

# 大气污染控制工程

(第二版)

蒋文举 宁 平 主编

四川大学出版社

2005年·成都

责任编辑：周树琴  
责任校对：王 锋  
封面设计：罗 光  
责任印制：杨丽贤

图书在版编目 (CIP) 数据  
大气污染控制工程 / 蒋文举, 宁平主编. — 成都: 四川  
大学出版社, 2001.9  
ISBN 7-5614-2201-6

I. 大... II. ①蒋...②宁... III. 空气污染-污染  
防治 IV. X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 061518 号

### 内容简介

本书主要介绍大气污染控制的基本理论、颗粒污染物控制、气态污染物控制、污染物稀释法控制以及废气净化系统等内容。本书从大气污染控制的机理出发,分析各种污染控制过程,优选各种控制方法,指导设备设计,着重工程应用,使读者能了解各种控制过程的内在联系,有效地掌握和灵活地应用各种理论知识去解决实际工作中的大气污染问题。每章都列有例题、习题。

本书可作为高等院校环境工程专业及相关专业的本科生及研究生的教材或参考书,亦可供环境保护、环境监测、环境规划与管理等有关科技人员参考。

### 书名 大气污染控制工程(第二版)

主 编 蒋文举 宁 平  
出 版 四川大学出版社  
地 址 成都市一环路南一段24号(610065)  
发 行 四川大学出版社  
印 刷 郫县犀浦印刷厂  
成品尺寸 185 mm × 260 mm  
印 张 20  
字 数 470 千字  
版 次 2005 年 9 月第 2 版  
印 次 2005 年 9 月第 2 次印刷  
印 数 4 001 - 7 000 册  
定 价 28.50 元

◆ 读者邮购本书,请与本社发行科  
联系。电话:85408408/85401670/  
85418023 邮政编码:610065

◆ 本社图书如有印装质量问题,请  
寄回出版社调换。

◆ 网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

# 再版前言

“大气污染控制工程”是高等院校环境工程专业的一门主干课程。本书是在我们多年教授“大气污染控制工程”专业课程基础上合作编写的本科教材。

该书 2001 年由四川大学出版社出版发行以来，受到我国环境工程教学、科研和管理部门有关人员的广泛关注，已为多所高校选作教材和研究生考试参考书，产生了较好的效果。本书被评为 2001 年度四川省优秀图书。

全书分五个部分共十五章。第一部分是基本理论，包括概论、燃烧与大气污染、大气污染控制基础知识；第二部分是颗粒污染物控制，包括机械式除尘器（重力、惯性、旋风和旋流除尘器）、电除尘器、过滤式除尘器、施工除尘器。第三部分是气态污染物控制，包括吸收法、吸附法、催化法、生物法、等离子法、燃烧法、冷凝法、膜分离法、电化学法等；第四部分是污染物的稀释法控制，主要包括大气扩散和烟囱设计；第五部分是废气净化系统，包括集气罩、管道系统、风机和泵以及净化系统的施工、设计与运转管理等。为了帮助读者牢固掌握基本内容和扩大知识范围，每章编有习题和参考文献。

本次再版主要对书中部分内容进行了修改，且对第一版中存在的错误进行了更正。

本书内容新颖、系统，理论联系实际，着重工程应用，力求引导读者把理论应用于各种控制装置的实际设计与分析，培养读者的创新思维和工程应用能力。

本书由蒋文举、宁平主编，朱联锡教授主审。参加编写的有：四川大学蒋文举（第十、十一、十四章），尹华强（第三、八、十三章），苏仕军（第二章）；昆明理工大学宁平（第一、五、九章）；西南科技大学薛勇（第四、六章）；西南交通大学王文勇（第七章）；中国工程物理研究院环保中心赵君科（第十二章）。

编写本书时参阅并引用了国内外的有关文献资料，并得到上述单位许多老师和同事的帮助和支持。四川大学周树琴、昆明理工大学黄小凤、易红宏为本书的出版付出了辛勤劳动。在此，一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者学识水平所限，书中错误与不足之处在所难免，热诚欢迎读者批评指正。

编者

2005 年 6 月

# 符号说明

- $A$ ——面积
- $A_f$ ——有效滤布面积，反应池横截面积
- $a$ ——比表面积，紊流系数，单位长度集尘极板面积
- $B$ ——过流截面宽度
- $C$ ——康宁汉修正系数，污染物浓度
- $C_{AG}$ ——气相气体浓度
- $C_{Ai}$ ——气液界面处液相浓度
- $C_D$ ——阻力系数
- $C_{KP}$ ——临界浓度
- $C_R$ ——脱除浓度
- $C_{VL}$ ——废气中被冷凝组分的初始浓度
- $C_a$ ——空气的体积分数，空气比热
- $C_f$ ——燃料比热
- $C_i$ —— $i$  气态污染物的浓度，单位体积吸收剂中溶质的摩尔数
- $C_{ma}$ ——空气的质量分数
- $C_p$ ——恒压比热，静态电容
- $C_{pi}$ —— $i$  气体污染物的恒压比热
- $C_v$ ——恒容比热
- $C_{vi}$ —— $i$  气体污染物的恒容比热
- $C^y$ ——燃料中碳元素含量
- $c$ ——旋风除尘器形状几何参数
- $D$ ——直径，筛下累计分布，扩散系数，断面直径
- $D_H$ ——当量直径
- $D_e$ ——有效扩散系数
- $D_m$ ——颗粒扩散系数
- $D_1$ ——渐缩管直径
- $\Delta D$ ——频率分布
- $AF$ ——空燃比
- $A_o$ ——吸气口面积
- $a_m$ ——平衡吸附量（静活性）
- $a_p$ ——表面积
- $b$ ——增长系数，射流半高度
- $C_A$ ——物质  $A$  的浓度
- $C_{AS}$ ——固相表面浓度
- $C_B$ ——本底浓度
- $C_I$ ——液相中惰性组分浓度
- $C_L$ ——反应物浓度
- $C_T$ ——液相总浓度
- $C_{允}$ ——地面允许浓度
- $C_e$ ——排出物比热
- $C_g$ ——废气比热
- $C_j$ ——进口气体含尘浓度
- $C_m$ ——混合物爆炸极限浓度
- $C_{mi}$ —— $i$  气体污染物的质量分数
- $\overline{C}_p$ ——混合气体恒压比热
- $C_{pm}$ ——平均恒压热容
- $\overline{C}_v$ ——混合气体恒容比热
- $C_{vp}$ ——液滴的体积分数
- $C_0$ ——环境质量标准
- $c_o$ ——气流中吸附质浓度
- $D_{AG}$ ——气相中分子扩散系数
- $D_{AL}$ ——液相中分子扩散系数
- $D_T$ ——填料吸收塔塔径，反应器直径，喉管直径
- $D_o$ ——卸灰口直径
- $D_2$ ——渐扩管直径
- $d$ ——烟囱出口直径

$d_A$ ——等投影面积径  
 $d_L$ ——等周长径  
 $d_p$ ——颗粒直径  
 $d_{sv}$ ——等面积体积直径  
 $d_a$ ——空气动力径  
 $d_{c50}$ ——分割直径  
 $d_e$ ——排气管直径  
 $d_{\min}$ ——百分之百捕集的最小颗粒直径  
 $d_o$ ——吸气口直径，筛孔直径  
 $d_t$ ——自由沉降直径  
 $d_{20}$ ——表面积平均粒径  
 $d_{32}$ ——体积面积平均粒径  
 $d_{50}$ ——中位径  
 $E_G$ ——气相能耗  
 $E_T$ ——接触能  
 $E_c$ ——起始电晕电场强度  
 $E_p$ ——集尘极附近电场强度  
 $E_0$ ——两极间的平均电场强度  
 $\Delta E_p$ ——位能差  
 $F$ ——横断面积，牵引力，浮力通量  
 $F_D$ ——阻力  
 $f$ ——频率密度分布，开孔率，污染权重  
 $G_s$ ——气体惰性组分流速，质量流速  
 $g$ ——重力加速度  
 $H_{OG}$ ——传质单元高度  
 $H_i$ ——溶解度系数  
 $H_y$ ——燃料中氢元素含量  
 $\Delta H_f$ ——燃料热焓  
 $\Delta H_e$ ——排出气热焓  
 $h_o$ ——太阳高度角，筛板上水层的原始高度  
 $h_2$ ——旋风筒锥体高度  
 $K_{AG}$ ——气相总传质系数  
 $K_{AL}$ ——液相总传质系数  
 $K_S$ ——对应增长速率  $\mu = \mu_{\max} \rho$  的污染物浓度

$d_F$ ——定向径  
 $d_M$ ——面积等分径  
 $d_s$ ——等表面积直径  
 $d_v$ ——等体积直径，当量直径  
 $d_b$ ——小球直径  
 $d_d$ ——斯托克斯直径  
 $d_g$ ——几何平均直径  
 $d_n$ ——一年中的日期序数  
 $d_{om}$ ——众径  
 $d_{10}$ ——算术平均粒径  
 $d_{30}$ ——体积平均粒径  
 $d_{40}$ ——加权平均粒径  
 $E$ ——能耗，热设备特征尺寸  
 $E_L$ ——液相能耗  
 $E_a$ ——活化能  
 $E_i$ ——亨利常数  
 $E_r$ ——电场强度  
 $\Delta E_k$ ——动能差  
 $e$ ——电子电量  
 $F_C$ ——气流汇流阻力  
 $F_r$ ——离心惯性力  
 $G$ ——气体质量流量，冷凝量，重力沉降参数  
 $G_w$ ——冷却水量  
 $H$ ——焓，高度，有效源高  
 $H_e$ ——机械功  
 $H_S$ ——烟囱几何高度  
 $\Delta H$ ——烟囱抬升高度，热焓  
 $\Delta H_g$ ——废气热焓  
 $h_i$ ——逆温层消失高度  
 $h_1$ ——旋风筒筒体高度  
 $K$ ——比热比，传质系数，平衡系数，除尘器系数，离子迁移率，吸附层保护系数，空气过剩系数，传质系数，渗透系数  
 $K_b$ ——生物降解速率常数

$K_{b2}$ ——生物二级动力学速率常数

$K_i$ —— $i$  组分的平衡吸附常数

$K_n$ ——努森数

$K'_v$ ——有温差时临界流量比

$K_y$ ——气相总传质系数

$k_{AG}$ ——气相传质系数

$k_{AL}$ ——液相传质系数

$k_a$ ——吸附系数

$k_o$ ——频率因子

$k_y$ ——外扩散吸附分系数

$L_p$ ——等效电感

$L_S$ ——流量, 吸附剂量

$L_2$ ——渐扩管长度

$M$ ——气体摩尔质量

$M_L$ ——液体物质分子量

$M_i$ —— $i$  气体的摩尔质量

$\dot{M}_e$ ——排出物质量流量

$\dot{M}_g$ ——废气质量流量

$m_d$ ——积聚的粉尘负荷

$N$ ——耗电功率

$N_{OG}$ ——传质单元数

$N_0$ ——离子密度

$O^y$ ——燃料中氧元素含量

$P$ ——压力, 通过率

$P_{AG}$ ——气相主体  $A$  的分压

$P_I$ ——气体中惰性组分分压

$P_e$ ——皮克雷特准数

$P_n$ ——无因次系数

$P_v$ ——动压

$P_0$ ——吸附组分饱和蒸气压

$\Delta P_G$ ——气相压力损失

$\Delta P_d$ ——粉尘层阻力损失

$p$ ——时间稀释指数, 地形因子

$Q_A$ ——分离膜的通量

$Q_N$ ——标准状态下的流量

$K'_b$ ——假一级反应动力学速率常数

$K_m$ ——膜常数

$K_v$ ——无温差时临界流量比

$K_x$ ——吸附相总传质系数

$k$ ——分离系数, 波尔兹曼常数, 反应常数, 卡门系数

$k_G$ ——气相传质系数

$k_b$ ——分解系数

$k_x$ ——内扩散吸附分系数

$L$ ——长度, 高度, 流量, 液相总流量, 混合层高度, 管道长度

$L_1$ ——减缩管长度

$l$ ——长度, 膜厚度

$M_A$ ——局部马赫数

$M_a$ ——空气的摩尔质量

$\dot{M}_a$ ——新鲜空气质量流量

$\dot{M}_f$ ——燃料质量流量

$m$ ——气体总质量, 修正系数, 粉尘负荷, 大气饱和度

$N_A$ ——传质速率

$N_t$ ——传质单元数

$n$ ——指数, 系数, 转速, 颗粒物浓度, 反应级数, 反射次数, 组分数

$P_A$ ——吸附物的分压

$P_{Ai}$ ——气液界面处  $A$  的分压

$P_{VS}$ ——饱和蒸气压

$P_i$ ——气相组分  $i$  的分压

$P_r$ ——对比压力

$P_w$ ——能耗

$\Delta P$ ——压差, 阻力损失

$\Delta P_L$ ——液相压力损失

$\Delta P_0$ ——清洁滤袋阻力损失

$Q$ ——流量, 热量, 源强

$Q_H$ ——热量

$Q_V$ ——烟气排放量

$Q_{dtw}^y$ ——燃料的燃烧热	$Q_g$ ——气体体积流量
$Q_l$ ——液体体积流量	$Q_1$ ——热损失
$q$ ——吸附剂吸附量, 反应速率, 换热量	$q_A$ ——吸附质从气相扩散到吸附剂外表面的量
$q_f$ ——比负荷, 入口气体摩尔流率	$q_s$ ——饱和荷电量
$q_p$ ——透过薄膜的摩尔流率	$q_1$ ——渗余相气体流量
$q_t$ ——瞬时荷电量	$R_A$ ——宏观反应速率
$R$ ——筛上累计频率分布, 筒体半径, 水力半径, 拦截数, 气体常数, 射流半径	$R_e$ ——雷诺数
$R_{ep}$ ——粉尘颗粒雷诺数	$R$ ——气体常数, 射流断面半径
$R_l$ ——比压损	$R_0$ ——摩尔气体常数
$R_1$ ——残存吸附质的百分数	$R_2$ ——吸附质的百分数
$r$ ——半径	$r_A$ ——本征化学反应速率
$r_a$ ——吸附速率	$r_c$ ——电极半径
$r_e$ ——排气管半径	$r_0$ ——电晕线半径, 旋风筒卸灰管半径
$S$ ——颗粒运动距离, 污染物流量, 螺距, 饱和度, 基质浓度, 大气稳定度参数	$S_T$ ——膜的总面积
$S^y$ ——燃料中硫元素含量	$S_{tk}$ ——斯托克斯数
$T$ ——温度	$s$ ——旋风除尘器排气管插入深度, 射流距离喷口的距离
$T_a$ ——空气温度	$T_c$ ——反应处于平衡时的温度
$T_e$ ——排出物温度	$T_f$ ——燃料温度
$T_g$ ——废气温度	$T_m$ ——最佳温度
$T_s$ ——烟气温度	$t$ ——时间
$t_0$ ——荷电时间常数	$\Delta t$ ——温差
$\Delta t_m$ ——对数平均温度差	$U$ ——内能, 喷淋密度, 吸附量
$u$ ——液体固气比, 热运动平均速率, 平均风速, 断面流速	$u_s$ ——离心分离速度
$u^*$ ——摩擦速率	$u_t$ ——粒子切线速度
$V$ ——体积, 电压, 吸附量	$u_0$ ——空塔空气流速
$V_G$ ——空隙体积	$V_C$ ——过滤层体积
$V_R$ ——催化剂体积	$V_L$ ——液相体积
$V_c$ ——起晕电压	$V_a$ ——燃料单位燃烧所需空气量
$V_m$ ——最大吸附量	$V_g$ ——气体体积
$V_y$ ——实际烟气体积	$V_s$ ——催化剂颗粒体积
$V_1$ ——起始流量	$\bar{V}$ ——实际空气量
	$V_{O_2}^k$ ——理论需氧量

$V_k^0$ ——理论空气量  
 $\dot{V}_a$ ——新鲜空气的体积流量  
 $\dot{V}_f$ ——燃料体积  
 $v$ ——流体速度  
 $v_D$ ——液滴运动速度  
 $v_g$ ——气体空塔流速  
 $v_m$ ——射流中心速度  
 $v_s$ ——颗粒运动速度，烟气出口速率  
 $v_{sp}$ ——空间速率  
 $v_x$ ——控制面上的控制风速  
 $v_1$ ——起始上升速率，断面平均流速  
 $v_\theta$ ——切向速度  
 $W$ ——功，流出物总量，伞形罩的宽度或直径，吸附剂的重量  
 $X$ ——单位体积生物产量  
 $X_{AS}$ ——比质量浓度  
 $X_a^*$ ——平衡吸附浓度  
 $X_{O_2g}$ ——废气中可燃组分需氧量  
 $x_{O_2}$ ——最小比需氧量  
 $x_g$ ——最小比产气量  
 $Y_A$ ——比质量浓度，摩尔分率  
 $Y_B$ ——破点浓度  
 $Y_0$ ——气体初始浓度  
 $y$ ——横风向距离，热设备短边与长边之比， $y$ 轴上距离  
 $Z_G$ ——气膜厚度  
 $z$ ——吸附床层高度，距离地面高度  
 $z_m$ ——吸附床层高度损失  
 $\alpha$ ——过剩空气系数，阻力系数，紊流系数，颗粒分布指数  
 $\beta$ ——分布系数，增大因子  
 $\gamma_d$ ——干绝热气温直减率  
 $\epsilon$ ——空隙率  
 $\epsilon_0$ ——真空介电系数，空隙率

$V_y^0$ ——理论烟气流  
 $\dot{V}_e$ ——排出物的体积流量  
 $\dot{V}_g$ ——废气体积  
 $v'$ ——室内气流速度  
 $v_f$ ——过滤速度，液泛速率  
 $v_k$ ——湍球塔临界速度  
 $v_r$ ——径向速度，气液相对速度  
 $v_{SD}$ ——液滴终端沉降速率  
 $v_t$ ——终端沉降速度  
 $v_0$ ——空塔速率，吸风口平均风速  
 $v_2$ ——质量平均流速  
 $v_{\theta c}$ ——旋风筒“筛网”处流体切向速度  
 $W_g$ ——气体质量流量  
 $W_l$ ——液体质量流量  
 $X_A$ ——比质量浓度，转化率，摩尔分率  
 $X_i$ ——组分  $i$  的摩尔分率，平衡转化率  
 $X_{O_2f}$ ——燃料燃烧需氧量  
 $x$ ——距离， $x$ 轴上的距离  
 $x_f$ ——距离，入口气体浓度  
 $Y$ ——生物产量  
 $Y_{AS}$ ——比质量浓度  
 $Y_E$ ——流出物浓度  
 $Y^*$ ——平衡吸附量  
 $y_i$ ——废气中组分的质量百分数  
 $Z$ ——高度，文丘里几何尺寸  
 $Z_L$ ——液膜厚度  
 $z_a$ ——传质区高度  
 $z_0$ ——地面粗糙度  
 $\alpha_{AB}$ ——膜分离系数  
 $\alpha_{AB}^*$ ——理论分离系数  
 $\gamma$ ——膜内转化系数，气温直减率  
 $\delta$ ——漏风率，相对密度，形状系数，太阳倾角  
 $\epsilon_p$ ——相对介电系数

$\eta$ ——净化效率	$\eta_D$ ——扩散沉降捕集效率
$\eta_G$ ——重力捕集效率	$\eta_I$ ——惯性捕集效率
$\eta_R$ ——拦截捕集效率	$\eta_d$ ——分级净化率
$\eta_S$ ——固相催化剂有效系数	$\eta_t$ ——总净化效率
$\theta$ ——蜗壳偏心角，切割率	$\theta_A$ ——A 组分的覆盖率
$\theta_i$ —— $i$ 组分的覆盖率	$\lambda$ ——地理经度，摩擦压损系数
$\lambda_H$ ——绝热升温	$\lambda_M$ ——分子平均自由程
$\lambda_e$ ——导热系数	$\lambda_m$ ——摩擦系数
$\lambda_0$ ——地理经度	$\mu$ ——动力粘度，微生物的增长速率，磁导率
$\mu_a$ ——空气的粘度	$\mu_g$ ——气体粘度
$\mu_i$ —— $i$ 污染物的粘度	$\mu_m$ ——平均粘度
$\mu_p$ ——液滴的粘度	$\mu_0$ ——273K 时的气体粘度
$\mu_{\max}$ ——最大微生物增长速率	$\nu$ ——运动粘度，比容
$\nu_L$ ——液体的运动粘度	$\xi$ ——阻力系数
$\xi_0$ ——清洁滤料的阻力系数	$\xi_d$ ——粉尘层的阻力系数
$\rho$ ——密度	$\rho_a$ ——空气密度
$\rho_b$ ——堆积密度，小球密度	$\rho_g$ ——气体密度
$\rho_i$ —— $i$ 颗粒污染物密度	$\rho_l$ ——液体密度
$\rho_p$ ——真空密度	$\Delta\rho$ ——气液密度差
$\sigma$ ——几何标准差，液体表面张力	$\sigma_g$ ——几何标准差
$\sigma_{yF}$ ——熏烟影响下的水平扩散参数	$\sigma_y$ ——水平扩散系数
$\sigma_z$ ——铅直扩散系数	$\tau$ ——剪应力，接触时间
$\tau_B$ ——实际操作时间	$\tau_E$ ——传质区形成和移出床层所需时间
$\tau_F$ ——传质区形成所需时间	$\tau_a$ ——时间
$\tau_b$ ——持续时间	$\varphi$ ——射流形状系数
$\varphi_r$ ——颗粒休止角	$\varphi_s$ ——颗粒形状系数
$\varphi_o$ ——筛板开孔率	$\phi$ ——填料因子
$\phi_s$ ——席勒模数	$\Psi$ ——惯性参数，水与液体的密度比
$\overline{\Psi}$ ——修正后的惯性参数	$\Phi$ ——地理纬度
$\omega$ ——角速度，驱进速度	$\omega_i$ —— $i$ 粒子的驱进速度
$\omega_p$ ——有效驱进速度	

# 目 录

第 1 章 概 论 .....	( 1 )
1.1 大气的结构及组成.....	( 1 )
1.2 大气污染和大气污染物.....	( 3 )
1.3 防治大气污染的法规和标准.....	(11)
第 2 章 燃烧与大气污染 .....	(15)
2.1 能源与燃料.....	(15)
2.2 燃料的燃烧.....	(19)
2.3 燃烧过程污染物排放量计算.....	(22)
2.4 燃烧过程中硫氧化物的形成与控制.....	(24)
2.5 燃烧过程中氮氧化物的形成与控制.....	(25)
2.6 燃烧过程中颗粒污染物的形成与控制.....	(27)
2.7 燃烧过程中其他污染物的形成与控制.....	(29)
第 3 章 大气污染控制的基础知识 .....	(32)
3.1 气体的物理性质.....	(32)
3.2 物料衡算与能量衡算.....	(35)
3.3 颗粒粒径及粒径分布.....	(40)
3.4 粉体颗粒的物理性质.....	(46)
3.5 气体中的颗粒动力学.....	(48)
3.6 净化装置的性能.....	(52)
第 4 章 机械式除尘器 .....	(59)
4.1 重力沉降室.....	(59)
4.2 惯性力除尘器.....	(63)
4.3 旋风除尘器.....	(64)
4.4 旋流除尘器.....	(78)
第 5 章 电除尘器 .....	(80)
5.1 概述.....	(80)
5.2 电晕放电.....	(82)
5.3 粒子荷电.....	(85)
5.4 粒子的捕集.....	(88)
5.5 电除尘器的结构.....	(91)
5.6 电除尘器的设计和选型.....	(96)

第 6 章	过滤式除尘器.....	(100)
6.1	袋式除尘器的除尘过程及机理 .....	(100)
6.2	袋式除尘器的性能 .....	(102)
6.3	袋式除尘器的结构 .....	(106)
6.4	袋式除尘器的设计 .....	(112)
6.5	颗粒层除尘器 .....	(115)
第 7 章	湿式除尘器.....	(119)
7.1	湿式除尘原理 .....	(119)
7.2	雾化接触型洗涤器 .....	(123)
7.3	液膜接触型洗涤器 .....	(130)
7.4	鼓泡接触型洗涤器 .....	(133)
7.5	湿式除尘器的设计举例 .....	(135)
第 8 章	吸收法净化气态污染物.....	(139)
8.1	吸收平衡 .....	(139)
8.2	吸收速率 .....	(143)
8.3	吸收设备与设计 .....	(151)
8.4	吸收净化法的应用 .....	(159)
第 9 章	吸附法净化气态污染物.....	(163)
9.1	吸附及吸附剂 .....	(163)
9.2	吸附平衡与吸附速率 .....	(166)
9.3	吸附装置及工艺 .....	(171)
9.4	固定床吸附过程的计算 .....	(173)
9.5	吸附剂再生 .....	(182)
9.6	吸附净化法的应用 .....	(184)
第 10 章	催化法净化气态污染物 .....	(189)
10.1	催化作用和催化剂 .....	(189)
10.2	气固相催化反应过程及动力学方程 .....	(191)
10.3	催化反应器及其设计 .....	(196)
10.4	影响催化转化的因素 .....	(202)
10.5	催化转化法的应用 .....	(204)
第 11 章	生物法净化气态污染物 .....	(207)
11.1	废气生物处理原理 .....	(207)
11.2	生物降解动力学方程 .....	(210)
11.3	废气的生物处理方法和装置 .....	(213)
11.4	生物净化法的应用 .....	(218)
第 12 章	等离子体法净化气态污染物 .....	(222)
12.1	等离子体净化气态污染物的基本原理 .....	(222)
12.2	电子束辐照烟气脱硫脱硝技术 .....	(225)

12.3	脉冲电晕放电烟气脱硫脱硝技术 .....	(228)
12.4	等离子体法处理易挥发性有机废气 .....	(232)
第 13 章	气态污染物的其他净化法 .....	(233)
13.1	燃烧法 .....	(233)
13.2	冷凝法 .....	(241)
13.3	膜分离法 .....	(244)
13.4	电化学法 .....	(250)
第 14 章	污染物的稀释法控制 .....	(253)
14.1	影响大气污染的气象因子 .....	(253)
14.2	烟气的抬升高度 .....	(262)
14.3	污染物落地浓度 .....	(265)
14.4	烟囱计算 .....	(274)
第 15 章	废气净化系统 .....	(280)
15.1	废气净化系统的组成及设计内容 .....	(280)
15.2	集气罩设计 .....	(281)
15.3	管道系统的设计 .....	(289)
15.4	风机和泵的选择 .....	(298)
15.5	净化系统的施工安装和运转管理 .....	(299)
参考文献	.....	(301)

# 第 1 章 概 论

## 1.1 大气的结构及组成

### 1.1.1 大气圈及其结构

大气是自然环境的重要组成部分，是人类赖以生存的必不可少的物质。在自然地理学上，把由于地心引力而随地球旋转的大气层称之为大气圈，其厚度大约为 10 000km。离地面越远，空气越稀薄，到地表上空 1 400km 以外的区域已非常稀薄，因此，从污染气象学研究的角来讲，大气圈是指从地球表面到(1 000~1 400)km 的范围。大气圈的总质量大约为  $6 \times 10^{15}t$ ，约为地球质量的百万分之一。

大气的密度、温度和组成随高度的不同而不同，呈现层状结构。例如，根据气温在垂直方向的变化情况，将大气圈分为对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层五层。如图 1-1 所示。

#### 1. 对流层

对流层是大气圈中最接近地面的一层，对流层顶高度随着纬度和季节的变化而变化。在赤道低纬度区为(16~18)km，在两极地附近的高纬度地区为(6~10)km。暖季比冷季要高。对流层的平均厚度约为 12km。这一层的特点是：

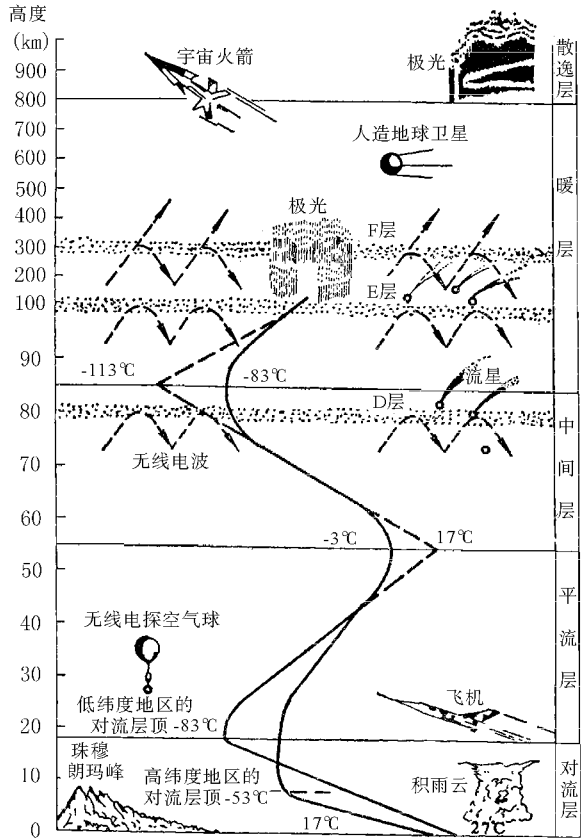


图 1-1 大气圈层的结构

(1) 由于地球表面大陆和海洋分布不均匀，再加上不同纬度接收的太阳辐射不同以及

地形的差别，因而在对流层中，特别是在下层中存在着大气在垂直和水平方向的对流，空气发生强烈的混合。

(2) 空气质量约占大气层总质量的  $3/4$ ，并且还含有一定量的水蒸气，对人和动植物的生存起着重要的作用。

(3) 云、雾、雨、雪和雷电等天气现象都在这一层发生。污染物的迁移、扩散和转化也主要是在这一层进行，特别是在离地 (1~2) km 的近地层。因此，对流层是对人类生产、生活影响最大的一层。

(4) 气温随高度的增加而下降，一般情况下，平均每升高 100m 下降  $0.65^{\circ}\text{C}$ 。

## 2. 平流层

平流层位于对流层上面，层顶距地面约 (50~55) km。此层根据温度的不同又可分为两层，从对流层顶到 (30~35) km，气温几乎不随高度而变化，称为同温层。而同温层上部气温则随高度的增加而迅速增高，这是因为在这一层存在一厚度约为 20km 的臭氧层，依靠臭氧层强烈吸收太阳紫外线 [波长为 (200~300) nm] 使气温增高。在平流层中，大气多是处于平流流动状态，因此，不利于进入平流层的污染物扩散，致使污染物在此层停留时间较长，甚至可达数年之久。并且进入平流层的污染物，如氮氧化物、氯化氢及氟利昂有机致冷剂等还能与臭氧发生光化学反应，致使臭氧浓度降低，严重时产生“臭氧空洞”，太阳辐射直接穿过“臭氧空洞”，造成地球表面的紫外线增强，就会导致更多的人患皮肤癌，对人类生态系统造成极大的威胁。所以，保护臭氧层是当今世界面临的紧迫任务之一。

## 3. 中间层

中间层位于平流层的上面，层顶距地面约 (80~85) km。此层有强烈的垂直对流运动，又没有臭氧吸收太阳紫外线，因而，在这一层气温随高度增加而迅速下降，层顶温度可降至  $-83^{\circ}\text{C} \sim -113^{\circ}\text{C}$ 。

## 4. 暖层

暖层位于中间层上部，层顶距地面约 800km。此层下部基本由分子氮组成，上部由原子氧组成。原子氧层可吸收太阳辐射的紫外光，因而该层气体温度随高度增加而迅速上升。暖层中的大量气体分子在太阳光和宇宙射线的作用下被电离，所以暖层又称电离层。电离层能反射电磁波，对远距离通讯有很重要的作用。

## 5. 散逸层

散逸层是大气圈的最外层，层顶不明确。该层空气更加稀薄，距离地面越远，气温越高，气体电离度越大，气体离子可散逸到宇宙空间。

又如：根据大气中氮气和氧气的组成比例是否有变化，将大气圈分为均质层和非均质层。从地球表面到大约 (80~85) km 高度处，其氮气和氧气的组成比例几乎没有变化，这一层称为均质层；其上的大气层，气体组成随高度而变化，称为非均质层。

### 1.1.2 大气成分

大气是多种成分的混合物，其中氮、氧、氩及微量氦、氩、氪、氙、氡等稀有气体的含量在地球表面几乎是不变的，为恒定组分，氮、氧两种气体所占的比例达到 99.03%。

大气中的二氧化碳和水蒸气由于受到地区、季节、气象以及人们生活、生产活动的影响而发生变化，为可变组分。通常，二氧化碳的含量在 0.02% ~ 0.04% 之间，水蒸气的含量小于 4%。此外，由于火山爆发、森林火灾等自然现象和人为因素将造成大气某种成分(不定组分)的增加或增多。

由恒定组分及可变组分所组成的大气，叫做洁净大气。不含水蒸气的洁净大气称为干洁空气，其组成如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 干洁空气的平均成分

气体名称	分子量	体积百分比(%)	重量百分比(%)
氮	28.016	78.08	75.55
氧	32.000	20.95	23.13
氩	39.944	0.93	1.27
二氧化碳	44.010	0.03	0.05
合计		100	100

表 1-2 干洁空气中微量气体的平均成分

气体名称	分子量	体积浓度(mL /m <sup>3</sup> )	重量浓度(mg /kg)
氦	20.183	18	12.9
氩	4.003	5.2	0.74
甲烷	16.04	2.2	1.3
氦	83.80	1	3.0
一氧化二氮	44.01	1	1.6
氢	2.016	0.5	0.03
氙	131.30	0.08	0.37
臭氧	48.00	0.01	0.02
氩	222	$0.6 \times 10^{-12}$	
合计		27.99	19.96

## 1.2 大气污染和大气污染物

### 1.2.1 大气污染

#### 1. 大气污染

大气污染是指由于人类活动而排放到空气中的有害气体和颗粒物，累积到超过大气自净化过程(稀释、转化、洗净、沉降等作用)所能降低的程度，在一定的持续时间内有

害于生物及非生物的现象。按照国际标准化组织（ISO）的定义，大气污染是指由于人类活动和自然过程引起某种物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到足够的时间，并因此而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境的现象。

大气污染的来源主要有两方面。一方面是自然界的自然现象引起的，此类污染一般依靠大气自净作用，最终可形成平衡；另一方面是由人类的生产、生活活动引起的，此类污染的特点是集中、持续、排放量大，常超过了环境的自净作用，有时甚至是不可逆转的。

## 2. 大气污染分类

大气污染按影响范围分为局域性污染、地区性污染、广域性污染和全球性污染；按污染物特征分为煤烟型污染、石油型污染、混合型污染和特殊性污染；按放射性特性分为放射性污染和物理化学污染。

## 3. 大气污染源分类

大气污染源是指向大气中排放各种污染物的生活或生产过程、设备、场所等。常用的分类方法有以下几种：

按源的形态分为固定源（工厂烟囱）和移动源（飞机、轮船、火车等）；按源的几何形状分为点源（烟囱）、线源（公路，一排烟囱）和面源（居民区、车间无组织排放）；按源离地高度分为高架源（排气筒有一定高度）和地面源（直接从地面排放）；按源排放时间分为连续源（连续排放）和间断源（间歇排放）等。

### 1.2.2 大气污染物

大气污染物按其存在状态一般分为气态污染物和颗粒物。颗粒物与气体行为类似，所以又称为气溶胶。大气污染物粗略地估计有百余种，表 1-3 分类列举了燃烧产生的大气污染物，表 1-4 列举了空气中主要的碳氢化合物，表 1-5 列举了有关的气态有机物。在我国《大气污染物综合排放标准》中列入的就有 33 项：二氧化硫、氮氧化物、颗粒物、氯化氢、铬酸雾、硫酸雾、氟化物、氯气、铅及其化合物、汞及其化合物、镉及其化合物、铍及其化合物、镍及其化合物、锡及其化合物、苯、甲苯、二甲苯、酚类、甲醛、乙醛、丙烯腈、丙烯醛、氰化氢、甲醇、苯胺类、氯苯类、硝基苯类、氯乙烯、苯并（a）芘、光气、沥青烟、石棉尘、非甲烷总烃。

表 1-3 大气污染物

	物理性质	浓度水平	人为来源	天然来源
SO <sub>2</sub>	无色，带刺激性臭味的气体；浓度在(0.3~1) mL/Lm <sup>3</sup> 时，可用味觉检测；在水中易溶(293K 下为 10.5 g/100cm <sup>3</sup> )	全球本底浓度在(0.04 ~ 6) × 10 <sup>-3</sup> mL/Lm <sup>3</sup> 之间，市区时平均最大浓度偶尔会超过 1mL/Lm <sup>3</sup>	固定源的燃料燃烧；工业过程的排放；金属和石油的炼制	有机硫化物的大气氧化

续表 1-3

	物理性质	浓度水平	人为来源	天然来源
H <sub>2</sub> S	无色,可燃性气体;剧毒;有明显的臭鸡蛋气味	全球本底值大约为 $3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;观察到的市区最大浓度为 $390\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	牛皮纸浆厂;天然气和石油炼制;人造纤维和尼龙的制造;炼焦炉	生物腐烂过程;火山和地热行为
NO	无色、无味气体;不易燃烧,在水中微溶;有毒	全球本底值在 $(10\sim 100)\times 10^{-6}\text{mL}/\text{m}^3$ 间,观察到的市区最大浓度为 $0.5\text{mL}/\text{m}^3$	燃烧	细菌作用;天然燃烧过程;照明
NO <sub>2</sub>	带明显刺激性气味的红棕色气体;有毒、易腐蚀性;能吸收许多可见光谱中的光	全球本底值在 $(10\sim 500)\times 10^{-6}\text{mL}/\text{m}^3$ 间,观察到的市区最大浓度为 $0.5\text{mL}/\text{m}^3$	燃烧	
NH <sub>3</sub>	带刺激性气味的无色气体;在浓度超过 $500\text{mL}/\text{m}^3$ 时能检测;在水中易溶	全球本底值为 $1\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ ;市区浓度在 $5\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ 范围之内	燃烧	在有机废物中氨基酸的细菌分解
CO <sub>2</sub>	无色、无味、无毒气体,在水中的溶解度适中	全球本底浓度从 1900 年的 $290\text{mL}/\text{m}^3$ 增加到 1985 年的 $345\text{mL}/\text{m}^3$	矿物燃料的燃烧	
CO	无色、无味、可燃的有毒气体,在水中微溶	全球平均浓度为 $0.09\text{mL}/\text{m}^3$ ;北半球的浓度大约是南半球的两倍;在交通繁忙的公路附近,市区值超过 $100\text{mL}/\text{m}^3$	矿物燃料的燃烧	甲烷和其他生物烃的大气氧化
O <sub>3</sub>	无色、有毒气体,在水中微溶	全球本底浓度在 $(20\sim 60)\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ 之间;受污染市区值在 $(100\sim 500)\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ 之间	没有最初来源,在涉及碳氢化合物和氮的氧化物的大气反应中形成的二次污染物	天然对流层的化学物质;从平流层输送到对流层
非甲烷烃类		全球本底浓度在 $(10\sim 20)\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ 之间;受污染市区值在 $(500\sim 1200)\times 10^{-3}\text{mL}/\text{m}^3$ 之间	不完全燃烧;工业源	植被