

抽气压力对阀口袋粉体充填效果的影响

刘晓东^{1a}, 卢立新^{1a,1b}, 王利强^{1a,1b}, 潘嘹^{1a,1b}, 徐立敏²

(1.江南大学 a.机械工程学院 b.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2.江苏创新包装科技有限公司, 江苏 扬州 225600)

摘要: **目的** 探究阀口袋充填过程中抽气压力变化对包装内粉体运动规律、飞粉浓度、颗粒捕获率及包装密实度的影响, 以典型工业用粉氢氧化锂为研究对象, 寻找其最佳充填工艺。**方法** 基于气固耦合机理, 应用 Ansys Fluent 中的 Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散相模型对阀口袋在 5 种不同抽气压力下的充填抽气过程进行仿真模拟, 设置抽气装置对粉体的捕获率、包装内的密实度及飞粉浓度作为评判标准。**结果** 抽气压力增加将导致颗粒在充填抽气口附近聚集, 提高包装内的飞粉浓度、颗粒捕获率及包装密实度; 抽气压力为 0.04~0.06 MPa 时, 阀口袋内的飞粉浓度和颗粒捕获率相对较低, 且包装密实度可达 90% 以上。**结论** 通过设置合适的抽气压力范围, 可保证在进行粉体充填时袋内的飞粉浓度、颗粒捕获率较低, 同时保证包装内适当的密实度。

关键词: 抽气压力; 气固耦合; 飞粉浓度; 密实度; 颗粒捕获率

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)19-0166-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.024

Effect of Pumping Pressure on Powder Filling of Valve Bag

LIU Xiao-dong^{1a}, LU Li-xin^{1a,1b}, WANG Li-qiang^{1a,1b}, PAN Liao^{1a,1b}, XU Li-min²

(1a.School of Mechanical Engineering b.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Innovative Packaging Technology Co., Ltd., Yangzhou 225600, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of the change of the pumping pressure during the filling process of the valve bag on the powder movement in the package, the concentration of flying powder, the particle capture rate, and the compactness of the package and find out the optimum filling process with the typical industrial powder lithium hydroxide as the research object. Based on the gas-solid coupling mechanism, the Realisable $k-\varepsilon$ turbulence model and discrete phase model in Ansys Fluent were used to simulate the filling and pumping process of the valve bag under 5 different pumping pressure. The particle capture rate, compactness in the package, and flying powder concentration were set as the evaluation criteria. Increasing the pumping pressure caused particles to be collected near the filling extraction port, and improved the concentration of flying powder in the package, the rate of particle capture, and the compactness of the package at the same time. When the pumping pressure was 0.04~0.06 MPa, the flying powder concentration and particle capture rate in the valve bag were relatively low, and the compactness of the package could reach more than 90%.

收稿日期: 2019-12-26

基金项目: 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主资助基金(FMZ201902)

作者简介: 刘晓东(1995—), 男, 江南大学博士生, 主要研究方向为包装工艺与机械。

通信作者: 卢立新(1966—), 男, 博士, 江南大学教授, 主要研究方向为食品包装技术与安全、包装系统与装备等。

By setting an appropriate range of pumping pressure, the flying powder concentration and particle capture rate in the bag can be guaranteed to be low during the powder filling process, and the appropriate compactness in the package can also be guaranteed.

KEY WORDS: pumping pressure; gas-solid coupling; flying powder concentration; compactness; particle capture rate

阀口袋具有运输方便、密封性好、包装效率高及破损率低等特点, 已被广泛应用于医药、化工粉体产品包装中。粉体特别是超细粉体内含有大量气体, 为保证包装充填速度及精度, 在充填时须进行抽气处理。

粉体充填抽气过程中, 包装内气体流动复杂, 气相与颗粒相的运动相互耦合, 实际充填过程中难以对包装内的粉体流动进行检测观察。近年来, 有研究采用模拟仿真方法对气固两相流进行流场分析, 既能获得包装内的粉体流动参数同时节约试验成本。冯彬彬^[1]、孟坤鹏^[2]应用 Fluent 软件中的 DPM 模型, 模拟了敞口袋中粉体的充填过程; Nwose^[3]、Guo^[4]基于 DEM-CFD 耦合的方法模拟药剂粉末在真空中充填进模具的过程。上述研究聚焦粉体充填过程的仿真模拟, 并未涉及粉体充填中的抽气过程。

为了保证充填质量及包装密实度, 阀口袋充填过程中需进行抽气处理, 抽气压力大小影响包装充填质量。抽气压力过大, 导致过多粉体颗粒被抽气装置携带至包装外, 降低充填效率; 抽气压力过小则会导致包装内的含气率过高, 影响包装密实度。同时抽气导致包装内粉体飞粉浓度过高, 卸袋过程中包装内的含尘气体会顺着阀口流出, 污染环境。目前有研究通过抽气机构^[5-6]实施生产过程的抽气, 但无法控制抽气压力和抽气效果。

文中应用 Ansys Fluent 软件对阀口袋内粉体的充填及抽气过程进行仿真模拟, 分析抽气压力对包装内飞粉颗粒浓度分布、包装密实度及颗粒捕获率的影响, 旨在掌握抽气影响包装内气固两相运动中颗粒运动的一般规律, 为粉体充填工艺的优化提供依据。

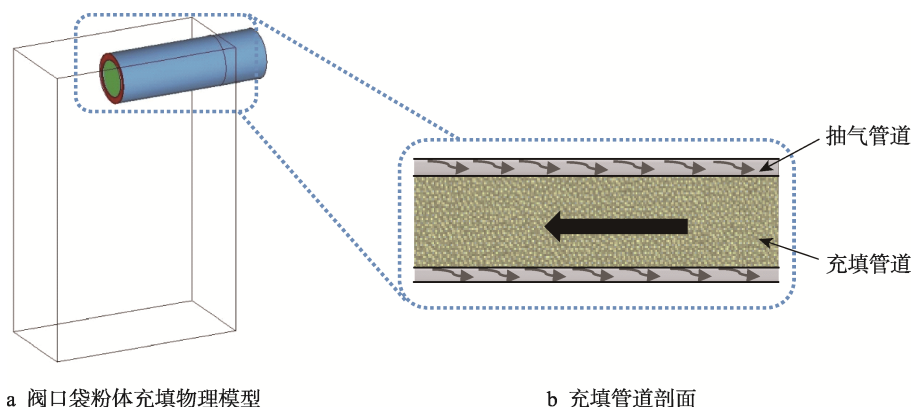
1 阀口袋粉体充填物理模型

根据阀口袋充填的实际情况, 建立含气超细粉料充填过程的物理模型。粉体包装尺寸为 560 mm×350 mm×170 mm, 阀口袋充填管道直径为 95 mm, 包含 2 层结构, 内层直径为 70 mm, 其与料仓相连用于粉体充填, 外层与真空泵相连抽取包装内的气体。物理模型见图 1a, 管道剖面图见图 1b, 在充填时, 粉体颗粒通过充填管道进入包装内, 气体通过抽气管道排出到包装外。

2 粉体充填的数值模型

2.1 气固耦合理论

粉体在包装内自由下落时, 会将四周空气带入粉体流内部, 在其周围产生与下落方向相反的扰流。随着下落距离的增加, 越来越多的空气被卷吸到粉体流内部, 空气在粉体流内部流动时受到的阻力较大, 导致颗粒两侧的空气速度不一致, 颗粒产生内旋的趋势^[7]。粉体下落过程由于受到重力的影响下落速度会越来越快, 颗粒两侧的速度差值随之增加, 当超过临界值时, 颗粒流外侧颗粒则会克服重力及颗粒间作用力向四周扩散开去。在阀口袋包装内, 由于增加了抽气过程, 包装内的气体流动更为复杂, 空气更易进入粉体流内部, 导致更多的颗粒脱离粉体流整体, 脱离粉体流的颗粒又影响着包装内空气的流动状态, 这种空气与颗粒之间相互作用相互影响的本质就是气固耦合作用^[8-9]。



a 阀口袋粉体充填物理模型

b 充填管道剖面

图 1 阀口袋粉体充填物理模型及充填管道剖面

Fig.1 Physical model of powder filling in valve bag and sectional view of filling pipeline

在气固耦合理论中求解多相流的方法为2种,一种是欧拉-欧拉法,此方法将颗粒相视为流体,与空气相一起在欧拉坐标系中进行求解;另一种则为欧拉-拉格朗日法,其与第1种方法不同的是,将颗粒相视为离散相,空气仍视为连续相,两相在欧拉坐标系下联立 N-S 方程组进行求解^[10]。欧拉-拉格朗日法能够显示颗粒相的运动轨迹,且能反应每个颗粒的运动状态^[11-12]。

2.2 数学理论模型

为分析颗粒的运动规律需了解颗粒在包装内的运动轨迹,因此选择欧拉-拉格朗日法。在 Ansys Fluent 中选取采用欧拉-拉格朗日法的离散相模型(DPM)和 Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行耦合求解。

2.2.1 流体相控制方程

粉体充填抽气过程中,包装内气体流动复杂,仿真模拟中标准 $k-\varepsilon$ 模型难以真实反应包装内气体流动情况。Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型相较于标准 $k-\varepsilon$ 模型,其在回流、大曲率过流表面和强旋度等情况下可更好地预测湍流特性,与实际情况更接近,因此选择 Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型中,其湍流动能 k (m^2/s^2) 和湍流耗散率 ε (m^2/s^2) 的表达式为^[13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

式中: μ 为分子的粘性系数; μ_t 为湍流粘性系数; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率所产生的影响; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为浮力所引起的湍动能; ρ 为流体的密度; σ_k 为耗散率 ε 和湍动能 k 的湍流普朗特数; x_i, x_j 为坐标粉量; S_k 为自定义模型源项。

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: $C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 均为常数, $C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right)$; $S = (2S_{ij} \cdot S_{ij})^{\frac{1}{2}}$, 在标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型中, C_μ 为一个常数, 在 Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型中, 其计算方法为^[14]:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* \frac{k}{\varepsilon}} \quad (3)$$

式中: $A_0 = 4.0$; $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$; $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij}^* \Omega_{ij}^*}$, $\Omega_{ij}^* = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k$, $\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$,

$\overline{\Omega_{ij}}$ 为在角速度 ω_k 的参考系中的时均转动速率张量。

2.2.2 颗粒相运动方程

颗粒相的运动方程表达式为^[15]:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + F_{\text{drag}} \quad (4)$$

式中: m_p 和 u_p 分别为颗粒的质量和速度; F_{drag} 为单个颗粒所受到的粘性阻力。

2.3 网格划分及无关性验证

将模型导入 Hypermesh 进行六面体网格划分,对进料、抽气口进行网格加密处理。划分得到 4 万、12 万、18 万、26 万、37 万、61.8 万等 6 组网格数。进行网格无关性验证见图 2, 距出料口不同水平距离的平面空气速度变化曲线在网格数为 37 万和 61.85 万时达到了收敛, 此时网格数目的增加不会引起空气速度发生明显变化, 考虑到仿真精度及计算量, 在之后的模拟中选取 37 万网格模型。

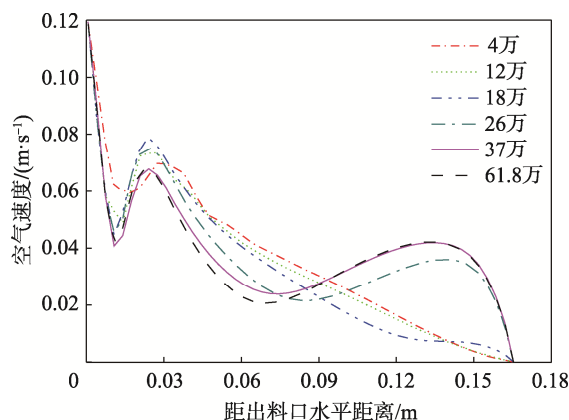


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

2.4 仿真工况设置

考虑模拟及计算过程, 结合生产实际对模型做如下假设^[16]: 将气相视为连续相流体, 颗粒相为形状均匀的散相球体, 且忽略颗粒之间的相互作用; 包装袋视为规则的长方体, 且忽略包装袋袋壁对颗粒的反射作用。

选取常见的氢氧化锂超细粉体颗粒作为充填对象, 相关参数见表 1。

表1 氢氧化锂粉体参数

Tab.1 Lithium hydroxide parameters

平均粒径/ μm	质量流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	堆积密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	真实密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
10	0.8	500	1430

阀口袋包装机所用的真空源压力变化范围为 0 ~ 0.098 MPa, 将此区间分成 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 MPa 等 5 个梯度范围, 对 5 种抽气压力下的充填工况进行仿真模拟。

3 结果与讨论

为评价包装的充填效果, 结合实际情况选取包装内的飞粉浓度、密实度及颗粒捕获率作为评价标准。包装内的飞粉浓度分布情况可在 Fluent 中直接导出, 包装密实度可通过充填完成后进入包装内的粉体颗粒总质量推算得出, 抽气装置对颗粒的捕获率则可通过由抽气装置所逃逸的颗粒数目与进入包装内的颗粒总数之比得到。

3.1 抽气压力对包装内飞粉浓度的影响

5 种不同抽气压力下的飞粉颗粒分布见图 3。结果发现, 随着抽气压力的增加, 颗粒逐渐集中在充填抽气口附近。一方面是由于抽气压力增加, 空气的动能增加, 提高了其携带颗粒的能力; 另一方面包装内空间较为狭窄, 且在抽气口附近气流变化复杂, 抽气压力的增加会使得抽气口附近形成许多小的旋涡^[17], 阻碍了颗粒的自由下落。

同时, 随着抽气压力的增加, 包装内的飞粉浓度

整体逐渐提高, 在抽气压力为 0 ~ 0.02 MPa, 0.06 ~ 0.08 MPa 之间时, 飞粉浓度显著提升; 在 0.02 ~ 0.06 MPa 之间时, 飞粉浓度虽也有上升, 但幅度较为缓慢。这说明抽气提高了包装内的飞粉浓度, 但可能在一定范围内其对于粉体颗粒的携带能力是有限的^[18], 因此在此范围内随着抽气压力的增加包装内的飞粉浓度提升较小, 而超过此范围后, 空气对颗粒的携带能力进一步提高, 包装内的飞粉浓度则会剧烈上升。对于氢氧化锂, 当抽气压力在 0.02 ~ 0.06 MPa 之间时, 包装内的飞粉浓度随抽气压力的变化较小。

3.2 抽气压力对颗粒捕获率的影响

将被抽气装置所捕获的颗粒数目(即为仿真模拟中通过抽气口所逃逸的颗粒数目)与颗粒总数目之比设为颗粒的捕获率, 抽气压力对颗粒捕获率的影响见图 4, 通过对比不同工况的颗粒捕获率进一步探究抽气压力变化对颗粒运动所产生的影响。

由图 4 可知, 随着抽气压力的增大, 颗粒捕获率随之增加, 且在抽气压力为 0 ~ 0.02 MPa, 0.06 ~ 0.08 MPa 之间增加的幅值较大, 在 0.02 ~ 0.06 MPa 之间增加得较小, 不同抽气压力之间颗粒捕获率的幅值变化呈现出与图 3 颗粒浓度变化相似的规律。说明在一个抽气压力范围内, 空气对颗粒的携带能力是有限

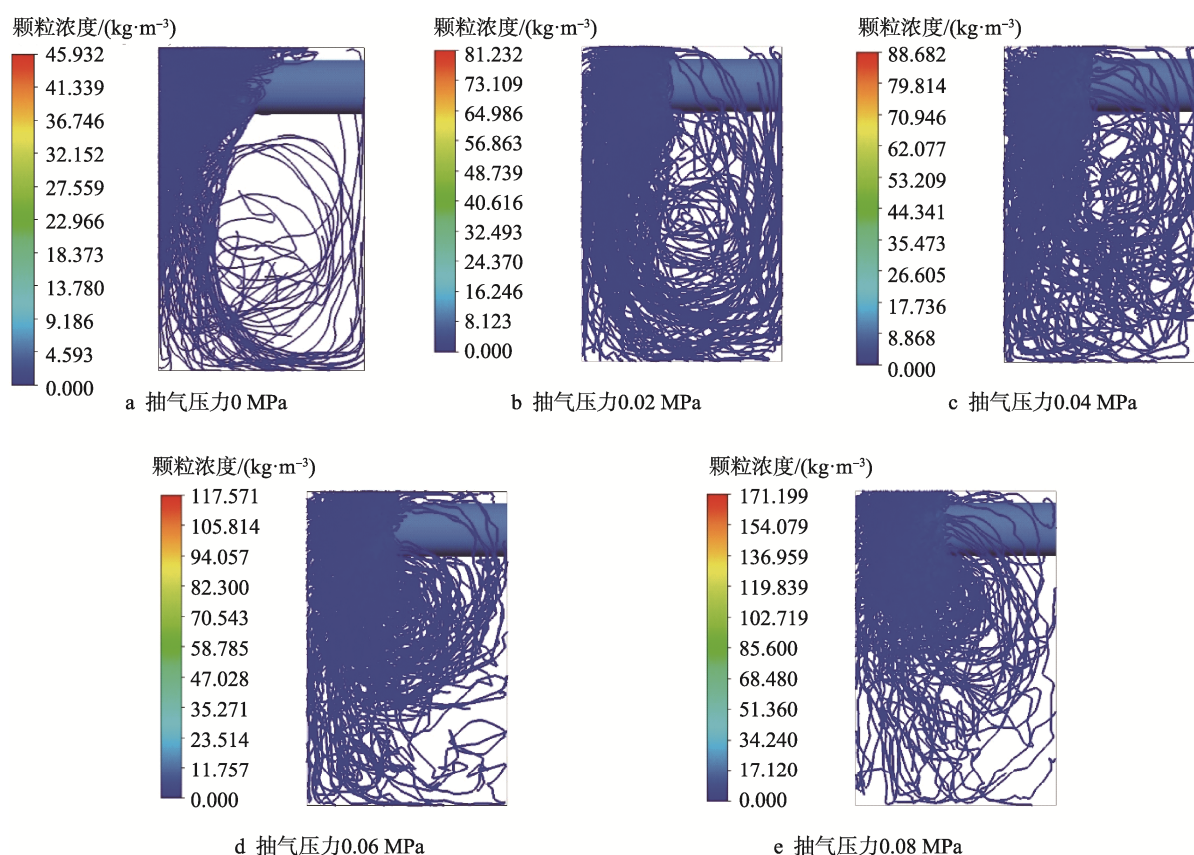


图 3 5 种抽气压力的飞粉颗粒分布

Fig.3 Particle distribution trajectories of five different suction pressure

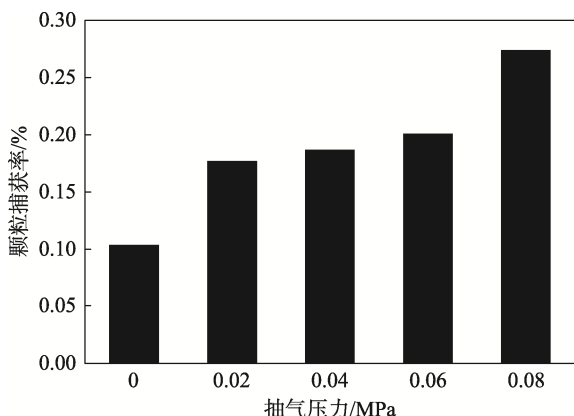


图4 抽气压力对颗粒捕获率的影响

Fig.4 Effect of suction pressure on particle capture rate

的,因此在此范围内既能保证抽气的正常进行,又不会导致过多的颗粒被抽气装置所吸附,同时还保证包装内的颗粒浓度在一定的水平之下。对于氢氧化锂,当抽气压力在 0.02 ~ 0.06 MPa 之间时,颗粒捕获率随抽气压力的变化较小。

3.3 抽气压力对包装密实度的影响

导出 5 种抽气压力下的包装密实度,见图 5。随着抽气压力的升高,包装的密实度逐渐增加,但增幅逐渐下降,当抽气压力增加至 0.04 MPa 以上时,包装内的密实度可达 90%以上。当抽气压力由 0.06 MPa 增加至 0.08 MPa 时,包装密实度变化较小。抽气压力的增加会提高包装内的密实度,但当抽气压力达到一定数值时,抽气压力的进一步增加对于包装密实度的提升影响较小。同时,抽气压力过高会导致颗粒捕获率及包装内粉体浓度的骤增,因此应在适当的范围内选择抽气压力。对于氢氧化锂,当抽气压力在 0.04 ~ 0.06 MPa 之间时,既可以保证包装内的密实度在 90%以上,又能保持包装内较低的飞粉浓度及颗粒捕获率。

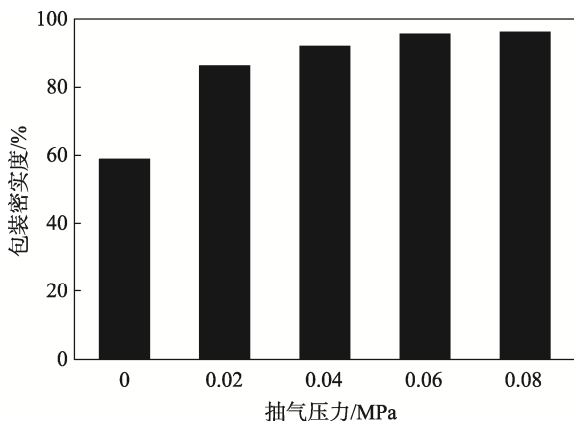


图5 抽气压力对包装密实度的影响

Fig.5 Effect of suction pressure on package compactness

4 实验验证

为验证模型的准确性进行相关实验,实验物料、包装袋规格尺寸与模拟设置参数相同。得到质量流量为 0.8 kg/s,抽气压力为 0, 0.04, 0.06 MPa 下颗粒捕获率及包装密实度,将所得结果与仿真模拟结果进行比较,见图 6—7。结果发现,模拟结果和实验结果变化趋势一致,颗粒捕获率的平均误差值为 9.59%,包装密实度的平均误差值为 7.43%。这主要由于实际粉料粒径非定值、颗粒形状非一致,导致实际实验与模拟结果产生一定偏差^[19]。

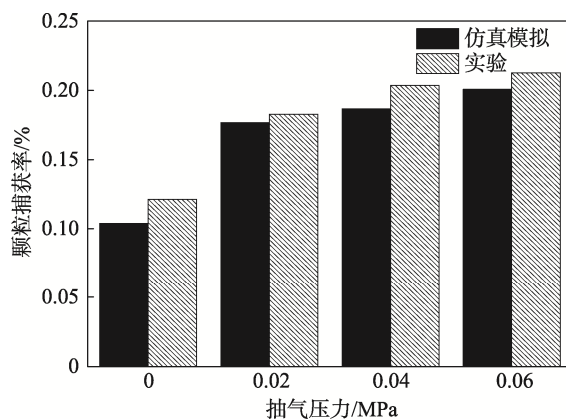


图6 实验及仿真模拟颗粒捕获率对比

Fig.6 Comparison of particle capture rates in experiments and simulations

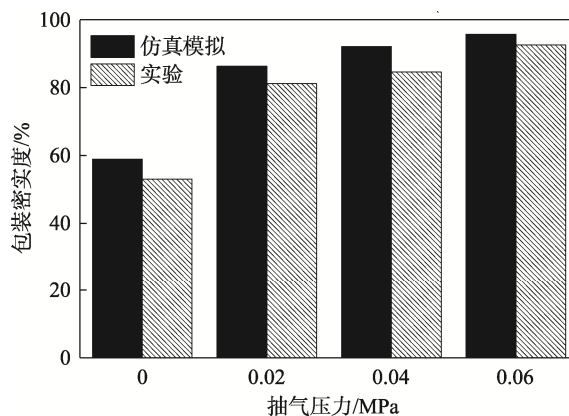


图7 实验及仿真模拟包装密实度对比

Fig.7 Comparison of package compactness of experiment and simulation

5 结语

针对阀口袋的充填抽气过程进行仿真模拟,以氢氧化锂为例,研究了抽气压力变化对包装内飞粉浓度、颗粒捕获率及包装密实度的影响,并通过了实验验证仿真模拟的准确性。结果表明,抽气会对包装内

颗粒运动产生明显的影响,抽气压力的增加会导致颗粒聚集在充填抽气口附近,同时提高包装内的飞粉颗粒浓度、颗粒捕获率及包装密实度;抽气压力存在一定的界限范围,在此范围内,既可以保持较低的飞粉浓度及颗粒捕获率,又能保证包装内的密实度在一定水平之上,超过此范围后,随着压力的增加其颗粒捕获率及包装内的飞粉浓度会骤增,且包装密实度增加较小。在进行工业充填时,可在此范围内进行抽气参数的选择。对于文中所用的氢氧化锂,此抽气压力范围为0.04~0.06 MPa。

参考文献:

- [1] 冯彬彬,唐正宁.粉体在袋装充填过程中的扬尘规律[J].包装工程,2017,38(7):119—123.
FENG Bin-bin, TANG Zheng-ning. Regularity of Dust Emission during Powder Filling Process[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 119—123.
- [2] 孟坤鹏,李永祥,徐雪萌,等.粉体除静电离子风场对粉体包装充填影响的模拟研究[J].包装工程,2019,40(15):170—174.
MENG Kun-peng, LI Yong-xiang, XU Xue-meng, et al. Simulation Study on the Impact of Powder Destaticization Ion Wind Field on Powder Packaging Filling[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 170—174.
- [3] NWOSE E N. Modelling Die Filling with Charged Particles Using DEM/CFD[J]. Particuology, 2012(2): 93—99.
- [4] GUO Y, WU C Y, KAFUI K D, et al. 3D DEM/CFD Analysis of Size-induced Segregation during Die Filling[J]. Powder Technology, 2011, 206(1): 177—188.
- [5] 王浩先,王宝琨.一种阀口袋包装机自动排气装置及阀口袋包装机:中国,207225724U[P].2018-04-13.
WANG Hao-xian, WANG Bao-kun. Automatic Exhaust Device for Valve Bag Packing Machine and Valve Bag Packing Machine: China, 207225724U[P]. 2018-04-13.
- [6] 吕辉祥,黄波来.一种阀口袋包装机及其排气装置:中国,201821047681.7[P].2018-07-03.
LYU Hui-xiang, HUANG Bo-lai. A Valve Bag Packaging Machine and its Exhaust Device: China, 201821047681.7[P]. 2018-07-03.
- [7] 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.
- [8] FAUQUET-ALEKHINE P. Gas-particles Flow Transitions for High Density Powder[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2012, 2199(1): 1820—1825.
- [9] CERECEDO L M, LUIS A, 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.
- [10] AMIRI Z, MOVAHEDIRAD S. Bubble-induced Particle Mixing in a 2-D Gas-solid Fluidized Bed with Different Bed Aspect Ratios: A CFD-DPM Study[J]. Powder Technology, 2017, 320: 637—645.
- [11] 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.
- [12] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M].北京:人民邮电出版社,2015:103—104.
ZHU Hong-jun. FLUENT 15.0 Flow Field Analysis Practical Guide[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2015: 103—104.
- [13] HREIZ R, GENTRIC C, MIDOUX N. Numerical Investigation of Swirling Flow in Cylindrical Cyclones[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2011, 89(12): 2521—2539.
- [14] 周凌九,胡德义,王正伟.可实现性k-ε模型在水轮机流场计算中的应用[J].水动力学研究与进展(A辑),2003(1):71—75.
ZHOU Ling-jiu, HU De-yi, WANG Zheng-wei. Application of Realizable k-ε Model in Turbine Flow Field Calculation[J]. Research and Progress in Hydrodynamics (Series A), 2003(1): 71—75.
- [15] 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,2012:32—35.
YUAN Zhu-lin, ZHU Li-ping. Gas-solid Two-phase Flow and Numerical Simulation[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012: 32—35.
- [16] 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 Fee-falling Dust Transported and Diffused by Open Air in Open Space[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(2): 266—271.
- [17] 樊航.自由下落颗粒流卷吸空气量及颗粒运动特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015:41—44.
FAN Hang. Study on the Entrained Air Volume and Particle Movement Characteristics of Free Falling Particle Flow[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015: 41—44.
- [18] SCHIANO S, CHEN L, WU C Y. The Effect of Dry Granulation on Flow Behaviour of Pharmaceutical Powders during Die Filling[J]. Powder Technology, 2018, 337: 78—83.
- [19] ANSART R, DE R A, DODDS J A, et al. Dust Emission by Powder Handling: Comparison between Numerical Analysis and Experimental Results[J]. Powder Technology, 2009, 190(1): 274—281.