

文章编号: 1672-9897(2006)03-0063-08

风洞模拟建筑物对大气污染物扩散影响的若干问题讨论

汪新¹, McNamara K F²

(1. 广东工业大学建设学院, 广州 510090; 2. 爱尔兰国立大学土木工程系, 戈尔威)

摘要:通过相似性分析,得到了大气污染建筑物影响风洞试验应满足的基本相似条件。由一个实例研究了利用常规风洞模拟装置和测试仪器进行大气污染建筑物影响风洞试验在技术上的可行性。结果显示:由于模拟装置和仪器条件的限制,在大多数风洞试验中存在大气边界层不完全模拟和仪器响应过慢等问题,但通过合理模拟来流的主要湍流特征和改进采样方法,可以在风洞中较真实地模拟建筑物对大气扩散的影响。

关键词:空气污染;扩散;风洞试验;建筑物影响

中图分类号: O353.5

文献标识码: A

Discussion on wind-tunnel simulation of the effects of buildings on pollutant dispersion

WANG Xin¹, McNamara K F²

(1. Faculty of Construction, Guangdong University of Technology, Guangzhou 51090, China; 2. Department of Civil Engineering, National University of Ireland, Galway, Ireland)

Abstract: The basic similarity requirements for the wind-tunnel simulation of building-effects on pollutant dispersion were obtained by the non-dimensional analysis of the system of equations of flow and pollutant dispersion. The availabilities of using regular passive turbulence simulation and instruments techniques for building-effects wind-tunnel experiments were studied by a practical wind-tunnel campaign. It was concluded that the incomplete simulation of atmospheric boundary layer and slow instrument responses exist in most of wind tunnels possibly due to the limitations of simulation devices and instrument conditions, however, it is possible, by simulating the key turbulence characteristics in oncoming flow and improving the sampling procedure, to give a reasonably simulation for the effects of buildings on pollutant dispersion in a wind tunnel.

Key words: air pollution; dispersion; wind-tunnel experiment; building effects

0 引言

现场实测是研究建筑物对大气污染物扩散影响的最可靠手段。但由于费用高、耗时长、提供的浓度场数据量相对较少,故一般限制在对现有建筑物影响模式的评估和验证上。相对来说,由于在风洞试验中来流条件可以控制,试验过程可以人为延长或重复,

从而可以以相对较低的费用得到高密度的试验数据。鉴于此,风洞试验仍是研究建筑物对大气污染物扩散影响的最基本的模拟工具。

风洞扩散试验通过在缩尺模型周围释放示踪气体,用仪器测量一系列采样点上的示踪气体浓度值,以达到研究建筑物周围污染物的扩散特性的目的。但是,要使风洞试验结果准确反映全尺寸行为,模型

• 收稿日期: 2005-09-07; 修订日期: 2006-05-08

作者简介: 汪新(1962-),男,湖北宜昌人,工学博士,副教授.研究方向:结构风工程,计算流体力学等.

与原型之间应该满足几何相似、运动相似和动力相似等一系列相似关系,测量的浓度值与足尺浓度值之间在时间尺度上也应保持相似。但是实践已经证明^[1]:在风洞试验中严格满足所有的相似关系是不可能的,其中的一些相似关系在实际应用时必须加以松弛。因此,研究某些相似条件松弛对试验结果的影响是重要的,因为在某些情况下这可能导致不真实的试验结果。

结合一个孤立建筑物对近源排放扩散影响的风洞试验,重点讨论了由于不完全模拟大气边界层和试验仪器限制等因素对试验结果的影响,并提出了提高试验精度的方法。结果显示:通过合理地模拟大气边界层,合理地处理测量数据,在风洞试验中可以较好地模拟实际的建筑物周围的扩散特性。

1 风洞大气扩散试验原理

1.1 相似性要求

无量纲化后,大气运动和大气污染物输运方程可表示为^[2]:

(1) 连续方程:

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (\rho^* u_i^*)}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + U_j^* \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} + \left[\frac{L_0 \Omega_0}{U_0} \right] 2\epsilon_{ijk} \Omega_j^* U_k^* = \\ - \frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} - \left[\frac{\Delta T_0}{T_0} \cdot \frac{L_0 g_0}{U_0} \right] \Delta T^* g^* \delta_{i3} + \\ \left[\frac{\nu_0}{U_0 L_0} \right] \frac{\partial^2 U_i^*}{\partial x_k^* \partial x_k^*} + \frac{\partial (-u_i' u_j')^*}{\partial x_i^*} \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 湍流能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + U_i^* \frac{\partial T^*}{\partial x_i^*} = \left[\frac{k_0}{\rho_0 C_{p0} \nu_0} \right] \left[\frac{\nu_0}{L_0 U_0} \right] \frac{\partial^2 T^*}{\partial x_k^* \partial x_k^*} + \\ \frac{\partial (-\theta' u_i')^*}{\partial x_i^*} + \left[\frac{\nu_0}{L_0 U_0} \right] \left[\frac{U_0^2}{C_{p0} (\Delta T)_0} \right] \Phi^* \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 污染物守恒方程:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + U_i^* \frac{\partial C^*}{\partial x_i^*} = \left[\frac{D}{\nu_0} \right] \left[\frac{\nu_0}{L_0 U_0} \right] \frac{\partial^2 C^*}{\partial x_k^* \partial x_k^*} + \frac{\partial (c' u_i')^*}{\partial x_i^*} \quad (4)$$

式中: t 代表时间, x_i 为笛卡儿坐标系中第 i 方向坐标值, u_i , u_i' 和 U_i 分别为沿 i 方向的速度、湍流速度和平均速度分量, P 和 ρ 分别为空气压力和密度, ν 为运动粘滞系数, Ω_j 为地球自转角速度的第 j 分量,

T 和 θ 分别为平均温度与温度波动, g 是重力加速度, k 是热传导率, C_p 为热容量, Φ 是耗散函数, c 和 C 分别为污染物浓度和平均值, D 为分子扩散系数。下标“0”表示变量特征尺度,上标“*”表示无量纲变量。以上公式包含的各无量纲变量为:

$$\begin{aligned} U_i^* &= U_i/U_0, u_i^* = u_i/U_0, \\ (u_i')^* &= u_i'/U_0, x_i^* = x_i/L_0, \\ t^* &= (tU_0)/L_0, \rho^* = \rho/\rho_0, \\ \Omega_j^* &= \Omega_j/\Omega_0, P^* = P/(\rho_0 U_0^2), \\ T^* &= T/T_0, \Delta T^* = \Delta T/(\Delta T)_0, \\ g^* &= g/g_0, (c')^* = c'/C_0, \\ C^* &= C/C_0 \end{aligned} \quad (5)$$

方程(5)给出了风洞扩散试验应满足的完整系列的相似关系,包括几何相似、运动相似、动力相似以及时间尺度相似等。从方程(1)~(4)可以得出:要使以上所有相似关系得到满足,原型和模型之间必须使以下无量纲参数维持相等:

Reynolds 数: $Re = U_0 L_0/\nu$,

Richardson 数: $Ri = [\Delta T_0/T_0][L_0 g_0/U_0^2]$,

Rossby 数: $Ro = U_0/(L_0 \Omega_0)$,

Prandtl 数: $Pr = [\rho_0 C_{p0} \nu_0]/k_0$,

Eckert 数: $Ec = U_0^2 = U_0^2/[C_{p0}(\Delta T)_0]$,

Schmidt 数: $Sc = \nu_0/D$

研究已经证明^[3]:建筑物周围的平均流场和湍流特征主要由建筑物所致的空气动力决定,大气稳定条件的影响相对较小。另一方面,由于近地风的风速受地转力影响较小且远低于音速。因此,研究建筑物对污染物扩散影响可以在中性大气稳定条件下进行,而不必考虑 Richardson 数、Rossby 数、Prandtl 数和 Eckert 数等的影响。这意味 Reynolds 数是影响建筑物周围风场的最重要的参数。虽然在实际风洞试验中维持原型和模型之间 Reynolds 数相等是不可能的,但研究显示当风洞试验中 Reynolds 数高于某一临界值的话,建筑物周围的湍流形态及大气污染物扩散特性与足尺情况有较好的相似性,并与来流风速无关。ASCE 建议^[3]:风洞试验中,基于建筑物高度的临界 Reynolds 数($= (U_H H)/\nu$)为 1.1×10^4 。

此外,在足尺情况下,由于风向的横向波动可能造成测点污染物浓度场数据出现较大间歇性,因此在各种规范扩散模式中,污染物浓度指标通常是对应于一定时距的平均值(例如,小时平均浓度),这意味着

风洞扩散试验获得的试验数据也应该在时间尺度上与足尺数据保持相似。由公式(5)可以得到风洞试验需满足的采样时间要求:

$$t_m = (L_0/U_0)_m (U_0 t/L_0)_p \quad (7)$$

式中,下标 m 和 p 分别表示模型和原型。

1.2 大气边界层模拟

要使风洞试验模型建筑物周围风场和扩散形态与足尺情况相似,除了必须使 Reynolds 数高于 ASCE 建议的临界值外,还应该保持原型和模型之间流体边界条件的相似。在风洞试验中可以利用可调顶板和控制模型阻塞度等方法使风洞试验的侧向和上部边界尽量满足大气边界层中零压力梯度条件,但是通过被动模拟装置虽然可以较好地模拟大气边界层平均风速剖面,但不能完全模拟来流的湍流统计特征。因此,应该分析大气层不完全模拟对试验结果的影响程度。

当在风洞中模拟一个点源排放烟流在自由流中的扩散时,其下风采样点 (x, y, z) 的浓度值符合高斯分布^[4]:

$$\frac{C(x, y, z) \sigma_y \sigma_z U}{Q} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中: σ_y 和 σ_z 分别是烟流的扩散参数。

当假定 $t = x/U \gg T_L$, 扩散参数 σ_y 可由泰勒扩散理论得到(σ_z 以同样过程得到)^[5]:

$$\sigma_y^2 = 2\sigma_L^2 T_L t = 2\sigma_L^2 (\alpha L_y / \sigma_i) (x/U) = 2\alpha I_i L_y x \quad (9)$$

式中: σ_i 和 I_i 分别表示 y 方向湍流速度分量的标准差和湍流强度, T_L 和 L_y 分别是 Lagrangian 湍流时间长度和 y 方向湍流积分长度, α 为常数。

从公式(9)可以看出:如果要在风洞中完全模拟足尺扩散行为,除了准确模拟来流的平均速度剖面外,还应合理地模拟来流的湍流强度和湍流积分长度。此外,当在风洞中试验建筑物周围扩散特性时,来流中湍流应力的影响可能也是重要的,因为它可能直接影响到建筑物迎风面边缘的气流分离和局地流态的分布范围(如尾流腔区尺度等特征尺寸),从而导致建筑物周围的流场和湍流特征的变化。但是,由于对这个问题研究较少,通常认为湍流应力剖面对扩散的影响可以不加考虑。

综合以上分析,判断一个模拟的风洞边界层是否

可接受的标准,首先是平均风速剖面,然后是湍流尺度和湍流强度,湍流应力剖面对扩散的影响通常被看作第二位的。

1.3 试验浓度值无量纲化表示方法

为了将风洞试验数据应用到足尺条件,试验浓度场等值线图应该保持与原型几何相似,这需要在模型和原型之间所有对应几何位置上满足下列关系:

$$(C/C_0)_m = (C/C_0)_p \quad (10)$$

式中: C_0 为特征浓度值。

由公式(8)和(9)可以推断:当模型和原型之间对应位置上几何长度和湍流积分长度有相同的缩尺比并且湍流强度相同的话,下列关系成立:

$$\left(\frac{C(x, y, z) \sigma_y \sigma_z U}{Q}\right)_p = \left(\frac{C(x, y, z) \sigma_y \sigma_z U}{Q}\right)_m \quad (11a)$$

或利用公式(9)的关系,将上式写为:

$$\left(\frac{C(x, y, z) (L_y L_z)^{0.5} x U}{Q}\right)_p = \left(\frac{C(x, y, z) (L_y L_z)^{0.5} x U}{Q}\right)_m \quad (11b)$$

由于建筑物周围湍流积分长度与建筑尺寸有相同的量级: $L_y \sim W$, $L_z \sim H$, 公式(11)可简化为:

$$\left(\frac{C(x, y, z) H W U}{Q}\right)_p = \left(\frac{C(x, y, z) H W U}{Q}\right)_m \quad (12)$$

基于以上分析,对于立方体建筑物,我们的试验数据表示为:

$$\chi = CH^2 U_H / Q \quad (13)$$

式中: H 为建筑物高度, U_H 为建筑高度 H 处来流风速, Q 是源强。

值得注意的是,该表达方法为风洞扩散试验参数设置提供了一些灵活的选择:即只要保持 U/Q 不变,试验中源强 Q 和风速 U 可以任意调整而不改变模型和原型之间等值线图的几何相似性。

2 实例分析

2.1 试验概述

在爱尔兰国立大学(戈尔威)土木工程系的大气边界层风洞中进行了一个孤立建筑物对模型附近点源排放的扩散影响的风洞试验。该风洞是一座低速直流风洞,其工作段长 9.9m、高 1.99m、宽 2.44m。风扇通过液压系统驱动,风速可在 0~7m/s 之间调节。工作段的前 6.3m 用来放置湍流发生装置和粗糙元,

中心距工作区段入口 7.6m 的转盘用于安装风洞试验模型。

图 1 给出了该风洞试验采用的湍流模拟装置、试验模型和测试仪器等概况。风洞试验包括边界层测量和浓度场测量两部分。首先,利用表 1 所示的被动湍流模拟装置结合分布粗糙元模拟出一个目标风洞边界层(地面粗糙类型为小城镇中心)。风洞边界层测量过程中,在模型位置的 1.2 米高度处安放了一个

Pitot 管,用于设置梯度风风速到 5.0m/s。平均风速和湍流强度剖面用 TSI 热片风速仪(探头型号 1054)获得,采样频率设置为 5000Hz,每个测点的采样时间为 50s。然后,将建筑物模型和源模型放置在转盘对应位置。建筑物模型为高度 0.1m 木制立方体,放置在转盘中心处架空地板上。在缩尺比 1:250 时(注:该模型缩尺比与边界层缩尺比相同,详见 2.2 节),该模型代表一个足尺高度为 25m 的方形建筑物。

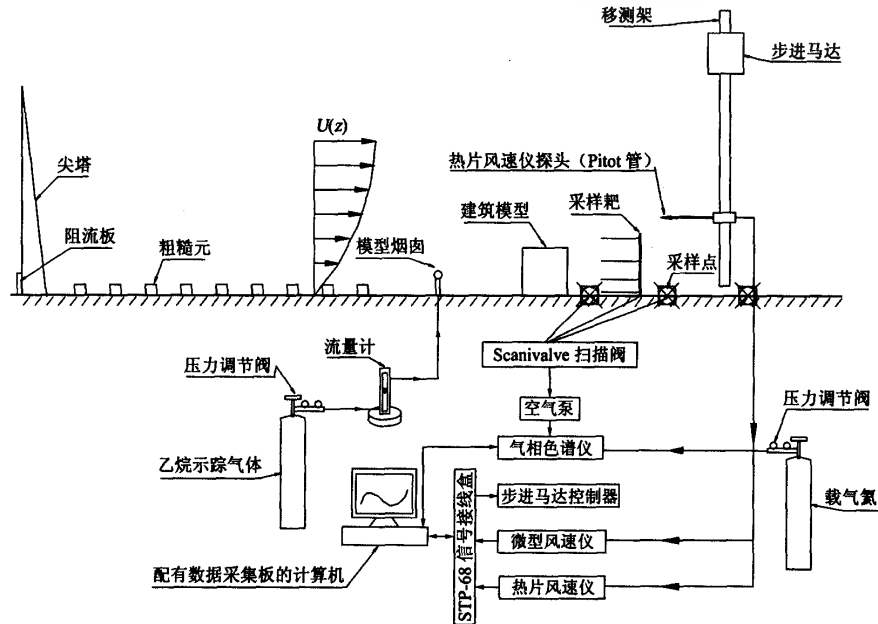


图 1 风洞扩散试验概况图

Fig.1 Sketch of wind-tunnel dispersion experiment

表 1 风洞边界层模拟所用被动模拟装置

Table 1 Passive devices used to wind-tunnel boundary layer simulation

模拟装置	迎风前缘到整流蜂窝出口的距离(m)	区段的长度(m)	几何轮廓	分布密度(%)
穿孔阻流板 (直径 25cm 中心距为 50cm)	0.33		宽 2.440m 高度 65mm	
4 个相距 0.61m 的尖塔	0.35		高度 1.270m 底部宽度 0.22m	
交错分布的安排粗糙元	0.70	6.0	38mm 高 34mm 宽 34mm 深	5
粗糙地毯	6.7	0.37		

如图 2 所示,示踪气体由内径 2mm 的铁管制成的模型烟囱释放;该模型烟囱高度为建筑物模型一

半,安放在距建筑物模型迎风墙 2 倍模型高度的上风距离处。示踪气体由流量计控制以 0.3L/min 通过模

型烟囱释放,示踪气体浓度由型号 M200 的气相色谱仪分析。在建筑模型的尾流区沿中轴线、横风向地面和垂直方向布置了一系列采样点(1mm 内径的铜管),其中地面采样点直接固定在风洞架空地板上,垂直方向采样点安装在一个采样耙上。各采样点和 SCANIVALVE 扫描阀对应的通道之间、SCANIVALVE 出口与气相色谱仪的采样口之间均通过 PVC 管相连接。还在 SCANIVALVE 出口与气相色谱仪采样口之间安装了一个空气泵以加快采样过程。采样过程中,当一个气体样本被采集并被气相色谱仪分析后,计算机程序将控制 SCANIVALVE 自动向前移动一个通道,因此来自所有采样点的示踪气体样本可以用一台气相色谱仪连续采样分析,并将对应的色谱和浓度值存入主控台式计算机中。

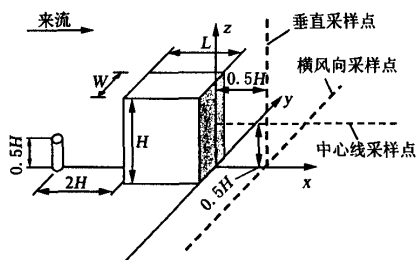


图2 风洞试验坐标系及采样点布置

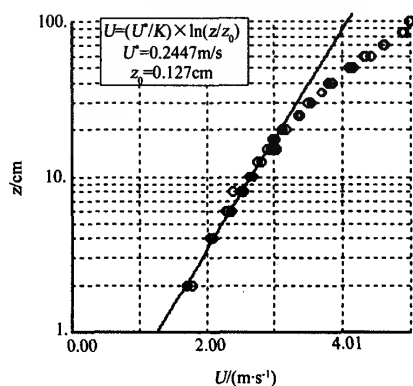
Fig.2 Coordinate system and arrangement of sampling points in the wind tunnel experiment

在整个浓度场采样过程中,梯度风平均风速仍维持为 5.0m/s。因此,由指数律风剖面推算出建筑高度处来流平均风速(U_H)约为 2.66m/s,这使得基于建筑物模型高度的 Reynolds 数大约为 1.8×10^4 。这大于 ASCE 建议的 1.1×10^4 临界 Reynolds 数以保证试验结果不受风速的影响。

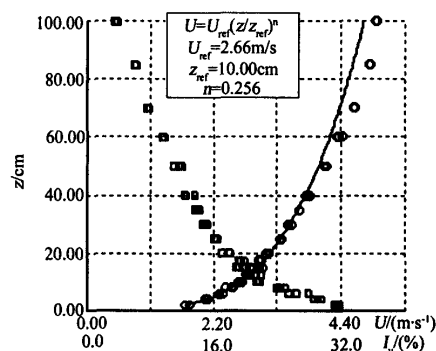
2.2 风洞边界层与 ESDU 足尺数据比较

图3给出了在风洞边界层中测得的对数律和指数律平均风速剖面以及湍流强度剖面。在图3(a)的对数律风剖面拟合中,零平面位移 d 值近似为零,因为测量场地为相对光滑的风洞地板。动力粗糙长度 z_0 和摩擦速度 u^* 值通过试验作 $\ln z$ 对 U 的图线来决定。从图3(a)可以看出,用一条直线拟合试验数据可以直到 0.2m 高度处,该直线的斜率即为 u^* ($=0.2447\text{m/s}$)、在 z 轴的截距即为 z_0 ($=1.27\text{mm}$)。图3b给出了试验拟合的指数律风剖面,在风剖面指数

律拟合时, n ($=0.256$) 是指数律风剖面的指数值,参考风速取为模型高度 z_{ref} ($=0.1\text{m}$) 处的平均风速 U_{ref} ($=2.66\text{m/s}$)。图3(b)也显示,测量的湍流强度剖面较好地符合负指数律衰减率,其值在地面水平约为 33%,在模型高度处(0.1m)为 26.4%。



(a) 对数律风剖面



(b) 指数律风剖面

图3 测量的风剖面

Fig.3 Measured wind profiles

顺风向湍流积分长度通过拟合 Von Karman 谱获得。频谱分析前采集的波动风速信号先由一个二阶 Butterworth 数字低通滤波器进行滤波,然后由 FFT 变换为功率谱,其试验结果见图4(b)。

图4给出了缩尺比范围 1:50 到 1:550 之间试验测量的湍流强度剖面和积分湍流尺度与 ESDU 足尺数据的比较^[6,7]。从图中可以看出,通过合理选择缩尺比,在风洞中可以很好地模拟大气边界层的湍流强度剖面,例如,当缩尺比为 1:250 时测量的湍流强度剖面很好地符合 ESDU 足尺数据(见图4(a));但是,图4(b)显示,在所试验的缩尺比范围内风洞试验中测量的湍流积分长度均远小于 ESDU 足尺数据。这

反映了一个事实:即在风洞试验中很难模拟实际大气中的大涡运动。值得注意的是:图4(b)也显示,当选择较小的缩尺比时,一般可以使测量的湍流积分长度较为接近足尺数据,但是这在风洞试验中是不希望出现的。因为,高缩尺比必然导致选择比较高的模型缩尺比,从而易于造成模型制作误差和风洞试验中出现低 Reynolds 数。

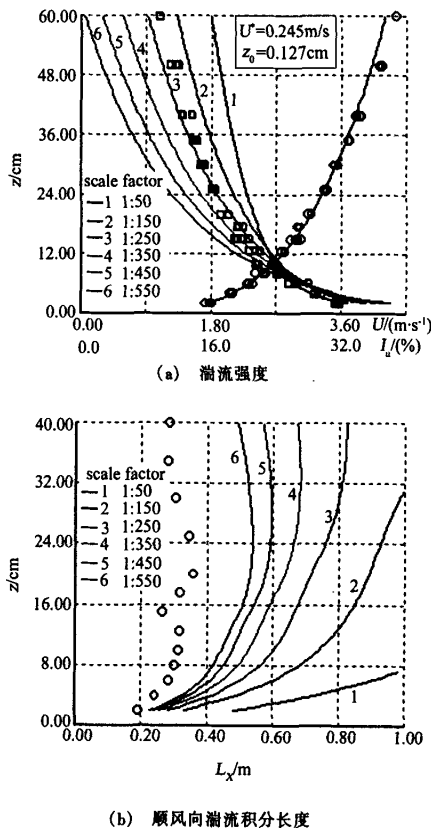


图4 在缩尺比1:50到1:550之间,风洞测量数据与ESDU足尺数据的比较

Fig.4 Comparison of measured wind profiles with ESDU full-scale data for scale factors between 1:50 and 1:550

实际上,考虑到积分湍流长度在同一气象条件下可能变化2~3倍^[8],这意味着在风洞试验中即使测量的湍流积分长度小于足尺数据2~3倍也是合理的。因此,图4显示:在缩尺比为1:250时,所模拟的风洞边界层代表了一个指数律风剖面指数值为0.256、粗糙长度 z_0 为0.3175m的大气边界层,这是典型的下垫层为小的城镇中心的大气边界层。

2.3 平均浓度场测量

气相色谱仪通过向分析柱注入示踪气体样本获得浓度值,因此该浓度值对应的时间尺度等于样本的注入时间。在本试验中气相色谱仪的样本注入时间被设置为0.1s,这与该风洞边界层的湍流时间长度(0.12s)大致相等。换句话说,由单次测量的浓度值可能不足以有效平均掉大尺度(大于平均湍涡尺寸)湍涡的影响。如图5所示,对测点进行重复测量的浓度值或浓度分布曲线均表现了一定程度的波动,但从图中也可以看出,对来自3次重复试验的数据进行简单平均后,得到的浓度曲线明显大大改善了光滑性。因此,尽管本试验浓度的时间尺度远小于实际要求(例如,假设原型与模拟之间风速相等,由公式(7)换

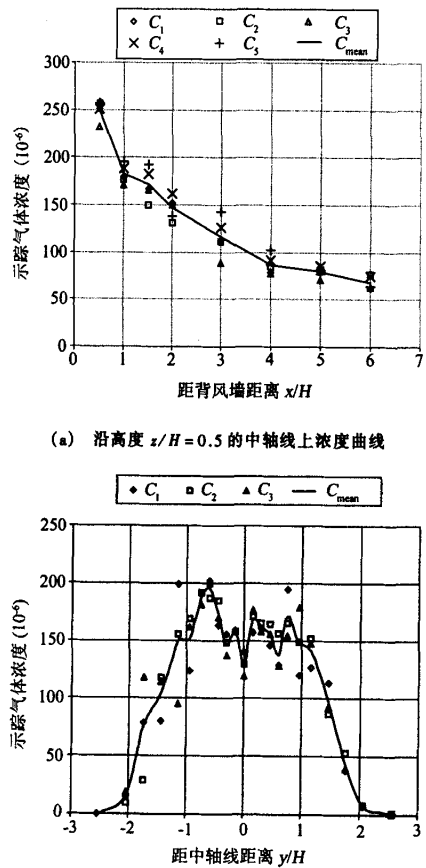


图5 采样重复性试验: C_i 为第“i”次试验的测量浓度
Fig.5 Repeatability check for concentration sampling: C_i is the i-th measured concentration value

算,当足尺平均浓度的平均时距为 1h 的话,该风洞试验所需平均时距约为 14s,但经过对 3 次重复采样数据进行简单平均后,其浓度值可以在一定程度上代表实际平均浓度场。

前面已经提到:在风洞试验中,当合理地模拟了大气边界层的平均风和湍流特性后,只要保持 U_H/Q 不变,可以对风速和源强进行调整,而不改变以无量纲表达的浓度场等值线分布。但应注意,在做这种调整时应当使烟囱的排放速度 (V_s) 不太大,以保证烟流中心轨迹不受排放速度 (V_s) 的影响。一般认为:该条件当排放速度小于烟囱高度处水平风速时(既 $V_s < U_s$) 可以自动满足。但这一结论可能不是广泛适

用的,需要针对具体的试验设置加以验证。

图 6 试验了两个不同排放速度 (V_s) 对浓度场的影响。试验中,模型烟囱高度处平均风速 (U_s) 保持为 2.23m/s,源强 0.3L/min (即排放速度 (V_s) 为 1.59m/s)。图例 NoSpn1 ~ NoSpn5 对应模型烟囱出口无任何遮挡时测得的浓度值,图例 Spn1 ~ Spn5 显示当模型烟囱出口用海绵球挡住时测得的浓度值。在后一种情况,示踪气体排放具有无方向性,且排放速度较前者低。从图中可以看出,来自两个不同排放速度 (V_s) 的浓度数据交织在一起,几乎看不到明显不同之处,这证明本试验设置对应于被动排放,浓度场是独立于排放速度的。

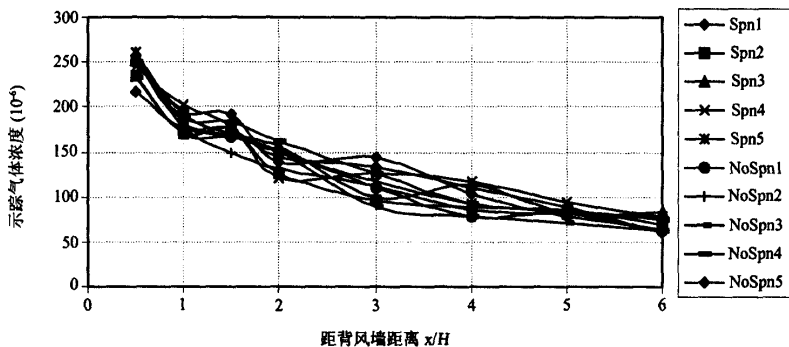


图 6 排放速度对测量浓度的影响(测点沿高度 $z/H=0.5$ 的中轴线)

Fig. 6 Influence of emission velocity on measured concentration (sampling points along centerline at $z/H=0.5$)

3 结 论

通过相似性分析,得到了大气污染建筑物影响风洞试验应满足的基本相似条件。由一个实例研究了利用常规风洞模拟装置和测试仪器进行大气污染建筑物影响风洞试验在技术上的可行性以及需注意的问题。主要结论如下:

(1) 风洞扩散试验应保证建筑模型和原型之间、风洞边界层与目标大气边界层之间有相同的几何缩尺比,合理地模拟来流的湍流统计特征,并使 Reynolds 数高于 ASCE 建议的临界值;

(2) 用被动湍流发生装置和分布的粗糙元,在风洞中可以很好地模拟实际大气边界层的平均风速和湍流强度剖面,但是很难模拟大尺度的湍流运动;

(3) 风洞试验中其烟流的散开程度一般较足尺情况小,但这种情况在建筑物周围可能并不严重,因为建筑物尾流区的湍流积分长度与建筑物特征尺寸

有相同的量级;

(4) 气相色谱仪通常频率响应很慢且仪器浓度值对应的平均时距太小,因而单次测量浓度值很难在时间尺度上与原型相似。利用本文建议的有限次重复试验的平均过程获得平均浓度值可以较好地模拟平均浓度场的分布特性。

参考文献:

- [1] WILLIAMS J, RAE H, POPE A. Low-speed wind tunnel testing[M], 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [2] CERMAK J E. Applications of fluid mechanics to wind engineering[A]. Proc. of winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineering, New York, 1977: 17 ~ 21.
- [3] ASCE. Wind-tunnel studies of buildings and structures[J], Journal of Aerospace Engineering, 1996, 9(1): 19 ~ 36.
- [4] ZANNETTI P. Air pollution modeling: theories, computational methods and available software[M]. New York: Van Nostrand

- Reinhold, 1990.
- [5] WANG X. Numerical and wind tunnel simulations of building effects on pollutant dispersion[D]. PhD thesis, NUI, Galway, 2004.
- [6] ESDU. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere) [R]. Item No. 85020, ESDU international, London, 1985.
- [7] ESDU. Strong winds in the atmospheric boundary layer. Part 2: discrete gust speeds[R]. Item No. 83045, ESDU international, London, 1983.
- [8] RILEY M A, SIMIU E. Wind-tunnel model scale and estimates of wind effects on low-rise buildings[A]. Proc. of 11th international conference on wind engineering, Lubbock, Texas, 2003: 1463 ~ 1470.

