

## 局地废气排放污染影响的实验模拟

蒋维楣 马福建 谢国梁 潘裕强  
(南京大学大气科学系)

### 提 要

本文给出了一项在南京大学 NJU 环境风洞中实施的实验模拟研究。试验模拟一座位于城市街区的排放塔的废气排放,通过流场测量,放烟显示和示踪气体扩散试验,分析气流分布与污染物浓度分布,得出对局地环境影响的一些结论。文中还以模拟扩散试验资料为实验基础,建立修正的扩散模式,探讨污染物浓度预测的可靠途径。研究结果表明,风洞流体模拟手段是有效且实用的。

### 一、引 言

实验模拟与经验统计模式、高斯模式和数值模拟一起,成为现代城市空气质量影响分析及预测研究的四种基本途径。它是在一定的实验装置,例如环境风洞里,运用流体模拟手段把发生在大气边界层内的气象过程,如气流流动、湍流扩散和空气质量变化等再现于实验室里,进行大量细致的、可重复的试验分析。它具有试验条件可控、试验周期短以及不受实际天气条件影响等优点。因此,近一、二十年来在许多问题的基本机制研究和工程气象应用中发挥其独特的作用,从而也成为应用气象学科发展的一个重要领域。

对于一些座落于比较复杂的环境,如城市街区建筑群综合体中的废气排放问题,由于影响分析的局地环境尺度小,结构复杂,因此时空分辨率要求高。现场实测研究不仅实施极其困难,而且也难以达到分辨率高的要求。于是常藉助于实验模拟手段。这方面国外已有一些颇有成效的工作和总结<sup>[1-4]</sup>。本文给出在南京大学 NJU 环境风洞中实施的一项实验模拟研究及其结果分析。

### 二、实验模拟研究方法

本试验在南京大学的 NJU 环境风洞中进行。该风洞系一座直流吹式中性大气环境模拟风洞,试验段呈矩形截面,宽2m,高1.4m,长16m,风洞顶板可调。其气动轮廓如图1所示,其详细构造和性能参见文献[5]中说明。试验段装有高精度三维移测架,可将感测探头移送至三维空间任意位置,以测量模拟气象场和浓度场的各种变量。风洞附有微机数据采

集系统,以便及时获取测试数据并予处理。

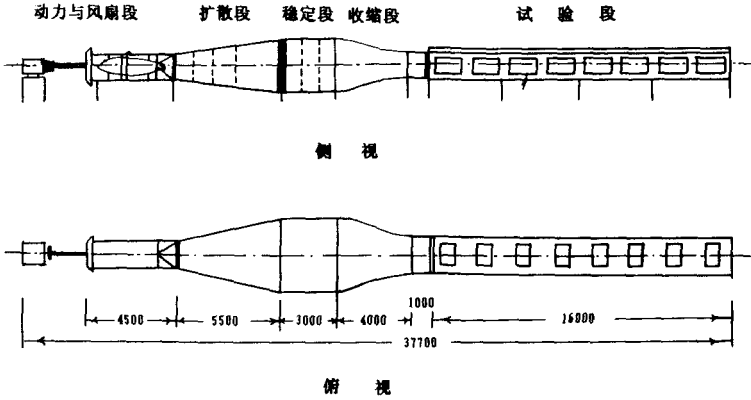


图1 NJU 环境风洞气动轮廓示意图(比例尺1:200)

试验目的是模拟位在大都市街区的一座废气排放塔 的污染影响。塔身外形与构造均有一定特点;周围街区交错,地形平坦无起伏,唯楼房林立(平均高度以14m 计),环境较复杂。显然,为实施有成效的模拟,首先必须按一定缩比建立准确的模型和相似的排放条件。排放塔轮廓外形如图2所示。

风洞流体模拟试验,是将处于大气边界层里的现场原型搬至风洞模拟边界层里。因此,除满足几何相似(本试验取1:324的缩比)建立模型外,尚需满足运动相似和动力相似条件。按流体模拟相似原理,中性层结下的气流运动相似主要取边界层风和湍流相似。本试验取:(1)模型与原型对应点上的流向相同,流速成比例;(2)模型风廓线与原型相似,乘幂律指数相等,据现场实测取排放塔上方风廓线指数  $P = 0.30$ ;(3)模型与原型的湍流强度相同,据现场实测取排放塔高度的纵向湍强  $i_z = 0.18$ ;(4)模型与原型的排放条件相似,取排放源高处环境风速与废气排放速度之比相似。并认为取排放结构与排放方式相同,则排放条件相似。动力相似考虑则要求在充分发展湍流的条件下,满足湍流雷诺数

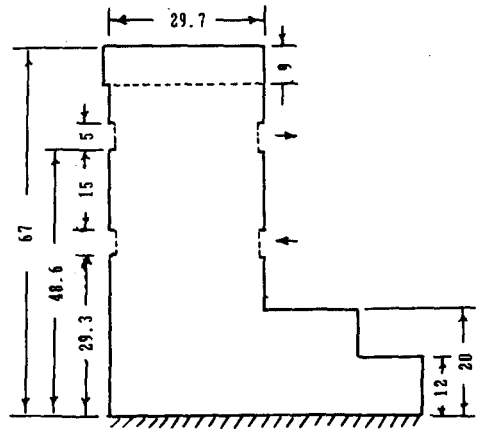


图2 风塔外形轮廓(比例尺1:1000,单位:m)

$Re_k = \frac{UL}{k}$  相等的相似条件。采用目前国内普遍运用的根本茂(Nemoto, 1968)<sup>[6]</sup>相似准则,其实用关系为:  $U_{模型}/U_{原型} = (L_{模型}/L_{原型})^{1/3}$ ;  $t_{模型}/t_{原型} = (L_{模型}/L_{原型})^{2/3}$ 。这里  $U$  为平均风速,  $t$  为取样时间,  $L$  为特征长度,  $k$  湍涡粘滞系数(按照实用相似判据,试验时它不出现在判据关系中)。

作为气流与扩散模拟的基本舞台,应首先在风洞试验段形成与原型相似的边界层。采

用人工形成方法,即从试验段气流入口处开始,依次布设城垛挡墙、尖塔涡旋发生器以及三种不同尺度的粗糙元列阵。整个边界层形成系统行程7m,能够形成向下游渐渐增厚并至一定距离达平衡的模拟边界层,厚度约70cm。

### 三、气流分布与废气排放的流动显示模拟

试验研究气流分布并模拟废气排放的途径有两种。一种通过平均流速和湍流测量,揭示气流分布特征,主要采用热线微风仪实施,使用美国 TSI 热线风速仪系统。为保证稳定性采取:(1)由专用射流装置作经常性校验;(2)每个数据取十个样本平均处理。另一种是通过放烟实施流动显示,观测模拟废气的排放情形,主要采用照相与摄影记录的办法。

如图2所示的排放塔处于边界层气流中,其空气动力学特征必定影响气流的分布与湍流结构,从而直接影响污染物的散布规律。在模型排放塔上下游不同垂直剖面作气流测量,结果表明,由于塔的存在,使得(1)塔后风速急剧减小,形成背风侧最大速度亏损区,影响范围可及下游5—6倍塔高距离(水平向)和2—2.5倍塔高范围(垂直向);(2)塔后形成高湍流强度的涡旋活动区,纵向湍强至塔高度开始向上急剧减弱,而在整个塔高度层内湍强维持较高水准,体现了扰动影响;(3)随着离塔下游距离的增大,上述变化趋势减缓并渐渐回复气流分布的原状。图3给出这类测量结果的实例,分别为平均风速和纵向湍强分布。所给实例是在排放塔的上下游测得。平均风速分布图中还给出了风廓线乘幂指数的变化值。试验还测量了模拟区上空不同高度、不同来流方向(风向)下平均风速和湍强的水平分布,揭示废气排放高度层的气流分布特征。还测定了模型区不同位置的风速和湍强垂直分布,如图4所示。图4表明,模型区中心排放塔所在位置,平均风速随高度递增明显加剧,尤其在低层;而湍强则随高度陡减,同样更明显地反映在下部。这显然是由于建筑物扰动所致。

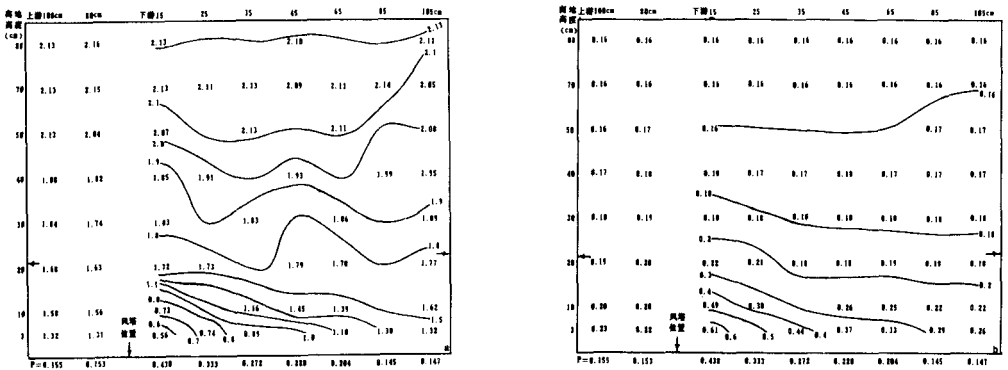


图3 气流分布测量结果示例 (a)平均风速( $u, m/s$ ) (b)纵向湍强  $t_i$

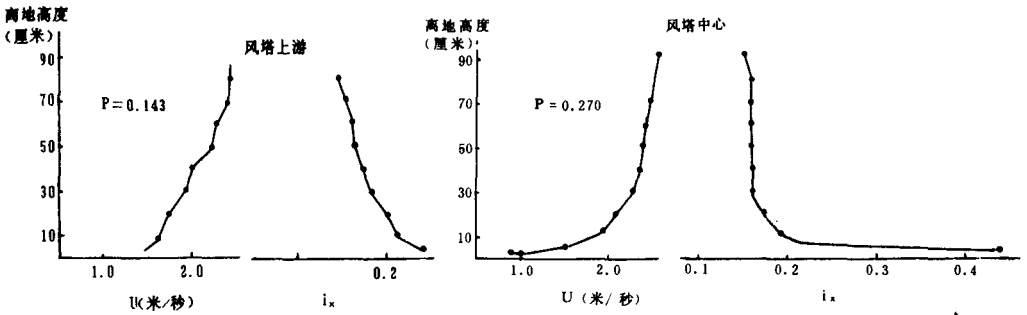


图4 模型区平均风速和湍强垂直分布

由施放可见烟流,模拟排放塔废气排放,能清楚观察并拍摄记录各种特征现象。我们对所摄得的可见烟流照片,根据烟流轮廓和特征点加上背景网格标尺作定量分析处理。由大量照片记录的结果分析可得如下主要结论:(1)当排放源高处环境平均风速与废气排放的水平出口速度之比超过1.8倍时,开始发生烟流下洗现象。烟气触地造成地面污染高浓度,随风速增大而落地点离源距离减小。在本试验模拟条件下(风速2.6—5.2m/s),落地点位于离源2—6倍塔高距离范围内。(2)从拍摄照片上的烟流轮廓可测定烟流横向散布宽度(2y<sub>0</sub>)及其随下游距离(x)的变化,便直接得知离塔近距离范围的废气散布特征。所得结果(表1)与下节示踪扩散试验结果吻合。(3)当排放塔下游一定间距处存在另一高耸建筑物时,烟流会发生几种现象,如抬升爬越、在迎风面铺开和先下洗然后绕行等,且可归纳出一定规律,如①两体间距较小时,烟流爬越障碍的现象较明显;②相同间距时,环境风速越小,烟流分离点离障碍物迎风面越远;③相同环境风速情况下,间距小时烟流爬升分离点更靠近障碍物迎风面。

表1 烟流横向散布范围(2y<sub>0</sub>)

下游距离(x)		2y <sub>0</sub>			
模 型	原 型	模 型	原 型	模 型	原 型
		5.2m/s		2.6m/s	
(cm)	(m)	(cm)	(m)	(cm)	(m)
10	32	28	90	36	117
20	65	34	109	41	133
30	97	39	126	47	152
40	130	44	143	52	169
50	160	48	156	56	181
60	194	52	169	60	193
70	227	56	181	63	204
80	259	62	201	65	211
90	292	65	211	69	223
100	324	70	227	87	282

### 四、示踪气体扩散模拟

模拟扩散试验采用乙烯(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)作为微量示踪气体。以模型与原型的无量纲浓度相等的原理计算确定模拟源强。由空气压缩机、过滤器、混合室、流量控制器及流量计和乙烯气源等组成示踪气体排放系统。由图5所示系统采集气样；送至 HP5890-A 型气相色谱仪和 HP3392-A 型积分仪分析处理，浓度分辨至10<sup>-9</sup>体积比。采样系统系52路采集器同步自动采集，采气瓶由医用20毫升注射器加工特制，以保证气路的单向性，由它替代常用的三通阀或单向阀，简单经济，可靠性好。

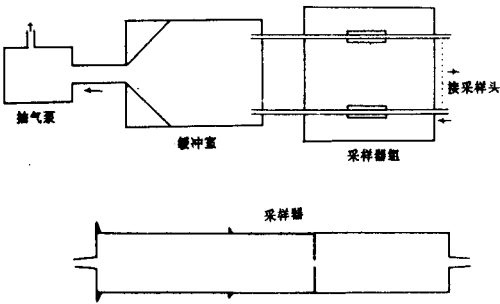


图5 气样采集系统示意图

模拟扩散试验取两种方式布置实施，一种以孤立排放塔布置，源下游设置放射形弧线采样点和不同位置垂直采样点；一种以模型区布置，源四周的特征点设采样点和不同位置垂直采样点。前者研究排放塔扩散特性；后者则分析废气排放环境影响，均取得良好效果。大量试验数据分析表明，对孤立排放塔情形：(1)浓度水平分布仍近似呈高斯型，唯散布范围较宽。(2)浓度垂直分布由于空气动力学效应而呈偏态，峰值明显下移并随下游距离的增加而到地。这种分布特征明显地影响到地面轴线浓度分布。由浓度试验分析得烟流轴线触地的离源距离(平均为离源227m)与放烟观测所得相吻合。(3)考虑到在风洞中的扩散模拟会受到洞壁影响，利用高斯分布条件下示踪气体浓度  $C \approx 0.61C_0$  时的烟流宽度为两倍浓度标准差的关系，即  $y_D = \sigma_y, z_D = \sigma_z$  (这里  $C_0$  为轴线浓度)。以此算得扩散参数，

表2 扩散参数平均值

离源距离 x (m)		97	162	227	292	486
水平	$\sigma_y$		31.8	41.3	53.7	77.0
	$2y_0$		137.0	178.0	274.0	331.0
垂直	$\sigma_z$	19.1	26.0			
	$2z_0$	82.0	112.0			

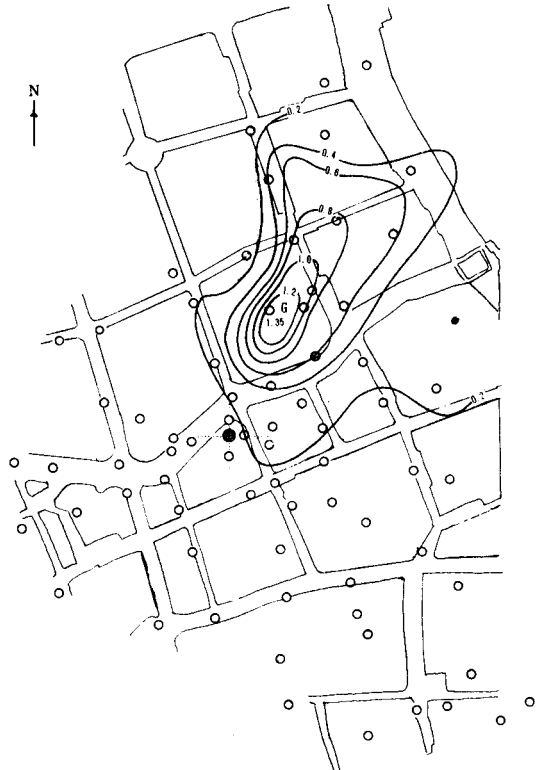


图6 模型区浓度分布实例(风向:SW)

(单位:mg/m<sup>3</sup>)

结果(见表2)与放烟观测结果大体相当,略偏小。对模型区布置的情形,在排放塔周围布设64个地面采样点,另加设垂直剖面的采样(一个剖面设11个点)。试验时以不同风向接通相应范围内的采样器采样。这样得到多次测定的模型区浓度分布,并从中确定浓度分布的高低中心,超标状况和影响范围等重要资料。特别可以对重点关注的地区和建筑物,作污染影响的定量判断。图6给出实测浓度的例子。

根据模拟扩散试验结果,可以探讨建立一个能够正确描述排放的废气浓度分布的数学模式,供预测估算实用。考虑到模拟对象的特点及问题性质:(1)研究尺度较小,离源数百米范围;(2)高架连续源,以窗口方式排放,无烟气抬升,但有水平出口速度,可见,排放源有一定体积,将产生自身动力效应而非理想点源;(3)处于城市下垫面条件,有明显空气动力学效应。模式中考虑规定烟流轴线离地最低不小于5m,以反映城市下垫面作用。对街区建筑物则取直接撞击的保守估计。这样建立的修正高斯扩散公式如下:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H+x\tan\alpha)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H-x\tan\alpha)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad x \leq \frac{H-5}{\tan\alpha}$$

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-5)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+5)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad x > \frac{H-5}{\tan\alpha}$$

式中 $\alpha$ 为烟流下斜倾角(度),由模拟实验确定; $\sigma_y$ 为横向扩散参数,其值包含三部分,即由排放塔的几何尺度造成的初始扩散 $\sigma_{y0}$ ,由排放的水平初速度造成的初始扩散 $\sigma_y$ ,以及湍流扩散 $\sigma_{yn}$ ; $\sigma_z$ 为垂直扩散参数;其余符号的意义如常。模式取以下参数(由实验得):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= 15 + 0.953x^{0.70} \\ \sigma_z &= 7 + 0.116x \end{aligned} \right\} x \leq 1000\text{m}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= 0.16x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}} \\ \sigma_z &= 0.14x(1 + 0.0003x)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} x > 1000\text{m}$$

由于塔后平均风速减小并随下游距离 $x$ 变化,因此对源高平均风速取以下经验表达式:

$$U(x) = U_\infty \left[ (0.5 - 0.001x) + \left(\frac{x}{500}\right)^{0.584} \right], \quad x \leq 500\text{m}$$

$$U(x) = U_\infty, \quad x > 500\text{m}$$

式中 $U$ 为风洞气流平均风速。

模式以扩散试验资料作轴线浓度的检验,在离源500m范围内地面浓度的计算值与实测值之比如表3所示,可见检验效果良好。运用建立的修正模式可以给出不同条件下排放塔废气排放的环境影响程度。

综上所述。为建立修正的扩散模式,在浓度分布试验所得结论的基础上,考虑:(1)扩散参数增大的修正;(2)风速随下游距离变化的修正;(3)反映城市下垫面特征的修正;(4)烟流轴下斜的修正等。修正检验主要根据排放塔示踪试验模拟结果,以排放下游轴线浓度作检验依据,这样,试验条件相对简单,检验效果较好,试验样本数据也比较充足。风洞模拟的试验条件易控,重复性好,是其突出优点,并为模式检验提供有利条件。

表3 地面轴线浓度检验比较

下游距离 $x$ (m)		97	162	227	292	486
$C_{\text{计算}}/C_{\text{实测}}$	1	1.05	1.14	0.79	0.57	0.35
	2	0.71	1.01	0.65	0.55	—
	平均	0.74	1.08	0.72	0.56	0.35

## 五、结 语

本项实验研究采用风洞流体模拟手段,实验结果表明,运用这种手段是有成效的,可以获得有关废气排放污染影响的丰富的分析结果,从而为现场局地环境影响评价提供了实验依据。许多信息是现场测试所难以得到的。在实验基础上进行的扩散模式的修正,形式简明却具有良好的实验依据。因此运用效果较好,实用性强,对于目前大量工程应用的环境影响研究是很有实际意义的。

致谢:本试验研究项目由上海市建委、环保局资助,上海市环境保护研究所委托进行的。上海环保所朱宏贵、孙和宁、郭征工程师,上海华东师范大学张超教授等给予了许多指点和帮助,特此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Hosker, R. P., Flow and diffusion near obstacles, Atmospheric Science and Power Production, ch. 7 1984.
- [2] Plate, E. J., Engineering Meteorology, ch. 11, 1982.
- [3] Meroney, R. N. et al., Wind tunnel measurements of dispersion and turbulence in the wakes of nuclear reactor plants, U. S. NRC. NUREG/CR-1475, 1980.
- [4] Williams, C. D. & R. L. Wardlaw, The Ottawa wind study, model scale and full scale measurements of the pedestrian wind environment, Recent Advances in Wind Engineering, 2, 821—828, 1989.
- [5] Jiang Weimei et al., NJU meteorological wind tunnel and study on fluid modeling, J. of Nanjing University, 1, 1990.
- [6] Nemoto, S., Similarity between natural local wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel, Papers in Meteorology and Geophysics, 19, 2, 131—230, 1968.

---

## EXPERIMENTAL MODELING FOR THE IMPACT OF LOCAL AIR POLLUTION BY THE EFFLUENT

Jiang Weimei Ma Fujian

Xie Guoling Pan Yujiang

*(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)*

### Abstract

An experimental modeling study executed in NJU meteorological wind tunnel was described in this paper. Atmospheric pollution affected by the waste gas from a tower located at downtown of a big city has been simulated. By means of measuring the flow field and flow visualization and dispersion test by releasing the tracer, some conclusions concerning the impact of atmospheric pollution on the local environment have been obtained. Based on the experimental data of the dispersion test, a modificative dispersion model has been developed in order to explore the actual approach to predict the air pollutant concentration and its distributions. The results show that fluid modeling in wind tunnel is an effective and practical method.

---