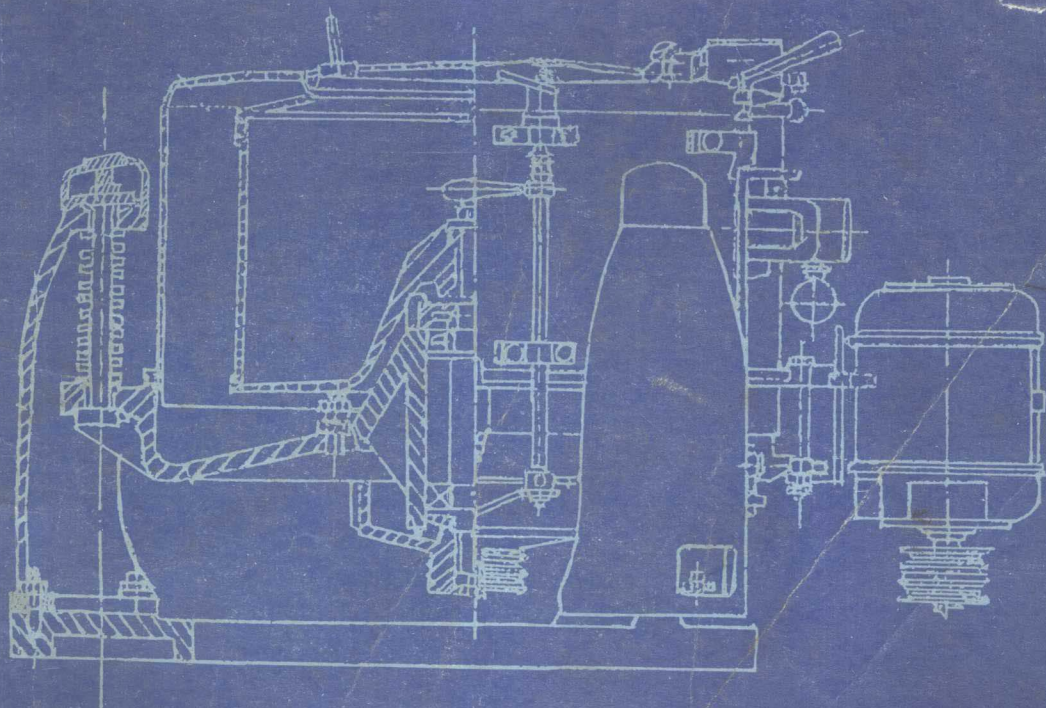


化工原理

上册

李云倩 主编

HUA GONG YUAN LI



中央广播电视大学出版社

化 工 原 理

上 册

李 云 倩 主 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字163号

化 工 原 理

上 册

李 云 倩 主 编

中央广播电视大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

固安县 印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张 25.25 千字 579

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数 1—6000

定价 9.35 元

ISBN 7-304-00636-6/TQ·7

内 容 提 要

书中介绍了主要化工单元操作的基本原理、典型设备及计算方法。全书分上、下两册。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、传热、蒸发等章,下册包括蒸馏、吸收、干燥、萃取等章。每章均编有适量的例题和习题。为了适应远距离教学的需要,各章还编有学习辅导。在内容和形式上都比较适合于自学。

本书可供广播电视大学、职工大学、夜大学、业余大学及函授大学化、轻工各专业使用。

前 言

本教材是根据 1988 年 4 月在北京召开的中央广播电视大学化轻系大纲审定会审定的《化工原理》教学大纲编写的,着重介绍化工单元操作的基本原理、计算方法及典型设备。

本书编写中,力求在保证本学科的科学性、系统性的前提下,做到深入浅出、通俗易懂,并特别注意理论联系实际和用工程观点来分析问题,以适合成人学生远距离学习的需要。为解决远距离教学中缺乏教、学信息双向反馈可能产生的困难,每章均编写了学习辅导,其中包括学习目的的要求,学习提要及思考题等内容。

本书由李云倩主编,除第二章、第三章由张士波编写外,其余各章均由李云倩编写。

全书由莫锡荣教授审定。

1990 年 11 月和 1991 年 6 月中央广播电视大学为本教材召开了审定会,参加会议的有清华大学、天津大学、北京理工大学、北京化工学院、河北工学院及化学工业出版社等单位的专家,北京化工学院莫锡荣教授提出了书面意见。会议认为教材的编写目的明确,内容简明实用,适用于广播电视大学《化工原理》课程的教学需要。

本教材也可供大学专科《化工原理》课程的教学选用。

由于编者水平所限,书中错误及不妥之处在所难免,恳请读者予以批评指正,以助日后修订。

编 者

1991 年 6 月

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 流体的基本性质	(7)
1-1 密度、相对密度和比容	(7)
1-2 流体的压强	(9)
1-3 粘度	(11)
第三节 流体静力学	(15)
1-4 流体静力学基本方程式	(15)
1-5 流体静力学基本方程式的应用	(17)
第四节 流体动力学	(23)
1-6 流量和流速	(23)
1-7 稳定流动与不稳定流动	(26)
1-8 稳定流动的物料衡算——连续性方程式	(27)
1-9 柏努利方程式	(28)
1-10 柏努利方程式的应用	(32)
第五节 流体在管内的流动阻力	(35)
1-11 流体的流动类型与雷诺准数	(35)
1-12 流体在圆形管内的速度分布	(38)
1-13 边界层的概念	(39)
1-14 流体流动阻力	(40)
1-15 流体在直管中的流动阻力	(41)
1-16 非圆形管内的流动阻力	(50)
1-17 局部阻力	(52)
1-18 管路总能量损失的计算	(54)
第六节 管路计算	(60)
1-19 简单管路计算	(62)
第七节 流速和流量的测定	(69)
1-20 测速管	(69)
1-21 孔板流量计	(72)
1-22 文氏流量计	(76)
1-23 转子流量计	(77)
习题	(80)
本章重要符号说明	(88)

第二章 流体输送机械	(90)
第一节 概述	(90)
第二节 离心泵	(90)
2-1 离心泵的工作原理和主要部件	(90)
2-2 离心泵的主要性能参数	(93)
2-3 离心泵的特性曲线及其应用	(96)
2-4 离心泵的汽蚀现象和安装高度	(98)
2-5 离心泵的工作点和流量调节	(102)
2-6 离心泵的联用、安装和运转	(105)
2-7 离心泵的类型与选用	(106)
第三节 其它类型泵	(108)
2-8 往复泵	(108)
2-9 其它类型泵	(110)
第四节 气体输送机械	(111)
2-10 离心式通风机	(112)
2-11 鼓风机	(115)
2-12 压缩机	(115)
2-13 真空泵	(120)
习题	(121)
本章重要符号说明	(123)
第三章 非均相物系的分离	(125)
第一节 概述	(125)
第二节 重力沉降	(126)
3-1 沉降速度	(126)
3-2 重力沉降设备	(130)
第三节 离心沉降	(133)
3-3 离心沉降速度	(134)
3-4 离心沉降设备	(135)
第四节 过滤	(140)
3-5 过滤操作的基本概念	(140)
3-6 过滤基本方程式	(142)
3-7 过滤设备	(146)
第五节 离心分离	(151)
3-8 离心分离的基本概念	(151)
3-9 离心过滤和离心沉降	(152)
第六节 气体的其它净制方法	(155)
3-10 惯性分离器	(155)
3-11 袋滤器	(155)

3-12 静电除尘器	(155)
习题	(156)
本章重要符号说明	(157)
第四章 传热	(159)
第一节 概述	(159)
4-1 传热过程在化工生产中的应用	(159)
4-2 传热的基本方式	(159)
4-3 间壁式换热器中的传热过程	(160)
第二节 热传导	(161)
4-4 傅立叶定律	(161)
4-5 导热系数	(162)
4-6 平壁的稳定热传导	(165)
4-7 圆筒壁的稳定热传导	(167)
第三节 对流传热	(171)
4-8 对流传热的基本概念	(171)
4-9 影响对流传热系数的主要因素	(172)
4-10 流体无相变化时的对流传热系数	(173)
4-11 流体有相变化时的对流传热系数	(183)
第四节 热辐射	(190)
4-12 基本概念	(190)
4-13 物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	(191)
4-14 克希霍夫定律	(192)
4-15 两固体间的相互辐射	(193)
4-16 设备热损失的计算	(196)
第五节 传热计算	(198)
4-17 换热器的热负荷计算	(198)
4-18 传热平均温度差的计算	(200)
4-19 流体流动方向的选择	(208)
4-20 总传热系数	(209)
4-21 污垢热阻	(212)
4-22 壁温的计算	(214)
4-23 传热面积	(214)
第六节 换热器	(220)
4-24 换热器的分类	(220)
4-25 间壁式换热器	(221)
4-26 列管式换热器的选用	(229)
4-27 列管式换热器选用计算中的有关问题	(230)
4-28 传热过程的强化	(238)
第七节 加热、冷却和冷凝	(240)

4-29 加热	(240)
4-30 冷却	(242)
4-31 冷凝	(244)
习题	(244)
本章重要符号说明	(249)
第五章 蒸发	(252)
第一节 概述	(252)
5-1 概述	(252)
第二节 单效蒸发和真空蒸发	(253)
5-2 单效蒸发	(253)
5-3 温度差损失	(259)
5-4 蒸发器的生产能力和生产强度	(263)
5-5 真空蒸发	(264)
第三节 多效蒸发	(265)
5-6 多效蒸发的流程	(265)
5-7 多效蒸发的计算	(267)
5-8 多效蒸发效数的限制	(271)
5-9 蒸发过程的节能措施	(272)
第四节 蒸发设备	(273)
5-10 自然循环蒸发器	(273)
5-11 强制循环蒸发器	(276)
5-12 液膜式蒸发器	(276)
5-13 蒸发器的选型	(279)
5-14 蒸发设备的附属设备	(280)
习题	(281)
本章重要符号说明	(283)
学习辅导	(284)
第一章 流体流动	(284)
第二章 流体输送机械	(305)
第三章 非均相物系的分离	(316)
第四章 传热	(326)
第五章 蒸发	(345)
附录	(353)
1. 单位换算表	(353)
2. 饱和水蒸汽表(按温度排列)	(358)
3. 饱和水蒸汽表(按压力排列)	(359)
4. 水的饱和蒸汽压($-20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$)	(362)
5. 水的重要物理性质	(364)

6. 水的粘度(0~100°C)	(365)
7. 某些液体的重要物理性质	(366)
8. 液体粘度共线图	(368)
9. 液体比热共线图	(370)
10. 液体汽化潜热共线图	(372)
11. 某些液体的导热系数	(373)
12. 无机物水溶液在大气压下的沸点	(374)
13. 空气的重要物理性质 (760mmHg 压力下)	(375)
14. 某些气体的重要物理性质	(376)
15. 常用气体的导热系数图	(377)
16. 气体比热共线图(常压下用)	(378)
17. 气体粘度共线图(常压下用)	(380)
18. 某些固体材料的重要物理性质	(382)
19. 建筑材料、绝热材料、耐酸材料及其它	(383)
20. 某些固体材料的黑度 ϵ	(384)
21. 管子规格	(385)
22. 离心泵规格	(386)
23. 离心通风机规格	(389)
24. 列管式换热器规格	(390)
主要参考资料	(393)

绪 论

化学工业是将原料经过化学和物理方法加工而制成产品的工业。化工产品不仅是工业、农业和国防等部门的重要生产资料，也是人民生活中的重要生活资料，所以化学工业在国民经济中占有重要地位。

化工产品种类繁多，生产过程(即从原料加工成产品的过程)十分复杂，每一种产品的生产过程均不相同。举例说明如下。

阿斯匹林(乙酰水杨酸)的生产过程，见图 0-1。

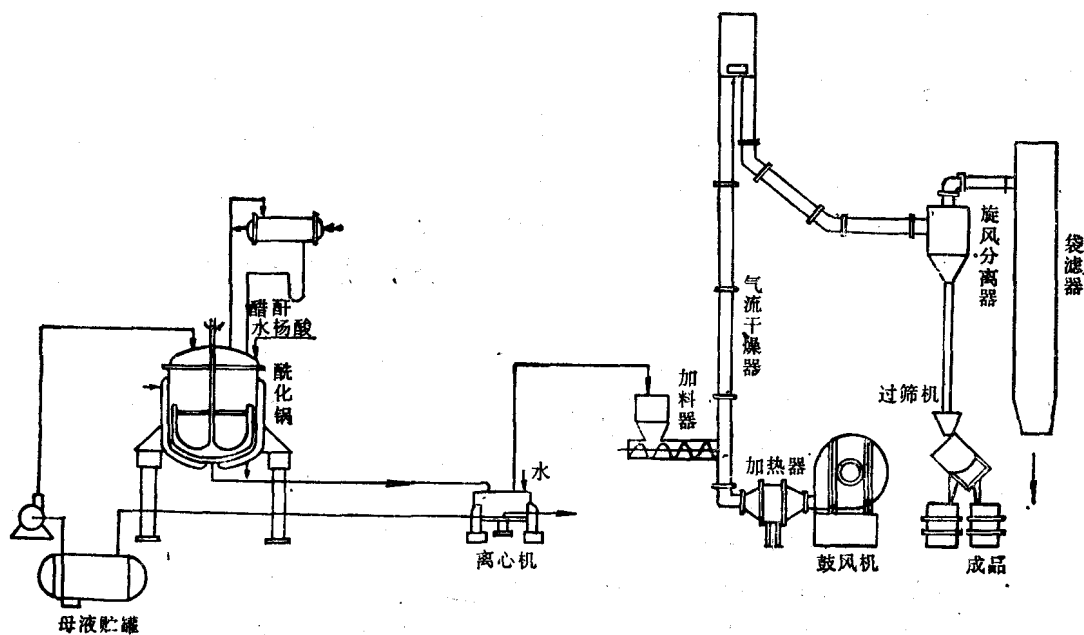


图 0-1 阿斯匹林生产流程图

阿斯匹林是由水杨酸与醋酐进行乙酰化反应而制得的。由流程图可见，用泵将贮罐中的醋酸(称为母液)打入酰化锅，加入醋酐，在搅拌下加入水杨酸。加热至 74°C ，保温 5 小时进行酰化反应。反应结束后，冷却结晶，在离心机中过滤晶体，滤液送回母液贮罐。晶体在离心机中再用水清洗，经数次洗涤后，由螺旋加料器送至气流干燥器中干燥，干燥产品用旋风分离器回收，最后过筛即得阿斯匹林。从旋风分离器出来的空气经袋滤器进一步回收阿斯匹林粉尘后排入大气。

在阿斯匹林的生产过程中，除酰化锅内的酰化反应为化学反应过程外，其它设备中进行的过程，如母液输送、离心机内脱水、洗涤、空气加热、气流干燥及旋风分离除尘等均为物理操作过程。这些反应前、后的处理过程是输送物料；使物料达到一定的温度、压力要求；液固分离以提高纯度

等。综上所述,这些物理过程是化工生产中的重要组成部分,所用设备占据着企业的大部分设备投资,每一个过程进行的好坏都直接与产品的产量、质量密切相关。

研究不同化工产品的生产过程后不难发现,不同产品的生产过程尽管不同,但都由化学反应过程和为数不多的物理操作过程组成。根据这些物理过程的操作原理,可以归纳为数个基本的操作过程,如流体流动及输送、非均相物系的分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取及干燥等等。我们将这些基本的操作过程称为**化工单元操作**(简称单元操作)。每一单元操作都遵循某一基本原理,并在一类特定的设备中进行,所以单元操作应包括**过程原理和设备**两方面内容。可以这样讲,任何一种化工产品的生产过程,都是由化学反应过程和若干个单元操作组合而成。

单元操作不仅在化工生产中占有重要地位,而且在石油、轻工、食品、冶金、制药及原子能工业中也被广泛应用。

一、《化工原理》课程的性质、内容和任务

本课程是在高等数学、物理学及物理化学之后开设的一门基础技术课,也是一门工程学科的课程。

本课程主要研究化工生产中各单元操作的基本原理、设备及其计算方法。具体内容有:

- (1) 流体流动过程 包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离等单元操作;
- (2) 传热过程 包括传热、蒸发等单元操作;
- (3) 传质过程 包括蒸馏、吸收、萃取和干燥等单元操作。

本课程的主要任务是培养学生具有运用基础理论,分析和解决化工生产中各种实际问题的能力。具体要求是:

- (1) 掌握各单元操作的基本原理,并具有一定的“过程和设备”的选择能力;
- (2) 掌握各单元操作的基本计算方法,包括过程的计算和设备的设计计算或选型计算;
- (3) 根据生产上的不同要求,能进行操作和调节,在操作发生故障时,能够寻找产生故障的原因并具有一定的排除故障的能力;
- (4) 了解过程强化的方向及改进设备的途径。

二、物料衡算、能量衡算、平衡关系及过程速率

虽然各个单元操作所遵循的基本原理不同,但它们同时又遵循着某些共同的规律,这些规律是本课程的计算和分析问题的基础,包括物料衡算、能量衡算、平衡关系及过程速率。简要说明如下:

1. 物料衡算

根据质量守恒定律,输入与离开某一化工过程或设备的物料质量之差,必等于积累在该过程或设备中的物料质量,即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量} \quad (0-1)$$

称(0-1)式为物料衡算式。该式适用于任何指定的系统,如一个工厂、一个车间或一个设备等。物料衡算式也适用于过程所涉及的全部物料,或混合物中的某一组分(无化学反应时)。物料衡算式看上去很简单,但在化工生产中有十分重要的作用。

在连续的化工生产中, 稳定操作时, 单位时间内进入设备的各物料质量总和 ΣM_{λ} 应与排出设备各物料质量的总和 $\Sigma M_{\text{出}}$ 相等, 故常用的物料衡算式为

$$\Sigma M_{\lambda} = \Sigma M_{\text{出}} \quad (0-2)$$

2. 能量衡算

根据能量守恒定律, 对于连续稳定系统, 进入系统的总能量, 必等于系统输出的总能量。

能量的形式很多, 如机械能、热能、电能、化学能等等。各能量之间可以相互转换, 如机械能转换为热能等, 但在化工单元操作中, 绝大多数场合不需考虑能量相互转换问题, 能量衡算主要指机械能衡算和热量衡算。

化工生产中需要计算的、最常用的能量形式是热量。当不计热损失时, 热量衡算式为随各种物料进入设备的热量总和 ΣQ_{λ} 与各种物料带出设备的热量总和 $\Sigma Q_{\text{出}}$ 相等, 即

$$\Sigma Q_{\lambda} = \Sigma Q_{\text{出}} \quad (0-3)$$

3. 平衡关系

传质过程中, 在温度和压力一定的条件下, 若物系存在两个或两个以上的相, 物料在各相中相对的量, 即物料中各组分在各相中的组成不随时间变化时, 我们称该物系处于平衡状态。这种平衡是动平衡, 即平衡时物料仍在进出各相, 只是各相的量及组分在各相中的组成恒定而已。例如, 在一定温度下, 不饱和的糖溶液与固体糖接触, 糖向溶液中溶解, 直至糖溶液饱和, 此时, 固体糖表面已与溶液成动平衡状态。若溶液中糖的浓度大于饱和浓度, 则溶液中的糖就会析出, 使固体糖长大, 达到新的平衡状态。

传热过程中, 当两种流体的温度不相等时, 热量自高温流体传给低温流体, 直至两种流体的温度相等, 即达到平衡。

可见, 任何过程在一定条件下都由不平衡到平衡, 而平衡关系则可用来判断一个过程在一定条件下能否进行、进行的方向及过程进行的极限。

4. 过程速率

上述平衡关系只说明过程进行的方向和极限, 并没有说明过程进行的快慢, 而后者对生产过程更为重要。过程进行的快慢用过程速率表示: 单位时间内, 过程的变化量称为过程速率。如传热过程的速率为单位时间内传递的热量, 称为传热速率; 传质过程的速率为单位时间内传递的物质质量, 称为传质速率。显然, 过程的速率越大, 设备的生产能力越大, 或在完成同样产量的情况下, 设备的尺寸就越小。

过程的速率可用如下关系式表示:

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程的阻力}} \quad (0-4)$$

过程的推动力是指: 某一瞬间过程的实际状态与平衡状态间的差距。如传质过程的推动力, 通常用某一瞬间过程的实际组成与平衡组成之差来表示; 传热过程的推动力为进行传热的两方的温度差。构成过程阻力的因素很多, 其值因过程的性质不同而异。过程的速率问题将结合各单元操作讨论, 在此不详述。

三、单位制及单位换算

1. 单位制

任何物理量的大小都是由数字和单位两部分构成的,如 5m, 10 kg。用以表示各个物理量大小的单位,又有不同的单位制,如物理单位制(CGS 制)、工程单位制、国际单位制(SI)等。在工程运算时应将物理量的数字和单位一并纳入计算式中,若各物理量用不同单位制的单位表示时,则应在计算前进行单位换算使其统一计量单位,这无疑给计算带来诸多不便。

随着我国经济建设、科学技术、文化教育事业的发展和国际经济、技术交流的日益增多,迫切要求统一各行各业使用的单位制,为此,1984 年国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,并要求在 1990 年底以前完成向国家法定计量单位的过渡。从而确定了以国际单位制单位为基础的我国法定计量单位(简称法定单位)。

本书采用法定计量单位。但考虑到目前常用的物理、化学数据及工程计算中用表、数、列线图 etc 仍有许多是用物理单位制及工程单位制(指尚未换算过来的部分),故本书附录 1 中列出单位换算表供查用。

2. 因次

法定计量单位同其它单位制一样,有基本单位和导出单位。常用的基本因次或称量纲:长度为 L,质量为 M,时间为 θ , 温度为 T。应用这些基本量来表示物理量特性的式子,称为因次式。例如,加速度的因次式为 $[L\theta^{-2}]$,密度的因次式为 $[ML^{-3}]$ 。

3. 单位换算

同一物理量可用不同单位制进行度量。当物理量的单位不属所需单位制时,则应进行单位换算。单位换算时需要换算因数。本书附录 1 中列出化工中常用单位的换算因数供查用。

化工计算中所用公式可分两类。一类是物理量方程,即根据物理规律建立的理论方程,如牛顿第二运动定律,气体状态方程等等。物理量方程具有因次一致性的特点,计算时各物理量采用同种单位制即可。

另一类是根据实验数据整理出的经验公式,这类公式只反映式中各物理量的数值间的关系,而这些数值都与特定的单位相对应,故使用经验公式时,各物理量必须采用式中规定的单位,否则计算结果毫无意义。

最后说明一点:要特别注意 SI 中“力”的单位 N 与工程单位制中“力”的单位 kgf 之间的换算关系。工程单位制中“力”是基本单位,而 SI 中“力”是导出单位。两种单位制中“力”的换算关系说明如下。

质量为 1 kg 的物体在重力场中所受的重力为

$$\begin{aligned} F &= mg = 1 \times 9.80665 \\ &= 9.80665 \text{ N} \end{aligned}$$

(9.80665 m/s² 为国际标准重力加速度)

在重力场中,物体所受重力即为该物体的重量,而工程单位制中将 9.80665 N 定义为 1 kgf

重量, 故有

$$1 \text{ kgf} \approx 9.80665 \text{ N}$$

由于质量为 1 kg 的物体其重量为 1 kgf , 所以 SI 中的质量与工程单位制中的重量数值相等。例如, 质量为 5 kg , 其重量为 5 kgf 。

第一章 流体流动

第一节 概 述

流体包括液体和气体。流体的特征是具有流动性,其形状随容器的形状而变化;受外力作用时内部产生相对运动。流体的流动规律是本课程的重要基础,因为:

1. 化工生产中所处理的物料大多为流体,按照生产工艺的要求,往往需将流体从一地送往另一地,或从一设备送往另一设备,这一过程的实现要借助管道和输送机械(如泵、风机等)来完成,从而需要研究流体的流动规律,以便进行管路的设计计算、输送能力的核算;选择适宜的流体输送机械及计算其所需功率;选择测量流体流速和流量的装置等。

2. 化工设备中的传热、传质和化学反应过程大多是在流体流动的条件下进行,这些过程进行的快慢、好坏等与流体流动的状态密切相关,因此,为了深入研究传热、传质等过程,则需首先研究流体的流动规律及流体流动的内部结构。

连续性假设 流体由大量的流体分子组成,分子彼此之间有空隙,又进行着复杂的微观运动。研究分子的微观运动不是工程学科的任务。从工程实际的角度出发,我们关心的不是个别分子的微观运动,而是整个流体的宏观机械运动,所以要引入**连续性的假设**:流体是由彼此之间没有空隙,没有微观运动的无数流体质点(或称微团)所组成的连续介质。流体质点由很多分子组成,其尺寸远大于分子自由程,而与流体所在空间(设备或管道)相比又微不足道。这种流体的物理性质(如密度、粘度等)和运动参数(速度等)均是连续变化的,从而可以使用连续函数这一有效的数学工具。可见,引入连续性假设,便摆脱了复杂的分子运动的研究,在处理工程实际问题上不仅应用方便,而且有足够的精确性。

应当指出,连续性假设在绝大多数情况下是适用的,但在高真空的情况下,由于气体稀薄,这种假设将不再成立。

不可压缩性流体与可压缩性流体 若流体的体积不随压力及温度变化,则称其为不可压缩性流体;若流体的体积随压力及温度变化,则称其为可压缩性流体。实际流体均为可压缩性流体。但在实际工程问题处理中,通常由于液体的体积随压力及温度变化很小而视其为不可压缩性流体;当气体的压力或温度变化很小时,亦可将气体作为不可压缩性流体处理;但一般情况下,由于气体比液体有较大的压缩性及膨胀性,通常将它视为可压缩性流体。

第二节 流体的基本性质

1-1 密度、相对密度和比重

一、密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,用符号 ρ 表示。其表达式为

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

(1-1)

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

一定的流体,密度是压力和温度的函数,即

$$\rho = f(P, T)$$

(1-2)

液体的密度 视液体为不可压缩性流体,其密度随压力的变化很小(极高压力下除外)可忽略不计,但温度对液体的密度有一定影响,故查取液体密度时,要注意注明其温度条件。

液体混合物的密度 若几种液体混合前的分体积等于混合后的总体积,则混合物的平均密度可按下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n}$$

(1-3)

式中: ρ_m ——液体混和物的平均密度, kg/m^3 ;

a_1, a_2, a_n ——液体混和物中各组分的质量分率, $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 。

气体的密度 气体为可压缩性流体,其密度随温度和压力变化较大。当没有气体密度数据时,如果压力不太高、温度不太低,气体的密度可近似按理想气体状态方程式计算,即

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

(1-4)

得

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

(1-5)

式中: p ——气体的压力, kPa ;

T ——气体的温度, K ;

M ——气体的分子量, kg/kmol ;

R ——通用气体常数, $R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

气体的密度亦可按下式计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0}$$

(1-6)

式中: ρ_0 ——标准状态下气体的密度, kg/m^3 ;