

李发永 刘雪暖 编

化工原理

例题与习题

石油大学出版社

化工原理例题与习题

李发永 刘雪暖 编

石油大学出版社



内 容 提 要

本书包括绪论、流体流动、流体输送机械、机械分离、固体流态化及气力输送、传热与传热设备、辐射传热与管式加热炉、传质过程导论、吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取共十二章。编入例题 109 个、习题 286 个、思考题 115 个。每章编有主要计算公式、学习指导及主要内容联系图。本书可供化工类各专业学生学习化工原理参考之用,也可供在职学习、复习考研人员使用及教师备课参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理例题与习题/李发永,刘雪暖编. —东营:
石油大学出版社,1999.8
ISBN 7-5636-1232-7

I. 化… II. ①李… ②刘… 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(1999)第 46252 号

化工原理例题与习题

李发永 刘雪暖 编

出版者:石油大学出版社(山东东营,邮编 257062)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpres>

印刷者:山东沂南印刷总厂

发行者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本: 787×1 092 1/16 印张:15.75 字数:402 千字

版 次:1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1 000 册

定 价:18.00 元

前 言

化工原理是化工类各专业学生必修的一门技术基本课,是一门理论与实际联系十分紧密的课程。学习和掌握好化工原理的基本理论及各单元设备的计算方法,对后续专业课的学习是十分重要的。为帮助学生学好本课程,我们在总结本教研室多年教学经验及教学资料的基础上,编写了这本《化工原理例题与习题》,以供学生学习化工原理参考之用。本书亦可供在职学习、复习考研人员之用。

本书包括绪论、流体流动、流体输送机械、机械分离、固体流态化及气力输送、传热与传热设备、辐射传热与管式加热炉、传质过程导论、吸收、蒸馏、气液传质设备和萃取共十二章。每章包括基本知识、例题、习题及思考题四个部分(第一、十一章无思考题)。在基本知识一节中除系统列出了所学公式外,还就学生在学习中经常遇到的问题,以学习指导的方式进行讲解,另外对重点章还总结出了主要内容联系图,以使学生能对全章的内容有一个更系统的掌握。全书共编入例题 109 个、习题 286 个、思考题 115 个。全书以使用国际单位制(SI 单位制)为主,考虑到目前在生产、科研及一些手册中还经常用到一些其他单位制,故本书有些章节还使用了一些非国际单位制,以使大家对各种单位制的使用及换算都有所了解。

全书由李发永、刘雪暖编写。第一章至第六章由李发永执笔,第七章至第十二章由刘雪暖执笔。全书由李阳初教授审阅。

由于编者学识有限,书中欠妥之处在所难免,恳请各位同仁及读者不吝指教,以助日后修改。

编 者

1999 年 11 月

BBP 70/07

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 基本知识.....	(1)
第二节 例题.....	(1)
第三节 习题.....	(3)
第二章 流体流动	(6)
第一节 基本知识.....	(6)
第二节 例题	(12)
第三节 习题	(22)
第四节 思考题	(35)
第三章 流体输送机械	(38)
第一节 基本知识	(38)
第二节 例题	(44)
第三节 习题	(48)
第四节 思考题	(51)
第四章 机械分离	(53)
第一节 基本知识	(53)
第二节 例题	(59)
第三节 习题	(65)
第四节 思考题	(68)
第五章 固体流态化及气力输送	(70)
第一节 基本知识	(70)
第二节 例题	(73)
第三节 习题	(79)
第四节 思考题	(79)
第六章 传热及传热设备	(81)
第一节 基本知识	(81)
第二节 例题	(89)
第三节 习题.....	(107)
第四节 思考题.....	(112)
第七章 辐射传热及管式加热炉	(114)
第一节 基本知识.....	(114)
第二节 例题.....	(130)
第三节 习题.....	(137)
第四节 思考题.....	(140)
第八章 传质过程导论	(141)

第一节	基本知识	(141)
第二节	例题	(144)
第三节	习题	(145)
第四节	思考题	(146)
第九章	吸收	(147)
第一节	基本知识	(147)
第二节	例题	(157)
第三节	习题	(168)
第四节	思考题	(171)
第十章	蒸馏	(172)
第一节	基本知识	(172)
第二节	例题	(186)
第三节	习题	(205)
第四节	思考题	(211)
第十一章	气液传质设备	(213)
第一节	基本知识	(213)
第二节	例题	(221)
第三节	习题	(228)
第十二章	萃取	(230)
第一节	基本知识	(230)
第二节	例题	(240)
第三节	习题	(244)
第四节	思考题	(245)
参考文献		(246)

第一章 绪 论

第一节 基本知识

通过本章学习主要掌握单位换算及物料衡算、能量衡算等基本知识,为正确进行化工计算打下良好的基础。在学习和解题计算中要注意以下几个问题。

(1) 正确使用单位及进行单位换算。当题目给出的单位不属于同一单位制或与计算公式所要求使用的单位不一致时,则要进行单位换算。对于简单的单位可直接通过换算因子进行换算,复杂的单位则要通过基本单位或简单单位的换算因子进行换算。

(2) 正确选定衡算范围。在进行物料衡算及能量衡算时,要选定适当的衡算范围,使进、出物流的参数为已知及所求或通过简单计算能求出的量,并画出衡算范围图。

(3) 正确选定衡算基准。在进行衡算时的基准应一致。① 在进行物料衡算时,如为连续进料、出料,可选单位时间(通常为 1 h)的物料量为基准进行计算;如为间歇式操作可选定一批或一次操作的物料量为基准进行计算。② 在进行能量衡算时,不仅要选定物料量的基准,同时要选定温度基准,以便取得统一基准的焓值进行热量计算。特别注意的是在有些手册或图表集中各物质焓值的基准温度是不一致的,在进行衡算时要十分注意。

第二节 例 题

【例 1-1】在一连续式干燥器中,用热风对某含水量为 17%(质量分数,下同)的湿物料进行干燥。为提高热效率,部分废气循环使用。已知新鲜空气中含水 1%,干燥后的物料中含水 4%,废气中含水 10%。新鲜空气与循环废气的混合气中含水 3%。试计算湿物料的处理量为 1 500 kg/h 时:

(1) 新鲜空气的流量为多少? 干燥出的物料量为多少? 放出多少废气?

(2) 废气的循环量为多少?

解 首先依据题意画出系统的示意图,并标出各参数,如图 1-1 所示。

(1) 设新鲜空气流量为 A ,干燥后的物料量为 B ,排出的废气量为 C 。

选范围 I 为衡算范围,以 1 h 的物料量为衡算基准,列出物料衡算式

$$\text{总物料衡算式} \quad 1\,500 + A = B + C$$

$$\text{固体物料衡算式} \quad 1\,500 \times (1 - 0.17) = B(1 - 0.04)$$

$$\text{干空气物料衡算式} \quad A \times 0.99 = C \times 0.9$$

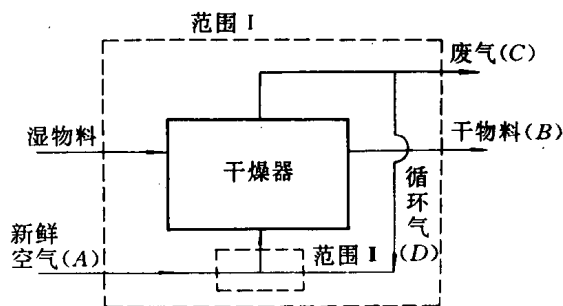


图 1-1 物料衡算图

联立以上三个方程式解得：

$$A = 2\ 030\ \text{kg/h}; B = 1\ 297\ \text{kg/h}; C = 2\ 233\ \text{kg/h}$$

(2) 设废气的循环量为 D 。

因废气循环线包括在范围 I 之中,也就是说在范围 I 的进、出物流中没有循环废气,所以通过范围 I 的物料衡算不可能解出 D 。现在取范围 II 进行物料衡算,列出物料衡算式:

总物料衡算式

$$A + D = E$$

水物料衡算式

$$A \times 0.01 + D \times 0.10 = E \times 0.03$$

联立以上方程解得

$$D = 580\ \text{kg/h}$$

通过这一例题可以看出,在对范围 I 作物料衡算时,涉及的物流中包括三个组分:水、干空气和固体物,可以列出三个独立的物料衡算方程。而范围 II 的进、出物料中包括两个组分:水和干空气,因此只可以列出两个独立的物料衡算方程。

【例 1-2】一车间体积为 $30 \times 10 \times 8\ \text{m}^3$,车间内产生一种有害气体。按安全标准规定它在空气中含量不得超过 0.2% (体积分,以下同),因此它的含量达到 0.2% 时就自动通风,通风量为 $120\ \text{m}^3/\text{min}$,问通风 20 min 后有害气体含量为多少? (假设空气在车间内完全混合。)

解 在通风过程中车间内及排出去的气体中有害气体的含量都是在变化的,所以是不稳定过程。由于过程中压力 (1 atm) 和温度都不变,故物料量可以用体积 (m^3) 表示。因车间内空气完全混合,故任一瞬间车间内和排出的气体中有害气体含量相等,设其值为 x (摩尔分数)。

画出过程的示意图,如图 1-2 所示。取车间为物料衡算系统,在微分时间 $d\theta$ 内作有害气体的物料衡算。

输入量: 0

输出量: $120x d\theta$

积累量: $dm = V \cdot dx = 30 \times 10 \times 8 dx = 2\ 400 dx$

根据物料衡算式: 输入量 = 输出量 + 积累量

得

$$0 = 120 x d\theta + 2\ 400 dx$$

$$120 x d\theta = - 2\ 400 dx$$

$$d\theta = - \frac{2\ 400}{120} \cdot \frac{dx}{x}$$

$$\int_0^{20} d\theta = - 20 \int_{0.2}^x \frac{dx}{x}$$

$$20 = - 20 \ln \frac{x}{0.2}$$

解得

$$x = 0.074\%$$

【例 1-3】一罐内盛有 20 t 重油,温度为 20°C ,用外循环加热法(图 1-3)进行加热,重油循环量为 $8\ \text{t/h}$,循环的重油在换热器中用蒸汽加热,其在换热器出口的温度恒为 100°C ,罐内的油均匀混合,问罐内的油从 20°C 加热到 80°C 需要多少时间?

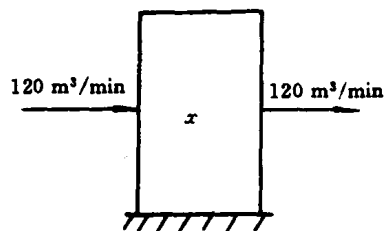


图 1-2 例 1-2 附图

解 罐内油的温度随时间变化,所以是一不稳定的加热过程,由于罐内油均匀混合,从罐内排出的油温与罐内油的温度相同,其在某一瞬间为 t (单位 $^{\circ}\text{C}$)。

以罐为系统作热量衡算,基准温度为 0°C ,在 $d\theta$ 时间内进、出系统及系统内积累的热量为:

输入系统重油的热量 $m_1 c_p T d\theta$

输出系统重油的热量 $m_1 c_p t d\theta$

系统内积累的热量 $m_2 c_p dt$

列出热量衡算方程式:

$$m_1 c_p T d\theta = m_1 c_p t d\theta + m_2 c_p dt$$

$$m_1 (T - t) d\theta = m_2 dt$$

$$d\theta = \frac{m_2 dt}{m_1 (T - t)}$$

按题意确定积分限,开始时: $\theta=0, t=20^{\circ}\text{C}$; 终了时: $\theta=\theta, t=80^{\circ}\text{C}$ 。

$$\int_0^{\theta} d\theta = \frac{20 \times 10^3}{8 \times 10^3} \int_{20}^{80} \frac{dt}{100 - t}$$

$$\theta = \frac{20}{8} \ln \frac{100 - 20}{100 - 80} = 3.47 \text{ (h)}$$

【例 1-4】 单位换算已知 $1 \text{ atm} = 1.0332 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$, 如用 SI 制表示其值为多少 N/m^2 ?

解 先列出有关各量不同单位制的等量关系, 得出换算系数

$$1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}, \quad 1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$$

换算时将换算系数和单位一起换算:

$$1 \text{ atm} = 1.0332 \text{ kgf/cm}^2 = 1.0332 \frac{\text{kgf} \times 9.81 \text{ N/1 kgf}}{\text{cm}^2 \left[\frac{0.01 \text{ m}}{1 \text{ cm}} \right]^2} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$= 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

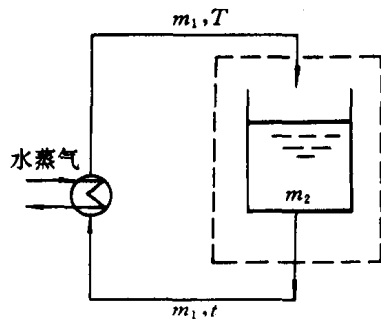


图 1-3 例 1-3 附图

第三节 习 题

1-1 进行下列单位换算(要求根据基本单位之间的关系变换,不能直接用单位换算表):

(1) 30°C 时水的表面张力 $\sigma = 71 \text{ dyn/cm}$, 将此 cgs 单位换算成 SI 单位, 再换算成工程单位。

(2) 30°C 时水的粘度 $\mu = 0.008 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}$, 将此 cgs 单位换算成 SI 单位, 再换算成工程单位。

(3) 某吸收过程的传质系数 $K_G = 1.6 \text{ kmol/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm)}$, 换算成 SI 单位: $\text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$ 。

1-2 粘度 μ 的定义由牛顿粘性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 得出, 其中 τ 为剪切应力(单位面积上的剪切力), $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度。

(1) 推导出 μ 在 SI 制与工程单位制中的单位和因次式;

(2) 20°C时水的粘度为 1cP, 试换算成工程单位与 SI 单位。

(注: 1 cP=0.01 dyn·s/cm²。)

1-3 试将下列物理量的单位换算成指定单位:

质量: 1.5 kgf·s²/m = _____ kg

密度: 1.36 g/cm³ = _____ kgf·s²/m⁴ = _____ kg/m³

压强: 35 kgf/cm² = _____ [磅(力)/英寸²] = _____ [物理大气压]
= _____ [工程大气压] = _____ mmHg = _____ Pa

能量: 130 Btu(英热单位) = _____ kcal = _____ kgf·m = _____ J

功率: 10 马力 = _____ kgf·m/s = _____ kW

比热: 2 Btu/(lb·°F) = _____ kcal/(kg·°C) = _____ J/(kg·°C)

流量: 2.5 L/s = _____ m³/h

表面张力: 70 dyn/cm = _____ kgf/m = _____ N/m

1-4 在气体状态方程 $pV=nRT$ 中, $R=0.082$ [atm·m³/(kmol·K)], 求用以下单位表示的 R 值等于多少。

(1) kJ/(kmol·K);

(2) [kcal/(kmol·K)];

(3) [kgf·m/(kmol·K)]。

1-5 一加热炉用空气(O₂和N₂的体积分数分别为21%和79%)燃烧天然气, 分析燃烧产物——烟道气, 得知其中含7%CO₂, 14%H₂O, 5.6%O₂, 73.4%N₂(以上含量均为摩尔分数), 求每通入100m³30°C的空气, 能产生多少m³的烟道气(烟道气温度为300°C, 压力为常压)?

1-6 某容器内装有1000L95%(质量分数)的乙醇水溶液, 其密度为840kg/m³。现用纯水以100kg/min的速率进入容器, 并以同样的速率放出酒精溶液, 假设容器内混合良好。试求要使容器内乙醇浓度变为5%(质量分数)时, 需要多少时间?

1-7 一矿物含Ba(NO₃)₂35%(质量分数), 用100°C热水将它从矿石中溶解出来(称浸取), 分离出不溶于水的矿渣后, 将溶液冷却结晶, 在0°C下得到Ba(NO₃)₂结晶, 所余母液循环使用。流程如图所示, 过程为连续稳定操作。

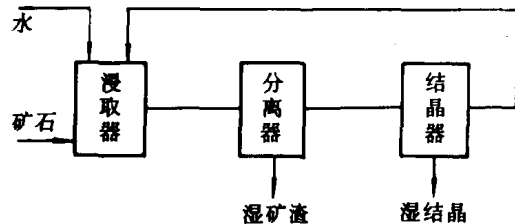


图 1-4 习题 1-7 附图

已知: Ba(NO₃)₂ 在 100°C 热水中的溶解度为 34g/100g 水, 而在 0°C 时为 5g/100g 水。矿渣中含溶液 15%, 结晶中含溶液 10%。为简化起见, 假定: (1) 矿渣内不含 Ba(NO₃)₂; (2) 矿渣不溶于水; (3) 结晶器将结晶全部分离。

求: 每吨原料所需的水量 A , 产生的湿矿渣量 B , 湿结晶量 C , 母液量 D 。

1-8 在换热器中, 用 2 atm 的饱和蒸汽将流量为 5t/h 的某种气体从 293 K 加热到 353 K, 气体的质量热容 $c_p = 1.024 + 0.08853 T$, 其中 T 为温度, 单位为 K, c_p 的单位为 J/(kg·K)。饱和蒸汽的用量为 142 kg/h, 蒸汽冷凝后以 90°C 的水排出, 问此换热器的热损失占蒸汽所提供热量的百分数为多少?

1-9 如图所示, 用泵将含 C₂H₅OH 40%(质量分数, 下同)的乙醇—水溶液送至高位槽, 经预热器加热后送精馏塔进行分离。高位槽每小时向塔内送物料 3 t, 物料经预热器温度由 20°C

提高到 80℃。求：

(1) 当预热器加热介质为 4 atm(表压)饱和水蒸气, 冷凝水温度为 90℃, 该预热器的热损失占水蒸气所提供热量的 5% 时, 求将料液加热所需的加热水蒸气量。

(2) 塔顶蒸气含 C₂H₅OH 90%, 经冷凝器全部冷凝为液体, 一部分作为产品, 一部分回流入塔, 回流量与产量之比为 2.5 : 1, 塔底残液中含 C₂H₅OH 为 5%。若 40%(质量分数)的酒精溶液的平均质量热容为 0.83 kcal/(kg·℃)。求每小时的产品量、残液量和进入冷凝器的蒸气量。(注: kcal 为非法定计量单位, 1 kcal=4.184 kJ, 后同。)

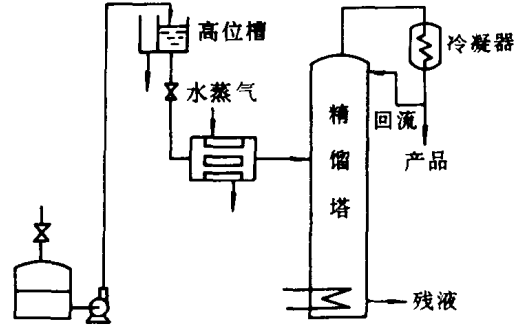


图 1-5 习题 1-9 附图

1-10 如 1-6 图所示, 每小时有 10 t 温度为 95℃ 的 5%(质量分数)乙醇水溶液 *F* 送入连续操作的精馏塔。塔顶蒸馏出的蒸气 *V* 中含有 95% 乙醇, 温度为 78.2℃。此蒸气通入冷凝器后全部冷凝成浓度相同的液体, 并冷却到 70℃ 才从冷凝器中送出, 其一部分 *L* 回流入塔, 另一部分 *D* 作为产品送出塔外。回流液量与产品量之比 $L/D=4$ 。从塔底流出的液体进入加热釜, 被加热到沸腾, 生成的蒸气重又回到塔内, 同时将含 0.1% 乙醇的废液不断排出塔外, 其温度为 100℃。

加热釜所需热量由 120℃ 的饱和水蒸气供给, 它冷凝成同温度的水后排出。冷凝器用冷却水移去热量, 它通入时的温度为 20℃, 排出时的温度为 40℃。

与计算有关的物性数据如下:

5% 原料液的质量热容为 1.0 kcal/(kg·K);

95% 产品的质量热容在 0~70℃ 时为 0.55 kcal/(kg·K), 在 70~80℃ 时为 0.75 kcal/(kg·K), 冷凝潜热为 250 kcal/kg;

0.1% 废液物性与水近似。

假设全塔的热损失为加热水蒸气供给热量的 5%, 以 1 h 为基准求:

- (1) 冷凝器的冷却水消耗量;
- (2) 加热釜的加热水蒸气消耗量。

1-11 某悬浮液中含有 10% 的固体和 90% 的水, 经过滤后, 得到的滤饼成分为: 70% 的固体, 30% 的水。假设过滤出的水中不含固体。求得到 1 m³ 的水时, 所得到的滤饼的体积为多少? 已知固体的密度为 3 200 kg/m³, 水的密度为 1 000 kg/m³。

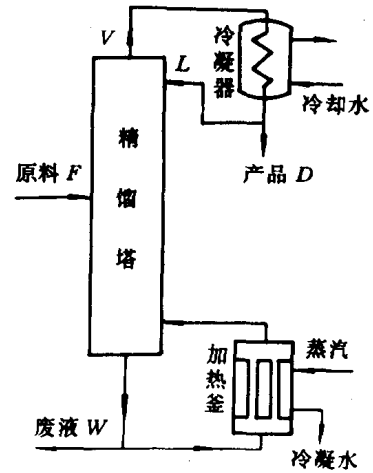


图 1-6 习题 1-10 附图

第二章 流体流动

第一节 基本知识

一、重要计算公式

1. 静力学基本方程式

(1) 静力学基本方程式:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-1)$$

式中 p ——液体内部压强, N/m^2 ;

p_0 ——液面上方压强, N/m^2 ;

ρ ——液体密度, kg/m^3 ;

h ——液柱高度, m 。

(2) U形管压差计及倒U形管压差计公式:

U形管压差计: $\Delta p = R(\rho_0 - \rho)g \quad (2-2)$

倒U形管压差计: $\Delta p = R(\rho - \rho_0)g \quad (2-3)$

式中 R ——压差计读数, m ;

ρ_0 ——压差计内指示剂的密度, kg/m^3 ;

ρ ——被测流体的密度, kg/m^3 。

2. 流体在管道中的流动计算公式

(1) 连续性方程式:

$$A_1 u_1 \rho_1 = A_2 u_2 \rho_2 = Au\rho \quad (2-4)$$

$\rho = \text{常数}$ 时:

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 = Au \quad (2-5)$$

对于圆管:

$$d_1^2 u_1 = d_2^2 u_2 = d^2 u$$

式中 A_1, A_2 ——管道截面 1 及 2 处的流通面积, m^2 ;

u_1, u_2 ——管道截面 1 及 2 处的流速, m/s ;

d_1, d_2 ——管道截面 1 及 2 处的管内径, m 。

(2) 柏努利方程式(不可压缩性流体稳定流动):

✓ 泵送管路: $gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum W_{f,1 \rightarrow 2} \quad (2-6)$

自流管路: $gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum W_{f,1 \rightarrow 2} \quad (2-7)$

式中 z_1, z_2 ——管路截面 1 及 2 处的高度, m ;

p_1, p_2 ——管路截面 1 及 2 处的压强, N/m^2 ;

u_1, u_2 ——管路截面 1 及 2 处的流速, m/s ;

W_e ——泵对单位质量流体所做的功, J/kg;

$W_{f,1 \rightarrow 2}$ ——流体在管路截面 1 至 2 间的摩擦阻力损失, J/kg。

(3) 泵的有效功率计算式:

$$N_e = mW_e = mH_e g = V H_e \rho g \quad (2-8)$$

式中 N_e ——泵的有效功率, W;

m ——流体质量流量, kg/s;

V ——流体体积流量, m^3/s ;

H_e ——泵的压头, m。

3. 流体在管道中流动时摩擦阻力计算式

(1) 流体流动类型判断:

雷诺数(准数): $Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (2-9)$

式中 d ——管内径, m;

μ ——流体的粘度, $Pa \cdot s$ 。

当 $Re \leq 2000$ 时为层流(或滞流); 当 $2000 < Re < 4000$ 时为过渡流; 当 $Re \geq 4000$ 时为湍流(紊流)。

(2) 摩擦阻力计算公式(范宁公式):

直管阻力: $W_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (2-10)$

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} = W_f \cdot \rho \quad (2-10a)$$

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} = \frac{W_f}{g} \text{ 压头} \quad (2-10b)$$

式中 λ ——摩擦阻力系数;

l ——管长度, m。

局部阻力: $W_f' = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad (2-11)$

$$W_f' = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (2-11a)$$

式中 l_e ——局部阻力当量长度, m;

ζ ——局部阻力系数。

管路总阻力: $\sum W_f = \lambda \frac{(l + l_e)}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (2-12)$

(3) 摩擦阻力系数的计算:

层流时: $\lambda = 64/Re \quad (Re \leq 2000) \quad (2-13)$

光滑管: $\lambda = 0.3164/Re^{0.25} \quad (3 \times 10^3 < Re < 10^5) \quad (2-14)$

(4) 流体在圆直管中作稳定层流流动时速度分布计算式:

管中心处速度: $u_c = \frac{(p_1 - p_2) r_w^2}{4\mu l} \quad (2-15)$

速度分布: $u_r = u_c \left(1 - \frac{r^2}{r_w^2}\right) \quad (2-16)$

平均速度: $u = u_c/2 \quad (2-17)$

湍流时平均速度与中心处速度关系为: $u = (0.78 \sim 0.82) u_c \quad (2-18)$

式中 r_w ——管子半径, m;

r ——管内某处离中心点距离(半径), m。

4. 管路计算公式

(1) 串联管路(如图 2-1 所示):

$$\text{流量: } V_1 = V_2 = V_3 = V \quad (2-19)$$

$$\text{阻力: } \sum W_f = W_{f1} + W_{f2} + W_{f3} \quad (2-20)$$

(2) 并联管路(如图 2-2 所示):

$$\text{流量: } V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (2-21)$$

$$\text{阻力: } W_{f1} = W_{f2} = W_{f3} = W_{f,AB} \quad (2-22)$$

$$\text{流量分配: } V_1 : V_2 : V_3 = \sqrt{\frac{d_1^5}{\lambda_1 l_1}} : \sqrt{\frac{d_2^5}{\lambda_2 l_2}} : \sqrt{\frac{d_3^5}{\lambda_3 l_3}} \quad (2-23)$$

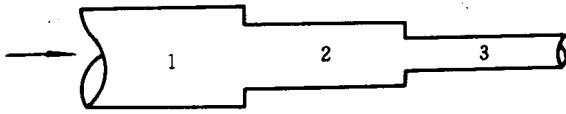


图 2-1 串联管路

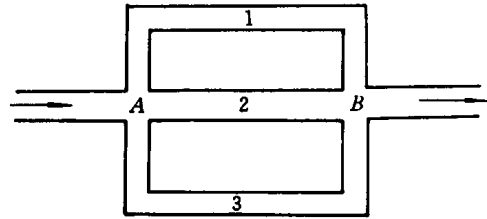


图 2-2 并联管路

(3) 分支管路(如图 2-3)所示:

$$\text{流量: } V = V_1 + V_3 + V_4 \quad (2-24)$$

柏努利方程:

$$C-E \text{ 两截面间: } gz_C + \frac{p_C}{\rho} + \frac{u_C^2}{2} = gz_E + \frac{p_E}{\rho} + \frac{u_E^2}{2} + \sum W_{f,CE} \quad (2-25)$$

$$B-C \text{ 两截面间: } gz_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} = gz_C + \frac{p_C}{\rho} + \frac{u_C^2}{2} + \sum W_{f,BC} \quad (2-26)$$

可得 B—E 两截面间:

$$gz_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} = gz_E + \frac{p_E}{\rho} + \frac{u_E^2}{2} + \sum W_{f,BC} + \sum W_{f,CE} \quad (2-27)$$

5. 流量测量

(1) 皮托管:

$$u = \sqrt{\frac{2R(\rho_0 - \rho)g}{\rho}} \quad (2-28)$$

式中 u ——测量点处的速度, m/s;

R ——压差计读数, m;

ρ_0, ρ ——分别为指示剂、被测流体密度, kg/m³。

(2) 孔板流量计

$$V_s = A_0 C_0 \sqrt{\frac{2R(\rho_0 - \rho)g}{\rho}} \quad (2-29)$$

式中 V_s ——流体流量, m³/s;

A_0 ——孔板孔口面积, m²;

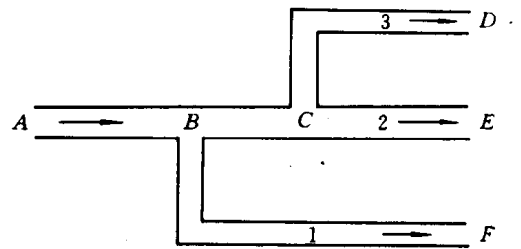


图 2-3 分支管路

C_0 ——孔板流量计孔流系数,可查有关图。

(3) 文丘里流量计:

$$V_s = A_v C_v \sqrt{\frac{2R(\rho_0 - \rho)g}{\rho}} \quad (2-30)$$

147.1 vs ρ

式中 A_v ——文丘里流量计喉管处截面积, m^2 ;

C_v ——文丘里流量计流量系数,实测。

$$gh = \frac{u^2}{2}$$

二、学习指导

流体流动一章是化工原理的基础章节,内容较多,题目灵活多样,具有广泛的实际应用性。对于初学者常常是公式很熟,但不知如何用于解决问题,下面介绍一些在解题方面应掌握的要点。

1. 流体静力学方程式

流体静力学方程式常用于计算管路中某两点间的压差、容器内液面高度等问题。在应用中应注意:

(1) 用于计算连续、静止流体内部的压强。

(2) 应用静力学方程式的关键是正确选取等压水平面。如图 2-4 所示,图中 $B-B'$ 是等压水平面,因为在 B 至 B' 段 U 形管中充满的是静止、连续的密度为 ρ_0 的指示剂。而图中 $A-A'$ 就不是等压水平面,这是因为 A 至 A' 段 U 形管中的流体虽是静止的但不是连续的,一种是密度为 ρ 的被测流体,一种是指示剂。如果从 A 至 A' 由管道连通来看,虽然自 A 至 1 至 2 再至 A' 是连续的流体,但 1 至 2 管道中的流体是流动的,因此 $A-A'$ 不是等压水平面。这里所说的连续流体是指流体的密度相同。

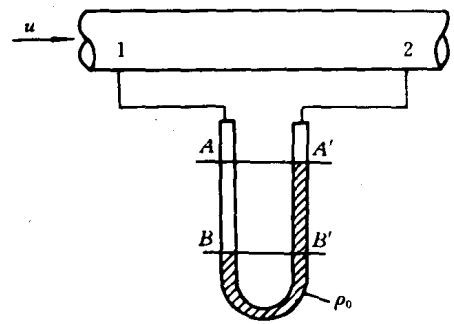


图 2-4 等压水平面概念

(3) 在应用静力学方程式时容易出现的错误是误把等高度面看成是等压水平面,如把图 2-4 中的 $A-A'$ 看成是等压水平面。

2. 柏努利方程式

柏努利方程式是总机械能衡算式,是解决流体流动问题的重要公式。常用此式计算流体输送所需要的外加功、管内某处的动能、压力能和位能及判断流向、确定流量等等。在解题过程中应注意掌握以下几点:

(1) 选定适当的基准水平面。因为位能 gz 是相对值,可以任意选定,但在解题中为方便计算通常选定地平面或能量衡算的两个截面之一作为基准水平面。

(2) 列柏努利方程进行能量衡算截面的选取。所选的截面应与流体的流动方向垂直,两截面间的流体必须是连续的。进、出两截面物流的参数(包括高度 z 、压力 p 、流速 u)应为已知或所求。

(3) 两截面间流体流动时摩擦阻力损失的计算。在进行阻力损失计算时,应计算流体由截面 1 到截面 2 的所有阻力损失(包括直管及所有局部阻力损失)。

(4) 单位的一致及压力基准的一致。代入方程式的各量的单位应一致(最好都采用 SI 制)。 p_1 及 p_2 的表示应一致,可以同时使用绝对压力或表压力或真空度的负值。初学者最好把压力都换算成绝对压力,这样不易出错。

$$3.182 \times 0.343$$

$$\frac{117.1}{22.4 TP_0} = \frac{29 \times 273 \times 284.7}{22.4 \times 323 \times 101.33}$$

*18 t
98.1)*

2.73

(5) 关于截面选在出口内、外侧的问题。如图 2-5 所示,在管出口处取截面 2 时,可取管出口外侧也可取管出口内侧。如取在管出口内侧的 2—2 截面,动能项为 $u_2^2/2$,但出口阻力为零,如选在出口外侧的 2'—2' 截面,动能项为零,但出口阻力为 $u_2^2/2$ (出口阻力的局部阻力系数 $\zeta=1$)。因此,总的结果是一样的,如表 2-1 所示。

表 2-1

位置	位能	压力能	动能	阻力损失	总机械能
出口内侧	gz_2	$\frac{p_2}{\rho}$	$\frac{u_2^2}{2}$	$\sum W_f$	$gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum W_f$
出口外侧	gz_2	$\frac{p_2}{\rho}$	0	$\sum W_f + \frac{u_2^2}{2}$	$gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \sum W_f + \frac{u_2^2}{2}$

(6) 当两截面之间的阻力发生变化,以柏努利方程分析两截面之间的任一截面处参数的变化时,要注意截面的选取。

3. 并联管路阻力的计算

在进行并联管阻力计算时,要注意总管路的阻力等于主管的阻力与任一并联管路的阻力之和,而不是主管路阻力与所有并联管路的阻力之和,这一点一定要牢记。如图 2-6 所示的并联管路,总阻力 $\sum W_{f,AD} = W_{f,AB} + W_{f,B1C} + W_{f,BCD}$ 。

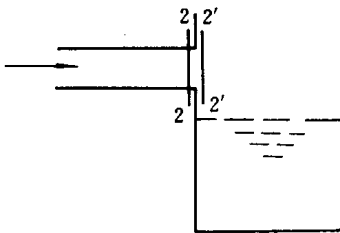


图 2-5 管出口截面的选取

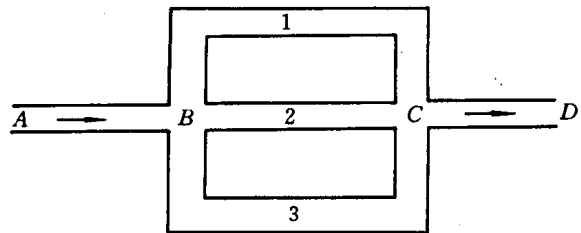


图 2-6 并联管路的阻力计算

三、主要内容联系图

本章主要内容联系如图 2-7 所示。

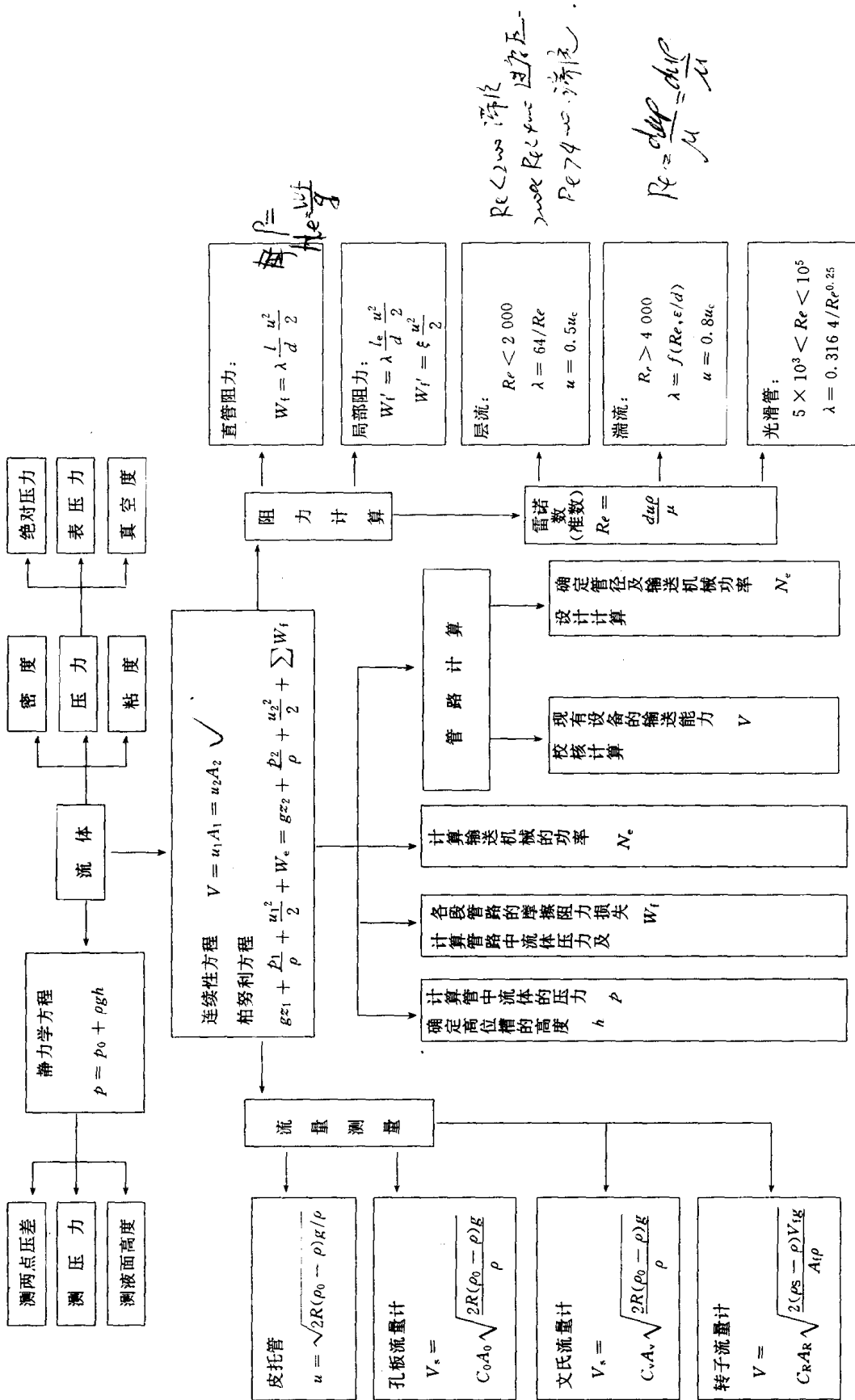


图 2-7 主要内容联系图