

文章编号: 1672-9897(2010)06-0016-07

建筑物对污染物扩散影响的数值与风洞模拟研究

郭栋鹏^{1,2,3}, 姚仁太², 乔清党²

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院,太原 030024; 2. 中国辐射防护研究院,太原 030006; 3. 太原科技大学环境科学与工程系,太原 030024)

摘要:采用 $k-\epsilon$ (RNG)与 RSM 湍流模型对处于方形建筑物不同位置污染源所排放污染物的扩散规律以及建筑物对流场的影响进行模拟,并且与相应的风洞试验结果进行了比较。流场分析结果表明:数值模拟能够较好地模拟建筑物前方迎风侧停滞回流、顶部回流以及后方空腔区等。浓度场分析结果表明:建筑物前方迎风侧以及顶部回流区污染物扩散的数值模拟结果与风洞试验结果基本相等,而在建筑物后方空腔区污染物的数值模拟结果略高于风洞试验结果。综合分析并与风洞试验结果相比较,RSM 模型能够较好地模拟污染物浓度场以及建筑物周围流场的变化规律。

关键词:数值模拟;风洞试验;建筑物影响;污染物扩散;流场

中图分类号: V211.74 文献标识码: A

Numerical and wind-tunnel simulation on the effect of building on pollutant dispersion

GUO Dong-peng^{1,2,3}, YAO Ren-tai², QIAO Qing-dang²

(1. College of Environment Science and Engineering of TUT, Taiyuan 030024, China; 2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 3. Department of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The flow and dispersion of gases emitted by sources located near bluff building separately studied in wind tunnels were determined by the commercial model STAR-CD using the RNG $k-\epsilon$, and the Reynolds stress RSM turbulence. Inlet conditions and boundary conditions were specified numerically to the best information available for each fluid modeling simulation. Calculations are compared against the wind-tunnel measurements, and the validation of flow modeling of this model is analyzed. The result of flow field's analysis shows that, numerical simulation can better simulate the windward side of the stagnation backflow, the top backflow in front of the building and the rear cavity zones, etc. The result of concentration field's analysis shows that, numerical simulation's result of the pollutants' dispersion is in good agreement with that from wind tunnel experiment in the windward side and the top backflow zones in front of the building, however, numerical simulation's result of the pollutants' dispersion is slightly higher than that from wind tunnel experiment in the rear cavity zones. As a whole, compared with wind tunnel experiment, the RSM model can better simulate the variation of pollutants' concentration field and flow field around the buildings than the RNG $k-\epsilon$ model.

Key words: numerical simulation; wind tunnel experiment; building effects; pollutant dispersion; flow field

0 引言

建筑物附近低矮烟囱排放的污染物进入大气环境中,因受到建筑物诱发的复杂局地扰动,从而改变污染物输送轨迹与扩散速率,使其在建筑物周围的输

运与扩散过程比较复杂。虽然一些规则建筑物附近流场与扩散的基本原理已在一些学术论著中阐述^[1],但是,用来考虑单个建筑物对污染物扩散影响的预测模式,特别是在建筑物附近,过去经常使用高斯模式和一些经过风洞或水槽试验所得的经验公式。然而,

它们或因成本原因、或因其预测精度不能满足要求，而在实际应用中存在一定的局限性。

在国外，一些研究者对单个建筑物以及复杂建筑群周围的流场及其对污染物的扩散规律的影响进行了相关的研究。结果表明，无论是单个建筑物还是复杂建筑物群均对周围流场及其附近污染物的扩散有较大的影响^[2-4]。在中国，一些学者对复杂建筑物群周围流场及其污染物的扩散规律进行了相关的风洞试验研究。结果表明，建筑物对污染物扩散的影响非常复杂，不仅表现出非均匀，而且随着建筑物布局的改变和风向的变化，这种影响也是各异的。并且在建筑物背风侧，烟羽并不是完全均匀地混合^[5]。

随着计算流体动力学(CFD)的不断发展，CFD模拟技术已逐渐用于预测各种建筑物环境下大气污染物的扩散规律，国外一些学者用CFD模拟整个三维空间复杂建筑物附近流场及其浓度场^[1]，并且对标准建筑物对固定污染源排放污染物的扩散做了相关的数值模拟研究，并且与前人风洞试验进行了比较^[6-7]。在中国仅有一些研究者采用FLUENT模式定性研究了建筑物对污染物扩散的影响^[8-9]，也有一些学者采用FLUENT模式的计算结果与国外相关的建筑物对污染物扩散规律影响的风洞试验结果进行验证^[10]，而对污染源在建筑物不同位置时污染物的扩散问题尚缺乏相关的研究。

笔者采用STAR-CD提供的 $k-\epsilon$ (RNG)模型、雷诺应力模型(RSM)对污染源在方形建筑物附近不同位置时污染物扩散规律进行了模拟。并用风洞试验结果对建筑物附近流场结构以及污染物扩散规律的数值模拟结果进行验证。

1 风洞试验模拟

1.1 大气环境风洞及模型

试验在中国辐射防护研究院大气边界层风洞实验室进行，风洞为直流下吹式，洞体全长36m，试验段长24m，宽1.5m，高1~1.4m，试验段顶板可调，以减小纵向压力梯度。试验段风速范围为0.2~9.0m/s。通过在试验段入口调节气流分布模拟中性大气边界层流动。试验以1:250制作模型，模型为长×宽×高($L \times D \times H$)均为164mm的标准方形建筑物。

1.2 相似准则

根据相似理论，两个流动系统相似必须满足一套确定的相似准则，除要求模型与原型之间实现几何相似外，还要求运动相似和动力相似以及边界条件相似。

该试验中，运动相似取上游风廓线指数和近地层

大气湍流强度相似，动力相似取雷诺数自准相似准则，即使得进入模型区气流的特征湍流雷诺数足够高。这样，在一定试验风速条件下，可确保试验模型和现场原型气流之间实现动力学相似^[11]。

试验中，进口气流满足以下条件：(1)近地层平均风廓线幕指数 $p=0.16$ ；模型顶部(164mm)处风速 $U=1.2\text{ m/s}$ ，(2)气流特征雷诺数 $Re=12000$ ，实现雷诺数自准。

1.3 污染源及浓度测量

试验分别模拟污染源位于标准方形建筑物前部(A)、顶部(B)、后部(C)时污染物的扩散情况，(A)、(B)、(C)分别代表污染源由于受到建筑物前方回流影响、顶部回流影响以及后方尾流空腔区影响时污染物的扩散规律，3种情况下污染源高度均为180.5mm(1.1H)，污染源与建筑物的相对关系见图1。选用CO作为示踪气体，源强为120mL/min，用红外气体分析仪分析样品浓度。

2 数值模拟

使用STAR-CD3.26作为计算平台，为了与风洞试验结果比较，数值模拟的计算区域设为24m×1.5m×1.5m(长×宽×高)，模型高度(H)为164mm的正立方体，烟囱高度为180.5mm(1.1H)，网格结构采用具有良好拓扑结构的六面体网格，计算区域网格总数约为100万，区域内最大网格尺寸为30mm，最小网格尺寸为0.1mm。计算时边界层入口边界条件风廓线、湍流廓线、模型顶部处风速以及污染源排放条件均与风洞试验相同，出口边界条件采用完全发展的出流边界条件，地面设置一定的粗糙度，顶部与两侧边界设为光滑，建筑物边界采用无滑移壁面。

模拟大气流场，湍流模型的选取十分重要，湍流模型的选择首先直接影响了建筑物流场结构，其次影响预测建筑物周围污染物沉积与扩散的准确性^[2]。考虑到模拟的建筑物附近流动属于锐体绕流，其流动具有分离、回流等复杂特征。标准 $k-\epsilon$ 湍流模型不能准确地模拟锐体绕流的复杂流动特征，而 $k-\epsilon$ (RNG)、RSM湍流模型均能够较好地模拟锐体的绕流问题^[6]。

$k-\epsilon$ (RNG)、RSM湍流模型的基本方程组均由连续方程、动量方程组成。其中 $k-\epsilon$ (RNG)模型分别引入关于湍动能 k 和耗散率 ϵ 的方程，两方程采用各向同性的湍动粘度来计算湍流应力，并且该模型没有考虑粒子运动表面曲率变化的影响。而RSM模型是对Reynolds方程中的湍流脉动应力直接建立微分方

程并进行求解。就三维问题而言,采用 RSM 模型比 $k-\epsilon$ (RNG) 模型多解 6 个 Reynolds 应力微分方程。从理论上分析,RSM 模型比 $k-\epsilon$ (RNG) 模型包含更多的物理机理,有更广的适用范围。但是哪一个模型能更好地描述建筑物对流场的影响以及其对污染物扩散的影响需进行进一步的探讨和分析。

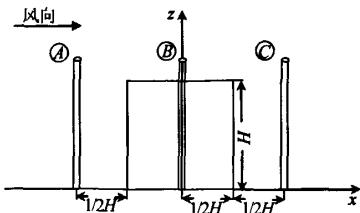


图 1 污染源与建筑物的相对关系
Fig. 1 The relative relationship between pollution sources and building

所以笔者拟分别采用 $k-\epsilon$ (RNG)、RSM 湍流模型计算污染源分别置于标准方形建筑物前、后、顶部时污染物的扩散规律以及建筑物对流场的影响。为了与风洞试验结果相匹配,该计算不考虑热量交换,即中性层结。

3 结果分析与比较

3.1 建筑物对流场的影响

该数值模拟分别采用 $k-\epsilon$ (RNG)、RSM 湍流模型计算了建筑物对其周围流场的影响,并与 Li、Meroney^[4]关于标准方形建筑物对周围流场影响的风洞试验研究结果进行归一化速度比较,比较结果见图 2。不同位置处湍流强度变化见图 3。

由图 2 可知, $k-\epsilon$ (RNG)、RSM 模型均能较好地模拟建筑物对流场的影响,并且与 Li、Meroney 的试验结果吻合较好,同时 Yoshihide 等人分别用标准 $k-\epsilon$ 模型与修正的 $k-\epsilon$ 模型对 Li、Meroney 的风洞试验结果进行验证。结果表明:修正的 $k-\epsilon$ 模型能较好地模拟建筑物顶部回流及周围的流场,并且与其他修正的 $k-\epsilon$ 模型相比, $k-\epsilon$ (RNG) 模型与风洞试验的吻合性最好^[1]。Meroney 等人分别用修正的 $k-\epsilon$ 模型与 RSM 模型对不同方形建筑物周围流场及压力分布情况进行模拟,并用风洞试验结果进行验证。结果表明:与其他模型相比, $k-\epsilon$ (RNG) 与 RSM 模型能较好地模拟建筑物周围的流场以及顶部回流,并且所有模型均能较好地模拟建筑物后方的空腔区,但是与风洞试验结果相比,模拟的空腔区范围比较大^[6]。

由图 2、3 可知,在建筑物顶部回流区内速度减小,从建筑物顶开始的下风向,在近尾流区(包括回流区)风速显著减小,湍流强度显著增大,在下风向

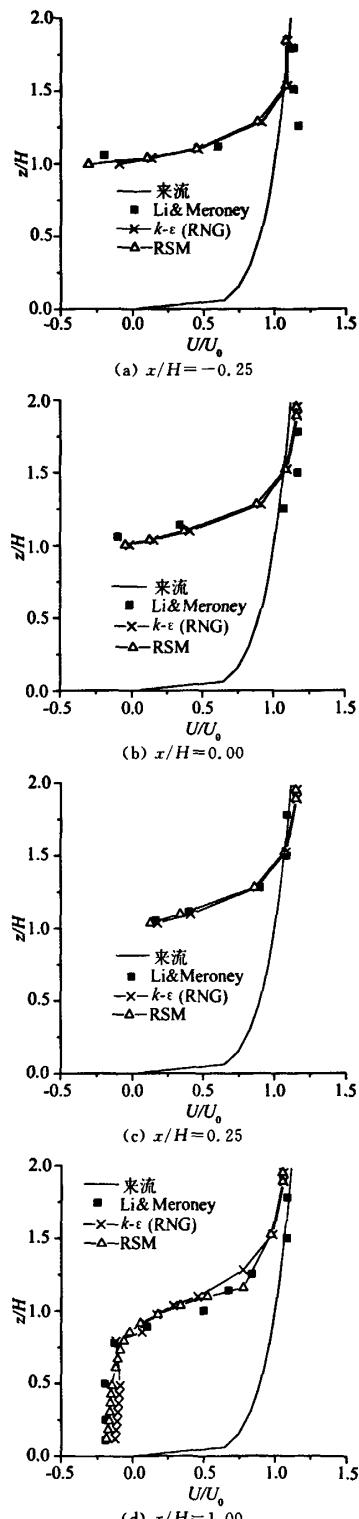


图 2 不同模型归一化速度随高度(z/H)的变化
Fig. 2 Dependence of normalized velocity profiles for different modes on height(z/H)

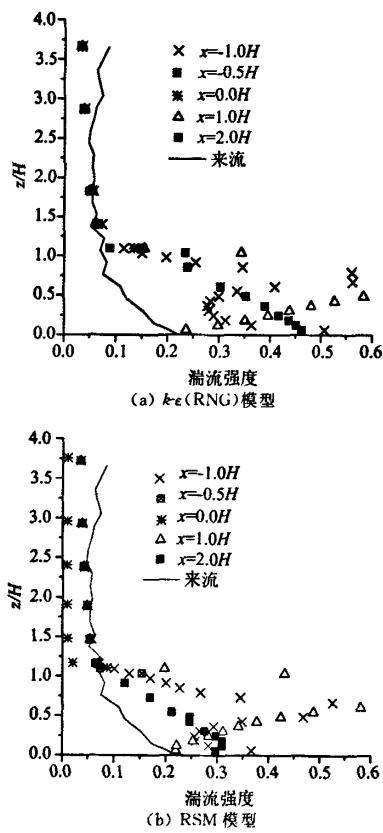


Fig. 3 不同模型湍流强度随高度(z/H)的变化
Fig. 3 Dependence of turbulent intensity profiles for different modes on height(z/H)

$1.0H$ 处湍流动能达到最大,湍流强度增大到 0.6 左右,此时速度亏损达到最大。随着下风距离的增大,

气流混合逐渐均匀,湍流强度逐渐减小,湍流强度较大的区域主要出现在回流区附近。

建筑物周围流场结构模拟结果见图 4。由图 4 可知,RSM 模型与 $k-\epsilon$ (RNG) 模型模拟建筑物对流场的影响趋势基本一致,其模拟建筑物迎风侧的静驻点均在距地约 $2/3H$ 处,空腔区的高度约在 $1.2H$ 处。RSM 模型模拟建筑物后侧再附点约在 $3.2H$ 处,而 $k-\epsilon$ (RNG) 模型模拟建筑物后侧再附点约在 $2.6H$ 处,两种湍流模型模拟建筑物顶部再附点位置均约在 $0.1H$ 处。该结果与 Yoshihide 使用不同修正 $k-\epsilon$ 模型验证方形建筑物顶部与后侧再附点的位置分别在 $0.08 \sim 0.4H$ 与 $2.0 \sim 3.0H$ 处,并且 $k-\epsilon$ (RNG) 模型模拟建筑物顶部与后侧再附点的位置分别在 $0.08H$ 与 $2.41H$ 处吻合性较好^[7]。

从整个流场的特征来看,两种模型均能较好地模拟受建筑物影响时气流的位移区、尾流区、空腔区、以及建筑物迎风面气流的分离与近地面的停滞回流、建筑物顶部气流的回流、建筑物两侧逆于来流方向的气流和建筑物下风方向空腔区内的马蹄形涡均有较好的体现,并且两种模型均能较好地模拟建筑物迎风侧的静驻点、以及建筑物顶部与后侧的再附点等。

3.2 建筑物对浓度场的影响

由于流场决定污染物浓度分布,浓度分布反映了流场的变化^[2]。风洞试验根据烟囱位置的不同,分别对其下风向地面浓度与沿风向轴线不同位置处的垂直剖面浓度场进行测量,风洞试验地面浓度采样个数为 300、垂向浓度采样个数为 1000。

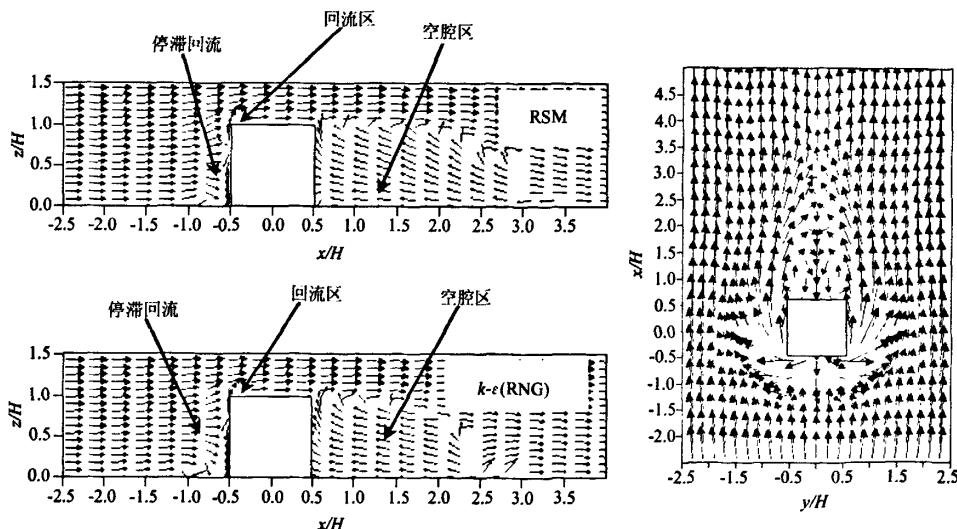


图 4 建筑物周围流场结构模拟结果
Fig. 4 The simulation results of flow field structure around the building

为了验证 $k-\epsilon$ (RNG)模型与 RSM 模型对污染物扩散模拟的合理性以及风洞试验结果的准确性,选用 Li、Meroney 关于标准方形建筑物对污染物扩散影响的风洞试验结果进行验证^[4]。因为 Li、Meroney 风洞试验模拟是污染源位于建筑物顶部时,建筑物对其扩散的影响,所以笔者同样选用风洞试验中污染源位于建筑物顶部情况下的扩散结果与其进行验证。然后分别对污染源位于建筑物前、后不同位置处,建筑物对其扩散的影响进行分析。

为方便比较,采用归一化浓度 $K = \frac{C^* \cdot U \cdot H^2}{Q}$

对不同位置处浓度值进行相互验证分析,其中 C^* 为下风向不同距离处的体积浓度值, U 为环境风速, H 为建筑物高度, Q 为源强(烟羽的体积排放速率)。

图 5 为(B)情况下污染源位于建筑物顶部回流影响区范围内,下风向轴线(x 方向)与位于烟囱点横向(y 方向)不同位置处的污染物浓度风洞测量值与数值模拟结果以及 Li、Meroney 风洞试验结果的比较。

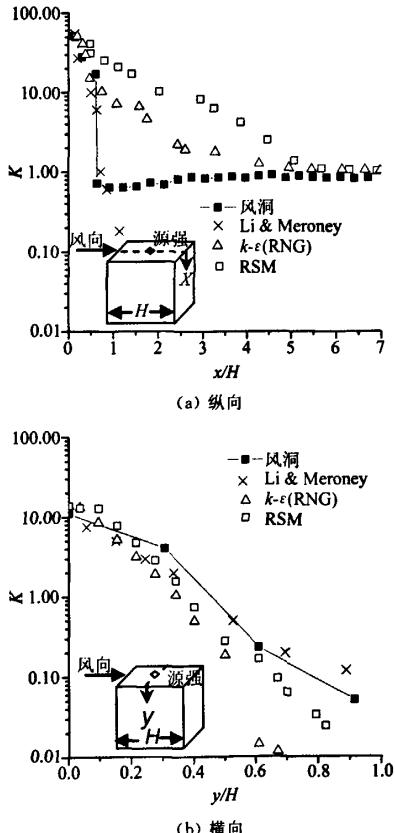


图 5 轴线上不同位置处归一化浓度随距离的变化
Fig. 5 Dependence of different positions normalized concentration for different locations on distance

由图 5(a)、(b)可知,该风洞试验结果与 Li、Meroney 风洞试验结果吻合较好。同时 $k-\epsilon$ (RNG)模型与 RSM 模型对建筑物后方的浓度的模拟结果均高于试验值,但是随着下方向距离的增加,数值模拟结果与试验值逐渐接近,可能是因为所有模型均较高地估算了建筑物后方的回流^[4];由图 5(b)可知, $k-\epsilon$ (RNG)模型与 RSM 模型水平横向远距离处污染物浓度计算值小于测量值,而在建筑物周围与测量值较为接近,并且 RSM 模型的模拟结果更为接近风洞测量值。

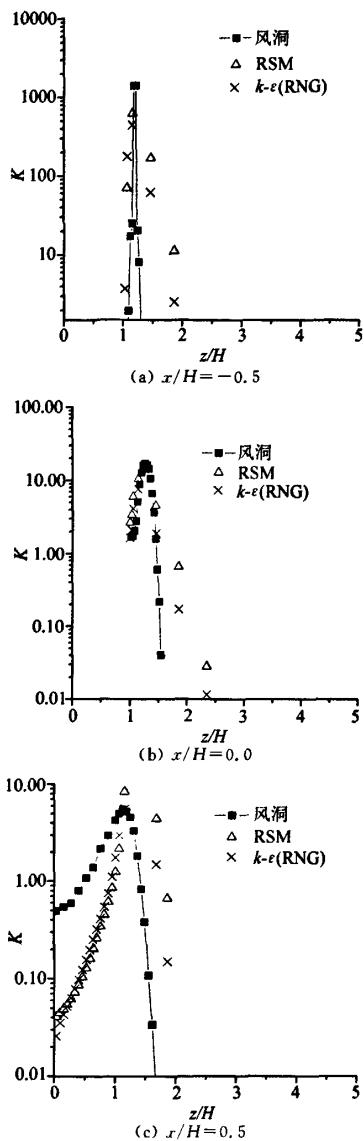
同样, Yoshihide 等人分别用标准 $k-\epsilon$ 模型与修正的 $k-\epsilon$ 模型对 Li、Meroney 的风洞试验结果进行验证。结果表明:与其它修正的 $k-\epsilon$ 模型相比, $k-\epsilon$ (RNG)模型模拟污染物扩散的浓度结果与风洞试验结果吻合较好^[1]。Meroney^[6]等人分别用修正的 $k-\epsilon$ 模型与 RSM 模型模拟不同方形建筑物对周围流场及其污染物扩散的影响并进行研究。结果表明: $k-\epsilon$ (RNG)与 RSM 模型能较好地模拟建筑物周围污染物的扩散。

图 6 为(A)情况下污染源位于建筑物前方回流影响区范围内,不同位置处的污染物浓度分布的风洞测量结果与数值模拟计算结果的比较。

由图 6(a)~(c)可知,与风洞试验结果相比, $k-\epsilon$ (RNG)与 RSM 模型均能较好地模拟污染物的扩散,不同位置垂直测点浓度的变化趋势较好,值略有不同;并且在建筑物的前方回流影响区(图 6(a)),数值模拟结果的前中部与风洞试验结果基本相同,而后部值略大于风洞试验结果;上方回流区(图 6(b)),垂直廓线测点前中部模拟结果与风洞试验结果吻合较好,而后部吻合较差,并且数值模拟的最大值与风洞试验结果相同,其它部分数值模拟结果均大于风洞试验结果;在建筑物的后方空腔区(图 6(c)),由于建筑物尾流的影响,数值模拟结果与风洞试验结果的吻合性较差,但是浓度随高度的总体变化趋势基本相同。

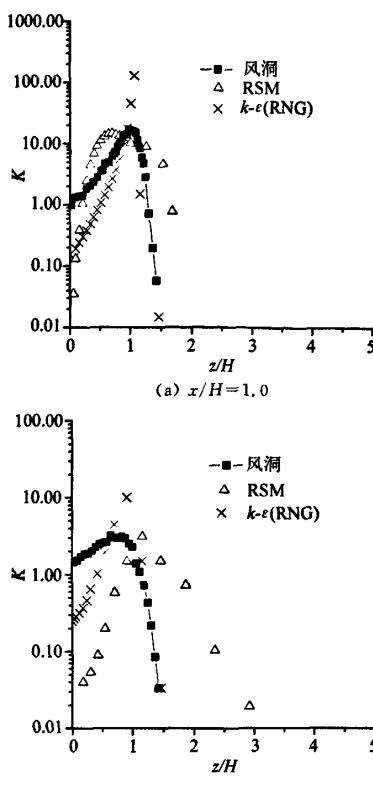
图 7 为(C)情况下污染源位于建筑物后方空腔区范围内,不同位置处的污染物浓度风洞测量结果与数值模拟结果的比较。

由图 7(a)与(b)可知,该范围内污染物的 $k-\epsilon$ (RNG)模型与 RSM 模型的模拟结果与风洞试验测量结果存在一定差异,但是整体变化趋势相似。主要原因是由于受建筑物尾流的影响,使得其对建筑物后面污染物扩散的模拟带来一定的误差,与风洞试验结果相比较,RSM 模型模拟结果比 $k-\epsilon$ (RNG)模型的模拟结果更加接近风洞测量值。

图 6 (A)情况下不同位置处归一化浓度随高度(z/H)的变化Fig. 6 Dependence of normalized concentration for different locations on height(z/H) in case A

总之, $k-\epsilon$ (RNG) 与 RSM 模型均能较好地模拟建筑物前方与顶部污染物的扩散,而在建筑物后方模拟结果不太理想。但是, RSM 模型模拟结果与风洞试验结果比较接近。所以与 $k-\epsilon$ (RNG) 模型相比较, RSM 模型的数值模拟结果更加合理。

综合分析可知,数值模拟的浓度分布迎风侧比背风侧好,离源较近的区域比离源较远的区域好。总之,CFD 模型在预测建筑物后方污染物浓度时,与风洞试验吻合性不理想,主要原因是由数值模拟过程一般均比较注重污染物的对流输运,而对污染物的扩散考虑得要少一些^[6]。

图 7 (C)情况下不同位置处归一化浓度随高度(z/H)的变化
Fig. 7 Dependence of normalized concentration for different locations on height(z/H) in case C

4 结 论

(1) 数值模拟结果与风洞试验结果以及前人的试验结果吻合较好,变化趋势基本一致;

(2) 流场分析结果表明: $k-\epsilon$ (RNG) 模型与 RSM 模型均能较好地模拟建筑物周围的流场结构,特别是能够较好地模拟建筑物迎风侧停滞回流、顶部回流和建筑物后方气流回流等现象;

(3) 浓度场分析结果表明:建筑物迎风侧与顶部回流区数值模拟结果与风洞试验结果基本相同,而在建筑物尾流空腔区数值模拟结果略高于风洞试验结果。

综合分析可知,与风洞试验结果相比较,RSM 模型比 $k-\epsilon$ (RNG) 模型能够更好地模拟污染物浓度场的变化规律。

研究结果表明,中性层结条件下,考虑建筑物对环境大气的动力学作用,同时用风洞试验和数值模拟技术对其周围流场和污染扩散进行研究是一种较为有效的途径,特别是当建筑物结构比较复杂时,数值

(下转第 26 页)

参考文献:

- [1] 邱彦杰. FL-2 风洞一期方向场校测[R]. 1994.
- [2] 邱彦杰. FL-2 风洞亚跨声速流场校测和标模试验报告[R]. 2004.
- [3] 姜正行等编著. 飞机内流空气动力学[M]. 北京:航空工业出版社,1989.
- [4] CRISTOPHER J A, VICTOR J G, DAVID J W. Investigation of hybrid fluidic/mechanical thrust vectoring for fixed-exit exhaust nozzles[R]. AIAA-97-3148.
- [5] GULIANO V, WING D. Static investigation of a fix aperture exhaust nozzles employing fluidic injection for multiaxis thrust vector control[R]. AIAA-97-3149.
- [6] YVETTE S W, DOUGLAS L B. Advancements in exhaust

(上接第 21 页)

模拟技术更加能显现出其对流场和污染扩散模拟的优点,并且风洞试验可以为数值模拟提供充足、有效的检验资料。

参考文献:

- [1] YOSHIHIDE T, TED S. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of $k-\epsilon$ models[J]. Atmosphere Environment, 2009, 43: 3200-3210.
- [2] ANDY T C, ELLEN S P SO. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality[J]. Atmosphere Environment, 2001, 35: 4089-4098.
- [3] JONES C D, GRIFFITHS R F. Full-scale experiments on dispersion around an isolated building using an ionisedair tracer technique with a very short averaging time[J]. Atmospheric Environment, 1984, 18: 903-916.
- [4] LI W, MERONEY R N. Gas dispersion near a cubical model building, Part I, Mean concentration measurements[J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 12: 5-33.
- [5] 姚仁太, 乔清党, 俞学曾, 等. 复杂建筑物近场扩散的风洞模拟[J]. 辐射防护通讯, 2002, 6: 1-6.
- [6] MERONEY R N, BERND M. LI. Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several

system technology for the 21st century[R]. AIAA-98-3100.

- [7] DANIEL N M, PTRICK J Y, JEFFREY W H. Fluidic throat skewing for thrust vectoring in fixed-geometry nozzles[R]. AIAA-99-0365.
- [8] BLASZAK J, FANRENHOLZ F. Rocket thrust control by gas injection[R]. Massachusetts institute of technology naval supersonic laboratory technical report 430, 19.

作者简介:

王 彬(1977-),女,高级工程师,进排气实验技术。通讯地址:沈阳市 701 信箱(110034),联系电话:024-86517537, E-mail: violet-wt@126.com



building shapes[J]. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 333-345.

- [7] YOSHIHIDE T, AKASHI M. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex[J]. Asian Architecture and Building Engineering, 2004, 3: 1-8.
- [8] 张晓伟, 朱蒙生. 住宅小区污染物扩散的数值模拟分析[J]. 低温建筑技术, 2008, 1: 121-123.
- [9] 张宁, 蒋维楣. 建筑物对大气污染物扩散影响的大涡模拟[J]. 大气科学, 2006, 30: 212-220.
- [10] 蒋维楣, 苗世光, 刘红年, 等. 城市街区污染散布的数值模拟与风洞实验的比较分析[J]. 环境科学学报, 2003, 23: 652-656.
- [11] 蒋维楣, 吴小鸣, 周朝辅, 等. 大气环境物理模拟[M]. 南京:南京大学出版社, 1991: 84-87.

作者简介:

郭栋鹏(1978-),男,山西应县人,讲师。研究方向:大气边界层物理与数值模拟理论与实验研究。通讯地址:山西太原中国辐射防护研究院(030006),联系电话:0351-2203043, E-mail: guodp@126.com

