



高等学校试用教材

# 化工传递过程

天津大学等合编

化学工业出版社

高等学校试用教材

# 化工传递过程

天津大学等合编

化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书系根据《化工传递过程》全国统一教学大纲编写而成，作为学完《化学工程》(化工原理)、《化工应用数学基础》之后进一步学习的一门“化学工程”专业课教材。

本书阐述了化工传递过程的基本原理，内容包括“动量传递”、“热量传递”及“质量传递”三篇，共十六章。为了便于学生理解和掌握课程内容，书中还列举了必要的例题和习题。

参加本书编写工作的有：

1. 动量传递：张远谋、王绍亭、陈透明、陈涛（天津大学）
2. 热量传递：范治新（清华大学）
3. 质量传递：李盘生、戴干策、范自晖、丛德滋（上海化工学院）

本书由天津大学主编，由王绍亭负责全书的最后整理和统编工作。陈涛参加了校对工作。

参加本书审定工作的有：林纪方、时钧、傅举孚。

高等学校试用教材

化工传递过程

天津大学等合编

\*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>印张20字数501千字印数5,151—15,170

1980年11月北京第1版1983年7月北京第2次印刷

统一书号15063·3186(K-230)定价2.05元

# 绪 言

## 1. 化工传递过程概述

远在化学工程学科开始被重视之前，已经有不少化学工业建立起来。那时，每一种化学工业的工艺，均被视为一门特殊的知识。化学工程的早期课程，即以学习各种化学工业的工艺学为基础。“单元操作”概念的引入，使课程发生了很大的变化。不同工业的生产过程中出现的物理变化性质的相似，引起人们对各种工业中共有的加工步骤的研究兴趣，这就提出了所谓的“单元操作”。例如，人们发现无论是在制糖工业中，还是在肥料生产中，从溶液蒸发液体所遵循的原理是相同的，于是，蒸发成为最早提出的单元操作之一。被称为单元操作的还有流体流动、传热、干燥、蒸馏、吸收、萃取、结晶、过滤等等。以这些单元操作作为研究和学习的主要内容，是化学工程学科在二十世纪前半期这一发展阶段的基本情况。

当单元操作被了解得更加深入以后，又发现了各操作之间存在的共性。过滤显然只是流体流动的一个特例；蒸发不过是传热的一种形式；萃取和吸收都包含着质量的传递；干燥与蒸馏则是传热与传质都重要的操作。于是，单元操作被看成是传热、传质、及流体流动的特殊情况或特定的结合。作为单元操作的基础，流体流动同传热与传质一样，也被视为一种传递现象，这是因为实际流体流动中，必然有动量传递。对单元操作的任何进一步研究，最终都是对这几种传递过程的研究。

二十世纪中期以来，化学工程学科进入以“传递过程”和“反应工程”为中心的所谓“三传一反”的发展阶段。关于化学反应器的研究，固然要求人们运用化学动力学和热力学的原理，同时也必然要求运用动量、热量、及质量传递的原理。至于在反应物的准备及生成物的分离等各有关单元操作中，更是不能不以传递过程的原理为基础。因此“化工传递过程”成了化学工程专业学生的一门重要必修课程。

由于化工过程的复杂性，迄今不少研究工作，多以经验或半经验的方法处理。但近年来高速电子计算机的发展，使理论的重要性大大提高。过去必须用经验方法解决的复杂问题，有了计算机，已经可以用理论方法解决了。

计算机除用于设计计算之外，现在还用于工厂操作变数的控制。如欲通过计算机使过程在最优条件下运转，过程的数学模型通常是必不可少的。这种模型要求对过程有更为细致的了解和进一步的数学分析。描述过程不稳态行为的动态模型，显然要求更高。基于上述理由，学习本课程时对数学分析方法加以强调是必要的。

## 2. 单位制度

从事化工工作的人常常发现由各类资料中得到的数据是用各种不同制度的单位表示的。在应用这些数据作计算之前，必须进行单位换算，将有关各量都换算成统一的单位制，这种计量单位不统一的状况，给科技工作者带来许多不必要的麻烦，甚至造成错误。因此，各国科学技术工作者和有关国际组织，多年来一直在研究如何改善和统一单位制的问题。

在1960年的第十一届国际权度大会上，通过了一种由米制发展来的，定名为“国际单位制”(SI)的单位制度，又经过历届权度大会的修改，到1971年的第十四届大会之后，SI制发展成了今天这样的形式：以米、千克(公斤)、秒、安培、开尔文、摩尔和烛光(坎德拉)七

个单位为基本单位（见表0-1）。这是一种比较完善的，有可能使得计量制度在全世界范围内统一的单位制。到目前为止，世界上工业较为发达的国家，几乎都已由政府部门通过法令或条例，正式宣布采用或准备逐步采用SI制。

表 0-1 国际单位制基本单位

物理量	名称	代号
长度	米	m
质量	千克（公斤）	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
光强度	坎德拉	cd

我国自1959年推行米制以来，已经取得了很大的成绩。在科技领域内基本上是使用米制，不过在工业生产和工程学科方面，广泛使用的是以公斤力作为基本单位之一的米制，即米-公斤力-秒制。而在国际单位制中，计量力的是导出单位（力的单位是  $(\text{kg}\cdot\text{m})$

$/\text{s}^2$ ，称为牛顿）。随着工业和科学技术的迅速发展，有必要加紧开展准备工作，为逐步全面过渡到国际单位制奠定基础。出于这样的考虑，本教材主要采用SI单位制。但鉴于我国计量制度的现况，要求学生同时熟悉现行的工程单位制及各单位制之间的换算。

表 0-2 SI单位换算成工程上常用的其它单位

力	$1\text{N}(\text{牛顿})=1(\text{kg}\cdot\text{m})/\text{s}^2=0.10197\text{公斤力}$
压力（压强）	$1\text{Pa}(\text{帕斯卡})=1\text{N}/\text{m}^2=10^{-5}\text{巴}$ $=1.0197\times 10^{-5}\text{工程大气压}$ $=0.9869\times 10^{-5}\text{标准大气压}$
能量、功、热	$1\text{J}(\text{焦耳})=1(\text{N}\cdot\text{m})=0.10197\text{公斤力}\cdot\text{米}$ $=0.2778\times 10^{-6}\text{千瓦}\cdot\text{时}$ $=0.2389\times 10^{-3}\text{千卡}$
功率、传热速率	$1\text{W}(\text{瓦特})=1\text{J}/\text{s}=0.10197\text{公斤力}\cdot\text{米}/\text{秒}$ $=0.860\text{千卡}/\text{时}$
（动力）粘度	$1\text{Pa}\cdot\text{s}=1(\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2=1000\text{厘泊}$ $=0.10197\text{公斤力}\cdot\text{秒}/\text{米}^2$
比热	$1\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})=0.2389\times 10^{-3}\text{千卡}/\text{公斤}\cdot\text{℃}$
热流强度	$1\text{W}/\text{m}^2=0.8598\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}$
导热系数	$1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})=0.860\text{千卡}/\text{米}\cdot\text{时}\cdot\text{℃}$
传热系数	$1\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})=0.860\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot\text{℃}$

表 0-3 其它单位换算成 SI 单位

力	$1\text{达因}=1.00\times 10^{-5}\text{N}$ $1\text{公斤力}=9.8067\text{N}$
压力（压强）	$1\text{达因}/\text{厘米}^2=0.1\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{公斤力}/\text{米}^2=9.8067\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{标准大气压}=1.0133\times 10^5\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{工程大气压}=9.8067\times 10^4\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{巴}=1.00\times 10^5\text{N}/\text{m}^2$ $1\text{毫米汞柱}=1.333\times 10^2\text{N}/\text{m}^2$
能量、功、热	$1\text{卡}=4.1868\text{J}$ $1\text{千卡}=4.1868\times 10^3\text{J}$ $1\text{尔格}=1.00\times 10^{-7}\text{J}$ $1\text{千瓦}\cdot\text{时}=3.600\times 10^6\text{J}$
功率、传热速率	$1\text{卡}/\text{秒}=4.1868\text{W}$ $1\text{千卡}/\text{时}=1.1630\text{W}$ $1\text{尔格}/\text{秒}=1.00\times 10^{-7}\text{W}$
（动力）粘度	$1\text{厘泊}=1.00\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ $1\text{公斤力}\cdot\text{秒}/\text{米}^2=9.8067\text{Pa}\cdot\text{s}$
比热	$1\text{千卡}/\text{公斤}\cdot\text{℃}=4.1868\times 10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
热流密度	$1\text{卡}/\text{厘米}^2\cdot\text{秒}=4.1868\times 10^4\text{W}/\text{m}^2$ $1\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}=1.1630\text{W}/\text{m}^2$
导热系数	$1\text{卡}/\text{厘米}\cdot\text{秒}\cdot\text{℃}=4.1868\times 10^2\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ $1\text{千卡}/\text{米}\cdot\text{时}\cdot\text{℃}=1.1630\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
传热系数	$1\text{卡}/\text{厘米}^2\cdot\text{秒}\cdot\text{℃}=4.1868\times 10^4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ $1\text{千卡}/\text{米}^2\cdot\text{时}\cdot\text{℃}=1.1630\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
通用气体常数	$R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$

# 目 录

## 绪言

1. 化工传递过程概述

2. 单位制度

## 第一篇 动 量 传 递

### 第一章 流体流动导论..... 1

1-1 牛顿型流体的粘度 ..... 1

1-2 非牛顿型流体的类型 ..... 3

1. 宾哈姆塑性流体 ..... 3

2. 拟塑性或假塑性流体 ..... 3

3. 胀塑性流体 ..... 4

1-3 圆管中的层流流动 ..... 4

1-4 动量、质量及能量的  
通量表达式 ..... 6

1. 动量通量 ..... 6

2. 质量通量 ..... 7

3. 能量通量 ..... 7

### 第二章 总衡算方程..... 9

2-1 总质量衡算方程 ..... 9

1. 简单几何体的质量衡算 ..... 9

2. 通用的总质量衡算方程 ..... 15

2-2 总能量衡算方程 ..... 18

1. 总能量衡算的通用表达式 ..... 19

2. 化工流体流动的总  
能量衡算 ..... 20

3. 机械能衡算 ..... 26

2-3 总动量衡算方程 ..... 29

### 第三章 微分衡算方程..... 37

3-1 微分质量衡算方程 ..... 37

1. 单组分系统 ..... 37

2. 双组分系统 ..... 42

3-2 微分能量衡算方程 ..... 44

3-3 微分动量衡算方程 ..... 47

1. 用应力表示的运动方程 ..... 47

2. 应力与应变速率之间  
的关系 ..... 51

3. 粘性流体的运动微分方程(奈  
维-斯托克斯方程) ..... 58

4. 柱坐标系和球坐标系中粘性流  
体的运动微分方程(奈维-斯托  
克斯方程) ..... 60

### 第四章 运动方程的若干解..... 63

4-1 平壁间的稳态平行层流 ..... 63

4-2 圆管与套管环隙中的  
稳态层流 ..... 66

4-3 爬流(蠕动流) ..... 70

4-4 流线与流函数 ..... 72

4-5 理想流体 ..... 75

4-6 势流 ..... 77

### 第五章 边界层流动..... 82

5-1 边界层的概念 ..... 82

5-2 边界层分离 ..... 83

5-3 曳力系数 ..... 86

5-4 边界层方程 ..... 87

5-5 边界层动量方程 ..... 90

5-6 流体沿平板壁面流动时层流边  
界层的计算 ..... 93

5-7 管道进口段的流体流动 ..... 96

### 第六章 湍流的速度分布与阻力..... 98

6-1 关于湍动的基本概念 ..... 98

1. 临界雷诺数 ..... 98

2. 平均速度与脉动速度 ..... 98

3. 湍动强度与湍动标度 ..... 99

4. 雷诺应力 ..... 100

5. 涡流粘度与混合长 ..... 102

6-2 光滑管中的湍流 ..... 104

1. 普兰德混合长与通用速度分

布方程	104	7-2 两相流体的流动型式	112
2. 速度分布与流动阻力	106	7-3 持液量的计算	115
6-3 粗糙管中的湍流	107	1. 滑动或持液量效应	115
1. 粗糙管中的速度分布	107	2. 持液量的计算	119
2. 粗糙管中的流动阻力	108	7-4 两相流动的总压强降	124
6-4 应用边界层动量方程于平板上		1. 加速项与升举项的讨论	124
的湍流边界层	108	2. 摩擦阻力的计算	127
<b>第七章 气液两相流动</b>	<b>112</b>	<b>动量传递篇符号表</b>	<b>138</b>
7-1 概述	112	<b>主要参考文献</b>	<b>142</b>

## 第二篇 热 量 传 递

<b>第八章 热传导</b>	<b>143</b>	1. 边界层方程	174
8-1 导热问题的分析求解方法	143	2. 方程组的因次分析	174
1. 热传导的一般数学模型	143	3. 速度分布与温度分布	175
2. 导热问题的分析解	144	4. 对流传热系数	178
3. 不稳态导热	146	9-4 层流传热的近似积分解	179
8-2 导热问题的数值算法	159	1. 边界层热流方程	179
1. 采用结点温度方程求解稳		2. 平壁层流传热	180
态温度场	159	3. 管内层流传热	183
2. 用迭代法求解稳态温度场	161	9-5 湍流传热的分析解	184
3. 用高斯消去法求解稳态温		1. 热量传递与动量传递的类	
度场	164	似性	185
4. 用松弛法求解稳态温度场	165	2. 雷诺类似律	186
5. 不稳态温度场的数值计		3. 普朗德-台劳类似律	189
算法	166	4. 卡门类似律	191
<b>第九章 单相对流传热</b>	<b>169</b>	5. 柯尔邦类似律	193
9-1 单相对流传热的一般数学		6. 湍流边界层的近似积分解	194
模型	169	<b>第十章 有相变的对流传热</b>	<b>197</b>
1. 传热微分方程	169	10-1 沸腾传热过程分析	197
2. 导热微分方程	169	1. 沸腾传热机理	197
3. 运动微分方程	169	2. 对流沸腾传热	198
4. 连续性方程	170	3. 沸腾对流传热系数的实用	
9-2 边界层及其与对流传热的		计算公式	204
关系	171	4. 临界热流强度	205
1. 热边界层及其对对流传热系数		10-2 冷凝传热	211
的影响	171	1. 蒸汽剪应力对于层流和湍流膜	
2. 边界层内的能量传递机理	171	状冷凝传热的影响	211
3. 进口段的传热发展过程	172	2. 管内冷凝传热的实用计	
9-3 平壁层流传热的分析解	174	算式	215
		<b>热量传递篇符号表</b>	<b>216</b>

第三篇 质 量 传 递

第十一章 分子扩散与扩散系数 .....220

- 11-1 费克定律 .....220
- 11-2 气相扩散系数 .....223
- 11-3 液相扩散系数 .....227
- 11-4 固体中的扩散 .....229
  - 1. 遵从费克定律的固体中的扩散 .....230
  - 2. 多孔介质中的扩散 .....231

第十二章 双组分混合物中的扩散 .....235

- 12-1 基本概念 .....235
- 12-2 微分质量衡算 .....237
  - 1. 质量通量 .....237
  - 2. 摩尔通量 .....238
  - 3. 应用微分衡算式的某些问题 .....240
- 12-3 双组分混合物中的扩散 .....240
  - 1. 组分A通过静止组分B的扩散 .....240
  - 2. 等分子反方向扩散 .....244
- 12-4 多组分混合物中的扩散 .....246
- 12-5 热扩散 .....248
- 12-6 传质系数和主体流动之间的关系 .....249

第十三章 层流下的质量传递 .....252

- 13-1 平行于平板层流流动下的传质 .....252
  - 1. 层流下浓度边界层方程的解析解 .....253
  - 2. 层流下浓度边界层方程的近似解 .....257
- 13-2 圆管内层流流动下的传质 .....260

第十四章 湍流下的质量传递 .....265

- 14-1 平行于平板湍流流动下的传质 .....265
- 14-2 湍流扩散系数与混合长 .....267
- 14-3 动量传递与质量传递间的类似 .....268
- 14-4 溶质渗透理论(不稳态质量传递理论) .....271
- 14-5 界面湍动 .....275

第十五章 对流传质的若干设计方程 .....277

- 15-1 湿壁塔的传质系数 .....277
- 15-2 填料床中两相流的传质系数 .....280
- 15-3 球体与圆柱体对流体的传质 .....283
- 15-4 球内、滴内、泡内的传质 .....285

第十六章 同时进行热量、质量传递的过程 .....288

- 16-1 平板上的层流边界层 .....288
- 16-2 湍流状态下热、质同时传递的问题 .....291
- 16-3 非等温接触中的传质 .....294

质量传递篇符号表 .....299

主要参考文献 .....301

附录 .....303

- 附录A 柱坐标系及球坐标系中连续性方程的推导 .....303
- 附录B 柱坐标系及球坐标系中微分能量衡算方程的推导 .....306
- 附录C 高斯误差函数表 .....309
- 附录D 基于勒奈特-琼斯势函数的碰撞积分 $\Omega_{DAB}$ 值 .....310
- 附录E 勒奈特-琼斯势参数 .....310



# 第一篇 动 量 传 递

## 第一章 流体流动导论

进行过程研究时所提出的许多问题，可以通过考察该过程与外部的联系而得到解决。各种量在一定范围内的变化可借输入与输出流股的性质或凭与周围环境以热和功的形式进行的能量交换而加以确定。这些方法的基础都是建立在热力学系统的概念之上的。例如，所谓总能量衡算就是热力学第一定律的具体运用。

对于总质量衡算、总动量衡算也可以采用与总能量衡算类似的方法。

我们用“总”字来描述这些衡算，是因为我们着眼于范围的外部，而对于内部的详情并不进行分析。但是，在许多情况下，我们很希望研究范围内部发生的过程细节。为此，可以列出微元体积的类似衡算。对于那些已了解了流体某些特性的情况，例如已知牛顿型流体的粘度，则可以将微分衡算加以积分。用这种分析方法，可以得悉在过程范围内部发生的详情。例如，用微分分析可以确定速度分布，而在总衡算中所能考察的却仅仅是平均进、出口速度。

一般来说，总衡算能通过对微分衡算进行积分而得到；反过来，后者也能由缩小范围至微元体积而得到。为了明了和避免某些数学上的混杂，在本教材中对这两种类型的衡算将独立推导。首先由总衡算开始，这是因为它相对来说简单一些，而且由于它在解决许多问题中所起的作用与微分衡算不同。

虽然不对流体行为的细节作广泛研究，也可以进行总质量、总能量和总动量衡算，并在实际上加以应用。但是，如果对流体的性质和流动情况有一些基本概念将是有益的。

### 1-1 牛顿型流体的粘度

图1-1表示流体在两个无限大平行板之间作层流流动时的情况。如果上板相对于下板以恒速运动，则板间流体最终将达到稳定的速度分布。对于牛顿型流体，剪应力 $\tau$ （为了维持恒速所需要的单位板面积上的应力）是正比于 $\Delta u$ ，而反比于 $\Delta y$ 的：

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-1)$$

式中： $\tau$ ——剪应力；

$\Delta y$ ——两板之间的距离；

$\Delta u$ ——两板的速度差；

$\mu$ ——比例常数，称为粘度。

上式只适用于 $u$ 与 $y$ 成直线关系的情况，当 $u$ 与 $y$ 成曲线关系时，上式应写成：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

式中,  $\frac{du}{dy}$  称为速度梯度, 又称剪切速率。

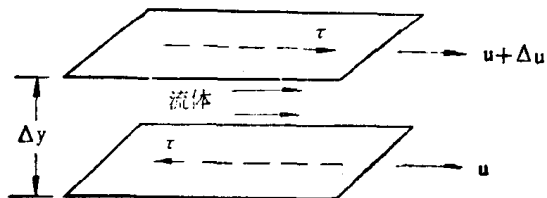


图 1-1 平行板间流体的切变图

正如其它许多基本物理量的关系一样,  $\mu$  的定义表达式是一个微分方程。

式 1-2 称为牛顿粘性定律, 凡是服从牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体。所有的气体和低分子量的大多数液体均属于牛顿型流体。

三种典型的牛顿型流体——空气、水、甘油的剪应力  $\tau$  与剪切速率  $du/dy$  之间的关系示于图 1-2 及图 1-3 中。这些图均是根据测定的数据标绘的, 因此, 可以反映上述三种流体的实际情况。甘油粘度最高, 水是中等粘度的流体, 空气是低粘度的流体。在  $1.013 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$  和 288K 下三者的粘度分别为:

	粘度 (N·s)/m <sup>2</sup>
甘油 .....	$2330 \times 10^{-3}$
水 .....	$1.1405 \times 10^{-3}$
空气 .....	$0.0182 \times 10^{-3}$

上述三种流体可以代表所有牛顿型流体的特性。图 1-2 为普通坐标, 由图可见, 它们的剪切速率  $du/dy$  与剪应力  $\tau$  的关系均各自为通过原点的直线。直线的斜率即为流体的粘度。图 1-3 为对数坐标,  $du/dy$  与  $\tau$  的关系亦为直线, 但对三种流体而言, 斜率均为 1, 在剪切速率  $du/dy=1$  时, 相应的  $\tau$  即等于粘度。

流体的粘度除以其密度  $\rho$ , 就得到运动粘度  $\nu$ ,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-3}$$

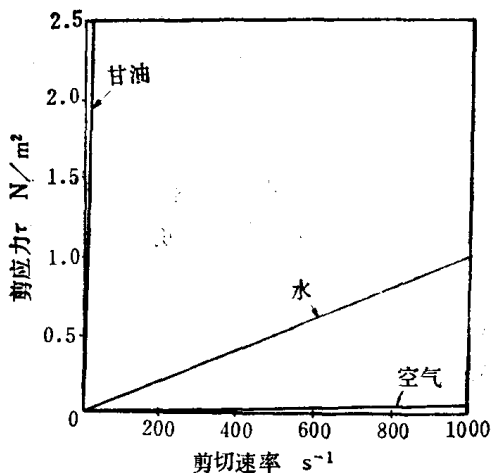


图 1-2 典型牛顿型流体的  $\tau$  与  $du/dy$  的关系图 (普通坐标)

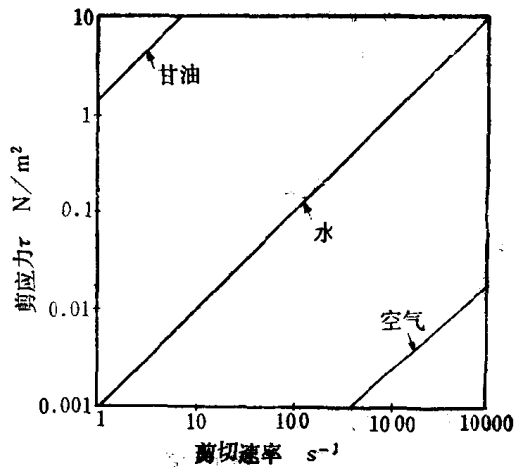


图 1-3 典型牛顿型流体的  $\tau$  与  $du/dy$  的关系图 (对数坐标)

牛顿型流体的粘度  $\mu$  可表示流体的性质, 它仅仅是流体状态 (压强、温度和组成) 的函数。如果流动是层流, 由于  $\tau$  是  $y$  的已知函数, 方程 1-2 能在  $\Delta y$  区间积分。采用这种方法, 可以得到层流流动的许多有用的结果。

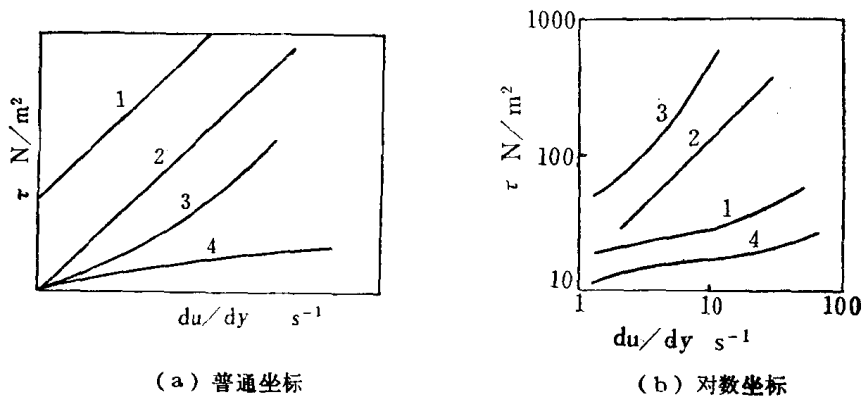
气体的粘度随温度升高而增加。液体的粘度随温度升高而降低, 而且大大地大于在同温

下同一物质处于蒸汽状态时的粘度。理想气体的粘度与压强无关，但实际气体和液体的粘度通常是随压强升高而增加的。一般气体、液体的粘度数据可由有关资料查出。

## 1-2 非牛顿型流体的类型

研究物质的流动和变形的科学称为流变学。流变学是研究非牛顿型流体行为的一门科学。

前已述及，对于牛顿型流体，剪应力  $\tau$  与速度梯度  $du/dy$  之间存在直线关系（许多作者将速度梯度称为剪切速率）。对于非牛顿型流体，这个关系一般不是直线关系。并且可以根据此种关系的特性将非牛顿型流体区分为：宾哈姆塑性流体 (Bingham-plastic fluids)；拟塑性或假塑性流体 (Pseudoplastic fluids) 以及胀塑性流体 (Dilatant fluids)。它们各自的剪应力  $\tau$  与速度梯度  $du/dy$  的关系曲线均示于图1-4中。



(a) 普通坐标

(b) 对数坐标

图 1-4 流体的切变行为图

1—塑性流体；2—牛顿型流体；3—胀塑性流体；4—拟塑性流体

上述这些非牛顿型流体的共同特点是，在恒定的速度梯度下，剪应力  $\tau$  与时间无关。

此外，还有一类与时间有关的非牛顿型流体，它们的特点是在恒定的剪切速率下，剪应力  $\tau$  是时间的函数。一般分为两类：其一是剪应力  $\tau$  随时间的增加而加大，另一类是剪应力  $\tau$  随时间的增加而减少。

下面，我们将只讨论剪应力  $\tau$  与时间无关的非牛顿型流体。

### 1. 宾哈姆塑性流体

此种流体与牛顿型流体不同之处是需要一个开始的剪应力  $\tau_0$ ，才能使其流动而产生剪切速率，如图 1-4 中的线 1 所示，此时：

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy} \quad \tau \geq \tau_0 \quad (1-4)$$

$\mu_p$  为常数，类似于牛顿型流体的粘度，称为表观粘度。对于牛顿型流体，剪应力与剪切速率的关系是一条通过原点的直线，而塑性流体则是通过  $\tau = \tau_0$  的一条直线。

此种流体是非牛顿型流体中最简单的一种。属于此种类型的液体有泥浆、污水和规则的、粒状固体的悬浮液。

### 2. 拟塑性或假塑性流体

大多数非牛顿型流体属于此种类型，其剪应力  $\tau$  与速度梯度  $du/dy$  的变化关系如图 1-4 中的线 4 所示。

对于这一类型流体的粘性定律，梅茨楠 (Metzner) 等人曾提出一个如下较简单的表

达式:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-5)$$

式中:  $n$  —— 流动行为指数或称流态特性指数;

$K$  —— 稠度系数。

式 1-5 亦可改写为:

$$\tau = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} = \frac{K}{\left| \frac{du}{dy} \right|^{1-n}} \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

令

$$\mu_a = \frac{K}{\left| \frac{du}{dy} \right|^{1-n}} \quad (1-7)$$

$\mu_a$  称为表观粘度。

表观粘度  $\mu_a$  是与剪切速率的  $(1-n)$  次方成反比例的。对于拟塑性流体,  $n < 1$ ,  $\mu_a$  随剪切速率的增加而减少。故图 1-4(a) 中的拟塑性流体的关系曲线 4 向下弯曲。

属于此种类型的液体有聚合物溶液、橡胶、醋酸纤维、油漆以及对称粒子的胶体或普通的悬浮液。

### 3. 涨塑性流体

对于此种类型的流体, 式 1-5 中的  $n > 1$ 。由式 1-7 知  $\mu_a$  随剪切速率的增加而增加。剪应力亦随剪切速率的增加而增加。故图 1-4(a) 中曲线 3 向上弯曲。

属于此种类型的流体有淀粉、硅酸钾以及阿拉伯树胶的悬浮液等。

因此, 流动行为指数  $n$  的大小可以表征流体非牛顿型的程度。当  $n > 1$  时, 称涨塑性, 当  $n < 1$  时称拟塑性, 而当  $n = 1$  时则称为牛顿型。

## 1-3 圆管中的层流流动

方程 1-2 所定义的剪应力或粘滞应力对流体流动问题的分析是很重要的, 它可用来分析在不变直径的水平圆管中不可压缩牛顿型流体的一维、稳定、层流的速度分布。

如图 1-5 所示, 取一液体的圆柱体单元做力的衡算。因为此单元流体不被加速, 则作用于其端部的压力正好与外界作用于圆柱体表面的流体阻力相平衡。即:

$$\pi r^2 \Delta p = -2\pi r L \tau \quad (1-8)$$

式中:  $r$  —— 圆柱体单元的半径;

$L$  —— 单元长度;

$\Delta p$  —— 作用于单元两端的压强差。

故由式 1-8 可得剪应力随半径而变的关系式如下:

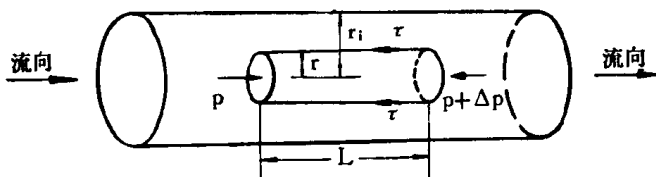


图 1-5 作用于圆管中流动流体单元上的力

$$\tau = \frac{-\Delta p}{2L} r \quad (1-9)$$

在壁面处, 方程 1-9 变为:

$$\tau_s = \frac{-\Delta p D}{4L} \quad (1-10)$$

式中的D为管子直径。

上式适用于层流和湍流流动，对于后者，采用时均压强和时均速度。

对于牛顿型流体的层流流动，有：

$$\tau = \mu \left( -\frac{du}{dr} \right) \quad (1-11)$$

此方程即为方程1-2的变形，式中的负号是由于  $du/dr$  为负值才加上的。

将式1-11代入式1-9，经整理和积分后可得：

$$\frac{-\Delta p}{2\mu L} \int_0^r r dr = - \int_{u_{\max}}^u du \quad (1-12)$$

积分后可得速度分布方程如下：

$$u = u_{\max} + \frac{\Delta p}{4\mu L} \cdot r^2 \quad (1-13)$$

由于在  $r=r_i$  处， $u=0$ （由于实际流体在壁面处，无滑脱），代入上式，得：

$$u_{\max} = \frac{-\Delta p r_i^2}{4\mu L} \quad (1-14)$$

将式1-14代入式1-13，得：

$$u = u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \quad (1-15)$$

上式表示，对于牛顿型流体的层流流动，沿  $r$  方向有一个抛物线形的速度变化，从管壁为零至管中心为最大。同时，也很容易推出平均速度与管中心速度之比为1/2。

由于流体在靠近管入口处可能被加速，所以方程1-15不适用于此区域。在管入口后足够远的地方，速度侧形为一恒定的形状，这种流动称为充分发展了的流动。在充分发展了的流动区域，方程式1-15才适用。

例1-1 导出稳定状态下，非牛顿型流体通过圆管层流流动时速度与半径的关系。

解：

$$\tau = K \left( -\frac{du}{dr} \right)^n \quad (1)$$

将式1代入式1-9得：

$$\frac{-\Delta p}{2KL} r = \left( -\frac{du}{dr} \right)^n \quad (2)$$

将上式两侧乘以  $\frac{1}{n}$  次方并求积分：

$$\left( \frac{-\Delta p}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^r r^{\frac{1}{n}} dr = \int_{u_{\max}}^u du \quad (3)$$

积分结果为：

$$u = \frac{n}{n+1} \left( \frac{-\Delta p}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} (r_i)^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_i} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (4)$$

因在  $r=r_i$  处， $u=0$ ，故得：

$$u = u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_i} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (5)$$

将此结果与方程1-15相比较,可知非牛顿型流体层流流动时的速度侧形与牛顿型流体有显著的差别。由于  $n$  值的不同,速度侧形就不相同。对于拟塑性流体,  $n < 1$ , 可得到较平坦的速度分布侧形。对于胀塑性流体,  $n > 1$ , 速度侧形则较陡,而对于  $n = \infty$  的极端情况,速度是半径的线性函数,此时,速度侧形是圆锥形的。

对于牛顿型流体而言,充分发展了的流动的速度侧形则视流动为湍流抑或层流而有所不同。

## 1-4 动量、质量及能量的通量表达式

### 1. 动量通量

分析一下式1-2,就可以看出剪应力的单位为  $\text{kg} \cdot (\text{m/s}) / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,也就是说,它相当于每秒通过单位面积的动量。因此,剪应力  $\tau$  可理解为动量的通量。此概念也可由力学的冲量定律导出。考察存在速度梯度  $du/dy$  的二相邻气体层,由于速度较快的气体层中的分子的不规则运动,会有一些分子进入速度较慢的气体层中,与较慢层的分子互相碰撞而使其加速。同样,较慢层的分子作用于较快层的分子,也会使较快层分子减速(这里慢与快是指分子层的速度,而不是指分子本身运动的速度,后者取决于温度)。这种分子的交换过程使得在速度梯度方向上产生动量传递。从宏观的表现看,较快层流体受到较慢层流体的向后拖曳力,而较慢层流体受到较快层流体的向前带动力,这就是二层界面上的剪切力。

在流体的层流流动中,动量的传递纯然是由于分子运动产生的。在湍流流动中,除分子传递外,还有由于涡流运动引起的流体质点(分子团)的传递,动量传递主要是由于质点的混合湍动过程引起的,此时,方程1-2可写成下述形式:

$$\tau = (\mu + e) \frac{du}{dy} \quad (1-16)$$

式中:  $\mu$ ——粘度,亦称为分子粘度;

$e$ ——涡流粘度。

在湍流运动中,涡流粘度值大大地大于分子粘度值,但它不是流体性质的函数,而是流体湍动程度的函数。湍流运动在第六章中还要详细讨论。

下面,再进一步讨论方程1-2。对于不可压缩流体,它可以写成下列形式:

$$\tau = -\nu \frac{d(\rho u)}{dy} \quad (1-17)$$

式中,  $\nu$  的单位是:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \left( \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right) \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

可称为动量扩散系数。

$d(\rho u)/dy$  中的  $\rho u$  为单位体积流体的动量  $\text{kg} \cdot (\text{m/s}) / \text{m}^3$ , 故  $d(\rho u)/dy$  为单位体积流体的动量在  $y$  方向上的梯度,或者说在  $y$  方向上的动量浓度梯度  $\text{kg} \cdot (\text{m/s}) / \text{m}^3 \cdot \text{m}$ 。

因此,方程1-17可表示:动量的通量(确切地说,应该是  $x$  方向上的动量在  $y$  方向上的通量,  $x$  为流体流动方向)等于动量的扩散系数  $\nu$  乘以在  $y$  方向上的动量浓度梯度,即:

$$-\left[\frac{\text{kg}\cdot(\text{m}/\text{s})}{\text{s}\cdot\text{m}^2}\right] = -\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]\left[\frac{\text{kg}\cdot(\text{m}/\text{s})}{\text{m}\cdot\text{m}^3}\right]$$

式中负号说明动量通量的方向和速度的负梯度（速度降度）的方向一致，即动量是朝着动量浓度降低的方向传递的。

通常，将通量等于扩散系数乘以浓度梯度的方程称为现象方程（Phenomenological equation），它代表一种关联所观察现象的经验方法。对于质量、能量、电量以及其他的通量也可写出类似的方程。

## 2. 质量通量

对于质量传递，方程可写成：

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-18)$$

上式适用于A和B的双组分混合物。 $j_A$ 是A的质量通量， $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ； $D_{AB}$ 是A在双组分混合物中的扩散系数， $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ； $\rho_A$ 是A的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。组分A系沿浓度梯度下降的方向而运动。

上式表明A组分的质量通量与该组分的浓度梯度成正比。

## 3. 能量通量

热量传递的方程可写为：

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dt}{dy} \quad (1-19)$$

式中： $k$ ——导热系数， $\frac{\text{W}}{(\text{m}\cdot\text{K})}$  或  $\frac{\text{J}}{(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})}$ ，

$t$ ——温度，K；

$q/A$ ——单位时间通过单位面积传递的热量  $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

对于具有恒定密度和比热的流体，式1-19可写成：

$$\frac{q}{A} = -\frac{k}{C_p\rho} \cdot \frac{d(C_p\rho t)}{dy} = -a \frac{d(C_p\rho t)}{dy} \quad (1-20)$$

式中， $a$ 称为热扩散系数，其单位为：

$$\begin{aligned} [a] &= \left[\frac{k}{C_p\rho}\right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s}}\right] \left[\frac{\text{kg}\cdot\text{K}}{\text{J}}\right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right] \\ &= \text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$(C_p\rho t)$ 表示单位体积内流体的能量，单位为：

$$\begin{aligned} [C_p\rho t] &= \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] (\text{K}) \\ &= [\text{J}/\text{m}^3] \end{aligned}$$

式1-20表明，能量通量  $q/A$  ( $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ) 与能量的浓度梯度 ( $\text{J}/\text{m}^3/\text{m}$ ) 成正比。能量是从高能量（温度）区向低能量区传递的。

通过以上讨论，可知关于动量通量、质量通量和能量通量诸方程的主要相似之处，在于动量、质量和热量的传递速率均与这些量的浓度梯度成正比。比例常数  $\nu$ 、 $D_{AB}$  和  $a$  的单位均为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。速度差是动量传递的推动力，浓度差是质量传递的推动力，而温度差则是热

量传递的推动力。

另外，与动量传递相同，质量和热量传递也可单独依靠分子扩散或依靠分子扩散和涡流扩散相结合的方式进行，而涡流传递的效果远较分子扩散为大。

在第二章中，将可看到在总的质量、能量与动量的衡算中彼此有许多相似之处。在第三章中，将研究质量、能量和动量的微分衡算。应用这些方程于通量，同时定义不同的扩散系数，将可进一步找出三种传递现象之间的类似性。本章仅初步讨论粘度和动量传递。至于导热系数和分子扩散系数的问题将在本书热量传递和质量传递章节中加以讨论。

## 习 题

### 1-1 单位换算

1. 试根据粘度的基本定义从下列单位制度的基本单位导出粘度的单位。  
质量英制（英制系统）；  
英制工程单位制；  
SI制；  
米制工程单位制。
2. 利用换算系数  $g_c$ ，将粘度由SI制换算成为米制工程单位制，由英制换算成为英制工程单位制。

$$\begin{aligned} g_c &= 9.81(\text{kg}\cdot\text{m})/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2) \\ &= 32.17(\text{lb}\cdot\text{ft})/(\text{lbf}\cdot\text{s}^2) \end{aligned}$$

- 1-2 水在68°F温度下流过内径为1/2in、长度为10ft的管道，中心速度为3in/s，问压强降为多少N/m<sup>2</sup>？
- 1-3 在一内径为2cm的管道，测得距管壁5mm处水的流速为10cm/s。水在283K温度下层流流过管道。问每米管长的压强降多少N/m<sup>2</sup>/m？
- 1-4 水在303K的温度下强制通过内径为3mm的毛细管，管中心处流体的流速为1cm/s，试计算管壁处的剪应力N/m<sup>2</sup>。



## 第二章 总衡算方程

在化工计算中，经常要进行全系统或系统中某一部分在过程前后的总质量、总能量和总动量衡算。为了知道物料在过程前后的变化情况，要做总质量计算。为了了解过程中热量和其它能量之间的转化关系，要进行总能量衡算。为了对流动过程中所包含的力进行分析，要做总动量衡算。总质量、总能量和总动量衡算是研究动量传递、热量传递、质量传递和单元操作的基础；对于下一章推导微分质量衡算、微分能量衡算和微分动量衡算方程亦有指导意义，因为微分衡算与总衡算所依据的相应物理定律相同。

在本章中要推导通用的总质量衡算方程、总能量衡算方程和总动量衡算方程，并阐明这些总衡算方程在化工实际问题中的应用。

### 2-1 总质量衡算方程

总质量衡算是质量守恒定律在流动系统中的应用。在化工原理课程中，已讨论过总质量衡算，但它主要是论述稳态和无化学反应情况下的质量衡算方法。在本节中要进一步讨论非稳态、多组分和有化学反应的质量衡算方法，并推导出一般情况下的通用总质量衡算方程。

在进行总衡算之前，首先要规定衡算范围，在流动过程中，通常把进行总衡算时所限定的空间区域称为“控制体” (control volume)，把包围此空间区域的边界面称为“控制面” (control surface)。例如，总衡算范围是流体中的一个立方体，则控制体就是此立方体的体积，控制面就是包围此立方体的上下左右前后六个平面。控制体和控制面的定义在总质量、总能量和总动量衡算中均适用。

在讨论总质量衡算时，先考虑控制体为简单几何形状的情况，然后再导出一般情况下的通用总质量衡算方程。

#### 1. 简单几何体的质量衡算

以简单几何体作质量衡算时，又可分为单组分系统或虽包含多个组分但不存在任一组分的浓度差的系统、多组分系统及有化学反应的系统。

下面分别加以论述。

##### (1) 单组分的质量衡算

图 2-1 所示为一储槽或容器，流入容器的质量流率（单位时间流入的质量）为  $w_1$ ，从容器流出的质量流率为  $w_2$ ，设  $M$  代表某瞬间容器内的质量， $\theta$  代表时间。根据质量守恒定律，流入容器的质量流率应该等于由容器流出的质量流率加上累积的质量流率，即：

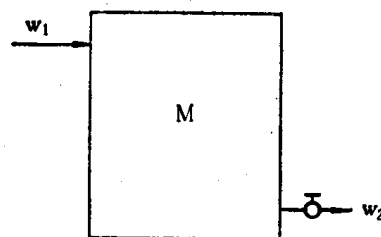


图 2-1 简单控制体的质量衡算

质量输入流率 = 质量输出流率 + 质量累积流率

$$w_1 = w_2 + \frac{dM}{d\theta}$$

或：