

# 城市大气污染扩散监测模型的理论\*与试验研究

韩明山 梅 宁 梁泽德

(中国海洋大学工程学院, 青岛 266071)

**摘要** 结合城市大气污染的具体情况, 在理论分析的基础上, 通过风洞实验对特定条件下的城市大气污染模型进行了模拟试验研究, 建立了适合一定条件下城市大气污染物扩散的数学和物理模型, 在此基础上对试验数据进行了分析和处理, 得到了特定条件下城市大气污染的一般规律, 该扩散模式同时还可以应用于城市大气污染物扩散浓度的估算。

**关键词** 大气污染 大气扩散 城市 风洞 物理模拟

## 1 引言

国内外已有很多学者对大气污染物扩散规律和扩散模式进行了大量研究, 但由于每一种模式都有其特定的适用条件, 因此在实际应用中必须结合当地的地理条件, 气象条件等因素来决定采用何种大气污染物扩散模式。本研究在借鉴前人研究工作的基础上, 结合具体地形条件, 辅之以风洞模拟试验得出了一定条件下的城市大气污染扩散规律, 建立了适用于一定条件下的扩散模式, 该模式也同样适用于其他污染物的扩散研究。

## 2 试验设备与模型简介

本试验研究的核心设备是一个直流吸式环境风洞, 空气从右至左被吸入管道, 该风洞由以下几部分组成(如图1所示), 其主要功能如下。

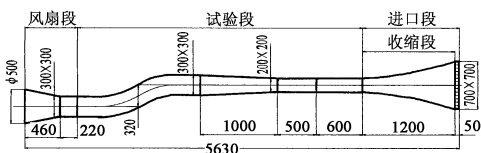


图1 风洞示意图

- (1) 洞体 主要作用是调节整理流过试验段的工作气流以满足实验要求。
- (2) 动力系统 不断产生并驱动工作气流流过风洞。
- (3) 控制系统 控制流过风洞的气流流量和流速。
- (4) 试验模型 用来模拟实际的各种建筑物和地形。
- (5) 测试和控制仪表 测量各种实验参数并保证相当的精度。

## 3 数学模型的建立

由于试验中模拟的污染源排放和流场都是定常的, 并且实验风速大于 1 m/s, 所以在推算污染物浓度时可以采用烟流模型<sup>[1]</sup>, 其扩散基本方程为:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

边界条件如下:

- (1)  $x=y=z=0$  时,  $c \rightarrow \infty$   $x, y, z \rightarrow \infty$  时,  $c \rightarrow 0$
- (2)  $k_z \frac{\partial c}{\partial z} \rightarrow 0$  ( $z \rightarrow 0$ )
- (3)  $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u c dy dz = Q$

结合传统高斯分布方程

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp \left[ -\frac{u}{4x} \left( \frac{y^2}{k_y} + \frac{z^2}{k_z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{其中: } \sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c y^2 dy dz / \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c dy dz$$

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c z^2 dy dz / \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c dy dz$$

这样, 在平均风速  $u$  已知, 扩散系数为常数条件下的浓度分布可表达为:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (3)$$

## 4 物理模型的建立

依据相似性原则, 为保证实验中的模拟流动与实际中的大气流动相似, 应保证各无量纲数分别对应相等, 在从地面到约1 000 m高度的大气边界层中, 发生的主要物理过程是地面与大气之间的质量、动量及能量的交换<sup>[2]</sup>, 因此其基本运动方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

\* 青岛市十五科技攻关重点项目, 青岛市科技发展局资助项目

### 动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + 2\epsilon_{ijk}\omega_j u_k = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{\Delta T}{T_0} g \delta_{i3} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial(-\overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} \quad (5)$$

### 能量守恒方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \left( \frac{k}{\rho c_p} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial x_k \partial x_k} + \frac{\partial(-\overline{\theta' u'_i})}{\partial x_i} + \frac{\Phi}{\rho c_p} \quad (6)$$

先采用下面的无量纲系数将方程无量纲化:

$$\begin{aligned} u_i^* &= \frac{u_i}{U} & u_i'^* &= \frac{u_i'}{U} & \theta'^* &= \frac{\theta'}{T_0} & x_i^* &= \frac{x_i}{L} \\ t^* &= \frac{tU}{L} & \rho^* &= \frac{\rho}{\rho_0} & \omega_j^* &= \frac{\omega_j}{\Omega_0} \\ p^* &= \frac{p}{\rho_0 U^2} & T^* &= \frac{T}{T_0} \\ \Delta T^* &= \frac{\Delta T}{T_0} \end{aligned} \quad (7)$$

这样可以得到无量纲化后的运动方程。

### 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \frac{(\rho^* u_i^*)}{\partial x_i^*} = 0 \quad (8)$$

### 动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{L\Omega_0}{U} 2\epsilon_{ijk}\omega_j^* u_k^* = \\ -\frac{\partial \rho^*}{\partial x_i^*} - \left( \frac{\Delta T}{T_0} \frac{Lg}{U^2} \right) \delta_{i3} + \frac{\nu}{UL} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_k^* \partial x_k^*} \\ + \frac{\partial(-\overline{u_j^* u_i^*})}{\partial x_j^*} \end{aligned} \quad (9)$$

### 能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u_i^* \frac{\partial T^*}{\partial x_i^*} = \left( \frac{k}{\rho_0 c_p \nu} \right) \left( \frac{\nu}{UL} \right) \frac{\partial^2 T^*}{\partial x_k^* \partial x_k^*} \\ + \frac{2(-\overline{\theta'^* u_i'^*})}{2x_i^*} + \left( \frac{\nu}{UL} \right) \left( \frac{U^2}{c_p T_0} \right) \Phi^* \end{aligned} \quad (10)$$

由于流动的全部特征已由上述控制方程组及边界条件决定,因此必须保证风洞模拟实验中的各个无量纲参数分别等于其在大气现场的相应数值,同时还应保证模拟实验中的下列边界条件在无量纲化之后也与实际大气现场的情况相等:(1)地形起伏;(2)地面粗糙度;(3)地面温度分布;(4)来流平均速度分布;(5)来流平均温度分布;(6)来流脉动速度分布;(7)来流脉动温度分布;(8)径向平均压力梯度。

## 5 无量纲数分析

从上面的数学和物理模型方程知道,要保证模拟试验能真正模拟实际中的大气污染扩散状况,必须得保证各无量纲数相似。

### 5.1 雷诺数( $Re$ )

依据雷诺数无关性理论(Reynolds number independence)可知,随着雷诺数  $Re$  的增大,湍流能谱分布中只有高频端(即较小尺度的湍流旋涡)受到影响,又因为较大尺度的湍流旋涡控制着边界层中的动量传输和质量传输,故模拟试验中只需要保证模拟实验中流动的雷诺数  $Re$  足够大(即大于某一临界值)<sup>[3]</sup>,在本实验环境风洞中,实验模型放置在从风洞试验段入口端 2 m 处,试验段底部表面的等效沙粒粗糙度为  $k_s = 10$  mm,则相对粗糙度的数值为  $x/k_s = 200$ ,由此可查出<sup>[4]</sup>在本实验特定条件下的临界雷诺数  $Re$  约为  $5 \times 10^5$ ,取运动学粘度系数  $\nu = 1.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,则可计算得到最低风速为  $U = 3.5 \text{ m/s}$ 。此实验风速可以达到,因此雷诺数相似可以保证。

### 5.2 里查森数( $Ri$ )

模拟里查森数即模拟低层大气的温度廓线对环境风洞的温度控制系统提出了复杂的要求,该实验模型缩小比例为 200,假设实际大气的温差为 10 K,如果不考虑雷诺数相似,为满足里查森数相似,则要求  $\Delta T_{\text{模型}} = 200 \Delta T_{\text{原型}}$ ,这就要求实验中的温差达到 2 000 K,因此要严格保证里查森数相似无法实现,另一方面,模拟雷诺数要求实验风速越大越好,而模拟里查森数相似则要求实验风速越小越好,这两方面也是互相冲突的,而模拟雷诺数相似更能够反映大气污染扩散的本质规律,因此试验以雷诺数为首要的相似参数,对里查森数只做到部分模拟。

### 5.3 普朗特数( $pr$ )

普朗特数代表动量传输速率与热量传输速率之比,因此普朗特数是流体的性质而非流动的特性,本实验以空气为实验介质,满足普朗特数相似条件。

### 5.4 罗斯贝数( $Ro$ )

罗斯贝数代表惯性力与地球自转造成的科氏力之比,在大气边界层中,科氏力使得水平风速矢量偏离水平气压梯度力的方向,并随高度的增加作顺时针转动,依据帕斯奎尔(Pasquill)<sup>[2]</sup>的计算,当烟羽水平传播的距离小于 5 km 时,可以忽略科氏力的影响而不至于产生明显的误差,由于本实验模拟烟羽的传播距离较短,因此对于本实验模拟的烟羽来说,可以不

考虑罗斯贝数的影响, 故罗斯贝数相似条件可以满足。

5.5 埃科特数(Ec)

埃科特数是能量耗散与对流传输的比值, 在空气中可表示为  $Ec = 0.4Ma^2 T_0 / \Delta T$ 。在环境风洞中, 埃科特数一般比其在大气中的数值小一个数量级, 而且实际大气中的埃科特数也是小于 1 的, 因此在两者都很小的情况下, 可以不考虑埃科特数相似的要求<sup>[3]</sup>。

6 试验数据及处理

根据帕斯奎尔(Pasquill)等人的研究: 对于给定了几何形状和布局的建筑物来说, 只要满足一定的流体动力学条件, 将浓度归一化后揭示出来的浓度场是普遍适应的<sup>[5]</sup>, 帕斯奎尔(Pasquill)采用的关系式为:

$$x = \frac{K_c Q}{uL^2}$$

本试验中经修正可得归一化浓度为:

$$c^* = \frac{cu_a L^2}{Q_s T_a / T_s}$$

式中  $c^*$  ——归一化浓度;

$c$  ——测量浓度;

$u_a$  ——大气风速;

$L$  ——长度特征值;

$Q_s$  ——污染排放量;

$T_a$  ——大气温度;

$T_s$  ——烟气温度。

表 1 实际测量数据(日期为 2003.5.25)

时间	温差	CO / $\times 10^{-6}$	O <sub>2</sub> %	COP	af	CO <sub>2</sub> %	eff
18:54:00	1	0	20.85	0	460.24	0.02	89
18:56:00	2	2	20.85	0	521.98	0.02	89
19:00:00	1	4	20.85	0	470.35	0.02	89
19:01:00	2	8	20.87	0	725.46	0.01	89
19:03:00	3	12	20.83	0	317.05	0.03	89
19:04:00	2	18	20.86	0	629.45	0.01	89.81
19:05:00	1	14	20.85	0	470.35	0.01	95.04
19:06:00	2	10	20.85	0	503.56	0.01	97.1
19:16:00	2	7	20.85	0	486.39	0.02	104.68
19:18:00	1	3	20.88	0	1861	0.01	104.98
19:19:00	2	0	20.84	0	356.68	0.03	100.48

表 1 为实际测量数据, 此数据还不能直接看出城市大气中 CO 污染状况的规律, 经由前面介绍的方法对数据进行无量纲化处理后可得表 2 所示归一化浓度<sup>[6]</sup>

表 2 无量纲化后的扩散浓度

距离 /mm	CO / $\times 10^{-6}$	温差	归一化浓度 / $10^{-4}$	计算结果 / $10^{-4}$
100	0	1	0	0.0004
80	2	2	2.7174	1.2145
60	4	1	5.4348	3.3867
40	8	2	10.8697	10.8764
20	12	3	16.3045	23.4267
0	18	2	24.4568	30.3652
-20	14	1	19.0219	23.4267
-40	10	2	13.5871	10.8764
-60	7	2	9.5110	3.3867
-80	3	1	4.0761	1.2145
-100	0	2	0	0.0004

将浓度归一化后并对试验数据进行拟合后, 理论计算结果与实际测量结果之间的差距在 30% 以内, 经与帕斯奎尔(Pasquill)在美国马萨诸塞理工学院朗德山(Round Hill)野外实验站进行的“大草原”试验<sup>[2]</sup>相对照, 结果比较符合通常条件下的实际状况, 从图 2 所示试验图形可以看出一定条件下城市大气污染的扩散与浓度分布规律: 在流场和污染源扩散稳定条件下, 连续点源大气污染扩散浓度呈正态分布, 随着距离增大, 扩散浓度逐渐降低, 在扩散中心轴线附近浓度达到最大值, 当距离增大到一定值以后, 扩散浓度逐渐趋近于零, 而在此边界以外区域, 测量浓度为零。

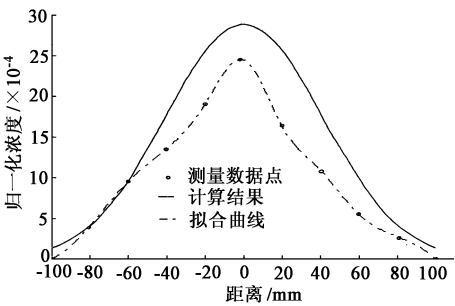


图 2 归一化后浓度分布

在流场和污染源扩散皆为定常条件下, 距污染源不同下风向距离时的污染浓度拟合曲线如图 3 所示, 从测量所得的污染数据来看: 随下风向距离的增大, 最大污染浓度逐渐降低, 浓度变化渐趋平缓, 但污染所影响的范围有所增加。

7 结论与分析

本研究在理论分析的基础上, 结合风洞模拟试验

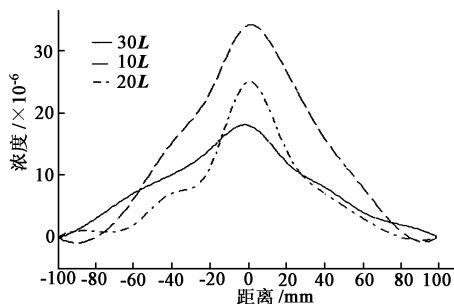


图3 浓度随下风向距离的变化  
注:  $L$  为长度特征值

对城市大气污染的扩散规律进行了研究, 根据试验测量结果对浓度值进行了无量纲化处理, 得出了一定条件下城市大气污染浓度的分布规律, 同时给出了一个估算城市大气污染扩散简单可行的模式, 该模式预测的结果经与风洞试验和前人进行的现场实验数据相对照, 能较好满足对城市大气污染状况进行初步预测的要求。

从理论分析和风洞模拟试验的结果, 可以得到如下结论:

(1) 在距污染源下风向距离一定的条件下, 污染扩散浓度呈正态分布, 在扩散中心轴线附近达到最大值, 当横向距离增大到一定值以后, 扩散浓度降低为零。

(2) 随着距污染源下风向距离的增大, 扩散浓度最大值逐渐降低, 浓度变化渐趋平缓, 但污染扩散所能够影响的范围有所增加。

(3) 风速增大将导致污染扩散与稀释速度加快,

污染浓度有所降低, 但当风速增加到一定值以后, 风速对污染的稀释能力已不太明显。

本研究的对象虽然是  $\text{CO}$ , 但该模式同样适用于其他气态物质诸如  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等的扩散研究。另外, 利用风洞模拟技术虽然可以模拟大气污染的扩散状况, 但还是存在一定的局限性, 与实际结果还是有一定的差距, 要十分细致模拟城市大气污染的实际状况也不太可能做到, 因此模拟试验只能够得到大气扩散的一般规律, 对于污染浓度的细节变化还得另外研究。

#### 参考文献

- 1 孟繁坚, 杨汝均. 环境系统工程导论. 轻工业出版社, 1987.
- 2 [英] P. 帕斯奎尔, F. B. 史密斯 著. 曲绍厚, 温玉璞, 周孝恒, 李世奎 译. 大气扩散. 科学出版社, 1987.
- 3 宣捷著. 大气扩散的物理模拟. 气象出版社, 2000.
- 4 Briggs G. A. Diffusion estimates for small emissions, in U. S. . National Oceanic and Atmospheric Administrator E. R. L. Report, 1973.
- 5 F. Pasquill and F. B. Smith. ATMOSPHERIC DIFFUSION Third edition Ellis Horwood limited 1983.
- 6 景银兰, 谷淑惠. 复杂地形污染物扩散模式. 华北工学院学报, 2001. 66: 440 ~ 444.

作者通讯处 韩明山 266071 山东省青岛市 中国海洋大学工程学院

电话 (0532)5903063

E-mail hms1321@sohu.com

2003-07-29 收稿

## “2004(第四届)全国水污染防治与废水资源化技术研讨会”征文通知

为了总结和交流近年来中国水污染防治与废水资源化领域的研究及应用成果, 中国环境科学学会环境工程分会和《环境工程》编辑部计划于2004年7月下旬召开“2004(第四届)全国水污染防治与废水资源化技术研讨会”。征文通知如下:

一、征文范围: 城市污水处理与资源化的新工艺技术及成套设备; 工业废水处理与回用技术与设备; 江河湖泊清淤及污染治理技术与研究成果; 水质分析监测技术与仪器; 新型水处理药剂、制品及材料; 污泥脱水与处理处置技术; 污水处理厂投资、运营及管理经验等。

二、征文要求: 内容充实、数据准确、论证可靠、文字通顺, 文责自负, 论文字数控制在5000字以内。文稿录入请用Word系统, 版面为A<sub>4</sub>纸规格, 通栏排版, 上下左右页边距均取30mm; 标题(2<sup>#</sup>黑体)居中; 作者姓名(5<sup>#</sup>楷体)位于标题下方(空一行)居中; 作者单位、地区、邮编(小5<sup>#</sup>宋体)位于作者姓名下方(空一行); 摘要、关键词(小5<sup>#</sup>仿宋)位于作者单位等下方(空一行); 正文用5<sup>#</sup>宋体, 一、二、三级标题序号分别用阿拉伯数字表示(如“1”、“1.1”、“1.1.1”); 图、表尽量排列紧凑; 正文后列出参考文献(小5<sup>#</sup>宋体)和第一作者简介及通讯处(约100字左右, 小5<sup>#</sup>宋体); 文章不打印页码。

三、联系方式: 地址: 北京市海淀区西土城路33号环境工程分会 邮编: 100088

电话: (010)82227640 E-mail: hjxh@hjgc.com.cn 来信请务必在信封注明: “会议征文”

production in a steel mill, where blast furnace slag is used as major raw materials, including materials, prescription and pivotal techniques of production, it is concluded that using blast furnace slag to produce glass-ceramic is feasible, and it has a good prospect and environmental benefit.

**Keywords** industrial slag, glass-ceramics and environmental benefit

## RESEARCH ON MUNICIPAL DOMESTIC REFUSE TRANSFER EQUIPMENT ..... Lü Chuanyi et al (54)

**Abstract** The transfer way of municipal domestic refuses is analyzed in this paper. The developed chain-driving refuse transfer station of horizontal type is introduced. And the key technology of a new type compression refuse transfer station with wedge-shaped compressor is also introduced.

**Keywords** municipal domestic refuse, transfer equipment, refuse transfer station, horizontal type and compression type

## DEVELOPMENT OF SULFUR FIXATION AND COMBUSTION-SUPPORTING AGENT FOR LOOSE COAL USING RED MUD AND BLACK LIQUOR OF PAPERMAKING ..... Yin Guoxun et al (57)

**Abstract** According to the sulfur fixation principle of the sulfur-fixation agent in Ca-series, the author found that the addition of high Ca red mud to a loose coal can fix its sulfur when burning. However, red mud affected the calorific value of the coal, it is black liquor of papermaking that high organic content made up for the loss of the heat of the coal, by which a sulfur fixation and combustion-supporting agent can be made. The result of the experiment showed that the agent could fix the sulfur and support combustion for the low-sulfur coal, and it can be widely utilized.

**Keywords** red mud, black liquor of papermaking, loose coal and sulfur fixation and combustion-supporting agent

## DETERMINATION OF $\text{COD}_{\text{Cr}}$ IN WATER BY CONTINUOUS FLOW ANALYSIS ..... Jiang Faping et al (60)

**Abstract** A grand-lot fast determination of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  in environmental water samples was conducted using continuous flow analysis, which can be compared with national standard method (potassium bichromate method). Its results have excellent accuracy and reproducibility with a detection limit of 1.3 mg/L and the accuracy of analyzing a standard sample is over 98%, whose variation coefficient is in the range of 0.21% ~ 1.00%; the relative deviation is 0.4% ~ 1.4% between the result of an actual water sample and that of potassium bichromate method, and the recovery of environmental water samples and industrial wastewater is 93% ~ 101%.

**Keywords**  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , continuous flow analysis and water sample

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON MONITORING MODEL FOR URBAN ATMOSPHERIC POLLUTION DIFFUSION ..... Han Mingshan et al (62)

**Abstract** A simulation test was conducted for an urban air pollution model under special conditions through wind tunnel experiment, on the basis of theoretical analysis, combining specific situations of an urban air pollution. Mathematical and physical models of urban air pollutants diffusion suitable for certain conditions were also set up, based on which the test data were analyzed and processed, and a general rule of an urban air pollution under special conditions was also obtained, which can be used for estimating the diffusion concentration of urban air pollutants.

**Keywords** air pollution, atmospheric diffusion, wind tunnel and physical simulation

## EXPERIMENTAL STUDY ON HORIZONTAL SPIRAL DEVICE FOR AEROBIC SLUDGE DYNAMIC COMPOSTING—EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE PRIMARY FERMENT OF DIGESTED SLUDGE ..... Zhang Zhi et al (66)

**Abstract** A horizontal spiral device for aerobic composting was developed. By using this device, a pilot-scale test on treating anaerobic digested sewage sludge was carried out, employing the technique of batch-dynamic composting with wood dust as amendment at a moderate temperature. Five kinds of various moisture contents (ranged from 51.0% to 71.0%) were adopted for the primary fermentation when the ratio of sewage sludge to wood dust is 10:1 (wet weight) and the aeration rate is 5.0 m<sup>3</sup>/h·t. The influence of different moisture contents upon the pile temperature, organic matter, pH value, total nitrogen and organic carbon was investigated. This study indicated that the optimal moisture content was