



# 第6篇 流体力学、传热学 及气动自动学基础

**主编单位**

北京化工学院

**合稿人**

夏焕彬

**编写人**

夏焕彬 黄玉洁

**特约编辑**

何国森

CA74/2206

## 常用符号表

$A$ ——截面积 有效面积	$r$ ——半径
$a$ ——长度、音速	$s$ ——焯、拉氏变换算子、比重
$b$ ——厚度	$T$ ——绝对温度K
$c$ ——比热、气容、流容、弹簧刚度	$T_d$ ——微分时间
$c_p$ ——定压比热	$T_i$ ——积分时间
$D$ ——管内径	$t$ ——时间、温度 $^{\circ}\text{C}$
$d$ ——管内径	$u$ ——内能、流体流速
$E$ ——辐射强度	$u_a$ ——流体平均流速
$e$ ——管粗糙度、常数	$V$ ——体积、容积
$f$ ——频率	$W$ ——功
$F$ ——力、浮力	$W_i(s)$ ——对象干扰通道传递函数
$G$ ——重量流量、重量	$W_x(s)$ ——对象调节通道传递函数
$g$ ——重力加速度	$W_f(s)$ ——前馈调节器传递函数
$H$ ——液柱高度	$W_c(s)$ ——反馈调节器传递函数
$h$ ——阻力损失、焓、位移量	$X_c$ ——容抗
$k$ ——流体体积弹性系数	$Z$ ——位头
$K_p$ ——调节器放大倍数	$\alpha$ ——体积膨胀系数、流量系数、对流给热系数
$K_d$ ——微分增益	$\beta$ ——角度、压缩率、相位系数
$k$ ——绝热指数	$\gamma$ ——重度
$L$ ——长度	$\delta$ ——厚度、边界层厚度
$l$ ——管长	$\varepsilon$ ——黑度、对流传热尺寸修正系数
$M$ ——质量、气体分子量	$\zeta$ ——局部阻力系数
$M_c$ ——马赫数	$\eta$ ——流体动力粘度
$n$ ——公斤分子数	$\theta$ ——温度差
$p$ ——压强	$\lambda$ ——波长、导热系数、摩擦系数
$\Delta p$ ——压差	$\nu$ ——流体运动粘度
$p_i$ ——分压力	$\rho$ ——密度
$p_s$ ——饱和压力	$\sigma$ ——黑体辐射系数
$Q$ ——流体体积流量、导热量	$\tau$ ——剪切力、时间
$q$ ——热量、弹簧张力	$\phi$ ——相频特性、相位角
$R$ ——通用气体常数、半径、气阻、流阻	$\varphi$ ——相对湿度、形状系数
$R_c$ ——雷诺准数	$\pi$ ——圆周率
$R_{cr}$ ——临界雷诺准数	

# 第1章 流体力学基础

## 1 流体的一般性质

### 1.1 理想流体与实际流体

流体是气体和液体的总称,按其流动性质可分为理想流体和实际流体。

凡是没有粘滞性的流体,称之为理想流体或非粘性流体。实际上所有流体都具有不同程度的粘滞性,故称之为实际流体或粘性流体。为了分析研究流体运动之方便,常把某些可以忽略其粘滞性的实际流体看成为理想流体。例如,静止流体、匀速直线流动的流体、低速流动的空气等,因为其粘滞性对流体流动状态的影响甚小,故可看成理想流体。

实际流体沿管壁流动或物体在实际流体中运动时,由于粘滞性的影响,将使流体的流动或物体的运动受到阻碍,使流体偏离理想流体的性质。在一般情况下,要想精确地求得实际流体的流动状态是非常困难的。为方便计,常常首先研究理想流体的流动状态,再引入粘性修正系数,最后近似求得实际流体的复杂流动状态。

### 1.2 流体的重度和比重

#### 1.2.1 流体的重度

在重力场中,均匀流体的重度 $\gamma$ 等于其重量 $G$ 与体积 $V$ 之比值。写成

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (6.1-1)$$

对于非均匀流体

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (6.1-2)$$

式中  $\gamma$ ——流体重度

$\Delta G$ 、 $G$ ——流体重量

$\Delta V$ 、 $V$ ——流体体积

如果采用公制单位,重量单位为 $\text{kg}$ ,体积单位为 $\text{m}^3$ ,则重度单位

$$\gamma = \frac{G}{V} = \text{kg}/\text{m}^3$$

如果采用国际单位[SI]制,重量单位为 $\text{kgm}/\text{s}^2$ 或牛顿( $\text{N}$ ),体积单位为 $\text{m}^3$ ,则重度单位

$$\gamma = \frac{G}{V} = \text{N}/\text{m}^3$$

#### 1.2.2 流体的比重

均匀流体的比重 $S$ 等于其重度 $\gamma$ 与纯水在 $4^\circ\text{C}$ 时的重度 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ 之比值。写成

$$S = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6.1-3)$$

比重在数值上也等于流体的密度或重量与 $4^\circ\text{C}$ 时纯水的密度或重量之比值。纯水在 $4^\circ\text{C}$ 时的重度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,其比重定为1,所以流体的重度在数值上等于它的比重的1000倍。

### 1.3 流体的密度与比容

#### 1.3.1 流体的密度

均匀流体的密度 $\rho$ 等于其质量 $M$ 与体积 $V$ 之比值。写成

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (6.1-4)$$

如果采用公制单位,质量 $M$ 的单位是 $\text{kg}$ , $\text{s}^2/\text{m}$ ,故密度单位是

$$\rho = \frac{M}{V} = \text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

如果采用国际单位[SI]制,质量单位是 $\text{kg}$ ,故密度单位是

$$\rho = \frac{M}{V} = \text{kg}/\text{m}^3$$

因为流体的重量与质量的关系是

$$G = Mg$$

式中  $g$ ——重力加速度

所以流体的重度与密度的关系可以写成

$$\gamma = \rho g \quad (6.1-5)$$

必须注意,(6.1-5)式只适于同一单位制中

换算。如重度单位是 $\text{kgf}/\text{cm}^3$ ，则密度单位必须用 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 。

### 1.3.2 流体的比容

均质流体的比容 $v$ 等于其体积与重量之比值。

写成

$$v = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (6.1-6)$$

可见，比容是重度的倒数。

## 1.4 流体的压强与大气压强

### 1.4.1 流体的压强

流体垂直作用于单位面积上的压力称为压强。

写成

$$p = \frac{F}{A} \quad (6.1-7)$$

式中  $p$ ——作用面上流体的压强  $\text{kgf}/\text{cm}^2$

$F$ ——作用面上流体的总压力  $\text{kg}$

$A$ ——作用面上受压面积  $\text{cm}^2$

若作用面上的压强不是均匀分布，可用点压强精确地反映作用面上各点的压强。点压强可用下式表示

$$p_d = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (6.1-8)$$

流体的压强有两个基本特性。其一是压强的方向与作用面垂直并指向作用面；其二是任意一点各方向的流体压强均相等。

### 1.4.2 大气压强

空气的重量对于地球表面所产生的压强称为大气压强。大气压强与地势的高低、场所的温度有关。通常以纬度 $45^\circ$ 的海面上，温度为 $0^\circ\text{C}$ 时，能与 $760\text{mmHg}$ 相平衡的大气压强称为一个标准大气压强或物理大气压。写成

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= \frac{G}{A} = \rho g H \\ &= 13.596 \times 980.665 \times 76 \\ &= 1.0133 \times 10^6 \text{ dyn}/\text{cm}^2 \end{aligned}$$

式中  $G$ ——水银重量

$A$ ——水银柱截面积

$\rho$ ——水银密度

$H$ ——水银柱高度

通常把 $1\text{dyn}/\text{cm}^2$ 叫做1微巴( $\mu\text{bar}$ )，于是

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 1.0133 \times 10^6 \mu\text{bar} \\ &= 1.0133 \times 10^3 \text{ mbar (毫巴)} \\ &= 1.0133 \text{ bar (巴)} \end{aligned}$$

对于工程单位制来讲

$$1\text{atm} = \frac{1.0133 \times 10^6}{980.665} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2$$

$1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 称为1工程大气压，记为 $\text{at}$ 。工程上常把标准大气压和工程大气压等同起来不加区别。但是在低于 $1\text{atm}$ 的系统中，这种等同会带来较大的误差。

绝对真空下的压强称为绝对零压。以绝对零压为基准来表示的压强叫绝对压强，记为 $\text{abs}$ 。

测量流体压强用的压力表上的读数叫表压，它是流体绝对压强与该处大气压强的差值。

如果被测流体的绝对压强低于大气压强，则压力表所测得的压强值称为真空度。

绝对压强、大气压强、表压、真空度之间的相互关系如图6.1-1所示。

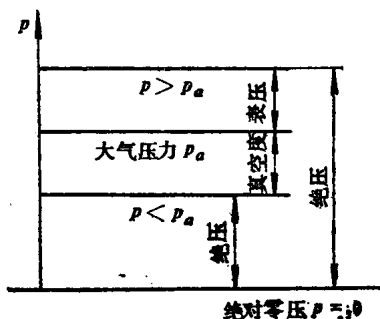


图6.1-1 绝对压强、大气压强、表压及真空度的相互关系

离海平面高度 $H\text{km}$ 时，大气的温度 $t$ ，绝对压强 $p$ 、空气密度 $\rho$ 可用下述诸式表示。

当 $H \leq 11\text{km}$ 时：

$$\begin{aligned} t &= t_0 - 6.5H^\circ\text{C} \\ p &= p_0 (1 - 0.02257H)^{5.256} \text{ mmHg abs} \\ \rho &= \rho_0 (1 - 0.02257H)^{4.256} \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4 \end{aligned}$$

当 $H > 11\text{km}$ 时：

$$\begin{aligned} t &= -56.5^\circ\text{C} \\ p &= p_0 \times 1.266e^{-0.1578H} \text{ mmHg abs} \\ \rho &= \rho_0 \times 1.684e^{-0.1578H} \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4 \end{aligned}$$

式中  $t$ ——高度为 $H$ 处大气温度 $^\circ\text{C}$

- $p$ ——高度为  $H$  处绝对压强 mmHg abs
- $\rho$ ——高度为  $H$  处大气密度  $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$
- $t_0$ ——海面上大气温度  $15^\circ\text{C}$
- $p_0$ ——海面上大气压强 760 mmHg
- $\rho_0$ ——海面上大气密度  $0.125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

### 1.5 流体的压缩性与膨胀性

#### 1.5.1 流体的压缩性

流体的体积随压力增高而缩小的性质叫流体的压缩性。当温度不变时，流体的压缩性可用单位压力所引起的体积变化率来表示，称为流体体积压缩系数。体积压缩系数  $\beta$  可用下式表示：

$$\beta = -\frac{\Delta V}{V} / \Delta p = -e / \Delta p \quad (6.1-9)$$

- 式中  $\beta$  ——流体体积压缩系数
- $V$  ——流体初始体积  $\text{cm}^3$
- $\Delta V$  ——流体体积压缩量  $\text{cm}^3$
- $\Delta p$  ——压力增量  $\text{kg}/\text{cm}^2$

$e (= \frac{\Delta V}{V})$  ——流体体积变化率

工程上常用体积弹性系数来衡量流体可压缩性的大小。体积弹性系数  $K$  与体积压缩系数  $\beta$  的关系可表示为：

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{e} \quad (6.1-10)$$

液体的体积弹性系数随温度、压力的升高而增大。表 6.1-1 给出了不同温度和压力下水的体积弹性系数。

图 6.1-2 给出用于液压机构的常用液体压缩量计算图。

例如：液压机构用液体为石油基油类，初始体积  $V = 500 \text{ cm}^3$ ，压力变化  $\Delta p = 210 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ，求  $\Delta V$  及  $e\%$ 。从图 6.1-2K 尺上确定  $K = 1.6 \times 10^4$ ，将  $K$  值与  $\Delta p = 210$  点连线，在  $e\%$  尺得一交点，再将  $V = 500$  点与交点连线并延长使之与  $\Delta V$  尺相交，即可求得体积压缩量  $\Delta V = 6.5 \text{ cm}^3$ ，体积变化率  $e\% = 1.3\%$ 。

在研究气体压缩性时，一般情况下可按理想气体处理。

理想气体在等温过程中，一定质量气体的体积与压强的乘积为恒量。即

$$pV = \frac{M}{\mu} RT \quad (6.1-11)$$

- 式中  $R$  ——普适气体常数。 $R$  的数值与所选用的状态参量 ( $p$ 、 $V$ 、 $T$ ) 的单位有关，通常取  $R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{l}/\text{mol} \cdot \text{K}$
- $M$  ——气体的质量
- $\mu$  ——气体的分子量
- $T$  ——气体的绝对温度

式 (6.1-11) 称为理想气体的状态方程。由该式可知，理想气体的等温线族在  $pV-p$  图上应是一系列平行于  $p$  轴的直线，如图 6.1-3 所示。但是大多数真实气体在常温状态的  $pV-p$  曲线如图 6.1-4 所示。

绝热变化时，空气的体积与压力的关系可用下式表示：

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1.41} \quad (6.1-12)$$

- 式中  $p_1$  ——空气初始压力  $\text{kgf}/\text{cm}^2 \text{ abs}$
- $p_2$  ——变化后空气压力  $\text{kgf}/\text{cm}^2 \text{ abs}$

绝热变化时空气的体积与压力的关系，也可用图 6.1-5 计算图求得。

例如：已知空气  $V_1 = 0.07 \text{ m}^3$ ， $p_1 = 5 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ ， $V_2 = 0.05 \text{ m}^3$ ，求  $p_2$ 。

解：将  $V_1$ 、 $V_2$  值连线与辅助线有一交点，将交点与  $p_1$  值连线并延长，与  $p_2$  尺交点即为所求之值。 $p_2 = 8.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ 。

#### 1.5.2 流体的膨胀性

大多数流体的体积都随温度的升高而增大，这种现象叫热膨胀。在压力恒定的情况下，表征流体的体积随温度增高而增大的物理量叫体积膨胀系数。体积膨胀系数的定义是：当流体温度改变  $1^\circ\text{C}$  时，流体体积的变化量与它在  $0^\circ\text{C}$  时体积之比值。可用下式表示：

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V} / \Delta t \quad (6.1-13)$$

- 式中  $\alpha$  ——流体体积膨胀系数  $\text{deg}^{-1}$
- $\Delta V/V$  ——流体体积变化率
- $\Delta t$  ——流体的温度变化量  $\text{deg}$

常见液体的体积膨胀系数如表 6.1-2 所示。

各种气体的体积膨胀系数均近似相等，其值约

表 6.1-1 水的体积弹性系数

压力 atm	温度 °C	$K$ kg/cm <sup>2</sup>	压力 atm	温度 °C	$K$ kg/cm <sup>2</sup>
1~25	0	$1.9 \times 10^4$	1000~1500	0	$2.55 \times 10^4$
1~25	10	$2.07 \times 10^4$	1500~2000	0	$3.20 \times 10^4$
25~50	0	$2.0 \times 10^4$	2000~2500	0	$3.55 \times 10^4$
25~50	10	$2.1 \times 10^4$	2500~3000	0	$3.97 \times 10^4$
100~200	0	$2.11 \times 10^4$			
500~1000	0	$2.50 \times 10^4$			

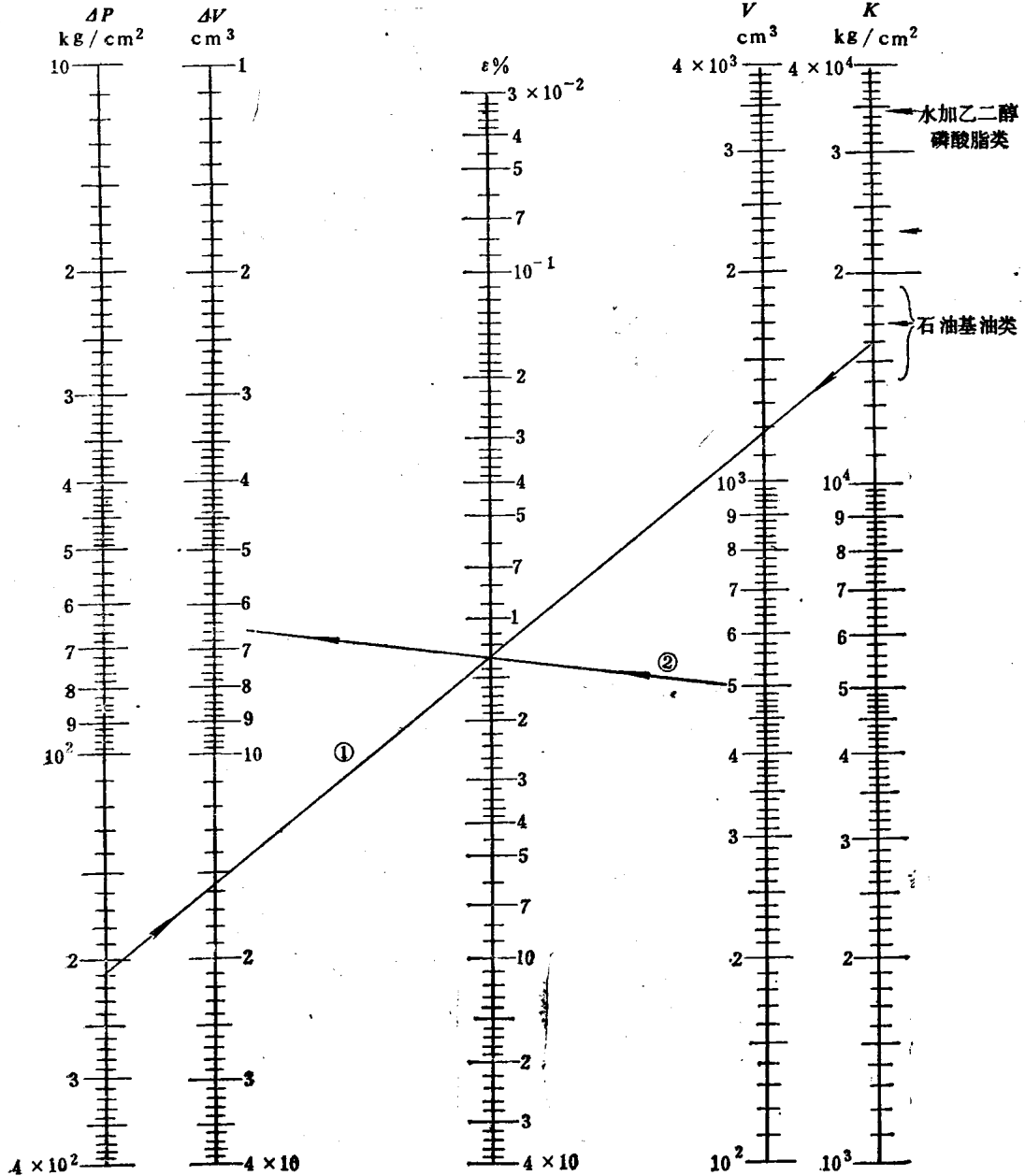


图6.1-2 液体压缩量计算图

$\Delta p$ —压力变化量kgf/cm<sup>2</sup>  $\Delta V$ —体积压缩量cm<sup>3</sup>  $V$ —初始体积cm<sup>3</sup>  $\epsilon\%$ —体积变化率 $\times 100\%$   $K$ —体积弹性系数kg/cm<sup>2</sup>

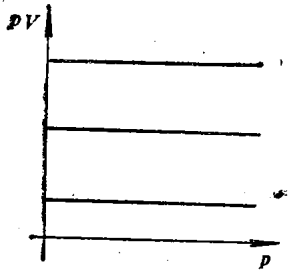


图6.1-3 理想气体 $pV-p$ 等温线

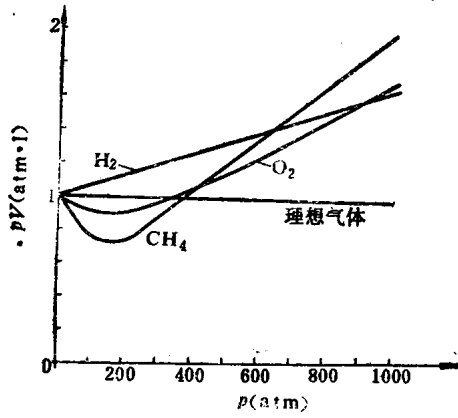


图6.1-4 真实气体 $pV-p$ 等温线

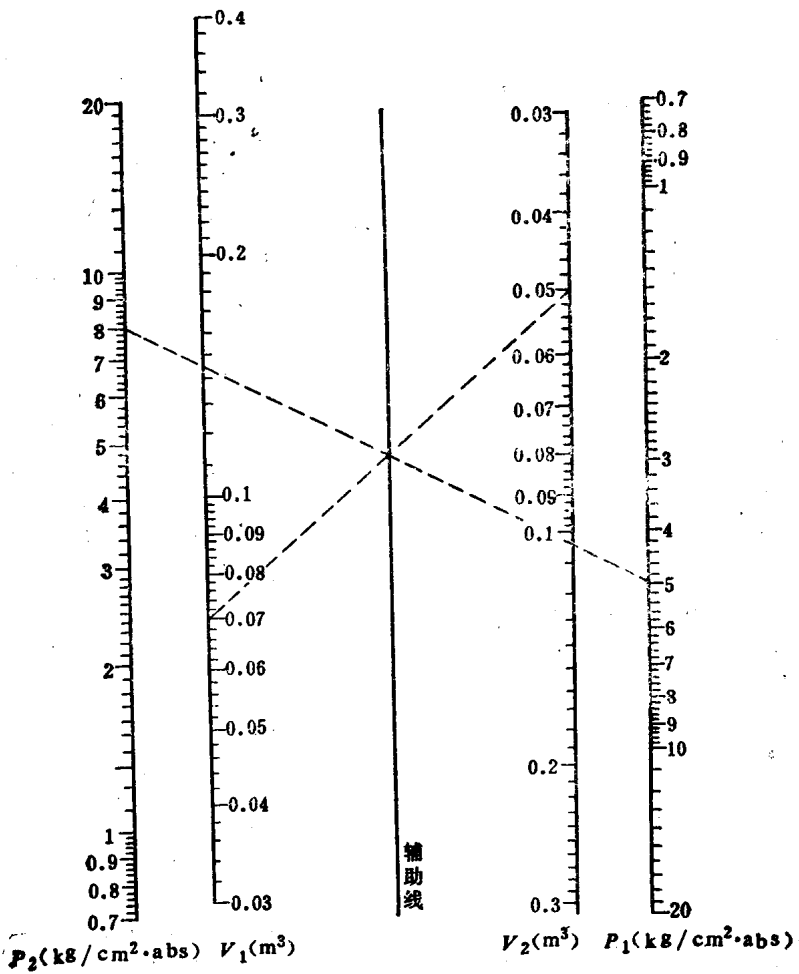


图6.1-5 绝热变化空气体积与压力计算图

$$P_1/P_2 = (V_1/V_2)^{1.41}$$

$P_1$ —空气初始压力  $\text{kgf/cm}^2 \text{ abs}$   $P_2$ —变化后空气压力  $\text{kgf/cm}^2, \text{ abs}$   $V_1$ —空气初始体积 $\text{m}^3$   $V_2$ —变化后空气体积  $\text{m}^3$



表6.1-2 液体的体积膨胀系数 $\alpha$

液 体	$t$ °C	$\alpha \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$	液 体	$t$ °C	$\alpha \cdot 10^{-3} \text{deg}^{-1}$
CCl <sub>4</sub>	20	1.236	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	20	1.120
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	20	1.237	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	20	1.090
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	20	1.608	CS <sub>2</sub>	20	1.218
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	20	1.487	HCl	20	0.455
CH <sub>2</sub> COOH	20	1.071	(33%水溶液)		
CHCl <sub>3</sub>	20	1.273	H <sub>2</sub> O	20	0.207
(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O	20	1.656	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20	0.558
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	20	0.505	Hg	20	0.182
CH <sub>3</sub> OH	20	1.199	石油(密度=0.847)	20	0.955

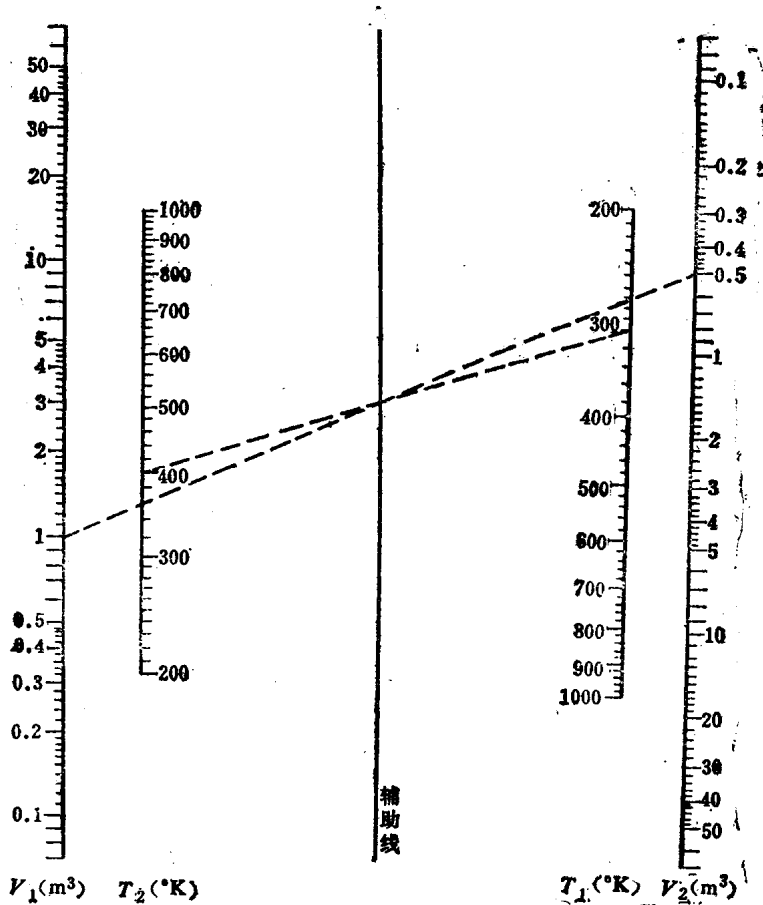


图 6.1-6 绝热变化时空气体积与温度计算图

$$\text{公式 } V_1/V_2 = (T_2/T_1)^{2.4}$$

$V_1$ —初始体积  $\text{m}^3$   $T_1$ —初始温度  $\text{K}$   $V_2$ —变化后体积 $\text{m}^3$   $T_2$ —变化后温度  $\text{K}$

为  $\frac{1}{273} \text{deg}^{-1}$  或  $3.663 \times 10^{-3} \text{deg}^{-1}$ 。

绝热过程时，空气的体积和温度的关系可写成

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{2.46} \quad (6.1-14)$$

式中  $V_1$ ——初始状态空气体积  $\text{m}^3$   
 $V_2$ ——变化后的空气体积  $\text{m}^3$   
 $T_1$ ——初始状态空气绝对温度  $\text{K}$   
 $T_2$ ——变化后的空气绝对温度  $\text{K}$

绝热过程空气的体积随温度而变化的关系，也可用图6.1-6的列线图计算。

例：把  $V_1 = 1 \text{m}^3$ ， $T_1 = 300 \text{K}$  的空气绝热压缩到  $V_2 = 0.5 \text{m}^3$ ，求此时空气的温度  $T_2$ 。

解：把  $V_1$ 、 $V_2$  之值连线，在辅助线上得一交点，把该点与  $T_1$  之值连线并延长，使之与  $T_2$  尺相交，其交点即为所求， $T_2 \approx 400 \text{K}$ 。

## 1.6 流体的粘滞性和粘度系数

### 1.6.1 流体的粘滞性

如果把实际流体的运动看成是互相平行于流动方向的无数薄层的流动，则在任意相邻两层的接触面上，存在着与流动方向相反的阻力，致使相邻两层运动速度不等，这种阻力就叫粘滞力或内摩擦力。流体流动时，产生内摩擦力的这种特性叫流体的粘滞性。

### 1.6.2 流体的粘度系数

若在如图6.1-7所示的两平板间充满流体，当上板受恒力  $F'$  的作用并以速度  $v$  相对下板移动时，

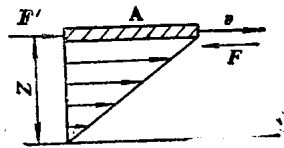


图6.1-7 两平板间流速分布(线性)

两平行板之间的流体层间必定产生与  $F'$  大小力相等、方向相反的粘滞力  $F$ ，其值为

$$F = \eta \cdot \frac{v}{z} \cdot A \quad \text{kg} \quad (6.1-15)$$

相邻流体层间单位面积上的粘滞力

$$\tau = \eta \cdot \frac{v}{z} \quad \text{kg/m}^2 \quad (6.1-16)$$

式中  $F$ ——流体的粘滞力  $\text{kg}$

$\eta$ ——流体的动力粘度系数，也称绝对粘度，或简称粘度  $\text{kg} \cdot \text{s/m}^2$

$v$ ——上平行板移动速度  $\text{m/s}$

$z$ ——上、下平行板间距  $\text{m}$

$A$ ——上平行板面积  $\text{m}^2$

$\tau$ ——单位面积上流体的粘滞力  $\text{kg/m}^2$

一般情况下流层间流速分布并非如图6.1-7的直线关系，而是如图6.1-8所示的非线性关系。此时单位面积上的粘滞力可写成

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dz} \quad (6.1-17)$$

式中  $dv/dz$ ——流速梯度  $\text{m/s} \cdot \text{m}$

公式(6.1-17)称为牛顿(Newton)内摩擦定律。

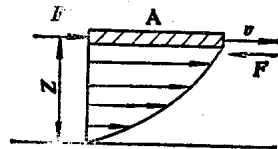


图6.1-8 两平板间流速分布

在很多方程式中(如雷诺数公式中)常出现动力粘度  $\eta$  和流体质量密度  $\rho$  的比值，这个比值定名为流体的运动粘度，记为  $\nu$ 。即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (6.1-18)$$

因为它的量纲中仅有长度和时间，是运动量的量纲，所以称之为运动粘度。

### 1.6.3 粘度的测量与单位换算

流体的粘度不能直接测量，只能通过测量与其有关的物理量，再用相应的公式计算求得。测量粘度的方法很多，但是目前工业上常用的粘度计是利用泄流方法，就是把已知温度和一定体积的待测液体，使其自由泄流过一个确定孔径与长度的短管，记下待测液体全部泄流出的时间与同体积已知粘度的液体的泄流时间相比较，从而推算出该温度下待测液体的粘度。

我国目前常用的工业粘度计是恩格勒(Engl-

er) 粘度计。待测液体的恩氏度 $^{\circ}E$ 为

$$^{\circ}E = t'/t \quad (6.1-19)$$

式中  $t'$ ——给定温度下 $200\text{cm}^3$ 待测液体全部泄流所需时间

$t$ —— $20^{\circ}\text{C}$ 恒温下 $200\text{cm}^3$ 蒸馏水全部泄流所需时间

根据测得的恩氏度，按下式即可换算出待测流体的运动粘度。

$$\nu = 0.0731^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} \quad \text{cm}^2/\text{s}$$

西欧各国的工业粘度计也多半采用恩氏粘度计，而美国常采用赛伯特 (Saybolt) 通用粘度计。赛氏粘度计是测量 $60\text{cm}^3$ 的待测液体在常温下流过直径为 $0.176\text{cm}$ ，长度为 $1.225\text{cm}$ 的毛细管所

需要的秒数，称为赛氏通用秒，记为SSU。

英国常用雷德伍德 (Redwood) 粘度计，所测之值称为雷氏秒。

各种粘度单位的换算可查本手册第2篇表2.1-51和2.1-52。也可用图6.1-9 粘度换算图表查得。例如， $100\text{cst}$ 换算成 $450\text{SSU}$ ， $13^{\circ}E$ ， $410$ 雷氏秒， $0.00108\text{ft}^2/\text{s}$ 。

### 1.6.4 流体的粘度与温度和压力的关系

液体的粘度随温度的升高而降低，随压力的升高而增大。但是，前者变化显著，后者变化甚微。压力在 $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下变化时，可不考虑液体粘度的变化。液体粘度随温度变化的关系应由实验来确定，小于 $300^{\circ}\text{C}$ 时动力粘度 $\eta$ 可用下述近似公式计

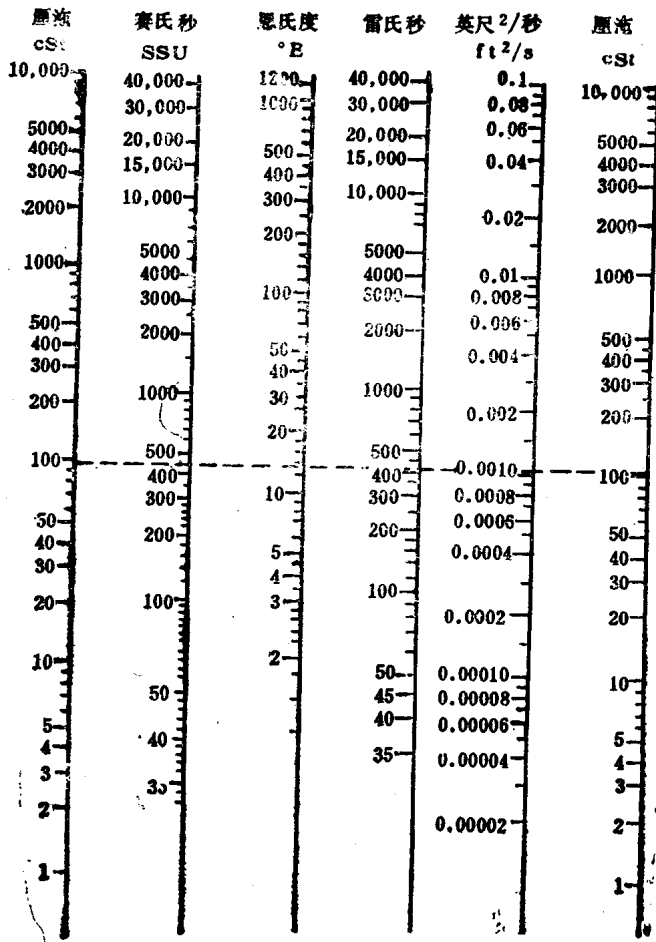


图6.1-9 粘度换算图

表 6.1-3 几种液体的温度校正系数K

液 体	水	水 银	乙 醇	甲 醇	甲 苯
校正系数					
A	-149.37	13	65	0	-67
B	511.6	355.2	2455	1283	641.5

表 6.1-4 几种气体的温度校正系数

气 体	空 气	氮	氧	氢	一氧化碳	二氧化碳	水 蒸 汽
$\alpha \cdot K$	124	104	125	71	100	254	961

算

$$\eta_t = \eta_0 e^{\left(\frac{B}{T+A} - \frac{B}{T_0+A}\right)} \quad (6.1-20)$$

式中  $\eta_0$ ——温度为  $\theta^\circ C$ 、压力为 760mmHg 时液体的动力粘度

$T$ ——液体绝对温度  $^\circ K$

$T_0$ ——273 $^\circ K$

$A, B$ ——温度校正系数。几种常见液体的温度校正系数如表 6.1-3 所示。

混合液体的粘度可按下式计算：

$$\ln \eta = \sum e_{M_i} \cdot \ln \eta_i \quad (6.1-21)$$

式中  $e_{M_i}$ —— $i$  组分液体分子量百分比

$\eta_i$ —— $i$  组分液体动力粘度

气体的动力粘度随温度的升高而增大，与压力的变化几乎无关，其关系可用下述近似公式

$$\eta_t = \eta_0 \frac{T_0 + \alpha}{T + \alpha} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \quad (6.1-22)$$

式中  $\alpha$ ——温度校正系数，常见气体的  $\alpha$  值如表 6.1-4 所示

混合气体的动力粘度可用下式计算：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \sqrt{M_i} \eta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \sqrt{M_i}} \quad (6.1-23)$$

式中  $\beta_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体所占体积百分数

$M_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体的分子量

$\eta_i$ ——混合气体中  $i$  组分气体的动力粘度

## 1.7 流体的导电性与导磁性

### 1.7.1 流体的导电性

不含溶质的纯液体一般不导电。各种溶液都具有不同程度的导电特性。在外电场的作用下，溶液内分子不断离解和中和正、负离子的过程便形成了导电功能。

常用电导或电导率表示溶液导电的能力，可用如下公式表示：

$$\left. \begin{aligned} K &= S \frac{A}{L} \\ S &= \frac{\lambda c}{\delta \times 1000} \end{aligned} \right\} \quad (6.1-24)$$

式中  $K$ ——溶液电导  $1/\Omega$

$S$ ——电导率  $1/\Omega \cdot cm$

$A$ ——平行电极的面积  $cm^2$

$L$ ——平行电极的距离  $cm$

$c$ ——溶液浓度  $mg/l$

$\delta$ ——溶液的克当量数

$\lambda$ ——当量电导率（相距  $1 cm$ ，面积为  $1 cm^2$  的平行电极之间充以浓度为  $1$  克当量溶液的电导率），且有

$$S = n\lambda$$

式中  $n$ ——溶液的毫克当量数， $n = \frac{c}{\delta \times 1000}$

可见，在确定的条件下溶液的电导率与溶液的浓度成正比。常见溶液在常温下电导率与浓度的关系如图 6.1-10 所示。

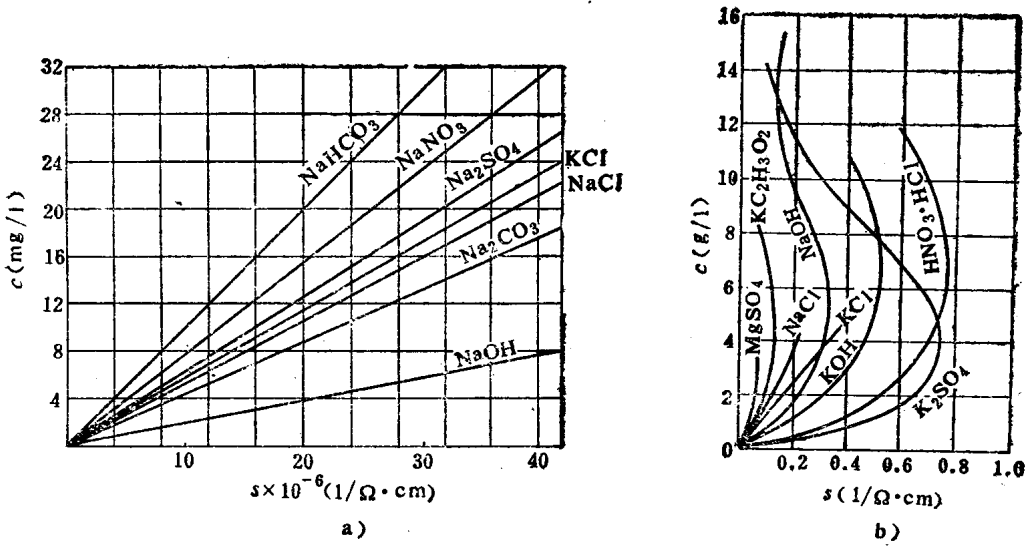


图6.1-10 20°C时某些液体的电导率与浓度的关系  
a)低浓度 b)高浓度

溶液的电导率随温度的增高而显著增大。在低浓度时(0.05N以下),电导率与温度的关系可以写成如下公式:

$$s_t = s_0 [1 + \beta_1 (t - t_0) + \beta_2 (t - t_0)^2] \quad (6.1-25)$$

式中  $s_t$ 、 $s_0$ ——溶液温度为 $t$ 及 $t_0$ 时电导率  
 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——电导率的温度系数,常温时酸性

溶液  $\beta_1 \approx 0.016 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ; 盐类溶液

$\beta_1 \approx 0.024 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ; 碱性溶液  $\beta_1 \approx$

$0.019 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ 。 $\beta_2$ 之值随温度的升

高而减小。 $\beta_2$ 之值甚小,一般可忽略

气体的电导率可由下式表达:

$$\sigma = \frac{i}{E} \quad (6.1-26)$$

式中  $i$ ——流过的电流  
 $E$ ——外加电压

如果气体离子浓度很小,气体处于弱电离状态时,其电导率可表示为:

$$\sigma = 3.34 \times 10^{12} \frac{Q}{Q\sqrt{T}} \frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}} \quad (6.1-27)$$

如果气体处于完全电离的等离子气体状态,其电导率可表示为:

$$\sigma = \frac{1.56 \times 10^{-4} \sqrt{T^3}}{\ln\left(\frac{1.23 \times 10^4 \sqrt{T^3}}{n_e}\right)} \frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}} \quad (6.1-28)$$

式中  $\sigma$ ——电导率  
 $Q$ ——冲撞截面积  
 $T$ ——绝对温度  
 $n_e$ ——粒子密度

常见气体电导率与温度之间的关系如图6.1-11所示。

### 1.7.2 流体的导磁性

任何物质在外磁场作用下都能被感应磁化,并在其内部产生一个附加磁场。外磁场强度与附加磁场强度之和称为磁感应强度。写成

$$\left. \begin{aligned} B &= H + M \\ M &= 4\pi xH \\ B &= \mu H \end{aligned} \right\} \quad (6.1-29)$$

式中  $B$ ——磁感应强度  $\text{kg/s}^2 \cdot \text{A}$   
 $H$ ——外磁场强度  $\text{A/m}$   
 $M$ ——附加磁场强度  $\text{A/m}$   
 $x$ ——磁化率

$\mu$ ——物质的导磁率  $\frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{A}^2}$

标准状态下的磁化率如表6.1-5所示。

多组分混合气体的磁化率为

$$\alpha = \sum_{i=1}^n x_i \varphi_i \quad (6.1-30)$$

式中  $x_i$  —— 第*i*组分的磁化率

$\varphi_i$  —— 第*i*组分的百分含量

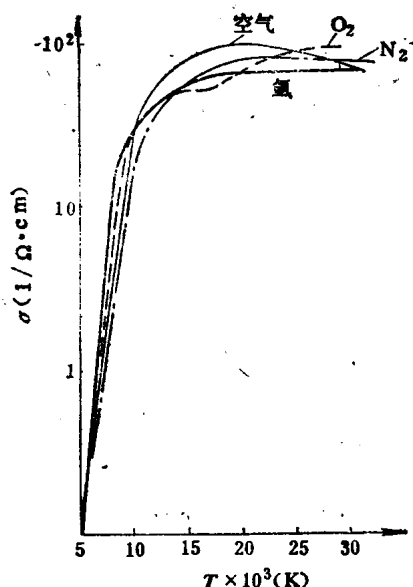


图6.1-11 常见气体在1 atm下电导率与温度的关系

物质的导磁率  $\mu > 1$  时称为顺磁性物质。这种物质本身具有磁矩，没有外磁场作用时，这些磁矩杂乱取向，故不显示磁性。在外加磁场作用下，这些磁矩便沿外磁场方向有序排列，且与外磁场同向。

物质的导磁率  $\mu < 1$  时称为反磁性物质。这种物质本身不具有磁矩，但在外磁场作用下由于磁感应和分子运动而产生附加磁场，其方向与外加磁场反向。

物质导磁性强弱常用磁化率表示。常用气体在

## 2 流体的静力学

### 2.1 基本概念

流体的静力学是研究流体在重力和压力作用下维持静平衡的规律。因为重力是不变的，所以流体静力学实际是研究相对静止状态的流体内部压强变化的规律。

流体静压力具有两个重要特性。其一，因为流体平衡时没有切应力和张力，所以流体静压力的方向是沿着作用面的内法线方向。其二，作用于某一点的流体静压力和该点所处的面在空间的方位无关，只与该点在空间的位置和流体的种类有关。就是说，从各方向作用于某一点的流体静压力的大小是相等的，它是空间坐标的连续函数，同时也是流体密度的连续函数。

### 2.2 静止流体的平衡方程式

若在静止流体中有一个底面积为  $dA$ ，高为  $dZ$  的无限小的六面体，如图6.1-12所示。假定六面体上面的压力为  $p$ ，下面的压力为  $p + dp$ ，流体的重度

表6.1-5 常用气体在标准状态下磁化率 $\alpha$

气 体	$\alpha \cdot 10^9$ (CGS制)	气 体	$\alpha \cdot 10^9$ (CGS制)
O <sub>2</sub>	+146	H <sub>2</sub>	-0.164
NO	+53	Ne	-0.32
NO <sub>2</sub>	+9	N <sub>2</sub>	-0.58
N <sub>2</sub> O	+3	H <sub>2</sub> O	-0.58
空 气	+30.8	Cl <sub>2</sub>	-0.6
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	+1.0	CO <sub>2</sub>	-0.84
CH <sub>4</sub>	+1.0	NH <sub>3</sub>	-0.84
He	-0.083		

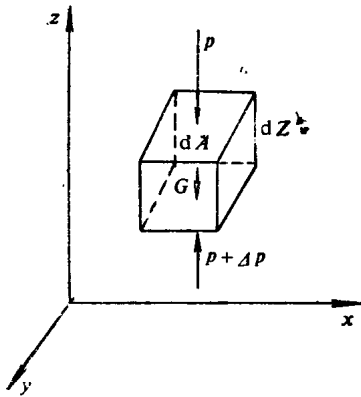


图6.1-12 静压力分析

为  $\gamma$ ，则六面体的重量

$$G = \gamma \cdot dZ \cdot dA$$

作用于六面体侧面的诸力，因相互平衡而抵消。假定向下的力为正，向上的力为负，则该六面体受力平衡方程式可以写成：

$$p \cdot dA + \gamma \cdot dZ \cdot dA = (p + dp) \cdot dA$$

于是

$$dp = \gamma \cdot dZ$$

上式为静止流体的微分方程式，它适用于可压缩流体，也适用于非压缩流体。对于可压缩流体因为重度  $\gamma$  是变化的，所以积分较复杂。对于非压缩流体因为重度  $\gamma$  不变，上式可积分成：

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\gamma} = \int_{z_1}^{z_2} dZ$$

或写成

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = Z_1 - Z_2 \quad (6.1-31)$$

公式(6.1-31)称为流体静平衡方程，它说明在重力作用下，处于静止状态的流体内部某一水平面上压强的大小，只与流体的重度和所在的水平位置有关。位置越低压强越大。

也可以把静止流体的压强方程写成如下形式：

$$Z + \frac{p}{\gamma} = \text{const}$$

即在重力作用下，非压缩流体任意一点的位置高度  $Z$  与静压头  $p/\gamma$  之和为常数。

## 2.3 潜体与浮体的平衡

### 2.3.1 潜体与浮体的概念

完全浸没于静止流体内的物体叫潜体。部分浸

没于静止流体内的物体叫浮体。潜体或浮体侧表面所受压力的合力相互平衡，上下两个表面则受到流体沿铅垂方向向上的压差力，这个压差力就叫浮力。浮力在数值上等于被潜体或浮体所排出同体积流体的重量，而与潜体下沉的深度无关。浮力方向永远垂直向上，其作用线通过物体的几何中心（称为浮心）。这就是阿基米德原理。若用公式表示则可写成

$$F = \gamma \cdot V \quad (6.1-32)$$

式中  $F$ ——潜体或浮体所受的浮力 kg

$\gamma$ ——潜体或浮体所排出流体的重度 kg/m<sup>3</sup>

$V$ ——潜体或浮体所排出流体的体积 m<sup>3</sup>

### 2.3.2 潜体与浮体的平衡

潜体的平衡条件：

1) 浮力  $F$  与潜体的重力  $G$  相等；

2) 潜体的重心  $D$  与浮心  $C$  应处于同一垂线上，如图6.1-13。

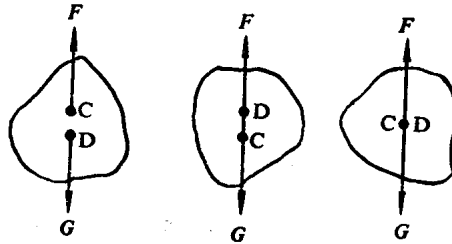


图6.1-13 潜体的稳定条件

由图6.1-13可知，由于重心与浮心所处位置不同，潜体的平衡状况可分为三种情况。当重心  $D$  低于浮心  $C$  时，潜体是稳定的；当重心  $D$  高于浮心  $C$  则潜体是不稳定的，受力后，潜体在重力与浮力组成的力偶作用下将力图使潜体翻转，趋于稳定状态；当重心  $D$  与浮心  $C$  重合时，潜体处于随遇平衡。

浮体的平衡条件：

浮体与潜体一样，也须满足上述两个条件才能平衡。但是当浮体的重心高于浮心时，浮体也可能是稳定的。如图6.1-14，当浮体受外力作用而倾斜  $\alpha$  角时，重心  $D$  仍在原平衡的浮轴上，但浮心由于浸没部分形状的改变而偏移到  $C'$  点。此时的浮力作用线与浮轴的交点  $N$  叫定倾中心。当定倾中心  $N$  高于重心时，浮体倾斜后重力  $G$  与浮力  $F$  组成的恢复力偶将使浮体趋于稳定。若定倾中心低于重心，则

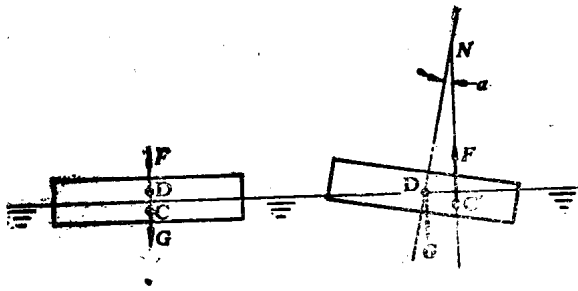


图6.1-14 定倾中心高于重心的稳定状态

浮体不稳定，如图6.1-15所示。因此，为保持浮体的稳定，应使定倾中心位于重心之上，并且要使这两点之间有足够的距离。

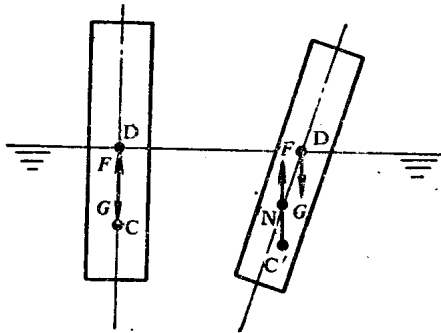


图6.1-15 定倾中心低于重心的不稳定状态

## 2.4 流体的表面张力与毛细管原理

### 2.4.1 表面张力

液体内部相邻分子间产生的吸引力叫内聚力。液体表面上的分子受内聚力的吸引而使液面任何两部分之间都具有力图使液面收缩成最小面积的张力，这种张力就叫表面张力，可表示为

$$f = \sigma \cdot l \quad (6.1-33)$$

式中  $f$ ——表面张力 dyn

$\sigma$ ——表面张力系数，它是液体接触面单位边界长度上的表面张力。其与液体的性质、温度以及与其接触的介质有关 dyn/cm

$l$ ——液体接触面边界长度 cm

表6.1-6给出常用液体的表面张力系数。表6.1-7给出不同温度下水的表面张力系数。

液体的表面张力与其纯度有关。在纯净的液体中如果掺进杂质，表面张力就将大为减小。

### 2.4.2 毛细管作用

液体与固体接触时，若附着力大于液体内聚力，则其接触面扩大且相互附着，称为浸润。例如，水可浸润玻璃。若接触面缩小且相互不附着，

表6.1-6 常用液体的表面张力系数

液体	温度℃	表面张力系数 $\sigma \times 10^4 \text{ kgf/m}$	液体	温度℃	表面张力系数 $\sigma \times 10^4 \text{ kgf/m}$	液体	温度℃	表面张力系数 $\sigma \times 10^4 \text{ kgf/m}$
水	0	77.15	苯	20	29.4	氮	-195.9	8.47
	10	75.70	甲苯	20	28.8	氧	-18.7	13.3
	20	74.21	二硫化碳	20	34.2	氢	-186.1	11.2
	30	72.60	四氯化碳	20	26.2	氮	-72	34.3
	40	70.95	氯仿	20	26.5	一氧化碳	-190	11.2
	50	69.27	甲醇	20	23.5	二氧化碳	15.2	1.84
	60	67.50	乙醇	20	22.7	氮	-29	42.6
	70	65.71	乙醚	20	16.8	二氧化硫	-25	34.0
	80	63.86	乙酸	20	24.0	三氧化硫	20	30.6
	90	61.97	苯胺	0	46.3	灰铸铁(c3.9%)	1300	1173
100	60.03	丙酮	16.8	23.9	钢	1520	1530	
水银	15	498	氮	-270.7	0.361	铜	1180	1125
	20	469	氢	-253	1.95	铝	760	877



表6.1-7 与空气接触水的表面张力系数

温 度 ℃	表面张力系数 $\sigma$ dyn/cm	温 度 ℃	表面张力系数 $\sigma$ dyn/cm	温 度 ℃	表面张力系数 $\sigma$ dyn/cm	温 度 ℃	表面张力系数 $\sigma$ dyn/cm
-10	77.10	14	73.64	22	72.44	30	71.15
-5	76.40	15	73.48	23	72.28	40	69.55
0	75.62	16	73.34	24	72.12	50	67.90
5	74.90	17	73.20	25	71.96	60	66.17
10	74.20	18	73.05	26	71.82	70	64.41
11	74.07	19	72.89	27	71.64	80	62.60
12	73.92	20	72.75	28	71.47	90	60.74
13	73.78	21	72.60	29	71.31	100	58.84

称为不浸润。例如，水银不浸润玻璃。

含有细缝或微孔的物体，如纸、砖等与液体接触时，由于分子间的作用力，液体将沿细缝或微孔上升或下降，这种现象称为毛细管作用。液体与浸润固体接触，液体将沿细缝或微孔上升，且液面呈凹月状，如图6.1-16所示。液体与不浸润固体接触时，液体将沿细缝或微孔下降，且液面呈凸月状，如图6.1-17所示。

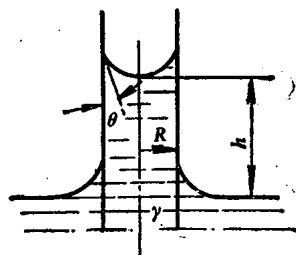


图6.1-16 液体在毛细管中上升

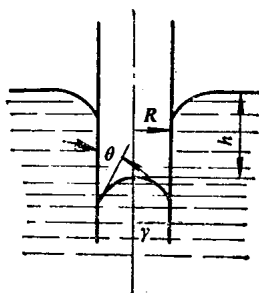


图6.1-17 液体在毛细管中下降

几种液体在玻璃圆断面毛细管和玻璃平行板间缝隙中上升或下降高度可查表6.1-8；也可按朱伦（Jurin）公式计算：

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma R} \cos\theta \quad (6.1-34)$$

式中  $h$ ——毛细管内液体上升或下降的高度mm  
 $\sigma$ ——液体的表面张力系数 g/mm  
 $\gamma$ ——液体的重度 g/mm<sup>3</sup>  
 $R$ ——毛细管半径 mm  
 $\theta$ ——液面与毛细管接触点的切线与管壁的夹角 deg

一般情况下因为毛细管半径 $R$ 很小，可以认为凹月面或凸月面为半球状，即 $\cos\theta = 1$ ，于是朱伦公式可简化为

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma R} \quad (6.1-35)$$

例 将内径0.8mm毛细管插到10℃水中，求毛细管内液体上升高度。

解 由表6.1-7查得 $\sigma = 74.20 \text{ dyn/cm} = 74.2 \times 0.000102 \text{ g/mm}$ ；10℃水重度 $\gamma = 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ，于是

$$\begin{aligned} h &= \frac{2\sigma}{\gamma R} \\ &= \frac{2 \times 74.2 \times 0.000102}{10^{-3} \times 0.4} \\ &= 37.85 \text{ mm} \end{aligned}$$

### 3 不可压缩流体的流动

#### 3.1 基本概念

密度为常数的流体称为不可压缩流体。

流体动力学是研究流体的压力、流速、加速度、密度以及粘滞力随时间和流体质点所在空间位置而连续变化的规律。研究流体运动通常可采用两