成了化学工程学的诞生；作为一门课程，我国称之为“化工原理”，已开设了近70年，对培养我国的化工类技术人才起了重要作用。到20世纪中叶，学者们进一步将这些单元操作归纳为三种传递过程：

- (1) 动量传递过程（流体流动），包括流体输送、沉降、过滤等；
- (2) 热量传递过程（传热），包括加热、冷却、蒸发等；
- (3) 质量传递过程（传质），包括吸收、蒸馏、萃取、干燥等。

以上形成了“传递过程”这门化学工程的学科分支，加强了理论基础。但作为高等学校的一门课程，化工原理更侧重于实际应用。

化学工程学科的不断发展和其与其他学科的交叉，其应用对象已远远超出了化学工程原来涉及的化学产品，几乎覆盖了所有物理和化学的物质加工过程，如环保、生物、材料、石化、能源、轻化工、医药和食品等工业过程。因此许多学者认为将狭义的“化学工程”提升为覆盖面更宽阔的“过程工程”似更为确切合理。为此，本书尝试由“化工原理”更名为“过程工程原理”。

本书立足学以致用，力求打好基础，即注重过程工程的基本概念、基本原理和典型设备的工艺计算；例题和习题的设计尽量来自相关专业的实际应用，以使用工程观点分析解决实际问题。此外，也适当介绍一些新近发展的技术，以扩大知识面，激发学习兴趣。

本书编写人员：第一章至第四章由李伟执笔，第五章（部分）、第八章由吴祖成执笔，第六、七章由周明华和施耀执笔；第八章中的膜分离由陈欢林编写；谭天恩参加了各章的编写，并为全书统稿。在本书的编写过程中，聂勇、张英、康颖、李明波参加了资料整理工作。

限于编者学术水平和时间，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2004年5月于浙江大学求是园

目 录

第 1 章 流体流动	1
1.1 流体静力学及其应用	1
1.1.1 流体的密度	1
1.1.2 流体的压力	1
1.1.3 流体静力学基本方程	2
1.1.4 流体静力学基本方程式的应用	3
1.2 流体流动的基本方程	4
1.2.1 流量与流速	4
1.2.2 稳定流动与不稳定流动	4
1.2.3 稳定流动时流体的质量衡算——连续性方程	5
1.2.4 流体流动时的总能量衡算和机械能衡算	5
1.3 流体流动现象.....	11
1.3.1 牛顿黏性定律及流体的黏度.....	11
1.3.2 流体的流动型态及雷诺数.....	13
1.3.3 管内流动的分析.....	15
1.3.4 边界层概念.....	17
1.4 管路内流动的阻力损失.....	18
1.4.1 层流时的沿程损失.....	19
1.4.2 湍流时的沿程损失.....	20
1.4.3 局部损失.....	24
1.5 管路计算.....	28
1.5.1 简单管路.....	28
1.5.2 复杂管路的概念.....	32
1.6 流速、流量的测量.....	33
1.6.1 变压头的流量计.....	33
1.6.2 变截面的流量计.....	36
本章符号说明	38
习题	39
第 2 章 流体输送机械	43
2.1 离心泵.....	43
2.1.1 离心泵的工作原理和主要部件.....	43
2.1.2 离心泵的基本方程.....	45
2.1.3 离心泵基本方程的讨论.....	47
2.1.4 离心泵的实际压头和主要性能参数.....	47

2.1.5	离心泵的特性曲线及其应用	48
2.1.6	离心泵的工作点与流量调节	51
2.1.7	离心泵的安装高度和汽蚀现象	54
2.1.8	离心泵的类型和选用	55
2.2	容积式泵	58
2.2.1	往复泵	58
2.2.2	计量泵(比例泵)	59
2.2.3	隔膜泵	60
2.2.4	齿轮泵	60
2.2.5	螺杆泵	61
2.2.6	容积式泵的流量调节	61
2.3	各类泵在生产中的应用	61
2.4	气体输送机械	62
2.4.1	离心式风机	63
2.4.2	罗茨鼓风机	66
2.4.3	往复式压缩机	66
2.4.4	真空泵	68
	本章符号说明	70
	习题	71

第3章	非均相物系的分离	73
3.1	颗粒的特性	73
3.1.1	单个颗粒的性质	73
3.1.2	混合颗粒的特性参数	74
3.2	沉降	75
3.2.1	颗粒-流体间的阻力	75
3.2.2	重力沉降	77
3.2.3	重力沉降设备	80
3.2.4	离心沉降速度	82
3.2.5	离心沉降设备	83
3.3	过滤	86
3.3.1	过滤过程的基本概念	86
3.3.2	影响过滤的因数	87
3.3.3	过滤过程的计算	88
3.3.4	过滤常数的测定	90
3.3.5	滤饼的洗涤	91
3.3.6	过滤设备	92
3.4	气体的其他净化方法	96
3.4.1	惯性除尘器	96
3.4.2	袋滤器	96

3.4.3 电除尘器	98
3.4.4 湿式除尘器	99
本章符号说明	101
习题	101
第4章 传热	103
4.1 概述	103
4.1.1 传热的三种基本方式	103
4.1.2 传热速率	104
4.1.3 稳定传热和不稳定传热	104
4.2 热传导	104
4.2.1 热传导的数学描述及导热系数	104
4.2.2 平壁的稳定热传导	106
4.2.3 圆筒壁的稳定热传导	110
4.3 对流给热	111
4.3.1 给热系数	112
4.3.2 影响给热的主要因素	113
4.3.3 给热系数及量纲分析	113
4.3.4 流体在管内作强制对流的给热系数	115
4.3.5 管外强制对流的给热系数	117
4.3.6 流体作自然对流时的给热系数	119
4.3.7 蒸汽冷凝时的给热系数	121
4.3.8 液体沸腾时的给热系数	124
4.3.9 给热系数关联式的小结	126
4.4 辐射传热	127
4.4.1 基本概念	127
4.4.2 辐射能力和斯蒂芬-波尔茨曼定律	128
4.4.3 克希霍夫定律	128
4.4.4 两固体间的辐射传热	129
4.4.5 气体热辐射的特点	132
4.4.6 热损失计算——对流和辐射的联合传热	133
4.5 两流体通过间壁的热量传递	133
4.5.1 传热速率方程	134
4.5.2 传热系数	134
4.5.3 平均温差和热量衡算	138
4.5.4 壁温的确定	141
4.5.5 复杂流向时的平均温度差	141
4.5.6 传热效率和传热单元数法	145
4.6 传热设备	150
4.6.1 换热器的类型	151

4.6.2	间壁式换热器的类型	151
4.6.3	列管式换热器	152
4.6.4	板式换热器	153
4.6.5	其他几种换热器的类型	156
4.6.6	列管式换热器的选用与设计原则	157
4.6.7	换热器传热的强化途径	160
	本章符号说明	161
	习题	162
第5章	吸收	166
5.1	概述	166
5.1.1	吸收过程的分类	166
5.1.2	吸收的流程	167
5.1.3	吸收剂的选择	168
5.2	吸收设备	168
5.2.1	填料塔和板式塔	168
5.2.2	填料特性与常用填料	169
5.3	气液相平衡	172
5.3.1	气体在液体中的溶解度	172
5.3.2	亨利定律	173
5.3.3	相平衡在吸收过程中的应用	174
5.4	传质机理与传质速率	176
5.4.1	分子扩散和费克定律	176
5.4.2	扩散系数	180
5.4.3	吸收传质的机理和速率	182
5.5	低浓度气体的吸收	186
5.5.1	微分物料衡算和传质速率	186
5.5.2	物料衡算和传质速率的积分式	187
5.5.3	填料层高度	187
5.6	传质单元	190
5.7	吸收动力学数据	191
5.8	吸收塔的计算	194
5.8.1	吸收剂的用量	194
5.8.2	填料塔直径	195
5.8.3	吸收塔的操作型问题	197
5.9	化学吸收	199
	本章符号说明	200
	习题	201
第6章	蒸馏	202

6.1 二元物系的汽液相平衡	202
6.1.1 理想溶液的汽液相平衡	202
6.1.2 非理想溶液的汽液相平衡	207
6.2 蒸馏方式	209
6.2.1 简单蒸馏	209
6.2.2 平衡蒸馏	210
6.2.3 精馏原理	212
6.3 二元连续精馏的分析和计算	213
6.3.1 全塔物料衡算	213
6.3.2 理论板概念和恒摩尔流假设	214
6.3.3 分段物料衡算及其图解	215
6.3.4 进料状态的影响	217
6.3.5 求理论塔板数小结	220
6.3.6 最小回流比及回流比的选择	224
6.3.7 实际塔板数和塔板效率	226
6.4 精馏装置的热量衡算	228
6.4.1 再沸器的热负荷	228
6.4.2 冷凝器的热负荷	229
6.5 多元精馏的概念	230
6.6 特殊蒸馏	232
6.6.1 水汽蒸馏	232
6.6.2 恒沸蒸馏	233
6.6.3 萃取蒸馏	234
6.7 蒸馏设备	235
6.7.1 概述	235
6.7.2 塔板的结构和功能	236
6.7.3 板式塔类型	236
6.7.4 板式塔的水力学性能	239
本章符号说明	247
习题	248

第7章 干燥

7.1 湿空气的性质及湿度图	250
7.1.1 表示湿空气性质的主要参数	250
7.1.2 空气湿度图	254
7.1.3 绝热饱和温度和湿球温度	256
7.2 干燥器的物料衡算及热量衡算	259
7.2.1 湿物料中含水率的表示方法	259
7.2.2 空气干燥器的物料衡算	260
7.2.3 空气干燥器的热量衡算	261

7.2.4 干燥过程的图解	263
7.3 干燥速度和干燥时间	266
7.3.1 物料中所含水分的性质	266
7.3.2 恒定干燥条件下的干燥速度	268
7.3.3 干燥曲线和干燥速度曲线	268
7.4 干燥设备	271
7.4.1 干燥器的性能要求和选择原则	271
7.4.2 常用工业干燥器简介	272
7.4.3 干燥技术在环境保护中的应用	280
本章符号说明	281
习题	283
第8章 其他分离过程	285
8.1 萃取分离	285
8.1.1 萃取过程和萃取剂	285
8.1.2 超临界萃取	289
8.1.3 反胶团萃取	292
8.1.4 双水相萃取	294
8.2 吸附分离	296
8.2.1 吸附平衡	297
8.2.2 吸附剂	298
8.2.3 吸附分离过程	299
8.2.4 变温和变压吸附	300
8.3 膜分离	303
8.3.1 膜分离概述	303
8.3.2 反渗透、纳滤、超滤和微滤	306
8.3.3 电渗析	310
8.3.4 液膜分离	311
8.3.5 气体的膜分离	313
8.3.6 渗透汽化与蒸气渗透	314
本章符号说明	316
习题	316
主要参考文献	317
附录	319
附录1 单位换算	319
附录2 某些气体的重要物理性质	322
附录3 某些液体的重要物理性质	323
附录4 某些固体材料的重要物理性质	324

附录 5	水的重要物理性质	325
附录 6	干空气的物理性质 (101.33 kPa 下)	326
附录 7	水的饱和蒸气压 (-20~100 °C)	327
附录 8	饱和水蒸气表 (按温度排列)	328
附录 9	饱和水蒸气表 (按压力排列)	329
附录 10	水的黏度 (0~100 °C)	331
附录 11	液体黏度共线图	332
附录 12	气体黏度共线图 (常压下用)	334
附录 13	液体比热容共线图	336
附录 14	气体比热容共线图 (常压下用)	338
附录 15	液体汽化潜热共线图	340
附录 16	管子规格	341
附录 17	IS 型单级单吸离心泵性能 (摘录)	344
附录 18	8-18 9-27 离心通风机综合特性曲线图	347
附录 19	换热器	348
附录 20	常用筛子的规格	353
附录 21	若干气体在水中的亨利系数	354
附录 22	氨在水中的溶解度	355
习题参考答案		356

第1章 流体流动

生产过程中所处理的物料以流体（气体和液体）占多数，因此，流体输送是最常见的单元操作。本章内容包括：流体的静力学，流体在管道中流动的基本规律，流体输送所需功率，流量测量等。流体流动规律在过程工程学科中是极为重要的，它不仅是研究流体输送、非均相物系分离、搅拌以及固体流态化等单元操作所依据的基本规律，而且与热量传递、质量传递和化学反应等过程都有极为密切的联系。

过程工程中所研究的流体运动规律，不是流体分子的微观运动，而是流体在生产装置内的宏观运动。因此，可以取大量流体分子组成的微团作为流体运动质点，并以其为研究对象；其尺度虽远小于设备尺寸，但比流体分子运动的自由程大得多，这样就可以假定流体是由无数质点组成的，彼此间没有间隙，是完全充满所占空间的连续介质。这一设想称为流体的连续性假定，它对除高真空度稀薄气体以外的气体和液体均适合。以下即按这一概念认识流体在静止及运动时的基本规律。

1.1 流体静力学及其应用

流体在重力与压力作用下达到平衡，便呈现静止状态；若平衡不能维持，便产生流动。静止流体的规律实际上是流体在重力作用下内部压力变化的规律。在此，首先介绍与此有关的几个物理量。

1.1.1 流体的密度

单位体积流体的质量称为流体的密度，单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。压力与温度一定，流体的密度亦为一定。密度随压力改变很小的流体称为不可压缩流体，若有显著改变则称之为可压缩流体。流体通常可分为气体和液体。液体的密度基本上不随压力而改变，通常认为是不可压缩的，但随温度稍有变化。气体是可压缩的，然而在输送过程中若压力改变不大，密度变化也不大时，仍可按不可压缩流体处理。液体的密度用查找手册或计算的方法获取，必要时可由实验测定。真实气体的压力、温度、体积之间的关系是复杂的，但在与常温常压相近时一般可按理想气体考虑。其密度的表达式为

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

式中 m ——质量， kg ；
 V ——体积， m^3 ；
 n ——气体的物质的量， kmol ；
 p ——压力， kPa ；
 R ——气体常数， $8.314 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；
 M ——摩尔质量， $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ；
 T ——温度， K 。

相对密度是指物质密度与 4°C 时纯水密度之比。

1.1.2 流体的压力

流体作用于整个面（例如器壁）上的力称为总压力，它垂直于作用面。流体垂直作用于

单位面积上的力，称为压力强度，简称为压强，但习惯上多称为压力。其法定单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，称为 Pa（帕）。此外还有许多习惯使用的单位，它们及其间的换算可参阅附录 1。

常用压力表所显示的读数是表内压力比大气压高出的值，而非表内压力的实际值。若表内、表外压力相等，则压力表的读数为零。压力的实际数值称为绝对压力（绝压），从压力表上读得的压力值称为表压力（表压），两者的关系为

$$\text{绝压} = \text{气压计读数} + \text{表压}$$

真空表上的读数是所测实际压力比大气压要低的值，称为真空度。真空度与绝压之间的关系为

$$\text{绝压} = \text{气压计读数} - \text{真空度}$$

显然，真空度越高，说明绝压越低。真空度也是表压的绝对值，例如真空度为 90 kPa，按表压算就是 -90 kPa。因此，工业上亦将真空度称为负压。

当压力数值用绝压或真空度表示时，应分别注明，以免混淆。例如 200 kPa（绝压），700 mmHg（真空）。若未注明，便视为表压。记录真空度或表压时，还要注明气压计读数，若没有注明，便认为是 1 标准大气压，即 101.3 kPa。

1.1.3 流体静力学基本方程

静止流体内部任一点的的压力称为该点的流体静压力（简称静压），其特点如下。

① 从各方向作用于某一点上的静压相等；

② 若指定一通过该点的作用平面，则静压的方向垂直于此面；

③ 在重力场中，同一水平面上各点的静压相等，但随位置高低而变。

对静止流体作力的平衡，可得到静力学方程式。如图 1-1 所示，考虑一垂直流体柱，其底面积为 A 。在底面以上高度为 z 的水平面上所作用的压力为 p ，此处流体的密度为 ρ 。在此水平面上厚度为 dZ 的薄层流体所受的力如下。

① 向上作用于薄层下底的总压力 pA ；

② 向下作用于薄层上底的总压力 $(p+d p)A$ ；

③ 向下作用的重力 $\rho g A d z$ 。

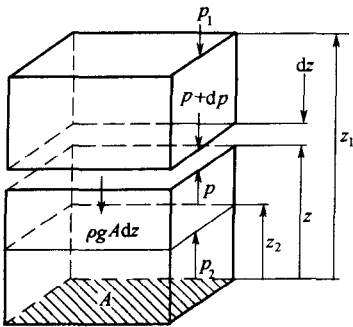


图 1-1 静止流体的力平衡

以向上作用的力为正，向下作用的力为负。静止时三力之和为零，故

$$pA - (p + dp)A - \rho g A dz = 0 \quad (1-2)$$

简化得

$$dp + \rho g dz = 0 \quad (1-3)$$

对连续、均一且不可压缩流体， ρ 为常数，积分上式得

$$p + \rho g z = \text{常数} \quad (1-4)$$

若积分上、下限分别取高度等于 z_1 和 z_2 的两个平面，又作用于这两平面上的压力分别为 p_1 与 p_2 ，则得

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2) \quad (1-5)$$

或

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + (z_1 - z_2) \quad (1-6)$$

式 (1-4)~式 (1-6) 是流体静力平衡的基本方程，适用于重力场中静止的、连续的、均一的不可压缩流体。上述各式表明：静止流体内部某一水平面上的压力与其位置及流体的密度有

关，所在位置愈低、密度越大，则压力愈大。从式 (1-5) 还可看出， p_1 若有变化， p_2 亦随之增减，即液面上所受的压力能以同样大小传递到液体内部的任一点（巴斯噶定理）。

若容器上部通大气，则以表压表示的 p_1 为零，容器底部静压 $p = p_2$ ，又以 z_p 代表 $z_1 - z_2$ ，从式 (1-6) 可知

$$\frac{p}{\rho g} = z_p \quad (1-6a)$$

式 (1-6a) 就是液柱高 z_p 与所产生的静压 p 之间的关系。 $p/\rho g$ 通称为静压头， z_p 相应地称为位头或位压头。

推导上述方程时曾假设 ρ 为常数。在工业设备高度的范围内，无论对气体或液体，此假设都能成立。

值得注意的是，积分范围内的流体只有一种而且是连续的，运用上述方程时要注意这一条件。

例 1-1 如图 1-2 所示，废水缓冲罐中有密度为 $1\,060\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的废水，水面最高时离罐底 10.4 m ，水面上方与大气相通。罐侧壁下部有一直径 600 mm 的人孔，用盖压紧。圆孔的中心距罐底 800 mm 。试求作用在人孔盖上的总压力。

解 先求作用于孔盖内侧的静压。作用于孔盖的平均静压等于作用于盖中心点的静压（试用积分结果证明）。以罐底为基准水平面，压力以表压计，则

$$z_1 = 10.4\text{ m}, z_2 = 800\text{ mm (或 } 0.8\text{ m)}$$

$$p_1 = 0, \rho = 1\,060\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) = 0 + 1\,060 \times 9.81 \times (10.4 - 0.8) = 99\,800\text{ Pa (或 } 99.8\text{ kPa)}$$

p_2 为作用于孔盖内侧的表压，作用于孔盖外侧的表压为零，故孔盖所受的平均压力为 99.8 kPa 。

作用于孔盖上的力

$$F = pA = 99.8 \times (\pi/4) \times 0.6^2 = 28.2\text{ kN}$$

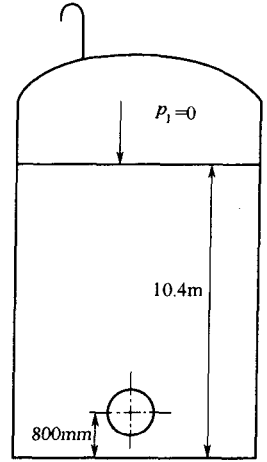


图 1-2 例 1-1 附图

1.1.4 流体静力学基本方程式的应用

压力是许多工业生产中重要的测量、控制参数。U 形管压差计是多种测压仪表中最简单、常用的一种。如图 1-3 所示，在一根 U 形的玻璃管内装液体，称为指示液。指示液要与所测流体不互溶，其密度大于所测流体的密度。

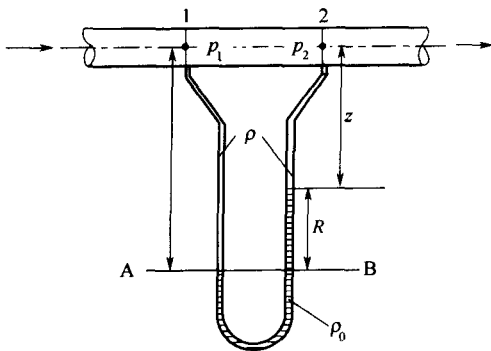


图 1-3 U 形管压差计

将 U 形管与所测的两点连通，若两测压点的压力不等（图中 $p_1 > p_2$ ），则指示液在 U 形管的两侧臂上便显示出高差 R 。

设指示液的密度为 ρ_0 ，被测流体的密度为 ρ 。如图 1-3 所示，两侧臂在水平面 A、B 处的静压相等，即 $p_A = p_B$ ，因为这两点都在相连通的另一静止流体中，并且在同一水平面上。1、

2 两点的静压力则不等, 因为这两点虽在同一水平面上, 却不是在相连通的一种静流体内。通过式 (1-5), 便能求出 $p_1 - p_2$ 的值。考虑 U 形管左侧的流体柱, 可得

$$p_A = p_1 + \rho g(z + R)$$

同样, 考虑其右侧可得

$$p_B = p_2 + \rho g z + \rho_0 g R$$

因 $p_A = p_B$, 故

$$p_1 + \rho g(z + R) = p_2 + \rho g z + \rho_0 g R$$

简化后即为 (由读数 R 计算) 压力差 $p_1 - p_2$ 的公式

$$p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) g R \quad (1-7)$$

测量气体时, 由于气体的密度比指示液的密度小得多, 式 (1-7) 中的 ρ 可以忽略, 于是可简化为

$$p_1 - p_2 = \rho_0 g R \quad (1-8)$$

若 U 形管的一端与被测流体连接, 另一端与大气相通, 则读数 R 即反映被测流体的表压。

亦可将普通 U 形管压差计倾斜放置, 以放大读数, 此即倾斜式 U 形管压差计。

1.2 流体流动的基本方程

工业中流体的输送多在密闭的管路中进行, 因此研究流体在管内的流动是过程工程中的一个重要课题。流体在管内的流动方向是轴向, 可按一维流动来分析。由此而建立的基本方程, 也可以应用于包括有密闭的容器与设备的管路系统, 流动流体的截面规定为与流动的方向相垂直。

1.2.1 流量与流速

流速 流体在流动方向上单位时间内通过的距离称为流速, 用 v 表示, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

流量 流体在单位时间内通过流通截面 (与流速方向垂直) 的体积量, 称为体积流量, 用 q_v 表示, 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 或 m^3/h ; 流体在单位时间内通过流通截面的质量, 称为质量流量, 用 q_m 表示, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 kg/h 两者的关系为

$$q_m = \rho q_v \quad (1-9)$$

式中, ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

平均流速 流体质点在同一截面上各点的线速度并不相等, 在管壁处为零, 离管壁越远则速度越大, 至管中心达到最大值。工程上用体积流量 q_v 除以流通截面积 A 所得之商作为平均速度, 用 u 表示, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$u = \frac{q_v}{A} \quad \text{或} \quad q_v = uA \quad (1-10)$$

在不会引起混淆的情况下, 简称其为流速。用质量流量 q_m 除以流通截面积 A 所得的商称为质量流速, 用 G 表示, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。显然

$$G = \frac{q_m}{A} = \rho \frac{q_v}{A} = \rho u \quad (1-10a)$$

1.2.2 稳定流动与不稳定流动

按流体流动时的流速、压力、密度等物理量是否随时间而变化, 可将流体的流动分成两类: 稳定 (稳态) 流动和不稳定 (非稳态) 流动。稳定流动中, 流速 (其他物理量亦然) 只与位置有关。而不稳定流动中, 流速除与位置有关外, 还与时间有关。连续生产过程的流体流动, 常视为稳定流动, 在开工或停工阶段, 则常属于不稳定流动。本章所述除特别说明

外，都为稳定流动过程。

1.2.3 稳定流动时流体的质量衡算——连续性方程

本节分析流体流动所用的方法，是考虑流体在一个系统的进、出口各参数的差异，通过物料衡算和能量衡算，得到表示流体流动中流速变化与能量变化的基本方程。分析时只注意管路系统外部所显现的变化，至于系统内部发生了什么情况，并不考虑。进行物料衡算或能量衡算时，首先要确定衡算的范围。这种范围称为控制体，它是指所研究的固定空间区域，有明确的界面。如图 1-4 所示的流动系统中，流体充满管路，连续通过截面 1-1 和截面 2-2 构成的控制体。根据稳定过程中的质量守恒定律，流体进入截面 1-1 的质量流量，等于从截面 2-2 流出的质量流量。

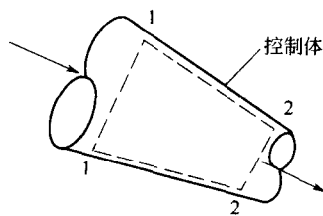


图 1-4 管路或容器内的流动

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (1-11)$$

式中， u 为流速； A 为流动截面积； ρ 为密度。此关系亦可扩展到管路的任一截面而写为

$$\rho u A = \text{常数} \quad (1-12)$$

若流体不可压缩， $\rho = \text{常数}$ ，上式简化为

$$u A = \text{常数} \quad (1-13)$$

以上是将流体视为由无数质点彼此紧靠着而构成的连续体。因此，这些公式用于管内流动时，流体必须充满全管，不能有间断之处。这也是式 (1-11)~式 (1-13) 被称为连续性方程的原因。

例 1-2 如图 1-5 所示，管路由一段内径 60 mm 的管 1、一段内径 100 mm 的管 2 及两段内径 50 mm 的分支管 3a 及 3b 连接而成。水以 $5.10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的体积流量自左侧入口送入，若在两段分支管内的体积流量相等，试求各段管内的流速。

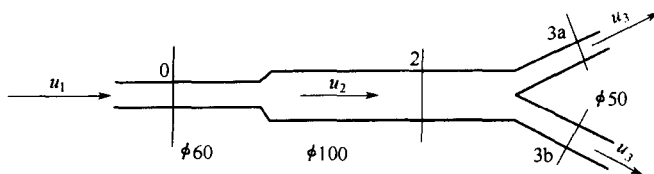


图 1-5 例 1-2 附图

解 通过内径 60 mm 管的流速为

$$u_1 = \frac{q_v}{A_1} = \frac{5.10 \times 10^{-3}}{\pi(0.06)^2/4} = 1.804 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

利用连续性方程式 (1-13)，可得

$$u_2 = \frac{u_1 A_1}{A_2} = u_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} = 1.804 \times \left(\frac{60}{100}\right)^2 = 0.649 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

水离开内径 100 mm 的管后分成体积流量相等的两股，故

$$u_1 A_1 = 2u_3 A_3$$

$$u_3 = (u_1/2)(A_1/A_3) = (u_1/2)(d_1/d_3)^2 = (1.804/2)(60/50)^2 = 1.299 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

1.2.4 流体流动时的总能量衡算和机械能衡算

1.2.4.1 总能量衡算

如图 1-6 所示是一流动系统或流动系统的一部分。现选作控制体，控制面由壁面和流通截面 1-1、2-2 所组成。在稳定条件下，每单位时间若有 1 kg 质量的流体通过截面 1-1 进入

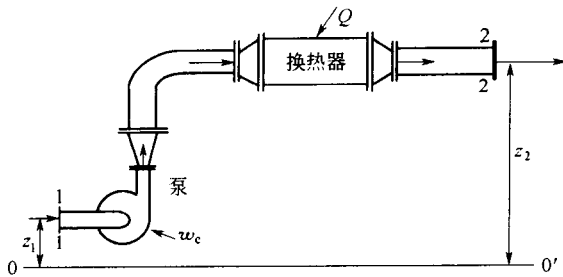


图 1-6 流动系统

的影响一般可忽略。1 kg 流体的内能以 U 表示。

(2) 位能 这是流体因处于地球重力场内而具有的能量。规定一个计算位能起点的基准水平面，如图 1-6 上的 0-0'，若流体与基准水平面的垂直距离为 z （在此水平面以上 z 值为正，以下为负），位能等于将流体提升距离 z 所做的功，1 kg 流体的位能为 gz 。

(3) 动能 这是流体因运动而具有的能量，等于将流体从静止状态加速到流速 u 所做的功，1 kg 流体的动能为 $u^2/2$ 。

(4) 压力能 将流体压进控制体时需要对抗压力做功。所做的功便成为流体的压力能进入控制体。1 kg 流体的体积为 $1/\rho$ ，故压力能为 p/ρ 。

1 kg 流体所具有的总能量 E 即为上述四项之和

$$E = U + gz + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho}$$

这些都是伴随流体进、出控制体而输入或输出的能量。除此之外，能量也可以通过其他途径进、出控制体。其他能量的形式如下。

(5) 功 若管路上安装了泵或鼓风机等流体输送机械对流体做功，便有能量从外界输入到控制体内。反之，流体也可以通过水力机械等对外界做功而输出能量。1 kg 流体在控制体中所接受的外功为 w_e ，此时 w_e 为正，对外界做功则 w_e 为负。

(6) 热 若管路上连接有加热器或冷却器，流体通过时便吸热或放热。1 kg 流体通过控制体的热量变化用 Q 表示，当流体吸入热量时， Q 为正，放出热量则为负。

若将伴随流体经过截面 1-1 输入的能量用下标 1 标明，经过截面 2-2 输出的能量用下标 2 标明，则对图 1-6 所示以 1 kg 流体为基准的稳定流动的总能量衡算式（式中各项的单位均为 $J \cdot kg^{-1}$ ）

$$U_1 + gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} + w_e + Q = U_2 + gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-14)$$

对于不可压缩的流体， $\rho_1 = \rho_2$ ，现以 ρ 表示可得

$$w_e + Q = U_2 - U_1 + g(z_2 - z_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} \quad (1-14a)$$

式 (1-14) 中所包括的能量可分为两类，一类是机械能，即位能、动能、压力能，功也归入此类。此类能量在流体流动过程中可以相互转变，亦可转变为热或流体的内能。另一类包括内能和热，它们都不能直接转变为可用于流体输送的机械能。

1.2.4.2 机械能衡算

式 (1-14) 中，若流动系统中无热交换器， $Q=0$ ；流体温度不变，则 $U_1=U_2$ 。

流体在管内流动时要克服流动的阻力，故其机械能有所损耗。损耗了的机械能转化为

控制体，亦必有 1 kg 流体从截面 2-2 送出。流体本身具有一定的能量，它便带着这些能量输入或输出控制体。能量有各种形式，其中包括下列几项（均以 1 kg 的流体为基准）。

(1) 内能 内能是贮存于物质内部的能量，由原子与分子的运动及彼此的相互作用而来，从宏观的角度看，它决定于流体的状态，即与流体的温度有关；而压力