

包装技术与工艺

粉体在袋装充填过程中的扬尘规律

冯彬彬¹, 唐正宁^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 在不同充填高度下探究粉体扬尘的影响因素和分布规律。**方法** 基于气固耦合机理, 分析粉体在袋装充填时与空气的相互作用。采用 Fluent 软件, 选择 κ - ε 湍流模型与离散相模型模拟粉体下落扬尘过程。将颗粒浓度、空气流速和颗粒追踪占比 3 项作为分析依据, 确定粉体充填的合理高度。**结果** 扬尘主要由卷吸空气引起, 在粉袋内颗粒会产生大量回流; 粉体距袋口 80~480 mm 时充填扬尘量最小。**结论** 通过改变袋装充填的充填高度能有效减少粉尘的产生。

关键词: 粉体扬尘; 气固耦合; 袋装充填

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0105-05

Behavior of Fugitive Dust in the Process of Filling Powder in the Bags

FENG Bin-bin¹, TANG Zheng-ning^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influencing factors and distribution law of powdery fugitive dust under different filling heights. Based on the gas-solid coupling theory, the interactive effect between particles and air was analyzed during powder filling. The falling powdery fugitive dust was simulated by FLUENT under κ - ε turbulence model and discrete phase model (DPM). The particle concentration, the air speed and the particle tracking proportion were analyzed to confirm the reasonable height of powder filling. Air entrainment was the main factor resulting in fugitive dust, leading to plenty of backflow of particles in the powder bag. Moreover, when the power was 80 mm to 480 mm from the bag mouth, the filling amount of the fugitive dust was the minimum. The fugitive dust can be effectively decreased by changing the height of powder filling in the bag.

KEY WORDS: powdery fugitive dust; gas-solid coupling; filling

充填包装时, 粉体颗粒在下料口被释放, 并通过自由下落的方式进入包装袋。根据自由落体定律, 无论物体的形状和密度, 都将以相同的加速度直线下落。在实际下落的过程中, 粉体颗粒在袋内会出现翻滚, 形成粉尘云^[1]。这些粉尘云悬浮在包装袋内, 随着周围空气的扰动四溢。粉尘一旦溢出口袋, 不仅会造成环境污染, 损害操作工人的身体健康, 而且不利于包装袋内粉体的精确定量。目前, 主要通过降低粉体充填的下落高度或是在粉袋口增设除尘装置的方法来控制粉体充填时的扬尘量。

在国内外针对粉体自由下落的研究中, 粉尘的产

生原因主要归结为以下 2 个方面: 粉体在下落过程中受到周围空气的影响而脱离粉体流, 悬浮于粉体流的过渡层内^[2], 产生粉尘云; 下落的粉体颗粒与袋内颗粒、壁面相互撞击, 产生冲击扬尘, 悬浮于空气中^[3]。这些悬浮的颗粒极易受到袋内空气的扰动, 并随着气流四处扩散。特别是表观密度较小的粉体, 受到该方面的影响更加明显。文中基于粉体扬尘产生的本质, 通过理论分析和数值模拟, 旨在掌握袋装粉体扬尘的一般性规律, 并通过探究粉体不同的下落高度为控制扬尘的产生量提供理论参考。

收稿日期: 2016-07-16

作者简介: 冯彬彬 (1992—), 男, 江南大学硕士生, 主攻包装工艺与机械。

通讯作者: 唐正宁 (1963—), 男, 江南大学副教授、硕导, 主要研究方向为包装机械与印刷工艺。

1 气固耦合机理及数值模拟方法

粉体进行袋装充填时,积聚在一起的粉体颗粒以粉体流的形式自由下落。随着粉体下落,粉体流四周原本静止的空气会产生与粉体下落方向相反的扰流。在粉体流加速下落的过程中,其四周围绕的空气会被带入颗粒群,使粉体流内部产生卷吸空气。此时,由于颗粒外侧的空气阻力小于颗粒内侧空气阻力,使得空气在颗粒两侧流动不均,颗粒将产生向内旋转的趋势^[4]。随着粉体流在下落过程中速度不断加快,粉体流外侧的颗粒就会克服自身重力以及颗粒间的其他作用力,当达到或超过临界值时,颗粒就会脱离粉体流。这些被卷吸空气带出粉体流的颗粒将悬浮于空气中,随着周围空气的流动而扩散。在粉体下落的过程中,粉体流内部的外层颗粒会逐层与卷吸空气发生上述作用,并随着粉体流的不断加快,粉尘量也会逐渐增多。这种粉体卷吸空气、空气影响颗粒的现象的本质就是气固耦合作用^[5-6],见图1。

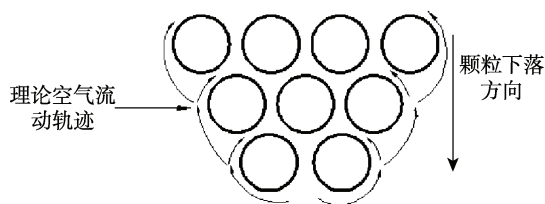


图1 气固耦合机理

Fig.1 Gas-solid coupling theory

在气固耦合的CFD理论中,目前主要有2种计算方法:欧拉-欧拉法,也称为颗粒相拟流体模型,该方法将颗粒视为具有连续介质特性的拟流体,与流体连续相在欧拉坐标系下求解;欧拉-拉格朗日法,也称为颗粒轨道法^[7],其主要将颗粒视为离散相,流体视为连续相,并在欧拉坐标系下建立Navier-Stokes方程组求解。欧拉-拉格朗日法能够直接对离散相颗粒的运动轨迹进行求解,并能反映每个颗粒的运动状态^[8-9]。

文中采用欧拉-拉格朗日模型进行求解。基于Fluent软件,使用 κ - ε 湍流模型与离散模型耦合(DPM)的方法求解,其中湍流动能 $\kappa(\text{m}^2/\text{s}^2)$ 和湍流动能耗散率 $\varepsilon(\text{m}^2/\text{s}^3)$ 表达式为^[10-11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \kappa)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\quad C_1 \rho E \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned}$$

式中: μ 和 μ_t 分别为层流和湍流动力粘性系数

(Pa·s), $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$; G_k 为湍流体积生成率($\text{kg}/\text{s}^3 \cdot \text{m}$),

$$G_k = 2\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; \quad E = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2;$$

C_1, C_2 和 C_μ 为经验常数; σ_ε 和 σ_k 为普朗特数,分别取用 κ - ε 湍流模型默认值; v 为绝对速度(m/s); u_i, u_j 分别为 i, j 方向速度。

结合实际情况,对模型作出如下假设^[12]:气体相视为连续相,且不可压缩;颗粒相视为离散相,且颗粒均视为球状;颗粒的体积率小于12%^[13],忽略颗粒与颗粒之间的作用;忽略粉袋袋底与颗粒之间的反射作用,将其视为流出捕获。

2 模型建立及仿真设置

文中根据淀粉材料下料充填的实际情况,主要模拟粉体从下料口出粉、自由下落至粉袋底部这一过程中粉体颗粒的扩散情况。根据粉体材料的一般充填水平(12 kg级粉袋每分钟充填2袋)设定粉体基本参数,即平均粒径为100 μm ,堆积密度为500 kg/m^3 ,充填速度为0.4 kg/s ,空气密度为1.225 kg/m^3 ,空气分子粘性系数(1个标准大气压(1 atm=101 325 Pa), 20 $^\circ\text{C}$ 的条件下)为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。根据Ogata^[14]给出的下料口径与颗粒质量流量的关系确定粉体下料口径为46 mm,计算式为:

$$M_p = 0.583 \rho_p (D - 1.4 d_p)^{5/2} \sqrt{g}$$

式中: M_p 为粉体下料的质量流量(kg/s); ρ_p 为颗粒的密度(kg/m^3); D 为下料直径(m); d_p 为颗粒直径(m); g 为重力加速度(m/s^2)。

根据速度公式得出粉体流从下料管道进入粉袋的速度为0.12 m/s,且粉体流内的空气初速度也为0.12 m/s。速度公式为:

$$v_0 = \frac{M_p}{\rho_p \pi r_0^2}$$

式中: v_0 为颗粒在下料口的初速度(m/s); r_0 为颗粒的下落半径(m)。

根据12 kg级的粉袋标准建立320 mm×120 mm×640 mm的粉体袋装充填模型,见图2a。其中,经机械手撑袋后粉袋模型内部空间类似为长方体,圆柱体充填管道伸入粉袋下料,充填管道下料口至袋底的距离是粉体自由下落的实际高度。在建立模型时,设置8组不同下落高度的粉袋模型,一方面可模拟不同下料高度产生的粉尘量,另一方面能得到距袋口不同距离下袋口逃逸的粉尘量。模型网格见图2b,粉袋模型结构简单,可以通过六面体网格为主导的方式自动划分网格,并对下料口和袋口边界作网格细化处理。

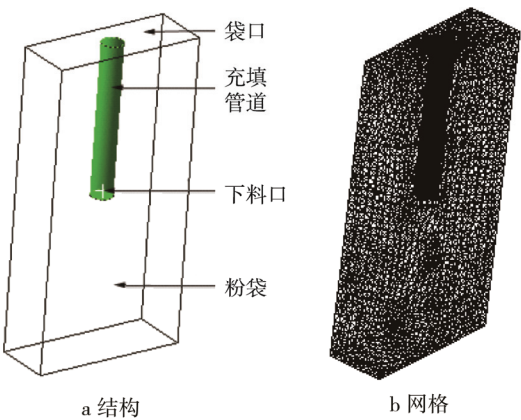


图 2 粉体袋装模型
Fig.2 Particle bag model

粉体在下料时，颗粒触到不同的模型边界后会以不同类型被记录。由于粉袋内颗粒与颗粒、壁面之间作用复杂，且 DPM 模型主要针对气体与颗粒的两相耦合，弱化了其他作用。为了便于探究粉体下落高度与粉尘云产生的关系，减小其他因素的干扰，需对模

型各边界进行简化设置：模型下料口边界类型为速度入口；出料口边界设定为自由流出；颗粒追踪类型为逃逸；对于模型的充填管道和粉袋，其边界类型均视为壁面；充填管道的颗粒追踪形式为反射；粉袋的颗粒追踪形式设置为捕获。

文中首先通过仿真得到颗粒在粉袋内的分布。其次采用二分法，在袋内设置 8 个距袋口的距离(S)，即 0，40，80，160，320，480，560，600 mm 来获取充填数据。继而将这 8 个面分别作为粉体下料的位置探究粉尘与充填距离的关系。在模型收敛后，计算各个面以及袋口的颗粒浓度(kg/m^3)和空气流速(m/s)。同时，在每次模拟中进行颗粒追踪，并按比例统计颗粒下落后的分布状态。

3 仿真结果及对比分析

根据仿真结果给出在 8 个不同高度下粉体充填的颗粒示踪轨迹，见图 3。由图 3 可知，粉袋中从粉体流逃逸出的颗粒主要集中在下料口和袋壁四周。在

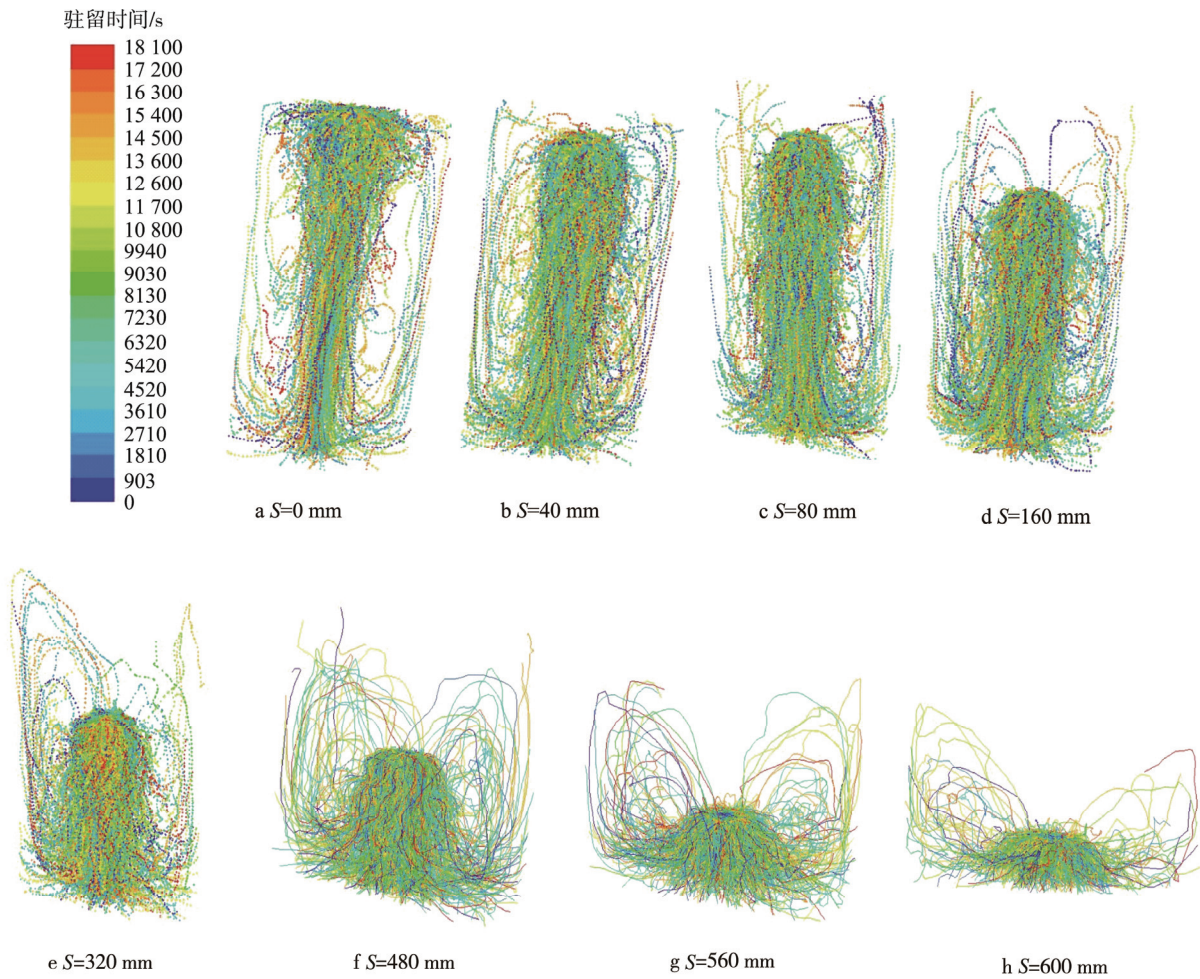


图 3 不同距离下充填颗粒的分布
Fig.3 Particle distribution in different distance filling

下料口附近,颗粒下落初速度较小,很多颗粒直接被气流带出粉体流,悬浮在下料口四周;随着粉体流下落,四周空气开始被卷吸入粉体流。颗粒被卷吸空气携出并沿着袋壁向上回流;随着下落高度降低,颗粒回流量也逐渐减少。

粉体在袋口($S=0$ mm)下料时袋内各截面的颗粒浓度与空气流速的比较见表 1,可知,袋内各层面的空气平均流速比较稳定,而颗粒浓度呈两极分布,且主要集中于距袋口 80 mm 内和袋底位置。和图 3a 进行对比可以发现,各截面不同速度下产生的卷吸空气所携带出的粉尘量相差不是很大,而袋口积聚的颗粒主要由颗粒回流和卷吸空气携出,袋底高浓度颗粒则是由粉体充填沉降产生。

表 1 袋口充填下各截面颗粒质量浓度与空气流速
Tab.1 Particle concentration and air speed in bag opening filling

距袋口距离 S/mm	颗粒质量浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	空气流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0	0.283	0.011
40	0.659	0.017
80	0.483	0.029
160	0.168	0.049
320	0.246	0.029
480	0.381	0.038
560	0.522	0.027
600	0.701	0.015
620	0.735	0.012

粉袋内各边界对颗粒的追踪结果见表 2。可以看出,在袋口下料时颗粒的逃逸比例非常高,且会有大量颗粒悬浮在袋中。由此可见,通过降低粉体充填高度能有效降低粉尘量。当下料口伸入袋中 40 mm 以上时,颗粒的逃逸比例和悬浮比例都大幅降低。

以上结果表明,卷吸空气是粉尘产生的主要原因,袋口四溢的粉尘是颗粒回流直接作用的结果。由

表 2 不同距离下充填颗粒的分布比例
Tab.2 Particle proportion in different distance filling

距袋口距离 S/mm	逃逸率	捕获率	悬浮率
0	10.36	23.06	66.58
40	0.83	97.87	1.30
80	0.55	97.76	1.69
160	0.37	97.94	1.69
320	0.03	97.83	2.14
480	0	97.91	2.09
560	0	98.20	1.80
600	0	99.51	0.49

表 1—2 可发现 640 mm 的高度对袋内各层面颗粒卷吸量的影响不是很大(颗粒质量浓度稳定在 $0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$),颗粒回流量也比较稳定(逃逸比例维持在 1% 以下)。袋口逃逸的高浓度粉尘量主要由下料口卷吸空气携出的颗粒回流积聚而成。

为了进一步探究粉尘量与粉体下落高度的关系,分别计算袋内 8 个不同位置粉体下落时各截面及袋口的颗粒浓度和空气流速,见表 3。当粉体下料口在距袋口 40 ~ 480 mm 时,下料口产生的粉尘量较小,且在 320 mm 左右达到最佳值。同时,当距袋口 40 mm 以上充填粉体时,颗粒溢出粉袋的量较少。随着粉体下料高度的降低,回流颗粒明显减少。一方面,下落高度降低后耦合空气的速度也相对减小,气流的动能不足以将袋内悬浮的颗粒带出粉袋,粉尘逃逸量降低;另一方面,下落高度降低后粉体流的下落速度也会减小,随之粉体流卷吸周围空气的量也会减小,相对被气流带出的颗粒量就会降低,悬浮颗粒就会减少^[15-16]。通过降低粉体下落高度后,袋内粉尘云得到有效减少。

表 3 不同距离下充填各截面颗粒质量浓度和空气流速
Tab.3 Particle concentration and air speed in different planes in different distance filling

距袋口 距离 S/mm	颗粒质量浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$		空气流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	下料面	出料面	下料面	出料面
0	0.283	0.283	0.011	0.011
40	0.084	0.011	0.036	0.015
80	0.063	0.008	0.04	0.01
160	0.065	0.007	0.04	0.007
320	0.041	0.001	0.043	0.002
480	0.083	0	0.032	0.001
560	0.131	0	0.026	0.001
600	0.178	0	0.021	0.001

表 3 还比较了在袋内不同位置下料时四周空气的流速,该速度反映了悬浮颗粒的运动情况。可以发现,下料位置距袋口越远,袋内空气流速也越小,即悬浮颗粒获得的速度也会越小。这主要是因为随着下料高度的降低,粉体流自由下落获得的动能变小,与卷吸空气产生的影响也会减弱。

4 结语

通过气固耦合的原理分析和模型仿真,主要得出如下结论:卷吸空气是粉体下落时扬尘产生的主要原因,通过降低粉体下落高度进而降低粉体流流速,卷吸空气速度也会下降,这样能有效减少粉尘产生;由于粉袋空间狭小,颗粒下落时随气体回流,增加了颗

粒逃逸量,当粉体下落高度低于 320 mm 后,空气获得的速度不足以将颗粒带出粉袋;在距袋口 80 mm 以上和距袋底 160 mm 这个区间内下料时,粉体流产生的粉尘影响较小,该区域能有效降低粉尘云的产生,减少粉尘的袋口逃逸量。以上得到的仿真结果与数据,显示出了气固耦合时粉体流的颗粒分布状态,且为粉体在袋装充填过程中充填口的设置提供了理论数据支持。

参考文献:

- [1] 王培敬. 从粉尘的沉降探讨提高粉状物料的包装速度——采用聚乙烯薄膜进行包装[J]. 中国包装, 1986(4): 7—8.
WANG Pei-jing. Explore the Packaging Speed of Powder Falling: Packaging with PE Film[J]. China Packaging, 1986(4): 7—8.
- [2] ANSART R, RYCK A, DODDS J A, et al. Dust Emission by Powder Handling: Comparison between Numerical Analysis and Experimental Results[J]. Powder Technology, 2009(1): 274—281.
- [3] 王锐, 陈斌. 三维格子湍方法模拟自由下落颗粒群[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(3): 499—502.
WANG Rui, CHEN Bin. Particle Group Simulation in Free Falling by Three-dimensional Grid[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(3): 499—502.
- [4] WARDJIMAN C, LEE A, SHEEHAN M. Shape of a Particle Curtain Falling in Stagnant Air[J]. Powder Technology, 2009(3): 384—388.
- [5] ALEKHINE F. Gas-particles Flow Transitions for High Density Powder[J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2012(1): 1820—1825.
- [6] CERECEDO L M, AISA L, BALLESTER J. Experimental Study on a Non-dilute Two-phase Coflowing Jet: Dynamics of Particles in the Near Flow Field[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(5): 468—483.
- [7] 王瑞金, 张凯. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
WANG Rui-jin, ZHANG Kai. Fluent Technological Base and Application Example[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [8] 陈伟. 基于离散单元法的砂轮磨料粉体流动性研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 67—70.
CHEN Wei. Flow Performance of Grinding Wheel Abrasive Powder Based on Discrete Element Method [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 67—70.
- [9] FERRANTE A, ELGHOBASHI S. On the Physical Mechanisms of Two-way Coupling in Particle-laden Isotropic Turbulence[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(2): 315—329.
- [10] OOI J Y, MAGNANIMO V, SUN J, et al. Particle Modelling with the Discrete Element Method[J]. Powder Technology, 2016(5): 293.
- [11] 叶涛. Fluent 软件在粉体颗粒混合领域中的应用[J]. 中国粉体技术, 2011, 15(3): 73—76.
YE Tao. Application of Fluent Code in Powder Mixing Field[J]. China Powder Science and Technology, 2011, 15(3): 73—76.
- [12] 郭帅伟, 邹树梁, 唐德文, 等. 开放空间中自由下落粉尘随水平风流运移扩散的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 266—271.
GUO Shuai-wei, ZOU Shu-liang, TANG De-wen, et al. Numerical Simulation of Free-floating Dust Migration and Diffusion in a Horizontal Wind in the Open Space[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(2): 266—271.
- [13] 袁竹林, 朱立平. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.
YUAN Zhu-lin, ZHU Li-ping. Gas-solid Flowing and Numerical Simulation[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012.
- [14] OGATA K, FUNATSU K, TOMITA Y. Experimental Investigation of a Free Falling Powder Jet and the Air Entrainment[J]. Powder Technology, 2001(5): 90—95.
- [15] 张桂芹, 刘泽常. 物料下落过程中随机性粉尘的产生特性及其数学模型[J]. 山东农业大学学报, 2008, 39(1): 114—118.
ZHANG Gui-qin, LIU Ze-chang. Emission Characteristics of Fugitive Dust Generation of Falling Material and Its Model[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2008, 39(1): 114—118.
- [16] ZHANG C, CHEN Q H, LIU J F, et al. Numerical Study on the Effect of Cold Powder Carrier Gas on Powder Stream Characteristics in Cold Spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2016(4): 177—185.