

街道峡谷内污染物扩散对周边建筑物自然通风影响的研究进展

同济大学 王宏亮[☆] 龙惟定

摘要 介绍了城市街道峡谷内污染物的特点和扩散模式,分析了换气效率、室内气流组织、污染物扩散方式等影响建筑自然通风的主要因素,并对实地测量法和数值模拟法进行了分析和比较。

关键词 街道峡谷 污染物扩散 自然通风

Research progression in influences of air pollution dispersion in urban street canyon on nearby natural ventilated buildings

By Wang Hongliang[★] and Long Weiding

Abstract Presents the main features and dispersion models of pollution in urban street canyons, and analyses the effect of air change rate, indoor air distribution and pollution dispersion on natural ventilation buildings. Compares and analyses the observation method and numerical simulation method.

Keywords street canyon, pollution dispersion, natural ventilation

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

街道峡谷(street canyon)是指城市中道路及周围连续建筑物形成的城市大气边界层下垫面中的狭长低谷。随着城市经济的不断发展,大中城市的汽车保有量逐年增加,虽然机动车燃料和发动机技术有了很大改进,但城市大气环境仍然受到交通污染的困扰。机动车主要污染物包括 CO, NO_x, 碳氢化合物和颗粒物^[1]。城市特殊下垫面以及微气候的特征可能影响污染物的传输扩散,从而产生局部地区空气污染,以致在城市街道峡谷中可观测到高浓度污染物^[2-4]。

自然通风是街道峡谷周边建筑物比较常用的通风方式,临街建筑通过自然通风将室外空气引入室内。然而在街道峡谷内污染物扩散的情况下,建筑自然通风可能会将污染空气引入室内,恶化室内空气质量^[5-6]。

1 街道峡谷的特点

1.1 街道峡谷的定义

街道峡谷的概念最早由 Nicholson 提出^[7],是

指街道两侧都有连续的高大建筑物的相对狭长的街道。但这一概念已经得到扩展^[8],即相对狭长的街道两侧的高大建筑物在不连续、存在一部分空白和缺口时,也可称为街道峡谷。典型的街道峡谷剖面图如图 1 所示。

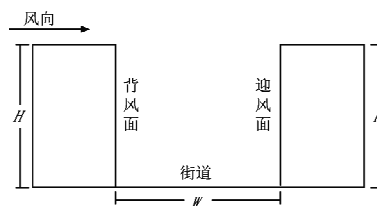


图 1 典型的街道峡谷剖面图

根据建筑物高度 H 和街道宽度 W 的比值 H/W (高宽比),可将街道峡谷分为理想街谷($H/W \approx 1$),深街谷($H/W \approx 2$)和浅街谷($H/W < 0.5$)。如

①[☆] 王宏亮,男,1983 年 6 月生,在读硕士研究生
200092 上海市四平路 1239 号同济大学济阳楼 403 室
(021) 65988388
E-mail: whl123456789@163.com
收稿日期:2008-09-03

果街谷两侧建筑物高度大致相等则称为对称街谷, 否则称为非对称街谷^[9]。

1.2 街道峡谷的流场

目前对二维孤立街谷内的流场结构研究比较多, 当风向垂直于街谷时, 依据街谷的尺寸可将二维街谷结构内的流场分为 3 种形式: 孤立粗糙流(isolated roughness flow)、尾流干扰流(wake interference flow)和滑动流(skimming flow)^[10]。

孤立粗糙流($H/W < 0.3$)是在街谷足够宽时产生的, 街谷中有充分的流动发展空间, 街谷背风面产生的旋涡不对街谷迎风面产生明显的影响, 因此, 在迎风面也能产生一个和背风面相当的旋涡, 流场结构相对简单。当街谷相对缩小($H/W > 0.5$)时, 就出现了尾流干扰流。在街谷背风面产生的旋涡还不能完全到达迎风面, 但它会对迎风面处的流动产生明显的影响, 使流动在迎风面的分离比较复杂。当 $H/W \approx 1$ 时, 会产生滑动流, 街谷中一般会形成一个典型的旋涡, 在相对较深的街谷中, 旋涡位置常常向上移动。当街谷更深时, 在上部旋涡下会出现一个反向弱旋涡。因此, 不同的街谷结构中的污染物扩散方式也具有不同的特点。

2 街道峡谷内污染物的扩散模式

街道峡谷内污染物的扩散模式大致可分为 3 类: 应用模式、物理模拟和 CFD 模式。

2.1 应用模式

应用模式一般针对特殊街谷问题而设计, 属于半经验模式, 当用于处理其他地区或其他形式的街谷污染物扩散问题时, 往往需要作进一步的改进。

2.1.1 高斯烟羽模式

连续点源排放的污染物浓度场可由正态分布表示, 浓度大小和污染源强度成正比, 和风速成反比。在简单的烟羽模式中, 污染物在地表和混合层顶被反射, 一般不考虑化学转化和清除过程。经改进的烟羽模式也可以用于城市面源或线源(如交通)的浓度计算, 但是一般不直接用于城市小尺度扩散问题, 因为城市中的建筑物和其他结构是通过地表粗糙度参数化的^[11]。

2.1.2 STREET-SRI

Johnson 等人对汽车尾气初始扩散和汽车引起的湍流进行了简化假设, 运用一个简单的箱式模型, 得到的街道峡谷模式称为 STREET 或 SRI^[12]。它的假设受体点的污染物浓度由两部分

组成: 城市背景浓度和街谷的汽车尾气引起的浓度。因此, 计算街道两侧污染物的浓度需要考虑街道受体点的高度和受体点与污染源的垂直距离。街谷背风面的污染物浓度与受体点和线源的距离成反比; 街谷迎风面的污染物浓度只与受体点和线源的垂直高度有关。

2.1.3 OSPM

OSPM(optional street pollution model)由丹麦国家环境研究所开发^[13], 该模式考虑了对污染物浓度有贡献的 3 个因素: 污染源、街谷环流和城市背景浓度。污染源直接扩散浓度的计算采用高斯烟羽模式思路, 街谷环流引起的循环浓度的计算采用区域形状为梯形的箱式思路。

2.2 物理模拟

物理模拟以相似性原理(包括几何相似、动力相似、大气边界相似等)为基础, 通过建模可得到与实际街道峡谷相似的条件。物理模拟一般通过两种方法实现: 风洞和水箱。但风洞模拟更广泛运用于模拟污染物的扩散。

2.3 CFD 模式

CFD(computational fluid dynamics)模式一般是通过计算机数值模拟流体流动和热量传输等现象, 它广泛地应用于工程以及环境领域。通过求解流体力学方程组(包括动量方程、连续方程、污染物传输扩散方程和状态方程等)并采用适当的湍流闭合方案, 来求得街道峡谷内流场和污染物浓度场。

3 街谷内污染物扩散对建筑自然通风的主要影响因素

3.1 自然通风房间换气效率

室内空气与室外空气的交换效率决定了房间的换气次数。房间进风口和出风口的位置对换气效率有显著的影响。当进风口位于建筑表面的高压区, 而出风口位于建筑表面的低压区时, 房间的换气效率会明显提高。但是, 对于街道峡谷周边建筑物自然通风的房间, 如果建筑外空气污染物浓度很高, 随着换气效率的提高, 进入室内的污染物浓度也会相应提高。Chao 等人的研究表明, 当自然通风房间的换气次数大于 4 h^{-1} , 室内外颗粒污染物的浓度就会趋于一致^[14]。

3.2 房间气流组织方式

房间的结构(如进风口和出风口的位置与面积)和几何形状与房间的气流组织密切相关。若房

间的进风口与出风口的位置不当,可能会降低房间自然通风的效率并导致室内空气质量恶化^[15]。

3.3 污染源强度及与建筑的距离

污染源强度(简称源强)由街道中总车流量、车辆类型以及车辆的排污率决定。一般来说,在风速及风向一定的情况下,源强越大,则建筑外表面处污染物浓度越高,通过自然通风引入室内的污染物浓度越高。源强与建筑物的距离也对建筑的自然通风有很大的影响,凌英等人的研究表明,在一定风速下,当污染源靠近背风侧建筑时,增大源强,迎风侧和背风侧建筑表面的污染物浓度均会增加;当污染源靠近迎风侧建筑时,增大源强,背风侧建筑表面的污染物浓度会增加,但迎风侧建筑表面的污染物浓度变化不大^[16]。

3.4 风向与风速

风向对街谷内污染物起着整体输送的作用,风向决定了污染物的迁移方向,使得污染源下风向的污染物浓度高于上风向的污染物浓度。街道两旁建筑物顶部的风向对街道内大气污染物扩散有重要的作用,这是由于不同风向的屋顶风在街道内将产生不同的气流流场。当屋顶风平行于街道峡谷时,街谷内污染物较容易扩散,不易在建筑物表面堆积。随着风向与街谷夹角的增大,污染物会在建筑物表面产生堆积现象^[18-20]。

风对街谷内污染物起到稀释的作用,随着风速增大,单位时间内流入街道峡谷内的清洁空气增加,对污染物的稀释作用也就越大。同时,风速的增大还会提高街谷建筑物表面的风压,从而增大建筑物自然通风的通风量。在街道峡谷内污染物的扩散过程中,当街谷高宽比不同时,街谷内会形成不同的旋涡,从而形成不同于建筑物上层大气的内流场。但它们有一个共同的规律^[15],就是上层大气中风速加大时,街道峡谷内污染物与上层大气的扩散交换随着加剧,从而使街道峡谷内建筑物表面污染物浓度降低。

3.5 街道峡谷地形

建筑物的高度与街道的宽度决定了街道峡谷的地形。在风速、风向一定的情况下,街谷的高宽比就决定了街谷内部流场的分布。Hussain 等人的风洞试验表明^[21],当街谷高宽比低于 0.2 时,街谷内污染物很容易扩散,不易在建筑表面堆积。随着街谷高宽比的增加,建筑表面的污染物浓度会相

应提高。Hoydysh 将街道峡谷迎风侧建筑物高度高于背风侧 1.5 倍以上的街道峡谷定义为递升型峡谷,反之则为递降型峡谷,而两侧建筑物高度差不多的街道峡谷为平行型峡谷^[18]。他的风洞试验表明递升型峡谷中建筑物表面污染物浓度低于另两类峡谷;而平行型和递降型峡谷中背风侧建筑物表面污染物的浓度都远高于迎风侧建筑物。

3.6 建筑屋顶形状

建筑物屋顶形状对街道峡谷内流场有显著的影响,改变建筑屋顶形状,街谷内污染物扩散方式会发生变化。Rafailidis 的风洞试验表明,两边建筑物一侧为尖顶、一侧为平顶的街道峡谷,街谷内污染物很容易扩散;两边建筑物都为尖顶的街道峡谷,其污染物很难扩散,建筑表面污染物浓度较高,对建筑内房间自然通风的影响较大^[22]。

4 街谷内污染物扩散对建筑自然通风影响的研究进展

4.1 实地观测法

实地观测法就是在一个连续的时间段内,对街道峡谷内大气污染物浓度和街道峡谷旁建筑自然通风房间内污染物浓度进行连续的测试,并对结果进行分析,得出其相互关系。Chan 等人对香港地区某典型街道峡谷旁建筑自然通风和某孤立建筑进行测试^[23],测试结果表明,在相同高度的自然通风房间内,街道峡谷旁建筑的悬浮性颗粒物的浓度较高。而且随着高度的增加,房间内污染物浓度呈指数下降。钟珂对上海市某临街建筑的自然通风房间和某远离街道的自然通风房间的 CO 浓度进行了测试^[24],测试结果表明,在没有室内污染源的情况下,临街建筑的自然通风房间和远离街道建筑的自然通风房间内的污染物浓度差别很大,而自然通风房间内外的污染物浓度差别不大。

4.2 数值模拟法

数值模拟法应用相当广泛,该方法就是将计算区域划分为小的网格,把控制空气流动的连续的微分方程组通过有限差分或有限元方法离散为非连续的代数方程组,并结合实际的边界条件在计算机上求解离散所得的代数方程组。对街道峡谷内建筑物房间自然通风的数值模拟应该分为两部分,即对流场的模拟和对污染物传输的模拟。首先应获得流场,其次再根据流场的分布求得污染物浓度场。Chang 用数值模拟法模拟了台湾地区某临街

建筑自然通风时的室内污染物浓度场^[25],并分析了街道污染物扩散方式和房间换气效率对房间内污染物浓度分布的影响。

5 结语

在当今节约能源、保持良好的室内空气质量的双重压力下,自然通风技术重新得到了广泛的应用^[26-28]。但是随着城市的现代化发展,城市机动车数量的增多,机动车尾气形成的大气污染也日益加剧。因此,城市街道峡谷的特殊条件对城市中街道峡谷周边建筑的自然通风有着很强的局限性。

分析街谷内污染物扩散对建筑自然通风影响的主要方法有实地观测法和数值模拟法。观测法可以很好地获得建筑室内外的研究资料,但是其观测计划设计需要很高的技巧。数值模拟的优点在于能够提供详细的街道峡谷和室内流场以及污染物浓度场,但还是存在着一些问题。首先,街道峡谷内的流场较为复杂,如何选用适合的湍流模型是一个难点^[29-30]。其次,房间自然通风的模拟研究需要建筑表面的网格精度较高,但街道峡谷内流场和污染物浓度场的较大尺度使得获得建筑表面的高精度网格较为困难^[31]。

参考文献:

- [1] 谢绍东,谢远航,唐孝炎. 我国城市地区机动车污染现状与趋势[J]. 环境科学研究,2000,13(4): 22-25
- [2] Britter R E, Hanna S R. Flow and dispersion in urban areas[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003,35(1):469-496
- [3] 邵祖峰. 试论城市机动车尾气污染的治理对策[J]. 上海汽车,2002(3):36-41
- [4] 周洪昌. 城市汽车排放 CO 污染模式的概略分析[J]. 环境科学,1994,15(5):78-82
- [5] Christopher Y H, Chao. Comparison between indoor and outdoor air contaminant levels in residential buildings from passive sampler study[J]. Building and Environment,2001,36(9):999-1007
- [6] Li Chunlei, Fu Jiamo, Sheng Guoying. Vertical distribution of PAHs in the indoor and outdoor PM_{2.5} in Guangzhou, China [J]. Building and Environment,2005,40(3):329-341
- [7] Nicholson S E. A pollution model for street level air [J]. Atmospheric Environment,1975,9(1):19-31
- [8] 王宝民,柯永东,桑建国. 城市街谷大气环境研究进展[J]. 北京大学学报:自然科学版,2005,41(1):146-153
- [9] Ludwig F L, Dabberdt W F, Johnson W B. Validation and applications of an urban diffusion model for vehicular pollutants [J]. Atmospheric Environment,1973,7(4):603-608
- [10] Oke T R. Street design and urban canopy layer climate[J]. Energy and Buildings, 1988, 11(2): 103-113
- [11] Owen B, Edmunds H A, Carruthers D J. Use of a new generation urban scale dispersion model to estimate the concentration of oxides of nitrogen and sulphur dioxide in a large urban area[J]. Science of the Total Environment,1999,235(3):277-291
- [12] Johnson W B, Ludwig F L, Dabberdt W F, et al. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1973,23(6):490-498
- [13] Hertel O, Berkowicz R. Modeling pollution from traffic in a street canyon [R]. NERI, Roskilde, Denmark; Evaluation of data and model development, 1989
- [14] Chao Y H, Tung C W. An empirical model for outdoor contaminant transmission into residential buildings and experimental verification [J]. Atmospheric Environment,2001,35(9):158-159
- [15] Ayad S S. Computational study of natural ventilation [J]. Wind Engine Indus Aerodynamic, 1999,82 (1/2/3):49-68
- [16] 凌英,付娟,宁智. 街道峡谷内机动车排气污染物的扩散规律[J]. 北京交通大学学报,2006,30(4):89-94
- [17] Catonl F. Dispersion mechanisms in street canyon [J]. Hemispheric Environment, 2003, 37(5): 693-702
- [18] Hoydysh W G, Dabberdt W F. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons[J]. Atmospheric Environment,1988, 22(12):2677-2689
- [19] Luria M, Weisiger R, Mordechai P. CO and NO_x levels at the center of city roads in Jerusalem[J]. Atmospheric Environment,1990,24B(1):93-99
- [20] 张化天,谢绍东,张远航. 城市街道峡谷内机动车排放污染物的扩散规律[J]. 环境科学研究,2002,15(1):51-54

(下转第 140 页)

分析)

冷水机组安装 CQM 后,连续使用 3 个月,冷凝器的传热温差一直控制在标准规定的范围内,温差小于 2℃且稳定性高。

表 1 为安装 CQM 冷水机组与未安装 CQM 冷水机组传热温差的对比。冷水机组安装 CQM 后,系统清洗运行频率与节电率有直接关系,不同节电率时冷水机组节省的能耗见表 2。

表 1 冷水机组安装与未安装 CQM 时的传热温差对比 ℃

运行时间/d	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
安装 CQM	0.5	0.8	1.2	1.5	2.2	3.0	3.3	4.2	4.5	5.1	5.5	6.2	6.0	6.8	8.3
未安装 CQM	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6

表 2 不同节电率时冷水机组节省的能耗

冷水机组	A/kW	B/%	C/(h/a)	D/%	E/(元/(kWh))	F/(元/a)
WCFX30-30C	385	60	5 000	15	1.00	173 250
WCFX30-30C	385	60	5 000	30	1.00	346 500

注:A为冷水机组的耗电量,kW;B为冷水机组的平均运行效率,按项目选取;C为冷水机组年运行时间,h/a,按项目选取;D为CQM系统投入使用后的平均节电率;E为电费,1.0元/(kWh);F为节省的总电费,F=ABCDE,元/a。

4.2 节约的人工清洗费用

原先使用 15 d 就要人工通炮管清洗一次,按 6 个月空调期通炮 12 次计算,则每年节省人工清洗费用约 70 000 元。

4.3 投资回报分析

每台 WCFX30-30C 型冷水机组配套选用的 CQM-Ⅱ型产品单价为 385 000 元,按目前使用环

境和实际投用情况,可省 15%~30% 电能,由表 2 可以得知,使用 CQM 系统后每台空调冷水机组节省的电费在 173 250~346 500 元/a 之间;另外还可节省人工定期清洗冷水机组冷凝器的费用 70 000 元,解决了定期人工清洗冷凝器对空调运行及设备异常的影响。保守估算每台 CQM 可综合节省费用约 30 万元/a。

5 总结

CQM 清洗技术在广州地铁海珠集中冷站成功试用后,该集中冷站的另外 2 台冷水机组也安装了型号相同的 2 台 CQM 全自动清洗设备,到目前为止,使用情况正常。

1) 推广应用 CQM 可节省电能达 30%,1.5~2 a 可收回初投资,节电效益显著。

2) 本项目应用 CQM 不但具有技术优势,更具有很好的经济效益,CQM 的使用年限达 20~25 a,其长远的经济效益尤为可观。

3) 使用 CQM 能使冷水机组冷凝器维护简便,大大地减少机组故障率,延长冷水机组使用寿命。

参考文献:

- [1] 北京制冷学会《制冷与空调设备手册》编辑委员会. 制冷与空调设备手册[M]. 北京:国防工业出版社,1987
- [2] 彦启森. 空气调节用制冷技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004

(上接第 23 页)

- [21] Hussain M, Lee B E. An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boundary layer flow [R]. Sheffield, Yorkshire, England; Report BS56, Department of Building Science, Faculty of Architectural Studies, Universities of Sheffield, 1980
- [22] Rafailidis S, Schatzmann M. Concentration measurements with different roof patterns in street canyons with aspect ratios B/H = 1/2 and B/H = 1 [EB/OL]. [2007-04-22]. http://www.Mi.uni-hambrug.de/technische_meteorology
- [23] Chan L Y, Kwok W S. Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(26): 4403-4412
- [24] 钟珂. 室内外空气污染物浓度演化关系的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004
- [25] Chang Tsang-Jung. Numerical evaluation of the effect of traffic pollution on indoor air quality of a naturally ventilated building[J]. Journal of the Air & Waste

Management Association, 2002, 52(9): 1043-1053

- [26] Cooper P, Linden P F. Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources[J]. Fluid Mechanics, 1996(6): 153-176
- [27] 段双平, 张国强, 彭建国. 自然通风技术研究进展[J]. 暖通空调, 2004, 34(3): 22-28
- [28] Li Yuguo. Analysis of natural ventilation—a summary of existing solutions[EB/OL]. [2008-07-16]. <http://hybvent.civil.auc.dk/publications/Technical%20Reports/TR12%20AnaSol.Pdf>
- [29] 黄远东, 王守生, 金鑫. 城市街道峡谷内污染物扩散模拟中不同湍流模型的比较研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(2): 189-195
- [30] Dixon N S, Boddy W D, Smalley R J. Evaluation of a turbulent flow and dispersion model in a typical street canyon in Yoke, UK[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(5): 958-972
- [31] Ugo Piomelli, Elias Balaras. Wall-layer models for large-eddy simulations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 34: 349-374