

机械与过程控制

粉体除静电离子风风场对粉体包装充填影响的模拟研究

孟坤鹏, 李永祥, 徐雪萌, 唐静静, 李飞翔, 陈静

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 研究外加离子风风场对粉体充填过程粉尘落袋的影响, 探究离子风机应用于粉体除静电包装的可行性。**方法** 基于气固耦合机理, 利用 Fluent 软件, 使用 κ - ε 湍流模型与离散相模型 (DPM), 模拟外加风场情况下粉体包装的粉尘落袋过程, 分析离子风风速对不同粒径粉尘颗粒捕获率的影响。**结果** 模拟结果显示, 在外加离子风风场风速 ≤ 0.4 m/s 时, 风场对粉尘颗粒捕获率影响较小, 在风速为 0.4~0.6 m/s 时, 对直径 1~30 μm 的粉尘颗粒的捕获率有明显的提升作用。**结论** 通过设置适当的离子风风速, 外加风场不会加剧粉体充填过程中出现的扬尘, 在粉体填充包装过程中使用离子风机消除静电是可行的。

关键词: 粉体包装; 气固耦合; 静电消除

中图分类号: TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)15-0170-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.027

Simulation Study on the Effect of Air Field of Powder De-static Ion on Powder Packing and Filling

MENG Kun-peng, LI Yong-xiang, XU Xue-meng, TANG Jing-jing, LI Fei-xiang, CHEN Jing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of ionic wind field on dust bagging in powder filling process, and to explore the feasibility of ionic fan applied in powder electrostatic packaging. Based on the mechanism of gas-solid coupling, the dust bagging of powder packaging was simulated by the κ - ε turbulence model and the discrete phase model (DPM) through Fluent software, and the effects of different ion wind speed on the capture rate of dust particles in different particle sizes were analyzed. The simulation results showed that when the wind speed of the applied ionic wind field was ≤ 0.4 m/s, the influence of the applied wind field on the dust particle capture rate was small. When the wind speed was in the range of 0.4 m/s-0.6 m/s, the capture rate of dust particle with particle diameter of 1 micron to 30 micron was obviously increased. Setting appropriate ion wind speed will not aggravate the dust in the powder filling. It is feasible to use ion blower to eliminate static electricity in the powder filling and packaging.

KEY WORDS: powder packaging; gas-solid coupling; electrostatic elimination

粉体在进行包装填充时, 会形成固气沉淀系统, 粉体颗粒由下料口释放, 在落袋的过程中会与空气的流动互相产生影响, 在包装袋内翻滚形成粉尘云^[1]。

粉尘云的存在会带来许多负面的影响。外界气流的扰动很容易使悬浮在包装袋内的粉尘云向包装袋外部飞散, 影响包装定量的精度和袋口的封装质量。四散

收稿日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0400704); 河南省科技厅自然科学基金项目 (182102110163)

作者简介: 孟坤鹏 (1993—), 男, 河南工业大学硕士生, 主攻包装机械。

通信作者: 李永祥 (1960—), 男, 河南工业大学教授、博导, 主要研究方向为粮食机械及理论。

的粉尘还会造成生产环境的污染,对生产人员的健康产生危害。另一方面,在粉体的输送和包装过程中,粉体内部颗粒的碰撞以及粉体与输送管壁之间的摩擦,会使得粉体颗粒产生静电^[2]。由于同种电荷的互斥作用,粉体中静电的存在,会加剧上述粉体落袋时的扬尘现象^[3],因此粉体包装过程中引入除静电系统,有效去除粉体静电,可以保证包装质量,消除安全隐患。

在粉体包装中,对静电进行防治所采取的方法一般有:包装机接地、调节包装环境空气湿度、加装静电消除设备。离子风机静电消除器是一种常见的静电消除设备,它是根据尖端放电和正负电“中和”原理设计制造的,广泛应用于电子产品生产领域。其利用电晕放电,使空气发生电离产生大量的正负电荷,并通过送风系统将电离了的空气向外部输送,气流中的正负电荷会与物体上的异种电荷相互中和从而消除静电。它可以消除绝缘材料及物品上的静电。离子风机静电消电器风量大小可以调节,可以根据实际情况进行具体设置。

即使是常规条件下电的良导体材料(如镁、铝等),在制备成粉体后由于粉体自身所具有的特性,粉体内部颗粒在进行输送和包装的过程中大多会处于悬浮状态,使得粉体颗粒总是处于一个相对绝缘的状态,所以粉体内部会产生和累积静电^[4]。文中将离子风机静电消除器引入粉体包装的过程中,以消除下落粉体的静电,在保证离子风风量足够的前提下,尽可能降低外加离子风风场(后文简称风场)的气流扰动对粉体落袋过程的影响,如果能同时提高粉体的落袋效率则更好。文中基于落袋过程中粉体扬尘产生的本质,通过理论分析和数值模拟,旨在掌握外加风场时对袋装粉体扬尘的影响规律,探究将离子风机引入粉体包装填充工位进行静电消除的可行性。

1 气固耦合机理及数值模拟方法

在对粉体进行填充包装时,粉体中颗粒自由下落的形式是粉体流。粉体在落袋的过程中,会与四周的空气发生相对运动,下落过程会受到空气扰动的影响,气流在粉体流内部颗粒间进行流动时会受到很大的阻力,粉体颗粒外侧空气的流速将大于内侧,使颗粒产生向内旋转的趋势^[5]。粉体流在重力的作用下会加速下落,粉体颗粒两侧的气流速度差也会随之增大,达到一定程度后会使之从粉体流中脱离悬浮于空气中,并随着气流向四周扩散。这种空气与粉体颗粒相互影响现象的本质就是气固耦合作用^[6-7]。

在气固耦合中求解多相流的方法一般有 2 种,分别是欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法。颗粒的运动轨迹是文中关注的重点,在这 2 种方法中,欧拉-拉格朗日法更适合于此。文中研究使用的 DPM 模型,采

用的计算思路就是欧拉-拉格朗日法,首先将空气流场分布计算出来,将离散相中每个颗粒的受力情况和流场变量进行联合求解,最终得到颗粒的速度和运动轨道^[8-10]。

研究中使用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型与离散相模型进行耦合求解,与标准的 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型相比,RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型对湍流动能耗散率表达式中的模型常量进行了改变,模型的其他部分与标准的 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型相同。RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型中关于湍流动能 κ (m^2/s^2) 和湍流动能耗散率 ε (m^3/s^3) 的表达式为^[11-12]:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\text{RNG}} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\text{RNG}} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (2)$$

式中: μ 为层流动力粘性系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), μ_t 为湍流动力粘性系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), $\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$; G_κ 为湍流体积生成率 ($\text{kg}/(\text{s}^2\cdot\text{m})$); $C_{1\text{RNG}}, C_{2\text{RNG}}$ 为经验常数; σ_κ 和 σ_ε 为普朗特数; v 为绝对速度 (m/s); u_i, u_j 分别为 i, j 方向的速度。

为了便于模拟和计算,现对模型作如下假设^[13]:空气不可压缩;不考虑粉体颗粒外形差异,均视为球体;忽略静电作用,默认粉体中的静电已被完全消除,只模拟风场对粉尘颗粒的影响;忽略粉体颗粒间的作用力,且颗粒的体积分数不超过 12%^[14];粉体进行填充包装时,包装袋呈长方体形状;忽略包装袋对粉体颗粒的反射作用。

2 模型建立及仿真设置

文中根据粉体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,外加风场对粉尘颗粒运动和捕获情况的影响。

设定相关基本参数,选择包装粉体为小麦粉,依照实际情况,取较低的粉体包装速度。设定单个 25 kg 级粉袋填充时长为 19 s,则有粉体的堆积密度为 520 kg/m^3 ,颗粒密度为 1960 kg/m^3 。由于面粉粒径大小差异较大,为简化计算,设颗粒直径为 50 μm ,充填速度为 1.32 kg/s ,连续相流体为空气,查阅资料可知,在标准大气压下 $p=101.32$ kPa 时,空气密度为 1.21 kg/m^3 ,空气的动力粘度为 18.0 $\text{MPa}\cdot\text{s}$ (温度取 20 $^\circ\text{C}$)^[15]。根据粉体颗粒质量流量与下料口之间的计算关系^[16],如式(3)所示,代入数据计算后可得下料口直径为 72 mm。

$$M_p = 0.583 \rho_p (D - 1.4 d_p)^{\frac{5}{2}} \sqrt{g} \quad (3)$$

式中: M_p 为粉体下料的质量流量 (kg/s); ρ_p 为粉体的堆积的密度 (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)。

由式 (4) 可以, 得出在进行填充包装时粉体流的速度为 0.62 m/s , 则模型中空气的初速度也为 0.62 m/s 。

$$v_0 = \frac{M_p}{\rho_p \pi r_0^2} \quad (4)$$

式中: v_0 为颗粒在下料口的初速度 (m/s); r_0 为下落颗粒所在的管道半径 (m)。

外加风场出风口的湍流强度 I 按照式 (5) 进行计算:

$$I = 0.16(Re)^{-\frac{1}{8}} \quad (5)$$

式中: I 为湍流强度; Re 为雷诺数。

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度 (kg/m^3); v 为流体的平均流速 (m/s); D 为管道的水力直径 (m); μ 为流体的动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

仿真主要针对外加风场对装袋过程中粉尘颗粒的影响, 因此仿真模型建立为粉体包装袋内。根据粉体包装袋标准^[17]建立了 25 kg 级粉袋模型。其尺寸为 $350 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 560 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 见图 1。其中, 距袋口 60 mm 的区域被预留为封口区域。

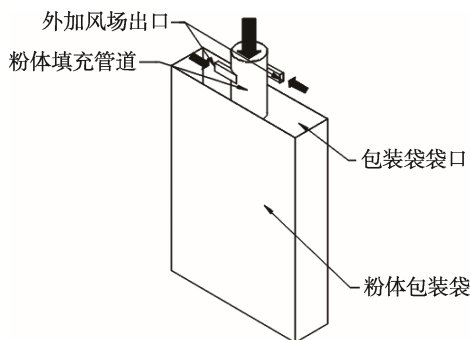


图 1 模型结构
Fig.1 Model structure

模型中填充管道下料口伸入包装袋的距离为 50 mm 。离子风机吹风口的规格设置为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽) 且与粉体输送管道垂直相切。通过对比不同风速情况下袋子对不同粒径粉尘的捕获率, 来确定外加风场对粉体落袋粉尘的影响。模型的网格见图 2。

为了便于探究外加风场对落袋粉尘的影响, 粉体在进行落袋模拟时, 颗粒碰到不同的边界将会被记录为不同的类型, 对模型的各边界进行简化设置, 见表 1。

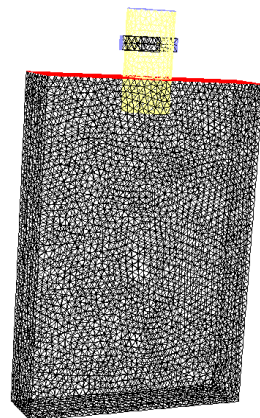


图 2 模型网格
Fig.2 Model grid

表 1 各模型边界所设置的颗粒追踪类型
Tab.1 Types of particle tracing set at the boundary of each model

模型边界	边界类型	颗粒追踪类型
下料口	速度入口	反射
袋口	壁面	逃逸
袋壁	壁面	捕获
袋底	壁面	捕获

该研究通过改变离子风机出风口风速的大小, 得到不同情况下包装袋对粉尘颗粒的捕获效率, 探究外加风场对粉体落袋时产生粉尘的影响, 从而论证粉体包装工艺过程中, 在充填工位通入离子风进行粉体静电消除的可行性。

3 仿真结果及对比分析

在未添加风场时, 落袋模型空气流场速度分布见图 3a, 根据仿真结果, 可以看出气流主要沿袋子两边向外流出并呈对称分布。此时对颗粒直径为 $10 \mu\text{m}$ 的粉尘颗粒进行颗粒追踪后得到的颗粒运动情况见图 3b, 由于颗粒的粒径较小, 颗粒质量小, 受风场分布影响较大, 此时包装产生的粉尘颗粒运动规律主要表现为沿着袋子两边的风场向外飞散。

在出风口添加风速为 0.4 m/s 的风场后, 得到的整体落袋模型风场速度分布见图 4a, 直径 $10 \mu\text{m}$ 粉尘颗粒运动情况见图 4b。

通过对比可以看出, 在添加风场后, 虽然较原来的空气流场来说袋子内部气流最大速度有所增加, 但袋子内部气流的速度差较原来有所下降。从对颗粒直径为 $10 \mu\text{m}$ 的粉尘颗粒进行追踪后得到的颗粒运动情况也可以看出, 对比原来的运动轨迹, 此时的粉尘颗粒更容易实现落袋。

为了验证不同风速对粉尘颗粒落袋效率的影响, 将风机的出风口设置为垂直于粉体输送管道, 将风速设置在 $0.1 \sim 1 \text{ m/s}$, 以 0.1 m/s 为间隔, 分别对直径为 $1, 10, 20, 30, 40, 50 \mu\text{m}$ 的粉尘颗粒进行轨迹追

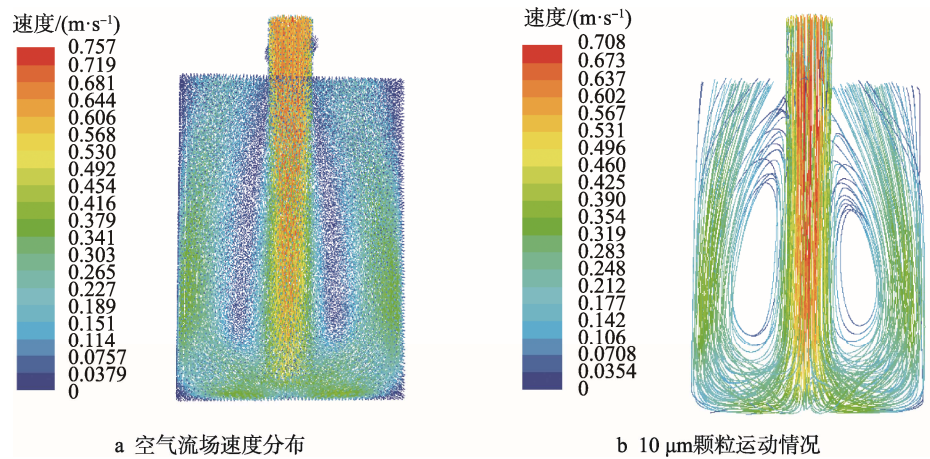


图 3 出风口未添加风场的模拟结果
Fig.3 Simulation result of the outlet without wind field

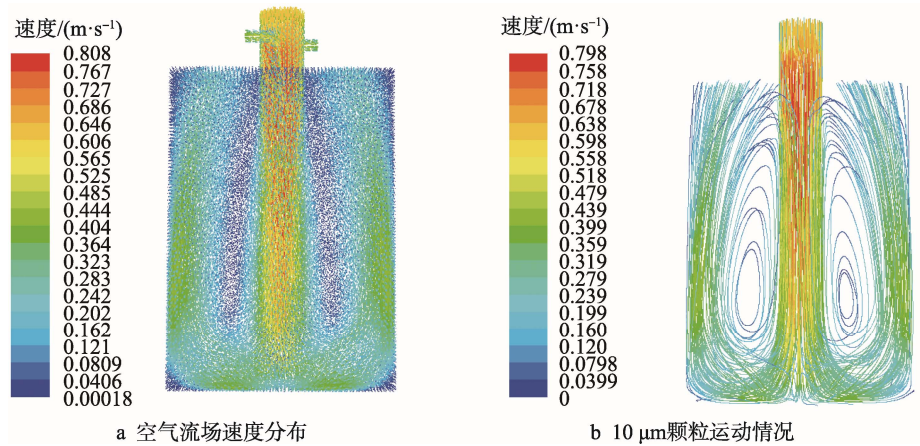


图 4 出风口添加风速为 0.4 m/s 的风场的模拟结果
Fig.4 Simulation results of the outlet with wind field speed of 0.4 m/s

踪,并对不同情况下的捕获率进行统计,捕获率的计算方式为口袋捕获的颗粒数目与颗粒总数目之比,将数据绘制成折线图,见图 5。

从图 5 可以看出,对于颗粒直径为 40, 50 μm 的粉尘颗粒,在未加风场时其捕获率较高;在添加风场后,在风速较低时颗粒捕获率比较稳定,风速超过 0.4 m/s 时,其捕获率会有所下降。这是因为粒径大的颗粒由于其自身质量较大,风速低时对其捕获效率的影响有限,风速高时由于外加风场加快了颗粒流的速度,颗粒动能增加,使得颗粒更容易向袋外飞散,从而降低了颗粒的捕获率。

同样的风场对不同粒径的粉体颗粒来讲,其落袋捕获效率是不同的,粉尘颗粒直径越大、颗粒质量越大,初始状态下受重力影响越大,其捕获率越高,这也与实际情况相符合。同时在对粉体包装管道添加风场后,不同的风速下,相同粒径的粉尘颗粒的捕获效率也是不同的,从图 5 上可以看出,虽然有些波动,但整体呈现一些规律:每个颗粒直径的捕获率会出现先升高后下降的趋势,且颗粒直径越大,捕获率出现上升段时所用风场的风速越小;在风速较低(小于

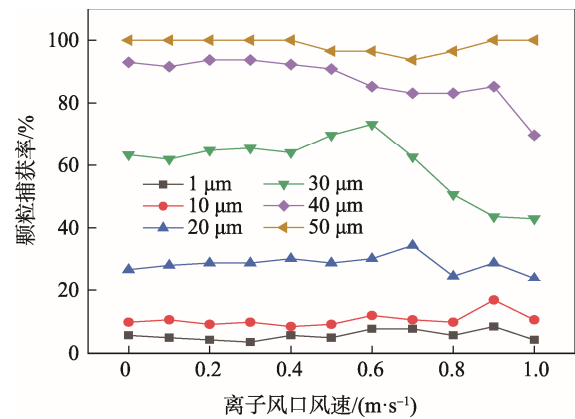


图 5 出风口在不同风速下不同粒径颗粒的捕获率
Fig.5 Capture rates of particles in different sizes at different wind speed

0.4 m/s) 时,外加风场后对各粒径颗粒的捕获率影响较小,在风速较高(大于 0.6 m/s)时,外加风场后会出现粉尘颗粒捕获率降低的现象;风速在 0.4~0.6 m/s 范围时,外加风场会有利于颗粒直径小于等于 30 μm 的粉尘颗粒的落袋,即存在一个风速区间,不

仅不会增加粉体包装过程中的扬尘,反而会提高粉尘颗粒的捕获率。这个风速区间的存在,使得将离子风机应用于粉体包装填装管道成为可能。

4 结语

论证了粉体包装工艺过程中,在充填工位通入离子风进行粉体静电消除的可行性,若所需风量不大,将风速控制在 0.4 m/s 以内,对粉体颗粒的落袋情况影响较小;若所需风量较大时,将风速设置在合理范围内,即 0.4~0.6 m/s,会提高粉尘颗粒落袋率,减少包装过程中的扬尘。

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] MEHRANI P, BI H T, GRACE J R. Electrostatic Charge Generation in Gas-solid Fluidized Beds[J]. Journal of Electrostatics, 2005, 63(2): 165—173.
- [3] MANAFI M, ZARGHAMI R, MOSTOUFI N. Effect of Electrostatic Charge of Particles on Hydrodynamics of Gas-solid Fluidized Beds[J]. Advanced Powder Technology, 2019(1): 10.
- [4] 党君祥, 李刚, 邓照帆. 粉体静电起电的试验研究[J]. 中国粉体技术, 2001(3): 11—13.
DANG Jun-xiang, LI Gang, DENG Xu-fan. Experimental Study on Electrostatic Electrification for Powders in Vibration Sieve[J]. China Powder Science and Technology, 2001(3): 11—13.
- [5] WARDJIMAN C, LEE A, SHEEHAN M, et al. Shape of a Particle Curtain Falling in Stagnant Air[J]. Powder Technology, 2009, 192(3): 384—388.
- [6] FAUQUET-ALEKHINE P. Gas-particles Flow Transitions for High Density Powder[C]// Proceedings of the World Congress on Engineering, 2012.
- [7] CERECEDO L M, AÍSA 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.
- [8] 于勇, 张俊明, 姜连田. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [9] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
ZHU Hong-jun. FLUENT 15.0 Flow Field Analysis Practical Guide[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [10] CAX 技术联盟, 郑力铭. ANSYSFluent 15.0 流体计算从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
CAX Technical Alliance, ZHENG Li-ming. ANSYS Fluent 15.0 Fluid Computing from Introduction to Proficiency[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2015.
- [11] OOI J Y, MAGNANIMO V, SUN J, et al. Particle Modelling with the Discrete Element Method: A Success Story of Pardem[J]. Powder Technology, 2016, 293: 1—2.
- [12] 李军, 陈辉, 戚蓝, 等. 三种紊流模型模拟溢流坝泄流精度的对比分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 73—75.
LI Jun, CHEN Hui, QI Lan, et al. Study on Hydrodynamic Characteristics and Water Diversion Scale from Niulan River to Caohai in Dianchi Lake[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 73—75.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [16] ZHANG C, CHEN Q, LIU J, et al. Numerical Study on the Effect of the Cold Powder Carrier Gas on Powder Stream Characteristics in Cold Spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 294: 177—185.
- [17] GB/T 8946—2013, 塑料编织袋通用技术要求[S].
GB/T 8946—2013, General Technical Requirements for Plastic Woven Bags[S].