

风洞管道中细微颗粒物浓度分布规律的数值模拟

李熠豪¹, 杜登高^{2,3*}, 陶乐仁^{2,3}, 黄理浩^{2,3}

¹上海北分科技股份有限公司, 上海

²上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

³上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海

Email: *ddgusst@163.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年5月10日; 发布日期: 2021年5月17日

摘要

本文利用计算流体动力学(CFD)研究风洞管道中气流驱动的细微颗粒物的扩散分布规律。基于欧拉-拉格朗日方法建立数值模型, 使用随机轨道模型来考虑湍流扩散, 求解颗粒物的扩散轨迹。分析气流风速和入口颗粒物质量流率变化对颗粒物扩散的影响, 研究风洞管道内流场分布规律和颗粒物浓度场分布规律。结果表明, 气流通过弯管之后产生的二次流是影响颗粒物分布均匀性的主要原因。并且发现只改变管道内风速或者颗粒入口质量流率的情况下, 颗粒物浓度随着风速增加而降低, 随颗粒物质量流率增加而增加。研究结果有助于加深对颗粒物随气流运动规律及机理的研究, 为颗粒物排放监控提供更合适的指导策略。

关键词

气固两相流, 颗粒物, 数值模拟, 随机轨道模型

Numerical Simulation of the Concentration of Fine Particles Distribution in Wind Tunnel Ducts

Yihao Li¹, Denggao Du^{2,3*}, Leren Tao^{2,3}, Lihao Huang^{2,3}

¹Shanghai Baif Technology Co., Ltd., Shanghai

²School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

³Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Power Engineering, Shanghai

Email: *ddgusst@163.com

*通讯作者。

Abstract

In this study, computational fluid dynamics (CFD) was used to study the diffusion of particles driven by airflow in wind tunnel duct. A numerical model is established based on the Euler-Lagrange method, and discrete random walk model is used to consider the turbulence diffusion, and the trajectory of particles is solved. The influence of wind speed and mass flow rate of particles at the inlet on the diffusion was analyzed, and the distribution law of flow field and particles concentration field in wind tunnel ducts was studied. The results show that the secondary flow after the flow through the elbow is the main reason that affects the distribution uniformity of particles. It was also found that the concentration of particles decreased with the increase of wind speed and increased with the increase of mass flow rate of particles when only the wind speed in the ducts or the mass flow rate of particles at the inlet was changed. The research results are helpful to deepen the understanding on the movement law and mechanism of particles, and provide more appropriate guiding strategies for particles emission monitoring.

Keywords

Gas-Solid Two-Phase Flow, Particulate Matters, Numerical Simulation, Discrete Random Walk Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今巨大的能源消耗造成污染物的大量排放, 严重威胁着人们的身体健康。2013年, 世界卫生组织(WHO)将细颗粒物(PM_{2.5})归为第一类致癌物质, 人们对颗粒污染物 PM_{2.5} 的关注不断增加[1]。PM_{2.5} 超标是造成雾霾的主要原因, 因此许多国家制定了相关标准来管制 PM_{2.5} 的排放问题。随着环保标准的日益严格, 环保局对各工厂烟气排放控制的要求也越来越高, 因此监控颗粒物的排放有重要意义。

烟道中颗粒物的运动, 从流动方式上来归类为气固两相流, 目前国内外的学者做了许多与管道中气固两相流相关的研究。比如: Kliafas 和 Holt [2]使用激光多普勒测速仪测量了 90°弯管方形截面内的气固两相流, 并获得了平均流向速度和径向速度。Tsuji 等人[3]和 Huber、Sommerfeld [4]等人发表了从相位多普勒风速测量(PDA)获得的关于粒子速度和粒子尺寸分布的空间发展的信息。Akilli [5]等人使用光纤探头在水平管道的不同位置进行了颗粒浓度和颗粒速度的测量。宋勇[6]利用计算流体力学软件 FLUENT 对 CLT/A 型旋风分离器进行了数值模拟, 验证了优化的可行性。杨瑞昌等人[7]提出了用于模拟多维湍流气固两相流的改进的扩散模型。李剑锋[8]利用 Fluent 对风机内部的气固两相流进行了数值模拟, 与实验结果进行的比较表明模拟结果是可信的。Sa Z 等人[9]利用 Fluent 软件模拟了硐室爆破后 20 分钟内通风采石场的粉尘浓度变化和不同风速下的粉尘轨迹, 对减少采石场粉尘危害具有重要意义。Zhao M 等人[10]通过 CFD-DEM 的方法模拟了流化床中湿颗粒的团聚和沉积现象。Yang D 等人[11]针对大于 5 毫米的大尺寸颗粒, 采用基于欧拉-拉格朗日方法和离散相模型的耦合方法进行了模拟研究, 预测了大颗粒煤的水平气力输送特性。Bilal F S 等人[12]研究了 45°和 90°弯管中颗粒物的侵蚀现象。

多数学者使用实验或数值模拟的方法研究了气固两相流动的运动规律，在颗粒物运动方面取得了大量进展，但很少学者研究管道中颗粒物浓度分布均匀性和稳定性，因此本文研究了颗粒物在风洞管道中的运动规律，分析内部流场和浓度场分布，为颗粒物排放监测提供指导。

2. 数学模型

2.1. 气相模型

本次模拟采用欧拉-拉格朗日方法[13]。气体被视为连续相，用纳维尔-斯托克斯方程求解，而颗粒物被视为离散相，用牛顿第二定律求解。包括两个步骤：连续相流场模拟和颗粒跟踪。

由于风洞管道中流动雷诺数很高，处于紊流状态，因此使用基于雷诺平均方程的 RNG k- ε [14]湍流方程求解流场。

当气流处于稳定状态时，空气被认为是不可压缩的，连续性方程和动量方程表示为：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \right] \quad (2)$$

对于 RNG k- ε 方程，k 方程为：

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

其中，k 代表湍动能， m^2/s^2 ， α_k 代表湍动能的有效普朗特数的倒数，取 1； μ_{eff} 为黏性系数； G_k ， G_b 分别为由平均速度梯度和浮力引起的湍动能； ε 为湍动能耗散率， m^2/s^3 。

方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (4)$$

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中 $C_{1\varepsilon}$ ， $C_{2\varepsilon}$ ， $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_{3\varepsilon} = 0.09$ ； μ_t ， μ 为湍流和层流的粘性系数； α_ε 为耗散率的有效普朗特数的倒数，取 0.769。

2.2. 颗粒相模型

颗粒物被认为是离散相，颗粒物的求解由牛顿第二定律得到[15]。在笛卡尔坐标系下表示为：

$$u_p = \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

$$m \frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{mg(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + \Sigma F \quad (8)$$

式中， u_p 为颗粒的速度， m/s ； u_f 为气流速度， F_D 为颗粒所受的曳力， N ； g 为重力加速度， m/s^2 ； ρ_p 为颗粒密度， kg/m^3 ； ρ_f 为流体密度， kg/m^3 ； ΣF 为颗粒受到的其他作用力的合力，因为本文使用的颗粒密度远大于空气，所以考虑曳力和重力，而忽略其他次要力[16]。

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} \quad (9)$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |u_p - u_f|}{\mu} \quad (10)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & (Re_p < 1) \\ \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{2/3}\right) & (1 \leq Re_p < 10^3) \\ 0.44 & (Re_p \geq 10^3) \end{cases} \quad (11)$$

式中, μ 为流体的动力粘度, Pa·s; Re_p 为颗粒的雷诺数; C_D 为阻力系数。

3. 数值模拟方法

3.1. 物理模型及网格划分

本次模拟基于上海北分风洞实验室的实际布置方式, 管道分为矩形入口扩散段、过渡段、弯管段 1、直圆管测量段、弯管段 2 和排出段, 其中矩形管道尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.56 \text{ m}$, 弯管角度为 90° , 曲率为 $R/D = 2$, 圆形管道尺寸为 $D = 0.56 \text{ m}$, 将第二个弯管对测量段的影响考虑在内, 所以在 solidworks 中建立何模型, 在 ICEM 软件[17]中采用结构网格方式划分, 对矩形管道向圆形管道过渡的地方以及两个弯管和壁面附近进行加密处理。图 1(a) 为风洞管道的整体网格示意图, 图 1(b) 为矩形管段截面和圆管截面网格示意图。具体尺寸见图 2。测量段法兰位置具体安排见图 1(a) 和表 1。其中 $X^* = (X - 0.84)/0.56$ 代表法兰距离弯管段 1 出口的距离。

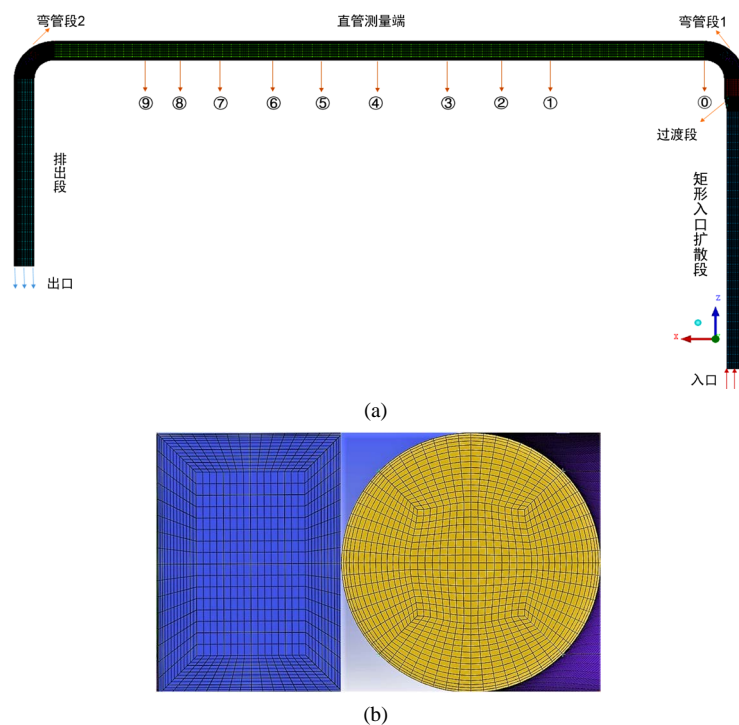


Figure 1. The whole grid diagram of the wind tunnel duct
图 1. 风洞管道的整体网格示意图

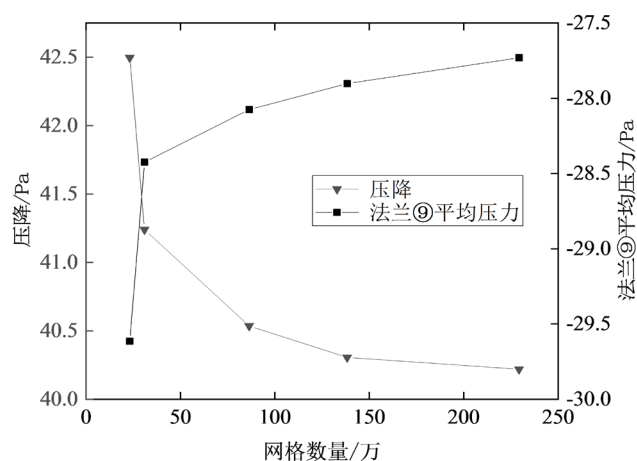


Figure 2. Duct pressure drop and flange ⑨ average pressure change with the mesh number
图 2. 管道压降和法兰⑨平均压力随网格数量的变化

Table 1. The specific location of the flange

表 1. 法兰的具体位置

法兰编号	法兰位置 X(m)	X^*/D
①	5.14	7.7
②	6.34	9.8
③	7.84	12.5
④	9.84	16.1
⑤	11.38	18.8
⑥	12.78	21.3
⑦	14.18	23.8
⑧	15.38	26
⑨	16.18	27.4

3.2. 网格无关性验证

为了在确保仿真模拟的准确性的前提下, 提高计算效率。在网格质量符合要求的情况下划分了 232,224、309,504、864,020、1,382,776 和 2,292,569 个网格进行网格无关性验证。根据图 2, 发现在网格数量大于 1382776 时, 管道整体压降和法兰⑨监测的平均压力变化均小于 1%, 表示计算结果趋于稳定, 所以选取数量为 1,382,776 的网格进行计算。

3.3. 边界条件和算法

使用速度入口边界条件, 壁面采用无滑移, 出口定义为自由流出。颗粒在入口和出口设置为逃逸, 壁面条件设置为反弹。压力 - 速度耦合求解采用 Simple 算法, 压力, 动量, 湍动能, 湍动能耗散率均采用二阶迎风差分格式。先计算稳态流场至收敛, 再加入颗粒物继续计算。

3.4. 模型验证

为了验证模拟模型的准确性, 将入口风速为 8.76 m/s, 颗粒质量流率为 13 mg/s 的条件下的模拟结果和已有的实验数据进行对比。图 3 为直管测量段管道中心轴线上颗粒物浓度值的数值模拟结果和实验结

果的对比。可以发现，在直管测量段的中心轴线上，无论是数值模拟还是实验结果，颗粒物浓度随着管长都是先增加后下降，再趋于平稳，发展趋势高度吻合。数值模拟结果的颗粒物浓度曲线平稳时候是处于震荡的，这主要是因为拉格朗日方法的限制，颗粒物被认为是离散相，颗粒物与管壁的每一次碰撞都会造成计算结果的颗粒物浓度变化。图 4 为法兰⑥处沿管道 Z 轴方向(Z^* 为在管道径向测点距离管道内壁的距离)颗粒物浓度和带误差棒(误差范围为 30%)的实验结果对比图。发现模拟结果在误差范围内，说明模拟方法是可行的。

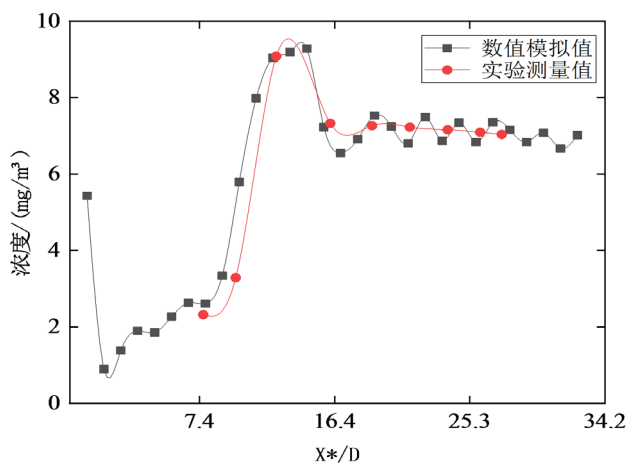


Figure 3. Model validation: Particle concentration on the central axis of the straight pipe measurement section
图 3. 模型验证: 直管测量段中心轴上的颗粒物浓度

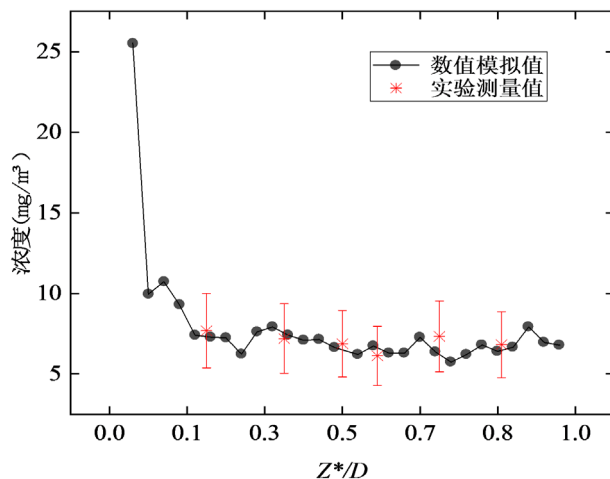


Figure 4. Model validation: Particle concentration in the Z axis direction on the flange ⑥ section
图 4. 模拟验证: 法兰⑥截面上 Z 轴方向的颗粒物浓度分布

4. 仿真结果及分析

4.1. 流场分布

直管测量段是此风洞用于标定的工作段，因此本文主要关注此段的速度和浓度分布。图 5 为入口风速为 8.76 m/s 时的速度云图和速度矢量图。气流从风洞方形入口进入，形成壁面速度低，管道中心速度大的湍流充分发展状态，随后进入对气流影响最大的弯管部分。由于正压力梯度，管道内壁附近的气流被加速，而管道外壁附近的气流由于负压力梯度而减速，在弯曲的中点 45° 附近后，这种行为开始逆转。

并且在弯管出口处气流由于惯性力和离心力的共同作用向管道外壁面运动，靠近内壁附近形成气流低速区。在弯管出口形成了由两个反向旋转的漩涡，这两个漩涡被称为迪恩涡[18]。随着管道的延长，漩涡面积才能减小并逐渐消失。

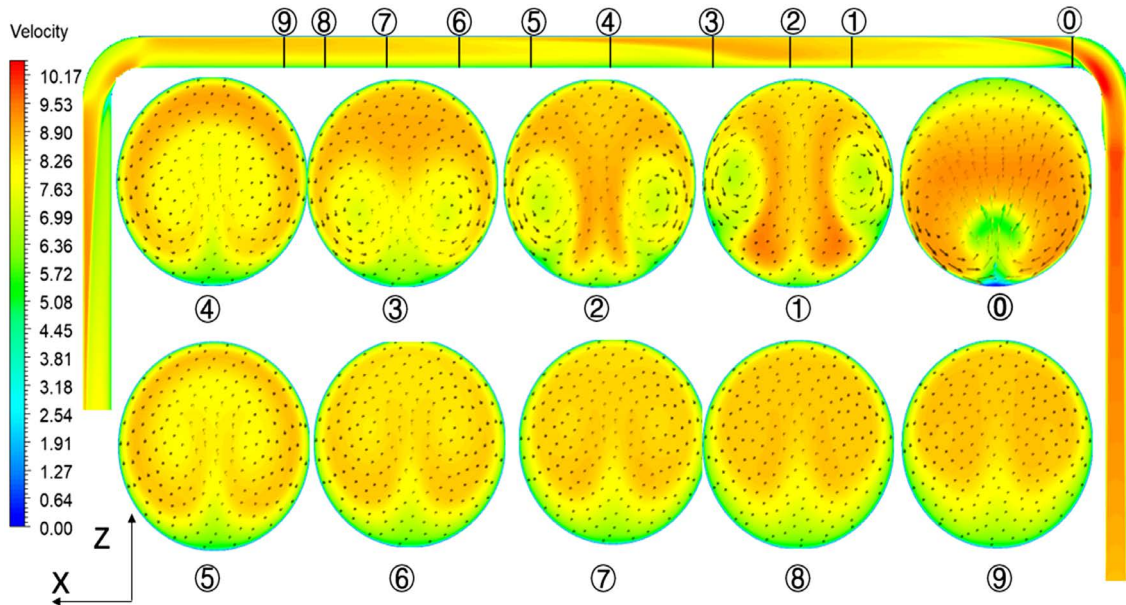


Figure 5. ZX section and YZ section velocity cloud diagram and velocity vector diagram of pipeline at different positions
图 5. ZX 截面和不同位置管道 YZ 截面速度云图和速度矢量图

选取截面⑩ (弯管段 1 的出口)和法兰①、④、⑦、⑨为目标，图 6 和图 7 显示了沿管道径向的速度和压力分布图，可以看到截面⑩处沿管道径向气流速度和压力波动十分明显，这主要是因为此处二次流强度大，两个反向旋转的漩涡扰乱了流场，法兰①处速度和压力波动虽然减小，但还未稳定下来，法兰④正好处于向稳定流动状态发展的过渡阶段，法兰⑦和法兰⑨速度，压力变化基本消失，流场已经稳定下来。

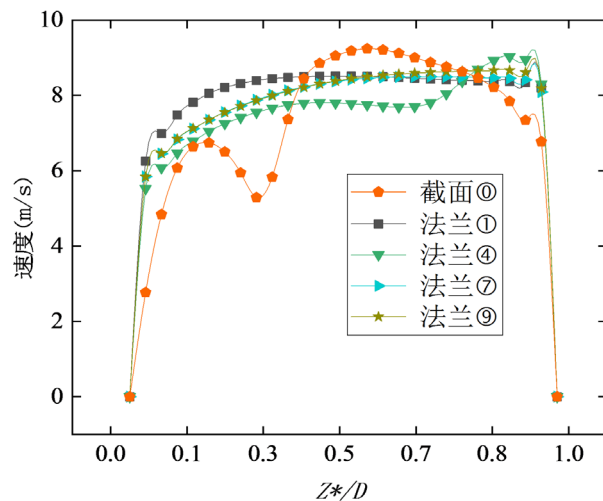


Figure 6. Velocity distribution along the radial direction of the pipe at different positions
图 6. 不同位置沿管道径向的速度分布

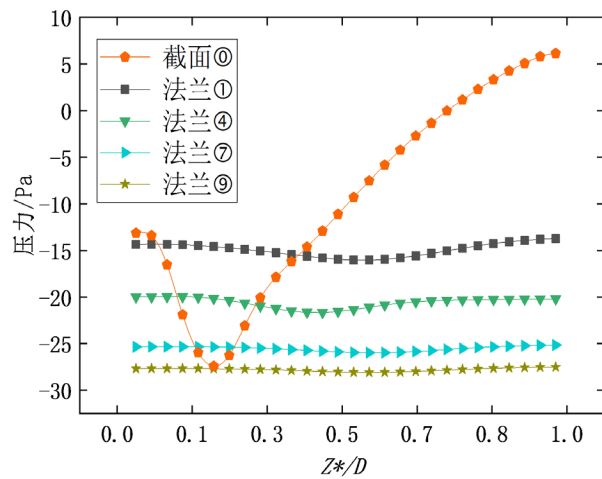


Figure 7. Pressure distribution along the pipe radial direction at different positions
图 7. 不同位置沿管道径向的压力分布

4.2. 浓度场分布

图 8 为颗粒物浓度分布云图，颗粒物进入弯管后，在离心力，惯性和气流曳力的共同作用下，颗粒物聚集在弯管出口外壁附近，而在内壁的低速区，几乎看不到颗粒物的存在。颗粒物的聚集现象在离开弯管之后就逐渐消失，这主要是因为二次流漩涡的存在扰动流场，颗粒物跟随漩涡运动，沿管道截面半径呈对称分布，漩涡核心区域颗粒物难以进入，所以形成两个低浓度区。结合图 5 的速度分布云图和图 8 的浓度分布云图看出，在法兰①~④，漩涡逐渐消失，漩涡核心处的低浓度区域面积逐渐减小，颗粒物浓度分布均匀性也显现出来。从法兰⑤~⑨可以看到，漩涡消失后，颗粒物均匀的分布在管道中。因此提出了一个评估因子 Φ 来判断整体颗粒物浓度均匀性的好坏，定义如下：

$$\Phi = \frac{|C_1 - C_2|}{C_1} \times 100\% \quad (12)$$

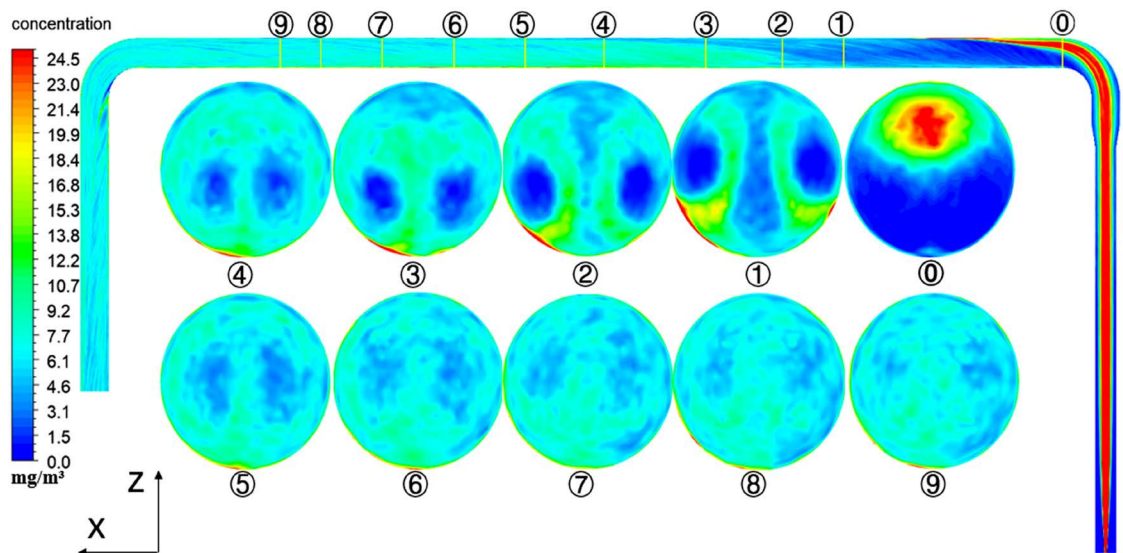


Figure 8. Concentration distribution cloud map of ZX section and different sections of duct
图 8. 管道 ZX 截面和不同处管道截面浓度分布云图

其中 C_1 代表截面的颗粒物面积加权平均浓度, kg/m^3 ; C_2 代表截面上 line-z 和 line-y 上得到的颗粒物平均浓度, kg/m^3 。图 9 为管道截面上 line-z 和 line-y 的位置分布关系, 图 10 为评估因子 Φ 的变化曲线, 法兰①~⑨所处截面 Φ 值是逐渐下降, 然后趋于平稳, 距离弯管出口越远, Φ 值越小, 表明浓度分布逐渐均匀, 法兰④之后, Φ 都低于 5%, 说明整体分布已经达到初步均匀, 从图 8 的浓度分布云图的也能看出这一点。

图 11 为法兰①管道截面上管道截面上 line-z 和 line-y 的浓度分布图, 结合图 8 发现法兰①的 line-z 正好处于两个漩涡中间, 而颗粒主要随着漩涡运动, 所以浓度并不高, 管道壁面附近浓度大于管道中心处。且 line-y 正好穿过两个漩涡, 可以发现两个浓度波谷正好处于漩涡中心处, 颗粒很难进入漩涡核心, 所以浓度接近于 $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。图 12 为法兰⑨截面上 line-z 和 line-y 的浓度分布图, 此时流场已经发展稳定下来, 外壁面附近整体速度相比于内壁偏高一点, 因此从 line-z 上可以看到内壁面浓度更高, 从 line-y 上可以看到因为重力的存在, 管道下部颗粒聚集得更多, 浓度更高。并且法兰⑨截面上漩涡已经完全消失, z 方向和 y 方向上在管道中心附近浓度差别不大, 整体均匀性很好。

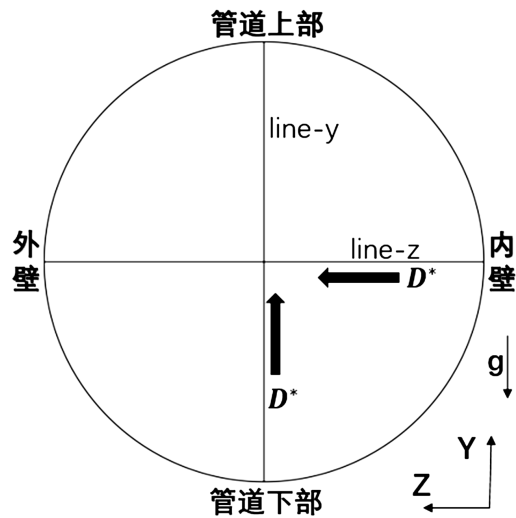


Figure 9. Position of line-y and line-z

图 9. line-y、line-z 的位置分布

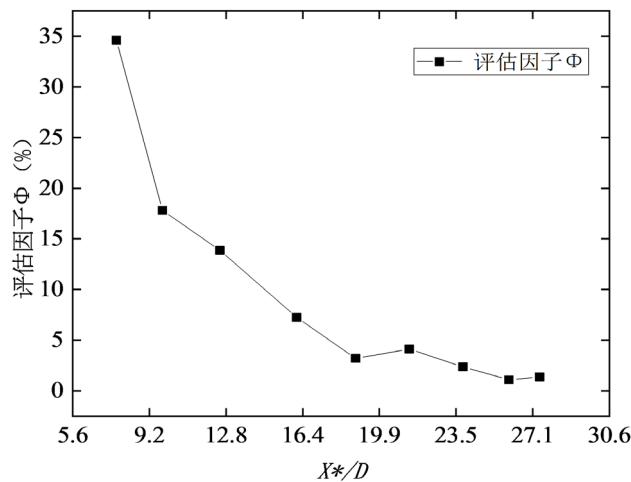


Figure 10. Along the axial direction of duct on the duct section Φ value size

图 10. 沿管道轴向方向上各管道截面 Φ 值大小

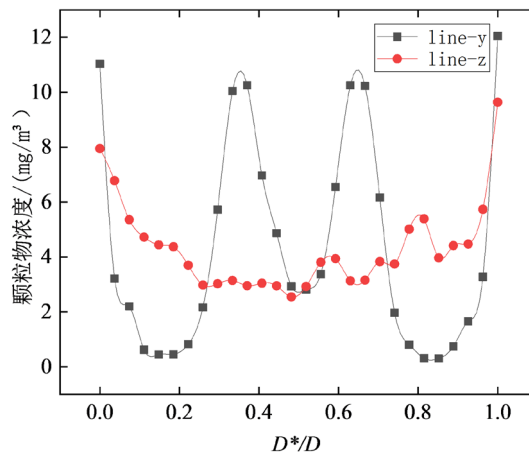


Figure 11. Particle concentrations of line-y and line-z on the flange ① section

图 11. 法兰①截面上 line-y 和 line-z 浓度分布曲线

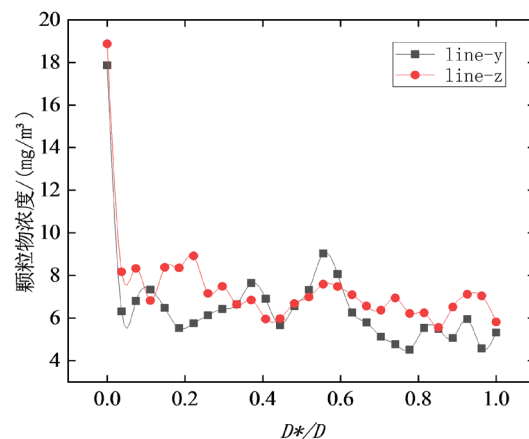


Figure 12. Particle concentrations of line-y and line-z on the flange ⑨ section

图 12. 法兰⑨截面上 line-y 和 line-z 浓度分布曲线

4.3. 气流风速和颗粒质量流率的影响

图 13 为颗粒质量流率固定为 13 mg/s 时, 不同风速下, 不同法兰截面上 line-z 的平均浓度规律基本一致, 先上升再下降后趋于平稳。先上升是因为弯管出口二次流很强, 大量颗粒物随着漩涡移动到管道中心部分。随着漩涡强度减小, 颗粒物开始扩散到整个管道, 当漩涡完全消失, 颗粒物充满整个管道, 所以 line-z 上的平均浓度会再下降然后趋于平稳。

在不同风速下可以发现, 随着风速的提高, 颗粒物平均浓度下降, 这是湍流增强的原因, 由于流体速度的增加, 湍流强度增加, 颗粒受到的曳力增加, 高速区的颗粒物更容易被流体带走。并且随着流速的增加, 平均浓度下降趋势也逐渐减弱, 这主要是因为气流速度的增加, 湍流强度增加, 颗粒受到的曳力增加, 高速区的颗粒物更容易被流体带走。并且随着流速的增加, 平均浓度下降趋势也逐渐减弱, 这主要是因为气流速度的增加, 湍流强度增加, 漩涡寿命也越长, 完全消失的距离也越远, 所以 line-z 上的平均浓度下降得更慢。

图 14 为风速固定为 8.76 m/s 时, 随着颗粒质量流率的增加, 颗粒物平均浓度上升, 这也与质量守恒相符。并且在越小的颗粒质量流率情况下发现平均浓度上升和下降趋势越缓慢, 特别是在 3.25 mg/s 时, 平均浓度的下降趋势特别小。原因主要是颗粒质量流率减少, 相同时间进入管道内的颗粒量也降低, 减

少了颗粒与气流的动量交换, 更有利于颗粒跟随气流运动, 从而使得颗粒浓度场紧随流场发展趋势, 更快的发展开来, 从而看到 line-z 上的平均浓度下降趋势减弱。

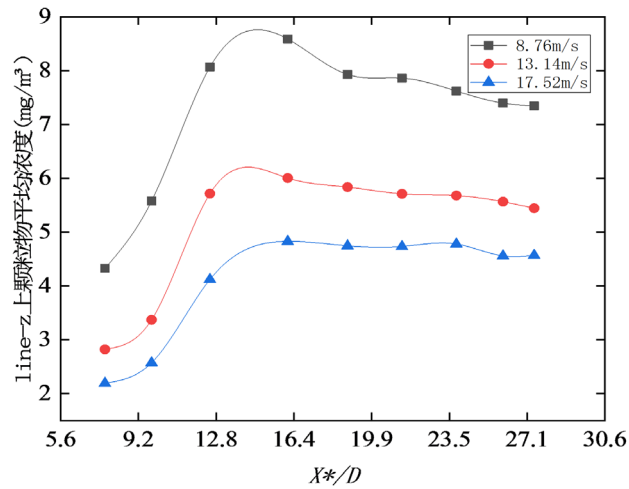


Figure 13. Variation of mean concentration at different flange sections line-z at different wind speeds
图 13. 不同风速下不同法兰截面 line-z 上平均浓度变化曲线

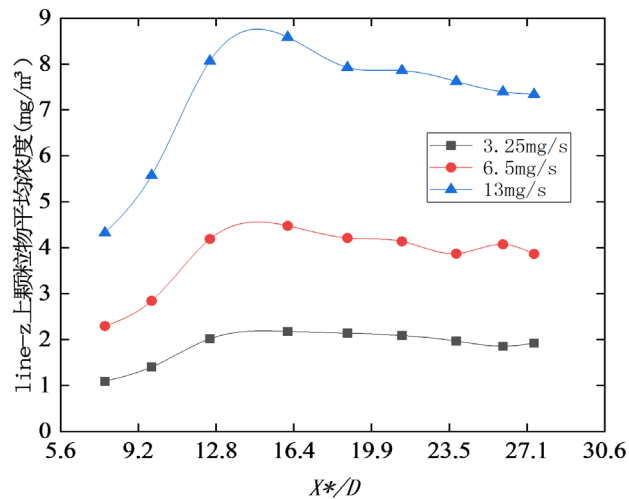


Figure 14. Variation of mean concentration of line-z of different flange sections at different particle mass flow rates
图 14. 不同颗粒质量流率下不同法兰截面 line-z 的平均浓度变化曲线

5. 结论

1) 使用 RNG k- ϵ 湍流模型和欧拉 - 拉格朗日模型模拟了细小颗粒在风洞管道中的运动扩散情况, 将模拟结果与实验数据比较, 误差在可接受范围内, 说明本次的模拟方法具有可靠性。

2) 基于气流流场、速度云图, 速度矢量图和颗粒物浓度图说明了细微颗粒物的扩散规律。影响颗粒物分布均匀性的最大因素是经过弯管之后形成二次流的漩涡, 漩涡起到了混动颗粒的作用, 但也是造成颗粒分布不均匀的直接原因, 颗粒分布的均匀程度与漩涡的强度呈反比关系。

3) 颗粒物浓度随着气流速度的增加而下降; 随着入口颗粒物质量流率的增加而增加。为了保证颗粒浓度分布的均匀性, 在风速 8.76 m/s 和颗粒质量流率 3.5 mg/s 时, 平均颗粒浓度曲线变化更加平缓。

参考文献

- [1] 高贵生. 大气细颗粒物 PM2.5 污染来源及防治措施[J]. 化工管理, 2017(5): 250.
- [2] Kliafas, Y. and Holt, M. (1987) LDV Measurements of a Turbulent Air-Solid Two-Phase Flow in a 90° Bend. *Experiments in Fluids*, **5**, 73-85. <https://doi.org/10.1007/BF00776177>
- [3] Tsuji, Y., Kawaguchi, T. and Tanaka, T. (1993) Discrete Particle Simulation of Two-Dimensional Fluidized Bed. *Powder Technology*, **77**, 79-87. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(93\)85010-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)85010-7)
- [4] Huber, N. and Sommerfeld, M. (1994) Characterization of the Cross-Sectional Particle Concentration Distribution in Pneumatic Conveying Systems. *Powder Technology*, **79**, 191-210. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(94\)02823-0](https://doi.org/10.1016/0032-5910(94)02823-0)
- [5] Akilli, H., Levy, E.K. and Sahin, B. (2001) Gas-Solid Flow Behavior in a Horizontal Pipe after a 90° Vertical-to-Horizontal Elbow. *Powder Technology*, **116**, 43-52. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00360-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00360-0)
- [6] 宋勇. 旋风分离器内气固两相流场数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2011
- [7] 杨瑞昌, 赵磊, 巨泽建, 刘若雷. 使用扩散模型数值模拟二维湍流气固两相流[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(z1): 113-116.
- [8] 李建锋, 吕俊复, 张海, 等. 排粉风机内部气固两相流动特性研究[J]. 流体机械, 2008, 36(2): 22-26.
- [9] Sa, Z., Li, F., Qin, B. and Pan, X. (2012) Numerical Simulation Study of Dust Concentration Distribution Regularity in Cavern Stope. *Safety Science*, **50**, 857-860. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.019>
- [10] Zhao, M., Liu, D., Ma, J. and Chen, X. (2020) CFD-DEM Simulation of Gas-Solid Flow of Wet Particles in a Fluidized Bed with Immersed Tubes. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **156**, Article ID: 108098. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108098>
- [11] Yang, D., Li, G., Wang, Y., Wang, Q., Li, J., Huang, Q., et al. (2020) Prediction of Horizontal Pneumatic Conveying of Large Coal Particles Using Discrete Phase Model. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2020**, Article ID: 1967052. <https://doi.org/10.1155/2020/1967052>
- [12] Bilal, F.S., Sedrez, T.A. and Shirazi, S.A. (2021) Experimental and CFD Investigations of 45 and 90 Degrees Bends and Various Elbow Curvature Radii Effects on Solid Particle Erosion. *Wear*, Article ID: 203646. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203646>
- [13] Brusca, S., Famoso, F., Lanzafame, R., Mauro, S. and Strano, S. (2016) PM10 Dispersion Modeling by Means of CFD 3D and Eulerian-Lagrangian Models: Analysis and Comparison with Experiments. *Energy Procedia*, **101**, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.042>
- [14] Yakhot, V. and Orszag, S.A. (1986) Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*, **1**, 3-51.
- [15] 朱红钧. FLUENT 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [16] 胡霄乐. 细弯管内多粒径颗粒的气固两相流动规律分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [17] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [18] 汪建兴, 王海民, 饶玲. 细小直角弯管流道的压力损失及迪恩涡特性[J]. 流体机械, 2017, 45(3): 33-37.