



21 世纪高等院校经典教材同步辅导
ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAOCAITONGBUFUDAO

化工原理

天大修订版
全程导学及习题全解

主编 范文元 王 钰

- ◆ 知识归纳 梳理主线重点难点
- ◆ 习题详解 精确解答教材习题
- ◆ 提高练习 巩固知识迈向更高





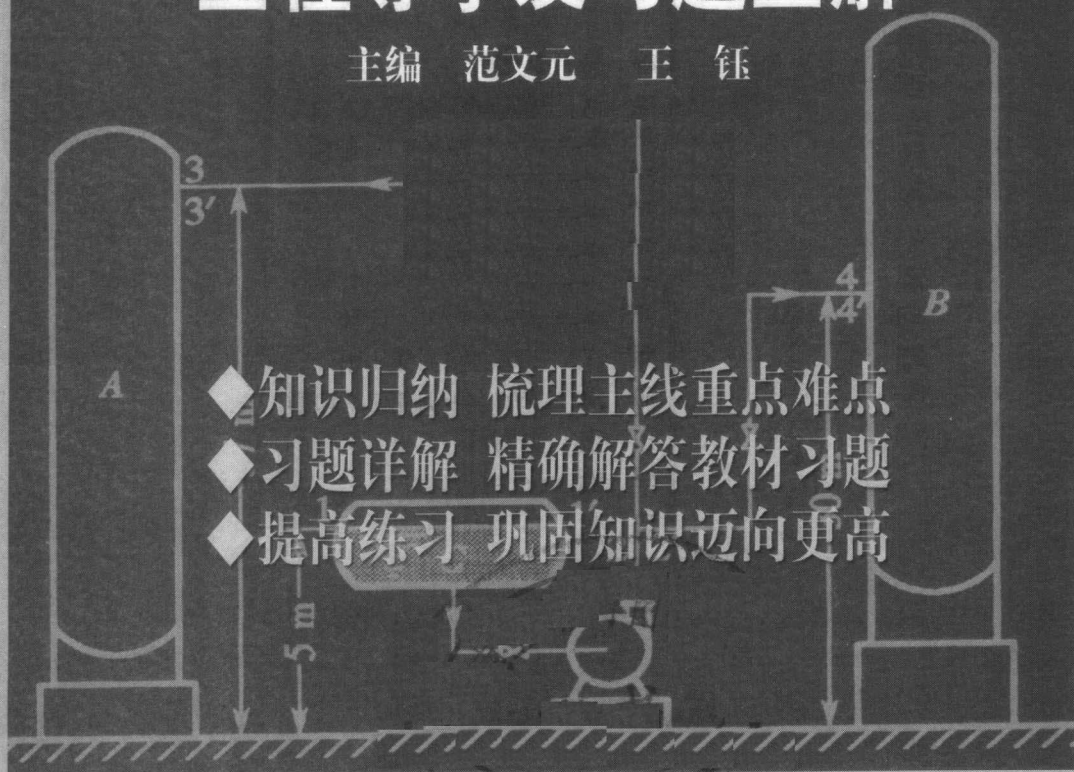
21 世纪高等院校经典教材
ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAO

化工原理

天大修订版
全程导学及习题全解

主编 范文元 王 钰

- ◆ 知识归纳 梳理主线重点难点
- ◆ 习题详解 精确解答教材习题
- ◆ 提高练习 巩固知识迈向更高



中国时代经济出版社
China Modern Economic Publishing House

图书在版编目(CIP)数据

化工原理全程导学及习题全解 / 范文元, 王钰主编.

—北京: 中国时代经济出版社, 2007.9

(21 世纪高等院校经典教材同步辅导)

ISBN 978-7-80221-375-3

I. 化... II. ①范... ②王... III. 化工原理—高等学校—教学参考资料

IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 104027 号

化
工
原
理
全
程
导
学
及
习
题
全
解

范
文
元

王
钰
主
编

出版者	中国时代经济出版社
地 址	北京东城区东四十条 24 号 青蓝大厦 11 层东办公区
邮 编	100007
电 话	(010)68320825 (发行部) (010)88361317 (邮购)
传 真	(010)68320634
发 行	各地新华书店
印 刷	北京鑫海达印刷有限公司
开 本	787 × 1092 1/16
版 次	2007 年 9 月第 1 版
印 次	2007 年 9 月第 1 次印刷
印 张	13.375
字 数	250 千字
印 数	1~5000 册
定 价	16.00 元
书 号	ISBN 978-7-80221-375-3

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据夏清、陈常贵主编,姚玉英主审,天津大学出版社出版的《化工原理》(上、下册)(修订版)一书所编写的配套学习辅导用书。该书依照教学计划及大纲要求,将教材各章中所涉及的知识点、难点和重点进行归纳并总结,对学习中常见的问题有针对性的进行解答,对教材各章中全部习题和思考题做了尽可能详细的讲解。旨在培养学生独立思考问题及自学能力,加深对基本概念和理论的理解,养成良好的思维习惯,形成良好的知识体系,提高学生的专业素养和解决实际问题的能力,更好地掌握和运用所学知识。

本书是作者在总结多年教学经验的基础上编写而成的,内容结构重点突出,详略得当,条理清楚。各章均由“本章学习指导”、“本章学习要点”、“习题全解”及“思考题解答”几部分内容组成。

本书即可作为高等院校化工类及相关专业学生学习的参考用书,也可作为从事化工工作的科技人员进行自学的指导用书。

参加本书编写工作的有范文元、王钰(绪论、第一至三章),王可、于景阳(第四章),王战强、付继刚(第五章),孙建华、马丁(第六章),陈秀聪、王丽丹(第七章),孙建成、金艳丽(第八章),杨乐威、王贵鹏(第九章),范乃玮、李雨洁(第十章),由范文元对全书进行统稿。

限于作者的知识和水平,本书难免存在缺点和错误,我们真诚欢迎读者对本书存在的缺点和错误提出批评、建议,以利我们改进。同时,对《化工原理》(修订版)的主编夏清、陈常贵老师,主审姚玉英老师表示衷心感谢!

编 者

2007年7月

目 录

绪论	1
本章学习指导	1
本章学习要点	1
习题全解	2
第一章 流体流动	5
本章学习指导	5
本章学习要点	5
习题全解	11
思考题解答	30
第二章 流体输送机械	35
本章学习指导	35
本章学习要点	35
习题全解	42
思考题解答	50
第三章 非均相物系的分离和固体流态化	54
本章学习指导	54
本章学习要点	54
习题全解	64
思考题解答	75
第四章 传热	80
本章学习指导	80
本章学习要点	80
习题全解	89
思考题解答	107
第五章 蒸发	110
本章学习指导	110
本章学习要点	110
习题全解	114
思考题解答	117
第六章 蒸馏	118
本章学习指导	118
本章学习要点	118
习题全解	124

思考题解答	143
第七章 吸收	146
本章学习指导	146
本章学习要点	146
习题全解	153
思考题解答	164
第八章 蒸馏和吸收塔设备	167
本章学习指导	167
本章学习要点	167
习题全解	171
思考题解答	173
第九章 液-液萃取	175
本章学习指导	175
本章学习要点	175
习题全解	182
思考题解答	189
第十章 干燥	190
本章学习指导	190
本章学习要点	190
习题全解	196
思考题解答	208

绪 论

本章学习指导

一、本章学习目的

通过本章学习,了解化工原理的基本概念以及所包含的基本内容,理解动量传递、质量传递、热量传递的类似以及内在联系,掌握化工单元操作中的流体流动及输送、沉降、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取、干燥等基本规律和应用。

本章学习要点

一、化工原理概述

1. 性质及基本内容

阐述各个单元操作的基本原理、过程计算以及典型设备。

2. 研究方法

(1)实验研究方法(经验法)

(2)数学模型法(半经验半理论法)

3. 学习要求

通过学习达到能选择单元操作和设备,并能进行工程设计和调节,逐步提高自己的过程开发和实践指导能力。

二、单位换算

1. 化工基本单位

表 0-1

物理量	SI 单位	cmg 单位	工程制单位
长度	m(米)	cm(厘米)	m(米)
质量	kg(千克)	g(克)	kgf · s ² /m(千克力 · 秒 ² /米)
时间	s(秒)	s(秒)	s(秒)
温度	K(开)	℃或 K(开)	℃
物质的量	mol(摩尔)	mol(摩尔)	mol(摩尔)

2. 几个重要的单位换算

$$1 \text{ 千卡} = 427 \text{ 千克力(力)} \cdot \text{米} = 4.187 \text{ kJ}$$

$$\text{N} \cdot \text{m} = \text{J(焦耳)} \quad \text{J/s} = \text{W(瓦)}$$

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa(帕斯卡)}$$

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81 \text{ N}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 10.33 \text{ mmHg} \quad 1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa}$$

三、物料和能量衡算

1. 物料衡算

物料衡算可以有效了解和控制生产过程中的原料、成品以及损失的物料数量,物料衡算是质量守恒定律的一种表现形式,即

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 + G_A$$

式中 ΣG_1 ——输入物料的总和;

ΣG_0 ——输出物料的总和;

G_A ——累积的物料量。

2. 能量衡算

化工计算中遇到的能量衡算依据的是能量守恒定律,对于常见的热量衡算有

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_0 + Q_L$$

式中 ΣQ_1 ——随物料进入系统的总热量, kJ 或 kW;

ΣQ_0 ——随物料离开系统的总热量, kJ 或 kW;

Q_L ——向系统周围散失的热量, kJ 或 kW。

习题全解

1. 热空气与冷水间的总传热系数 K 值约为 $42.99 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,试从基本单位换算开始,将 K 值的单位改为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

【解】 首先将 kcal, h 换成 kJ 和 s

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}; 1 \text{ kcal} = 4.2 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{故} \quad K = 42.99 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 42.99 \times 4.2 \times 10^3 / 3600 = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

2. 密度 ρ 是单位体积物质具有的质量。在以下两种单位制中,物质密度的单位分别为:

SI kg/m^3

米制重力单位 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

常温下水的密度为 1000 kg/m^3 ,试从基本单位换算开始,将该值换算为米制重力单位的数值。

【解】 1 千克物体所受重力为 1 kgf,且 $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ kg} = 9.8 \text{ N}$ 。

$$\text{故} \quad 1000 \text{ kg/m}^3 = 1000 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = (1000/9.8) \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = 102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

3. 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t + 261}$$

式中 p ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

今需将式中 p 的单位改为 Pa, 温度单位改为 K, 试对该式加以变换。

【解】 因为 $760\text{mmHg}=101325\text{Pa}$

所以 $1\text{Pa}=0.0075\text{mmHg}$

同时 $T(\text{K})=t(^{\circ}\text{C})+273$

将公式中的 p, t 换成单位分别为 Pa 和 K 时有以下公式

$$\text{即} \quad \lg(1/0.0075p)=6.421-352/(T-273+261)$$

$$\lg p - \lg 0.0075 = 6.421 - 352/(T-12)$$

$$\lg p = 8.546 - 352/(T-12)$$

4. 将 A, B, C, D 四种组分各为 0.25 (摩尔分数, 下同) 的某混合溶液, 以 1000kmol/h 的流量送入精馏塔内分离, 得到塔顶与塔釜两股产品, 进料中全部 A 组分、96% B 组分及 4% C 组分存于塔顶产品中; 全部 D 组分存于塔釜产品中。试计算塔顶和塔釜产品的流量及其组成。

【解】 由题意知, 进料: $W_{\text{FA}}=W_{\text{FB}}=W_{\text{FC}}=W_{\text{FD}}=1000 \times 0.25=250\text{kmol/h}$ 。

(1) 塔顶和塔釜产品流量。

塔顶出料:

$$W_{\text{DA}}=250 \times 100\%=250\text{kmol/h}$$

$$W_{\text{DB}}=250 \times 96\%=240\text{kmol/h}$$

$$W_{\text{DC}}=250 \times 4\%=10\text{kmol/h}$$

塔底出料:

$$W_{\text{WD}}=250 \times 100\%=250\text{kmol/h}$$

根据物料衡算:

对于塔底:

$$W_{\text{WA}}=W_{\text{FA}}-W_{\text{DA}}=250-250=0\text{kmol/h}$$

$$W_{\text{WB}}=W_{\text{FB}}-W_{\text{DB}}=250-240=10\text{kmol/h}$$

$$W_{\text{WC}}=W_{\text{FC}}-W_{\text{DC}}=250-10=240\text{kmol/h}$$

对于塔顶:

$$W_{\text{DD}}=W_{\text{FD}}-W_{\text{WD}}=250-250=0\text{kmol/h}$$

(2) 塔顶和塔釜产品流量。

塔顶总物料:

$$W_{\text{D}}=W_{\text{DA}}+W_{\text{DB}}+W_{\text{DC}}+W_{\text{DD}}=250+240+10+0=500\text{kmol/h}$$

塔顶各物料组成:

$$x_{\text{DA}}=W_{\text{DA}}/W_{\text{D}}=250/500=50\%$$

$$x_{\text{DB}}=W_{\text{DB}}/W_{\text{D}}=240/500=48\%$$

$$x_{\text{DC}}=W_{\text{DC}}/W_{\text{D}}=10/500=2\%$$

塔釜总物料:

$$W_{\text{W}}=W_{\text{WA}}+W_{\text{WB}}+W_{\text{WC}}+W_{\text{WD}}=0+10+240+250=500\text{kmol/h}$$

塔釜各物料组成:

$$x_{\text{WA}}=W_{\text{WA}}/W_{\text{W}}=0/500=0\%$$

$$x_{\text{WB}}=W_{\text{WB}}/W_{\text{W}}=10/500=2\%$$

$$x_{\text{WC}}=W_{\text{WC}}/W_{\text{W}}=240/500=48\%$$

$$x_{\text{WD}}=W_{\text{WD}}/W_{\text{W}}=250/500=50\%$$

5. 将密度为 810kg/m^3 的油与密度为 1000kg/m^3 的水充分混合成为均匀的乳浊液,测得乳浊液的密度为 950kg/m^3 。试求乳浊液中油的质量分数。水和油混合后体积无变化。

【解】 设对于 1m^3 乳浊液中油的质量分数为 x ,则

乳浊液质量: $1\text{m}^3 \times 950\text{kg/m}^3 = 950\text{kg}$

乳浊液中油的质量: $950x\text{kg}$

乳浊液中水的质量: $950(1-x)\text{kg}$

对于水和油混合前后没有体积变化,所以

混合前的体积 $= 950x/810 + 950(1-x)/1000 = 1$

解得 $x = 0.2244$ 。

6. 每小时将 200kg 过热氨气(压强为 1200kPa)从 95°C 冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为 30°C 。采用冷冻盐水为冷凝、冷却剂,盐水于 2°C 下进入冷凝、冷却器,离开时为 10°C 。求每小时盐水的用量。

热损失可以忽略不计。

数据:

95°C 过热氨气的焓, kJ/kg 1647

30°C 饱和液氨的焓, kJ/kg 323

2°C 盐水的焓, kJ/kg 6.8

10°C 盐水的焓, kJ/kg 34

【解】 根据题意,不计热损失,氨冷凝所释放出的热量等于盐水所吸收的热量

$$m_{\text{氨}}(H_1 - H_2) = m_{\text{盐}}(h_1 - h_2)$$

已知 $m_{\text{氨}} = 200\text{kg/h}$, $H_1 = 1647\text{kJ/kg}$, $H_2 = 323\text{kJ/kg}$, $h_1 = 34\text{kJ/kg}$, $h_2 = 6.8\text{kJ/kg}$

代入得

$$200 \times (1647 - 323) = m_{\text{盐}}(34 - 6.8)$$

解得 $m_{\text{盐}} = 9735\text{kg/h}$ 。

第一章 流体流动

本章学习指导

一、本章学习目的

通过本章学习,了解化工原理中流体流动的基本概念及原理,流体流动的规律,熟练掌握静力学方程式、连续性方程式、机械能守恒方程式,并能应用所学的原理方法去分析解决实际流动过程中的有关问题。具体包括:

1. 流体输送:流速的选择,管径的选择,流体输送设备的选型。
2. 参数的测量:如压强、流速等。
3. 建立最佳条件选择:最佳的流动条件,以保证工程中能得到最佳的传质、传热及化学反应条件。

二、必须掌握的内容

1. 流体的基本物性(密度和黏度)概念以及数据的求取。
2. 流体静力学基本方程式及应用。
3. 流体流动的基本方程及应用(包括连续性方程式、柏努利方程式)。
4. 流体流动的分类根据,以及相互比较。
5. 流动阻力的计算。
6. 管路计算和流量(流速)的测量。

三、本章学习中需要注意的问题

1. 应用流体力学的基本原理解决问题时,要按题意绘图,选取基准面和衡算的截面。
2. 解决实际问题时,注意不同单位的换算。
3. 要活学活用,做到掌握问题的要点。

本章学习要点

一、流体的重要物理性质

1. 流体的密度

单位体积流体所具有的流体质量称为流体密度,以 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。下面根据流体的分类对流体密度分开讨论。

(1) 液体的密度

液体的密度基本上不随压强变化(极高压强除外),随温度略有改变,一般可视为不可压缩流体。纯液体的密度可查相关手册,混合液体的密度则可根据以下公式估算。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n}$$

(2) 气体的密度

气体密度随着温度和压力而变化,是可压缩流体,一般当温度不太低,压力不太高时,可按理想气体处理,即

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

或

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T}$$

对于混合气体,其平均密度为

$$M_m = M_1y_1 + M_2y_2 + \dots + M_ny_n$$

2. 流体的黏度

(1) 牛顿黏性定律

对于一定流体,内摩擦力与速度梯度成正比,即符合牛顿粘性定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

其中 μ 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

凡符合牛顿粘性定律的流体称为牛顿流体,否则称为非牛顿流体。

(2) 流体的黏度

由牛顿粘性定律得到流体黏度 $\mu = \frac{\tau}{du/dy}$, 其物理意义是促使流体产生单位速度梯度的剪应力,是流体的重要物理性质之一。

工程中常用运动黏度,其为黏度与密度的比值,单位为 m^2/s 。

(3) 理想流体

黏度为零的流体称为理想流体。实际上自然界中并不存在理想流体,然而引入理想流体的概念,对于实际的研究起到简化的作用。

3. 非牛顿型流体

(1) 与时间无关的粘性流体

①假塑性流体;②胀塑性流体;③宾汉塑性流体。

(2) 与时间有关的粘性流体

①触变性流体;②流凝性流体。

二、流体静力学基本方程式

1. 静压强

垂直作用在流体单位面积上的表面力称为流体的静压强,简称压力,以 p 表示,单位为 Pa ,特别在连续静止的流体内部,压强为位置的函数,任一点的压强与作用面垂直,且在各个方向都具有相同的数值,如图 1-1 所示。

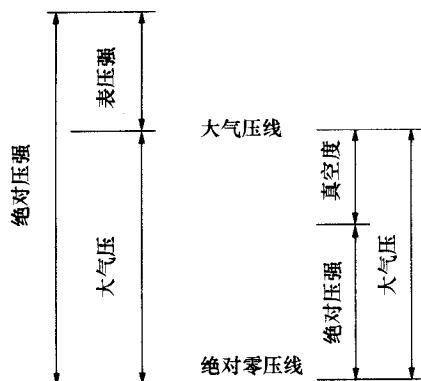


图 1-1

绝对压强:以绝对真空为基准测得的压强;

表压强:以当地大气压为基准测得的压强;

真空度:表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值,为表压强的负值。

应该指出,为了防止相互混淆,对表压强和真空度应该加以标注。

2. 静力学基本方程式

对于不可压缩流体, ρ 为常数,则有

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2$$

或

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2)$$

当液体上方的压强为 p_0 时,距液面 h 处水平面的压强为 p

$$p = p_0 + \rho gh$$

适用条件:上述方程只能适用于静止的、连通着的同一种液体,该式表达了重力场中静止的连续不可压缩流体内部压强的变化规律。

注意事项:

①应用静力学方程时要注意等压面的选取。等压面是指流体中压力相等的水平面,等压面必须满足静止的、连续的同一种流体、处于同一水平面这三个条件。

②因为化工容器中气体压力变化一般可以忽略,所以上述方程也适用于气体。

③由上述方程可以变形为高度表示压力,说明压差可以用一定高度的液体柱表示,但一定要注明是何种液体。

④以流体静力学基本方程为依据可设计出各种液柱压差计、液位计,可进行液封高度计算,根据 $gZ + \frac{p}{\rho}$ 的大小判断流向。但需特别注意 U 型管压差计读数反映的是两侧位能和静压能两者之和的差值。

⑤应用静力学基本方程式进行计算时,关键要准确选取等压面,此外还要注意不同压强的表示方法和相互转换。

三、流动流体基本方程

1. 流速与流量

单位时间内流过管道任一截面的流体量,称为流量,可以用体积流量 V_s (m^3/s),质量流量 w_s (kg/s)表示。

单位时间内流体在流动方向上所流过的距离,称为流速,以 u 表示,单位 m/s 。有时候采用质量流速 G 表示,单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。关于体积流量、质量流量、平均流速、质量流速之间有如下关系:

$$V_s = uA, w_s = V_s \rho = uA\rho, G = w_s/A = V_s \rho/A = u\rho$$

其中 A 为与流动方向相垂直的管道截面积,单位 m^2 。

一般管道的截面为圆型,若以 d 表示其内径,则

$$u = \frac{4V_s}{\pi d^2}$$

于是根据体积流量和流速可以求出管内径 d 。

2. 稳态流动与非稳态流动

(1)稳态流动:流动系统中,各个截面上的流动的流速、压强、密度等有关物理量仅随位置变化,不随时间变化。

(2)非稳态流动:流动系统中,流体在各个截面上的有关物理量既随位置变化,又随时间变化。

3. 连续性方程式

$$u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = u A \rho = w_s = \text{constant}$$

实际上是流动物系的物料衡算式,对于不可压缩流体, ρ 为常数,有

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = V_s = \text{constant}$$

特别对于圆管

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

4. 柏努利方程式

柏努利方程是流体流动中能量守恒和相互转化原理的体现,它描述了封闭系统中流入和流出一个系统的各参数之间的定量关系,柏努利方程式在不同情况下,具有不同简化形式。

(1)具有外功加入、不可压缩流体的稳态流动的柏努利方程式

以 1kg 流体为基准,有

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f$$

式中 W_e 为 1kg 流体通过输送设备所获得的能量,称为有效功,单位为 J/kg。

①对于理想流体,流动不产生阻力则 $\sum h_f = 0$,又没有外力功加入 $W_e = 0$,柏努利方程式变成

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

上式反映了流体位能、静压能和动能之间的相互转化和守恒关系。

②当流体不流动时, $u = 0$, $\sum h_f = 0$,也没有加入外功, $W_e = 0$,于是方程变成

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

通过简化,可知道流体静力学基本方程式为柏努利方程式的一个特例。

(2)柏努利方程式的讨论

①公式中 gZ 、 $\frac{u^2}{2}$ 、 $\frac{p}{\rho}$ 分别表示某一截面上流体本身所具有的位能、动能和静压能;而 W_e 、 $\sum h_f$ 则分别表示流体在两截面之间所获得和所消耗的能量。

②公式虽然原则上只适用于不可压缩流体,但是对于可压缩流体的流动,若所取系统两截面的绝对压强变化小于原来绝对压强的 20% 时,仍可使用,但是公式中的流体密度需要校正,即用平均密度代替流体密度。

③柏努利方程式的其他两种形式

以单位重量流体为衡量基准

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{W_e}{g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{\sum h_f}{g}$$

令 $H_e = \frac{W_e}{g}$, $H_f = \frac{\sum h_f}{g}$, 则

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + H_f$$

上式单位 m, 表示单位重量的流体所具有的能量。公式所具有一定的物理意义,它表示单位重量的流体所具有的机械能可以把自身从基准水平面抬高的高度。常把 Z 、 $\frac{p_1}{\rho g}$ 、 $\frac{u_1^2}{2g}$ 、 H_e 、 H_f 分别称为

位压头、静压头、动压头、有效压头、压头损失。

以单位体积流体为衡量基准

$$\rho g Z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e = \rho g Z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho \sum h_f$$

上式单位 Pa, 表示单位体积的流体所具有的能量。

4. 柏努利方程式应用要点

- (1) 公式适用于稳态流动的连续性流体。
- (2) 选择于流动方向相垂直的截面, 两截面上的物理量应该尽可能多包括已知量。
- (3) 选择与地面平行, 且尽可能与所选截面重合, 使的位能计算方便。
- (4) 单位必须一致。

四、流体流动

1. 流动类型

$$\text{雷诺数 } Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

$Re \leq 2000$, 稳定层流区

$Re \geq 4000$, 湍流区

$2000 < Re < 4000$, 过渡区

表 1-1 两种流型的比较

流型	层流	湍流
判据	$Re \leq 2000$	$Re \geq 4000$
质点运动状况	沿轴向作直线运动, 不存在横向混合和质点碰撞	不规则杂乱运动, 质点碰撞和剧烈混合。脉动是湍流的基本特点
管内速度分布	抛物线方程 $u = \frac{1}{2} u_{\max}$ 壁面处 $u = 0$, 管中心 $u_{\max}$	碰撞和混合使速度平均化 $u \approx 0.8 u_{\max}$ 壁面处 $u = 0$, 管中心 $u_{\max}$
边界层	滞流层厚度等于管子的半径	层流底层—缓冲层—湍流层
直管阻力	粘性内摩擦力, 即 牛顿粘性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$	粘性应力+湍流应力, 即 $\tau = (\mu + e) \frac{du}{dy}$ (e 为涡流黏度, 不是物性, 与流动状况有关)

五、流体在管内的流动阻力

1. 直管中的流动阻力

(1) 圆形直管

范宁公式

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \left(\frac{u^2}{2} \right)$$

或

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \left(\frac{\rho u^2}{2} \right)$$

式中 λ 称为摩擦系数, 它是雷诺数的函数或者为雷诺数和管壁粗糙度的函数, 当流动属于层流

时, $\lambda = 64/Re$, 而与管壁粗糙度无关。

(2) 非圆形直管

① 采用当量直径 d_e 代替 d

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流通截面}}{\text{湿润周边}}$$

② $\lambda = C/Re$, 常数 C 可以查相关手册。

③ 计算 Re 以及 $h_f, \Delta p_f$ 中的 u 均指真实流速, 不是用当量直径来计算。

2. 管路上局部阻力

(1) 局部阻力系数法

$$h'_f = \zeta \frac{u^2}{2}, \zeta_{\text{入口}} = 0.5, \zeta_{\text{出口}} = 1.0$$

(2) 当量长度法

$$h'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \left(\frac{u^2}{2} \right)$$

应该指出用上面公式求局部阻力系数时, 遇到管径突然变大或变小的情况, 上式中 u 取细管中的流速。若流动系统的下游截面取在管内, 则柏努利方程中的动能项和出口阻力项二者只能取其一, 若截面取在出口内侧, 则有内能项, 截面取在出口外, 则有出口阻力项。

3. 管路系统总能量损失

管路系统总能量损失包括全部直管阻力和局部阻力之和, 具体有

$$\sum h_f = \lambda \left(\frac{\sum l_i + \sum l_e}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{u^2}{2}$$

式中 $\sum h_f$ ——管路中的总能量损失, J/kg;

$\sum l_i$ ——管路系统中的各段直管的总长度, m;

$\sum l_e$ ——管路系统中全部管件与阀门的当量长度之和, m;

$\sum \zeta_i$ ——管路系统中全部阻力系数之和, 量纲为 1;

u ——流体在管路中的流速, m/s。

六、管路计算

1. 简单管路

特点: 由等径或异径管段串连而成的管路, 流体通过各管段的流量相等, 总阻力损失等于各段损失之和。

2. 复杂管路

特点: 包括并联管路和分支管路, 各管路中各支管的流量彼此影响, 相互制约, 总流量等于各分管流量之和。

实际中常遇到的管路计算问题主要包括:

(1) 已知管径、管长、管件和阀门的设置以及流体的输送量, 求流体通过管路系统的能量损失, 以便进一步确定输送设备所加入的外功, 设备内的压强或设备的相对位置等。

(2) 已知管径、管长、管件和阀门的设置以及允许的能量损失, 求流体的流速和流量。

(3) 已知管长、管件或阀门的当量长度、流体的流量以及允许的能量损失, 求管径。

七、流量(流速)测量

1. 变压差(定截面)流量计

包括:测速管(皮托管)、孔板流量计、喷嘴和文丘里流量计。其中除测速管测量点速度以外,其余三种均测得是管截面上的平均速度。

特点:如果采用 U 型管压差计读数 R 表示压差,则流量可以统一表示为

$$V_s = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_A - \rho)}{\rho}}$$

式中 C_0 为流量系数,对于文丘里、测速管、喷嘴流量计,其值都接近于 1,而孔板流量计的 C_0 约为 0.6~0.7 之间。

2. 变截面(恒压差)流量计(转子流量计)

公式

$$V_s = C_R A_R \sqrt{\frac{2V_i g(\rho_t - \rho)}{A_i \rho}}$$

其中 C_R 为流量系数,其值接近于 1。

特点:读流量方便,直观,能量损失小,测速范围广。此外,转子流量计的刻度与被测流体的密度有关,当被测流体的密度不同于标定介质密度时,需要校正。具体有

$$\frac{V_{s,2}}{V_{s,1}} = \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_t - \rho_2)}{\rho_2(\rho_t - \rho_1)}}$$

对于气体流量计

$$\frac{V_{s,g2}}{V_{s,g1}} = \sqrt{\frac{\rho_{g1}}{\rho_{g2}}}$$

习题全解

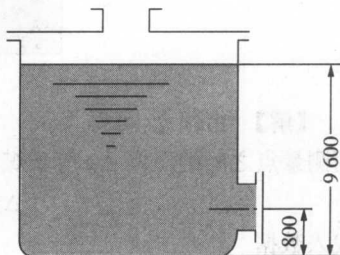
1. 某设备上真空表的读数为 $13.3 \times 10^3 \text{ Pa}$,试计算设备内的绝对压强与表压强。已知该地区大气压强为 $98.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

【解】 因为 $p_{\text{真}} = p_{\text{大}} - p_{\text{绝}}$

故有 $p_{\text{绝}} = p_{\text{大}} - p_{\text{真}} = (98.7 - 13.3) \times 10^3 = 8.54 \times 10^4 \text{ Pa}$

$$p_{\text{表}} = -p_{\text{真}} = -1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$$

2. 在本题附图所示的贮油罐中盛有密度为 960 kg/m^3 的油品,油面高于罐底 9.6m,油面上方为常压。在罐侧壁的下部有一直径为 760mm 的圆孔,其中心距罐底 800mm,孔盖用 14mm 的钢制螺钉紧固。若螺钉材料的工作应力取为 $32.23 \times 10^6 \text{ Pa}$,问至少需要几个螺钉?



习题 2 附图

【解】 圆孔处受到的油的静压 p

$$p = \rho gh = 960 \times 9.8 \times (9.6 - 800 \times 10^{-3}) = 8.3 \times 10^4 \text{ Pa}$$

要使油不漏出,则有螺丝提供的应力之和必须不小于圆孔所受压力 p

$$\pi \left(\frac{0.76}{2} \right)^2 p = n \pi \left(\frac{0.014}{2} \right)^2 \times 32.23 \times 10^6$$

解得 $n = 7.59$, 所以至少取 8 个。