

# 微细颗粒物的边界层近壁面运动

孙科,王锐,周锟,贺铸,刘少杰 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室,武汉 430081

摘 要:颗粒污染物(如PM<sub>10</sub>等)在暴露体附近壁面的流动很普遍,与背景流场作用和运动归宿较复杂, 且具较大研究和实用意义。本文采用近壁面湍流模型对典型直管边界层颗粒流进行模拟,研究直管湍流 中颗粒沉积等特性。研究发现:在本模拟条件下,采用增强壁面模型所得流动与前人 DNS 结果较吻合, 所得颗粒无量纲沉积速度在前人研究结果区间内。无量纲沉积速度随无量纲松弛时间增大而增大,但略 有不同。在无量纲松弛时间较小且壁摩擦速度较小时,近壁面模型影响较大。当颗粒数 St>1 时,通过率 随 St 增加而减小,随摩擦速度增大而增大;当 St 较小时不受影响。本研究初步给出不同近壁面湍流模 型对暴露体附近湍流和颗粒流动的影响,有利于颗粒污染物的暴露研究和控制。 关键词:雾霾气溶胶;近壁湍流态;颗粒踪迹去向;沉积和通过;近壁面模型

# Movement of micro- & fine-particles in boundary layer and near-wall area

SUN Ke, WANG Rui, ZHOU Kun, HE Zhu , LIU Shaojie

State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Particle contaminant (e.g.  $PM_{10} \& PM_{2.5}$ ) flow around an exposed body is commonly existed in nature, and its interaction with background flow and its fate are complicated and valuable for further research and application. *Materials and methods* This paper adopts turbulent and near-wall model to numerically simulate typical boundary layer and near-wall particle flow in a straight duct, and to study the detail particle deposition and penetration process in the turbulent flow. *Results* Under current simulation conditions, the flow behavior based on the Reynolds Stress Model and Enhanced near-wall model agrees well with previous Direct Numerical Simulation (DNS) results, while predictions from other near-wall models show partial agreements and partial discrepancies. The obtained dimensionless particle deposition velocities (DPDVs) based on these two models are generally among the range areas of literature experiment and DNS results, although differences exist. *Discussion* DPDVs increase with dimensionless particle relaxation times (DPRTs) increase between  $4.2 \times 10^{-3} < \tau_p^+ < 6.8 \times 10^2$ , but the increasing trend is slightly different from literature data trends. The above phenomena may be attributed to different simulation and experimental conditions for different literature works.

引用格式:孙科,王锐,周锟,等.2017. 微细颗粒物的边界层近壁面运动 [J]. 地球环境学报, 8(6): 578-585.

Citation: Sun K, Wang R, Zhou K, et al. 2017. Movement of micro- & fine-particles in boundary layer and near-wall area [J]. Journal of Earth Environment, 8(6): 578-585.

收稿日期: 2017-09-01; 录用日期: 2017-10-21

Received Date: 2017-09-01; Accepted Date: 2017-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602179)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (11602179)

通信作者:周 锟, E-mail: zhou.kun@wust.edu.cn

Corresponding Author: ZHOU Kun, E-mail: zhou.kun@wust.edu.cn

When the DPRT  $\tau_p^+ < 1.9 \times 10^{-2}$  and the near-wall frictional velocity  $u^* \le 19 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , the effects of different nearwall models are obvious; while above these DPRT and frictional velocity values, the near-wall models impose slightly on DPDV. Under St>1 condition, the particle penetration decreases with St increase and it increase with  $u^*$  increase. Under St<1 condition, the St number has no influence on the penetration. *Conclusions* In short, this investigation preliminarily gives the effects of different near-wall models on nearby turbulence and particle flow of an exposed body, and this research also obtains the characteristics of particle flow fate. *Recommendations and perspectives* Further studies are recommended to be conduct on the interacting and modeling among turbulence, near-wall boundary layer and particle flow. These studies are believed to be useful for exposure research and effective control of particle contaminant.

Key words: mist/fog aerosol; near wall turbulence; particle trace & fate; deposition & penetration; near wall model

当前我国的大气污染已相当严重,特别是 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物 (VOCs)等 气体污染物以及由化学反应而得到的多环芳烃 (PAH)等碳烟前驱物,由气体污染物相互反应、 成核、凝并和团聚而得到的纳米微米气溶胶污染 物,如 PM<sub>25</sub>和 PM<sub>10</sub>等 (Cao et al, 2003, 2005; He et al, 2015; Zhou et al, 2016; Huang et al, 2017; Li et al, 2017)。该类污染物通常处于大气 边界层、城镇生活区工作区周围和渗透入室内的 空间,长期暴露于此类污染物对人体健康影响特 别明显 (Huang et al, 2014; Niu et al, 2017)。 这些污染物影响区域在环境上位于城镇地面上空、 建筑壁面附近、汽车尾气或工业废气排放系统、 采样仪器管道内、通风或净化系统通道内、室内 空间近壁面、人体表面附近和人体呼吸道内等。 从流体物理上理解提炼为,颗粒污染物在上述开 放空间或闭合管道中,在其影响的暴露体近壁面 区域受空气载体作用而运动,其边界层近壁面流 态、尺度谱和浓度谱对暴露体起着非常重要的直 接作用(Yu et al, 2004; Zhao et al, 2004; Chen et al, 2012; Zhou et al, 2014) 。

以大气雾霾颗粒物在建筑通风管道系统的运动和沉积特性为例,颗粒物的室内外通风交互贡献率决定着室内人体附近的颗粒暴露,进而影响人体健康。诸多通风管道均处于非均匀湍流状态,湍流场变化将导致微纳颗粒在管道呈现非均匀分布状态,引致沉积速度和通过率发生变化。例如,Sippola (2002)和 Sippola and Nazaroff (2004)对 具有实际结构的管道系统进行研究,结果表明: 湍流结构改变使沉积增强 1—2 个数量级。Chen and Zhao (2011)和 Zhao et al (2004)对通风系 统开展大量沉积、过滤、渗透和浓度分布的建模、 解析和模拟研究。Lai and Chen (2006)和 Lai and Nazaroff (2000)研究颗粒在室内、模型箱体和通 风设施的分布和沉积等实验、数值和分析模型。 Lin et al (2004, 2015)亦得出纳米或超常颗粒的 通过率、沉积或分布等规律。Yu et al (2013)讨 论了颗粒凝并对室内颗粒沉积率的影响。Li et al (2010)探讨空调参数和气溶胶对室内微生物发 展的作用。Qian and Li (2010)和 Qian et al (2006) 分析了呼吸液滴颗粒在空气传播感染房间或病房 的运动规律或控制方法。Zhang and Chen (2009) 和 Zhang et al (2007)用计算流体力学(CFD)的 方法研究得出颗粒在室内不同湍流状态下的沉积 分布情况。Sun et al (2013)初步得到颗粒壁面作 用、浓度尺度分布、通过率和沉积速度等随着颗 粒和流场特性变化的规律。

基于已有研究基础,本文拟采用湍流和近壁 面模型模拟分析主流和边界层湍流、颗粒在直 管边界层近壁面的运动沉积和颗粒的总体通过 率规律。

# 1 研究方法

#### 1.1 流体运动模拟

在建立直管流动控制方程前,做如下假设: 流体流动为稳态湍流,流体为不可压缩牛顿流体, 黏度和密度各向同性且为定值。基于上述假设, 在直角坐标系下,列出以张量形式表示的流体流 动的质量、动量守恒方程,并在 CFD 软件 ANSYS FLUENT (2015)中求解其速度场和压力场。鉴于 环境结构的复杂性,应用雷诺平均法(RANS)可 快捷给出流体和污染物的运动规律。进行湍流模 拟的关键是计算雷诺应力和湍流黏性。其中,应 用较多的是三种 k-ε 模型、两种 k-ω 模型和雷诺应

579

# 力RSM模型。

主要的近壁面函数/模型包括 Standard 标准 近壁面函数/模型、Scalable可扩展模型、Non-Equilibrium 非平衡模型和 Enhance 增强近壁面模 型。根据已有研究经验,近壁面模型是将管道湍 流核心区与壁面之间的黏性底层和过渡层用近壁 面函数来修正其流动状态。标准模型开发最早, 对流动模拟具有广泛适用性,但其主要适合恒定 剪切和平衡态湍流边界层情况。可扩展模型主要 是迫使对数律与标准模型联合使用的情况。非平 衡模型主要适用于带有较大压力梯度和非平衡的 复杂湍流,修正近壁面网格的非平衡湍流量。增 强模型使用双层模型,将黏性底层和其他近壁面 层分开建模,可提高近壁面的求解精度,可在非 各向同性湍流中适用。但是,以上模型在模拟微 细颗粒物运动上的适用特性还需继续深入研究。

根据近年改进的入口湍流和近壁面湍流研究 进展, RANS 模型可较精确地给出湍流规律(Sun et al, 2012)。因此本研究选取其中一种湍流模 型——RSM 模型来模拟湍流流动,并比较几种近 壁面模型的效果。

# 1.2 颗粒运动追踪

本文将雾霾颗粒简化为稀相圆球颗粒,采用 单相耦合方法,忽略颗粒对气体流动的影响。颗 粒群运动主要用拉格朗日方法来追踪,其运动方 程如下:

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{p}i}}{\mathrm{d}t} = F_{\mathrm{D}}(u_i - u_{\mathrm{p}i}) + g_i(1 - \frac{\rho}{\rho_{\mathrm{p}}}) + F_{\mathrm{a}i} \tag{1}$$

其中: $u_{ni}$ 是颗粒在*i*方向上的速度, $F_{D}(u_{i}-u_{ni})$ 是曳 力,右边第二项是重力,第三项是其他作用力。

通过两个固定截面(如直管出口入口截面) 的颗粒通过率 P 可由下式求得:

$$P = \frac{C_{\circ}}{C_{i}}$$
 (2)

其中: C。和 Ci 分别是出口和入口的颗粒平均浓度。 跟颗粒通过率 P 紧密关联的是 St, 即颗粒 Stokes 数,它表示颗粒松弛时间与流场特征时间之比。

颗粒在管道中的沉积状态常用无量纲沉积速 度 V<sup>+</sup> 来表达, 该速度可根据颗粒浓度的变化和气 流摩擦速度得到,具体如下:

$$V_{\rm d}^{+} = \frac{V_{\rm d}}{u_{\rm w}} \tag{3}$$

其中: V<sub>4</sub>为颗粒沉积速度, 与颗粒浓度的减少率 相关: u<sub>w</sub>是壁摩擦速度。与V<sub>a</sub><sup>+</sup>对应的无量纲颗

粒松弛时间  $\tau_{a}^{\dagger}$  的计算公式为:

$$\tau_{\rm p}^{+} = \frac{\tau_{\rm p}}{\tau_{\rm e}} \tag{4}$$

其中:为τ。颗粒松弛时间;τ。为湍流涡时间尺度, 由 Gauss 随机数 ç 和流体 Lagrangian 积分尺度决定:

$$\tau_{\rm c} = -C_{\rm L} \frac{k}{\epsilon} \log(\varsigma) \tag{5}$$

其中:  $C_{I}$  为时间常数, k 为湍动能,  $\epsilon$  为湍动耗 散率。

## 1.3 几何模型及数值过程

本研究选取直管宽度 d=100 mm,长度 l=2000 mm,如图1所示。采用约4万结构化网 格,边界层加密,如图2所示。数值计算选用基 于压力的求解器,压力和速度耦合采用半隐式的 SIMPLE 算法; 动量、湍动能、能量和湍动能耗散 率等采用二阶迎风离散格式,而压力项采用二阶 压力项。迭代收敛后,计算近壁面第一层网格无 量纲距离 y<sup>+</sup>=yu<sup>\*</sup>/v, 以检查是否满足近壁面函数的 条件。通过选择不同模型的不同近壁面条件计算 无量纲速度,作图与DNS结果和经验公式计算结 果作对比(Zhang and Ahmadi, 2000)。选择较合 适的模型及其壁面条件,加离散相来模拟直管中 PM25、PM100 等颗粒的运动特性。



图1 简化直管模拟 Fig.1 Simplified straight duct simulation

#### 结果及讨论 2

# 2.1 结果验证分析

数值计算迭代收敛后的残差如图3所示,连 续性 continuity、两个方向速度、湍动能 k、湍动 耗散率 epsilon 和各个应力 stress 项的收敛残差都 小于 1×10<sup>-5</sup>, 数值收敛效果较好。基于模拟的收敛 性,下文将与近壁面模型对比分析、与直接数值 模拟(DNS)对比验证分析和不同流向距离的垂 向近壁面分析。

为更好进行模拟结果验证和计算颗粒在壁 面附近的沉降,本文将首先对比直接数值模拟 (DNS)和经验公式 u<sup>+</sup>=2.5ln(yu<sup>\*</sup>/v)+5.0 的计算 结果,检验模拟模型和过程在近壁面区域的精度。

## 外 科,等:微细颗粒物的边界层近壁面运动

#### 第6期

图 4—图 7 中, 无量纲高度  $y^+$  指垂直于壁面的无量 纲高度  $yu^*/v$ , 无量纲速度  $u^+$  指主流 x 方向的近壁 面无量纲速度  $u/u^*$ 。图中的倍数曲线数据表示离入 口的距离  $l_a$  是直管宽度 d 的倍数, 如  $l_a$ =10d 表示 距离入口 10 倍宽度 d 的流向 x 位置。从图中可以 看出图 5 的吻合性最好,本模拟结果与 DNS 的结 果基本一致。与经验公式计算结果的差异主要体现 在最靠近壁面的区域,这是因为该经验公式是对数 律,本就是由湍流核心区的实验数据所得;而黏性 底层为线性律。因此,图 4—图 6 中经验公式计算 结果在最近壁面区均较大。图 7 结果则相反,在最 靠近壁面区域,本模拟数值高估了实际的速度。图 4 则在  $y^+$  约为 15—50 的区域微弱低估了实际的速 度。图 6 则在  $y^+$  约为 10—85 的区域低估了实际的 速度。



图 2 直管横断面网格 Fig.2 Sample grid of straight duct cross-section

# 2.2 不同近壁面模型分析

从图 4—图 7 分别表示标准 Standard 近壁面 模型、增强 Enhance 近壁面模型、非平衡 Non-Equilibrium 近壁面模型和可扩展 Scalable 近壁面 模型。上文与 DNS 和经验公式对比的过程提及图 4—图 7 的模拟结果具有一些区别,其结果进一步 说明不同近壁面模型带来的区别。根据上文的分 析,采用 Enhance 壁面模型所得到的近壁面速度 分布跟 DNS 的结果更吻合。这是因为其模型带有 的双层模型可更精确地逼近实际非各向同性边界 层中黏性底层、过渡层和湍流核心区的流动状态。 该结果从一个新的视角佐证了该壁面模型在复杂 环境和工程应用中的有效性和精确性。



图 3 收敛性示意图 Schematic diagram of simulation convergence

Fig.3





Fig.4 Dimensionless streamwise velocity comparison among results of DNS, empirical formula computation (Zhang and Ahmadi, 2000) and current RSM simulation with Standard near wall model in boundary layer flow (10d—18d mean locations from inlet)

随着离入口距离 l<sub>d</sub> 的增加(从 10d 到 18d), 中心湍流的速度剖面亦有所增强,特别是在 y<sup>+</sup>>20 的位置。图 4---图 6 中三种近壁面模型在黏性底层 与 DNS 吻合较好。用 Enhance 近壁面模型所得结 果跟 DNS 和经验公式计算结果在 *l<sub>d</sub>* 为 10*d*—16*d* 区段较为相近,而用 Standard 近壁面模型所得结 果跟 DNS 和经验公式计算结果在 *l<sub>d</sub>*=18*d* 区段附近 较为相近。图 6 中 Non-Equilibrium 近壁面模型所 得结果均低估了实际速度,这可能是跟湍流沿着 管长方向的发展快慢有关,也说明壁面对核心湍 流区速度剖面的影响减弱。图 7 中 Scalable 近壁面 模型所得结果除部分区域(*l<sub>d</sub>* 为 12*d*—16*d* 且 *y*<sup>+</sup> 为 20—90)外,均高估了实际流速;这估计是由强 行扩展湍流对数律到线性底层所得偏差。总之整 体来看,由 Enhance 近壁面模型模拟出来的近壁面 湍流跟 DNS 更加接近。



图 5 RSM Enhance 增强近壁面边界层无量纲速度与 DNS 及经验公式(Zhang and Ahmadi, 2000)计算结果对比分 析图(10d 到 18d 表示位置离入口距离 ld) Fig.5 Dimensionless streamwise velocity comparison among results of DNS and empirical formula computation (Zhang and Ahmadi, 2000), current RSM simulation with Enhance near-wall model in boundary layer flow (10d—18d mean locations from inlet)

#### 2.3 沉积与通过率分析

根据上述分析,在计算颗粒运动时,本文主要 选取 RSM Enhance 近壁面模型为离散颗粒相的湍 流模拟模型(在图 10 的比较中亦加入 Standard 标 准近壁面模型的结果比较)。颗粒选取 1—150 μm 中的 9 种不同直径的粒子。颗粒通过入口吹入管 道的沉积结果如图 8 所示。沉积率表示沉积颗粒 总量与入射颗粒总量之比。图中沉积率的绝对值 虽小(0—0.05),但如果沉积面积大、管道长或 沉积时间长,则沉积总量亦较为可观。如果颗粒 的直径增加或者背景流体流动速度降低,沉积率 也会相应增大。由本图可知,沉积率随着颗粒增 大而增大,这很大程度上是由颗粒重力引起。



图 6 RSM Non-Equilibrium 壁面边界层无量纲速度与 DNS 及经验公式(Zhang and Ahmadi, 2000)计算结果对比分 析图(10d 到 18d 表示位置离入口距离 l<sub>d</sub>) Fig.6 Dimensionless streamwise velocity comparison among results of DNS and empirical formula computation (Zhang and Ahmadi, 2000), current RSM simulation with Non-Equilibrium near-wall model in

boundary layer flow (10d - 18d mean locations from inlet)





Fig.7 Dimensionless streamwise velocity comparison among results of DNS and empirical formula computation (Zhang and Ahmadi, 2000), current RSM simulation with Scalable nearwall model in boundary layer flow (10*d*—18*d* mean locations from inlet)



图 8 颗粒沉积率与颗粒直径的关系 Fig.8 Relationship between particle deposition fraction and its diameter

颗粒无量纲沉积速度  $V_{d}^{+}$  与无量纲松弛时间  $\tau_{p}^{+}$ 的关系如图 9 所示。同 Zhang and Ahmadi (2000) 的 DNS 结果、Sippola and Nazaroff(2004)、Liu and Agarwal (1974)、Kvansnak et al (1993) 的 实验结果对比可知,大部分模拟结果位于这些沉 积的 DNS 和实验结果区间内, 说明模拟的吻合性 较好。但由于各研究者模拟和实验的几何构型、 流动条件和颗粒状态等存在差异,图9结果在部 分区域亦存在约一个数量级的差异。这是因为从 无量纲沉积速度和无量纲松弛时间的公式(3)-(5) 可以看出,壁面附近的微小涡流、脉动量与微颗 粒之间的作用在公式里面体现更加明显。此亦说 明流动的微小波动对颗粒沉积速度有较大影响作 用,特别是小 $\tau_{n}$ 的颗粒沉积。使用 RSM Enhance 模型模拟的无量纲沉积速度上升变化趋势比实验 数据的趋势缓和,比 DNS 的趋势更平缓,这大概 是因为所选取的 DNS 为竖直管道颗粒沉积的缘故。 本文模拟从 $u^*$ =17 cm·s<sup>-1</sup> 到 49 cm·s<sup>-1</sup>, 无量纲沉 积速度随着壁摩擦速度增加而减小。这可以理解 为壁摩擦速度越大输运颗粒的能力越强,所以沉 积越小。这与 DNS 的模拟结果规律是一致的。另 外, 同图 8 的规律趋势一致, 无量纲沉积速度随 着无量纲松弛时间的增大而增大。

图 10 展示出应用目前的 RSM Enhance 模型 和 Standard 模型并结合颗粒的拉格朗日追踪,所 得沉积速度结果的比较。对比结果表明,当壁摩 擦速度 *u*<sup>\*</sup>=49 cm·s<sup>-1</sup>较大的时候,两个模型并无 太大区别;当 u<sup>\*</sup>较小时,无量纲沉积速度在无量 纲松弛时间较小的情况下(如 τ<sup>\*</sup><sub>p</sub>=4.2×10<sup>-3</sup>)差别 较大,根据标准模型的计算值是根据增强模型计 算值的 7 倍。这充分体现两种近壁面模型在主流 速度较小情况下对近壁面湍流脉动的模化差异。 另外,在颗粒 τ<sup>\*</sup><sub>p</sub>较小的情况下,颗粒受到壁湍流 的影响作用越大,近壁面的小涡很容易把颗粒带 到壁面上并附着于壁面。固而选取适当的近壁面 模型对颗粒在湍流边界层附近的沉积速度计算具 有一定影响。



图 9 无量纲粒子沉积速度与无量纲松弛时间的关系 Fig.9 Relationship between dimensionless particle deposition velocity and dimensionless relaxation time

图11表示采用RSM Enhance 近壁面模型时, 颗粒通过率与无量纲的 Stokes 数(St)之间的 关系。颗粒通过率是管道颗粒流动比较重要的参 数。从图中可以看出,在 St <1 时,颗粒很小, 基本跟随主流流体运动,或者说其主流跟随性较 强,所以通过率接近 1;当 St >1,随着 St 数的 增加,通过率 P迅速降低,这是因为颗粒的重 力使其沉降更快更多。同图 9 的规律一致,随着 壁摩擦速度 u<sup>\*</sup>的增加,颗粒的沉积减少,通过 率增加。颗粒越大,或摩擦速度越大,以上规 律越明显。

DOI: 10.7515/JEE201706009

583

地球环境学报



图 10 无量纲粒子沉积速度随无量纲松弛时间、近壁面模型和摩擦速度的变化关系





Fig.11 Relationship between particle penetration and Stokes number

# 3 结论与展望

本文根据湍流和近壁面数值模拟的方法来研 究空气中可假设为颗粒的污染物(如PM<sub>25</sub>和可吸 入颗粒 RSP等)运动特性。将雷诺应力模型和几 种近壁面模型所得近似结果,与经验公式、直接 数值模拟和前人实验结果对比分析,考察所采用 模拟模型的适用性、差异性和可能的影响因素。

研究结果表明,用 Enhance 增强近壁面模型所得结果跟 DNS 和经验公式计算结果大部分较为吻

合,且其计算效率高,节省时间和资源;而用其 他近壁面模型所得结果只有小部分区域与前人结 果较为相近,其他区域则或低估或高估流速。

颗粒沉积率随颗粒直径的增大而增加。通过率 随 Stokes 数(St)增大而减小。颗粒无量纲沉积 速度同前人的实验和直径数值模拟部分吻合较好。 随着壁摩擦速度增大,无量纲沉积速度有小幅减 小;在 St>1 时颗粒通过率随壁摩擦速度增大而增 大,但当 St<1 时,通过率不受影响。近壁面模型 对模拟的近壁面湍流有影响,特别是对无量纲松 弛时间  $\tau_p^* < 1.9 \times 10^{-2}$ 且壁摩擦速度  $u^* \le 19$  cm·s<sup>-1</sup> 的 颗粒运动情况。

以上初步研究结果对理解雾霾颗粒物等大气 污染物运动和去向具有理论参考作用,以期待找 出一些高效快捷的气流运动和污染扩散研究方法, 以方便对大气污染物的控制。同时,上述研究亦 具有一定局限性,许多方面还待深入研究,如更 精确但又快速的湍流和颗粒模拟方法开发、壁湍 流与颗粒的交互作用机理及其适用于空气污染物 控制的便捷模化表达式等。

#### 参考文献

- ANSYS Inc. 2015. ANSYS FLUENT 15.0 users guide [Z]: Canonsburg PA, USA.
- Cao J J, Chow J C, Lee S C, et al. 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 5(3): 3561–3593.
- Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. 2003. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 37(11): 1451–1460.
- Chen C, Zhao B. 2011. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor [J]. *Atmospheric Environment*, 45(2): 275–288.
- Chen C, Zhao B, Weschler C J. 2012. Indoor exposure to "Outdoor PM<sub>10</sub>": assessing its influence on the relationship between PM<sub>10</sub> and short-term mortality in US cities [J]. *Epidemiology*, 23(6): 870–878.
- He Z, Zhou K, Xiao M, et al. 2015. Simulation of soot size distribution in a counterflow flame [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 13(1): 95–101.

584

- Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 514: 218–222.
- Huang Y, Liang Y, Rao Y, et al. 2017. Environmentfriendly carbon quantum Dots/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> photocatalysts: characterization, biocompatibility, and mechanisms for NO removal [J]. *Environmental Science & Technology*, 51(5): 2924–2933.
- Kvasnak W, Ahmadi G, Bayer R, et al. 1993. Experimental investigation of dust particle deposition in a turbulent channel flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 24 (6): 795–815.
- Lai A C K, Chen F Z. 2006. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynoldsaveraged Navier-Stokes model [J]. *Journal of Aerosol Science*, 37 (12): 1770–1780.
- Lai A C K, Nazaroff W W. 2000. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces [J]. *Journal of Aerosol Science*, 31 (4): 463–476.
- Li A, Liu Z, Zhu X, et al. 2010. The effect of air-conditioning parameters and deposition dust on microbial growth in supply air ducts [J]. *Energy and Buildings*, 42 (4): 449–454.
- Li B, Ho S S H, Xue Y, et al. 2017. Characterizations of volatile organic compounds (VOCs) from vehicular emissions at roadside environment: The first comprehensive study in Northwestern China [J]. *Atmospheric Environment*, 161: 1–12.
- Lin J Z, Yin Z Q, Lin P F, et al. 2015. Distribution and penetration efficiency of nanoparticles between 8—550 nm in pipe bends under laminar and turbulent flow conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85: 61–70.
- Lin J, Zhang W, Yu Z. 2004. Numerical research on the orientation distribution of fibers immersed in laminar and turbulent pipe flows [J]. *Journal of Aerosol Science*, 35(1): 63–82.
- Liu B Y H, Agarwal J K. 1974. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 5(2): 145–155.
- Niu X, Ho S S H, Ho K F, et al. 2017. Indoor secondary organic aerosols formation from ozonolysis of monoterpene: An example of d-limonene with ammonia and potential impacts on pulmonary inflammations [J]. Science of The Total Environment, 579: 212–220.
- Qian H, Li Y. 2010. Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room [J]. *Indoor Air*, 20(4): 284-297.

Qian H, Li Y, Nielsen P V, et al. 2006. Dispersion of exhaled

droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems [J]. *Indoor Air*, 16(2): 111-128.

- Sippola M R. 2002. Particle deposition in ventilation ducts [D]. Berkeley: University of California.
- Sippola M R, Nazaroff W W. 2004. Experiments measuring particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation ducts [J]. *Aerosol Science and Technology*, 38 (9): 914–925.
- Sun K, Lu L, Jiang H. 2012. A numerical study of bend-induced particle deposition in and behind duct bends [J]. *Building* and Environment, 52(6): 77–87.
- Sun K, Lu L, Jiang H, et al. 2013. Experimental study of solid particle deposition in 90° ventilated bends of rectangular cross section with turbulent flow [J]. Aerosol Science and Technology, 47(2): 115–124.
- Yu I T S, Li Y, Wong T W, et al. 2004. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus [J]. New England Journal of Medicine, 350(17): 1731–1739.
- Yu M, Koivisto A J, Hämeri K, et al. 2013. Size dependence of the ratio of aerosol coagulation to deposition rates for indoor aerosols [J]. *Aerosol Science and Technology*, 47(4): 427–434.
- Zhang H F, Ahmadi G. 2000. Aerosol particle transport and deposition in vertical and horizontal turbulent duct flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 406: 55–80.
- Zhang Z, Chen Q. 2009. Prediction of particle deposition onto indoor surfaces by CFD with a modified Lagrangian method [J]. *Atmospheric Environment*, 43(2): 319–328.
- Zhang Z, Zhai Z Q, Zhang W, et al. 2007. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2-comparison with experimental data from literature [J]. HVAC&R Research, 13(6): 871–886.
- Zhao B, Zhang Y, Li X T, et al. 2004. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method [J]. *Building and Environment*, 39(1): 1–8.
- Zhou K, Attili A, Alshaarawi A, et al. 2014. Simulation of aerosol nucleation and growth in a turbulent mixing layer [J]. *Physics of Fluids*, 26(6): 065106. DOI: 10.1063/1.4884789.
- Zhou K, Jiang X, Sun K, et al. 2016. Eulerian-Lagranigan simulation of aerosol evolution in turbulent mixing layer [J]. *Applied Mathematics and Mechanics-English Edition*, 37(10): 1305–1314.