

通风管道内温湿度对颗粒沉积的影响

韩云龙, 胡永梅, 钱付平

(安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:于矩形断面 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 、长度 3 m 的通风管道中,对完全发展湍流中的颗粒沉积进行了模拟计算。由于空调通风管道内空气温、湿度有所变化,因此综合考虑了热泳力及湿度对颗粒沉积的影响,采用拉格朗日法随机轨道模型进行了 3 000 个颗粒沉积的模拟研究。在粒径范围 $0.01\sim 50\ \mu\text{m}$ 、管道风速 5 m/s 的条件下,得到了无因次沉积速率随无因次松弛时间变化曲线并与前人的研究结果进行了比较,结果表明曲线呈现“V”形分布,模拟结果与前人研究结果基本一致。针对粒径 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒,调查了温度及湿度对颗粒沉积的影响,结果表明由气流与管壁的温差产生的热泳力加速了颗粒沉积,并随温差的增加而呈提高趋势;随着空气相对湿度的提高,颗粒沉积速率也相应增加。

关键词:空气品质;沉积;热泳力;通风管道

中图分类号: TU834.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0066-05

Effects of Air Temperature and Humidity on Particle Deposition in a Ventilation Duct

HAN Yun-long, HU Yong-mei, QIAN Fu-ping

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, 243002, P. R. China.)

Abstract: Particle deposition in a fully developed turbulent flow of ventilation duct with a rectangular cross section of $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ and 3 m in length was investigated. The effects of thermophoretic force and air humidity were also considered. Trajectories of 3 000 particles were tracked on the basis of the random walk model from Lagrangian approach. The profile of dimensionless deposition velocity with relaxation time was achieved and the comparison with the previous studies was made with particle size range of $0.01\sim 50\ \mu\text{m}$ and air flow velocity of 5 m/s . It is found that the trend of dimensionless deposition velocity is in agreement with the previous studies and the profile of dimensionless deposition velocity showed a V-shaped curve. The effects of temperature and air humidity were also investigated with particle size of $1\ \mu\text{m}$. Thermophoretic force caused by temperature gradient between air flow and wall surface accelerated particle deposition. Meanwhile, it is also found that the deposition velocity increases with the increase of air relative humidity.

Key words: air quality; deposition; thermophoretic force; ventilation duct

室内空气品质问题,如 CO_2 浓度高或新风不足、挥发性有机气体的排放、细(病)菌等更易获得大家的关注,尤其对于那些大部分时间在封闭的室内工作和生活的人来说,更是如此,可是大家往往忽略

了空气中可吸入颗粒物浓度的影响。对于中央空调系统而言,如果通风系统只是装备了低效或中效过滤器,那么室内可吸入颗粒物浓度将会受到影响。室外空气中的灰尘会通过过滤器进入送风系统,其

收稿日期:2010-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50708001)

作者简介:韩云龙(1974-),男,副教授,博士,主要从事空气净化及污染物处理研究,(E-mail)hanlongy@163.com。

中一部分会沉积在管道内,而送风管道内的温湿度非常适合病菌、微生物的生存繁殖,在空调系统启动过程中或管道振动则可能会促使气流将这些附有病菌的积尘重新扬起并送至室内。若人们长期暴露于此环境下,呼吸道疾病或病态建筑综合症将不可避免。因此,诸多研究者^[1-5]对管道内颗粒沉积进行了相关的研究工作,他们的研究表明风速、颗粒粒径、管壁表面粗糙度等对颗粒物沉积具有重要的影响,一般而言,随风速、粒径的增加,颗粒沉积速率提高。对于水平的通风管道,气流中的颗粒物在重力沉积作用下部分沉积于管道底部,同时惯性和湍流扩散也会加速颗粒向管道周壁的沉积。

对于空调房间,为了维持室内一定的温、湿度环境,要进行一个热湿交换过程,经过热湿处理后的空气经由通风管道送往空调房间。因此,若管道保温措施不当,则气流与管壁间的温差产生的热泳力会加速颗粒的沉积,一些研究者^[6-8]认为即使气流与管壁之间存在一个小的温差也会加速颗粒沉积速率。然而,前人^[9-12]的研究多基于小断面通风管道内的颗粒物沉积,同时空气湿度变化对通风管道内颗粒物沉积的影响还未有报道。该文采用雷诺应力模型(RSM)模拟管道内湍流,在接近实际空调通风管道尺寸断面的管道内应用拉格朗日随机轨道模型对完全发展湍流中颗粒物沉积进行模拟研究,对于管道内气流与管壁温差所产生的热泳力对颗粒物沉积的影响进行探讨,同时研究空气相对湿度对颗粒物沉积的影响。

1 模型

1.1 流体与颗粒运动方程

通风管道内空气与颗粒之间的运动属于典型的气固两相流动问题,目前,对此问题的解决方法主要就是欧拉法与拉格朗日法。拉格朗日法可追踪单个颗粒的运动轨迹,但是需要花费较多的计算时间。一般而言,空调通风管道内的灰尘浓度较低,由于过滤器的装备,粒径也较小,因此,空气与灰尘可分别处理为连续相与分散相。通常来说,由于灰尘粒径较小及浓度较低,连续相对分散相有重要的影响,而灰尘颗粒对连续相的影响可以被忽略,所以采用拉格朗日法的单相耦合计算方法。

空调通风管道内湍流流动的模拟计算应用商业软件 FLUENT 6.1,一些研究者^[13-15]采用雷诺平均的 Navier-Stokes (RANS)方程,即 $k-\epsilon$ 双方程模拟不可压缩湍流流动。Tian 和 Ahmadi^[16]于湍流管道内纳米和微米级的颗粒物沉积进行了模拟研究,

认为 RSM 湍流模型及“two-layer”边界条件的使用,能合理的预测颗粒物的沉积。模拟结果表明 $0.01\sim 50\ \mu\text{m}$ 范围的无因次颗粒沉积速率呈现“V”形分布,因此,采用 RSM 模型和“two-layer”模型的边界处理条件。

1.2 沉积速率及热泳力

为了与前人的研究结果进行比较,采用了无因次颗粒沉积速率,通常表示为:

$$V^+ = \frac{J}{C_m u^*} \quad (1)$$

其中 C_m 为时均颗粒浓度; u^* 为磨擦速度,可写为下式:

$$u^* = U_m \sqrt{f/2} \quad (2)$$

其中 U_m 为平均风速; f 为范宁系数,采用 White^[17]得出的关联式计算 f 。

$$1/\sqrt{f} = -3.61\lg[6.9/Re + (k/3.7D)^{1.1}] \quad (3)$$

其中 k 为壁面粗糙度,光滑壁面为 0; Re 为雷诺数; D 为水力直径。

无因次松弛时间 τ^+ , 如下示:

$$\tau^+ = \frac{C_c \rho_p d_p^2 u^{*2}}{18\mu\nu} \quad (4)$$

其中 μ 和 ν 分别为流体的动力粘度与运动粘度; ρ_p 和 d_p 分别为颗粒密度和直径; C_c 为坎宁汉系数,如下示:

$$C_c = 1 + K_n [1.257 + 0.4\exp(-\frac{1.1}{K_n})] \quad (5)$$

其中 K_n 为克努森数:

$$K_n = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (6)$$

其中 λ 为气体分子自由程,在 1 大气压, 25°C 时为 $0.065\ \mu\text{m}$ 。

如果气流与管壁之间存在温差,颗粒物会沿着温度降低的方向运动,即为热泳现象。颗粒所受热泳力可表示为如下:

$$F_{xi} = -D_T \frac{1}{m_p T} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

其中 F_{xi} 为热泳力; D_T 为热泳系数,其确定采用 Talbot 等^[18]提出的关联式; m_p 为颗粒质量; T 为流体温度。

2 计算域

于矩形断面 $0.3\ \text{m} \times 0.2\ \text{m}$, 长度为 $3\ \text{m}$ 接近实际空调通风管道尺寸的管道内模拟完全发展湍流颗粒沉积。采用网格生成工具 Gambit 生成六面体结构网格;对于管道内颗粒沉积而言,边壁处高精度网格的生成十分重要,因此采用 Tian 和 Ahmadi^[16]的

边界层划分方法,即第一个网格距离边壁处 0.05 mm,其后以 1.2 的倍率增加直至 1~1.2 个单位长度为止,近壁处网格较为密集,见图 1,整个计算域共划分 150 000 个网格单元。

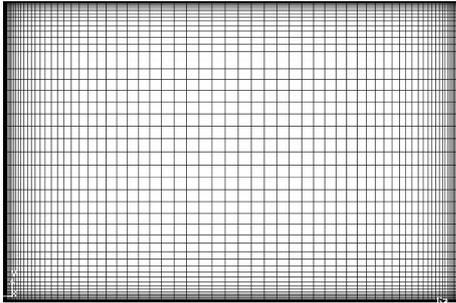


图 1 矩形断面网格划分

应用拉格朗日随机轨道模型追踪离散相颗粒的运动轨迹,颗粒密度为 900 kg/m^3 ,个数为 3 000 个。为了和以前研究者的实验或计算结果进行比较,对于粒径范围 $0.01 \sim 50 \mu\text{m}$ 的球形颗粒沉积进行了模拟计算,入口风速为 5 m/s ,温度 15°C ,管道出口边界条件为“outflow”,管壁热绝缘并认为水力光滑,为“trap”;忽略颗粒间的合并、碰撞及与壁面的反弹。

3 结果与讨论

3.1 流场分析

为了和前人的研究结果进行比较,对小断面尺寸($0.075 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$)的通风管道内低雷诺数流动及颗粒沉积也进行了模拟计算,流场见图 2。2 种断面尺寸的管道进口风速均为 5 m/s ,由于断面尺寸的减小,相应的雷诺数也减小,分别为 82 135、5 136。由图 2 可以看出,虽然进风风速相同,但断面尺寸的减小导致雷诺数大幅降低。可以看出大断面管道内流速梯度较小,断面流速较为均匀;而小断面管道流速梯度较大,断面越小,管道流动核心区流速越大,而近壁区域流速明显低于大断面管道处的流速。而前人如 Tian 等^[16]主要基于小断面管道内颗粒沉积的研究,由此可知这 and 实际通风管道内流体流动情况稍有差距。

3.2 模型验证

图 3 为无因次沉积速率随无因次松弛时间的变化曲线,尘粒粒径范围为 $0.01 \sim 50 \mu\text{m}$,并将模拟结果与前人数据进行了比较。由于粒径不同,所受扩散力、惯性力大小也不同,致使颗粒沉积运动呈现 3 个区:即扩散区、过渡区和惯性区。对于次微米及纳米级颗粒而言,颗粒所受重力很小,惯性力可以忽

略,而扩散力则是颗粒沉积的主要机理。对于大粒径颗粒,重力及惯性力是颗粒沉积的主要作用力。由图 3 可以看出,模拟结果基本符合前人的实验数据及计算结果,无因次沉积速率随无因次松弛时间呈现“V”形变化,满足颗粒沉积的扩散区、过渡区及惯性区分布规律。但是计算域为矩形断面($0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$)的三维计算,更接近于实际空调管道的断面尺寸,雷诺数(82 135)也要远高于前人的实验或计算中采用的雷诺数^[16,19](Tian 等^[16]采用的雷诺数为 6 667)。但雷诺数的提高不是由风速的提高而引起,而仅由断面尺寸的增加导致的。一般而言,随风速的提高,颗粒的沉积速率会相应提高,但由断面尺寸增加而导致雷诺数提高对颗粒沉积的影响并不显著。

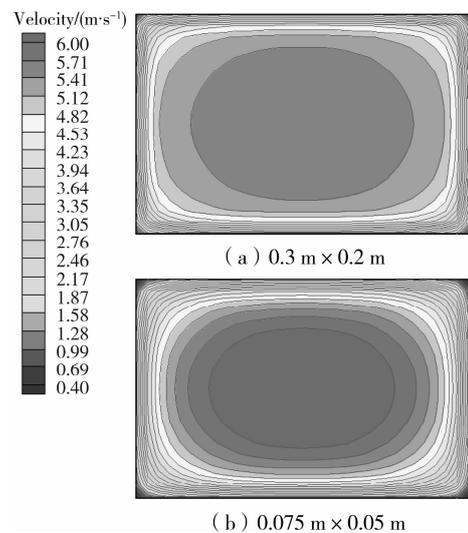


图 2 不同通风管道断面流场

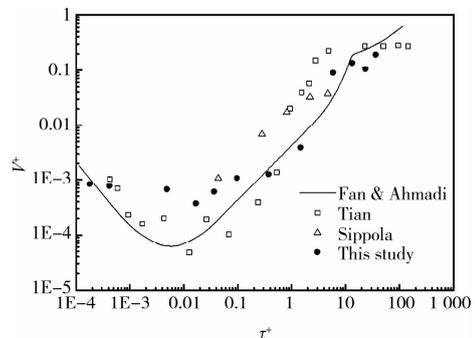


图 3 模型计算结果的比较验证

3.3 温度对颗粒沉积的影响

对于实际空调系统通风管道而言,送风温度、湿度因季节的变化而不同,因主气流温度与管壁的温差而导致的热泳力将会促进次微米级小微粒的沉积。有关热泳力对颗粒沉积的影响,一些研究者曾加以研究,如 Yang 等^[11]认为 PM2.5 的沉积效率主

要受主气流与冷壁面的温差影响,热泳力是导致PM_{2.5}沉积的关键因素。He和Ahmadi^[20]认为只有颗粒进入边界层的粘性底层时,布朗扩散才是颗粒沉积的控制机理,热泳力对小颗粒(如几个微米级或以下)的传输、沉积有重要影响。并且沉积速率及粒径范围皆随着主气流与壁面温差的提高而增加。其它研究者^[21-22]也都认为温差导致的热泳力能促进颗粒的沉积。该研究针对1 μm的颗粒探讨主气流与管壁之间温差对颗粒沉积的影响。图4为入口空气温度24℃时不同壁面温度所形成主气流与冷壁面的温差对颗粒沉积的影响,温度梯度均为沿着壁面的法线方向,温度向管壁处降低。由图4可以看出,当固定入口温度时,随着管壁温度的提高,颗粒沉积速率有下降的趋势,无论底面、侧壁还是顶壁面都是如此趋势,表明了主气流与壁面温差所产生的热泳力促进了颗粒的沉积。同时可以看出,侧壁颗粒沉积速率同顶、底面相比,其沉积速率略小,底面的沉积速率最大。然而对于实际空调系统通风管道而言,都会有保温措施,管道壁面可视为热绝缘,主气流与管壁之间的温差很小,那么热泳力对颗粒沉积所起的作用可以被忽略。

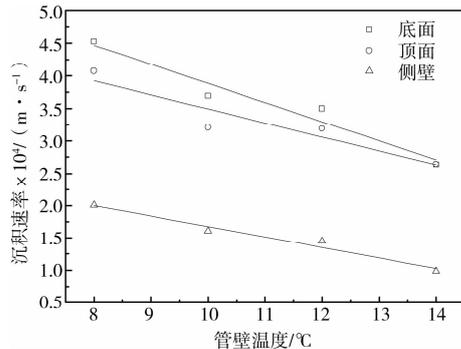


图4 热泳力对颗粒沉积的影响

然而当入口空气温度提高,而管壁保持绝缘时,发现不同之现象,如图5示。可以发现随着入口温度的提高,底面、侧壁的颗粒沉积速率均略呈下降趋势,而顶面的颗粒沉积速率则呈现升高趋势。虽然设立了管壁绝缘的边界条件,但管道顶部的气流温度略高于管道底部,会产生一个升力。因此,温差产生的升力作用使较多的颗粒分散于管道空间的上部,所以,管道顶部的颗粒沉积速率有升高趋势,底部及侧壁的颗粒沉积速率则略呈下降趋势。另外,随着温度的升高,空气的粘度增加而导致管道内气体流动的雷诺数有所减小,湍动能有所降低致使颗粒的湍流扩散作用减弱也有关。

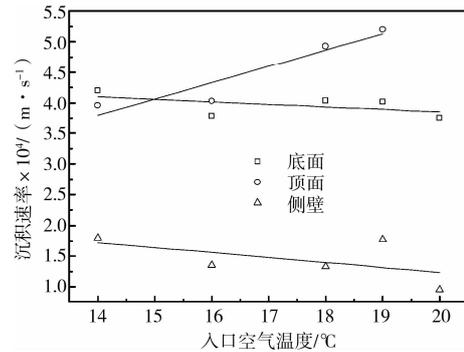


图5 管道气流温度对颗粒沉积的影响

3.4 湿度对颗粒沉积的影响

空调系统为了满足室内一定的湿度要求,在新风处理单元一般需要加湿过程,经过加湿处理后的空气,其中的颗粒沉积是否有影响尚需研究。在该研究中,于入口空气16℃时,对通风管道内空气相对湿度40%~80%的环境条件颗粒沉积进行了模拟研究,见图6。空气相对湿度的提高会改变空气的粘度、密度、热导率等物性,将空气相对湿度改变所引起的物性变化计算出来,在模拟计算过程中,认为每个物性都对应着一个相对湿度。由图6可以看出,随着气流相对湿度的提高,颗粒沉积速率均相应增加。这是由于空气相对湿度的提高,湿空气的粘度也会相应提高,增加了湍流边界层的厚度,使得更多的颗粒进入这个低速的粘性边界层,因此提高了颗粒沉积速率。该研究只是对于绝缘管壁的情况进行的计算,在实际运行中,倘若管壁保温措施不当,则较高湿度空气中的水会凝结于管壁,这就会相应提高管壁的粗糙度,按照Lai等^[3]的研究结果可知,粗糙度的提高会促进颗粒的沉积,所以沉积速率会有相应的提高,而潮湿的管道内环境,适宜的温度则为真菌、细菌等提供了繁殖的温床,对室内空气品质会有严重的影响。

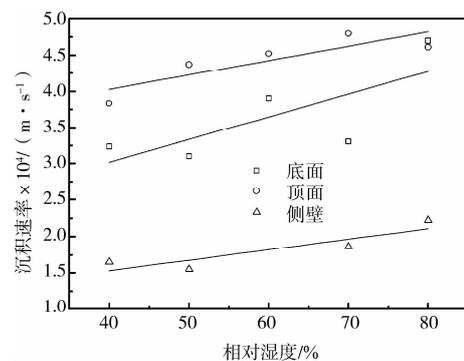


图6 管道内气流湿度对颗粒沉积的影响

4 结论

应用拉格朗日随机轨道模型模拟分析了通风管

室内温湿度变化对颗粒物沉积的影响,得出了如下主要结论:

1)集中式空调系统通风管道内高温送、回风气流与低温管壁形成较大温差时,热泳力会加速小颗粒(亚微米、纳米级颗粒)的沉积速率,对于实际工程应用,若管道具有良好的保温措施,热泳力对颗粒沉积的作用则可以被忽略。

2)通风管道内送、回风湿度的提高会加速颗粒物的沉积速率,对于缺乏良好保温措施的通风管道,若湿度较大,管壁上凝结水的出现会增加粗糙度,更会加速颗粒物的沉积。

3)集中式空调系统通风管道内颗粒物的沉积及其卫生状况对室内空气品质的影响已逐渐引起重视,若通风管道维护不当,送回风温湿度的变化会影响颗粒物的沉积,并恶化室内空气品质。通过文章的分析研究,有助于空调运行管理人员提高通风管道内颗粒物沉积的认识,促进其对空调系统通风管道的维护、清洁工作,同时可为评价室内人员对颗粒物的接触、暴露情况提供参考。

参考文献:

- [1] CHEONG K W. Deposition of aerosol particles in ductwork[J]. *Applied Energy*, 1997, 57(4):253-261.
- [2] WU J, ZHAO B. Effect of ventilation duct as a particle filter[J]. *Building and Environment*, 2007, 42:2523-2529.
- [3] LAI A C K, BYRNE M A, GODDARD A J H. Enhanced particle loss in ventilation duct with ribbed surface[J]. *Building and Environment*, 2000, 35: 425-432.
- [4] ZHAO B, WU J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 457-466.
- [5] ZHANG H, AHMADI G. Aerosol particle transport and deposition in vertical and horizontal turbulent duct flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 406: 55-80.
- [6] BAE G N, LEE C S, PARK S O. Measurements and control of particle deposition velocity on a horizontal wafer with thermophoretic effect[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, 23: 321-330.
- [7] WIRZBERGER H, LEKHLANAKHER S, SHAPIRO M, et al. Prevention of particle deposition by means of heating the deposition surface[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(S1): S83-S84.
- [8] TSAI R, LIANG L J. Correlation for thermophoretic deposition of aerosol particles onto cold plates [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32: 473-487.
- [9] CHANG Y C, RANADE M B, GENTRY J W. Thermophoretic deposition in flow along an annular cross-section: experiment and simulation[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(3): 407-428.
- [10] LUO X W, YU S Y. Deposition of particles in turbulent pipe flow[J]. *China Particuology* 2006, 4 (1):31-34.
- [11] YANG R C, LIU R L, ZHOU T, et al. Kinematic characteristics and thermophoretic deposition of inhalable particles in turbulent duct flow[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(2):192-197.
- [12] DEHBI A. A stochastic Langevin model of turbulent particle dispersion in the presence of thermophoresis [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35:219-226.
- [13] ZHANG Z, CHEN Q. Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3396-3408.
- [14] ZHANG J P, LI A G. Study on particle deposition in vertical square ventilation duct flows by different models [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 1008-1018.
- [15] LAI A C K, CHEN F Z. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynolds-averaged Navier - Stokes model[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37: 1770-1780.
- [16] TIAN L, AHMADI G. Particle deposition in turbulent duct flows-comparisons of different model predictions [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38: 377-397.
- [17] WHITE F M. *Fluid Mechanics* [M]. 2th ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [18] TALBOT L, CHENG R K, SCHEFER R W, et al. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, 101:737-758.
- [19] FAN F, AHMADI G. A sublayer model for turbulent deposition of particles in vertical ducts with smooth and rough surfaces[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1993, 24: 45-64.
- [20] HE C H, AHMADI G. Particle deposition with thermophoresis in laminar and turbulent duct flows[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 29(6): 525-546.
- [21] ROMAY F J, TAKAGAKI S S, PUI D Y H, et al. Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29(8): 943-959.
- [22] LINA J S, TSAIA C J, CHANG C P. Suppression of particle deposition in tube flow by thermophoresis[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35: 1235-1250.

(编辑 胡英奎)