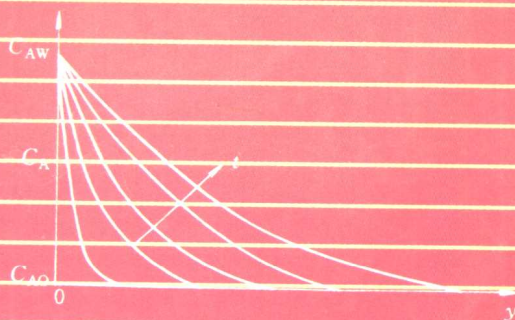
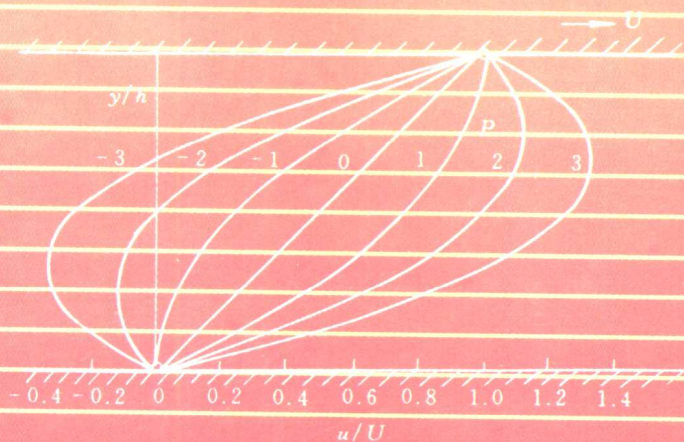
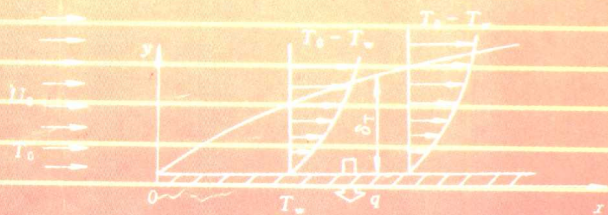




高等学校教材

# 传递 现象 导论

戴干策 任德呈 范自晖 编



化学工业出版社

高等学校教材

# 传递现象导论

戴干策 任德呈 范自曝 编

化学工业出版社  
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

传递现象导论/戴干策等编. -北京: 化学工业出版社,  
1996. 3  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-1591-7

I. 传… I: 戴… II. ①化工过程-动量-传递-高等  
学校-教材②化工过程-传热-高等学校-教材③化工过程-传  
质-高等学校-教材 N. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 00813 号

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市朝阳区惠新里 3 号)

社长: 傅培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所  
印 刷: 北京市通县京华印刷厂  
装 订: 北京市通县京华印刷厂  
版 次: 1996 年 3 月第 1 版  
印 次: 1996 年 3 月第 1 次印刷  
开 本: 787×1092  $1/16$   
印 张: 12  
字 数: 296 千字  
印 数: 1—5000  
定 价: 14.30 元

## 前 言

“传递现象”在60年代初问世，作为课程起先仅为化工类学生开设，随后象热力学、电子学等课程一样，被机械、环境、电力及冶金等专业所接受，而成为工科院校的公共课程。为适应不同专业，不同层次教学的需要，国内外有多种“传递过程原理”或“传递现象”教材出版。

“传递现象”在被广泛接受的同时，又颇感教学内容难以处理，即数学推导繁杂，工程应用实例不足，因而时受非难，为解决上述问题，人们开始了新的探索。有的将传递原理与化工原理合并；有的在加强数学教学的基础上，扩充传递课的内容，将两相过程和一些化工设备的操作原理并入。这些新的尝试，解决了某些方面的问题，但也带来了新的困扰，如篇幅过大，一门课的教学时间拖长，甚至难以组织教学等。

传递过程理论和实践的发展，特别是其应用领域（包括高新技术领域）的不断扩大，以及它在培养现代工程技术人才中的重要作用，愈益为人们所认识。使得进一步改革这门课程教学的愿望更为迫切。在这种背景下，经化工部化学工程专业教学指导委员会多次酝酿讨论，形成了一种新的方案：将传递现象课程作为物理、数学课程的延伸，置于化工原理课程之前开设。这一方案的好处是：紧接在数学、物理课之后，学生的数理基础较好，“遗忘”较少，为传递课的教学提供了较好的外部条件；同时，将传递课作为物理类型的课程进行教学，有利于学生学会现象分析，掌握基本原理，避开冗长而繁复的数学推演，使教学过程较为“简洁”，也便于学生巩固已学的数理知识。突出传递现象的基本理论，不强求与单元操作和设备结合，仅力图为化工原理的学习打下良好基础。为了进行这种教学试点需要相应的教材，这就是我们编写“传递现象导论”的来由。

本书共五章，主要内容是前四章。第一章介绍基本概念和研究传递现象所依据的基本原理和方法，二、三、四章主要以一维流动为基础，分别论述动量、热量、质量传递的基本原理和必要的计算以及若干应用实例，理解这些实例一般不需要很深的工程专业知识，可在一般科学知识的基础上探讨。为使学生不至于“以偏盖全”，第五章则进一步以三维现象为基础，简要地介绍传递现象的一般化普遍方程的建立及其解析求解的数学方法。全书共约20万字，可在30学时教完。

本书对华东理工大学二年级学生进行过3届教学实践，效果良好。但毕竟时间较短还需继续探索和完善。我们也热忱希望有更多的院校进行这类尝试，共同努力，把我国“传递过程原理”课程的教学提高到一个新的水平。

鉴于本书对传统的传递现象课程和教材作了较大幅度的变革，难免有失偏颇，加之作者水平和能力有限，对书中存在的缺点，敬请同志们、朋友们批评指正。

本书承蒙陈敏恒教授审阅全稿，作者对他的帮助表示衷心感谢。

编 者

1995年3月

## 主要符号

$A$	面积, 截面积, 热功当量	$U_0$	来流速度, 远处速度
$B$	宽度	$V$	气体体积, 体积流率
$C$	混合物摩尔浓度	$V_p$	固体颗粒表观孔体积
$C_D$	阻力系数	$W$	质量流率
$C_i$	组分 $i$ 摩尔浓度	$a$	质量分数, 导温系数, 热扩散系数
$C_0$	黑体辐射系数	$b$	尾流宽度, 间距
$C_p$	定压热容	$d$	分子直径, 毛细管直径, 桨叶直径, 液滴、气泡、球直径
$D$	直径、总阻力	$d_n$	喷嘴直径
$D_{AB}$	双组分混合物阻力系数	$d_p$	颗粒直径
$D_{AK}$	纽特逊扩散系数	$f$	范宁摩擦系数
$D_{AB,e}$	双组分混合物有效扩散系数	$h$	板间距
$D_e$	当量直径	$h_l$	能量损耗
$D_{eff}$	泰勒分散系数	$h_s$	粗糙峰高度
$D_F$	摩擦阻力	$i$	相界面
$D_p$	压差阻力	$j$	质量扩散通量
$E$	能量	$j_H, j_D$	传热、传质 $j$ 因子
$F$	力	$k$	传质系数
$G$	质量流速	$k_c$	基于摩尔浓度差 $\Delta C$ 的传质系数
$H$	距离	$k^0$	无净流动下传质系数
$I$	相对湍流强度	$k_{cm}$	平均传质系数
$J$	摩尔扩散通量	$k_x, k_y$	液相、气相传质系数
$K$	传热系数	$k$	有限传质速率下的传质系数
$K_{ox}$	液相传质总系数	$k''$	反应速率常数
$K_{oy}$	气相传质总系数	$l$	混合长, 距离
$L$	湍流尺度, 长度	$\bar{l}$	分子平均自由程
$M$	分子量, 力矩	$m$	质量, 稠度系数, 分配系数
$N$	转速, 相对于静止坐标的总摩尔通量	$n$	相对于静止坐标的总质量通量, 摩尔数, 分子数, 流动行为指数, 无因次变量
$N_i$	相对于静止坐标的组分 $i$ 摩尔通量	$p_i$	组分 $i$ 分压
$N_p$	功率准数	$q$	热流强度, 热量通量
$P$	压力, 功率消耗	$q$	内热源生成热速率
$Q$	传热速率	$r$	半径, 孔半径
$R$	气体通用常数, 半径, 热阻, 相关系数, 曲率半径	$r_p$	颗粒半径
$R$	质量生成速率	$S$	表面积, 多孔介质表面积
$T$	温度	$t$	时间
$T^+$	无因次温度	$u$	速度, 质量平均速度
$T_0$	来流速度		
$U$	截面平均速度		

$u_i$	组分 $i$ 绝对速度	$\delta_0$	粘性底层厚度
$u_{iD}$	扩散速度	$\delta_T, \delta_c$	传热、传质边界层厚度
$u_M$	摩尔平均速度	$\delta_i$	扩散内层厚度
$u_0$	球运动速度, 气泡速度	$\epsilon$	空隙率, 拉伸应力
$u^+$	无因次摩擦速度	$\epsilon_D, \epsilon_H, \epsilon_M$	涡流质量扩散系数, 涡流热量扩散系数、 涡流动量扩散系数
$u_s$	摩擦速度	$\epsilon_n$	黑度
$\bar{u}$	分子平均速度	$\eta$	表观粘度
$w$	功, 质量分数	$\theta$	角度, 温度
$x$	液相摩尔分数, 距离	$\mu$	动力粘度
$x_{B,lm}$	惰性组分 $B$ 对数平均摩尔分数	$\mu_e$	涡流粘度
$x_A^*$	与 $y$ 相成平衡的组分 $A$ 在 $x$ 相摩尔分数	$\nu$	运动粘度
$y$	气相摩尔分数	$\xi$	局部阻力系数
$y_A^*$	与 $A$ 相成平衡的组分 $A$ 在 $y$ 相摩尔分数	$\rho$	密度
$y^+$	无因次摩擦距离	$\rho_0$	固体堆积密度
$Z$	位头, 距离	$\sigma$	拉伸应力, 液体表面张力系数
$\Delta$	径向射流高度	$\sigma_0$	斯蒂芬-波尔兹曼常数
$\Theta$	无因次温度	$\tau$	剪切应力, 动量通量, 曲折因素
$\alpha$	对流给热系数 (传热膜系数)	$\tau_0$	屈服应力
$\beta$	体积膨胀系数, 流动参数	$\varphi_s$	角系数
$\gamma$	剪切变形, 汽化潜热	$\omega$	角速度, 频率
$\dot{\gamma}$	剪切变形速率	$\lambda$	导热系数, 摩擦阻力系数
$\delta$	边界层厚度, 间壁厚度, 液膜厚度		

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	(1)
1-1 平衡过程和速率过程 .....	(1)
1-2 速率过程的基本变量和基本概念 .....	(1)
1. 速度与速度分布 .....	(1)
2. 压力与剪切应力 .....	(2)
3. 剪切速率与拉伸速率 .....	(3)
4. 温度与温度分布 .....	(4)
5. 浓度与浓度分布 .....	(4)
6. 通量 .....	(5)
7. 传递过程分类 .....	(5)
8. 流动问题描述方法 .....	(7)
1-3 分子传递现象 .....	(7)
一、动量传递 .....	(8)
1. 牛顿粘性定律 .....	(8)
2. 粘性系数 .....	(9)
3. 非牛顿流体粘性定律 .....	(11)
二、热量传递 .....	(12)
1. 傅立叶定律 .....	(12)
2. 导热系数 .....	(13)
三、质量传递 .....	(13)
1. 格雷姆扩散试验 .....	(14)
2. 费克定律 .....	(14)
3. 扩散系数 .....	(15)
四、类似现象 .....	(15)
1-4 守恒原理 .....	(17)
一、控制体和控制面 .....	(17)
二、质量守恒 .....	(18)
三、能量守恒 .....	(18)
四、动量守恒 .....	(22)
1-5 因次分析法 .....	(25)
一、无因次化的意义 .....	(25)
二、基本因次、导出因次与无因次数 .....	(25)
三、无因次化方法—— $\pi$ 定理 .....	(26)
四、无因次数的物理意义 .....	(28)
<b>第二章 动量传递</b> .....	(30)

2-1 流动状态：层流与湍流 .....	(30)
一、雷诺试验 .....	(31)
二、流动状态的判别：雷诺数 .....	(32)
2-2 层流动量传递 .....	(33)
一、平行平板间的流体流动——库特流 .....	(34)
二、圆管内的流体流动 .....	(36)
1. 牛顿流体的管内层流流动 .....	(37)
2. 非牛顿流体流动特征 .....	(39)
三、旋转流动 .....	(41)
四、振荡流动 .....	(43)
2-3 动量传递的基本理论 .....	(44)
一、边界层理论 .....	(44)
1. 边界层流动的特点 .....	(45)
2. 边界层流动的计算 .....	(47)
3. 绕柱体的流动边界层分离 .....	(53)
二、湍流理论 .....	(54)
1. 湍流测试技术 .....	(55)
2. 湍流时均运动与湍流脉动的统计性质 .....	(55)
3. 湍流唯象理论——混合长 .....	(58)
4. 壁面湍流 .....	(60)
5. 自由湍流——射流与尾流 .....	(63)
2-4 动量传递原理的应用 .....	(64)
一、流动阻力 .....	(64)
1. 阻力产生的机理 .....	(64)
2. 低雷诺数下绕球流动阻力 .....	(65)
3. 阻力系数 .....	(66)
4. 管流阻力 .....	(69)
5. 减阻 .....	(72)
二、流体均布 .....	(72)
三、流体混合 .....	(74)
<b>第三章 热量传递 .....</b>	<b>(76)</b>
3-1 传热机理 .....	(76)
一、热对流 .....	(76)
1. 牛顿冷却定律 .....	(76)
2. 影响对流换热的因素 .....	(77)
二、热辐射 .....	(78)
三、热传导 .....	(79)
1. 定常导热 .....	(79)
2. 非定常导热 .....	(84)
3-2 层流热量传递 .....	(88)



一、平行平板间层流流动换热 .....	(88)
二、管内层流流动换热 .....	(89)
三、自然对流 .....	(92)
3-3 对流换热的基本理论 .....	(93)
一、传热边界层 .....	(93)
1. 传热边界层的形成 .....	(93)
2. 传热边界层的厚度 .....	(94)
3. 圆管进口段内传热边界层的发展 .....	(95)
4. 传热边界层能量积分方程 .....	(97)
5. 流体绕圆柱和圆球流动时的换热 .....	(100)
6. 热流方向对换热的影响 .....	(100)
二、湍流换热 .....	(102)
1. 壁面附近湍流换热机理 .....	(102)
2. 涡流附加能量和湍流普朗特数 .....	(102)
3. 湍流通用温度分布 .....	(103)
4. 热量传递与动量传递的类比 .....	(104)
三、含相变化的对流换热 .....	(105)
1. 层流膜状冷凝 .....	(105)
2. 湍流膜状冷凝 .....	(108)
3-4 热量传递原理的应用 .....	(109)
一、复合传热及其强化 .....	(109)
1. 工程传热的简化处理——热阻 .....	(110)
2. 传热系数 .....	(110)
3. 强化途径 .....	(110)
二、撞击射流换热 .....	(113)
1. 撞击射流基本特征 .....	(113)
2. 换热特征 .....	(113)
3. 换热计算 .....	(114)
三、热管技术 .....	(114)
1. 结构与原理 .....	(114)
2. 影响因素 .....	(115)
3. 特性与应用 .....	(116)
<b>第四章 质量传递</b> .....	(117)
4-1 传质机理 .....	(117)
一、分子扩散 .....	(117)
1. 非定常分子扩散 .....	(117)
2. 运动流体中的分子扩散 .....	(120)
3. 固相中扩散 .....	(123)
二、对流扩散 .....	(125)
1. 层流扩散 .....	(125)

2. 湍流扩散	(125)
3. 对流传递的简化处理——传质系数	(126)
4-2 层流质量传递	(128)
一、液膜中的扩散	(129)
二、圆管内的传质	(130)
三、泰勒分散	(133)
4-3 对流传质基本理论	(137)
一、传质边界层	(137)
1. 壁面传质边界层的形成与发展	(137)
2. 传质边界层的近似计算	(138)
3. 边界附近流场与浓度场关系的进一步分析	(141)
二、湍流传质	(143)
1. 涡流扩散系数	(143)
2. 湍流中扩散物质的分布	(144)
3. 壁面附近湍流传质模型	(145)
4. 质量、热量、动量传递的类比	(146)
三、相际传质	(148)
1. 界面浓度与传递推动力	(150)
2. 双膜论	(150)
4-4 质量传递原理的应用	(151)
一、混合物分离与传质	(151)
1. 海水淡化	(151)
2. 尾气净化	(152)
二、传热与传质	(153)
1. 蒸发冷却	(153)
2. 液滴在气流中的蒸发	(154)
<b>第五章 传递现象的基本方程及应用</b>	(157)
5-1 传递现象基本方程	(157)
一、动量传递微分方程组	(157)
1. 连续性方程	(157)
2. 粘性流体运动方程	(158)
二、热量传递微分方程 (能量方程)	(160)
三、质量传递微分方程 (扩散方程)	(161)
5-2 定解条件	(162)
一、初始条件和边界条件	(162)
二、相界面上的边界条件	(162)
5-3 传递微分方程解法	(163)
一、变量置换法	(163)
二、分离变量法	(165)
三、拉普拉斯变换法	(167)

四、积分变换法.....	(168)
5-4 典型传递问题的简化处理 .....	(168)
一、低雷诺数下的绕流——爬流近似.....	(168)
1. 流动特征.....	(168)
2. 传质特征.....	(171)
二、高雷诺数下的绕流——边界层近似.....	(172)
1. 沿平壁边界层流动特征.....	(172)
2. 平壁边界层中的传热与传质.....	(174)
<b>附录</b> .....	(177)
附录一 压力单位换算表.....	(177)
附录二 常用物质的导热系数.....	(177)
一、常见固体的导热系数.....	(177)
二、液体的导热系数.....	(178)
三、几种气体的导热系数.....	(178)
附录三 常见物系扩散系数.....	(179)
一、某些物系在大气压强下的气相扩散系数.....	(179)
二、稀溶液中扩散系数的实验值.....	(180)
三、固体中的扩散系数.....	(180)
附录四 误差函数 <sup>①</sup> .....	(181)
附录五 拉普拉斯变换表.....	(181)

# 第一章 概 论

动量、热量和质量的传递，普遍存在于自然界和工程领域。这三种传递现象类似，有许多共同的规律，这些规律可以在统一的基础上阐述，亦可分别讨论，本书采取统一和分论结合的方式。在本章则着重共性，先介绍某些必需的基本概念，然后分别讨论分子传递以及研究传递现象所依据的守恒原理，最后介绍一种建立经验方程并藉助实验解决问题的因次分析方法。

## 1-1 平衡过程和速率过程

在大量的物理、化学现象中，同时存在着正反两个方向的变化，如固体的溶解和析出、升华与凝华、可逆化学反应等。当过程变化达到极限，就构成平衡状态，如化学平衡、相平衡等。这时，正反两个方向上变化的速率相等，净速率为零。不平衡时，两个方向上的速率不等，描述过程的一个或几个变量将随时间变化。物系偏离平衡状态，就会发生某种物理量的转移，使物系趋于平衡。

热力学探讨平衡过程的规律，考察给定条件下过程能否自动进行？进行到什么程度？条件变化对过程有何影响等。

动力学探讨速率过程的规律。化学动力学研究化学变化的速率及浓度、温度、催化剂等因素对化学反应速率的影响；传递动力学研究物理变化的速率及有关影响因素。

在物理学上，物体质量与速度的乘积被定义为动量。速度可认为是单位质量物体所具有的动量。因此，同一物质，速率不同，所具动量也就不同。若处于不同速度流体层的分子或微团相互交换位置时，则将发生由高速流体层向低速流体层的动量传递；当物系中各部分之间的温度存在差异时，则发生由高温区向低温区的热量传递；若介质中的物质存在化学势差异时，则发生由高化学势区域向低化学势区域的质量传递过程，化学势的差异可以由浓度、温度、压力或电场力所产生，而最为常见的是由于浓度差而导致的质量传递过程，此时，混合物中某个组分将由其浓度高处向低处扩散传递。传递过程的速率正比于推动力，反比于阻力，即

$$\text{速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻 力}} \quad (1.1-1)$$

本书主要讨论上述动量、热量、质量传递过程的速率。化学反应仅在建立普遍方程或少量例子中涉及。

## 1-2 速率过程的基本变量和基本概念

表征传递过程的变量主要是速度——动量，温度——热量，浓度——质量。影响传递过程的速率将涉及设备几何结构，物质特性，操作条件等一系列因素。为了以后讨论方便，下面对有关的物理量和概念略作简单复习或介绍。

### 1. 速度与速度分布

许多传递过程是在流体流动情况下进行的，与流体的量有关。单位时间内流体通过的量

称流率，以体积计量称体积流率，用  $V$  表示，单位为  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ；以质量计量为质量流率，用  $W$  表示，单位为  $[\text{kg}/\text{s}]$ 。两者关系为：

$$W = \rho V \quad (1.2-1)$$

式中  $\rho$ ——流体密度，为单位体积流体具有的质量  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。

由于气体体积随温度、压力变化，因此，对于气体的体积流率，必须指明其所处的温度 ( $T$ ) 和压力 ( $P$ )；质量流率则不随  $T$ 、 $P$  变化。

流动速度是单位时间内流体流动的距离。江河中的水流，中央快，近岸处慢。与此类似，流体在管道和设备中流动时，同一流动截面上各点的流速（称点速度  $u$ ）通常也不相等，且按一定规律变化，即存在着某种速度分布  $u(r)$ 。

工程上为了简化计算，通常假定流体沿截面作均匀流动。并按照体积流率相等的原则，定义通过流动截面的平均速度为

$$U = \frac{\int_A u dA}{A} = \frac{V}{A} \quad (1.2-2)$$

式中  $A$ ——流体通道截面积  $[\text{m}^2]$ 。

单位时间内流体通过单位流动截面的质量称质量流速，以  $G$  表示，单位为  $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$ ，因此有

$$G = \rho U \quad (1.2-3)$$

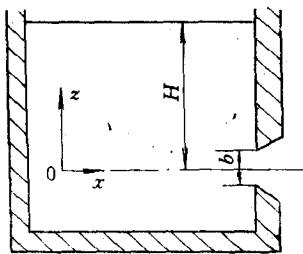
$$W = \rho U A = GA \quad (1.2-4)$$

需要指出的是，应用上述这种假想的即流体以平均速度沿截面作均匀流动代替沿截面具有速度分布的实际流动，当进行某些工程运算时，如动量、动能等将会产生偏差，其大小与假想的均匀分布偏离实际分布的程度有关，若偏差较大则应进行修正。

了解速度分布是研究热量传递、质量传递以及工程上为提高过程效率、促使设备内流动流体分布均匀的基础。依据速度分布计算速度梯度又是解析计算某些工程物理量如流动阻力等的主要途径。因此，速度分布将是以后所需讨论的一个重要内容。

#### [例 1-1] 容器小孔流出

流体自容器下方小孔流出，形成射流，如例 1-1 附图所示。已知孔口流速为  $U = \sqrt{2g(H-Z)}$ ，试确定流体通过单位宽度 ( $y$  向) 孔口截面的体积流率及平均流速。



例 1-1 附图

[解] 由式 1.2-2，体积流率

$$\begin{aligned} V &= \int_A u dA = \int_{-b}^b \sqrt{2g} \sqrt{H-Z} dZ \cdot 1 \\ &= -\frac{2}{3} \sqrt{2g} [(H-Z)^{3/2}] \Big|_{-b}^{+b} \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{2g} [(H+b)^{3/2} - (H-b)^{3/2}] \\ &= \frac{2}{3} H \sqrt{2gH} \left[ \left(1 + \frac{b}{H}\right)^{3/2} - \left(1 - \frac{b}{H}\right)^{3/2} \right] \end{aligned}$$

孔口平均流速为

$$U = \frac{V}{2b \cdot 1} = \frac{H}{3b} \sqrt{2gH} \left[ \left(1 + \frac{b}{H}\right)^{3/2} - \left(1 - \frac{b}{H}\right)^{3/2} \right]$$

## 2. 压力与剪切应力

工程上的压力概念通常指物理学中的压强，为垂直作用于单位面积的力，是一种法向应

力。静止流体内，任意点处都存在压力，称为静压力。其大小与距离表面的深度有关，而与容器的形状以及该点的方向无关。在同种静止流体内部，同一水平高度的静压力相等，距离流体自由表面  $h$  处的压力为

$$P = P_0 + \rho gh \quad (1.2-5)$$

上式即为流体静力学的平衡定律。式中  $P_0$  为作用于流体自由表面的压力。

应用流体机械、风机或泵可对流体施加压力，在压力差的推动下，流体发生运动。运动着的流体内部，到处存在着静压力，当在管壁开孔并安装玻璃细管，管内流动流体将会在玻璃管内上升一定高度，表现出一定的静压力，如图 1.2-1 所示，这也是测量流体压力的基本原理。通过测量等截面水平管道两点间的压力降则可了解流体流动过程中的能量损耗即阻力损失。压力随距离的变化率称为压力梯度，它决定了压力场对流体运动所产生的效应。此外，许多计量流体流率的装置亦需通过测量压力进行确定。因此，压力是一个重要的工程参数。

压力的法定单位为帕 [斯卡]，符号为 Pa [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]，过去常用的压力单位为 [大气压]、[mmHg 柱]、[mmH<sub>2</sub>O 柱] 等，其相互间的换算关系见附录一。

根据表达流体压力所选择的基准不同，有绝对压力与表压之分。绝对压力以绝对真空为基准，指的是设备内流体的真实压力（物理学定律中表达的压力）；表压以大气压力为基准，指的是绝对压力与大气压力的差值（工业用压力计上的读数）。当真实压力低于大气压即出现负压时，两者差值通常被称为真空度（=大气压 - 绝对压）。

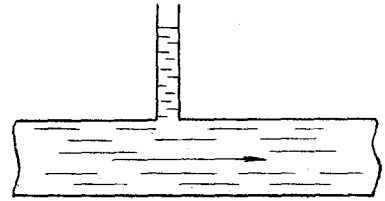


图 1.2-1 流动液体存在静压力的示意图

上述压力是垂直作用于流体质点表面的法向应力，流体在流动过程中，质点表面还将受到剪切应力即作用于单位面积的切向力，通常以  $\tau$  表达，与流体抵抗流动变形有关，是产生流体流动阻力的重要原因。与压力不同，它具有各个方向的分量。图 1.2-2 所示为中间夹有胶的两块平行平板，胶与平板的接触面积为  $A$ ，下板固定，若上板侧面受力为  $F$  时，胶面则受有剪切应力  $\tau_{yx} = \frac{F}{A}$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]，下标  $y$  表示受力面垂直于  $y$  轴， $x$  表示受力方向。

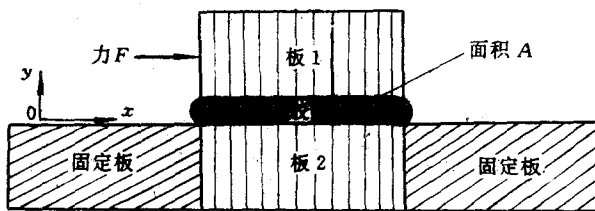


图 1.2-2 剪切应力

力和拉伸力的作用下分别发生剪切变形和拉伸变形，如图 1.2-3 所示。

为描述变形，定义如下物理量

剪切变形

$$\gamma = \frac{\text{剪切位移量 } S}{\text{剪切面之间的距离 } H} = \text{tg}\theta$$

剪切变形速率

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (1.2-6)$$

拉伸应力  $\sigma = F/A$

### 3. 剪切速率与拉伸速率

流体受力运动，微团会变形。在剪切

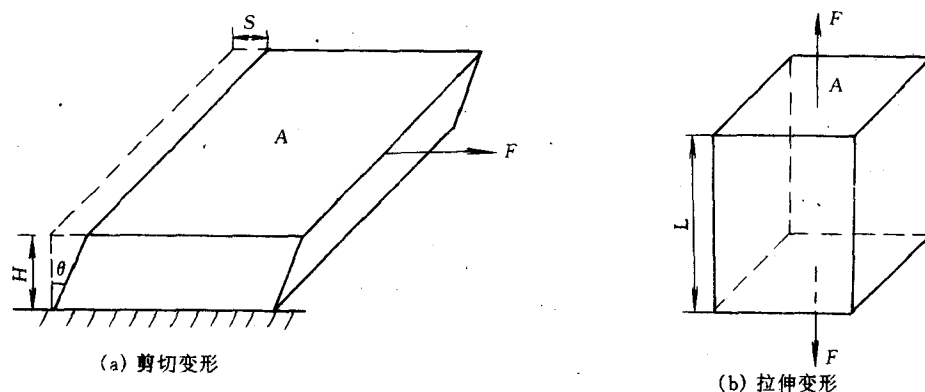


图 1.2-3 剪切变形与拉伸变形

拉伸变形或伸长率

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} \approx \frac{L - L_0}{L_0}$$

拉伸变形速率

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

式中  $L_0$  为流体试样的初始长度,  $t$  为时间,  $L$  为试样在  $t$  时刻经拉伸后的长度。

固体抵抗变形的力取决于变形量; 而流体抵抗变形的力, 则取决于变形速率。产生一定剪切变形速率所需要的剪切应力表现为流体运动的粘性阻力。

对于一般流体, 很少考虑拉伸变形。但对于聚合物则很重要, 如聚合物熔体破裂所造成的产品缺陷就是主要由拉伸应力引起的。

#### 4. 温度与温度分布

温度是分子运动激烈程度的表现, 许多流体性质受温度影响, 如液体的表面张力、粘度、密度等通常均随着温度的升高而降低。因此, 速率过程都与温度有关, 是温度的函数, 只是在不计或忽略温度效应作为常物性处理时才不予考虑。温度又是表示传热过程特性的重要参数, 研究传热过程通常需考察温度随位置或时间的变化。换热过程中的温差或反应过程的热效应, 都会使设备中形成某种温度分布。了解各种因素对温度分布的影响, 寻求温度分布的规律应用于确定合理的工艺条件或改善温度分布以适应工艺要求, 这些都是工程上十分关心的问题。

此外, 由温度分布计算温度梯度又是解析计算和分析传热速率大小的基础。因此, 温度分布是传热研究中的主要内容, 将集中在第三章进行讨论。

#### 5. 浓度与浓度分布

浓度指的是单位体积混合物中某组分  $i$  的含量。浓度有多种表达形式, 组分含量以质量表示称质量浓度  $\rho_i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]; 含量以摩尔数表示称摩尔浓度  $C_i$  [ $\text{kmol}/\text{m}^3$ ]。摩尔浓度常用于化学反应或气体定律。两种浓度间的关系为

$$C_i = \rho_i / M_i \quad (1.2-7)$$

式中  $M_i$  为组分  $i$  的分子量。

气体混合物浓度常以分压  $P_i$  表示, 对于理想气体

$$C_i = \frac{n_i}{V} = \frac{P_i}{RT} \quad (1.2-8)$$

式中  $n_i$ ——组分  $i$  的摩尔数；  
 $V$ ——气体体积；  
 $T$ ——绝对温度；  
 $R$ ——气体常数。

单位体积混合物的总质量称总质量浓度，亦即密度  $\rho$

$$\rho = \sum_1^n \rho_i \quad (1.2-9)$$

式中  $n$  为混合物组分数。

单位体积混合物的总摩尔数称总摩尔浓度  $C$

$$C = \sum_1^n C_i \quad (1.2-10)$$

为表示混合物的组成，常用某组分含量占有混合物总量的百分数表示。由于气体或互溶液体混合时，总体积不能以各组分的体积相加，因此，常用质量分数  $w_i$  和摩尔分数  $x_i$ 、 $y_i$  表示其浓度。

$$w_i = \rho_i / \sum \rho_i = \rho_i / \rho$$

$$\sum_1^n w_i = 1 \quad (1.2-11)$$

$$x_i = C_i / \sum C_i = C_i / C$$

$$\sum_1^n x_i = 1 \quad (1.2-12)$$

对于服从理想气体定律的气体混合物

$$C = n/V = P/RT \quad (1.2-13)$$

式中  $P$  为总压力，等于各组分分压之和，即

$$P = \sum P_i \quad (1.2-14)$$

因此，气相摩尔分数

$$y_i = C_i / C = \frac{P_i / RT}{P / RT} = P_i / P \quad (1.2-15)$$

$$\sum_1^n y_i = 1$$

无论是质量传递的物理操作还是进行化学反应的场所都存在着浓度变化过程，研究给定时刻设备空间某区域内浓度随位置的变化即浓度分布规律，是了解传质过程及计算物质传递速率大小的基础，是第四章将要讨论的主要内容。

## 6. 通量

单位时间、通过单位面积传递的特征量称为该特征量的通量。对于热量传递，热量通量 ( $q$ ) 则为单位时间、单位面积传递的热量，其单位为  $[J / (m^2 \cdot s)]$ ；在质量传递中， $i$  组分质量通量 ( $j_i$ ) 的单位为  $[kg / (m^2 \cdot s)]$ 。质量与速度的乘积  $Mu$  为动量，其单位为  $[kg \cdot m / s]$ 。若将剪切应力  $\tau$  的单位  $[N/m^2]$  改写成  $[\frac{kg \cdot m/s}{m^2 \cdot s}]$ ， $\tau$  则为动量通量。通量是表征传递速率的物理量，是以后各章讨论的主要内容。

## 7. 传递过程分类

实际传递过程是复杂的，为了便于研究和进行简化处理，可对不同特征的传递问题进行分类。按物系相的特点可分为均相与非均相；按流动状态可分为定常与非定常；按流动特性可分为可压缩与不可压缩；按流动空间自变量的变化关系又可分为一维、二维、三维等。



### (1) 均相与非均相

物质存在三种状态——气态、液态、固态。一个系统内可有几个液相或固相共存，但气体只能以一个相出现。油加入盛有水的容器内，平衡时则分为两个液相，水相在下，油相在上，液面上方为空气、水和油分子共存的单一蒸汽相。系统中有多相存在时称非均相物系，发生在相际的传递要比单一相即均相中的传递复杂得多。例如，流体发生相变时的换热过程将有其特殊规律；当多相系统发生质量传递时需考虑相平衡规律，处于相平衡状态时，各相温度、压力相等，但两相的组成一般不等，两相不平衡时，质量传递速率与推动力则取决于偏离平衡的程度。

### (2) 定常与非定常

根据过程物理量随时间变化的特点，过程有定常与非定常之分。过程物理量不随时间变化谓定常过程，随时间变化谓非定常过程。定常过程的数学特征是  $\frac{\partial(\quad)}{\partial t} = 0$ ，显然，其计算要比非定常过程简单。改变参考坐标系，可将非定常转换为定常过程处理，如图 1.2-4 所示，物体以恒定速度  $U$  在流体中运动，对于静止坐标系（图 a），物体两侧流体流动是非定常的，对于固定在物体上的运动坐标  $x'y'z'$ （图 b），流动则是定常的。前者如同在岸上观察船体运动

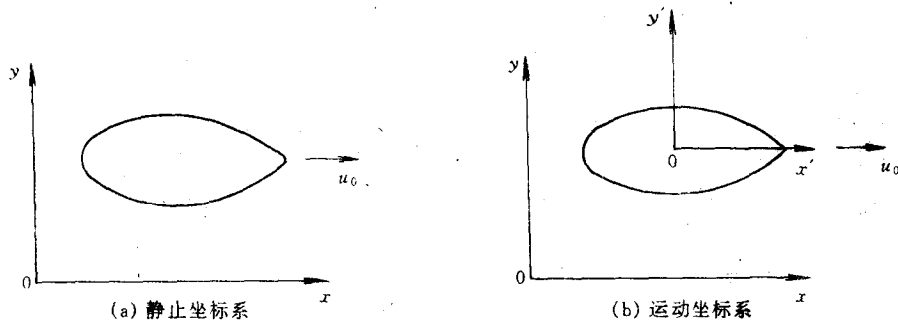


图 1.2-4 坐标系变换

时周围的水流变化，此时看到的水流图象，在不同时刻是不相同的，因而非定常的；后者如同在船上观察两侧水流变化，不同时刻的图象是相同的，因而流动是定常的。

根据相对运动原理，将模型物体固定在称之为“风洞”或“水池”的实验装置中进行试验，然后研究匀速流体绕经模型物体的流动规律，这是一种将非定常过程简化为定常过程处理的常用方法，此时，测取流场中各物理量的变化规律可用于描述匀速物体在静止流体中的运动。

### (3) 一维与多维

过程物理量（如  $u$ 、 $T$ 、 $C$  等）在空间的分布通常是三维的，即在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上均有变化，是三个坐标的函数。当仅沿空间坐标的一个或两个方向变化时，则分别被简化成了一维或二维问题。一维过程的数学特征是，仅在发生变化的方向上（如  $x$  轴）有  $\frac{\partial(\quad)}{\partial x} \neq 0$ ，其余两个方向上则有  $\frac{\partial(\quad)}{\partial y} = \frac{\partial(\quad)}{\partial z} = 0$ ，二维过程亦然。

显然，一维问题较之多维简单得多。工程上，在保证一定精度的条件下，总是尽可能将三维问题简化为二维、一维，以减少独立的空间变量，简化描述过程的方程，甚至可使某些无法求解的问题得到合理的解答，例如流体在等截面圆管中的流动，采用直角坐标系时，质