1 空气动力学基础

悬浮于气体中的固体和液体颗粒物称为气溶胶粒子，国内习惯上统称粉尘。除尘技术是空气污染控制领域的一个重要组成部分。它的基础理论是空气动力学和气溶胶力学。因此，了解与除尘技术相关的空气动力学基础知识是必要的。

1.1 气体的物理性质

1.1.1 气体的密度和质量体积

室外的正常空气成分为氧气、氮气、二氧化碳及少量的其他气体、杂质和水气。在空气净化中，所处理的气体中经常含有腐蚀性气体(如 SO_2)、有毒有害气体(如 CO, NO_x)、爆炸性气体（如 CO，碳氢化合物）及大量的水蒸气。

单位体积气体的质量称为气体密度 $\rho(kg/m^3)$，其数学表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1.1}$$

式中 m——气体质量，kg；

V——气体体积，m^3。

质量体积为密度的倒数，即

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{1.2}$$

1.1.2 气体的体积、压力和温度

气体的物理状态取决于 3 个要素：体积 V、压力 p 及温度 T。其中任意两个量发生变化将会引起第三个量的变化。它们之间的关系可通过状态方程来确定

需要全本请访问 www.ertongbook.com

$$\frac{pV}{T}=\frac{p_0V_0}{T_0}=\text{常数} \tag{1.3}$$

式中，V_0、p_0 和 T_0 分别为标准状态下气体的体积、压力和温度。式(1.3)还可写成

$$\frac{pV}{T}=Rm \quad \text{或} \quad \rho=\frac{p}{RT} \tag{1.4}$$

式中 R——气体常数，J/(kg·K)；

m——气体的质量，kg。

从式(1.4)看出：知道气体常数、压力及温度即可算出密度。在空气净化中，常用标准状态进行计算。所谓标准状态，即：温度 $T_0=273\text{K}$，压力 $p_0=1$ 个标准大气压 $=1.013\times10^5\text{Pa}$。故标准状态下气体的密度为

$$\rho_0=\frac{p_0}{RT_0}=\frac{372}{R} \tag{1.5}$$

在温度和压力相同的条件下，不同气体在相同容积中所包含的分子数目相同。在标准状态下，1mol(摩尔）任何气体的体积均相同，它等于 $22.41\times10^{-3}\text{m}^3$。

当已知某气体的摩尔质量为 M_0，质量为 m，则摩尔数 n 为

$$n=\frac{m}{M_0} \tag{1.6}$$

所以该气体在标准状态下的体积为

$$V_0=22.41\times10^{-3}\frac{m}{M_0} \tag{1.7}$$

密度为

$$\rho_0=\frac{M_0}{22.41}\times10^3 \tag{1.8}$$

于是，如果知道气体常数或气体的摩尔质量，便可由式(1.5)或式(1.8)求标准状态下气体的密度。若求非标准状态下气体的

密度,可由式(1.4)计算,其中

$$R = 8.314/M_0 \tag{1.9}$$

几种常见气体的气体常数列入表 1.1 中。混合气体的气体常数 R_T 可按下式确定

$$R_T = \frac{m_1R_1 + m_2R_2 + \cdots}{M} = w_1R_1 + w_2R_2 + \cdots \tag{1.10}$$

式中 $m_1, m_2, \cdots$——各组分气体的质量,kg;

$R_1, R_2, \cdots$——各组分气体的气体常数, J/(kg·K);

$w_1, w_2, \cdots$——各组分气体的质量分数, %;

M——混合气体的总质量,kg。

表 1.1 几种常用气体的气体常数

气体名称	化学分子式	分子量	气体常数/J·(kg·K)$^{-1}$
氧气	O_2	32	259.8
氮气	N_2	28	196.9
氩	Ar	40	207.9
二氧化碳	CO_2	44	189.0
水蒸气	H_2O	18	261.9
二氧化硫	SO_2	64	129.9
一氧化碳	CO	28	296.9
氢气	H_2	2	4257.2
甲烷	CH_4	16	519.6
干空气	混合气体	29	286.7

例如，常温下干空气的密度是我们经常用到的一个基本数据。干空气由 75.5% 的 N_2、23.1% 的 O_2、1.3%的 Ar、0.05% 的 CO_2 组成，其气体常数和气体密度分别为

$$R_T = 0.755 \times 296.9 + 0.231 \times 259.8 + 0.013 \times 207.9 + 0.0005 \times 189 = 287$$

$$\rho_0 = \frac{372}{R_T} = \frac{372}{287} = 1.296$$

对于混合气体，当没有化学反应和处于平稳过程时，混合气体的总压力等于各气体的分压之和，即

$$p_T = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \tag{1.11}$$

式中 p_T——混合气体的总压力，Pa；

$p_1, p_2, \cdots, p_n$——各气体的分压，Pa。

若已知各组分气体的体积分数 $\psi_a, \psi_b, \psi_c, \cdots$ 和各组分气体的摩尔质量 $M_a, M_b, M_c, \cdots$ 时，则在标准状态下混合气体的密度为

$$\rho_T = \frac{1}{22.41}(\psi_a M_a + \psi_b M_b + \psi_c M_c + \cdots) \tag{1.12}$$

1.1.3 气体的连续性和压缩性

1.1.3.1 连续性

气体的连续性假设是指我们不必研究大量分子的瞬间状态，而只要研究描述流体宏观状态下的物理量，如密度、速度、温度、压力等就行了。在连续介质中，可以把这些物理量看作是空间坐标和时间的连续函数。

在空气净化中，连续性的假设是适用的，它是一个最基本的假设。

1.1.3.2 压缩性

实际上，任何气体都是可以压缩的，也就是说气体的密度是随着压力与温度的改变而发生变化。但是，在空气净化中，如果在管道内或净化设备内气体的温度和压力在整个流动过程中变化不大，那么，引起密度的变化也就很小。理论计算结果表明，对于气体速度和其音速之比小于 0.3 的绝热流动，就可以当作不可压流动来处理。空气净化所讨论的气体流速远小于音速，通常都可看作不可压缩流体，这对工程计算是十分便利的。

1.1.4 气体的黏性

气体在流动过程中，在两相邻流层之间，由于存在相对运动，而在接触面上产生切向作用力，这种力称为内摩擦力。根据牛顿内摩擦定律，单位面积上的内摩擦力 τ 可用下式表示

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y} \tag{1.13}$$

式中 τ——内摩擦应力，Pa；

μ——动力黏度，Pa·s。

有时，动力黏度还可用运动黏度 η 来替代，两者的关系为

$$\eta = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.14}$$

动力黏度与气体的温度有关，随气体的温度升高而增大。气体的压力对动力黏度的影响，在常压下可以不考虑。

在常压下，气体动力黏度 μ 与温度 T 的关系可由下列经验式表示

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C}\left(\frac{T}{273}\right)^{1.5} \tag{1.15}$$

式中 μ_0——0℃时气体的动力黏度，Pa·s；

C——与气体性质有关的常数。

一些气体的动力黏度 μ_0 与常数 C 见表 1.2。

表 1.2 一些气体的动力黏度及常数

气 体	动力黏度 μ_0/Pa·s	常 数 C	气 体	动力黏度 μ_0/Pa·s	常 数 C
空气	17.16×10^{-6}	122	氢气	8.36×10^{-6}	83
水蒸气	8.24×10^{-6}	961	一氧化碳	16.57×10^{-6}	100
氧气	19.42×10^{-6}	110	二氧化碳	14.02×10^{-6}	260
氮气	16.64×10^{-6}	102	二氧化硫	12.06×10^{-6}	

对于混合气体的动力黏度 μ_T 可由下式计算

$$\frac{M_T}{\mu_T} = \frac{M_a\psi_a}{\mu_a} + \frac{M_b\psi_b}{\mu_b} + \cdots \tag{1.16}$$

式中 $\psi_a, \psi_b, \cdots$——各组分气体的体积分数，%；

$M_a, M_b, \cdots$——各组分气体的摩尔质量，kg；

$\mu_a, \mu_b, \cdots$——各气体组分的动力黏度，Pa·s。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

而混合气体的摩尔质量 M_T 由下式计算

$$M_T = M_a\psi_a + M_b\psi_b + \cdots \tag{1.17}$$

1.1.5 气体的湿度

气体中含有少量的水蒸气，气体的湿度是表示气体中含有水蒸气的多少，一般有两种表示方法：绝对湿度和相对湿度。

1.1.5.1 绝对 湿度

绝对湿度 x 是指单位体积或单位质量气体中所含水蒸气的质量 (kg/m^3 或 kg/kg)。当湿气体中水蒸气含量达到在该温度下所能容纳的最大值时的气体状态，称为饱和状态。

1.1.5.2 相对 湿度

相对湿度 ϕ 是指单位体积气体中所含水蒸气的质量 ρ_x 与同温同压下饱和状态时气体所含水蒸气的质量 ■ 之比。这一比值也等于湿气体中水蒸气分压　　与同温度的饱和蒸气压　　之比。相对湿度一般用百分数表示

(1.18)

1.2 流体一维流动的基本方程

空气净化技术所研究的气体虽然是多相的、可压缩的黏性流体，但是,很多工程上的问题,气体按单相的不可压缩低速流体来处理,只要适当地加以修正,几乎都可以得到满意的结果。为了便于后面的讨论,本节将介绍空气净化中可能应用到的气体动力学的诸方程。

所谓一维流动是指垂直于流动方向的各截面上的流动参数(如速度、压力、温度、密度等)都均匀一致而且只是空间坐标的函数。若流动情况随时间变化，称为非定常流动。反之，则为定常流动。空气净化中所遇到的许多问题多数可看作一维定常流动。

1.2.1 连续性方程

气体动力学所要回答的问题之一是流动过程中，各项流动参数(速度、压力、温度、密度等)是怎样变化的。联系这些参数变化

的是物理学中的 3 条基本规律：质量守恒、动量的变量等于作用力的冲量、能量守恒。这些规律在气体动力学中有两种表达形式：微分形式和积分形式。

一维定常流动的质量守恒方程，又称连续方程，其微分形式为

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}+\frac{\mathrm{d}S}{A}+\frac{\mathrm{d}v_A}{v_A}=0 \tag{1.19}$$

式中 ρ——气体密度，$\mathrm{kg/m^3}$；

S——流管截面积，$\mathrm{m^2}$；

v_A——垂直于截面 A 处的流速，$\mathrm{m/s}$。

对于不可压缩流体，ρ=常数，式(1.19)简化为

$$\frac{\mathrm{d}S}{S}+\frac{\mathrm{d}v_A}{v_A}=0 \tag{1.20}$$

对上述方程积分，可得到连续方程的积分形式

$$M=\rho vS=\text{常数} \tag{1.21}$$

$$Q=vS=\text{常数} \tag{1.22}$$

式中 M——质量流量，$\mathrm{kg/s}$；

Q——体积流量，$\mathrm{m^3/s}$。

连续方程式(1.22）是空气净化中最基本的、最常用的方程式之一。

1.2.2 欧拉运动方程与伯努利公式

忽略黏性力，微分形式的流体能量方程称为欧拉运动方程，其表达式为

$$\mathrm{d}p+\rho v\mathrm{d}v+\rho g\mathrm{d}z=0 \tag{1.23}$$

式中 p——压力增量，Pa；

g——重力加速度，$\mathrm{m/s^2}$；

$\mathrm{d}z$——流管微段在重力方向上的投影距离。

将式(1.23) 积分，对于不可压缩流体，ρ=常数，得

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 + \rho g z = 常数 \tag{1.24}$$

这个式子称伯努利公式。在空气净化计算中，考虑到气体密度很小，常忽略高度 z 的影响。在实际管道系统中，有沿程阻力损失 Δp，因此扩大的伯努利方程为

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \Delta p \tag{1.25}$$

1.2.3 动量定理

动量方程是把牛顿第二运动定律应用于运动流体所得到的关系式

$$\sum \boldsymbol{F} = M(\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1) \tag{1.26}$$

式中 $\sum \boldsymbol{F}$——作用于运动流体的合外力；

M——流体的质量流量，kg/s；

$\boldsymbol{v}_2$、$\boldsymbol{v}_1$——流管截面 1 和截面 2 的流速，m/s。

[例] 设密度为 1.3kg/m^3 的气体在弯曲 90°的收缩管道中流动。在弯管进口截面 1 的压力为 $1.20\times10^5\text{Pa}$，在出口截面 2 的压力为 $1.19\times10^5\text{Pa}$，气体的流量为 $5\text{m}^3/\text{s}$，截面 1 的直径为 0.4m，截面 2 的直径为 0.3m。试计算气体对弯管内壁的作用力。

[解] 取一段气体（控制体）如图 1.1 所示。其侧表面为气体在弯管内流动的边界，它的两个截面与气流方向垂直。

设 F_x 和 F_y 表示弯管内壁对气流的作用力在 x 和 y 方向的投影。应用动量方程，有

$$F_x + p_1 A_1 = M(0 - v_1) \tag{a}$$

$$F_y + p_2 A_2 = M(-v_2 - 0) \tag{b}$$

式(a)、式(b)中的 v_1 及 v_2 可由连续方程求得，即

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{5}{\frac{\pi}{4}\times0.4^2} = 39.79$$

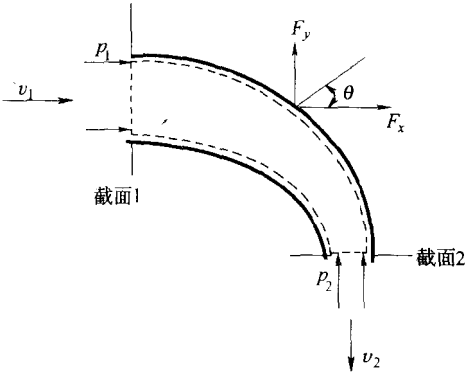


图 1.1　由动量方程求对管壁作用力

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{5}{\frac{\pi}{4} \times 0.3^2} = 70.74$$

将 v_1、v_2 以及其他已知数据代入式 (a)、式 (b)中，得

$$F_x = -(1.2 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 + 1.3 \times 5 \times 39.79) = -15338.28$$

$$F_y = -(1.19 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} \times 0.3^2 + 1.3 \times 5 \times 70.74) = -8871.42$$

负号说明 F_x、F_y 的方向与原假设方向相反。根据牛顿第三定律，气流对弯管的作用力为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 17719$$

F 与 x 轴正方向的夹角为

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} = 30^\circ$$

1.3　流体多维流动的基本方程

多维流动包括二维和三维流动。二维流动是指只有两个空

间坐标的流动，平面流和轴对称流属之。空气净化技术中的许多问题常可以化为二维流动。但在个别场合（如旋风除尘器、绕球体的流动），又必须用三维流动来描述。

1.3.1 连续方程

在直角坐标系下的连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}=0 \tag{1.27}$$

式中 t——时间，s；

v_x, v_y, v_z——分别为 x, y, z 方向上的分速度，m/s。

对于不可压缩定常流，$\rho=$ 常数，则

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0 \tag{1.28}$$

对于不可压缩流体，在柱坐标系下的连续方程为

$$\frac{\partial(rv_r)}{r\partial r}+\frac{\partial v_\theta}{r\partial \theta}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0 \tag{1.29}$$

式中 v_r, v_θ, v_z——分别为坐标 r, θ, z 方向上的分速度，m/s。

1.3.2 旋流与势流

流体微团的运动可以分解为平移、变形及转动。直角坐标系下，流体微团绕各个轴的旋转角速度 ω 由下述方程描述

$$\omega_x=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_z}{\partial y}-\frac{\partial v_y}{\partial z}\right),\quad \omega_y=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}-\frac{\partial v_z}{\partial x}\right),$$

$$\omega_z=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_y}{\partial x}-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right) \tag{1.30}$$

某一流动，如果式(1.30)中，有一个旋转角速度不为零，这种流动称为旋流。若某流动在研究范围内，所有的旋转角速度分量全都为零，即由式(1.30)得

$$\frac{\partial v_z}{\partial y}-\frac{\partial v_y}{\partial z}=0,\quad \frac{\partial v_x}{\partial z}-\frac{\partial v_z}{\partial x}=0,\quad \frac{\partial v_y}{\partial x}-\frac{\partial v_x}{\partial y}=0 \tag{1.31}$$

那么，这一流动称为无旋流动。式(1.31)正是 $v_x\mathrm{d}x + v_y\mathrm{d}y + v_z\mathrm{d}z$ 这样一个式子成为全微分的充分必要条件。令 $\mathrm{d}\phi$ 代表这个全微分,即

$$\mathrm{d}\phi = v_x\mathrm{d}x + v_y\mathrm{d}y + v_z\mathrm{d}z \tag{1.32}$$

这个 $\phi = \phi(x, y, z)$ 称势函数。依此定义，有

$$v_x = \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad , \quad v_y = \frac{\partial\phi}{\partial y} \quad , \quad v_z = \frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{1.33}$$

由于无旋流动中，速度分量可以由势函数导出。所以，无旋流又称为势流。

在柱坐标下，流体微团的角速度分量分别是

$$\omega_r = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_z}{r\partial\theta} - \frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right) \quad , \quad \omega_\theta = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r}\right) \quad ,$$

$$\omega_z = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \left(\frac{\partial v_r}{r\partial\theta} - \frac{v_\theta}{r}\right)\right] \tag{1.34}$$

当流场上到处无旋时，有势函数 $\phi(r, \theta, z)$存在

$$\mathrm{d}\phi = v_r\mathrm{d}r + rv_\theta\mathrm{d}\theta + v_z\mathrm{d}z \tag{1.35}$$

其中

$$v_r = \frac{\partial\phi}{\partial r} \quad , \quad v_\theta = \frac{\partial\phi}{r\partial\theta} \quad , \quad v_z = \frac{\partial\phi}{\partial z} \tag{1.36}$$

1.3.3 流线与迹线

流动流体的各流体微团的位置随时间的延续而不断变动。同一瞬间，与各流体微团速度矢量相切的连线称为流线。如图 1.2*a* 所示的流线上任意点 P 的切线方向，与该点的速度 $v(v_x, v_y, v_z)$ 的方向是一致的。

流线的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}x}{v_x} = \frac{\mathrm{d}y}{v_y} = \frac{\mathrm{d}z}{v_z} \tag{1.37}$$

在非定常流中，流线与某一流体微团质点所经过的轨迹，又称

需要全本请访问 www.ertongbook.com

迹线是不一致的。如图 1.2*b* 所示,在时间 t 流线 1 上的点 P_1 沿流线 1 的切线方向移动,经时间段 $\mathrm{d}t$ 后到达 P_2,该瞬时的速度方向不再是流线 1 的切线方向，而是新流线 2 的切线方向。但对于定常流，因速度矢量不随时间变化，故流线与迹线完全重合了。

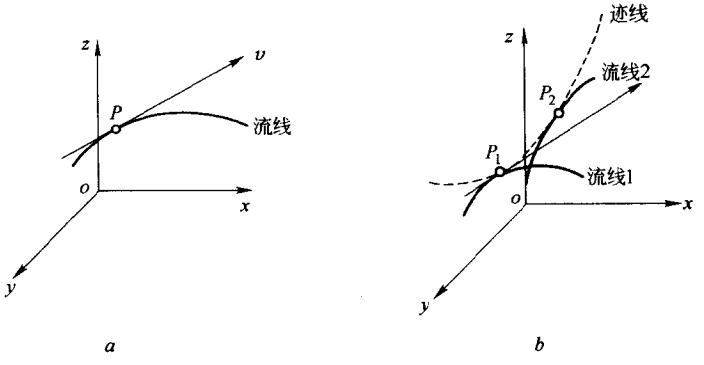


图 1.2　流线与迹线

1.3.4　平面势流与流函数

严格地说，在实际工程中并不存在平面流动。不过，在空气净化中的很多情况下，为简化起见，可近似作为平面流动来处理，然后再按实际条件加以修正。

选平面直角坐标 x, y,使速度分量 v_z 以及关于 z 的偏导数都等于零。若流动为势流和定常流。则这个流场就成为平面势流。按式(1.33)得

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad , \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{1.38}$$

式中　ϕ——平面势流函数。

连续方程为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \tag{1.39}$$

这个式子可以看作是 $-v_y \mathrm{d}x + v_x \mathrm{d}y$ 成为全微分的充分必要条件,这个全微分为

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x}dx + \frac{\partial \psi}{\partial y}dy = -v_y dx + v_x dy \qquad (1.40)$$

ψ 称为流函数,定义为

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v_y \quad , \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = v_x \qquad (1.41)$$

根据连续方程(1.29),容易得到极坐标下 ψ 的定义

$$v_r = \frac{\partial \psi}{r\partial \theta} \quad , \quad v_\theta = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \qquad (1.42)$$

比较式(1.38)和式(1.41),ϕ 和 ψ 两函数之间的关系为

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad , \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad (1.43)$$

对于一个平面无旋不可压缩流动，流线与等势线是正交的。这个结论可用两组曲线的斜率关系去证明。流线的斜率是$(dy/dx) = v_y/v_x$。沿等势线,由式(1.32)得平面流 $v_x dx + v_y dy = 0$。其斜率是$(dy/dx) = -v_x/v_y$。二者互为负倒数，故正交。要描写某一不可压缩流，ϕ 和 ψ 之中只要找到一个，就可以立即确定流场上各点的流速。

[例] 设有一种平面不可压缩流的势函数 $\phi = -\frac{a}{2}(x^2 - y^2)$,式中 a 为待定常数。求流场上的速度分布和压强分布，并做出流线和等势线的网图。

[解] 给了 $\phi(x, y)$,易得流速分布

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = -ax \quad , \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = ay$$

流线的微分方程

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y}$$

将 v_x 和 v_y 代入上式,积分,得 $xy =$ 常数。

流线是等边双曲线族。以 x 轴和 y 轴为其共同的渐近线。图 1.3 上只画了右半平面的流动情况。图 1.3 上也画了等势线族

$\phi = a(x^2 - y^2) = c$。等势线也是等边双曲线，而以 $x = y, x = -y$ 两条斜线为共同渐近线。轴线是流线之一，而流线是不可逾越的线。所以，我们可以把 y 轴作为一个固定边壁看。这相当于气流从正 x 轴过来，直向一块竖板冲去。中间有一条流线是 x 轴，x 轴上下两边气流各转 90°的弯，分别向 y 的正向和 y 的负向流去。也可以把 x 轴当作另一个固壁。流动只限于第一象限中，这就是气流遇到折壁的拐弯流动的情况。

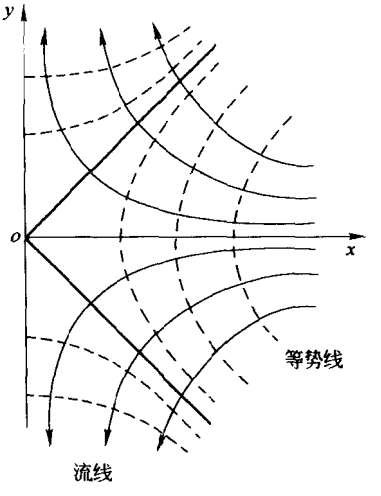


图 1.3　流线和等势线网图

流场各点的压强 P 可用伯努利公式计算

$$p = p_0 - \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0 - \frac{1}{2}\rho a^2(x^2 + y^2)$$

式中，p_0是流动的总压，即流速为零处（称驻点）的压强。等压线是一系列以 o点为圆心的圆。

在空气污染净化中，分析气体对固定边壁的绕流对研究粉尘的惯性和离心分离机理具有重要的意义。为此，我们给出几种固定边壁绕流的流函数和势函数表达式[1]。

流动情况如图 1.4 所示。这些流动可用下式表达（取极坐标）

$$\phi(r,\theta) = -\frac{a}{n}r^n\cos n\theta \quad , \quad \psi(r,\theta) = -\frac{a}{n}r^n\sin n\theta \qquad (1.44)$$

式中　n——实数；

r——极坐标半径；

a——待定常数。

流线可按 $\psi = c$ 画出来，即令；

$$r^n \sin n\theta = c \tag{1.45}$$

零流线 $\psi = 0$ 是

$$\sin n\theta = 0, \quad 即 \quad \theta = k\pi/n \tag{1.46}$$

式中的 k 可以是

$$k = 0, 1, 2, \cdots, 2n - 1 \tag{1.47}$$

这些零流线都是过原点 o 的直线，具体的位置由 n 值所决定。

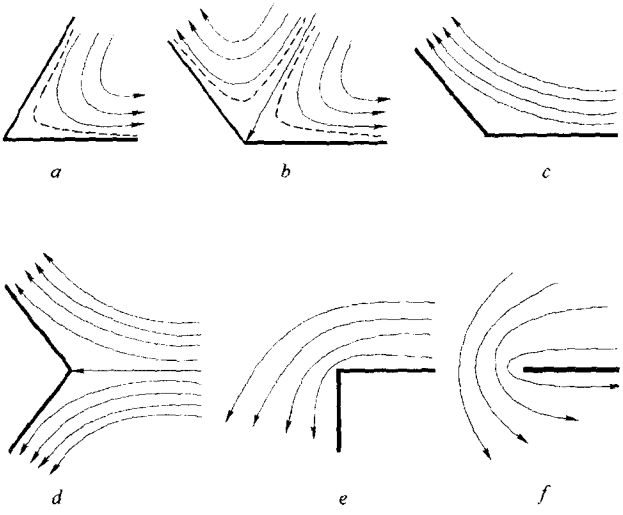


图 1.4 流体经固定边壁的绕流

当 $n = 2, k = 0, 1, 2, 3$。4 条直线彼此相隔 $\pi/2$，是绕凹直角的流动，如图 1.3 所示。如果 $n > 2$，是绕凹角的流动，凹角小于 $\pi/2$，图 1.4a 上画的是 $n = 3$。图 1.4b 是两个 a 拼在一起的流动，凹角等于 60°。如果 $1 < n < 2$，还是绕凹角的流动，凹角大于 $\pi/2$，图 1.4c 是 $n = 3/2$ 的流动。图 1.4d 是两个 c 拼在一起的流动，如果只把 $\theta = 2\pi/3$ 和 $4\pi/3$ 两条流线当作壁面的话，也可以算是绕凹角的流动。图 1.4 中的 e 和 f 是 $n < 1$ 的绕凸角的流动。前者，

$n=2/3$,后者，$n=1/2$。请注意，凡是绕凹角的流动，凹角顶点是驻点,即 $v=0$,凡是绕凸角的流动，凸角顶点处，$v\to\infty$。这些特点都是符合实际流动的。若求速度分布 v_r 和 v_θ,可利用式(1.36)或式(1.42).

1.3.5 旋涡流与源汇流

如切向入口的旋风除尘器或类似的切向入口的流体机械，里面的流场明显存在着两种不同性质的流动，强制涡和自由涡。强制涡是有旋流动，而自由涡是无旋势流。考虑平面流动，旋涡流的切向速度分布为

$$v_\theta r^n = 常数 \tag{1.48}$$

式中,当 $n=1$ 时为自由涡,当 $n=-1$ 时为强制涡。

在平面流中，从中心点径向向外四周流动称为源流。反之，由四周径向向内对中心点的流动称汇流。其径向速度分布为

$$v_r = \pm\frac{q}{2\pi}\frac{1}{r} \tag{1.49}$$

式中 q——流量,m/s。当流动为源流取正值，汇流取负值，表示与正向相反。

1.3.6 绕封闭体的流动

在空气污染控制中，过滤方法是一种常用的净化技术。因过滤材料置于气流中，所以，其周围的流场会对其捕集性能产生影响。从应用的角度考虑，这里直接给出绕封闭体的流动的流函数和速度分布表达式，而不作过多的推导。对于纤维过滤，可近似为绕圆柱体的流动；对于颗粒层过滤，可近似为绕球体的流动；对于较大的非规则形状的填料过滤，可近似为绕钝体的流动。关于绕非规则封闭体的流动，视具体情况参考有关流体力学书籍，这里不做介绍。

1.3.6.1 绕静止圆柱体的流动

势流情况下，用极坐标表示的绕圆柱体的流动的流函数为

$$\psi = v_0\left[1-\left(\frac{a}{r}\right)^2\right]r\sin\theta \tag{1.50}$$

式中　a——圆柱半径，m。

其径向和切向速度分布分别为

$$v_r = \frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = v_0\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\cos\theta, v_\theta = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -v_0\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)\sin\theta \tag{1.51}$$

在黏性流情况下，流函数为

$$\psi = \frac{v_0}{2La}\left[2\ln\left(\frac{r}{a}\right) - 1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] r\sin\theta \tag{1.52}$$

其中，参数 La 由下式给出

$$La = 2.002 - \ln Re_D \tag{1.53}$$

其中，Re_D 为绕直径 D 圆柱体流动的雷诺数

$$Re_D = \frac{\rho v_0 D}{\mu} \tag{1.54}$$

式中　ρ——气体密度，kg/m^3；

v_0——来流速度，m/s；

D——圆柱体直径，m；

μ——气体动力黏度，Pa·s。

径向和切向速度分别为

$$v_r = \frac{v_0}{2La}\left[2\ln\left(\frac{r}{a}\right) - 1 + \frac{a^2}{r^2}\right]\cos\theta, v_\theta = -\frac{v_0}{2La}\left[2\ln\left(\frac{r}{a}\right) + 1 - \frac{a^2}{r^2}\right]\sin\theta \tag{1.55}$$

1.3.6.2　绕静止球体的流动

势流情况下，用球坐标表示的绕球体的流动的流函数为

$$\psi = \frac{1}{2}v_0\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^3\right] r^2\sin^2\theta \tag{1.56}$$

式中　a——球体半径，m。

需要全本请访问 www.ertongbook.com