

# 第 1 章 流体的性质

---

## 学习要求：

1. 掌握力学模型，连续介质的假设，密度、比容、饱和蒸汽压力、压缩率等概念；
2. 掌握流体黏性、黏度的概念及计算，掌握牛顿内摩擦定律的建立，牛顿体和非牛顿体的定义和计算公式，理想流体的模型；
3. 了解表面张力的产生和计算方法，毛细管现象；
4. 掌握质量力、表面力定义和其物理意义；
5. 了解工程流体力学的发展史，工程流体力学的学习方法。

# 第 1 章 流体的性质



1.1 流体的基本概念

1.2 密度、比容和蒸汽压力

1.3 流体的压缩性

1.4 流体的粘性

1.5 液体的表面张力

1.6 作用在流体上的力

1.7 学习导论



## 1.1 流体的基本概念

### 1. 什么是流体？

流体指可以流动的物质，包括气体和液体。与固体相比，流体分子间的引力较小，分子运动剧烈，分子排列松散，这就决定了流体不能保持一定的形状，具有较大的流动性。

### 2. 研究流体力学的内容和方法

研究内容：

- (1) 流体在静止和运动时所遵循的基本规律。
- (2) 流体与固体间的相互作用。

## 1.1 流体的基本概念



### 研究方法：

(1) 理论方法：根据物理模型和物理定律建立描述流体运动规律的封闭方程组及相应的初始条件和边界条件，应用数学方法准确或近似地求解流场，揭示运动规律。

(2) 实验方法：应用模型实验理论，设计实验装置直接观测流动现象，测量流体的流动参数并加以分析和处理，然后从中得到流动规律。

### 3. 力学模型

质点：有质量、无形体（近似可忽略）

刚体：受力时形状和大小不变

固体：有质量，有变形，可抵抗拉、压、剪切力

流体：有质量，有变形，不可抵抗拉力、静止时不能抵抗剪切力

## 1.1 流体的基本概念



### 4. 流体的微团（质点）、微元体

相对于一般问题中的宏观特征尺寸小到可以被看成一个点，但仍含有足够多的流体分子。

### 5. 连续介质的假设

工程流体力学的主要任务是研究流体的宏观运动规律。因此认为流体充满一个空间时不留任何空隙，即把流体看作是连续介质。

有了流体的连续介质假设后，就可以使用**数学函数**来解决流体力学模型问题。

# 第 1 章 流体的性质



## 1.2 密度、比容、饱和蒸汽压力

### 1. 密度

**匀质流体**：单位体积流体所具有的质量， $\rho = \frac{m}{V}$  (kg / m<sup>3</sup>)

**非匀质流体**：某一点的密度表示为  $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$

此时密度是空间位置坐标和时间的函数，即  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ 。

在一个标准大气压（101.3kPa）下，纯水在 4°C 时的密度为

$$\rho_w = 1000 \text{ kg / m}^3$$

**流体的相对密度**：是指其密度  $\rho$  与标准大气压下 4°C 的纯水的密度

$\rho_w$  比值，又称**比重**（specific weight），用  $\gamma$  表示，即  $\gamma = \frac{\rho}{\rho_w}$

## 1.2 密度、比容、饱和蒸汽压力

### 2. 比容

定义：流体的比容是**单位质量的流体所占有的体积**，用希腊字母  $\nu$  来表示。 $\nu = \frac{1}{\rho}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

**与密度的关系为**  $\nu = \frac{1}{\rho}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

在气体流体力学中，经常使用比容（specific volume）这一物理量。

**完全气体**（perfect gas）：气体分子**只有质量没有体积**，分子之间完全没有作用力的气体。所有远离液体状态的常用气体在很大的常用温度和压力范围内，十分接近完全气体。完全气体满足气体状态方程式 (equation of state)，即

=

## 1.2 密度、比容、饱和蒸汽压力

### 3. 饱和蒸汽压力

液体的汽化是指液体由液态转化为汽态的过程。液体的汽化与温度、压力有一定的关系。在一定压力下，**温度升高**到一定数值时，液体会开始汽化，或在一定温度下，**压力降低**到一定数值时，液体也会**汽化**。

在一定的温度下，液体开始汽化的临界压力，称为该温度下液体的饱和蒸汽压力。用符号  $\boxtimes_{va}$  表示。

表 1-4 不同水温时的饱和蒸汽压 ( $H_{va} = \frac{p_{va}}{\rho g}$ )

水 温 (°C)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
饱和蒸汽压力 (mH <sub>2</sub> O)	0.06	0.09	0.12	0.24	0.43	0.75	1.23	2.02	3.17	4.82	7.14	10.33

当液体某处的压力低于饱和蒸汽压力时，液体将发生汽化。

注意：这里的  $\boxtimes_{va}$  表示绝对压力。与真空度  $\boxtimes_v$  的含义不同。

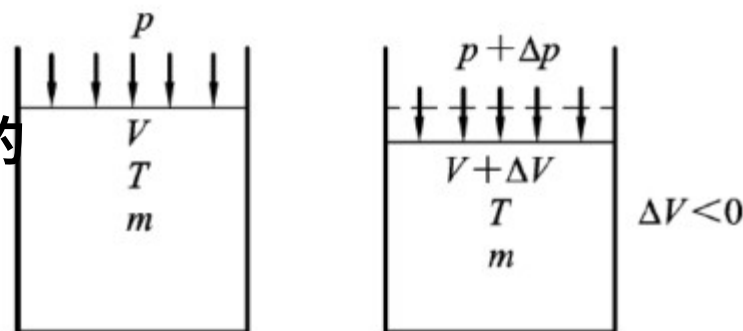




## 1.3 流体的压缩性

通常将液体看成是**不可压缩的流体**或非压缩性流体时，其误差非常小。但是，当液体的压力的变化迅猛且大时，**如水锤作用**，此时，液体的压缩性必须考虑的。

**流体的压缩率**：在某一温度下，  
体积为  $V$  的流体在压力微小变量  $\Delta p$  的作用下，流体体积减少了  $-\Delta V$ （体积增加为正）。单位体积的减少量（ $-\Delta V / V$ ）与压力变化量  $\Delta p$  之比，称为流体的压缩率，用符号  $\beta$  表示，即



$$\beta = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

## 1.3 流体的压缩性

☒ 值越大，流体的压缩性越大。工程上常用流体的压缩率的倒数来表征流体的压缩性，称为**流体的体积模量**（bulk modulus），用☒表示，单位为 Pa，即

$$= \frac{1}{\beta} = - \frac{dV}{V dP} = - \frac{dV}{V} \frac{1}{dP}$$

☒ 越大，流体的压缩性越小。

【例 1-2】温度为 10°C，体积为 1m³ 的海水，当压力增加了 7MPa 时，此时海水体积为多少。

解：查表 1-5 知，10°C 时海水的压缩率☒ =  $4.5 \times 10^{-10}$ ，由式（1-7）得海水的体积增加量☒☒为

$$\Delta V = - \frac{1}{\beta} \Delta P = -4.5 \times 10^{-10} \times 1 \times 7 \times 10^6 = -0.00315(\text{m}^3)$$

海水被压缩后的体积为

$$V' = V + \Delta V = 1 - 0.00315 = 0.997(\text{m}^3)$$



## 1.4 流体的黏性

### 1. 什么是流体的黏性和黏性力

流体所具有的阻碍流体流动，**即阻碍流体质点间相对运动的性质称为黏滞性**，简称黏性。

对液体来讲，黏性主要是由液体分子之间的引力引起的；

对气体来讲，黏性是由气体分子的热运动引起的。

当流体中存在层与层之间的相对运动时，快层对慢层施加一个拖动力使它加速，同时慢层对快层也施加一个阻力，**拖动力和阻力构成一对作用力和反作用力，这就是黏性的表现**。这一对大小相等方向相反的力称为流体的**内摩擦力或黏性力**，如图 1-2 所示。

## 1.4 流体的黏性

### 2. 牛顿内摩擦定律

实验研究表明，运动平板所受到的阻力与其运动速度、面积成正比，与两平板的间距成反比，而与接触面上的压力无关，设比例常数为 $\eta$ ，即

$$F = \eta \frac{du}{dy} A \quad (1-9)$$

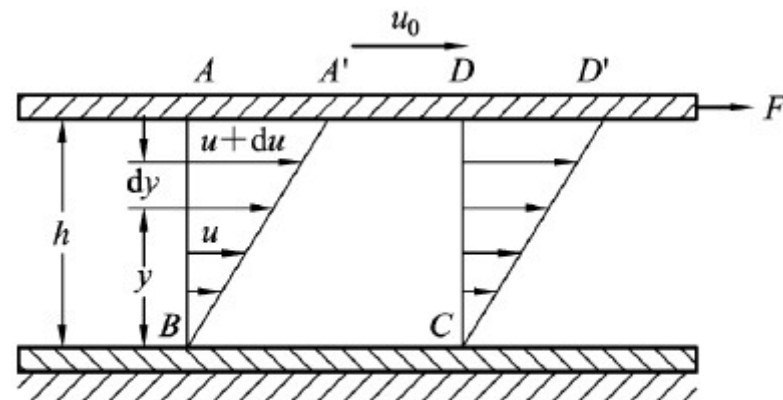


图 1-2 平行板间的黏性流体流动

$du/dy$  是单位时间内的切变形速度（即切变变形速度）。

在图 1-2 中可以证明 $\eta du/dy$  等于  $F/A$ 。因此，**平板单位面积上的摩擦力或剪应力**（shearing stress），以 $\tau$ 表示，单位为 Pa，即

牛顿内摩擦定律  $\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-10)$

注意区分式（1-9）和式（1-10）的模型

## 1.4 流体的黏性

上式不仅适用于平板的表面上，也可应用于流体内部具有速度梯度  $du/dy$  如图 1-3 所示的情况。

式 (1-10) 称为**牛顿黏性定律**，也称为**牛顿内摩擦定律**。满足此公式的流体也称为**牛顿流体**

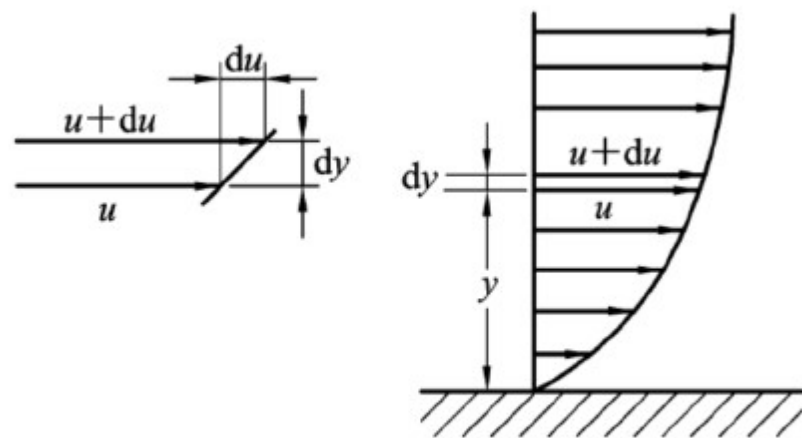


图 1-3 速度梯度和剪切应力

图 1-3 说明：流体沿壁面作层流流动，流层与壁面距离  $y$  的增加，速度分布的速度梯度存在着变化。在平行于距离壁面  $y$  处的平面上（称  $y$  平面），作用在  $y$  平面上的剪切应力  $\tau = \eta \frac{du}{dy}$ 。该剪切应力，在  $y$  平面上边的流体是**加速**增加  $y$  平面流体的速度，而在  $y$  平面下边的流体是**减慢**  $y$  平面流体的速度。

## 1.4 流体的黏性

牛顿内摩擦定律：

- (1) 符合牛顿内摩擦定律的流体称牛顿体，不适合为非牛顿体；
- (2) 静止液体，速度梯度为 0，所以没有粘性切应力；
- (3) 粘性力的大小与速度梯度有关，与压力关系不大；
- (4) 牛顿内摩擦定律只适应层流，不适用于紊流。因紊流除了有粘性力外，还存在复杂的紊流附加力。

### 3. 黏度和黏度的单位

式 (1-10) 比例常数  $\eta$  称为黏度。

$\eta$  的单位为 
$$[\eta] = \frac{[\tau]}{[v]} = \frac{(\text{N/m}^2) \text{m}}{\text{m/s}} = (\text{N/m}^2) \cdot \text{s}$$
$$= \text{Pa} \cdot \text{s}$$

因单位中含有动力因素， $\eta$  也称为流体的动力黏度。

## 1.4 流体的黏性



工程中还常用动力黏度和流体密度的比值来表示黏度，称为流体的运动黏度。

= -

$$\boxtimes \text{ 的单位为 } [ ] = \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} = \frac{[(\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2)/\text{m}^2] \cdot \text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

因单位中只有长度和时间量纲，故称运动黏度。

### 3. 影响黏性的因素

流体的黏性受压力和温度的影响。

(1) 压力影响——在通常压力下，压力对流体的黏性影响很小；在高压下，流体（包括液体和气体）的黏性随压力的升高而增大。

## 1.4 流体的黏性

(2) 温度的影响——黏性受温度的影响很大。温度升高，液体分子间的吸引力减少，液体的黏性降低；气体分子的热运动越强烈，动量交换就越频繁，气体的黏性也就越大。如图 1-4 所示。

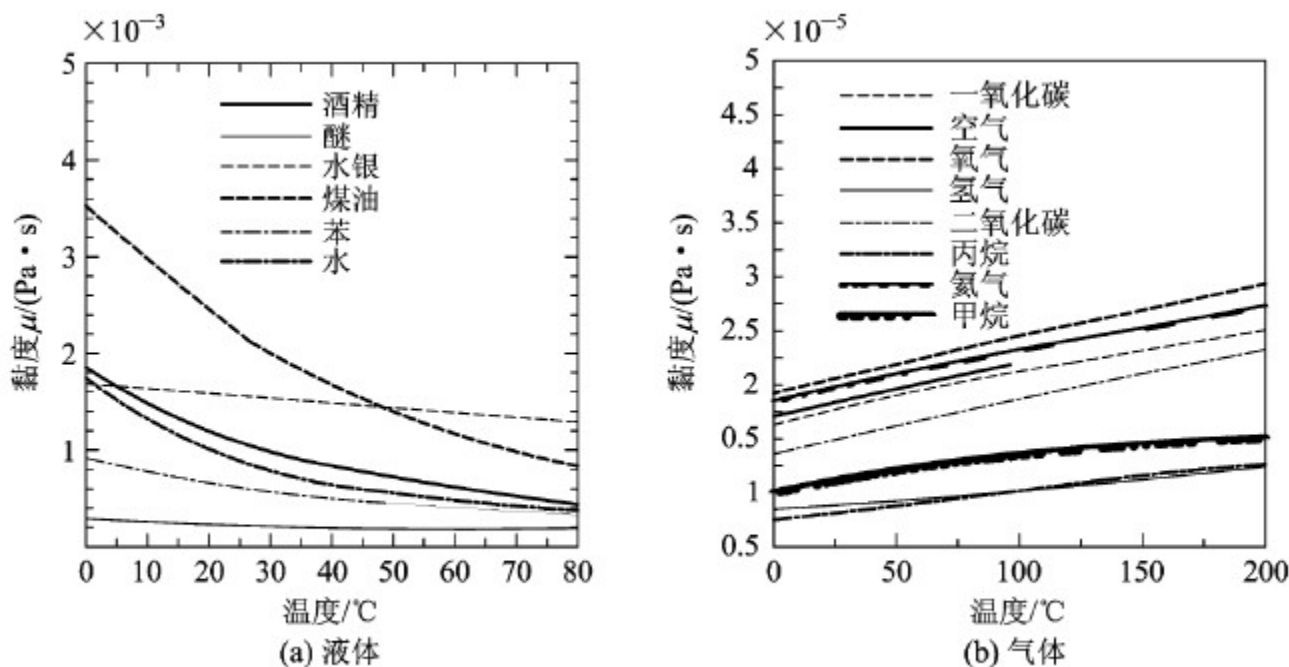


图 1-4 各种流体的黏度



## 1.4 流体的黏性

图 1-5 中可以看出，水的 $\nu$ 值大于空气的 $\nu$ 值，但水的 $\eta$ 值却小于空气的 $\eta$ 值。

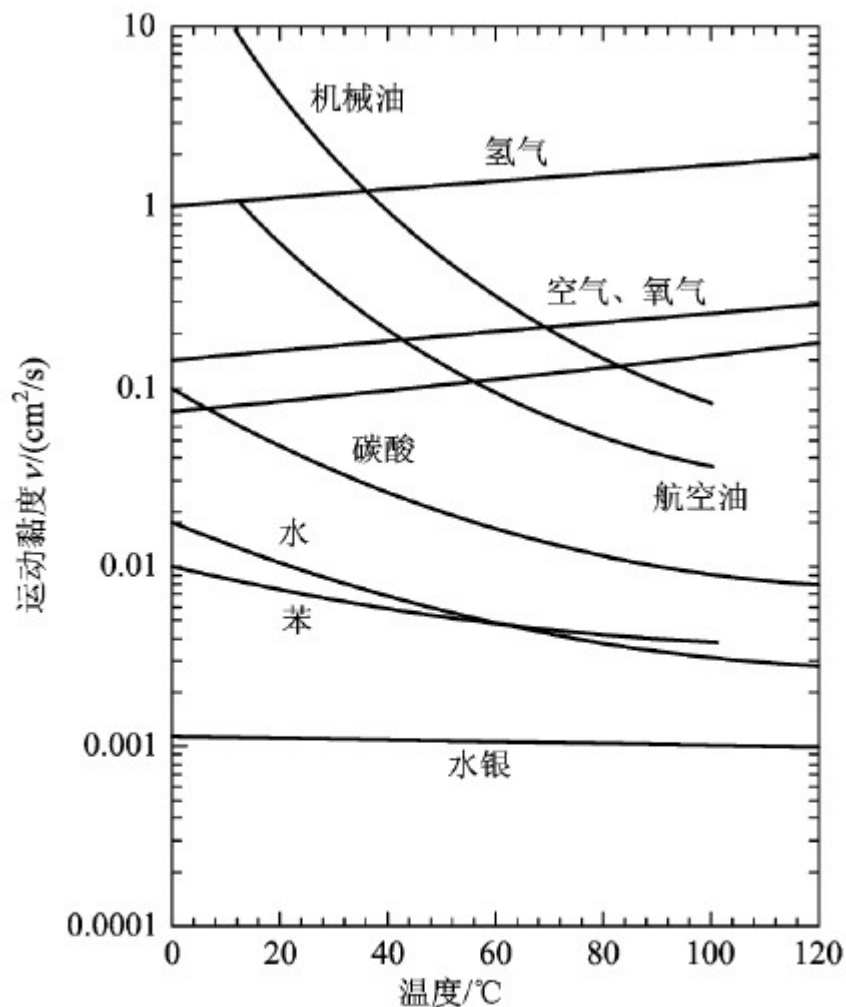


图 1-5 各种流体的运动黏度

## 1.4 流体的黏性



### 4. 非牛顿流体

不服从牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体（non-Newtonian fluid），此时内摩擦力 $\tau$ 和速度梯度 $du/dy$ 并不是简单的直线关系。

#### （1）塑性流体

这类流体是由液体及悬浮在其中的固体微粒所组成的胶状体。它们有一个保持不产生剪切变形的初始应力 $\tau_0$ ，克服 $\tau_0$ 后切应力 $\tau$ 才与 $du/dy$ 成正比，即

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy}$$

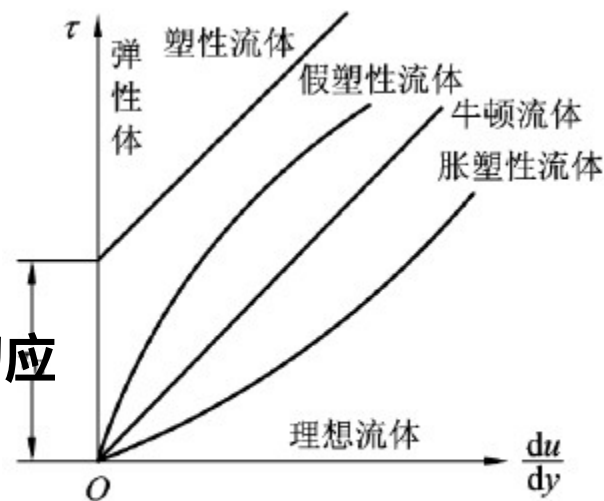


图 1-6 牛顿流体与非牛顿流体

式中， $\tau_0$  初始切应力， $N/m^2$ ； $\mu_p$  是塑性黏度， $Pa \cdot s$ 。  
粘土泥浆、沥青、含蜡原油、润滑脂等常属于塑形流体。

## 1.4 流体的黏性

### (2) 假塑性流体

其结构性较弱，一受到力的作用就立即流动而不具有极限静切应力（ $\tau_0$ ），流动情况与塑性流体流动的初期情况比较相似，故将这种流体称为假塑性流体。

假塑性流体的流变方程以“幂定律”形式表示，即

$$\tau = \eta \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

式中， $\eta$ 是稠度系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $n$ 是流性指数，无因次量。凡是流变规律符合幂定律形式的流体，称为幂律流体。

高分子溶液、油漆、纸浆液、乳化液属于假塑性流体。

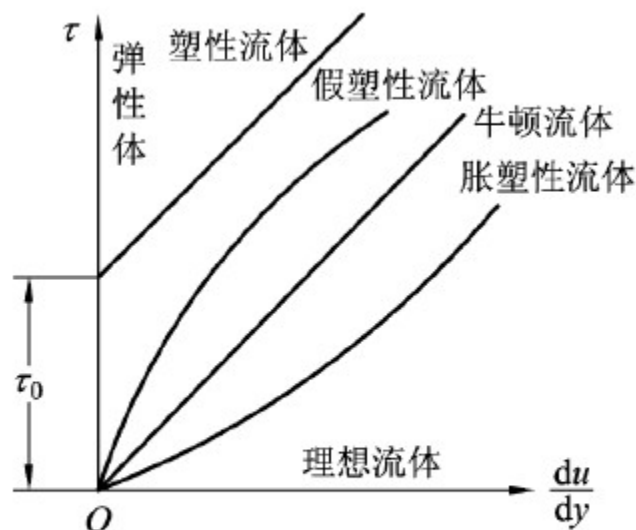


图 1-6 牛顿流体与非牛顿流体

## 1.4 流体的黏性



### (3) 胀流型流体

$\frac{d}{d}$  的增大， $\square - \frac{d}{d}$  曲线的斜率也增大。

淀粉水，沙子的水混合物属于胀流型流体

非牛顿流体在化工、轻工、食品等工业中常见，是流变学的研究对象。本书只讨论牛顿流体。

### 5. 理想流体

实际流体都具有黏性。当研究某些流动问题时，由于流体本身黏度小，或者所研究区域速度梯度小等，使黏性力与其他力，例如惯性力、重力等相比很小，可以忽略。此时，假设动力黏度  $\square = 0$ ，即流体没有黏性，这种无黏性的假想的流体模型称为理想流体。



## 1.4 流体的黏性

【例1-3】将长度 $l = 1\text{m}$ ，直径 $d = 200\text{mm}$ 水平放置的圆柱体。置于内径 $D = 206\text{mm}$ 的圆管中以 $u = 1.5\text{m/s}$ 的速度移动。已知间隙中油液的相对密度为0.92，运动黏度 $\nu = 5.61 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ，求所需拉力 $F$ 为多少？

解 间隙中油的密度：

$$\rho = \rho_w \cdot s = 1000 \times 0.92 = 920(\text{kg}/\text{m}^3)$$

动力黏度：

$$\mu = \rho\nu = 920 \times 5.61 \times 10^{-4} = 0.51612(\text{Pa} \cdot \text{s})$$

根据牛顿内摩擦定律，将圆柱体表面沿轴向切断，展开成平面，划成图1-2模式，运用式（1-9），则

$$F = \mu A \frac{u-0}{\frac{D-d}{2}} = 0.51612 \times 3.14 \times 0.2 \times 1 \times \frac{1.5}{\frac{0.206-0.2}{2}} = 162.06(\text{N})$$

【例 1-4】液体粘度测定方法的原理



## 1.5 液体的表面张力

当液体与气体或固体接触时，在液体内部，分子的内聚力使分子互相吸引而保持着平衡。在液体的表面，这种内聚力向液体内部作用，使液体表面面积变小，在该状态下，液体表面被紧紧地拉向液体内部，液体的自由表面似拉紧的弹性薄膜。液体表面单位长度上的这种拉力就称为**表面张力**（surface tension），用符号  $\sigma$  表示，单位为  $\text{N/m}$ 。

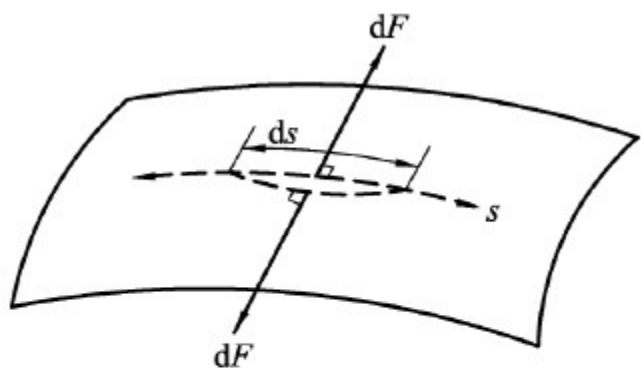


图 1-8 表面张力

在液体的表面曲线上取微元量为  $d$ ，与  $d$  垂直方向上液体内部拉力为  $d$ ，如图 1-8 所示，则

$$= \frac{d}{d}$$

# 1.5 液体的表面张力

一般表面张力随温度变化，温度升高，表面张力减小。液体表面张力与表面接触的流体种类有关，表 1-6 给出了各种液体的表面张力。

表 1-6 各种液体的表面张力(20℃)

液体(接触流体)	表面张力 $\sigma$ /(N/m)
水(空气)	0.0728
水银(真空)	0.472
水银(空气)	0.476
乙醇(空气)	0.0223
机械油(空气)	0.0311

## 1.1 液滴球面压差与表面张力

球状液滴场合，其表面张力向中心收缩，球的内部压力  $p_i$  大于球的外部压力  $p_o$ ，如果将球状液体切开，取上半球为分离体，如图 1-9 所示。球的半径为  $r$ ，则半球所受到的张紧力和其所受到的

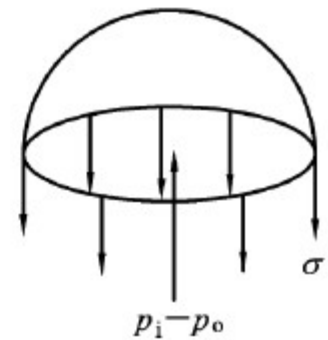


图 1-9 液滴球面压差与表面张力

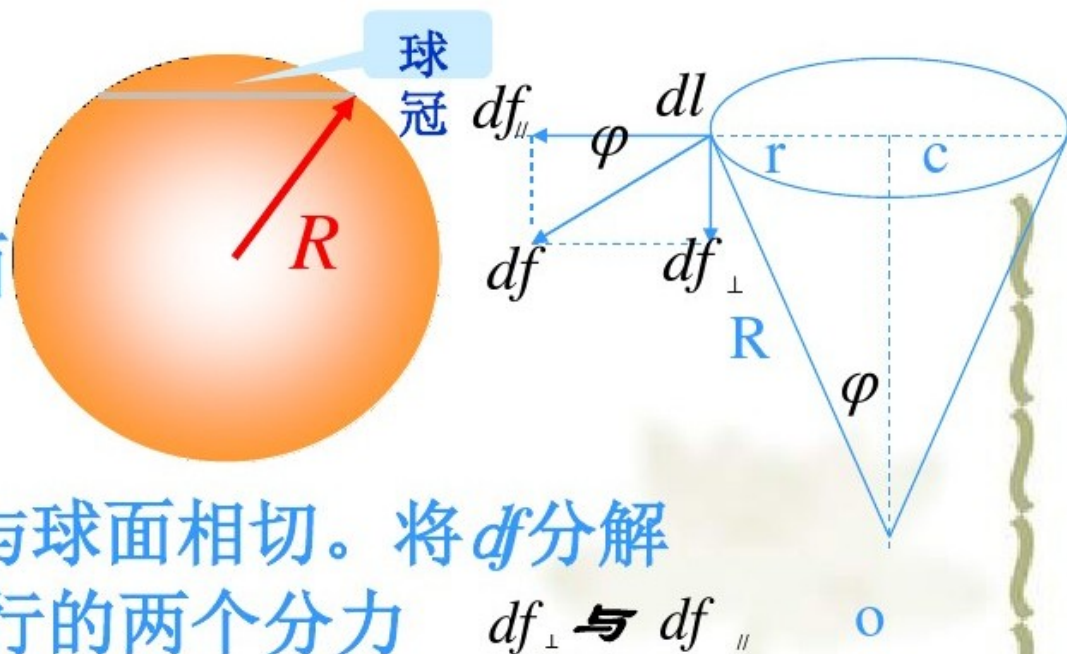
压差力相平衡，则

$$2 \pi r \sigma = (p_i - p_o) \pi r^2$$

$$p_i - p_o = \frac{2 \sigma}{r} \quad \text{拉普拉斯公式}$$



如图球形液面上的一小液面，在周界上取一线元 $dl$ ，作用在 $dl$ 上的表面张力  $df = \gamma dl$

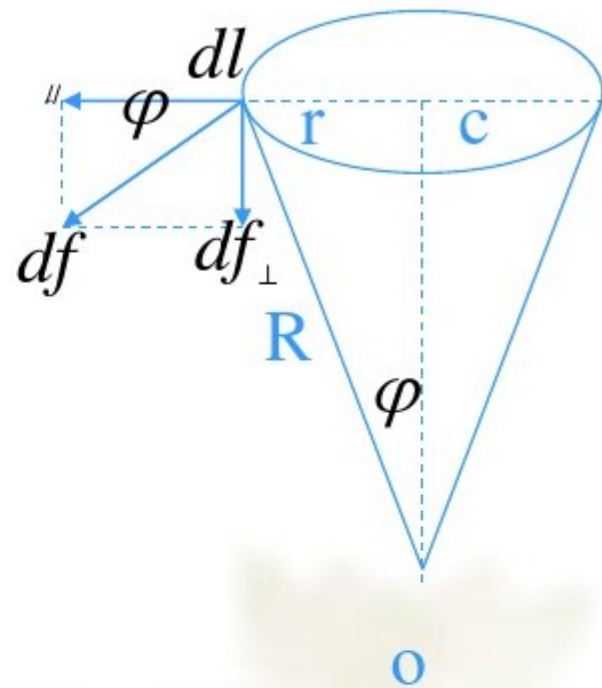


$df$ 力的方向垂直 $dl$ 且与球面相切。将 $df$ 分解为与半径 $r$ 垂直和平行的两个分力  $df_{\perp}$  与  $df_{\parallel}$

$$df_{\parallel} = df \cos \varphi = \gamma dl \cos \varphi$$

$$df_{\perp} = df \sin \varphi = \gamma dl \sin \varphi$$

由圆对称性，在圆周上的其他线元上，作用着同样大小的表面张力，这些力的水平分力相互抵消，垂直分力方向相同，合力为：



$$f_{\perp} = \int df_{\perp} = \int_0^{2\pi r} \gamma \sin \varphi dl = \gamma \sin \varphi \cdot 2\pi r$$

$$\text{由于 } \sin \varphi = \frac{r}{R}, \text{ 则 } f_{\perp} = \gamma \frac{2\pi r^2}{R}$$

$$f_{\perp} = \gamma \frac{2\pi r^2}{R}$$

附加压强

$$p_s = \frac{f_{\perp}}{\pi r^2} = \frac{2\pi r^2 \gamma}{R \pi r^2} = \frac{2\gamma}{R}$$

——拉普拉斯球公式

球形液面附加压强与表面张力系数成正比，与球面半径R成反比。半径越小，附加压强越大；半径越大，附加压强越小；半径无限大时，附加压强等于零，这正是水平液面的情况。

$$\text{凸液面: } p = p_0 + \frac{2\gamma}{R}$$

$$\text{凹液面: } p = p_0 - \frac{2\gamma}{R}$$

## 1.5 液体的表面张力

表面张力是很小的，在一般情况下可以忽略不计，但在水滴和气泡的形成、液体的雾化、以及气液两相的传热与传质研究中，将是不可忽略的重要因素。

### 2. 接触角

液体分子间的吸引力称为内聚力。

液体与固体分子间的吸引力称为附着力。

如图 1-10 所示，因水内聚力小于水与玻璃壁面间的附着力，水湿润玻璃壁面并沿壁面伸展，致使水面向上弯曲，表面张力把管内液面向上拉高。水银相反。

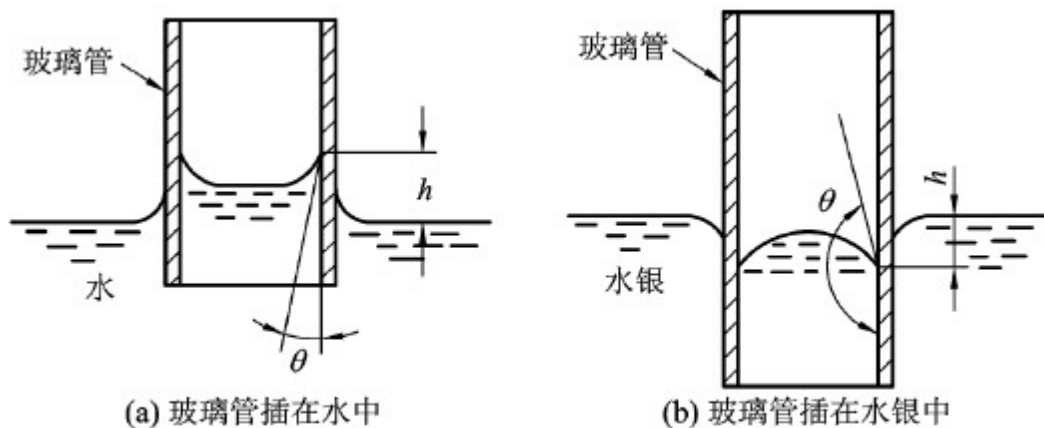


图 1-10 毛细管现象



## 附着力

一、这种吸引力是两种物质分子间存在着相互作用的吸引力的一种表现，只有当两种物质分子间的距离非常小时（小于  $10^{-8}$  米）才能显示出来。因为从微观角度看，固体的表面往往是凹凸不平的，所以两种固体接触时不能显示出附着力的作用。

二、由于液体与固体能够密切接触，因此液体与固体间就能显示出附着力的作用。液体浸润固体的现象，就是由于在与固体相接触的液体附着层中，附着力发生作用的结果，当**附着力大于液体的内聚力时，液体就会浸润固体。**

## 1.5 液体的表面张力

**接触角：**当液体与固体壁面接触时，作液体表面的切面，此切面与固体壁在液体内部所夹部分的角度称为接触角。当为锐角时，液体润湿固体，当为钝角时，液体不润湿固体。

### 3. 毛细管液面平均高度的计算

在与空气接触密度为的液体中，如图 1-11 所示，半径为的毛细管铅直地插入液体中，如果接触角小于  $90^\circ$ ，那么液体在管内是上升的。

管内的液面可近似地看作是一个向上凹的半径为的球面，则球面的半径  $R = r_0 \cos \theta$ 。由于表面张力的作用，液面内液体的压力  $p_w$  低于液面上空气的压力  $p_0$ 。则

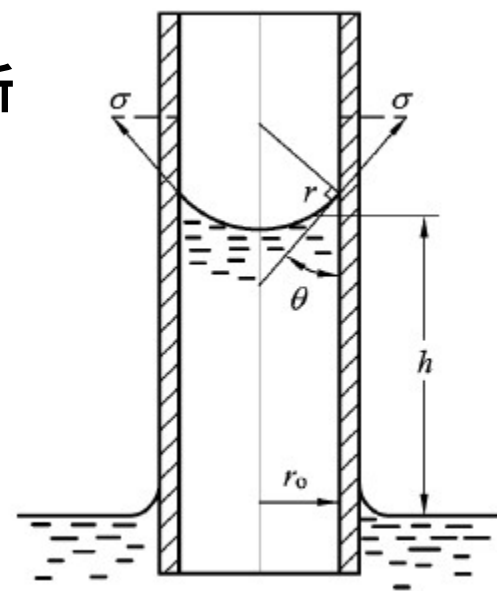


图 1-11 细管表面张力

## 1.5 液体的表面张力

$$\Delta p = p_0 - p_w = \frac{2\sigma}{r_0}$$

这个压力差给管内液体提供一个向上的力（基础是附着力），即

$$F_{\text{up}} = \Delta p \cdot \pi r_0^2 = \pi r_0^2 \cdot \frac{2\sigma}{r_0} = 2\pi r_0 \sigma \cos\theta$$

此力与被拉高部分的液柱重力相平衡，即

$$2\pi r_0 \sigma \cos\theta = \rho g V = \rho g \pi r_0^2 h$$

式中， $h$ 为管内液面平均高度

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g}$$

液体为水时，接触角 $\theta = 0^\circ$ ，则水面上升高度为

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g}$$

## 1.5 液体的表面张力

应用上式，要满足以下条件：毛细管的直径  $d < 2.5\text{mm}$ ，毛细管的内壁要非常清洁，计算的高度才与实际情况一致。毛细管的直径增大或管内表面不很干净，毛细高度  $h_c$  都会减小，对于直径大于  $12\text{mm}$  的管子，可以忽略毛细力的作用。

【例 1-5】  $20^\circ\text{C}$  水在直径为  $2\text{mm}$  的干净的玻璃管内上升高度为  $35\text{mm}$ ，求水实际的静态高度是多少？

解：  $20^\circ\text{C}$  水的  $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$ ，查表 1-6，  $\sigma = 0.0728\text{N/m}$

干净玻璃管的  $\theta = 0^\circ$

$$\text{所以 } h_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g d} = \frac{2 \times 0.0728 \times 1}{998.2 \times 9.8 \times 0.001} = 0.0149\text{m} = 14.9\text{mm}$$

水在管中实际的静态高度  $= 35 - 14.9 = 20.1\text{mm}$



# 第 1 章 流体的性质

## 1.6 作用在流体上的力

### 1. 质量力

质量力作用在每个流体的质点上，并与流体质量成正比，它是由流体的质量而引起的力，不是因流体与其它物体接触而产生的，属于非接触力，常见的有：重力和惯性力。

单位质量流体所受到的质量力为 $\vec{f}$ ，则：

$$= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{F}_i}{\sum m_i} = \frac{\sum \vec{F}_i}{\sum m_i} + \frac{\sum \vec{F}_i}{\sum m_i} + \frac{\sum \vec{F}_i}{\sum m_i} = \quad + \quad +$$

流体力学中经常遇到作用在流体上的质量力只有重力的情形，如果取铅直向上的方向为 $\vec{e}_z$ 轴的正方向，则有

$$= \quad = 0, \quad \vec{f} \cdot \vec{e}_z = -g/\quad = -g$$

## 1.6 作用在流体上的力

### 2. 表面力

表面力是作用于所研究的流体表面上，并与作用面的面积成正比。表面力是由和流体相接触的其它流体或物体作用在分界面上的力，属于接触力，如大气压力。

表面力不仅指作用在流体外表面上的力—外力，也包括作用在流体内任意两部分流体接触面上的力—内力。在流体力学中，常从流体中隔离出一部分流体作为研究对象，这时作用在隔离体表面上的力就是外力，尽管这些力是流体内部的相互作用力，我们仍将其称为表面力。

由于流体是连续介质，其表面力不是一个集中的力，而是沿表面连续分布的，因此，在流体力学中，常用单位面积上的表面力，其单位为 Pa 或  $\text{N/m}^2$ 。

## 1.6 作用在流体上的力

作用在图 1-12 所示的微元面积  $\Delta A$  上的力用  $\Delta F$  表示，则单位面积受到的表面力  $\Delta F_s$  可表示为

$$s = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

将  $\Delta F$  分解为法向分量  $\Delta F_n$  和切向分量  $\Delta F_\tau$ ，法向分量就是物理学中的压强，流体力学中称之为压力，两分量的表示如下：

$$= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}$$

$$= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta F_\tau}{\Delta A}$$

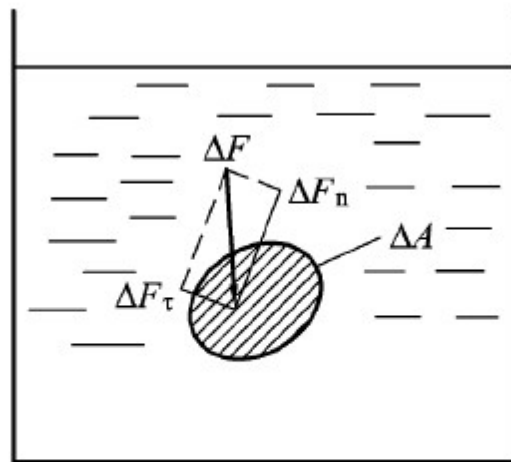


图 1-12 作用在流体上的力

## 1.6 作用在流体上的力

压力作用在流体表面的合力称为**总压力**（total pressure），用 $F$ 表示，则

$$F = \iint_A p dA$$

同理，剪切力的合力表示为

$$T = \iint_A \tau dA$$



## 1.7 工程流体力学学习导论

### 1. 流体力学的发展概况

(1) 中国的经验流体力学，治水。

(2) 公元前 250 阿基米德浮力定律

(3) 1643 年，托里拆利 (E.Torricelli) 论证了孔口出流的基本规律。

(4) 1650 年帕斯卡 (B.Pascal) 提出了液体中压力传递原理—帕斯卡原理。

(5) 1686 年牛顿建立了流体内摩擦定律。奠定黏性流体力学理论基础。

(6) 1738 年伯努利 (D.Bernoulli) 推导出了流体位置势能、压力势能和动能之间的能量转换关系—伯努利方程。

## 1.7 工程流体力学学习导论



(7) 1755 年欧拉 (L.Euler) 建立理想流体的运动微分方程。

(8) 纳维尔 (C. L. M. H. Navier) 和斯托克斯 (G. G. Stokes) 建立黏性流体运动微分方程。

(9) 雷诺 (O. Reynolds) 1853 年用实验证实了黏性流体的两种流动状态—层流和紊流的客观存在。

(10) 普朗特 (L. Prandtl) 1904 年发表了《关于摩擦极小的流体运动》的学术论文，建立了边界层理论，解释了阻力产生的机制。这一理论也是现代流体力学的起点。

(11) 儒科夫斯基从 1906 年起，发表了《论依附涡流》等论文，找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系，建立了二维升力理论的数学基础。

## 1.7 工程流体力学学习导论



(12) 卡门 (Kamen) 在 1911~1912 年连续发表的论文中, 提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论。

(13) 布拉休斯 (H. Blasius) 在 1913 年发表的论文中, 提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式。尼古拉兹 (J. Nikuradze) 在 1933 年发表的论文中, 公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果—尼古拉兹曲线, 据此他还给紊流光滑管和紊流粗糙管的理论公式选定了应有系数。

(14) 科勒布茹克 (C. F. Colebrook) 在 1939 年发表的论文中, 提出了把紊流光滑管区和紊流粗糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。

(15) 莫迪 (L. F. Moody) 在 1944 年发表的论文中, 给出了他绘制的实用管道的当量糙粒阻力系数图—莫迪图。

(16) 钱学森、郭永怀, 空气动力学、两弹一星元勋



### 2. 流体力学的应用

流体及流体力学现象充斥在我们生活的各个方面，如云彩的漂浮、鸟的飞翔、水的流动、说话和声音等普遍存在于我们日常生活中；管道内液体流动、风道内气体的流动、空气阻力和升力、建筑物上风力的作用；石油通过地质结构的运动、射流、润滑、燃烧等都是存在于生活及生产各个方面。





# 学习方法

1. 概念的确立，黏性的有无对流体的影响，可压缩性与不可压缩性对流体的影响等等。  
○
2. 注意质量守恒、能量守恒、动量守恒、热力学第二定律（熵）的流体力学应用。
3. 理论与实验验证结合。