

文章编号:1673-0062(2011)01-0097-06

## 流态对粒子在矩形风管内沉降影响的模拟分析

张 杰,刘泽华,李惠敏,刘源全,宁勇飞

(南华大学 城市建设学院,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**采用雷诺应力模型(RSM)和随机轨道粒子模型模拟了粒径在 10~200  $\mu\text{m}$  范围内的 9 组粒径的粒子在入口平均风速分别为 2、4、6、8 m/s 时,在截面尺寸为 160 mm $\times$ 120 mm 的光滑水平风管内各表面的沉积,重点分析了流态对粒子在矩形空调风管内沉降的影响.结果表明,流态对粒子在通风管道内沉积的影响较小.

**关键词:**粒子;沉积;流态;通风管道;CFD

**中图分类号:**TU834.8      **文献标识码:**A

## Numerical Simulation of the Influence of Flow Pattern on Particle Deposition in Rectangle Ducts

ZHANG Jie, LIU Ze-hua, LI Hui-min, LIU Yuan-quan, NING Yong-fei

(School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** This paper discusses particle deposition in rectangle duct using RSM (Reynold Stress Model) and random trajectory particle model, and particle deposition in each internal surface of smooth horizontal duct are simulated with nine groups of particle which nominal diameters are 10~200  $\mu\text{m}$  at each of four nominal air speed: 2, 4, 6, and 8 m/s in the cross-section size of 160 mm  $\times$  120 mm, and then emphatically analyzes the influence of flow pattern on particle deposition in rectangle duct. The results show that the flow pattern have little influence on particles deposition.

**key words:** particle; deposition; flow pattern; ventilating duct; CFD

### 0 引 言

随着人们对热舒适要求的提高及建筑节能的需要,使室内通风换气主要借助于通风空调系统.而空调系统的卫生状况与室内空气品质又密切相

关.当空调系统设计安装不当或运行维护不良时,易出现粉尘、细菌、真菌等多种物质形成的气溶胶.这些气溶胶在空调系统内发生沉积时,通风管道内适宜的温湿度为微生物的滋生提供了良好的环境,通过送风气流的作用向室内传播或释放有

收稿日期:2010-12-14

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(08JJ3094);南华大学归国留学启动基金资助项目(5-xQD-2007-5)

作者简介:张 杰(1982-),男,湖南邵阳人,南华大学城市建设学院讲师,硕士.主要研究方向:室内空气品质.

害物,影响室内空气品质<sup>[1]</sup>;另一方面,气溶胶在空调系统中沉积还可能影响系统运行的稳定性,如:减少送风量、增加系统阻力等,从而导致系统能耗增加<sup>[2]</sup>。

粒子从湍流管道中沉积的实验文献多是针对小管或水力直径远小于典型暖通空调系统的管道,而使用的粒径也均为小于 16  $\mu\text{m}$  的粒子. Sippola 和 Nazaroff<sup>[2]</sup> 的综述里详细地介绍了各位学者的实验方法,随后 Sippola 和 Nazaroff<sup>[3-4]</sup> 得出了在管道的充分发展段、发展段、弯管、连接管内的沉积,朱青松、李念平<sup>[5]</sup> 等用滑石粉实验研究了粒子在通风管道内的沉降。

关于预测模型目前已有了各种经验公式、欧拉模型、亚层模型、拉格朗日模型等. 最早在该领域使用拉格朗日模型的是 Hutchinson<sup>[6]</sup>, 和 Reeks 和 Skyrme<sup>[7]</sup>; 第一次用直接数值模拟产生的流场来做粒子沉降实验的是 McLaughlin<sup>[8]</sup>; Zhang 和 Ahmadi<sup>[9]</sup> 在由 DNS 产生的管流中分析了粒子在垂直面和底面的沉积; 付峥嵘、李念平<sup>[10]</sup>; 吴俊、赵彬<sup>[11]</sup> 等对粒子在管道内的沉积规律做了一定的理论研究。

本文采用的粒子随机轨道模型是拉格朗日模型中的一种,它是目前在工程中应用最为广泛的湍流气固两相模型,该模型认为空气是连续介质,空气中单个粒子的轨迹由加在粒子上的力来决定,以此来计算粒子轨迹从而获得粒子的沉积信息. 用拉格朗日法研究粒子在湍流中沉积一般分两步:第一,数学描述流场;第二,把粒子释放到流场中,基于粒子运动方程跟踪粒子轨迹。

## 1 矩形风管中粒子迁移沉降的数学模型

本文研究 10、20、50、80、100、120、150、180、200  $\mu\text{m}$  9 组粒径的粒子在 2、4、6、8 m/s 的入口平均风速下,在截面尺寸为 160 mm  $\times$  120 mm 的光滑水平风管中顶、侧、底面的沉积,来了解 10 ~ 200  $\mu\text{m}$  的粒子在通风管道入口段及紊流段的沉积规律. 在有适当边界条件的任意形状的流动区域内利用有限体积法求解 N-S 方程和连续性方程. 通过给定粒子的初始速度和位置,求解特定粒子的运动方程计算粒子的轨迹,利用大量粒子的轨迹来研究通风管道中粒子的沉积速度。

### 1.1 无量纲沉积速度与无量纲松弛时间

粒子沉积到管道表面的无量纲沉积速度  $V_d^+$

被定义为:

$$V_d^+ = \frac{J}{C_{\text{ave}} u^*} \quad (1)$$

其中,  $J$  是粒子沉积到管道表面的时间平均粒子通量,  $C_{\text{ave}}$  是管道中时间平均粒子浓度,  $u^*$  为摩擦速度,是湍流强弱的量度,摩擦速度的定义见文献[2]. 除此之外沉积速度还与粒径,沉积面方位和沉积面的粗糙度有关。

在研究粒子从湍流中沉积时,经常要研究粒子的无量纲沉积速度和无量纲松弛时间之间的关系,对在 Stokes 流中球形粒子的无量纲松弛时间被定义成:

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

其中:  $\mu$  是空气的动力粘性,  $v$  是空气的运动粘性,  $\rho_p$  是粒子密度,  $d_p$  是粒子的直径,  $C_c$  是坎宁安滑移修正系数。

## 1.2 气流场模型

### 1.2.1 气流场方程

在管道中的空气被认为是连续介质,其瞬时流场由直接数值模拟(DNS) Navier-Stokes 方程得出. 空气在管道中的流态一般为湍流,模拟管道中的湍流一般用雷诺应力模型 Reynolds stress model (RSM), RSM 模型对于复杂的流动有较高精度的预测能力,对空气在矩形管道中的流动模拟结果和测量数据有较好的一致性<sup>[12]</sup>. 本文模拟利用有限体积法进行速度分量和雷诺应力湍动分量的收敛值均小于  $10^{-6}$ , 离散方法是二阶迎风法和 SIMPLE 运算法则。

### 1.2.2 边界条件

入口边界被定义为具有统一的流速;出口被定义为 Neumann boundary 条件,即流出边界的质量与流入边界的质量一致;壁面上采用无滑移边界条件。

## 1.3 颗粒轨道模型

### 1.3.1 运动方程

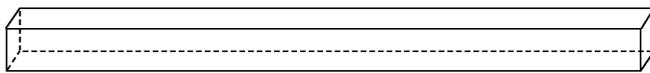
粒子在管道中的运动由粒子运动方程决定. 其中需要用到的假设如下:

- 1) 忽略粒子间的热质传递;
- 2) 当粒子接触到固体壁面时,都被壁面捕集,无粒子反弹;
- 3) 在粒子的迁移沉降过程中无粒子的凝聚;
- 4) 所有粒子的形状均为球形。

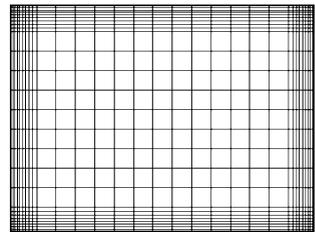
由牛顿第二定律可以得出单个粒子的运动方程:

$$m \frac{du_p}{dt} = \frac{\pi d_p^2 \rho_a |u_a - u_p| (u_a - u_p) C_d}{8 C_c} + \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g + F_{qt} \quad (3)$$

其中: $u_p$  是粒子的速度, $u_a$  局部空气速度, $C_d$  是阻力系数. 右边第一项是粒子在流体中运动受到的曳力. 右边第二项是粒子受到的地心引力, $F_{qt}$  是指粒子在流场中受到的其他作用力包括布朗力、剪切引起的升力(saffman force)、热泳、电场力、湍流泳力、压力梯度力、虚质量力、Basset force 等. 考虑到管道内粒子尺寸和密度,经过量级分析,只有剪切产生的升力不可忽略. 升力的计算详见文献[2].



(a) 管道的物理模型



(b) 横截面网格图

图 1 横截面尺寸为 160 mm × 120 mm 的管道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the duct cross-section size 160 mm × 120 mm

### 3 结果分析

#### 3.1 管道内的流场

当管道内的流速为 2、4、6、8 m/s 时,其紊流

#### 1.3.2 边界条件和初始条件

在本文中,粒子为水珠颗粒, $\rho_p = 998 \text{ kg/m}^3$ ,粒子源设为面源,粒子在管道入口处与流体具有相同的初始速度被释放到管道中. 壁面为“trap”类型边界条件,即粒子运动到壁面,与壁面接触时即被捕集,无重新悬浮;出口边界为“escape”边界,即粒子运动到出口边界时即逃离计算区域.

### 2 模型的物理结构及网格划分

管道的有效长度为 3 m. 图 1 所示为管道的物理模型和计算网格,网格采用近壁紧密的非均匀网格,原因在于近壁处的速度梯度是最高的.

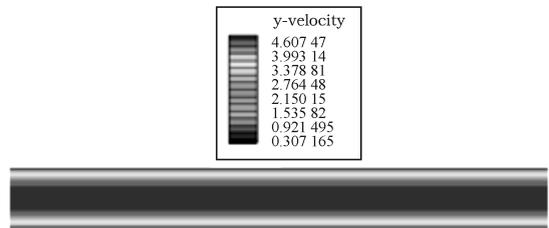
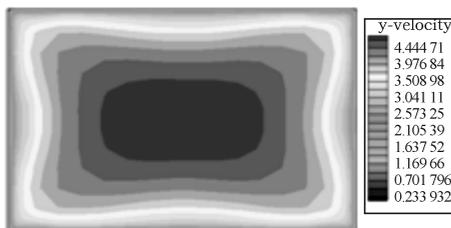


图 2 紊流段(充分发展段)流体的速度云图(速度 4 m/s)

Fig. 2 Velocity nephogram of turbulent flow(when the velocity is 4 m/s)

在管道进口断面,速度接近均匀分布,进入管道后,因流体具有粘性,受到壁面的阻滞,产生边界层. 随着沿程边界层厚度的发展,沿程各断面的速度分布不断变化,直到边界层厚度发展到管道中心,管中的流动全部为边界层流动,断面的速度

段和入口段的速度云图相似,图 2、图 3 所示为空气入口平均流速为 4 m/s 时,管道紊流段和入口段的速度云图(图中的横截面取长度为 1.5 m 处的截面).

分布不再变化. 自进口到断面的速度分布不再变化的这一管段为发展段,其后为紊流段,发展段与紊流段其流态明显不同,一个流动尚未充分发展,一个流动充分发展,粒子在不同的流态下的沉积行为可能不同.

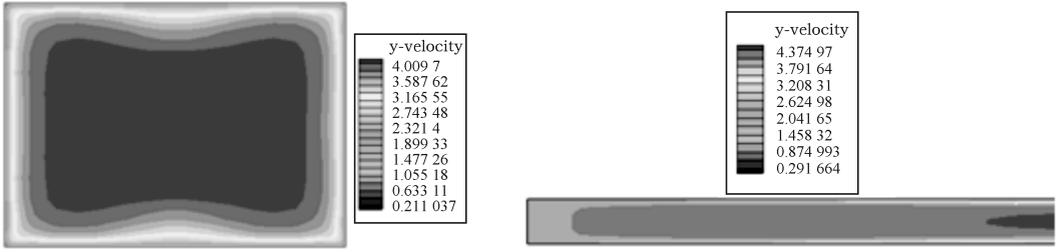


图3 入口段(发展段)流体的速度云图(速度4 m/s)

Fig.3 Velocity nephogram of entrance region (when the velocity is 4 m/s)

3.2 粒径、流速、沉积面的方位对粒子沉积的影响

图4为粒子在紊流段内的沉积情况,图5为粒子在入口段内的沉积情况.可以得出:1)由于重力的影响,对于10~200 μm的粒子,沉积到管道底面的无量纲沉积速度最高,其次是侧壁面,最后是管顶面;2)粒径对粒子在管道底面的沉积速度影响较大,随着无量纲松弛时间的增大,无量纲沉积速度迅速的增大,粒径对侧面、顶面的沉积速度影响较小,对于粒子在侧面的沉积,当粒径大于50~80 μm时,粒子沉积到侧面的沉积速度略微

减小,原因在于这些大粒子受近壁面区涡旋的影响较小,相反由湍动中心的大涡控制,大粒子不能快速对近壁旋涡的波动作出反应;3)管道入口流速对粒子在底面、侧面、顶面的沉积速度均有影响,在相同的无量纲松弛时间下,对于底面和侧壁面随着流速的增大,无量纲沉积速度减小.对于粒子在紊流段侧面沉积的无量纲沉积速度随无量纲松弛时间的变化关系遵循类似的规律,但只有在较大的空气流速下无量纲沉积速度随无量纲松弛时间变化图才与文献[13]的数据一致.

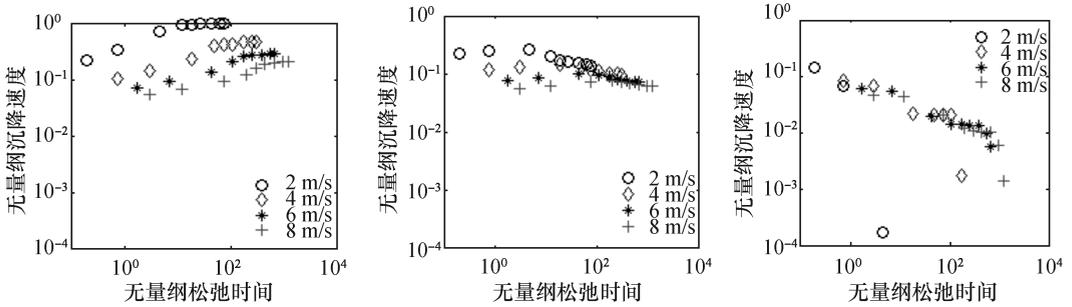


图4 粒子在紊流段的沉积

Fig.4 Particle deposition in turbulent flow

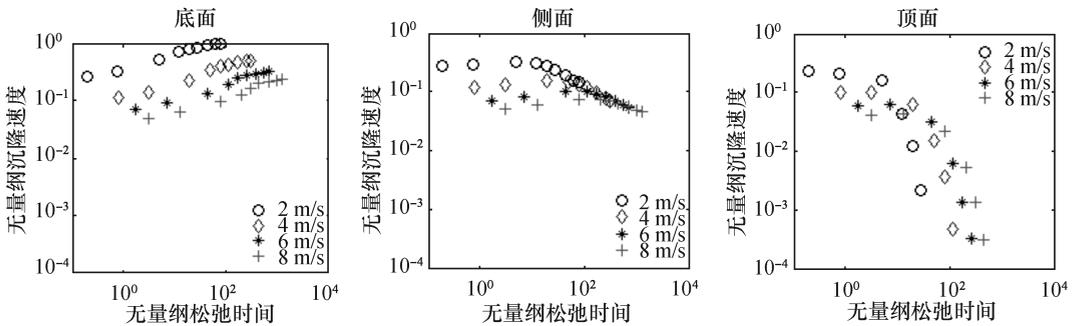


图5 粒子在入口段的沉积

Fig.5 Particle deposition in entrance region

3.3 粒子在紊流段和入口段内沉积的比较

从图6~图9可以看出,

1)粒子在管道底面的沉积速度相差不大,沉积曲线基本重合.这表明流态是否充分发展对粒

子在管道底面的沉积影响不大,这由于本文的模拟采用的是  $10 \sim 200 \mu\text{m}$  相对较大的粒子,重力起决定性的作用。

2) 粒子在管道侧面的沉积速度,在  $2 \text{ m/s}$  的情况下有一定的差距,但随空气流速的增大无量纲沉积速度随无量纲松弛时间变化呈重合的态势. 在有噪声控制的空调管道中,主管风速一般为  $4 \sim 6 \text{ m/s}$ ,末端一般为  $2 \sim 3 \text{ m/s}$ ,在这一区域,流态是否充分发展对粒子在侧面的沉积有一定的影响. 从  $2 \text{ m/s}$  的沉积图像上看,粒子在紊流段侧面

的沉积速度比入口段要小,但随着流速的增大,粒子在紊流段的沉积速度逐渐超过粒子在入口段的沉积。

3) 粒子在发展段顶面的沉积速度都能减到零,沉积曲线呈规则的抛物线型,粒子在紊流段顶面的沉积速度在小速度下能减到零,而在大流速下未能减到零,而是维持在  $10^{-3}$  这个数量级上. 在小流速时,粒子在紊流段顶面的沉积速度比入口段要小,随着流速的增大,粒子在紊流段的沉积超过入口段。

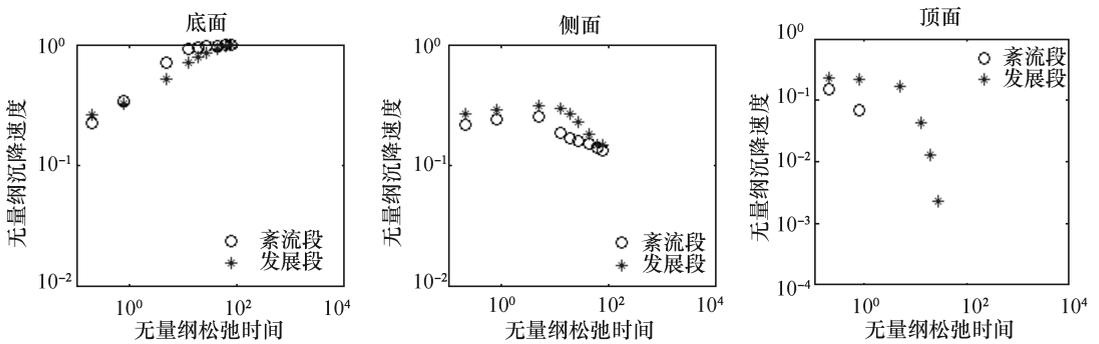


图 6 速度为  $2 \text{ m/s}$  时,粒子在紊流段和入口段沉积的比较

Fig. 6 Particle deposition compared in turbulent flow and entrance region, when the velocity is  $2 \text{ m/s}$

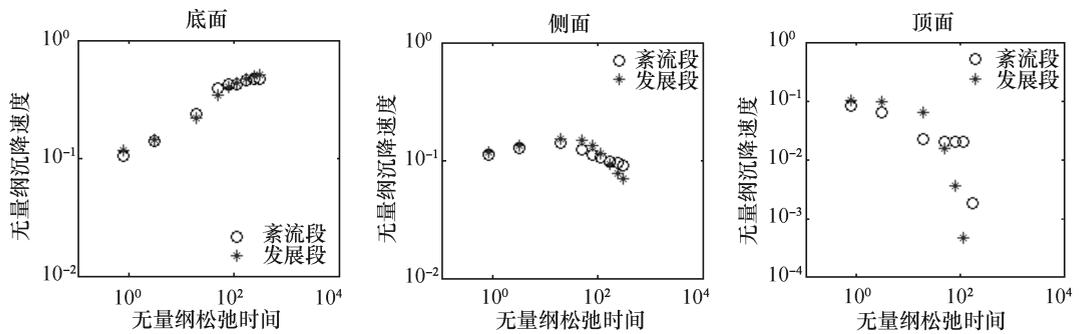


图 7 速度为  $4 \text{ m/s}$  时,粒子在紊流段和入口段沉积的比较

Fig. 7 Particle deposition compared in turbulent flow and entrance region, when the velocity is  $4 \text{ m/s}$

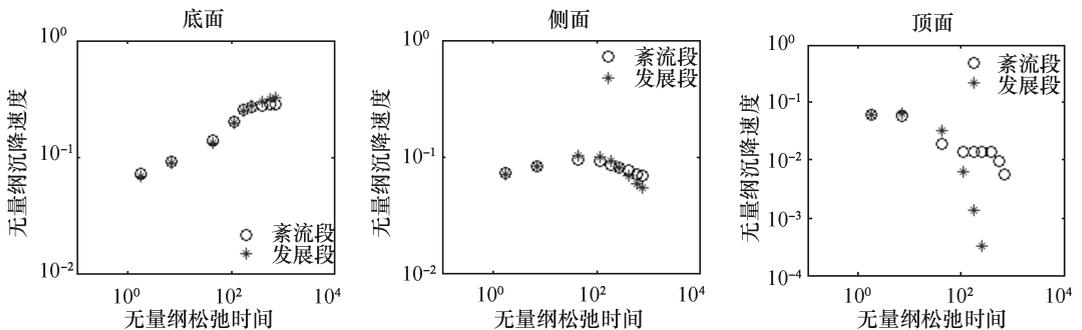


图 8 速度为  $6 \text{ m/s}$  时,粒子在紊流段和入口段沉积的比较

Fig. 8 Particle deposition compared in turbulent flow and entrance region, when the velocity is  $6 \text{ m/s}$

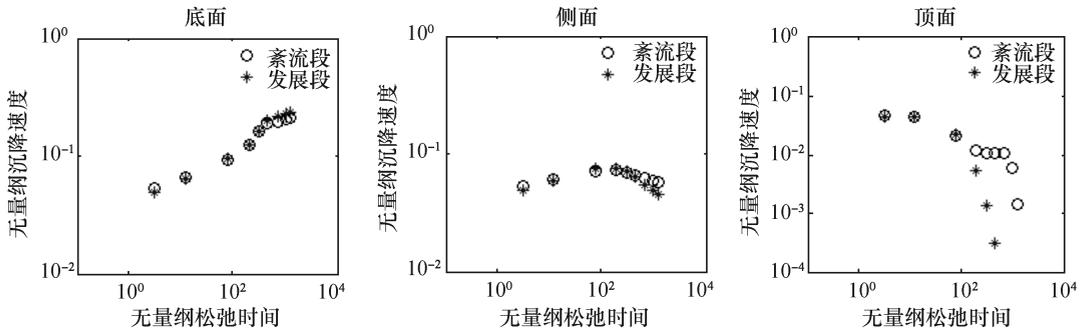


图9 速度为8 m/s时,粒子在紊流段和入口段沉积的比较

Fig. 9 Particle deposition compared in turbulent flow and entrance region, when the velocity is 8 m/s

## 4 结论

本文较完善的探讨了粒子在管道紊流段和入口段下顶、侧、底面的沉积规律,并得到如下结论:

1)对于 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 的粒子,由于重力的影响,粒子沉积到管道底面的沉积速度最高,其次是侧面,最后是顶面.粒子沉积到管底的无量纲沉积速度随着无量纲松弛时间的增加而增大,对于相同的无量纲松弛时间,底面的无量纲沉积速度随流速的增加而减小;粒子在侧面的沉积速度先随无量纲松弛时间的增加而增大,而后稍有减小;粒子在管道顶部的沉积规律不明显.

2)从粒子沉积到紊流段和入口段的比较来看,粒子在管道底面的沉积与流态是否充分发展无关(限大粒子如本文中 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 的粒子),粒子在侧面的沉积不仅与流态有关还与空气流速有关,在小流速下有一定的差距,在大流速下沉积图像趋于重合.

## 参考文献:

- [1] Bardana E J, Montanaro A. Indoor air pollution and health[C]. Marcel Dekker, New York, 1997:83-103.
- [2] Mark R Sippola, William W Nazaroff. Particle deposition from turbulent flow; review of published research and its applicability to ventilation ducts in commercial buildings [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51432, 2002.
- [3] Mark R Sippola, William W Nazaroff. Experiments measuring particle deposition from fully developed turbulent

flow in ventilation ducts[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, 38:914-925.

- [4] Sippola & Nazaroff. Particle deposition in ventilation ducts: connectors, bends and developing turbulent flow[J]. Aerosol Science and Technology, 2005, 39:139-150.
- [5] 朱青松,李念平,付峥嵘,等.气溶胶粒子在矩形风管中沉降速度的实验研究[J].流体机械,2007,35(11):5-9.
- [6] Hutchinson P, Hewitt G F, Dukler A E. Distribution of liquid or solid dispersions from turbulent gas streams: a stochastic model[J]. Chemical Engineering Science, 1971, 26: 419-439.
- [7] Reeks M W, Skyrme G. The dependence of particle deposition velocity on particle inertia in turbulent pipe flow [J]. Journal of Aerosol Science, 1976, 7:485-495.
- [8] McLaughlin J B. Aerosol particle deposition in numerically simulated channel flow[J]. Physics of Fluids A, 1989, 1: 1211-1224.
- [9] 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.
- [10] 付峥嵘,李念平,王汉青,等.风管中颗粒物沉降速度的解析法预测模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(2):35-38.
- [11] 吴俊,赵彬.通风管道内颗粒的沉降规律研究及应用[J].暖通空调,2008,38(4):18-23.
- [12] Bradshaw P. Turbulent secondary flows[J]. Ann Rev Fluid Mech, 1987, 19(1):53-74.
- [13] Liu B Y H, Agarwal J K. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow[J]. Aerosol Science, 1974, 5:145-155.