



国内外经典教材辅导系列·理工类

# 陈敏恒 《化工原理》

(第4版)

笔记和课后习题 (含考研真题) 详解

主编：圣才考研网  
www.100exam.com

买一  
送三



120元大礼包

- 送1 3D电子书 (价值30元)
- 送2 3D题库【名校考研真题+课后习题+章节题库+模拟试题】  
(价值30元)
- 送3 手机版【电子书/题库】(价值60元)

说明：手机扫码（本书右上角）；或者登录圣才学习网首页的【购书大礼包】  
专区(100xuexi.com/gift)，免费领取本书大礼包。

本书提供  
名师考前  
直播答疑

中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

教·育·出·版·中·心

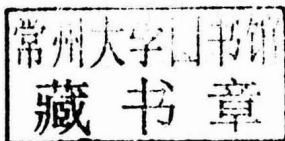
国内外经典教材辅导系列·理工类

陈敏恒《化工原理》  
(第4版)

笔记和课后习题(含考研真题)详解

主编：[100 考研网](http://www.100exam.com)

[www.100exam.com](http://www.100exam.com)



中国石化出版社

## 内 容 提 要

国内外经典教材辅导系列是一套全面解析当前国内外各大院校权威教科书的学习辅导资料。本书是陈敏恒《化工原理》(第4版)的学习辅导书。本书遵循第4版的章目编排,共分为14章,每章由三部分组成:第一部分为复习笔记,总结本章的重难点内容;第二部分为课(章)后习题详解,对第4版的所有习题都进行了详细的分析和解答;第三部分为名校考研真题详解,精选部分名校近年的考研真题,并提供了详细的解答。

圣才考研网([www.100exam.com](http://www.100exam.com))提供陈敏恒《化工原理》网授精讲班【教材精讲+考研真题串讲】、3D电子书、3D题库。随书享受大礼包增值服务【30元3D电子书+30元3D题库+60元手机版电子书/题库】。本书提供名师考前直播答疑,手机电脑均可观看,直播答疑在考前推出(具体时间见网站公告)。手机扫码(本书封面的二维码),或者登录圣才学习网首页的【购书大礼包】专区([www.100xuexi.com/gift](http://www.100xuexi.com/gift)),免费领取本书大礼包。

### 图书在版编目(CIP)数据

陈敏恒《化工原理》(第4版)笔记和课后习题  
(含考研真题)详解/圣才考研网主编. —北京:中国石化出版社,2015.9  
(国内外经典教材辅导系列·理工类)  
ISBN 978-7-5114-3617-7

I. ①陈… II. ①圣… III. ①化工原理-研究生-入学考试-自学参考资料 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第214343号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

#### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: [press@sinopec.com](mailto:press@sinopec.com)

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米16开本22印张552千字

2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

定价:42.00元

# 《国内外经典教材辅导系列·理工类》

## 编 委 会

主编：圣才考研网(www.100exam.com)

编委：娄旭海 李雪萍 赵 蓓 邸亚辉 赵芳微

胡 瑶 涂幸运 张秋瑾 段承先 倪彦辉

黄前海 杨 慧 余小刚 胡 辉 陈爱玲

# 序 言

我国各大院校一般都将国内外通用的权威教科书作为本科生和研究生学习专业课程的参考教材，这些教材甚至被很多考试（特别是硕士和博士研究生入学考试）和培训项目作为指定参考书。为了帮助读者更好地学习专业课，我们有针对性地编著了一套与国内外教材配套的复习资料，并提供配套的名师讲堂、3D电子书和3D题库。

陈敏恒主编的《化工原理》（第4版）（化学工业出版社）是我国高校采用较多的化工原理权威教材之一。作为该教材的学习辅导书，本书具有以下几个方面的特点：

1. 整理名校笔记，浓缩内容精华。本书每章的复习笔记均对本章的重难点进行了整理，并参考了国内名校名师讲授该教材的课堂笔记。因此，本书的内容几乎浓缩了该教材的所有知识精华。

2. 解析课后习题，提供详尽答案。本书参考大量化工原理相关资料，对该教材的课（章）后习题进行了详细的分析和解答，并对相关重要知识点进行了延伸和归纳。

3. 精选考研真题，巩固重难点知识。为了强化对重要知识点的理解，本书精选了部分名校近几年的化工原理考研真题，这些高校大部分以该教材作为考研参考书目。所选考研真题基本涵盖了各个章节的考点和难点。

与本书相配套，圣才考研网提供陈敏恒《化工原理》网授精讲班【教材精讲+考研真题串讲】、3D电子书、3D题库。

购买本书享受大礼包增值服务：手机扫码（本书封面的二维码），或者登录圣才学习网首页的【购书大礼包】专区（[www.100xuexi.com/gift](http://www.100xuexi.com/gift)），免费领取本书大礼包，具体包括：①本书3D电子书（价值30元）；②3D题库【名校考研真题+课后习题+章节题库+模拟试题】（价值30元）；③手机版【电子书/题库】（价值60元）。本书提供名师考前直播答疑，手机电脑均可观看，直播答疑在考前推出（具体时间见网站公告）。

圣才考研网（[www.100exam.com](http://www.100exam.com)）是圣才学习网旗下的考研考博专业网站，提供考研公共课和全国500所院校考研考博专业课辅导【一对一辅导、网授精讲班等】、3D电子书、3D题库（免费下载，免费升级）、全套资料（历年真题及答案、笔记讲义等）、国内外经典教材名师讲堂、考研教辅图书等。

考研辅导：[www.100exam.com](http://www.100exam.com)（圣才考研网）

官方总站：[www.100xuexi.com](http://www.100xuexi.com)（圣才学习网）

圣才学习网编辑部

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
0.1 复习笔记 .....	( 1 )
0.2 课后习题详解 .....	( 2 )
0.3 名校考研真题详解 .....	( 2 )
第 1 章 流体流动 .....	( 3 )
1.1 复习笔记 .....	( 3 )
1.2 课后习题详解 .....	( 17 )
1.3 名校考研真题详解 .....	( 51 )
第 2 章 流体输送机械 .....	( 55 )
2.1 复习笔记 .....	( 55 )
2.2 课后习题详解 .....	( 65 )
2.3 名校考研真题详解 .....	( 74 )
第 3 章 液体的搅拌 .....	( 79 )
3.1 复习笔记 .....	( 79 )
3.2 课后习题详解 .....	( 82 )
3.3 名校考研真题详解 .....	( 85 )
第 4 章 流体通过颗粒层的流动 .....	( 86 )
4.1 复习笔记 .....	( 86 )
4.2 课后习题详解 .....	( 93 )
4.3 名校考研真题详解 .....	( 102 )
第 5 章 颗粒的沉降和流态化 .....	( 104 )
5.1 复习笔记 .....	( 104 )
5.2 课后习题详解 .....	( 110 )
5.3 名校考研真题详解 .....	( 118 )
第 6 章 传 热 .....	( 120 )
6.1 复习笔记 .....	( 120 )
6.2 课后习题详解 .....	( 137 )
6.3 名校考研真题详解 .....	( 166 )
第 7 章 蒸 发 .....	( 172 )
7.1 复习笔记 .....	( 172 )
7.2 课后习题详解 .....	( 175 )
7.3 名校考研真题详解 .....	( 179 )
第 8 章 气体吸收 .....	( 181 )
8.1 复习笔记 .....	( 181 )
8.2 课后习题详解 .....	( 192 )

8.3	名校考研真题详解	(213)
<b>第9章</b>	<b>液体精馏</b>	(219)
9.1	复习笔记	(219)
9.2	课后习题详解	(238)
9.3	名校考研真题详解	(264)
<b>第10章</b>	<b>气液传质设备</b>	(270)
10.1	复习笔记	(270)
10.2	课后习题详解	(278)
10.3	名校考研真题详解	(283)
<b>第11章</b>	<b>液液萃取</b>	(285)
11.1	复习笔记	(285)
11.2	课后习题详解	(293)
11.3	名校考研真题详解	(299)
<b>第12章</b>	<b>其他传质分离方法</b>	(301)
12.1	复习笔记	(301)
12.2	课后习题详解	(308)
12.3	名校考研真题详解	(315)
<b>第13章</b>	<b>热、质同时传递的过程</b>	(316)
13.1	复习笔记	(316)
13.2	课后习题详解	(318)
13.3	名校考研真题详解	(322)
<b>第14章</b>	<b>固体干燥</b>	(323)
14.1	复习笔记	(323)
14.2	课后习题详解	(330)
14.3	名校考研真题详解	(340)

# 绪 论

## 0.1 复习笔记

### 一、化工生产过程

#### 1. 化学工业的定义

化学工业是对原料进行化学加工以获得有用产品的工业，核心是化学反应过程和反应器。

#### 2. 化工生产的要求

为使反应器内保持适宜的压力、温度和物料的组成等条件，原料需经过前处理。前处理是指原料经过的一系列预处理以除去杂质，达到必要的纯度、温度和压力的过程。反应产物同样需要经过各种后处理过程加以精制。

### 二、单元操作

#### 1. 单元操作的分类

按操作的目的可分为：

- (1) 物料的增压、减压和输送；
- (2) 物料的混合或分散；
- (3) 物料的加热或冷却；
- (4) 非均相混合物的分离；
- (5) 均相混合物的分离。

#### 2. 常用单元操作及内容

##### (1) 常见单元操作

单元操作是按物理过程的目的，兼顾过程的原理、相态，将各种前、后处理归纳成的系列操作，如表 0-1-1 所示。

表 0-1-1 化工常见单元操作

单元操作	目的	物态	原理	传递过程
流体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气-液；液-液； 固-液	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固；气-固	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固；气-固	密度差引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温，改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分间挥发度的不同	物质传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
干燥	去湿	固体	供热汽化	热、质同时传递
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	物质传递

单元操作	目的	物态	原理	传递过程
反渗透	均相混合物分离	液	各组分尺度不同的截留	物质传递
电渗透	均相混合物分离	液	电解质离子选择性的传递	物质传递

## (2) 单元操作的内容

各单元操作的内容包括：过程和设备。

## 三、“化工原理”课程的两条主线

### 1. 传递过程

(1) 动量传递过程(单相或多相流动)；

(2) 热量传递过程——传热；

(3) 物质传递过程——传质。

表 0-1-1 中各单元操作皆属传递过程。

### 2. 研究工程问题的方法论

(1) 实验研究方法，即经验的方法；

(2) 数学模型方法，即半理论、半经验的方法。

## 0.2 课后习题详解

本章无课后习题。

## 0.3 名校考研真题详解

什么是化工原理中的三传？试论述三传的可比拟性。[中山大学 2010 研]

答：(1) 化工原理的三传是指质量传递、热量传递、动量传递。

(2) 三传的可比拟性分析如下：

### ① 传递本质类比

a. 动量传递是由于流体层之间速度不等，动量将从速度大处向速度小处传递；

b. 热量传递是流体内部因温度不同，有热量从高温处向低温处传递；

c. 质量传递是因物质在流体内部存在浓度差，物质将从浓度高处向浓度低处传递。

### ② 基础定律数学模型类比

a. 动量传递的牛顿黏性定律；

b. 热量传递的傅立叶定律；

c. 质量传递的费克扩散定律。

### ③ 物性系数类比

a. 动量传递的黏度系数；

b. 热量传递的导热系数；

c. 质量传递的分子扩散系数。

# 第1章 流体流动

## 1.1 复习笔记

### 一、概述

#### 1. 流体流动的考察方法

##### (1) 运动的描述方法

①拉格朗日法：选定一个流体质点并跟踪观察，进而描述其运动参数(如位移、速度等)与时间的关系。

②欧拉法：在固定空间位置上观察流体质点的运动情况，如空间各点的速度、压强、密度等，进而直接描述各有关运动参数在空间各点的分布情况及变化。

流体质点不是真正几何意义上的点，而是具有质点尺寸的点。

##### (2) 定态流动

定态流动是指运动空间各点的状态不随时间变化的流动。

##### (3) 流线与轨线

轨线是指某一流体质点的运动轨迹。它是由拉格朗日法考察流体运动所得。

流线是流体在速度方向上的连线，流线上各点的切线表示同一时刻各点的速度方向。它是采用欧拉法考察的结果。由于同一点在指定的某一时刻只有一个速度，所以流线不会相交。

在定态流动时流线与轨线重合。

#### 2. 流体流动中的作用力

##### (1) 体积力

体积力(质量力)作用于流体的每一个质点上，并与流体的质量成正比。

##### (2) 表面力——压力与剪力

表面力与表面积成正比。若取流体中任一微小平面，作用于其上的表面力可分为垂直于表面的力和平行于表面的力。前者称为压力，后者称为剪力(或切力)。

##### ①压强

压强是指单位面积上所受的力，其单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ ，也称为帕斯卡(Pa)，其  $10^6$  倍称为兆帕(MPa)，现工程上常用兆帕做压强的计量单位。

##### ②剪应力

剪应力是指单位面积上所受的力。对大多数流体，剪应力  $\tau$  服从牛顿黏性定律。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

式中  $du/dy$  —— 法向速度梯度， $1/\text{s}$ ；

$\mu$  —— 流体的黏度， $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，即  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

$\tau$  —— 剪应力，Pa。

牛顿黏性定律指出，剪应力与法向速度梯度成正比，与法向压力无关。

### (3) 黏度

黏度是指流体抵抗剪切变形的能力。通常液体的黏度随温度增加而减小，气体的黏度远小于液体的黏度，随温度上升而增大。

黏度的单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，较早的手册也常用泊(达因·秒/厘米<sup>2</sup>)或厘泊(0.01 泊)表示。

$$1\text{cP}(\text{厘泊}) = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

黏度  $\mu$  和密度  $\rho$  常以比值的形式出现，定义

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$\nu$  称为运动黏度，在 SI 单位中以  $\text{m}^2/\text{s}$  表示，CGS 单位为沱( $\text{cm}^2/\text{s}$ )，其百分之一为厘沱。 $\mu$  又称为动力黏度。

### (4) 理想流体

当流体无黏性，即  $\mu = 0$  时，称为理想流体。

### (5) 液体的表面张力

表面张力  $\sigma$  为

$$\sigma = \frac{F}{2L}$$

## 3. 流体流动中的机械能

流体所含的能量包括内能和机械能。

固体质点运动时的机械能有两种形式：位能和动能。而流动流体中除位能、动能外还存在另一种机械能——压强能。

## 二、流体静力学

### 1. 静压强在空间的分布

#### (1) 静压强

在静止流体中，作用于某一点不同方向上的压强在数值上是相等的。

#### (2) 流体微元的受力平衡

设从静止流体中取一立方体流体微元，中心点 A 的坐标为  $(x, y, z)$ 。立方体各边分别与坐标轴  $ox$ 、 $oy$ 、 $oz$  平行，边长分别为  $\delta x$ 、 $\delta y$ 、 $\delta z$ ，如图 1-1-1 所示。

作用于流体微元上的力有表面力与体积力两种。

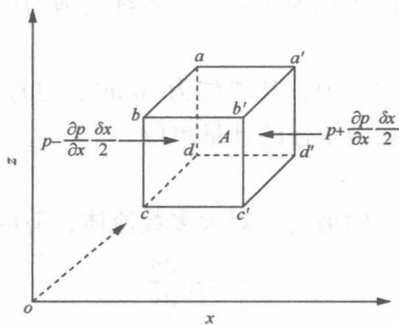


图 1-1-1 流体微元的受力平衡

### (3) 欧拉平衡方程

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

等式左方为单位质量流体所受的体积力和压力。

#### (4) 静力学平衡方程

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数}$$

对于静止流体中任意两点 1 和 2，如图 1-1-2 所示。

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2$$

上述两式仅适用于在重力场中静止的不可压缩流体，表明静压强仅与垂直位置有关，而与水平位置无关。

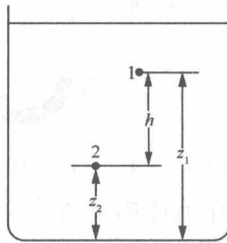


图 1-1-2 重力场中的静压强分布

### 2. 静力学方程的物理意义

$gz$  项实质上是单位质量流体所具有的位能， $p/\rho$  是单位质量流体所具有的压强能。位能与压强能都是势能。 $\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数}$  表明，在同种静止流体中处于不同位置的微元其位能和压强能各不相同，但其和即总势能保持不变。

### 3. 压强的表示方法

#### (1) 压强的表示方法

可直接以 Pa 表示，在压强不大时，工程上常间接地以流体柱高度表示，如用米水柱或毫米汞柱等。液柱高度  $h$  与压强的关系为

$$p = \rho gh$$

注意：当以液柱高度  $h$  表示压强时，必须同时指明为何种流体。

#### (2) 压强的基准

压强的大小常以两种不同的基准来表示：①绝对真空；②大气压强。以绝对真空为基准测得的压强称为绝对压强，以大气压强为基准测得的压强称为表压或真空度。

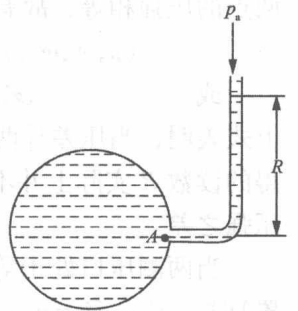
$$\text{表压} = \text{绝对压} - \text{大气压}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝对压}$$

### 4. 压强的静力学测量方法

#### (1) 简单测压管

最简单的测压管如图 1-1-3 所示。储液罐的 A 点为测压口。图 1-1-3 简单测压管测压口与一玻璃管连接。玻璃管的另一端与大气相通。由玻璃管中的液面高度获得读数  $R$ ，



用静力学原理得

$$p_A = p_a + R\rho g$$

A 点的表压为

$$p_A - p_a = R\rho g$$

### (2) U 形测压管

图 1-1-4 表示用 U 形测压管测量容器中的 A 点压强。在 U 形玻璃管内放入某种液体作为指示液。指示液必须与被测流体不发生化学反应且不互溶，其密度  $\rho_i$  大于被测流体的密度  $\rho$ 。

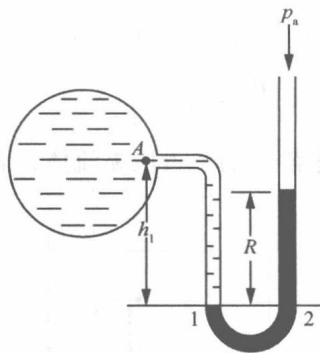


图 1-1-4 U 形测压管

由静力学方程可知，在同一种静止流体内部等高面即是等压面。图 1-1-4 中 1、2 两点的压强相等，由此可求得 A 点的压强为

$$p_A = p_a + \rho_i g R - \rho g h_1$$

A 点的表压为

$$p_A - p_a = \rho_i g R - \rho g h_1$$

若容器内为气体，则由气柱  $h_1$  造成的静压强可以忽略，得

$$p_A - p_a = \rho_i g R$$

此时 U 形测压管的指示液读数  $R$  表示 A 点压强与大气压之差，读数  $R$  即为 A 点的表压。

### (3) U 形压差计

若 U 形测压管的两端分别与两个测压口相连，则可以测得两测压点之间的压差，故称为压差计。图 1-1-5 表示 U 形压差计测量直管内作定态流动时 A、B 两点的压差。因 U 形管内的指示液处于静止状态，故位于同一水平面 1、2 两点的压强相等，故有

$$(p_A + \rho g z_A) - (p_B + \rho g z_B) = Rg(\rho_i - \rho)$$

或  $\mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = Rg(\rho_i - \rho)$

上式表明，当压差计两端的流体相同时，U 形压差计直接测得的读数  $R$  实际上并不是真正的压差，而是 A、B 两点虚拟压强之差。

当两测压口处于等高面上， $z_A = z_B$ （即被测管路水平放置）时， $\mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = p_A - p_B$ ，U 形压差计才能直接测得两点的压差。

当压差一定时，用 U 形压差计测量的读数  $R$  与密度差  $(\rho_i - \rho)$  有关，有时也可用密度较小的流体（如空气）作指示剂，采用倒 U 形管测量压差。

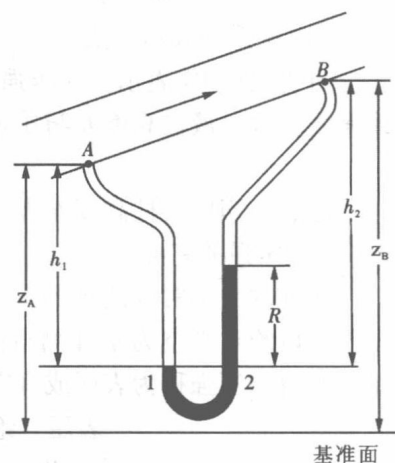


图 1-1-5 虚拟压强差

### 三、流体流动中的守恒原理

#### 1. 质量守恒

##### (1) 流量

流量是指单位时间内流过管路某一截面的物质量。流过的量如以体积表示，称为体积流量，以符号  $q_V$  表示，常用的单位有  $\text{m}^3/\text{s}$  或  $\text{m}^3/\text{h}$ ；如以质量表示，则称为质量流量，以符号  $q_m$  表示，常用的单位有  $\text{kg}/\text{s}$  或  $\text{kg}/\text{h}$ 。

体积流量  $q_V$  与质量流量  $q_m$  间存在如下关系

$$q_m = q_V \rho$$

式中  $\rho$ ——流体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

注意：流量是一种瞬时的特性，不是某段时间内累计流过的量。当流体作定态流动时，流量不随时间而变。

##### (2) 平均流速

流速是指单位时间内流体质点在流动方向上流经的距离，以符号  $u$  表示，单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。

平均流速与流量的关系为

$$\bar{u} = \frac{q_V}{A}$$

或

$$G = \frac{q_m}{A} = \bar{u} \rho$$

式中， $G$  称为质量流速，又称质量通量，其单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

##### (3) 质量守恒方程

考察图 1-1-6 中截面 1-1 至截面 2-2 之间的管段控制体，则

$$\rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——管段两端的横截面积， $\text{m}^2$ ；

$\bar{u}_1$ 、 $\bar{u}_2$ ——管段两端面处的平均流速， $\text{m}/\text{s}$ ；

$\rho_1$ 、 $\rho_2$ ——管段两端面处的流体密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

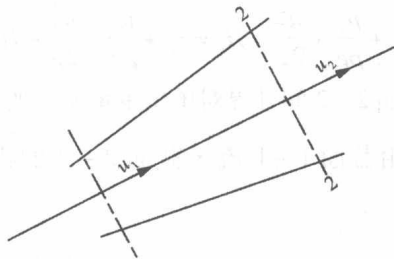


图 1-1-6 控制体中的质量守恒

对不可压缩流体， $\rho$  为常数。

$$\frac{\bar{u}_2}{\bar{u}_1} = \frac{A_1}{A_2}$$

上式表明，不可压缩流体的平均流速与管截面成反比，截面增加，流速减小；截面减小，流速增加。流体在均匀直管内作定态流动时，平均流速  $\bar{u}$  沿流程保持定值，不因内摩擦而减速。

## 2. 机械能守恒

### (1) 沿流线的机械能守恒

$$gz + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数}$$

上式称为伯努利方程, 适用于重力场不可压缩的理想流体作定态流动的情况, 表示在流动的流体中存在着三种形式的机械能, 即位能、压强能、动能。三种机械能可相互转换, 但总和保持不变。

### (2) 理想流体管流的机械能守恒

对于理想流体, 伯努利方程可以不加修改地用于管流。

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

下标 1、2 分别代表管流中位于均匀流段的截面 1-1 和 2-2。

### (3) 实际流体管流的机械能守恒

对截面 1-1 与 2-2 间作机械能衡算可得

$$\frac{\mathcal{P}_1}{\rho} + \overline{\left(\frac{u_1^2}{2}\right)} + h_e = \frac{\mathcal{P}_2}{\rho} + \overline{\left(\frac{u_2^2}{2}\right)} + h_f$$

式中  $\overline{\left(\frac{u_2^2}{2}\right)}$  —— 某截面上单位质量流体动能的平均值, J/kg;

$h_e$  —— 截面 1-1 至截面 2-2 间外界对单位质量流体加入的机械能, J/kg;

$h_f$  —— 单位质量流体由截面 1-1 流至截面 2-2 的机械能损失(即阻力损失)。

### (4) 伯努利方程的几何意义

伯努利方程的另一种以单位重量流体为基准的表达形式

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数}$$

式中  $z$  也称为位头;  $\frac{p}{\rho g}$  也称为压头;  $\frac{u^2}{2g}$  也称为速度头。伯努利方程的几何意义是位头、压头、速度头(均为高度)之和为常数。

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + H_f$$

式中  $H_e$  —— 截面 1-1 至截面 2-2 间外界对单位重量流体加入的机械能, J/N(或 m);

$H_f$  —— 单位重量流体由截面 1-1 流至截面 2-2 的机械能损失(阻力损失), J/N(或 m)。

## 3. 动量守恒

### (1) 管流中的动量守恒

作用于控制体内流体上的外力的合力 = (单位时间内流出控制体的动量) - (单位时间内进入控制体的动量) + (单位时间内控制体中流体动量的累积量)。

### (2) 动量守恒定律和机械能守恒定律的关系

动量守恒定律和机械能守恒定律都从牛顿第二定律出发导出, 两者都反映了流动流体各运动参数的变化规律。流动流体必须同时遵循这两个规律, 但在实际应用的场合上却有所不同, 因假定条件不同而使结果不同, 应用时都需经实验检验。

## 四、流体流动的内部结构

### 1. 流动的类型

#### (1) 两种流型——层流和湍流

①流体质点作直线运动，流体层次分明，层与层之间互不混杂（此处仅指宏观运动，不是指分子扩散），这种流型称为层流或滞留。

②流体质点在总体上沿管道向前运动，同时还在各个方向作随机的脉动，这种流型称为湍流或紊流。

#### (2) 流型的判据——雷诺数 $Re$

可以将雷诺数  $Re = \frac{d u \rho}{\mu}$  作为流型的判据：

①当  $Re < 2000$  时，必定出现层流，为层流区；

②当  $2000 \leq Re < 4000$  时，有时出现层流，有时出现湍流，依赖于环境，为过渡区；

③当  $Re \geq 4000$  时，一般出现湍流，为湍流区。

以  $Re$  为判据将流动划分为三个区：层流区、过渡区、湍流区。过渡区并非表示一种过渡的流型，它表示在此区内可能出现层流也可能出现湍流。

### 2. 雷诺数的物理意义

雷诺数表征了流动流体惯性力与黏性力之比。

### 3. 边界层及边界层脱体

#### (1) 边界层

边界层是指流速降为来流速度  $u_0$  的 99% 以内的区域。边界层按流型有层流边界层和湍流边界层之分，如图 1-1-7 所示。

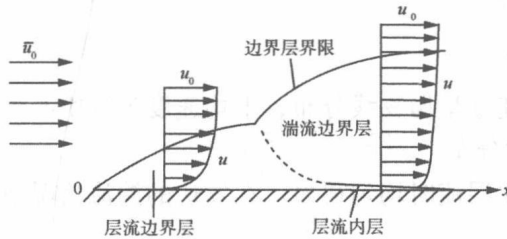


图 1-1-7 平壁上的边界层

#### (2) 管流入口段

当流体在圆管内流动时，只在进口处一段距离内（入口段）有边界层内外之分。经此段距离后，边界层扩大到管中心，在管中心汇合时，若边界层内流动是层流，则以后的管流为层流。若在汇合点之前流动已发展成湍流边界层，则以后的管流为湍流。

#### (3) 湍流时的层流内层和过渡层

将湍流流动分为湍流核心和层流内层两个部分。层流内层一般很薄，厚度随  $Re$  的增大而减小。在湍流核心内，径向的传递过程因质点的脉动而大大强化。在层流内层中，径向的传递只依赖于分子运动。因此，层流内层成为传递过程主要阻力所在。

#### (4) 边界层的分离现象

当流速均匀的流体绕过大曲率的物体，如球体或圆柱体流动时，边界层的情况又有新的特点。

如图 1-1-8 中  $C-C'$  线所示，该线与边界层上缘之间的区域即成为脱离了物体的边界

层。该现象称为边界层的分离或脱体。

在  $C-C'$  线以下的流体在逆压强梯度作用下形成倒流。在柱体的后部产生大量旋涡，造成流体的机械能损失增大。由上述可知：

- ① 流道扩大时必造成逆压强梯度；
- ② 逆压强梯度容易造成边界层的分离；
- ③ 边界层分离造成大量旋涡，大大增加机械能消耗。

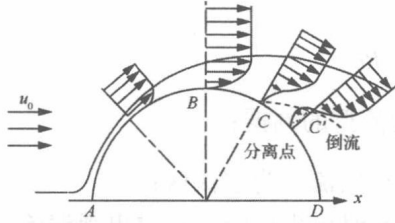


图 1-1-8 流体对圆柱体的绕流

#### 4. 圆管内流体运动的数学描述

##### (1) 剪应力分布

圆直管内沿径向的剪应力分布

$$\tau = \frac{P_1 - P_2}{2l} r$$

剪应力分布与流体种类无关，且对层流和湍流皆适用。上式表明，在圆直管内剪应力与半径  $r$  成正比。在管中心  $r=0$  处，剪应力为零；在管壁  $r=R$  处，剪应力最大，其值为

$$\left( \frac{P_1 - P_2}{2l} \right) R。$$

##### (2) 层流时的速度分布

层流时圆管截面上的速度呈抛物线分布，平均速度为管中心最大速度的一半。

##### (3) 圆管内湍流的速度分布

湍流时截面速度分布比层流时均匀得多。在发达的湍流情况下，平均速度约为最大流速的 0.8 倍。

#### 五、阻力损失

##### 1. 直管阻力和局部阻力

化工管路主要由两部分组成：(1) 直管；(2) 弯头、三通、阀门等管阀件。直管造成的机械能损失称为直管阻力损失(沿程阻力损失)；管件造成的机械能损失称为局部阻力损失。

对于通常的管路，无论是直管阻力或局部阻力，也无论是层流或湍流，阻力损失均主要表现为流体势能的降低。

流体在直管中作层流流动时，因阻力损失造成的势能差可用下式表示

$$\Delta P = \frac{32\mu l u}{d^2}$$

上式称为泊谟叶方程。层流时的直管阻力损失为

$$h_f = \frac{32\mu l u}{\rho d^2}$$