

建筑密度对城市热岛影响的多孔介质数值模拟

李甜甜¹, 俞炳丰¹, 胡张保¹, 陈志²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安石油大学石油工程学院, 710065, 西安)

摘要: 根据城市空间结构与多孔介质的相似性,在城市热岛效应的研究中引入了多孔介质理论,采用体积平均技术和雷诺时均方程法建立了适用于城市湍流流动与换热的多孔介质数学模型,并利用微尺度数值模拟计算结果的空间体积平均对模型的有效性进行了验证.采用建立的城市多孔介质数学模型,合理地考虑城市热源在城市冠层内的空间分布,研究了建筑密度对城市热岛强度的影响.结果表明:城市区域热岛强度随着地面孔隙率的增大而减弱,地面孔隙率每增加 0.1,就会引起城市热岛强度减小 0.36 K;在城市下游的乡村地区,随着离开城市距离的增加,热岛强度逐渐消失;城市冠层底部的热岛强度要显著高于上部,热岛强度随高度的增加几乎呈线性减小;城市对上空气流的影响可以延伸至 5 倍的城市冠层高度.

关键词: 城市热岛;多孔介质;建筑密度;孔隙率;数值模拟

中图分类号: P463.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0134-05

Numerical Simulation on Impact of Building Density on Urban Heat Island with an Urban Porous Media Model

LI Tiantian¹, YU Bingfeng¹, HU Zhangbao¹, CHEN Zhi²

(1. School of Energy and Power Engineer, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Insititute of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to the urban spatial structure and the similarity of the porous media, a two-dimensional model for the turbulent flow and heat transfer in a city was derived from the porous media theory. The urban porous media model was verified by comparing the numerical results with the volume-averaged results of the micro-scale CFD model. Moreover, the urban porous media model was applied to examine the effects of building density on the spatial UHI of the urban area and the leeward rural area. The results show that an increase in ground porosity by 0.1 leads to an increase in UHI intensity by 0.36 K and the UHI intensity decreases rapidly as the airflow enters the leeward rural area. The UHI intensity decreases linearly as the height increases and the UHI almost vanishes as the height reaches five times the height of the urban canopy.

Keywords: heat island; porous media; building density; porosity; numerical simulation

对于城市热岛的研究,目前主要的方法有地面观测法、遥感监测及边界层数值模式模拟等 3 种.地面观测法是早期出现的一种方法,它使用灵活,针对性强,但是由于受到城区内观测点数量及位置的限制,无法保证稳定的数据来源^[1].遥感技术尽管在数据获取方面具有明显的优越性,但目前遥感传感器

的分辨率普遍偏低,对于城市热岛的垂直结构研究也显得十分薄弱^[2].数值模拟方法包括中尺度和微尺度模拟,当研究对象为整座城市时,由于目前的中尺度模式对复杂城市下垫面参数化的细化程度还不够,将会使计算过于粗略;如果使用微尺度数值模式,则计算量过大,实际大小的城市精细数值模拟几

乎是不可能的。

多孔介质是由多孔固体骨架和孔隙间的流体组成的多相共存空间。当多孔介质内各相之间或各相内部存在温度差、压力差时,多孔介质内部就会有流动和传热传质过程发生。城市建筑物鳞次栉比,道路纵横交错、彼此贯通,空气在其中流动,可以看出,这种结构与具有内热源的多孔介质十分相似。倘若能把城市看作多孔介质,忽略掉一些微观信息,采用体积平均技术建立城市的多孔介质数学模型,利用多孔介质数值模拟方法研究城市热岛,则可以有效地解决微尺度数值模式中计算量过大的问题。基于上述考虑开展了本文的研究工作,研究内容包括:基于多孔介质理论,建立适用于城市湍流流动与换热的多孔介质数学模型,并对模型进行验证;采用多孔介质数值模拟方法研究地面建筑密度对城市区域及城市下风向乡村热岛强度的影响。

1 物理模型

本文建立模型时假设城市孔隙率只随高度变化,在水平方向上为定值,考虑到水平方向上的对称性,三维的城市冠层可以简化为二维的连续多孔介质,如图1所示。水平方向包括5 km的城市区和6 km的乡村区域(城市上风向的区域长1 km、下风向长5 km),竖直方向上城市冠层取80 m,计算高度取城市冠层高度的10倍,即800 m。城市冠层内为多孔介质流动,城市冠层上方及城市迎风向和下风向的乡村为纯流流动。以城市迎风边缘在地面的起始点为原点,水平方向为 x 轴,城市迎风边缘为 z 轴,则城市孔隙率在垂直方向上如下式变化

$$\phi = (1 - \phi_0) \left(\frac{z}{H} \right)^{0.5} + \phi_0, \quad z \leq H$$

$$\phi = 1, \quad z > H$$

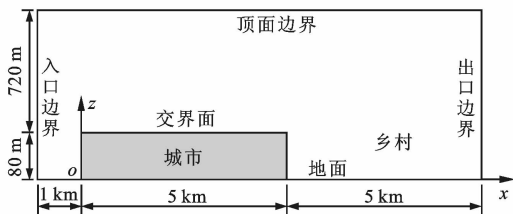


图1 物理模型示意图

2 数值研究方法

2.1 控制方程

当基于平均粒径的 Re 大于300时,多孔介质中的流动就进入充分发展的湍流流动^[3]。对于城市空

气流动,基于粗糙元平均高度和空气平均流速计算的 Re 一般都在 10^6 数量级,由此可以看出城市气流属于典型的湍流流动。下面建立适用于城市湍流流动与换热的稳态多孔介质控制方程,其中空气的各个物理量参数均为固有相平均量。

2.1.1 连续性方程 城市冠层内不可压缩流动的连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

2.1.2 动量方程 基于Brinkman-Forchheimer扩展达西模型^[4],在竖直方向上考虑空气重力作用和浮升力作用,通过Reynolds时间平均建立如下动量方程

$$\begin{aligned} \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\phi} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{\phi} + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \\ & \frac{2}{3} \rho \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} - \frac{\mu}{K} u_i - \frac{C_F \phi^2}{K^{1/2}} u_i (u_j u_j)^{1/2} + \\ & \delta_{i3} \frac{\rho}{\phi} g [\beta (T - T_{in}) - 1] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mu_t = c_\mu \rho \kappa^2 / \epsilon$; K 和 C_F 按下式计算^[5]

$$K = \frac{h^2 \phi^3}{150(1 - \phi)^2}; \quad C_F = \frac{1.75}{(150 \phi^3)^{1/2}} \quad (3)$$

在式(2)中,等号左边是对流惯性项,等号右边第1项是压力梯度项,第2项是边界效应引起的黏性扩散项,第3项是湍流脉动所造成的Reynolds应力产生项,第4项是黏性阻力项(Darcy项),第5项是惯性效应引起的形状阻力项(Forchheimer项),第6项是空气重力项和浮力项。

2.1.3 能量方程 略去局部非热平衡能量方程中的固体相方程,只用流体相能量方程来进行描述,两相之间的热交换通过下式模拟

$$h_a (T_s - T_f) = (1 - \phi) q \quad (4)$$

利用式(4),通过对文献[6]中的局部非热平衡能量方程做时间平均,建立城市多孔介质能量方程如下

$$\rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{(1 - \phi)}{\phi c_p} q \quad (5)$$

文献[7]在数值研究人为热对费城城市气候的影响时,把所有的热源当作空间均匀分布的内热源处理,其处理方法存在两点不足:一是没有对不同来源的热源进行区别处理;二是认为热源在整个城市冠层内均匀分布。本文对不同来源的热源进行区别处理,地面热源通过给定底面边界的热流密度来设定,单位体积建筑物的热源强度 q 通过下式计算

$$q = \frac{Q_b}{V_b} \quad (6)$$

式中: Q_b 是基于地表面面积的建筑热源强度, W/m^2 ; V_b 按下式计算

$$V_b = \int_0^H (1 - \phi) dz \quad (7)$$

2.1.4 湍动能方程及其耗散率方程 本文采用文献[8]建立的 $\kappa\epsilon$ 两方程湍流模型对上面建立的多孔介质动量方程和能量方程进行封闭。

2.2 边界条件

(1) 入口风速选择最为常用的指数律公式^[9]

$$\frac{u_{in}}{u_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^n \quad (8)$$

式中: u_{ref} 指参考高度 z_{ref} 处的水平风速, $m \cdot s^{-1}$; $n = 0.16$; $z_{ref} = 10 \text{ m}$ 。

(2) 入口边界上的温度分布设定为

$$T_{in} = T_0 - \gamma z \quad (9)$$

式中: T_0 为地表气流温度, K。

(3) 入口边界上压力按如下规律分布

$$p_{in} = p_0 - \rho g z \quad (10)$$

式中: p_0 为地表面参考压力, Pa。

(4) 来流的湍动能为

$$\kappa_{in} = 0.01 u_{10}^2 \quad (11)$$

式中: u_{10} 为 10 m 高度处的风速, $m \cdot s^{-1}$ 。

(5) 来流的湍动能耗散率为^[10]

$$\epsilon_{in}(z) = c_{\mu}^{3/4} \kappa_{in}^{3/2} / (kz) \quad (12)$$

式中: k 取 0.4。

(6) 对于热力边界, 给定地表面热流密度。对速度取无滑移边界条件, 即

$$u = w = 0 \quad (13)$$

(7) 出口边界和顶面边界采用充分发展的法向零梯度边界条件, 即边界上的变量值与邻近内节点上的变量值相等。

2.3 交界面的处理方法

在物理模型中主要有两个区域, 一个是城市多孔介质区, 即城市为孔隙的骨架, 大气在其中流动; 另一个是城市上空区及乡村区域, 属于纯流流动区。通过分析时均方程和封闭方程可以看出, 当孔隙率 $\phi \rightarrow 1$ 时, 所建立的城市多孔介质数学模型将还原为适用于纯流湍流流动与换热的时均方程和 $\kappa\epsilon$ 湍流模型。本文把这两个区域按一个流动区域来处理, 在这两个流动区域都采用城市多孔介质数学模型, 通过调整孔隙率的空间分布来区分多孔介质流动区域和纯流流动区域。

2.4 计算方法

对物理模型进行网格划分时, 城市区域为重点研究对象, 因此水平方向城市冠层内采用均匀网格, 网格间距为 50 m, 乡村则采用非均匀网格, 从城市迎风边缘至计算区域入口以及从多孔介质城市下风向边缘至计算区域出口, 网格间距逐渐增加, 比例系数取 1.05; 城市冠层高度内采用间距为 2 m 的均匀网格, 从城市冠层顶至计算顶面边界, 采用非均匀网格, 网格间距逐渐增加, 比例系数取 1.05, 并且所有网格通过了网格无关性检验。模型计算时采用控制容积法对方程进行离散, 速度和压力的耦合关系采用 SIMPLEC 算法, 前后两步迭代结果之间的相对残差小于 10^{-6} 。

3 模型检验

模型验证时最直接也是最有效的方法就是把数值计算结果与实验测量结果进行对比。然而, 由于在城市热岛多孔介质数值研究中, 表征体积元在水平方向上的尺寸可能达到几十米, 而测量仪器的传感器尺寸相对来说要小得多, 并且要想获得能代表表征体积元的参数值, 必须在表征体积元内不同空间位置布置大量的测点, 然后把这些观测值做体积平均来求取, 这些工作在实际操作中是很难实现的。为此, 有些学者提出利用微尺度 CFD 数值模拟结果来验证多孔介质数学模型。具体做法是: 首先对一个研究对象采用微尺度 CFD 方法做数值模拟, 并利用实验结果对其结果进行验证; 然后, 把验证合理的微尺度 CFD 结果在表征体积元内做体积平均, 得到与多孔介质计算结果具有可比性的空间体积平均值; 最后, 采用多孔介质模拟法对同一个研究对象做数值模拟, 将计算结果与微尺度 CFD 计算结果的体积平均值进行对比, 检验结果是否合理。胡汪洋^[11]曾采用微尺度 CFD 方法对西安市一个建筑排列比较规则的小区(水平方向长度约 1 km)进行了数值模拟, 并利用现场测量验证了计算结果的合理性。本文采用上述验证方法, 基于胡汪洋的微尺度 CFD 模拟结果对本文建立的城市多孔介质数学模型进行了验证。

检验结果表明: 在水平方向上, 两者的风速分布和温度分布趋势具有很好的一致性(如图 2), 平均相对误差分别为 9.9% 和 1.1%。通过上述对比分析可以看出, 采用多孔介质的方法对城市热环境进行数值研究是可行的, 本文所建立的城市多孔介质数学模型的数值结果在允许的误差范围内。

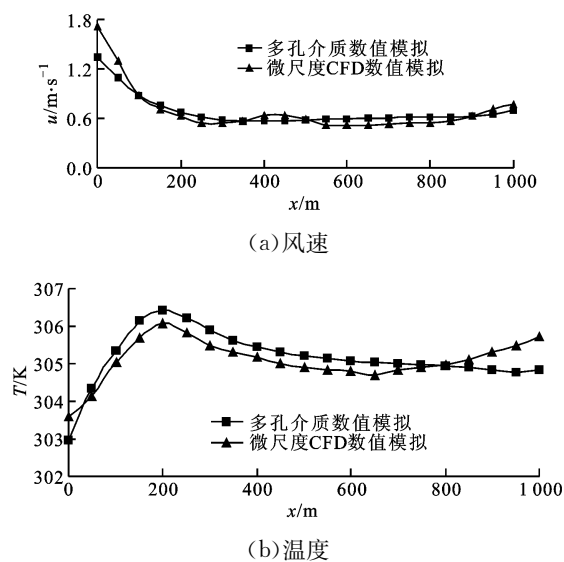


图 2 风速和温度的水平分布($z=2\text{ m}$)

4 结果与讨论

在真实城市中,建筑密度与孔隙率之和为 1,地面建筑密度的范围为 0.18~0.62,即地表面孔隙率范围为 0.38~0.82. 为了定量地研究建筑密度对城市区域及城市下风向乡村热岛强度的影响,本文做了 3 个数值实验,取地面孔隙率 ϕ_0 分别为 0.4、0.6 和 0.8. 基于各学者对大量城市的调查结果^[12],区域内热源为人为热和太阳辐射时,其值分别取为 80 W/m² 和 96 W/m²,入口风速取较小值 1.5 m/s. 此处的城市热岛强度应是城市空气温度和乡村温度之差,而文中将入口温度看做是没有受到城市影响的乡村温度,因此城市空间某处的城市热岛强度可由城市空气温度与同一水平方向上入口温度之差得到.

图 3 示出了在 3 种地面孔隙率条件下城市热岛强度在 3 个高度上的水平分布,在 2 m 高度上,城市前端 $x=200\sim600\text{ m}$ 的范围内出现了局部高热岛强度. 这是由于水平风速在此处为低风区,不利于热量的扩散,尔后一直到城市下风向边缘,城市热岛强度大小基本维持不变,并且热岛强度随着地面孔隙率的增大而减小. 表 1 示出了在 $x=3\text{ km}$ 处的城市热岛强度,地面孔隙率每减小 0.1,就会引起在 2 m 高度上城市热岛强度增加 0.36 K. 在 80 m 和 160 m 的高度上,城市的前端没有出现局部高热岛强度,相反该段的热岛强度还要比城市其他区域小,这主要是因为城市迎风边缘的上空形成有一急流区,较高的风速很快地把城市产生的人为热输送了出去. 在这两个高度上,热岛强度随 x 的增加有逐

渐加大的趋势,并且随着地面孔隙率的增大而减小. 城市下风向进入乡村后,3 个高度上的城市热岛强度均开始迅速减小,尔后减小速度趋于平缓,最终热岛强度逐渐趋近于 0.

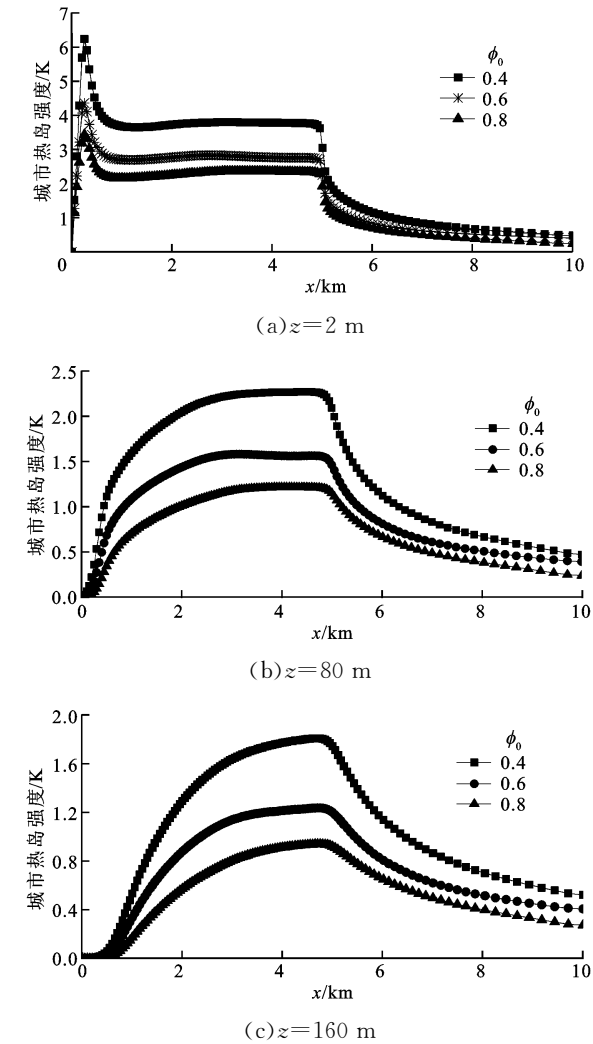


图 3 城市热岛强度在不同高度上的水平分布

表 1 $x=3\text{ km}$ 处不同地面孔隙率下的城市热岛强度

z/m	城市热岛强度/K		
	$\phi_0=0.4$	$\phi_0=0.6$	$\phi_0=0.8$
2	3.800	2.829	2.363
80	2.239	1.583	1.180
160	1.640	1.140	0.805

由图 4 可以看出,在整个城市冠层内,热岛强度随着地面孔隙率的增加而减小. 在城市下部,建筑密度最大,释放的建筑人为热最多,此外还有大量的交通工具排放的废热,从而导致城市底部的城市热岛强度相对于上方要高许多,并且随高度增加急剧减

小,几乎是呈线性的,对应 0.4、0.6 和 0.8 等地面孔隙率的城市热岛强度递减率分别为 15.6 K/km、11.1 K/km 和 8.7 K/km。整体来看,城市对上空气流的影响可以延伸至 400 m 高度(即 5 倍的城市冠层高度),400 m 高度以上气流几乎不受城市的影响。

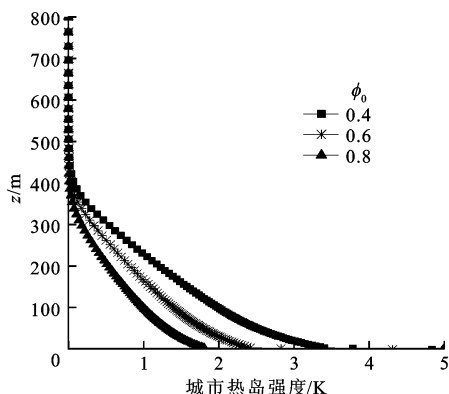


图4 城市热岛强度的垂直分布($x=2.5$ km)

5 结 论

本文提出把城市看作多孔介质,利用多孔介质数值模拟的方法,针对实际大小的城市物理模型,合理地考虑人为热在城市冠层内的空间分布,研究了建筑密度对城市区域及城市下风向乡村热岛强度的影响,主要结论如下。

(1)城市热岛强度随着地面孔隙率的增大而减弱,地面孔隙率每增加 0.1,就会引起城市热岛强度降低 0.36 K。

(2)在城市下游的乡村地区,随着离开城市距离的增加,热岛强度逐渐消失。

(3)城市冠层底部的热岛强度要显著高于上部,热岛强度随高度的增加几乎呈线性减小。

(4)城市对上空气流的影响可以延伸至 400 m 高度,400 m 高度以上城市热岛几乎不存在。

因此,在今后对城市建筑进行设计时,可以将建筑密度对城市热岛的影响参数化考虑进去,从而对缓解城市热岛效应起到一定的积极作用。

参考文献:

- [1] 胡嘉骢,朱启疆. 城市热岛研究进展[J]. 北京师范大学学报, 2010, 46(2):186-193.
HU Jiacong, ZHU Qijiang. Urban heat island: progress of the field [J]. Journal of Beijing Normal University, 2010, 46(2):186-193.

- [2] 杨英宝,苏伟忠,江南. 基于遥感的城市热岛效应研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(5):36-40.
YANG Yingbao, SU Weizhong, JIANG Nan. Application of remote sensing to study urban heat island effect [J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(5):36-40.
- [3] PEDRAS M H J, DE LEMOS M J S. Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(6): 1081-1093.
- [4] VAFAI K, TIEN C L. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(2):195-203.
- [5] AMIRI A, VAFAI K. Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(6):939-954.
- [6] BANU N, REES D. Onset of Darcy-Bénard convection using a thermal non-equilibrium model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(11):2221-2228.
- [7] FAN H L, SAILOR D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(1): 73-84.
- [8] ANTOHE B, LAGE J. A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(13):3013-3024.
- [9] 赵福云,汤广发,刘娣,等. 住宅小区风环境数值模拟[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 120-125.
ZHAO Fuyun, TANG Guangfa, LIU Di, et al. Numerical simulation of wind environment in an urban residential quarter [J]. Hv & Ac, 2005, 35(1):120-125.
- [10] HANG J, LI Y G. Wind conditions in idealized building clusters: macroscopic simulations using a porous turbulence model [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 136: 129-159.
- [11] 胡汪洋. 城市建筑小区内区域微热环境的数值模拟分析[D]. 西安:西安交通大学, 2004.
- [12] 周淑贞,束炯. 城市气候学 [M]. 北京:气象出版社, 1994.

(编辑 荆树蓉)