

基于工业转载溜槽的颗粒体平抛运动及逸散过程模拟

孙宏发^{1,2}, 李安桂¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 工业颗粒体输送系统如煤粉、铝粉、水泥等输运过程存在大量的粉尘逸散问题, 成为了工作场所的空气环境污染源头。溜槽是工业颗粒体输送系统的关键部件之一, 溜槽通道的形状大多呈“Z”型, 它是产生污染、治理粉尘污染的出发点。首先通过试验数据验证了 Discrete Phase Model 的正确性, 之后利用 Fluent 软件对溜槽内颗粒粒径为 300~500 μm , 密度为 700~2 800 kg/m^3 及质量流量为 0.05~0.2 kg/s 的不同工况进行了数值计算。结果表明, 随着颗粒质量流量增大卷吸空气速度明显增大; 随着颗粒密度和粒径减小, 颗粒越容易从料流核心区向外扩散; 颗粒密度对其速度有较大影响, 随着颗粒密度增大颗粒加速阶段持续时间越长。研究结果为工业颗粒体输送系统的粉尘逸散过程通风系统的设计提供了理论依据。

关键词: 环境污染; 数值计算; 卷吸空气; 料流核心区; 通风系统

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)03-0447-08

Simulation of particles horizontal projectile motion and fugitive process in the industrial transfer chute

SUN Hongfa^{1,2} LI Angui¹

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China)

Abstract: There is a large amount of dust escape problem in the transportation process of industrial particulate transportation systems such as coal powder, aluminum powder and cement, which has become the source of air pollution in the workplace. Transfer chute is one of the key components of the industrial particle delivery system. Most of the chute channel is “Z” type, which causes pollution and therefore is also the starting point of the dust pollution control. In this paper, the discrete phase model in Fluent software was used to simulate the particles of different mass flow (0.05~0.2 kg/s), diameter (300~500 μm) and density (700~2 800 kg/m^3), obtaining the entrained air velocity distribution, particle concentration distribution and particle velocity in the course of a horizontal projectile motion under different working conditions. Results show that the entrained air velocity increases significantly with the increase of the particle mass flow rate. As the particle density and diameter decrease, the particles are more likely to diffuse outward from the material flow core region. The density has a greater influence on particle velocity. As the particle density increases, the duration of the particle acceleration phase increases. Research results provide a theoretical basis for the design of the ventilation system of the dust escape process in the industrial particulate transport system.

Key words: environmental pollution; numerical calculation; entrained air; the material flow core region; ventilation system

工业生产是社会进步的源动力。工业原材料作为工业生产过程中重要元素之一, 通常需要经过各种加工和处理。然而, 工业原材料的加工和处理过程往往会带来各种各样的社会问题, 其中最为突出的就是环境污染问题^[1-2]。煤粉、铝粉、水泥等散状物料在工业原材料中占据相当大的比重。这些散状物料作为原材料用于工业生产之前一般需

要通过转运、输送等处理过程。而转运、输送过程最为常见的部件为转载溜槽。散状物料中粒径较大的颗粒在运动过程中对溜槽内引起的卷吸空气影响较大。然而, 可吸入的细颗粒(粉尘)依靠自身重力很难在空气中沉降下来, 容易随着卷吸空气逸出溜槽。逸散的粉尘严重影响了生产安全及工人的身体健康^[3,4], 甚至存在粉尘爆炸风险^[5,6]。

收稿日期: 2019-03-06 修改稿日期: 2020-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678469)

第一作者: 孙宏发(1988—), 男, 博士生, 主要从事工业粉尘污染控制研究。E-mail: sunhf1212@xtu.edu.cn

通信作者: 李安桂(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下空间环境调控, 密闭空间及工业建筑环境保障研究。E-mail: liangui@xauat.edu.cn

对颗粒流下落过程的研究始于上世纪六十年代. 最早 Hemeon^[7] 提出了单颗粒下落模型用于预测颗粒流下落过程的卷吸空气量. 接着 Tooker^[8] 通过引入新的参数对 Hemeon 的理论模型进行了修正. 然后, Arnold^[9] 和 Cooper^[10] 对卷吸空气特性进行了深入研究. 发现颗粒流料流核心区截面积随着下降高度的增加而减少, 而卷吸空气半径与下落高度呈正相关的关系. Ogata^[11] 提出了在 $Re < 500$ 时单一粒径颗粒流卷吸空气模型与多粒径颗粒流卷吸空气模型. 王怡等^[12] 对自由下落非均一粒径颗粒流的流场特性进行了研究, 发现卷吸空气速度在轴心处最大且大颗粒对卷吸空气速度影响要明显大于小颗粒.

如上所述, 目前对颗粒流下落过程卷吸空气特性研究主要集中在颗粒流自由下落过程. 然而, 实际生产过程颗粒流下落过程存在大量抛体运动过程, 工业生产中最为常见的转载溜槽运行过程即为颗粒流平抛下落过程. 有基于此, 作者以典型工业转载溜槽为对象对颗粒流平抛下落过程卷吸空气特性进行了研究. 通过数值计算得到了颗粒流平抛下落过程颗粒逸散及卷吸空气特性等相关结论为工业颗粒输送系统粉尘控制提供参考依据.

1 气固两相流数值模型

本研究中颗粒流在空气中运动过程本质上属于气固两相流, 由于整个运动过程颗粒相所占体积分数较小. 所以在计算过程中采用的数值模型为欧拉-拉格朗日模型.

1.1 溜槽内气固两相流进行数值计算时提出以下几点假设^[13]:

(1) 溜槽内空气流动为三维等温不可压缩流动; (2) 溜槽内部气固两相流动为定常流动; (3) 溜槽密闭良好无漏风;

1.2 气相数值模型

Fluent 中对气相模拟时湍流模型常用的有 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 模型, 根据文献^[14] 介绍本文湍流模型选择 RNG $k-\epsilon$ 模型. 控制方程如下.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

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

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_i} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$Y_M = 2\rho \epsilon \frac{k}{a^2} \quad (5)$$

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\text{其中: } \eta = \frac{S_K}{\epsilon}; \eta_0 = 4.38; \beta = 0.012. \quad (6)$$

式中, ρ 为空气密度, k 为湍动能, u_i 、 u_j 分别为 i 、 j 对应气流速度, u'_i 、 u'_j 分别为 i 、 j 对应气流时均速度; x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 对应坐标位置, ϵ 为湍动能耗散率, μ_{eff} 为分子扩散所造成的动力粘度, μ_t 为湍流粘性系数, η 为湍流时间尺度与平均流时间尺度之比, η_0 为 η 在均匀剪切流中的典型值, β 为热膨胀系数, a 为声速, g_i 为 i 方向重力分量, Pr_i 为普朗特数, G_k 为由层流速度梯度而产生的湍流动能, G_b 为由浮力而产生的湍流动能, Y_M 由于在可压缩流中过渡的扩散产生的波动, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 是常量分别取值 1.42、1.68、0.09, α_k 和 α_ϵ 是 k 方程和 ϵ 方程的湍流普朗特数, C_μ 为常数取值 0.09, S_K 为应变率张量的范数.

1.3 颗粒相数值模型

Fluent 中 DPM 模型是通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解颗粒相的轨道. 颗粒的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式(Z 方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_z(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_z \quad (7)$$

$F_D(u - u_p)$ 是颗粒的曳力, 即

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} \quad (8)$$

Re_p 颗粒的相对雷诺数定义如下.

$$Re_p \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

曳力系数 C_D 可运用下面式子计算:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, & Re_p < 1 \\ \frac{18.5}{Re_p^{0.6}}, & 1 \leq Re_p < 500 \\ 0.44, & 500 \leq Re_p \end{cases} \quad (10)$$

F_z 是其他力, 只考虑由于颗粒加速度引起的附加质量力.

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt}(u - u_p) \quad (11)$$

其中: u 为流体相速度; u_p 为颗粒速度; μ 为流体动力粘度; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒直径.

2 物理模型及验证

2.1 物理模型

以实际工业生产中直角溜槽为例, 作者利用建模软件 CATIA 建立了三维转载点溜槽模型. 再利用网格划分软件 ICEM 对溜槽模型进行了结构化网格划分, 模型采用的最终网格数为 210 万. 物理模型如图 1 所示, 具体模型部件及尺寸如表 1 所示.

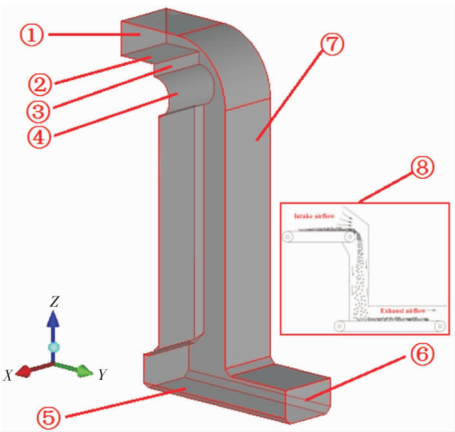


图 1 物理模型
Fig. 1 Physical model

表 1 模型部件及尺寸
Tab. 1 Model parts and size

部件名称	尺寸单位/mm	部件名称	尺寸单位/mm
①气流入口	550×1 000	⑤下皮带	3 000×1 000
②上皮带	700×1 000	⑥气流出口	550×100
③颗粒源	200×1 000	⑦密闭罩	5 000×1 500×1 000
④尾滑轮	R=320	⑧示意图	二维示意图

2.2 边界条件

本研究中颗粒平抛源根据实际散料转运过程中皮带上物料堆积高度及皮带宽度选取 200 mm×1 000 mm 的面源. 皮带运行速度根据生产过程选取常见的 2 m/s. 颗粒物粒径选择 300 μm 、400 μm 、500 μm 三种不同粒径. 颗粒物密度选取 700 kg/m^3 、1 400 kg/m^3 、2 800 kg/m^3 三种不同密度. 颗粒物质量流量选取 0.05 kg/s 、0.1 kg/s 、0.2 kg/s 三种不同质量流量. 具体边界条件如表 2 所示:

表 2 边界条件
Tab. 2 Boundary conditions

参数	取值
颗粒平抛源	200 mm×1 000 mm
计算网格	210 万
湍流模型	$\text{RNG } k-\epsilon$
气流入口	速度入口
气流出口	自由出流
上下皮带速度	2 m/s
颗粒物粒径: $d_p/\mu\text{m}$	300、400、500
颗粒物密度: $\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	700、1 400、2 800
颗粒物质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.05、0.1、0.2

2.3 模型验证

为验证数值模拟的正确性作者将本研究中颗粒流平抛运动过程中竖直方向速度与 Uchiyama^[15] 和 Hemeon^[7] 研究结果进行对比. 由图 2、图 3 可知本文模拟颗粒竖直方向速度与 Uchiyama 及

Hemeon 的研究结果能够基本保持一致.

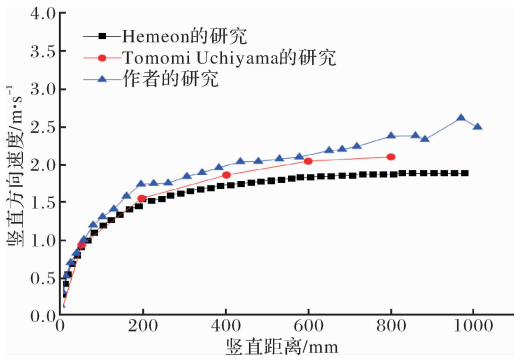


图 2 颗粒竖直方向速度对比 (400 μm 、1 400 kg/m^3)
Fig. 2 Comparison of particle vertical velocity (400 μm 、1 400 kg/m^3)

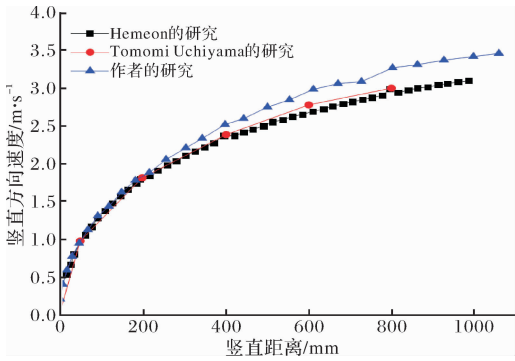


图 3 颗粒竖直方向速度对比 (500 μm 、2 800 kg/m^3)
Fig. 3 Comparison of particle vertical velocity (500 μm 、2 800 kg/m^3)

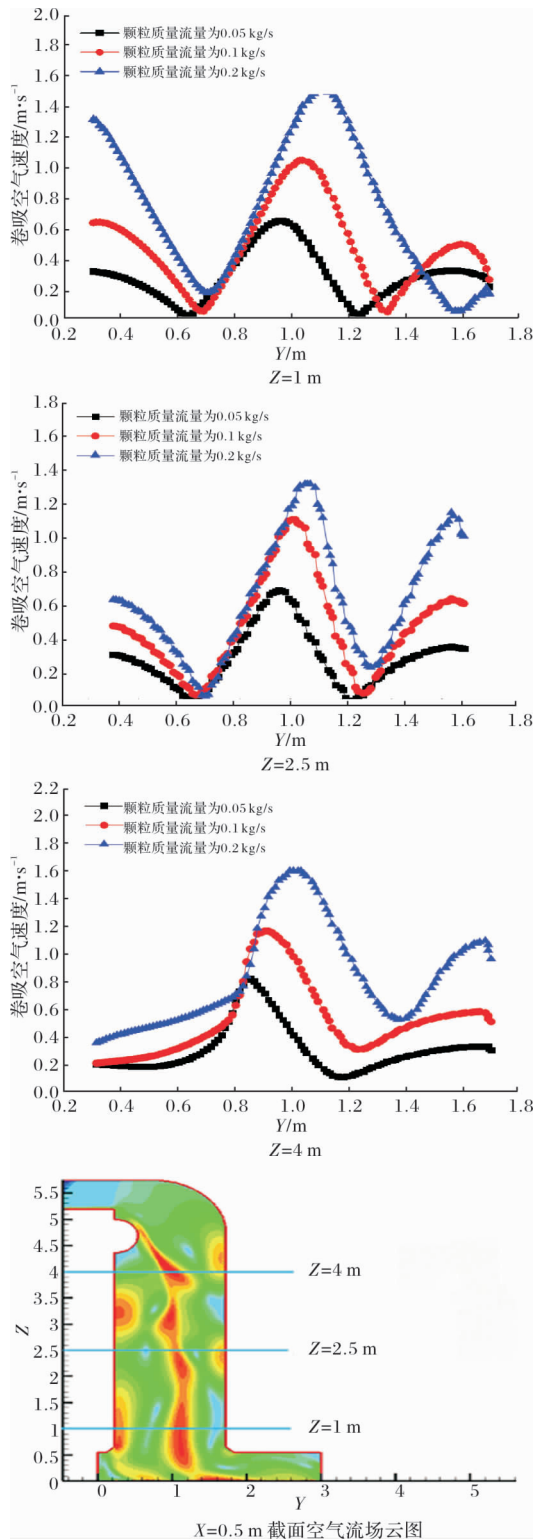


图4 不同断面卷吸空气速度随颗粒质量流量变化

Fig. 4 The entrained air velocity varies with the particles mass flow at different cross sections

3 结果及讨论

3.1 溜槽内卷吸空气速度分布

为了解转载溜槽内卷吸空气速度分布情况在竖直方向上选取 $Z=4\text{ m}$ 、 2.5 m 、 1 m 三个不同高度水平断面分别对不同颗粒流质量流量、粒径、

密度情况下不同水平断面上卷吸空气速度情况进行分析。

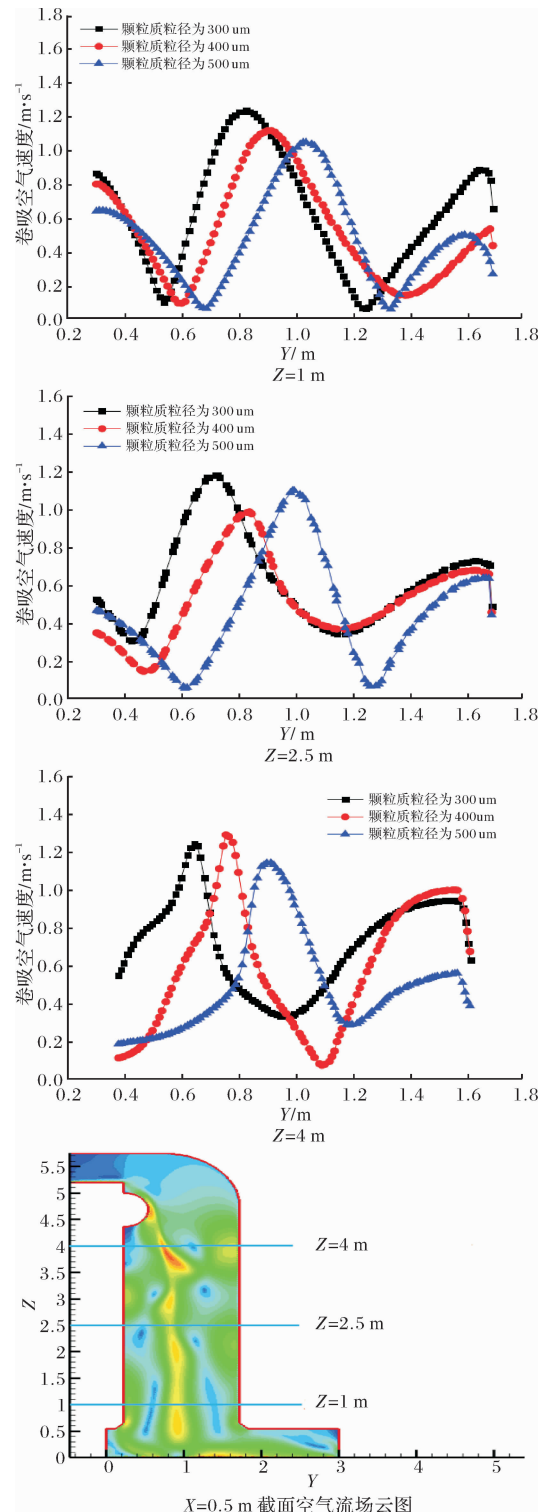


图5 不同断面卷吸空气速度随颗粒粒径变化

Fig. 5 The entrained air velocity varies with the particles diameter at different cross sections

图4可知颗粒物平抛下落过程随着质量流量增大在不同水平剖面上卷吸空气速度明显增大。颗粒质量流量为 0.2 kg/s 时在颗粒流核心区的卷吸空气速度最大达到 1.6 m/s ，沿着颗粒流核心区两侧卷吸空气的速度迅速下降。到达转载点溜槽竖直壁

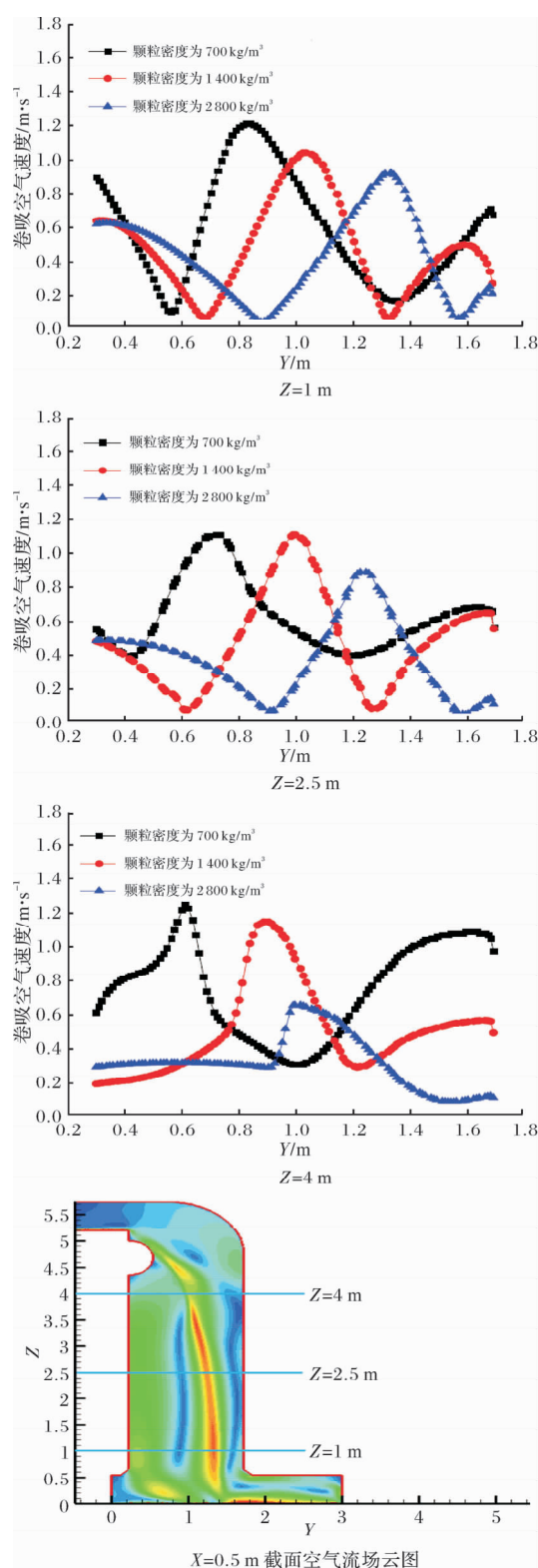


图6 不同断面卷吸空气速度随颗粒物密度变化

Fig. 6 The entrained air velocity varies with the particles density at different cross sections

面前,由于空气与竖直壁面碰撞形成涡流使得空气速度逐渐增大.通过对不同剖面卷吸空气速度对比分析可知,在溜槽内颗粒平抛下落过程首先对颗粒流外侧空气的卷吸作用强于内侧,随着下落高度的增加对颗粒流内侧卷吸作用强于外侧.

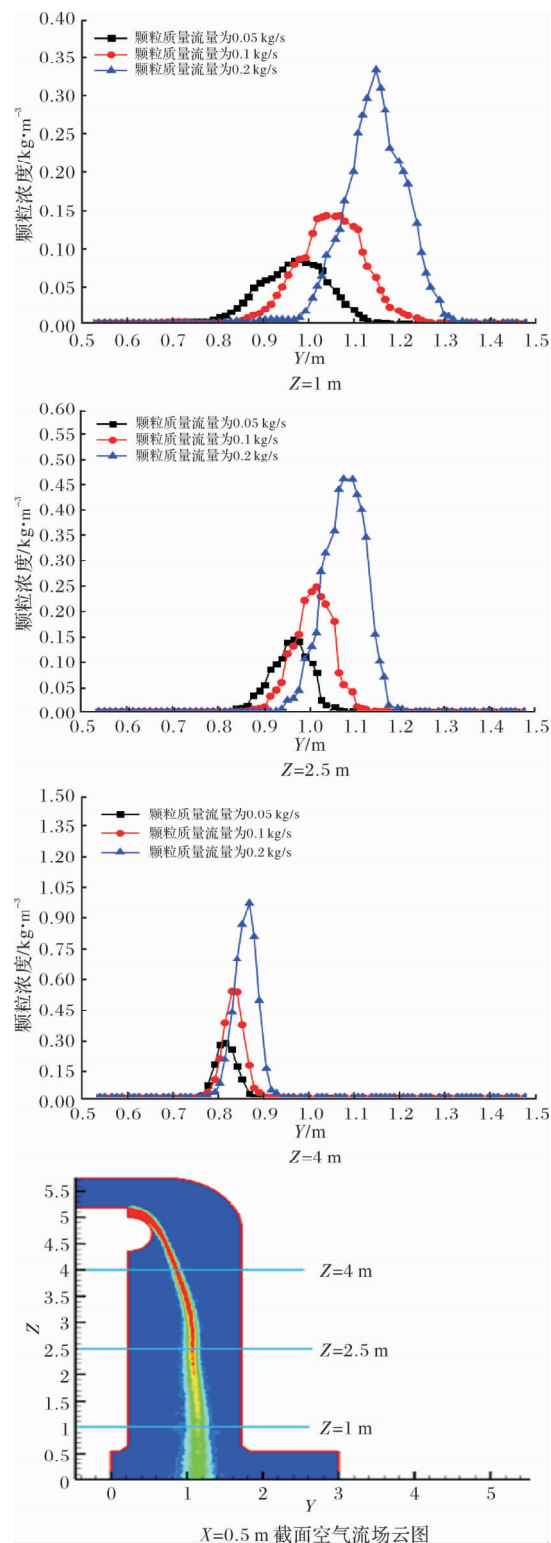


图7 不同断面颗粒物浓度随质量流量变化

Fig. 7 The particulate concentration varies with the particles mass flow at different cross sections

如图5所示,颗粒粒径对卷吸空气流场影响相对于质量流量较小.不同水平断面卷吸空气速度最大值基本保持在1.2 m/s左右.随着颗粒粒径增大颗粒流核心区向外侧平移(平抛方向).颗粒流下落过程中对两侧空气卷吸量由外侧大于内侧逐渐变为内侧大于外侧,但始终保持颗粒流核心区卷

吸空气的速度最大. 由断面 $Z=4\text{ m}$ 和 $Z=1\text{ m}$ 速度变化规律可知颗粒平抛初始阶段卷吸空气流场相对比较紊乱, 下落到一定高度后卷吸空气流场速度相对比较稳定, 规律为由颗粒流核心区向两侧逐渐减小接近两侧壁面前再逐渐增大.

如图6所示, 随着颗粒物密度增大, 卷吸空气最大速度逐渐减小. 密度越大颗粒水平运动距离越大. 颗粒密度对料流两侧卷吸空气影响与颗粒粒径、质量流量基本一致. 由 $Z=4\text{ m}$ 断面可知, 在颗粒平抛运动初始阶段随着颗粒密度增大卷吸空气强度明显减弱. 整个平抛下落过程中卷吸空气流场逐渐变得稳定, 始终保持在颗粒流核心区内卷吸空气速度值最大.

3.2 溜槽内颗粒物浓度分布

为了解转载溜槽内颗粒物扩散情况在竖直方向上选取 $Z=4\text{ m}$ 、 2.5 m 、 1 m 三个不同高度水平断面分别对不同颗粒流质量流量、粒径、密度情况下不同水平断面上颗粒物沿料流两侧扩散颗粒浓度分布特性进行了分析.

如图7所示, 在不同竖直断面上颗粒物浓度随质量流量增大明显增大. 颗粒流从断面 $Z=4\text{ m}$ 下落到断面 $Z=1\text{ m}$ 过程中, 由于空气的卷吸作用颗粒流核心区的颗粒物浓度明显减小, 质量流量越大减小越明显. 从不同断面料流核心区的位置可知颗粒物质量流量对颗粒流平抛下落过程中水平运动距离影响不大.

如图8所示, 平抛下落过程中颗粒粒径对竖直方向上不同高度断面内颗粒浓度影响较小, 在 $Z=4\text{ m}$ 和 $Z=1\text{ m}$ 断面上核心区颗粒物浓度最大值基本保持一致. 随着颗粒下落过程($Z=4\text{ m} \rightarrow Z=1\text{ m}$)料流核心区粉尘浓度逐渐减小, 粒径越小颗粒物越容易随卷吸空气向四周扩散. 由不同高度断面颗粒浓度分布图可知, 随着颗粒下落过程中粒径越小颗粒流核心区浓度减小越明显. 颗粒粒径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒流以水平初速度为 2 m/s 平抛下落 3 m ($Z=4\text{ m} \rightarrow Z=1\text{ m}$) 过程中比颗粒粒径为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒流水平扩散距离小接近 0.2 m .

如图9所示, 颗粒平抛下落过程中, 随着颗粒密度增大水平运动距离明显增大, 颗粒流向四周扩散能力明显减小. 颗粒密度为 2800 kg/m^3 的颗粒流以 2 m/s 水平速度平抛下落 3 m 过程中($Z=4\text{ m} \rightarrow Z=1\text{ m}$)水平运动距离比密度为 700 kg/m^3 的颗粒远接近 0.35 m . 整个下落过程中, 料流核心区颗粒浓度逐渐减小. 密度越大颗粒流核心区的保持能力越强越不容易向外扩散.

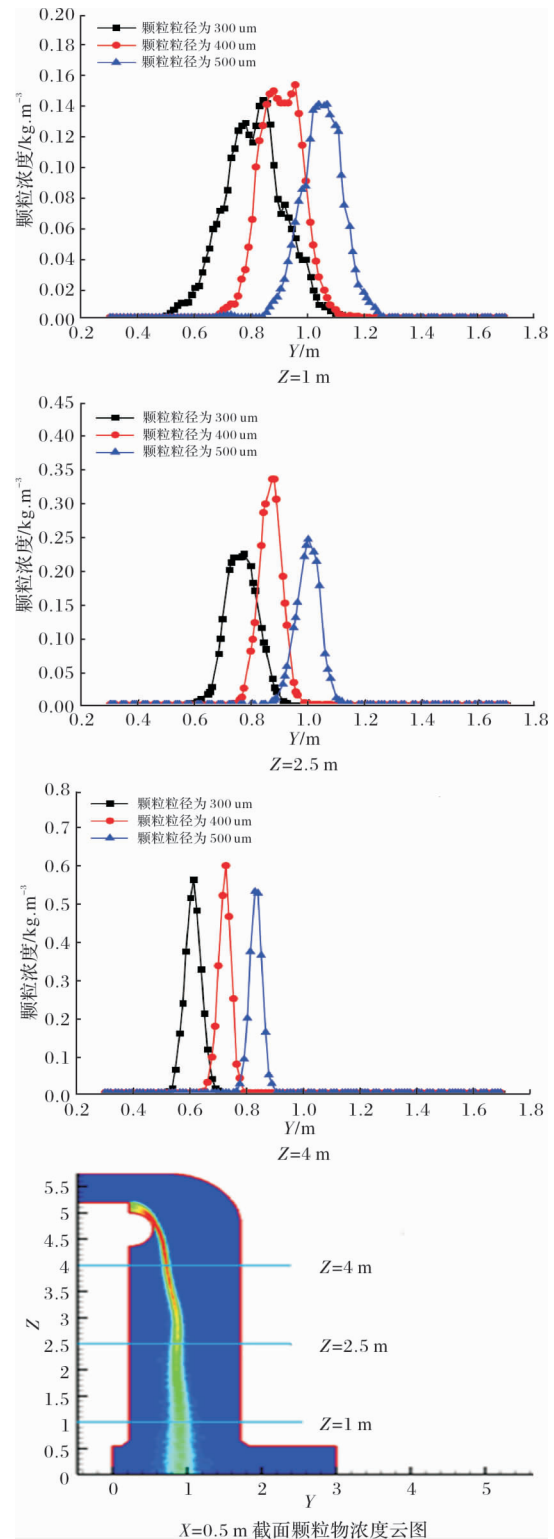


图8 不同断面颗粒物浓度随颗粒粒径变化

Fig. 8 The particulate concentration varies with the particles diameter at different cross sections

3.3 转载溜槽内颗粒物速度分布

以下三个图分别为颗粒的质量流量、粒径、密度对颗粒速度变化情况. 料流从 $Z=5\text{ m}$ 的上层皮带以水平速度 2 m/s 下落到 $Z=0\text{ m}$ 的下层皮带上. 由图10可知, 颗粒平抛过程中速度变化规律大体分为两个阶段, 在下落初始阶段颗粒的速度急

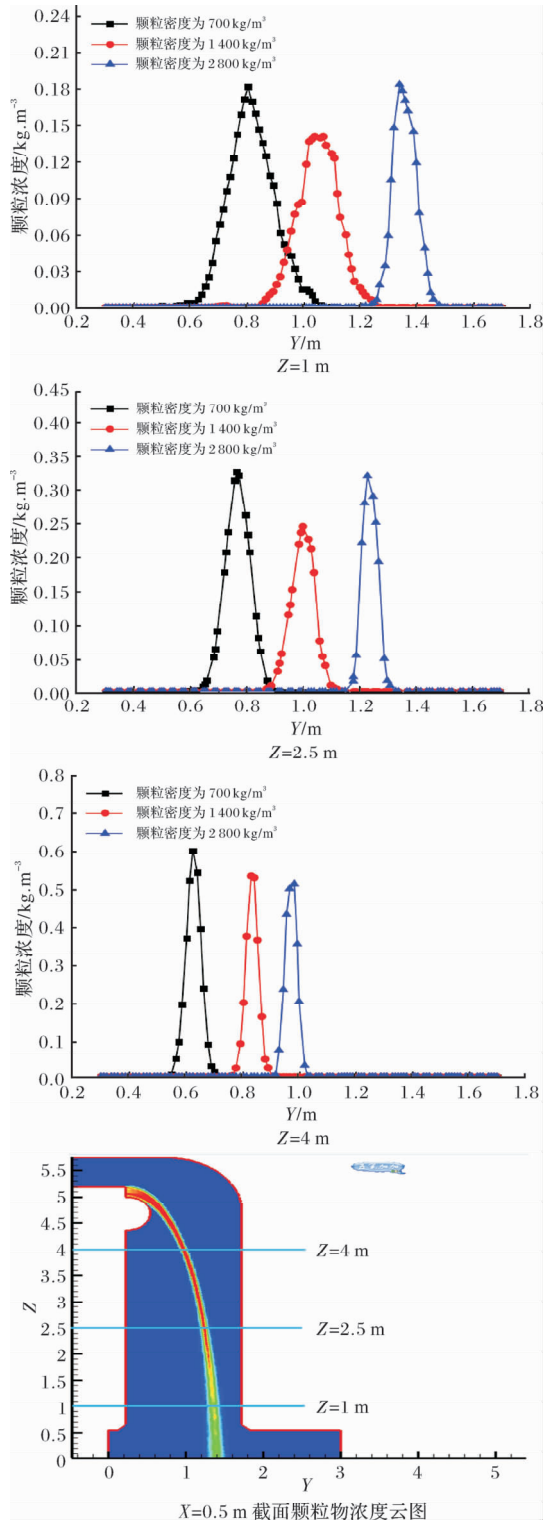


图9 高度方向不同断面颗粒物浓度随颗粒物密度变化

Fig. 9 The particulate concentration varies with the particles density at different cross sections

剧增加的加速阶段,随后颗粒速度基本保持在一定值的匀速阶段.出现这一现象的主要原因与颗粒流下落过程颗粒物与周围空气接触程度有关,下落初始阶段颗粒物未能与周围空气充分接触以致于空气对颗粒物的阻力作用小,颗粒物主要在重力作用下加速运动.随着下落高度的增加,颗粒与

空气充分接触受到空气的阻力也急剧增大,随着速度增大阻力也增大,最终在阻力与重力平衡的情况下以一定的速度匀速下落.从颗粒质量流量、粒径、密度对颗粒平抛运动速度的影响来看,颗粒密度对颗粒平抛运动速度影响最大,密度越大颗粒平抛下落速度增大的趋势越明显.颗粒密度为 2800 kg/m^3 时由 $Z=5 \text{ m} \rightarrow Z=0 \text{ m}$ 过程中颗粒速度由 2 m/s 增大到 5 m/s .颗粒密度为 700 kg/m^3 时由 $Z=5 \text{ m} \rightarrow Z=0 \text{ m}$ 过程中颗粒速度由 2 m/s 增大到 3 m/s .然而,随着颗粒质量流量和粒径增大颗粒平抛运动速度略微增大,增大到一定值后基本处于稳定.

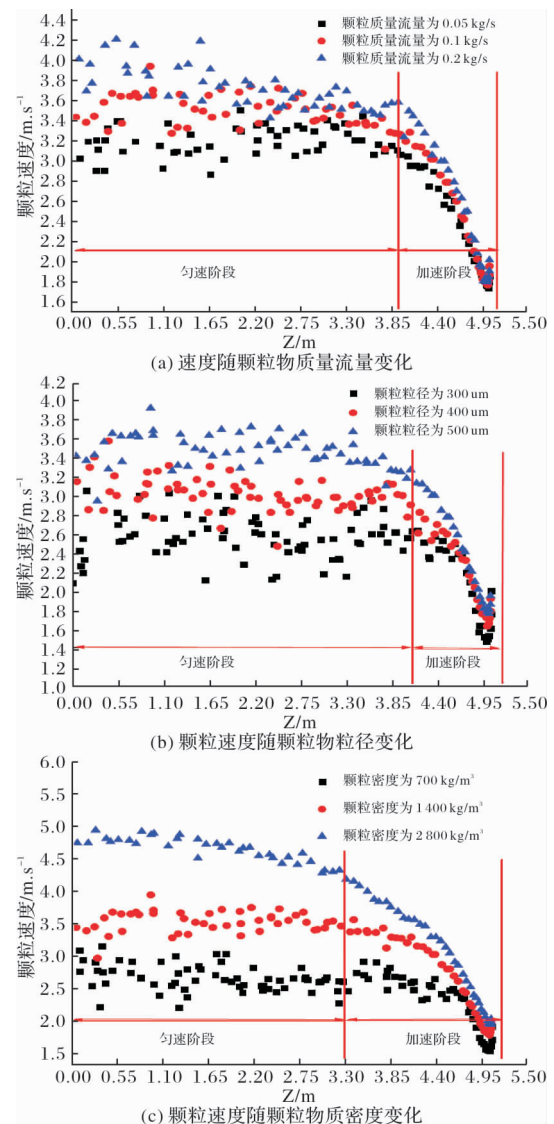


图10 颗粒物性对颗粒速度影响

Fig. 10 Effect of particle properties on particle velocity

4 结论

本文通过颗粒质量流量、粒径、密度对料流平抛运动过程中卷吸空气速度、颗粒浓度分布及

速度变化进行数值模拟研究得到以下几点结论.

(1)颗粒质量流量对卷吸空气速度影响最大,质量流量增大卷吸空气速度明显增大,颗粒质量流量由 0.05 kg/s 增大到 0.2 kg/s 在 $Z=4 \text{ m}$ 断面上卷吸空气最大速度由 0.65 m/s 增大到 1.6 m/s . 颗粒物密度和粒径增大,卷吸空气速度略微减小.

(2)颗粒质量流量对颗粒平抛运动过程中扩散情况影响不大.颗粒粒径和密度对颗粒平抛运动过程中扩散影响较大,密度为 2800 kg/m^3 颗粒流以 2 m/s 速度做平抛运动下落 3 m 过程中($Z=4 \text{ m} \rightarrow Z=1 \text{ m}$)水平扩散距离比密度为 700 kg/m^3 颗粒流小近 0.35 m . 密度和粒径越小颗粒物越容易从料核心区向外扩散.

(3)颗粒平抛运动过程中颗粒密度对颗粒速度影响最大,颗粒密度由 700 kg/m^3 增大到 2800 kg/m^3 颗粒末速度由 2.8 m/s 增大到 5 m/s , 密度越大颗粒速度增大幅度越大.颗粒物速度随着质量流量和粒径增大,平抛初始阶段速度增大较为明显,下落到一定距离后速度基本保持在一个稳定值.

参考文献 References

- [1] FEDORKO G, MOLNAR V, DOVICA M, et al. Analysis of pipe conveyor belt damaged by thermal wear [J]. Eng. Fail. Anal, 2014, 45:41-48.
- [2] HAMZELOO E, MASSINAEI M, MEHRSHAD N. Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks [J]. Powder Technology, 2014, 261:185-190.
- [3] 孙宏发, 李安桂. 转载溜槽内颗粒流斜抛运动过程颗粒扩散的数值模拟, [J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2):713-722.
SUN Hongfa, LI Angui. Numerical simulation of particle diffusion in process of particle stream oblique projectile motion in chute transfer [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2):713-722.
- [4] YOU Siming, HO Siew Wah, LI Tingting, et al. Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 361:237-244.
- [5] ECKHOFF C. Status and expected future trends in dust explosion research [J]. J. Loss Prev. Process Ind, 2005, 18(4-6):225-237.
- [6] CHAN J, HORVATH T, HORVATH T, et al. Dust suppression of phosphate rock, storage, conveyance and shipping [J]. Procedia Eng. 2012, 46:213-219.
- [7] HEMEON, WCL. Plant and Process Ventilation [M]. New York: The Industrial Press, 1963.
- [8] TOOKER G E. Establishing design criteria for Fugitive dust collection [J]. Bulk Solids Handling, 1985, 5(4), 865-869.
- [9] COOPER P, ARNOLD P. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material [J]. Powder & Particle, 1995, 13:125-134.
- [10] COOPER P, LIU. Z Q, GLUTZ, A. Air entrainment processes and dust control in bulk materials handling operations [C]//6th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Australia: The University of Wollongong, 1998.
- [11] OGATA K, FUNATSU K, TOMITA Y. Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment [J]. Powder Technology, 2001, 115(1): 90-95.
- [12] 王怡, 樊航, 任晓芬. 自由下落非均一粒径颗粒流的流场特性. [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版) 2015, 47(3):418-422.
WANG Yi, FAN Hang, REN Xiaofen. Flow characteristics of free-fall particles with non-uniform particle diameter [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition) 2015, 47(3):418-422.
- [13] 马云东, 罗根华, 郭昭华. 转载点粉尘颗粒扩散运动规律的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 16-18.
MA Yundong, LUO Genhua, GUO Zhaohua. Numerical simulation on application of diffuse regulation with power dust in transshipping site [J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(2):16-18.
- [14] JIN X, WANG Y, JU W. Investigation into parameter influence of upstream deflector on vertical axis wind turbines output power via three-dimensional CFD simulation [J]. Renewable Energy, 2018, 523:41-53.
- [15] TOMOMI Uchiyama. Numerical analysis of particulate jet generated by free falling particles [J]. Powder Technology, 2004, 145:123-130.

(编辑 吴海西 沈 波)