

高等院校土建类专业教材

# 简明工程流体力学

马航海 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等院校土建类专业教材

# 简明工程流体力学

马航海 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

简明工程流体力学/马航海编著. —武汉:武汉大学出版社,2016.5  
高等院校土建类专业教材  
ISBN 978-7-307-17771-0

I. 简… II. 马… III. 工程力学—流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 079076 号

责任编辑:路亚妮 方竞男

责任校对:杨赛君

装帧设计:吴 极

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:8 字数:196 千字

版次:2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷

ISBN 978-7-307-17771-0 定价:25.00 元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前言

“简明工程流体力学”是土木工程专业的力学基础课程,已经出版的流体力学教材中有针对工程应用的教材,但由于各工程专业的性质不同,故其对流体力学知识要求的重点也不同。长期的教学实践表明,对于土木工程各个专业,只需掌握流体力学的基本理论及其应用,为学生打下一定的流体力学基础即可。为此,本书是在综合土木工程专业的教学大纲、教学学时及专业培养目标的基础上,结合土木工程专业学习的共性编写而成的。

本书主要内容围绕“流体力学”课程的教学大纲,以流体力学经典理论为基础,以满足少学时课程教学为目的。本书的编写本着由浅入深、循序渐进的思路,以基本知识点为基础,兼顾工程应用。

本书引用了许多文献,谨向有关文献的作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

**编著者**

2016年2月

# 目录

1 流体概述 .....	(1)
1.1 流体力学 .....	(2)
1.2 流体的定义 .....	(3)
1.3 流体的力学模型 .....	(4)
1.3.1 连续介质模型 .....	(4)
1.3.2 理想流体 .....	(4)
1.3.3 不可压缩流体 .....	(4)
1.4 流体的主要物理力学性质 .....	(5)
1.4.1 惯性 .....	(5)
1.4.2 万有引力 .....	(7)
1.4.3 黏性 .....	(7)
1.4.4 压缩性与膨胀性 .....	(8)
1.4.5 表面张力特性 .....	(10)
1.5 作用在流体上的力 .....	(12)
1.5.1 表面力 .....	(12)
1.5.2 质量力 .....	(12)
※1.6 流体力学发展简史(选学) .....	(14)
1.7 流体力学在工程中的应用 .....	(17)
1.8 流体力学的研究方法 .....	(18)
1.8.1 理论分析方法 .....	(18)
1.8.2 实验研究方法 .....	(18)
1.8.3 数值分析方法 .....	(18)
独立思考 .....	(19)
习题 .....	(19)
参考文献 .....	(20)
2 流体静力学 .....	(21)
2.1 流体静止时的压强特性 .....	(22)
2.2 静止流体平衡微分方程 .....	(24)
2.2.1 欧拉平衡微分方程 .....	(24)
2.2.2 有势力场中静压强的分布 .....	(25)

2.2.3	静止流体中的等压面	(26)
2.3	重力场中流体静压强的分布规律	(27)
2.3.1	静力学基本方程	(27)
2.3.2	压强的计量	(28)
2.3.3	水头与能量守恒	(30)
2.3.4	压强的测量	(31)
2.4	流体的相对平衡	(34)
2.5	静止流体作用在平面上的总压力	(36)
2.5.1	静压强分布图	(36)
2.5.2	解析法	(37)
2.5.3	图解法	(39)
2.6	静止流体作用在曲面上的总压力	(42)
	独立思考	(45)
	习题	(45)
	参考文献	(48)
<b>3</b>	<b>流体运动学</b>	(49)
3.1	流体运动的描述方法	(50)
3.1.1	拉格朗日法	(50)
3.1.2	欧拉法	(51)
3.1.3	流体质点加速度	(51)
3.2	欧拉法的基本概念	(53)
3.2.1	一维流动、二维流动、三维流动	(53)
3.2.2	恒定流与非恒定流	(53)
3.2.3	流线与迹线	(54)
3.2.4	流管、流束、元流和总流	(54)
3.2.5	过流断面、流量与断面平均流速	(55)
3.2.6	均匀流与非均匀流	(56)
3.3	连续性方程	(57)
3.3.1	三维流动的连续性微分方程	(57)
3.3.2	恒定一维流动的连续性方程	(59)
	独立思考	(61)
	习题	(61)
	参考文献	(62)
<b>4</b>	<b>流体动力学</b>	(63)
4.1	流体运动微分方程	(64)

4.1.1	理想流体运动微分方程(欧拉方程).....	(64)
4.1.2	纳维-斯托克斯方程 .....	(65)
4.2	元流的能量方程.....	(67)
4.2.1	理想流体元流的伯努利方程.....	(67)
4.2.2	伯努利方程的几何及物理意义.....	(68)
4.2.3	黏性流体元流的伯努利方程.....	(68)
4.3	总流的能量方程.....	(69)
4.3.1	总流伯努利方程.....	(69)
4.3.2	总流伯努利方程的物理及几何意义.....	(70)
4.3.3	水头线.....	(70)
4.3.4	测量仪器.....	(71)
4.3.5	总流伯努利方程的扩展.....	(74)
4.4	恒定总流的动量方程.....	(79)
4.4.1	推导.....	(79)
4.4.2	应用.....	(80)
	独立思考 .....	(83)
	习题 .....	(83)
	参考文献 .....	(84)
<b>5</b>	<b>流体能量损失及流态</b> .....	<b>(85)</b>
5.1	流动阻力与水头损失.....	(86)
5.1.1	沿程阻力与沿程水头损失.....	(86)
5.1.2	局部阻力与局部水头损失.....	(86)
5.1.3	水头损失计算公式.....	(87)
5.2	沿程水头损失与切应力.....	(89)
5.2.1	均匀流基本方程.....	(89)
5.2.2	圆管过流断面上的切应力分布.....	(90)
5.3	流态.....	(91)
5.3.1	雷诺实验.....	(91)
5.3.2	雷诺数.....	(92)
5.4	圆管层流.....	(94)
5.4.1	流动特征.....	(94)
5.4.2	流速分布.....	(94)
5.4.3	沿程水头损失与沿程水头损失系数.....	(95)
5.5	紊流的运动特征.....	(97)
5.5.1	紊流的随机性与规律性.....	(97)
5.5.2	黏性底层.....	(98)

5.5.3	紊流切应力	(99)
5.6	紊流的沿程水头损失	(101)
5.6.1	尼古拉兹实验	(101)
5.6.2	紊流的速度分布	(102)
5.6.3	$\lambda$ 的经验公式	(104)
5.6.4	阻力区的判别	(104)
5.6.5	管道沿程水头损失	(105)
5.7	局部水头损失	(109)
5.7.1	分析	(109)
5.7.2	局部水头损失系数	(109)
5.7.3	水头线的绘制	(111)
5.8	边界层与绕流阻力	(113)
5.8.1	边界层的概念	(113)
5.8.2	边界层分离	(114)
5.8.3	卡门涡街与绕流阻力	(116)
	独立思考	(117)
	习题	(117)
	参考文献	(119)





# 1

## 流体概述

### 课前导问

你知道什么是流体吗？流体有哪些类型？流体有哪些区别于固体的特点？研究流体的方法和固体一样吗？为了研究流体，人们采取了哪些办法，做了哪些假定？如果你对流体感兴趣，并且想知道以上问题的答案，那就开始你的流体力学探索之旅吧！

### 课前提示

理解流体的物理力学特性及各种假定。

## 1.1 流体力学

流体力学是力学的一个分支,主要研究流体在各种力的作用下的静止状态和运动状态,以及流体和固体间有相对运动时的相互作用和流动规律,并应用于生产和生活的一门实用技术科学。

流体力学可以划分为流体静力学、流体运动学、流体动力学三个分支学科。

### (1) 流体静力学

流体静力学主要研究流体处于静止(或相对平衡)状态时,流体内部的一些特性及作用于流体上各种力之间的关系,如流体间的相互作用力、流体对固体表面的作用力等。

### (2) 流体运动学

流体运动学主要通过研究位移、速度、加速度等运动要素来分析流体的运动特征,但不考虑力或者能量。

### (3) 流体动力学

流体动力学主要研究速度和加速度与流体运动时所受的力之间的关系。

研究时常将流体运动学和流体动力学两者共同考虑,统称为流体动力学。其主要研究流体运动时,作用于流体上的力和运动之间的关系,分析流体的运动特征及能量转换。

## 1.2 流体的定义

处于自然界中的物质一般有三种存在状态,即固态、液态和气态。液体和气体统称为流体,流体区别于固体的最基本特征是它具有流动性。

流体是流体力学的研究对象,包括液体和气体。

固体由于分子间的距离比较近,分子间的引力大,可以保持固有的形状和体积。在受外荷载作用的情况下,理想的弹性体会发生变形,外荷载消失,弹性体必恢复到原先的状态。若是理想的塑性体,当受外荷载作用时也会发生变形,在材料不发生破坏的情况下,只要外荷载一直存在,变形就会持续下去;移除荷载时,变形随即停止,但不能恢复到原先的状态。而多数固体介于这两者之间,属于弹塑性材料,具有一定的体积和形状,不易变形,可承受压力,也能承受拉力及各种复杂应力。

液体分子间的距离比固体小,但比气体大,其分子间内聚力可将液体维系在一起,不会无限制地膨胀,具有一定的体积,相对不容易压缩。而气体分子间的距离比液体大得多,很容易压缩。当外部无限制时,气体会无限制地膨胀,且只有在完全封闭的状态下才具有一定的体积。流体只能承受压力,几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形。在任何微小切应力作用下,流体很容易发生变形和流动。

流体在微小剪切力作用下连续变形的特性,称为流动性。所以,流体就是在剪切外力作用下会发生流动的物体,它不能在承受剪力的同时使自己保持静止状态。

生产和生活中常见的流体是水和空气,因此我们经常以水和空气作为流体的典型研究对象。

流体作为物质存在的基本形式,必须遵循自然界的普遍规律,如质量守恒定律和能量守恒定律等。流体力学中的基本定理实质上就是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用。因此,前导课程——大学物理和理论力学是学习流体力学的必要基础,而高等数学则是分析流体力学的必要工具。

## 1.3 流体的力学模型

实际流体具有各种物理力学特性,研究中如果考虑所有的影响因素,往往会使问题复杂化,得不到需要的结果。因此,研究流体的一般方法是抓住主要矛盾,忽略次要矛盾,将实际问题抽象为力学模型,建立数学方程式,通过求解来获得适用于生产应用的结论,其中建立力学模型成为分析问题的关键。通过大量的研究总结,流体力学常用的力学模型有以下几种。

### 1.3.1 连续介质模型

流体是由分子组成的,但分子之间有间隙,故流体并不是连续的。因此,基于流体的各种物理量实际上应该也是不连续的,这样就无法用数学的方法来分析流体的各种规律,因为不满足连续介质力学假定。

流体力学研究的是流体的宏观运动规律,一般不涉及流体内部分子的微观运动,即流体分子间的距离与生产上需要的研究尺度相比是极其微小的。因此,可以将流体看作由无数流体质点所组成的无间隙的连续体。

连续介质模型的概念由瑞士数学家、自然科学家莱昂哈德·欧拉(Leonhard Euler)在1755年首先提出,对流体力学的发展有非常重要的作用。其中关于流体质点的表述为:宏观尺寸非常小,大小同一切流动空间相比微不足道,认为其宏观体积极限为零,但微观尺寸足够大,含有大量分子,是具有质量的一个“点”。连续介质模型假设流体是一种由流体质点组成的内部无间隙的连续体,这样就可以将基于流体的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数,并采用数学分析方法来研究流体运动,这为研究流体力学带来了很大的便利。

连续介质模型在流体的宏观分析中有着重要意义,用于一般流动分析是合理的,可以满足研究精度的需要。但在特殊情况下,它就不再适用了,需另行处理,如高空稀薄气体的运动,由于空气稀薄,不能满足在一个流体质点内含有足够多流体分子的条件;高速掺气水流中产生了气泡,流体不再是连续体。

### 1.3.2 理想流体

实际的流体都具有黏性,黏性的存在给流体运动规律的研究带来很大的困难。为了简化理论分析,我们引入了理想流体的概念。所谓理想流体,是指不考虑黏性的流体,即无黏性流体。理想流体实际上是不存在的,它只是一种简化的力学模型。

在有些问题中,黏性不起(主要)作用,可以忽略黏性的影响,所以流动分析大为简化,容易得出一些规律。所得的规律,对于某些黏性影响很小的流体,能够较好地符合实际;对于黏性影响不能忽略的流体,则可通过实验加以修正。这种考虑黏性的流体称为黏性流体。

### 1.3.3 不可压缩流体

实际流体都是可压缩的,如果忽略密度的变化,即忽略流体的压缩性,这种流体则称为不可压缩流体。引入不可压缩流体的概念,是在密度的变化对最终结果没有影响或影响不大时所做的一种假定。因此,不可压缩流体是一个理想化的力学模型。对于均质、不可压缩流体,密度无变化,即 $\rho$ 为常数,这样就简化了分析变量,降低了分析难度。

## 1.4 流体的主要物理力学性质

自然界任何一种物质都有其特定的物理力学性质,流体在各种力的作用下产生的运动规律取决于本身的物理特性。因此,学习流体的物理特性是学好流体力学的基础。

### 1.4.1 惯性

惯性是物体保持原有状态的一种性质。物体运动状态的任何改变,都必须克服惯性作用。质量是惯性大小的度量,质量越大,惯性越大。当流体受到外力作用而使运动状态发生改变时,流体就要产生反抗这种改变的反作用力(即惯性力),作用到其他物体上。

设物体的质量为  $m$ , 加速度为  $a$ , 则惯性力为:

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中负号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。

密度表示流体单位体积的质量,以  $\rho$  表示。若某一均质流体,质量为  $m$ , 体积为  $V$ , 则密度为:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

对于非均质流体,各点的密度不同,要确定空间某点流体的密度,可在包含该点的周围取一微元体积  $\Delta V$ , 若它的质量为  $\Delta m$ , 则该点的密度为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

重度表示单位体积流体所受的重力,以  $\gamma$  表示,国际单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ 。流体的密度和重度的关系为:

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

密度  $\rho$  是绝对量,它只与质量有关;而重度  $\gamma$  不是绝对量,它取决于重力加速度  $g$  的值,  $g$  随着位置的变化而变化。

温度和压强会影响流体的密度变化,在标准大气压下,不同温度下水和空气的密度可见表 1-1 和表 1-2。液体的密度随温度和压强的变化很小,一般实际工程中均视为常数,计算时一般采用  $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{水银}} = 13600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; 气体的密度随温度和压强的变化较大,在一个标准大气压条件下,  $0^\circ\text{C}$  时空气的密度  $\rho_{\text{空气}} = 1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 在标准大气压下水的物理特性

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	动力黏性系数 $\mu/(\times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$	运动黏性系数 $\nu/(\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$
0	999.8	9.805	1.792	1.792
5	1000.0	9.807	1.519	1.519
10	999.7	9.804	1.310	1.310
15	999.1	9.798	1.145	1.146
20	998.2	9.789	1.009	1.011

式中,流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 为速度在流层法线方向的变化率。在距离为 $dy$ 的上、下两流层间取矩形流体微元,如图 1-1 所示,因微元上、下层的速度相差 $du$ ,经时间 $dt$ ,微团除位移外,还有剪切变形 $d\gamma$ 。由于 $dt$ 很小, $d\gamma$ 也很小,因此有:

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du}{dy} dt$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-8)$$

因此,牛顿内摩擦定律又可写成:

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-9)$$

可见,速度梯度就是角变形速度,它是在切应力作用下发生的,因此也称为剪切变形速度。所以,牛顿内摩擦定律也可理解为切应力与剪切变形速度呈比例关系。比例系数 $\mu$ 称为动力黏性系数,简称黏度,单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

动力黏性系数是流体黏性大小的度量,在涉及黏度的许多问题中会经常同时出现 $\mu$ 和 $\rho$ 的比值。因此在实际计算中,人们常用运动黏性系数 $\nu$ (单位: $\text{m}^2/\text{s}$ )来表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

一般在相同条件下,液体的黏度要大于气体的黏度并随温度和压强的变化而变化,但其随压强的变化很小,通常可以忽略,而对温度变化较为敏感。其中,液体的 $\mu$ 值随温度的升高而减小,气体的 $\mu$ 值随温度的升高而增大(表 1-1、表 1-2)。这是由于液体分子间距较小,内聚力较大(内聚力是产生黏度的主要原因),随着温度升高,液体分子间距增大,内聚力减小,从而使液体黏度减小;气体分子间距大,内聚力很小,其黏度主要是气体分子动量交换的结果,温度升高时,气体分子运动加快,分子的动量交换速率加剧,黏度增加。流体的黏度在工程实际中可查阅相关资料获得。

牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体,即满足牛顿内摩擦定律的流体,如水、汽油、酒精、空气等。不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,如油漆、泥浆、血浆等。

#### 1.4.4 压缩性与膨胀性

流体的压缩性是指流体受压后,体积缩小,密度增大,除去外力后能恢复原状的性质。流体的膨胀性是指流体受热后,体积增大,密度减小,温度下降后能恢复原状的性质。液体和气体虽均属于流体,但其压缩性和膨胀性不一样,下面分别说明。

##### 1. 液体的压缩性与膨胀性

###### (1) 液体的压缩性

液体的压缩性用压缩系数来表示,表示在一定的温度下,压强增大 1 个单位时体积的相对缩小率。

某液体在压强为 $p$ 时,其体积为 $V$ ,当压强增加 $dp$ 时,体积将缩小 $dV$ ,则其压缩系数为:

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-11)$$

### 1.4.2 万有引力

物体之间具有互相吸引的性质,其吸引力称为万有引力。

在流体力学中,一般只需考虑地球对流体的引力,即重力,用符号  $G$  来表示,单位为 N 或 kN。重力  $G$  与质量  $m$ 、重力加速度  $g$  的关系是

$$G = mg = \rho Vg \quad (1-5)$$

### 1.4.3 黏性

流体具有流动性,静止时不能承受任何微小的切应力而无法抵抗剪切变形。但当流体处在运动状态时,若流体质点之间存在着相对运动,则质点间要产生内摩擦力,以抵抗其相对运动,这种性质称为黏性,内摩擦力称为黏滞力。流体的黏性是流体固有的属性,是流体中发生机械能损失的根源。

为了研究流体的黏性,假定两块平行平板足够大,其边缘条件可以忽略,两板距离  $Y$  很小,板间充满流体。下板固定不动,上板在力  $F$  作用下以速度  $U$  平行于下板运动。在边界处,流体微团黏附在壁面上,因而其相对于壁面的速度为 0,这就是无滑移条件,对一切黏性流体都适用。因此,与上板接触的流体速度一定是  $U$ ,与下板接触的流体速度为 0。在间距  $Y$  不太大和速度  $U$  不高时,两板间各流层的速度变化为线性相关。图 1-1 所示为黏性示意图。

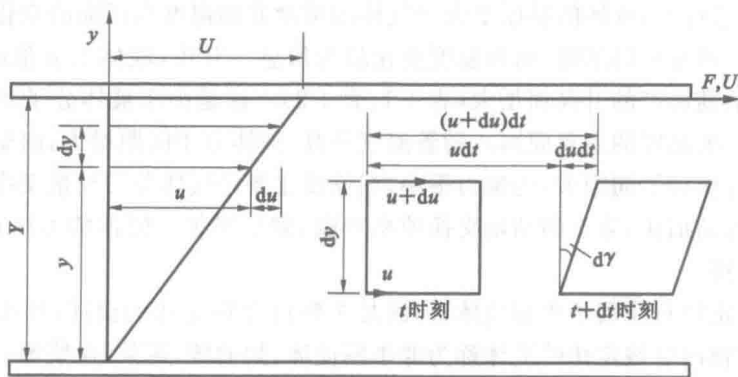


图 1-1 黏性示意图

由图 1-1 可知,上板带动黏附在板上的流层运动,并影响内部各流层的运动,速度快的带动速度慢的向前滑移,流层间存在的剪切力即为内摩擦力。

对于图 1-1 所示状态,实验证明有下列公式成立:

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

切应力表示为:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式(1-6)、式(1-7)称为牛顿内摩擦定律,即流体的内摩擦力  $F$  与流体的性质有关,与速度梯度  $\frac{du}{dy}$  成正比,与接触面积  $A$  成正比,与接触面上的压力无关。

续表

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	动力黏性系数 $\mu/$ ( $\times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )	运动黏性系数 $\nu/$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
25	997.0	9.777	0.895	0.897
30	995.7	9.765	0.800	0.803
40	992.2	9.731	0.654	0.659
50	988.0	9.690	0.549	0.556
60	983.2	9.642	0.469	0.478
70	977.8	9.589	0.406	0.415
80	971.8	9.530	0.357	0.367
90	965.3	9.467	0.317	0.328
100	958.4	9.399	0.284	0.296

表 1-2 在标准大气压下空气的物理特性

温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	动力黏性系数 $\mu/$ ( $\times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )	运动黏性系数 $\nu/$ ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
-40	1.515	14.86	14.9	9.8
-20	1.395	13.68	16.1	11.5
0	1.293	12.68	17.1	13.2
10	1.248	12.24	17.6	14.1
20	1.205	11.82	18.1	15.0
30	1.165	11.43	18.6	16.0
40	1.128	11.06	19.0	16.8
60	1.060	10.40	20.0	18.7
80	1.000	9.81	20.9	20.9
100	0.946	9.28	21.8	23.1
200	0.747	7.33	25.8	34.5



$\kappa$  的单位是压强单位的倒数, 即  $\text{Pa}^{-1}$ 。式(1-11)中的负值表示考虑液体受压,  $p$  增大,  $V$  减小, 为负值, 为使  $\kappa$  为正值, 故取负号。

根据液体质量守恒定律

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

得

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

所以, 压缩系数  $\kappa$  可表示为:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-12)$$

压缩系数的倒数是体积弹性模量, 用  $K$  (单位: Pa) 表示, 即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-13)$$

$K$  值越大, 表示液体越不容易压缩, 当  $K \rightarrow \infty$  时, 表示液体绝对不可压缩。

液体的压缩系数随温度和压强的变化而变化。水的压缩系数  $\kappa$  见表 1-3, 表中压强单位为工程大气压, 且  $1 \text{ at} = 98000 \text{ Pa}$ 。

表 1-3 水的压缩系数  $\kappa (\times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1})$

压强/at \ 温度/°C	5	10	20	40	80
0	0.540	0.537	0.531	0.523	0.515
10	0.523	0.518	0.507	0.497	0.492
20	0.515	0.505	0.495	0.480	0.460

## (2) 液体的膨胀性

液体的膨胀性用体积膨胀系数  $\alpha_v$  来表示, 它表示在一定的压强下, 温度每增加  $1^\circ\text{C}$ , 液体体积的相对变化率, 单位为  $\text{K}^{-1}$  或  $^\circ\text{C}^{-1}$ 。若液体的原体积为  $V$ , 温度升高  $dT$  后, 体积增加  $dV$ , 则其体积膨胀系数为:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-14)$$

$\alpha_v$  越大, 表示液体越容易膨胀。液体的膨胀系数随压强和温度的变化而变化。水的膨胀系数  $\alpha_v$  见表 1-4。

表 1-4 水的膨胀系数  $\alpha_v (\times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$

温度/°C \ 压强/at	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
100	0.43	1.65	4.22	5.48	7.04
200	0.72	1.83	4.26	5.39	