

怠速时汽车污染物在排气尾流中扩散特性的数值分析

宁智¹, 张振顺², 付娟¹, 资新运³, 张春润³

(1. 北京交通大学机电工程学院, 北京 100044; 2. 香港理工大学机械系, 香港; 3. 军事交通学院汽车系, 天津 300161)

摘要: 利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对怠速条件下汽车排气污染物在排气尾流中的扩散特性进行了研究. 汽车尾流中 CO_2 浓度变化规律的模拟计算结果与实测数据具有很好的一致性. 数值分析了排气浓度、速度、方向以及侧风强度等对怠速条件下汽车污染物在排气尾流中扩散的影响. 研究表明, 排气出口污染物浓度的变化将改变排气尾流中污染物浓度的大小, 但尾流扩散区域的结构基本保持不变; 排气速度会直接影响到污染物在尾流下游的穿透距离及显著向上扩散的位置; 相对排气浓度和排气速度而言, 排气方向对尾流结构及污染物在尾流中的扩散与分布具有更大的影响; 侧风对排气尾流的结构同样具有重要的影响, 它可以有效地改变汽车排气尾流的扩散方向和污染物的浓度分布.

关键词: 汽车; 怠速; 排气尾流; 污染物; 扩散; 数值分析

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)03-0424-07

Numerical Analysis of the Dispersion Characteristics of Vehicular Pollutants in Exhaust Plume Under Idle Condition

NING Zhi¹, Cheung C S², FU Juan¹, ZI Xin-yun³, ZHANG Chun-run³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Department of Automobile Engineering, College of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

Abstract: The $k-\varepsilon$ eddy dissipation model was used for the numerical simulation of the dispersing characteristics of vehicular exhaust plume under idle condition. The simulated results match very well with the experimental results. The effects of the initial emission concentration, exit velocity, exit direction and crosswind intensity were investigated parametrically. The initial pollutant concentration can increase the local concentrations but the pattern of dispersion remains the same. The exit velocity can increase the momentum of the jet, resulting in a deeper penetration downstream. The exit angle has stronger influence on pollutant dispersion than both initial pollutant concentration and exit velocity. Crosswind shows a significant effect on the dispersion of the exhaust plume also. It can divert the plume to disperse in the same direction of the wind with limited penetration in the downstream direction.

Key words: vehicle; idle condition; exhaust plume; pollutant; dispersion; numerical analysis

怠速工况下汽车排放比较严重, 且污染物不易扩散, 因此汽车的怠速排放被认为是环境及路边行人更加有害^[1,2]. 有些国家和地区的政府已要求汽车在停车等人或等红绿灯时必须熄火.

目前, 国内外已有一些学者对汽车排气的扩散问题开展了一些数值分析与研究, 例如 Baker 及 Kim 等学者利用数值分析的方法研究了汽车排气尾流的结构特性^[3~7]; Chan 及 Vardoulakis 等学者数值分析了汽车排气在街道峡谷内的扩散特性^[8,9]. 尽管人们目前已认识到汽车排放对环境具有重要影响, 但相对而言, 采用数值分析的方法对怠速条件下汽车排气污染物在排气尾流中的扩散规律及扩散特性的研究还很少.

Kim 在文献[4]中评述了模拟汽车排气污染物扩散的各种数值方法, 并通过实验测试结果与模拟计算结果的对比, 说明 $k-\varepsilon$ 湍流模型适用于汽车排气尾流扩散的分析计算. Chan 同样证明了 $k-\varepsilon$ 湍流

模型在分析汽车排气污染物在孤立街道峡谷内扩散规律时的适用性^[10].

本文建立了汽车排气尾流扩散的 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 通过尾流中 CO_2 浓度的模拟计算结果与实测数据的对比说明该模型的适用性, 并利用该模型对怠速条件下汽车污染物在排气尾流中的扩散特性及其影响因素和影响规律进行了研究. 数值分析了排气浓度、速度、方向以及侧风强度等对怠速条件下汽车污染物在排气尾流中的分布及其扩散的影响. 研究工作可以为汽车排气污染物对周围环境影响的评价提供更多有用的信息.

收稿日期: 2005-04-16; 修订日期: 2005-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40475048); 北京市自然科学基金项目(8042018); 香港 Croucher 基金资助项目

作者简介: 宁智(1962~), 男, 博士, 教授, 主要从事机动车排放与控制的理论与技术的研究.

1 模拟条件及数学模型

本文把模拟计算分析的对象限定在气态污染物,并以 CO 的扩散为例进行参数研究.

数值分析中采用的坐标系如图 1 所示,坐标系的原点位于地面上,排气管距地面高度 0.3 m.

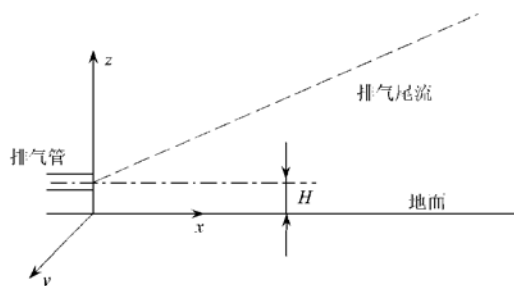


图 1 计算坐标系及排气尾流

Fig. 1 Schematic of the cartesian coordinate system and exhaust plume

计算时假设排气以一定速度从排气管排出,这一过程可看作射流边界层问题^[11].对于这一问题, Kim 证明了 k - ϵ 湍流模型可以用于其扩散的分析^[4].为准确描述排气污染物在汽车排气尾流中的扩散过程,数学模型中需考虑湍流混合、对流、扩散、温度的变化以及组分的迁移.怠速条件下汽车排气尾流扩散的控制方程组可以表达为^[4]:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为流体密度; $\bar{u}_i$ 为坐标 x_i 方向上的流体时均速度分量.

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \bar{u}_j \bar{u}_i + p \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i) = 0 \quad (2)$$

其中, p 为流体压强; μ 为流体动力粘度; g_i 为坐标 z_i 方向上的重力加速度; 当 $i = j$ 时, 算子 $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$. 本文研究中, 雷诺应力用 2 个方程 k - ϵ 模型进行模拟. 因此, 式(2)中的雷诺应力项可以表示为:

$$- (\rho \bar{u}_j \bar{u}_i) = \mu_1 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

其中, μ_1 为流体湍流粘度, $\mu_1 = c_\mu k^2 / \epsilon$. c_μ 为模型常数; k 和 ϵ 可由湍流脉动动能方程(k 方程)和湍能

耗散率方程(ϵ 方程)求解.

湍流脉动动能方程(k 方程):

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \mu_1 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] + \rho \epsilon = 0 \quad (4)$$

湍能耗散率方程(ϵ 方程):

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \epsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_1 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] + C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} = 0 \quad (5)$$

其中, C_1 和 C_2 为模型常数; Γ_k 和 Γ_ϵ 可以通过 Boussinesq 近似来确定.

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum (h_j \bar{J}_{T,i}^j) + \frac{Dp}{Dt} + \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = 0 \quad (6)$$

其中, h 为流体的焓; k 为分子导热系数; k_t 为有效导热系数, $k_t = \mu / Pr_t$; $J_{T,i}^j$ 为由于浓度梯度产生的组分 i 的扩散通量.

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_i) = - \frac{\partial J_{T,i}^j}{\partial x_i} + R_i \quad (7)$$

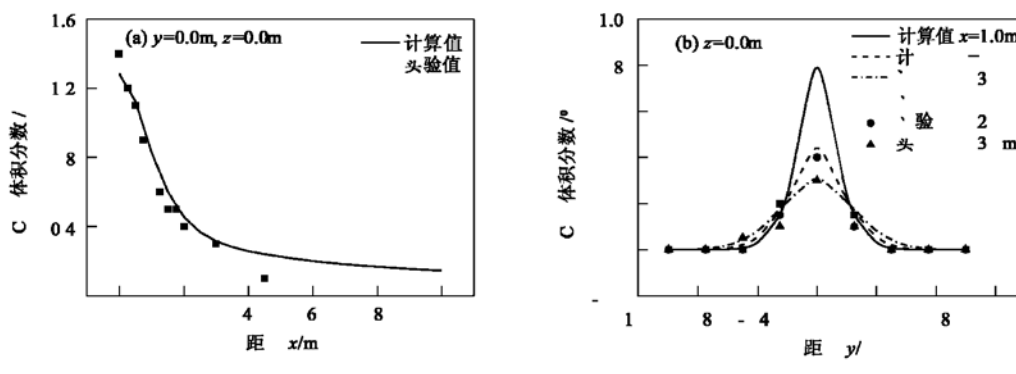
其中, C_i 为组分 i 的浓度; R_i 为化学反应源项. 在本文中不考虑各组分之间的化学反应.

计算区域取为 $25\text{m} \times 10\text{m} \times 5\text{m}$; 排气管直径 0.03 m. 计算区域的外部边界定义为自由边界. 参考实验测试数据^[12], 排气出口基准速度取为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; CO 出口体积浓度小于 5000×10^{-6} ; 大气环境温度和排气出口温度分别取为 293 K 和 380 K. 控制方程的离散采用有限容积法.

2 模型验证及参数分析

Kim 通过实验证明了 k - ϵ 湍流模型在汽车排气尾流分析中的适用性^[4]. 本文亦采用将计算结果与实测数据进行对比的方法来验证上述模型.

图 2 给出了排气尾流中 CO_2 浓度的计算结果与实测数据的比较. 从图 2(a)中可以看到, 尽管在排气尾流的下游处计算数据略高于实测数据, 但计算结果的总体变化趋势基本能够反映 CO_2 浓度沿排气尾流下游方向的近似指数规律的衰减特性. 图 2(b)的比较结果表明, 尾流中的 CO_2 在横向(y 方向)上浓度分布的计算结果与实测数据具有很好的

图2 排气尾流中 CO_2 浓度的计算结果与实测结果的比较Fig. 2 Comparison of CO_2 concentration between the experimental data and simulated results

一致性. 在对上述模型验证的基础上, 进一步利用该模型进行参数分析.

图3给出的是在相同的排气出口速度 $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下, 不同排气出口浓度时, CO 浓度在排气尾流 x - z 剖面上的等值线分布. 为了便于对怠速条件下汽车排气尾流扩散区域进行比较, 图中限定的 CO 最低的体积浓度为 1×10^{-6} .

从图3中可以发现, 在排气管出口附近, CO 的稀释和扩散非常剧烈, CO 浓度在排气管出口附近

一很小区域内迅速降低; 随后, 稀释和扩散逐渐减弱. 例如, 排气出口体积浓度为 500×10^{-6} 时, CO 浓度在排气下游第1个 5 m 内降低到 20×10^{-6} , 在第2个 5 m 内降低到 10×10^{-6} . 从图3中还可看到, 排气浓度越高, CO 在排气尾流内沿排气下游方向扩散的距离越远. 排气尾流中固定点处的 CO 浓度近似与排气出口浓度成正比. 由于排气尾流的动量惯性, 尾流只是在排气下游 6 m 以后才逐渐向上扩散, 且基本与排气出口浓度无关.

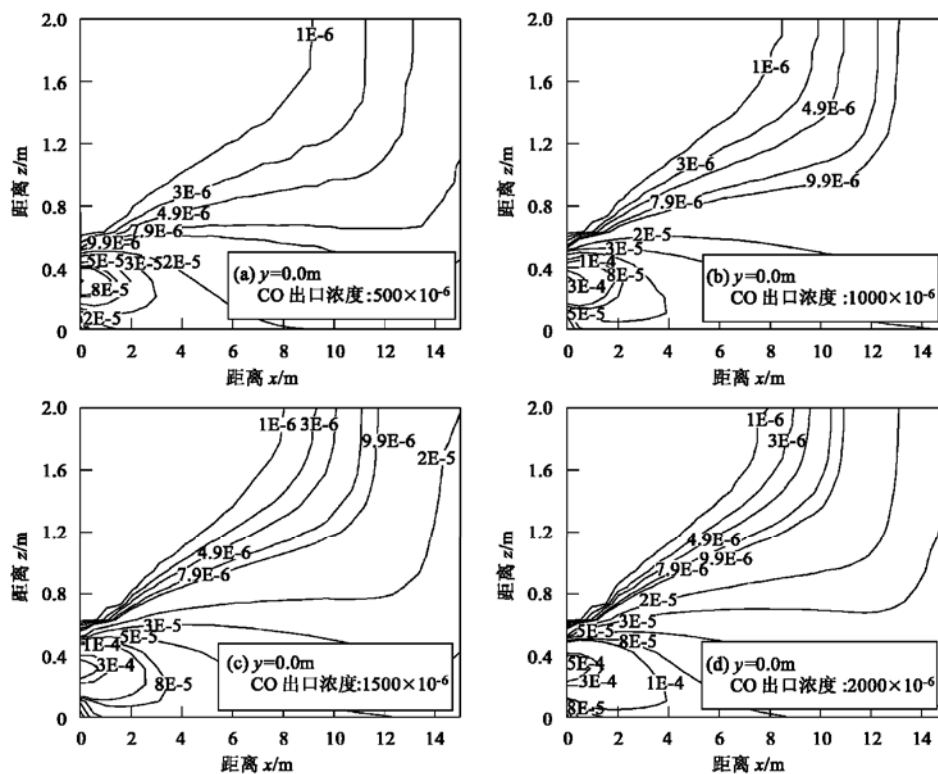


图3 在不同的排气出口浓度下 CO 浓度在排气尾流中的分布

Fig. 3 Distribution of CO concentration under different initial CO emission concentration

图 4 给出的是排气出口速度 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、排气出口浓度 1000×10^{-6} 时, 在排气下游 6 m 和 10 m 位置处, CO 浓度在排气尾流 y - z 剖面上的等值线分布。

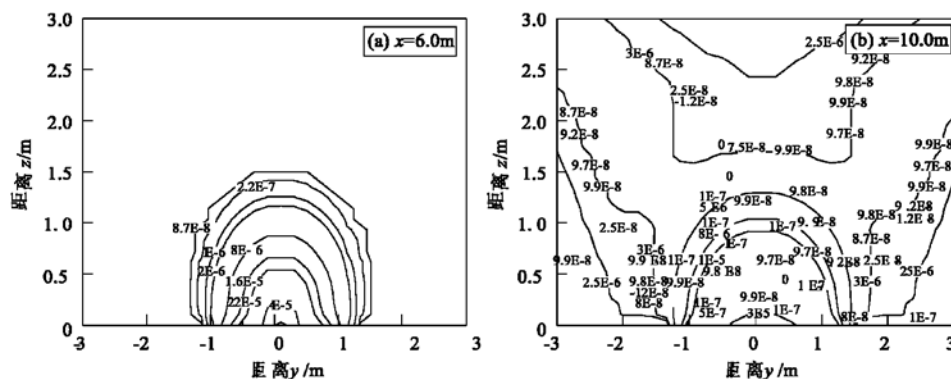


图 4 排气尾流下游 6 m 和 10 m 处 CO 浓度在 y - z 剖面上的分布

Fig. 4 Distribution of CO concentration in the section y - z for downstream distances of 6 m and 10 m

排气出口速度对排气尾流及排气尾流中污染物扩散的影响由图 5 和图 6 给出。排气出口速度 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 取自于实测结果^[12]。

图 5 给出的是在相同的排气出口体积浓度 800×10^{-6} 条件下, 不同排气出口速度时, CO 浓度在排气尾流 x - z 剖面上的等值线分布。从图 5 中可以看到, 排气下游 2 m 左右区域内, CO 浓度下降迅速。

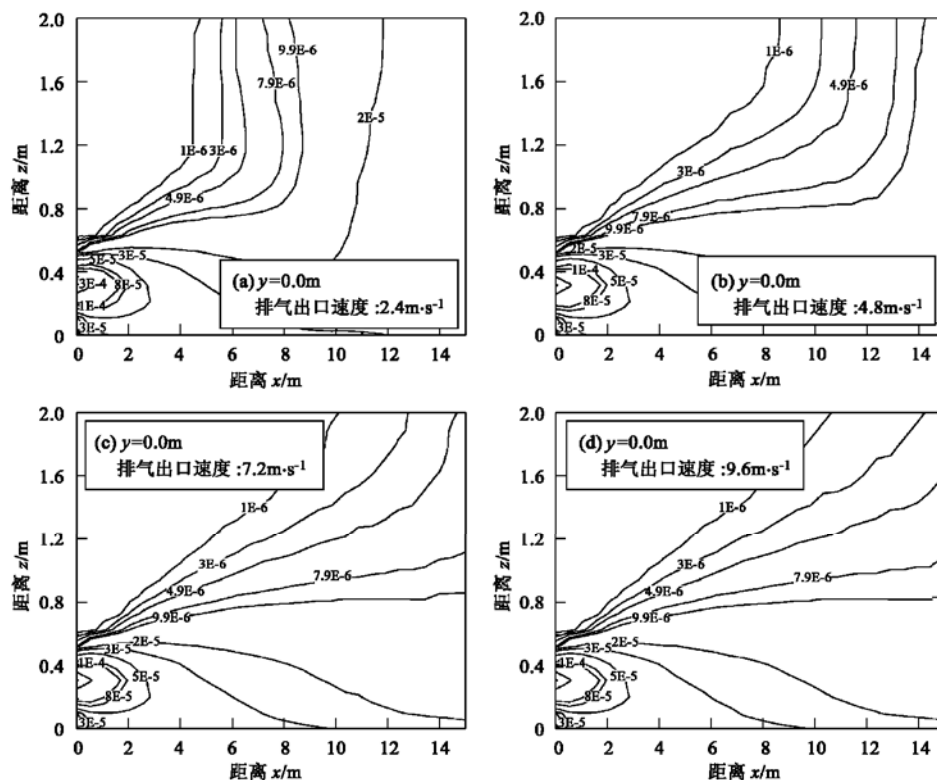


图 5 在不同的排气出口速度下 CO 浓度在排气尾流中的分布

Fig. 5 Distribution of CO concentration under different exit velocities

布。从图 4 中可以看到, 排气尾流下游 6 m 处, CO 的扩散仅限于半径小于 1.5 m 的半圆区域; 而在下游 10 m 处, CO 则扩散到整个图示区域。

在这个区域内, 不同排气出口速度下的 CO 浓度分布没有明显区别。超过 2 m 距离后, CO 浓度下降的速度逐渐减慢; 排气速度高时, CO 浓度下降的速度略快; 但 $7.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 排气出口速度时的 CO 浓度衰减差别不大。从图 5 中还可以发现, 低排气出口速度时, CO 向上扩散比较强烈, 并且排气出口速度越低, 向上扩散发生的位置越靠前。

为进一步分析 CO 向上扩散的情况, 图 6 给出了排气出口速度分别为 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的排气尾流 x - z 剖面上的速度等值线分布. 与图 5 比较可以发现, 尾流中速度接近 0 时, CO 开始迅速向上扩散. 例如, 在图 5(a) 中, CO 向上扩散的起始位置在 $x = 4 \text{ m}$ $z = 1.2 \text{ m}$ 左右, 而该处速度基本可

以忽略. 从而可以看到排气出口速度对污染物扩散的作用. 排气出口速度较高时, 气流具有较大的动量, 尾流在排气下游穿透的距离较远, 且在此过程中污染物可以充分稀释. 排气出口速度较低时, 气流动量耗尽较早, 这一方面不利于污染物尽快稀释, 另一方面也会促进污染物向上扩散.

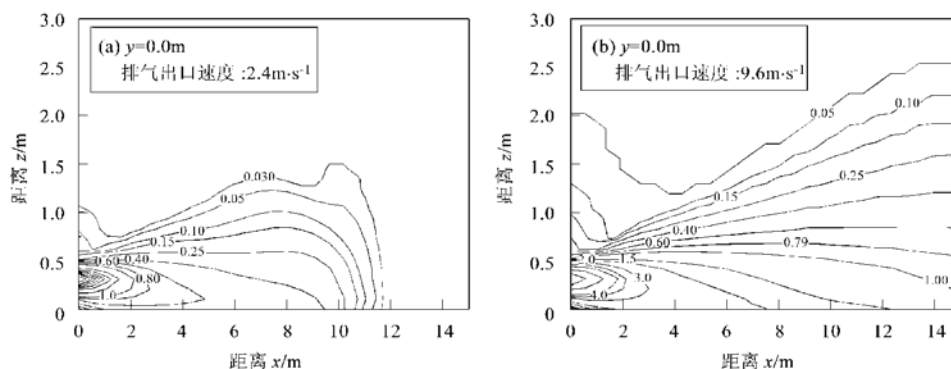


图 6 不同排气出口速度时排气尾流中的速度分布

Fig. 6 Distribution of flow velocity under different exit velocities

图 7 给出的是在相同排气出口速度 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、CO 出口浓度 800×10^{-6} 条件下, 不同排气出

口角度时, CO 浓度在排气尾流 x - z 剖面上的等值线分布.

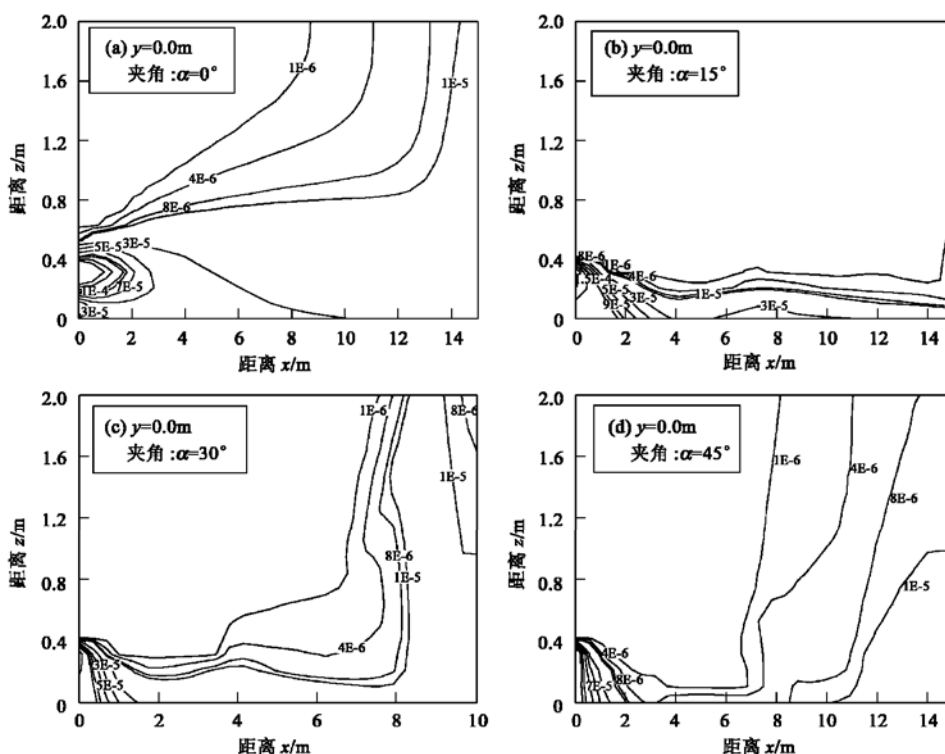


图 7 在不同的排气方向下 CO 浓度在排气尾流中的分布

Fig. 7 Distribution of CO concentration under different tailpipe exit direction

从图 7 中可以看到, 相对于排气浓度和排气速度的影响来说, 排气方向对污染物在排气尾流中的分布及扩散具有更强烈的作用. 当排气方向与水平呈 15° 夹角向下时, 排气尾流中的污染物扩散区域基本被限制在地表面附近. 然而当排气方向与水平夹角增加到 30° 或 45° 时, 气流与地面的强烈作用会造成污染物向上扩散. 排气方向与水平夹角越大, 污染物向上扩散的位置越靠前. 当排气方向与水平夹角为 30° 时, 污染物向上扩散的位置距排气管出口约 10 m 的距离; 但当夹角为 45° 时, 这一距离只有 7 m 左右. 通过改变排气管的排气方向, 可以限制或控制排气尾流中的污染物向上扩散.

侧风可以引起尾流在排气下游横向方向的扩散. 图 8 给出的是在相同的排气出口速度 $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、CO 出口浓度 800×10^{-6} 条件下, 不同侧风速度时, CO 浓度在排气尾流 x - y 剖面上的等值线分布.

从图 8 中可以看到, 侧风对排气尾流的发展具有重要作用. 即使侧风速度小到 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 也会使污染物的扩散区域主要限制在下风侧. 在较高侧风速度时, 污染物的扩散方向主要在侧风向, 而不是在排气下游方向. 侧风越强, 尾流在排气下游的穿透距离越短. 例如, 当侧风速度为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 排气尾流对排气下游 3 m 以上距离的区域已基本没有影响.

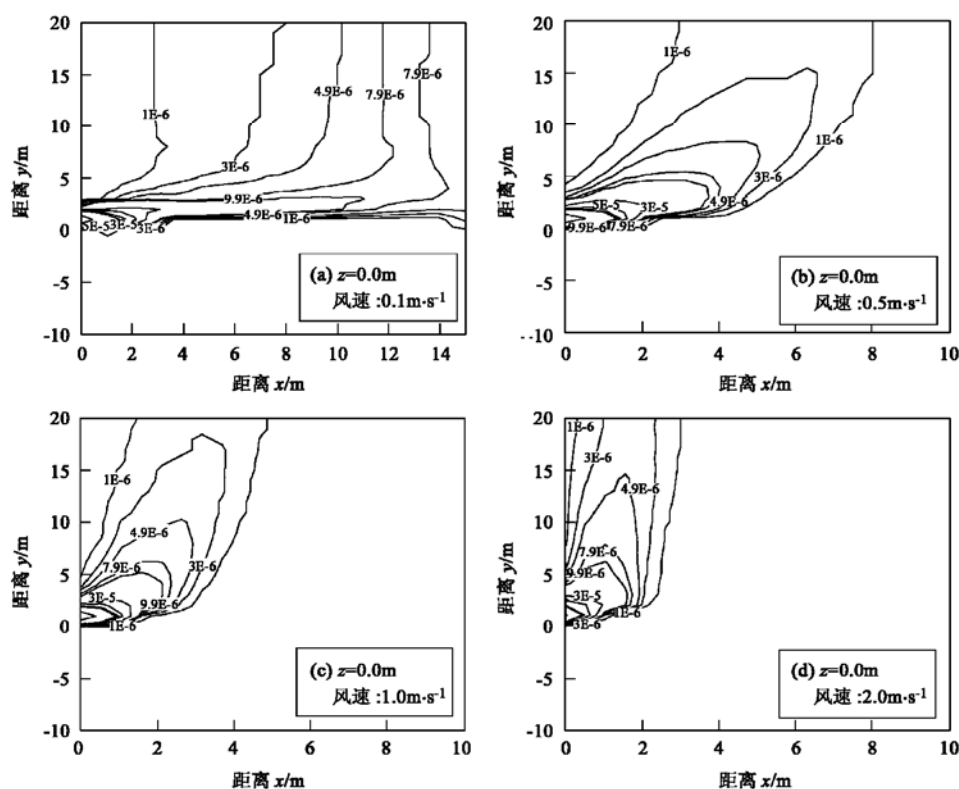


图 8 在不同的侧风速度下 CO 浓度在排气尾流中的分布

Fig. 8 Distribution of CO concentration under different crosswind speeds

3 结论

(1) 建立了模拟汽车排气尾流扩散的 k - ε 湍流模型, 通过模拟计算结果与实测数据的对比, 说明该数学模型可以较好地预测怠速条件下汽车排气污染物在排气尾流中的分布及其扩散特性.

(2) 尾流中污染物浓度近似与排气出口浓度成正比. 由于惯性, 尾流只是在排气下游 6 m 后才逐渐

向上扩散, 且基本与排气出口浓度无关.

(3) 排气出口速度较高时, 尾流在排气下游方向的穿透距离较远, 在此过程中污染物可充分稀释; 排气出口速度较低时, 气流动量耗尽较早, 不利于污染物的稀释, 并可促进污染物的向上扩散.

(4) 排气方向在限制尾流中的污染物向上扩散方面可以起到重要作用. 合适的排气方向可以使尾流中的污染物扩散区域限制在地表附近.

(5) 侧风可以有效改变排气尾流中污染物的扩散方向,对排气尾流的发展具有重要作用.

参考文献:

- [1] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. Development of a drivingcycle for Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**: 2323~ 2335.
- [2] Frey H C, Unal A, Rouphail M, *et al.* On road measurementof vehicle emissions using a portable instrument [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, **53**: 992~ 1002.
- [3] Baker C J. Flow and dispersion in ground vehicle wakes [J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, **15**: 1031~ 1060.
- [4] Kim Dong-Hee, Mridul Gautam, Dinesh Gera. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plum using k - ϵ turbulent closure [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**: 5267~ 5275.
- [5] Heinz S, Van Dop H. Buoyant plume rise described by a Lagrangian turbulence model [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**: 2031~ 2043.
- [6] Huai W, Li W. Similarity solutions of round jets and plumes [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, **14**: 649~ 658.
- [7] Obasaju E D, Robins A G. Simulation of pollution dispersion using small scale physical models ——an assessment of scaling options [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, **52**: 239~ 254.
- [8] Chan A T, Au W T W, So E S P. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality - Part II: multiple canopies and canyons [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**: 2761~ 2772.
- [9] Vardoulakis S, Fisher B E A, Pericleous K, *et al.* Modeling air quality in street canyons: a review [J]. Atmospheric environment, 2003, **37**: 155~ 182.
- [10] Chan T L, Dong G, Leung C W, *et al.* Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**: 861~ 872.
- [11] Chan T L, Dong G, Cheung C S, *et al.* Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**: 6117~ 6127.
- [12] 宁智, 张振顺, 资新运, 等. 怠速条件下汽车排气污染物在排气尾流中扩散特性的实验研究 [J]. 环境科学学报, 2005, **25**(8): 1151~ 1155.