

# 化工传递过程

(上)

刘衍烈编译

西北大学化工系化工原理教研室

# 化工传递过程

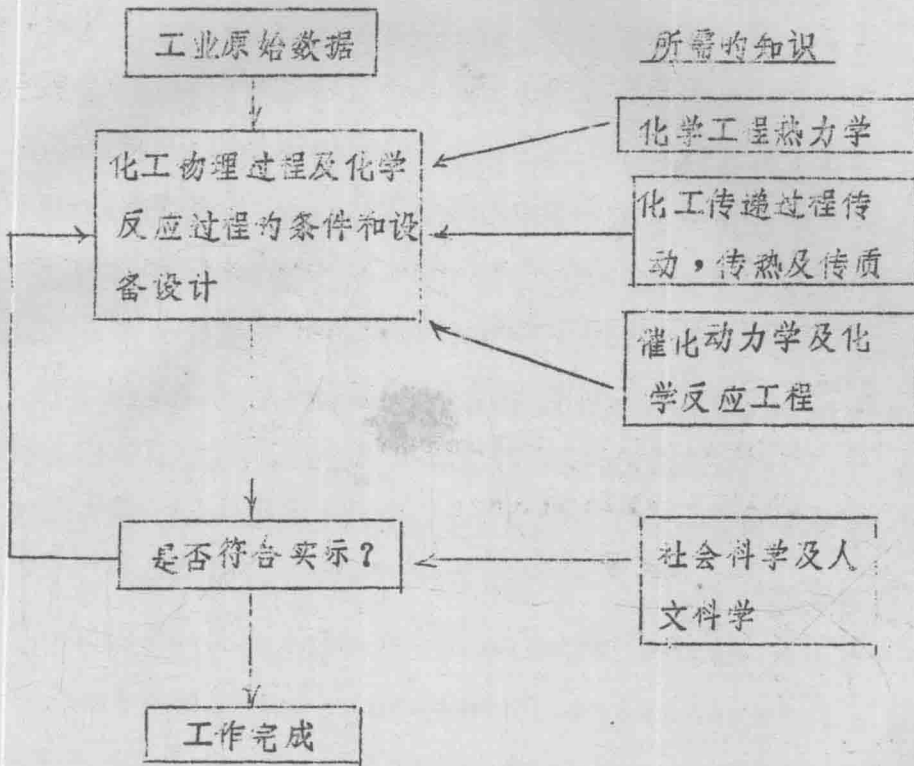
(上)

— 刘衍烈 编译

西北大学化工系化工原理教研室

# 前 言

流体力学、传热及传质在化学工程中所占的位置十分重要，因为不论有机物质、无机物质和生物物质所进行的物理过程或化学反应过程都离不开这方面的知识。在设计一个化工设备时，这方面的知识所占的位置十分重要，如下图所示。



关于这方面的知识在化工原理课程中已作了初步介绍，但着重于以始态及终态为基础的总衡算〔质量衡算、动量衡算及能量衡算〕和总传递速度的计算，这是因为“化工原理”这门课程的形成是以化工生产过程中具有共性的“单元操作”概念为基础的。在本世纪五十年代以前，就是以这些“单元操作”作为学习及研究的主要内容。因为

在五十年代以前，计算工具没有完善地解决，对于化工过程及设备的计算需要比较简单的计算方法及公式，这样就出现了许多经验及半经验公式。利用这些公式也解决了不少的问题。

随着计算技术及计算工具的发展，有可能求解对于复杂的化工过程所建立的大体上符合于实际的数学模型。而在建立数学模型时，就需要对于各单元操作内部的机理进行深入的探讨。在深入进行研究的过程当中，人们发现各“单元操作”之间存在着共性；同时，各个单元操作都与流体流动、传热及传质有关。此外，在一个物理过程或化学反应过程，会同时存在着上述两个传递过程或三个传递过程。因此，单元操作被看成是动量传递、热量传递及质量传递的综合。

从本世纪五十年代以来，化学工程学科即形成以“传递过程”和“反应工程”为中心的学科。人们开始用统一的方法来对待三个传递过程的研究。

1958年James, G. Knudsen 和 Donald L. Katz 首先出版了“Fluid Dynamics and Heat Transfer”一书。这本书的材料主要取自密西根大学工程研究所的科研资料，反映了当时这个领域的学术水平。

1930年R. Byron Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot 出版了“Transport Phenomena”一书，他们对这三个传递过程用统一方法 (unified approach) 进行讲授，使学生能够掌握一些共同描述这三个传递过程的规律，以加深对这三个传递过程的理解。

1961年Warren M. Rohsenow, Harry T. Chai 出版了“Heat, Mass and Momentum Transfer”。

1962年J. O. Bennett 和 J. F. Myers 出版了“Momentum, Heat and Mass Transfer”一书，1974年第

二版，此本教材为美国高等院校化学工程系广泛采用。

1969年，James R. Welty, Charles E. Wicks 和 Robert E. Wilson 出版了“Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer”一书，1974年第二版，这本书是由机械系和化工系合写的。

1978年Christie J. Geankoplis 出版了“Transport Processes and Unit Operation”一书。

在历史上，流体力学及传热为大多数工程所需要，而传质仅限于化学工程。但是近年来，其他领域也对于气体、液体和固体的传质深感兴趣。传递过程这门课不仅作为化学工程专业的必修课，而在其它专业，例如：动力机械工程、制冷工程、冶金工程、陶瓷工程、土建工程、废水处理工程、生化工程以及自动化工程都分别设有传递过程这门课。

此教材是计对本系现阶段化学工程专业的研究生及本科大学生的需要编写的，也可供现阶段青年教师学习，同时对于有关设计院的技术人员也是有用的。由于编者的业务水平有限，再加上时间十分匆促，错误与不当之处在所难免，请读者予以指正。

刘行烈

1981年3月

# 化工工程传递过程原理

## 目 录 (上册)

### 前 言

### 动量传递

第一部分 基本方程式及非粘性流体的流动 .....	(1)
第一章 流体及流体的性质 .....	(1)
1--1 流体力学 .....	(1)
2--2 流体的性质 .....	(1)
1--3 物质的状态及流体的定义 .....	(1)
1--4 气体及液体；蒸汽压力 .....	(2)
1--5 密度及比重 .....	(2)
1--6 液体的密度 .....	(2)
1--7 气体的密度 .....	(2)
1--8 热容 .....	(3)
1--9 表面张力 .....	(3)
1--10 流体的分子传递性质 .....	(3)
1--11 流体的粘度；动量传递 .....	(4)
1--12 牛顿流体的粘度；温度及压力的影响 .....	(5)
1--13 导热系数 .....	(6)
1--14 扩散系数 .....	(7)
1--15 流体的型式 .....	(8)
第二章 流体流动的微分方程式 .....	(10)
2--1 概论 .....	(10)
2--2 一维流动的连续性方程式 .....	(10)
2--3 三维流动的连续性方程式 .....	(11)



2-4	动量方程式 .....	[12]
2-5	三维流动的能量方程式 .....	[19]
2-6	稳定二维流动的能量方程式 .....	[21]
第三章	无粘性流体的流动 .....	[22]
3-1	无粘度流体的流动 .....	[22]
3-2	非粘性流体运动方程式(欧拉方程式) .....	[22]
3-3	速度势及非旋转流动 .....	[23]
3-4	流线(Streamlines) .....	[24]
3-5	二维不可压缩性流动的流函数 .....	[25]
3-6	欧拉方程式的积分; 柏努利方程式 .....	[26]
3-7	二维, 无旋转, 不可压缩性流动; 流动网 .....	[27]
3-8	二维, 无旋转的不可压缩性流动的实例 .....	[28]
3-9	在二维, 不可压缩性的, 无旋转的流动中有关一些问题的分析求解 .....	[28]
3-10	关于流动网的近似绘制 .....	[35]
3-11	分离 .....	[33]
第二部分	粘性流体的流动 .....	[41]
第四章	在封闭导管内的层流 .....	[42]
4-1	导论 .....	[42]
4-2	稳定流动过程的能量方程式 .....	[42]
4-3	导管内的流动及边界层的形式 .....	[44]
4-4	流体在圆管内进行稳定流动时的剪切应力 .....	[44]
4-5	摩擦因子 .....	[45]
4-6	关于管内摩擦因子的其它表示形式 .....	[45]
4-7	导管的水力半径 .....	[46]
4-8	管内的层流及湍流 .....	[47]

4-9	圆管中层流流动的速度曲线 .....	[43]
4-10	圆管内层流流动时的剪切应力及摩擦因子 .....	[51]
4-11	圆管中的非等温层流流动 .....	[52]
4-12	套管中的流动 .....	[53]
4-13	在平面圆环中的等温层流流动 .....	[54]
4-14	在平面圆环当中层流流动的剪切应力及摩擦因子 .....	[55]
4-15	具有纵向翅片修正圆环的层流流动 .....	[59]
4-16	在无限的两个平行平面之间的恒温层流流动 .....	[58]
4-17	非圆形通道的层流流动 .....	[60]
4-18	在矩形通道中层流流动时的摩擦因子 .....	[61]
第五章	湍流 .....	[63]
5-1	导论 .....	[63]
5-2	湍流流动的稳定度 .....	[64]
5-3	各种不同速度的定义 .....	[65]
5-4	不可压缩性湍流流动的雷诺方程式 .....	[66]
5-5	雷诺剪切应力 .....	[66]
5-6	普兰德混合长理论 .....	[67]
5-7	层流及湍流剪切应力的合并；涡流粘度 .....	[68]
5-8	湍流的统计理论 .....	[69]
5-9	湍流强度 .....	[71]
5-10	湍流程度 .....	[71]
5-11	用关联系数来表示雷诺剪切应力 .....	[73]
5-12	湍流各向同性及均一性 .....	[72]
5-13	各向同性湍流谱 .....	[73]
5-14	湍流的测定；热线风速仪 .....	[73]
5-15	关于湍流强度、大小及能谱的一些测定法 .....	[76]



第六章 流体动力学中的因次分析及其应用 .....	[79]
6-1 工程中的因次分析 .....	[79]
6-2 几何相似 .....	[79]
6-3 运动相似 .....	[79]
6-4 动力相似 .....	[79]
6-5 因次分析 .....	[79]
6-6 柏金汗姆法 .....	[81]
6-7 雷拉法 .....	[82]
6-8 应用微分方程式法 .....	[83]
6-9 模型的应用 .....	[87]
6-10 例题 .....	[37]
6-11 无因次群的物理意义 .....	[89]
6-12 因次分析的应用及局限性 .....	[89]
第七章 在封闭通道中的湍流流动 .....	[91]
7-1 概论 .....	[91]
7-2 由层流到湍流的过程 .....	[91]
7-3 决定管内速度分佈的普兰德指数定律 .....	[94]
7-4 对数速度分佈方程式 .....	[96]
7-5 对于光滑管的通用速度分佈 .....	[99]
7-6 通用方程式中的不一致性 .....	[101]
7-7 对于通用速度分佈方程式的改进 .....	[102]
7-8 流体性质变化对于湍流速度分佈的影响 .....	[103]
7-9 $u^+$ 及 $y^+$ 对于摩擦因子及雷诺准数的关系 .....	[104]
7-10 对于粗糙管湍流流动的速度分佈 .....	[105]
7-11 对于粗糙管及光滑管都适用的速度分佈 方程式 .....	[106]

7-12	光滑管湍流流动时的摩擦因子 .....	(107)
7-13	对于粗糙管湍流流动的摩擦因子 .....	(109)
7-14	粗糙管及光滑管完整的摩擦因子图 .....	(111)
7-15	对于非等温流动的摩擦因子 .....	(112)
7-16	对于管内流动的湍流进行测定 .....	(112)
7-17	列 别 .....	(113)
7-18	在平面环形管内由层流向湍流的过渡 .....	(118)
7-19	在平面环形管内湍流流动时的速度分佈 .....	(123)
7-20	在改进的套管中的湍流速度分佈 .....	(125)
7-21	在平面套管园环中的摩擦因子 .....	(125)
7-22	在平面套管的园环中内管偏心度所产生的影响 .....	(127)
7-23	在装有纵向翅片管的套管园环中湍流流动的 摩擦因子 .....	(123)
7-24	装有横向翅片管的套管园环中的摩擦因子 .....	(130)
7-25	在无垠平行平面间湍流流动时的速度分佈 .....	(131)
7-26	平行平面间湍流流动时的摩擦因子 .....	(131)
7-27	在矩形、三角形及梯形通道中湍流流动时的 速度分佈 .....	(132)
7-28	在矩形、三角及梯形通道中湍流流动的摩 擦因子 .....	(133)
第八章	层流内层 .....	(135)
8-1	关于层流膜的假设 .....	(135)
8-2	层流内层的厚度 .....	(133)
8-3	靠近固体壁面的点速的测定 .....	(136)
8-4	皮托管在测定靠近固体壁面的速度时所 产生的缺点 .....	(137)

8-5	对于靠近壁面的速度分佈所进行的实验工作 .....	[139]
8-6	对于层流内层的观察研究 .....	[141]
8-7	层流内层存在的可能性 .....	[141]
第九章	在封闭管道进口段的流动 .....	[142]
9-1	绪论 .....	[142]
9-2	管进口处的层流速度分佈 .....	[143]
9-3	在圆管进口段层流流动时的摩擦因子 .....	[146]
9-4	在圆管进口段的湍流速度分佈 .....	[148]
9-5	在圆管进口段的摩擦因子 .....	[149]
9-6	进口几何形状对于圆管湍流速度分佈 的影响 .....	[151]
9-7	同心圆管圆环的进口段中的湍流摩擦因子 .....	[152]
9-8	平行平面的进口段中的层流速度分佈 .....	[152]
9-9	两平行平面的进口段湍流摩擦因子 及速度分佈 .....	[153]

# 动量传递

## 第一部分

### 基本方程式及非粘性流体的流动

## 第一章

### 流体及流体的性质

#### 1-1 流体力学

流体力学是涉及流体运动以及影响流体运动条件的一门科学。静止流体是运动流体的特殊情况。流体运动学(Fluid Kinematics)是流体力学的一个分支,它局限于讨论运动的几何形状,而不涉及所作用的力。在另一方面,流体动力学也是流体力学的一个分支,它涉及到作用于流体的力。对于流体动力学根据流体运动的状态还可以进一步划分,即静止流体或稳定运动的流体(作用于流体的力处于平衡状态)以及不稳定运动的流体(作用于流体的力处于不平衡状态)。

流体运动学所涉及的内容有:流速、加速度、以及排出速度。在确定这些量时,“长度”、“时间”这些概念是需要的,同时经常采用不同的坐标系来表示其变化,例如采用直角坐标,圆柱坐标,球形坐标。究竟采用哪些坐标,一般根据方便来定,主要决定于特定系统的边界。流体动力学是把牛顿第二定律应用于运动的流体。此定律的内容是:作用力与动量的变化速率成正比。作用力包括:压力、剪切力、重力、惯性力。讨论动量时,必须知道流体的质量及速度。

在流体本身以及流体与固体之间所产生的各种传递过程不外三种:动量传递、热量传递及质量传递。当所有的真实流体在管内(通道内)流动或横过一个浸入于流体当中的物体时,由于粘性的作用,能量会

损失掉，此能量（可以表示为动量损失的速率）即代表了泵送流体所需要的动力。流体中所存在的热量传递及质量传递分别由于存在着温差及浓度差的原故。流体力学就是研究这些传递过程的速率，它是学习这三个传递过程以及它们之间的关系的基础知识。

### 1-2 流体的性质

研究流体力学以及与它有关联的“动量传递”“热量传递”及“质量传递”时，都要涉及流体的某一些物理性质。这些性质有：流体的密度、粘度、导热系数、热容、扩散系数、表面张力等。

流体（或固体）的物理性质是温度及压力的函数。许多人对于这些物理性质进行了测定，并曾经对于不同性质之间的关联关系的建立作了种种的努力。霍根及瓦特逊（Hogen, O. A. and K. N. Watson, *Chemical Process Principles* 1947）曾提供了许多经验关系式，应用这些关系式可以根据某一些性质来确定另一些特定的性质。赫谢费尔德等人（Hirschfelder J. O., Bird, R. B., and E. L. Spotz: *Trans. ASME* 71: 921 (1949)）曾对一些物理性质进行了理论研究，他们提供了一些根据化合物分子结构来计标物理性质的关系式。根据它们提供的关系式可以计标：临界性质，气体及液体的密度，压缩因子，粘度及导热系数。有关物理性质的数据可参阅化工手册。

### 1-3 物质的状态及流体的定义

所有的物质都是以固体或以流体存在。从物理方面看，固体状态的特征是固体中的分子呈相对“不流动状态”，每个分子都有一个固定的平均位置（在空间），并且围绕着这个平均位置在振动及旋转。流体状态的特征是分子具有相当的流动性，这些分子除去旋转及振动运动之外，还有转移（或位移）的运动，因此在流体中，分子没有固

定的位置。固体和流体在受到外力作用时，其表现特征是不相同的。固体具有拉伸强度，而流体只有很小的或没有拉伸强度。固体在某一个极限之内可以抵抗压缩力，而流体只有当它被盛入一个容器内时才可承受压缩力，而且此压缩力会作用于容器的所有壁面。固体在它的弹性极限内可以抵抗剪切力，但流体则不然，当它受到剪切力时，立刻变形，并且当此剪切力存在时，变形一直继续下去。

#### 1-4 气体及液体；蒸气压力。

物质以流动状态存在，即意味着以气体或液体而存在。气体中的分子彼此间的距离较大，而且具有很高的位移能。它们的位移能比它们之间相互吸引的能要大的多。在液体中，分子也是移动的，但它们的位移能比它们之间的相互吸引的能要小，因此，分子间的距离是比较小，而且比气体中分子之间的距离要小得多。

液体中分子之间的位移能的分布服从于马克思威尔的分布曲线 (Maxwell distribution curve)。因此，当某一些分子具有足够的位移能来克服邻近分子的吸引力时，它们就从液体中跑掉而形成蒸气。因此，液体会产生蒸气压力，当温度一定时，由液体逸出的分子形成蒸气，同时又与液体进行接触，一部分分子又回到液体，直到平衡为止，此时蒸气作用的压力称为蒸气压力。

蒸气压力是温度的函数，如图(1-1)的A B曲线所示。A B线以上的面积是过冷液体。曲线的顶端B称为临界点；在此点，液体中的分子位移能与其吸引能相等，此时蒸气与液体完全相同。

面积A B C是过热蒸气区域。当一个流体在单纯使用压缩的条件下即可使其液化，这个流体即被称为蒸气。B C右边的面积为气体区。当一种流体不论承受多大的压力都不能变为液体(即单纯使用压缩不能使其液化)时，此流体即被称为气体。



从研究流体流动的角度出发，液体与气体的主要不同点是它们的“可压缩性”。液体，当它所处的温度距它的临界点很远时，在很高的压力下只具有很小的“可压缩性”。在所有的实际应用当中，液体都可以认为是不可压缩的。气体及蒸气则相反，是非常易于压缩的，在许多流动问题上，此压缩性必须考虑。

### 1-5 密度及比重

物质的密度表示为：单位体积所具有的质量 ( $m/L^3$ )。物质的密度与某一标准物质密度之比称为比重。一般以  $15.5^{\circ}C$  的纯水作为基准物质，来表示液体及固体的比重。空气作为气体的基准物质，气体的比重可表示为气体的密度与空气密度之比（在同温及同压下）。气体的比重也是气体的分子量用空气分子量来除所得的数值。

### 1-6 液体的密度

对于流体流动来说，温度和压力对于液体密度的影响一般认为是不大的，也就是说，流动是不可压缩性的，当对比温度 ( $T_r = T/T_c$ ) 等于或小于 0.5 时，不可压缩性的假定是不会引起大的误差的。在  $0^{\circ}C$  到  $100^{\circ}C$  的温度范围内，在恒定压力下液体的热膨胀系数由  $2 \times 10^{-4}$  变化到  $16 \times 10^{-4}$ （当温度变化 1 度时，单位体积所具有的体积变化）。同样，在恒温下，可压缩性的变化范围是由  $2 \times 10^{-9}$  到  $16 \times 10^{-9}$ （当压力变化一单位时，单位体积所具有的体积变化），此数值随着液体、温度及压力有所不同。

### 1-7 气体的密度

决定气体密度的普遍方法是通过气体的  $P-V-T$  状态方程式。理想气体的状态方程式为

$$P V_m = R T \quad (1-1)$$

式中：  $P$  — 压力；

$V_m$  —— 单位衡分子所具的体积；

$T$  —— 绝对温度；

$R$  —— 气体常数

当对比温度大于 2，对比压力小于 1 时，真实气体也服从于方程式 (1-1)。

对于真实气体曾经开发了许多状态方程式，但是它们都十分复杂，在工程上难于应用。最简单的状态方程式是应用压缩因子  $Z$ 。

$$PV_m = ZRT \quad (1-2)$$

式 (1-2) 被用来决定气体在任意温度及压力下的密度。有关压缩因子的求法在化工热力学中已讲过，这里不再重复。

### 1-8 热容

使单位质量的物质温度升高一度所需的热量称为热容。如果物质是在恒压下被加热，热容变为

$$\left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P \quad (1-3)$$

如果物质是在恒容下被加热，热容变为

$$\left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_V = C_V \quad (1-4)$$

式中  $H$  —— 焓；

$E$  —— 内能；

$C_P$  —— 恒压热容；

$C_V$  —— 恒容热容；

热容的量纲为：单位质量的物质每增高一度所需的能量 ( $L^2/T^2T$ )

对于理想气体，

$$C_p - C_v = R \quad (1-5)$$

但对于液体及固体， $C_p$ 及 $C_v$ 基本上是相等的。在许多有关的流体流动计算中，即使流体中存在压力变化，都是采用 $C_p$ 。在恒压下对于温度的变化，

$$H_2 - H_1 = \left( \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \right)_p \quad (1-6)$$

当压力及温度都在变化时，焓变如下式所示，

$$dH = C_p dT + \left[ -T \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \right] dp \quad (1-7)$$

式(1-7)后边这一项表示由于压力变化所产生的焓变。一般这种变化并不是很大的(除非压力变化很大)

### 1-9 表面张力

表面张力的含意是增加液体的一个单位表面积所需的功。表面张力的单位一般为： $\left[ \frac{\text{达因-厘米}}{(\text{厘米})^2} \right]$  或  $(\text{达因}/\text{厘米})$ 。当流体与液体

表面进行接触时，会影响液体的表面张力。不过当气体与液体表面接触时，此影响是很小的。关于液体的表面张力(与空气接触)数据可参阅： $[ \text{Othmer, D. F. and R. Gilmont: Petroleum Refiner 31(1): 107(1952)} ]$ 。两个互不相溶的液体相互接触时，其界面张力大致为两个液体单独的表面张力(当它们与空气接触时)的差值。

### 1-10 流体的分子传递性质

流体的分子传递性质就是与动量传递速度、热量传递速度及质量传递速度[都是由于分子运动所引起]有关的那些性质。流体中的动量传递速度，热量传递速度及质量传递速度可以用类似的方程式来表示。一