doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.038

螺旋喂料机打散装置设计与实验

于　源　李兴帅
(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 为改善喂料机微细粉体喂料连续性和分散性,设计了一种螺旋喂料机打散装置。用离散元方法数值模拟微细颗粒输运性能,为解决计算量庞大和计算成本高昂等问题,引入粗粒化技术,通过休止角标定法获得粉体表面能参数。模拟结果表明:相较于无打散装置螺旋喂料机,安装打散装置喂料机出口区域颗粒数变异系数可减小 53.4%,出口区域颗粒数分布变异系数可减小 36.4%。利用高速摄像机采集粉体下落过程(喂料)图像,图像处理结果表明:当喂料速度分别为 12、18、24 kg/h 时,相较于无打散装置螺旋喂料机,安装打散装置的喂料机喂料连续时刻粉体面积分布变异系数分别减小 74.8%、75.0%、68.2%,最大连通区域面积分别减小 84.6%、83.0%、83.3%。模拟和实验结果均表明打散装置可提高喂料连续性和粉体分散性。

关键词: 螺旋喂料机; 打散装置; 模拟; 离散元方法; 颗粒物料
中图分类号: S229^{+}.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0473-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Dispersion Device for Screw Feeder

YU Yuan　LI Xingshuai
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Beijing University of Chemical Technology*, *Beijing* 100029, *China*)

Abstract: A dispersion device for screw feeder was designed in order to improve the feeding continuity and fine powder dispersity. The transport of fine particles was simulated numerically by using discrete element method. In order to solve the problem of large computation amount and high computation cost, the coarse-grained technology was introduced, and the surface energy parameter of the powder was obtained by the repose angle calibration method. The simulation results showed that the variation coefficient of particle number in the outlet area of the feeder was reduced by 53.4%, and the variation coefficient of particle number distribution in the outlet area was reduced by 36.4%. High-speed camera was used to collect images of powder falling process (feeding), and the image processing results showed that when the feeding speed was 12 kg/h, 18 kg/h and 24 kg/h, the variation coefficient of powder area distribution in the continuous feeding time of the feeder with the dispersion device was reduced by 74.8%, 75.0% and 68.2%, respectively, compared with the screw feeder without the dispersion device. The maximum connected area was decreased by 84.6%, 83.0% and 83.3%, respectively. Both simulation and experimental results showed that the dispersion device can improve feeding continuity and fine powder dispersity.

Key words: screw feeder; dispersion device; simulation; discrete element method; granular materials

0　引言

螺旋喂料机具有结构简单、易于操作且可计量等特点,常用于干性固态粉体的输运和送料,多见于农产品加工生产[1-2]。碳酸钙粉体在食品行业中有着多重用途,常被用作食品的增稠剂、稳定剂和酸中和剂,可以改善食品稳定性并赋予食品更好口感体验[3-5],或作为钙补充剂,补充人体所需的钙元素[6]。超细碳酸钙输运流动性差、易聚团,输运过程中会出现团聚和结块现象,在螺旋槽内易发生堆积,因此会影响到粉体由出料口卸出进入到下一道工序时粉体的分散状态,进而影响后续设备运行性能。国内外学者为了改善粉体在出料口处的分散性和连续性,对螺旋喂料机展开了诸多研究和改进,相

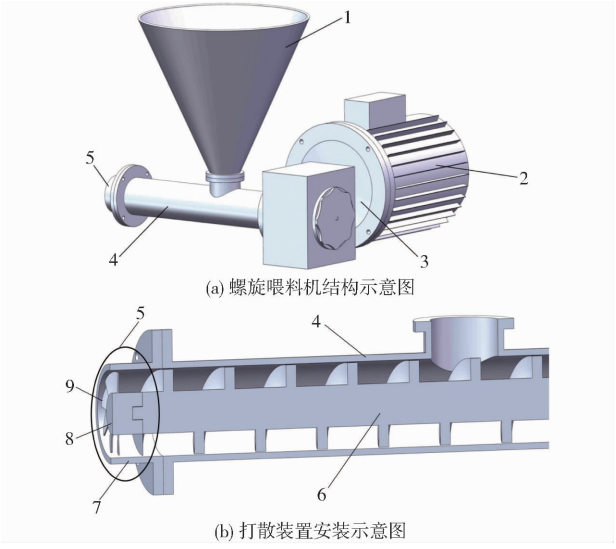
收稿日期: 2024-10-30　修回日期: 2025-01-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(52174234)
作者简介: 于源(1976—),女,副教授,主要从事气固两相流的 CFD 模拟和离散元仿真研究,E-mail: yuyuanjd@263.net

关研究成果可以分为 2 类:第 1 类是设计新型螺旋喂料装置以提升其输运性能[7-10];第 2 类是在螺旋喂料的基础上辅以其它装置进行组合式创新,改善物料流动特征[11-14]。

已有研究改善粉体在输运过程中及在出料口的分散性和连续性,有助于提高粉体的分散性,提升了螺旋喂料机的输运性能。相较于第 1 类螺旋喂料机改进,第 2 类改进是通过局部创新对现有螺旋喂料装置进行改造,以提高设备的技术先进性和生产适用性,具有投资少、见效快等优点。为使螺旋喂料机辅助装置具有简单且适配性更高的结构,本文设计打散装置,直接安装在螺旋喂料机的末端,以保证对容易团聚的粉体(如碳酸钙等)具有较好的分散性,顺利喂料的同时提高粉体在出料口的连续性和分散性。

1 螺旋喂料机打散装置设计

螺旋喂料机结构示意图如图 1a 所示,由喂料漏斗、变频电机、蜗轮蜗杆减速器、螺旋喂料机输运管组成,利用旋转的螺旋叶片在封闭的管道内推动物料向前移动,适用于多种不同的物料输送需求。为改善粉体在输运过程及在螺旋喂料机出料口的分散性和连续性,设计了一种打散装置,由分散叶片、连接轴和套筒组成,安装在螺旋喂料机末端,如图 1b 所示。原螺旋喂料机输运管长度为 260 mm,直径为 42 mm,增加了打散装置后的长度为 275 mm。为简化表述,下文将无打散装置的螺旋喂料机记为喂料机 A,将有打散装置的螺旋喂料机记为喂料机 B。



(a) 螺旋喂料机结构示意图

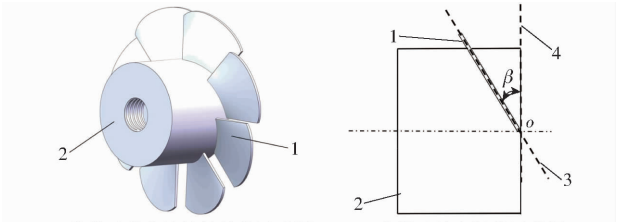
(b) 打散装置安装示意图

图 1 螺旋喂料机

Fig. 1 Diagrams of screw feeder

1. 喂料漏斗 2. 变频电机 3. 蜗轮蜗杆减速器 4. 螺旋喂料机输运管 5. 打散装置 6. 螺杆 7. 套筒 8. 连接轴 9. 分散叶片

图 2a 为分散叶片和连接轴结构示意图,可以看到 8 个分散叶片均匀固定在连接轴上,分散叶片型线为圆弧,叶型为扇形平面。套筒通过法兰连接在螺旋喂料机输运管的末端,套筒的外径与螺旋输运管的外径一致。连接轴通过螺纹连接固定到螺旋喂料机的螺杆末端,随螺杆旋转而旋转。打散装置的工作原理是:分散叶片随着螺杆旋转而旋转,待粉体到达分散叶片处,叶片的剪切力对结块团聚的粉体进行打散,改善粉体分散性。图 2b 为叶片安装角示意图,其中分散叶片底面中心线与所在位置径向正截面切线交点为 o。叶片安装角度 β 为 30°,即分散叶片底面中心线与所在位置径向正截面切线夹角。



(a) 分散叶片和连接轴结构示意图 (b) 分散叶片安装角示意图

图 2 打散装置设计示意图

Fig. 2 Design of dispersion device

1. 分散叶片 2. 连接轴 3. 分散叶片底面中心线 4. 连接轴径向正截面切线

2 基于 EDEM 软件的颗粒输运模拟分析

2.1 接触模型的选取

选取碳酸钙为实验原料,在范德华力和液桥力作用下,碳酸钙颗粒间会产生吸附,易发生团聚。Hertz - Mindlin with JKR(Johnon - Kendall - Roberts)接触模型是基于 Hertz - Mindlin(no slip)模型建立起来的具有内聚力的接触模型[15]。在仿真过程中考虑接触区的范德华力,能够充分展示出颗粒间团聚的情况并表达正确的力学行为。因此本文选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型(JKR 模型)来模拟分析螺旋喂料机输运过程中碳酸钙颗粒运动规律。在计算时颗粒运动的法向耗散力、切向弹性力、切向耗散力同 Hertz - Mindlin 接触模型相同,它的法向弹性接触力基于 Johnson - Kendall - Roberts 理论[16],取决于重叠量、相互作用参数、表面能,即

$$F_{\mathrm{JKR}}=\frac{4E^{*}a^{3}}{3R^{*}}-4\sqrt{\pi\gamma E^{*}a^{3}} \tag{1}$$

$$\delta=\frac{a^{2}}{R^{*}}-\sqrt{\frac{4\pi\gamma a}{E^{*}}} \tag{2}$$

其中

$$\frac{1}{E^{*}}=\frac{1-\nu_{1}^{2}}{E_{1}}+\frac{1-\nu_{2}^{2}}{E_{2}} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R^{*}}=\frac{1}{R_{1}}+\frac{1}{R_{2}} \tag{4}$$

式中　F_{JKR}——JKR 法向弹性接触力

a——接触半径　　δ——重叠量

γ——表面能　　E^*——当量杨氏模量

R^*——当量半径

E_i、ν_i——两接触颗粒的杨氏模量和泊松比，$i=1,2$

R_1、R_2——两接触颗粒的接触半径

2.2　休止角标定

鉴于螺旋喂料装置的设计尺寸显著大于超细颗粒粒度(1 ~ 10 μm)，直接在 EDEM 软件中对超细颗粒(原始颗粒)进行模拟仿真，会导致计算量异常庞大，进而严重影响计算效率与可行性。为此，在参数标定与离散元模拟分析中，引入了粗粒化技术[17-18]。为了得到粒径为 10 μm 的碳酸钙表面能 γ_p，使用休止角标定的方式[19-20]，同时将粒度为 10 μm 的原始颗粒替换为粒度为 1 000 μm 的粗粒化颗粒。即当 1 000 μm 粗粒化颗粒模拟得到的休止角与 10 μm 原始颗粒实验得到的休止角一致时，所选取的表面能参数可以体现 10 μm 原始颗粒团聚现象与运动特性，与此同时兼顾提高模拟效率。

休止角模拟的几何模型及其尺寸参考 BT-1000 型粉体综合特性测试仪中的喂料漏斗，接料盘上平面承接颗粒，如图 3a 所示。喂料漏斗和接料台的材料均为钢，实验物料为碳酸钙粉体，在 EDEM 模拟中选取这 2 种材料进行休止角标定模拟。通过文献查阅 JKR 模型所需参数，如表 1 所示。

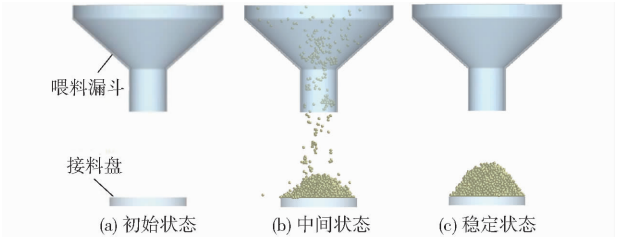


图 3　颗粒下落过程示意图

Fig. 3　Schematics of particle fall process

粗粒化颗粒粒度为 1 000 μm，生成速率为 2×10^3 个/s，颗粒下落速度为 1 m/s。根据 Rayleigh 时间步长规则，固定时间步长一般在 5% ~ 30%[24]，本模拟选取 20% 的 Rayleigh 时间步长，采取 Euler 积分，每 0.01 s 记录一次数据。图 3 分别为模拟颗粒下落的初始状态、中间状态以及稳定状态($t=3$ s 时达到稳定状态)。由于颗粒堆呈轴对称，截取稳定状态下颗粒堆单侧图像进行图像处理，经灰度化、二值化、噪声处理、边缘线离散点提取以及线性拟合等[25-28]处理(图 4)，获得休止角 θ。正如上文所述，代入不同的表面能 γ_p 进行模拟计算会得到不同的休止角 θ。为了得到粒径为 10 μm 的碳酸钙表面能 γ_p，模拟不同的表面能 γ_p 对应的休止角 θ，计算结果如表 2 所示。当表面能为 1.65 J/m^2 时，模拟休止角为 50.3°，与实验休止角 49.7° 的相对误差最小，为 1.2%。因此，确定在后续的螺旋喂料机模拟中选取碳酸钙颗粒表面能为 1.65 J/m^2。

表 1　离散元仿真参数设置

Tab. 1　Parameter settings of discrete element simulation

参数	数值
碳酸钙颗粒粒径 D/μm	1 000
碳酸钙密度 ρ_p/(kg·m^{-3})	2 930[21]
碳酸钙剪切模量 G/GPa	0.7[21]
碳酸钙泊松比 ν_p	0.3[21]
钢密度 ρ_g/(kg·m^{-3})	7 800
钢剪切模量 G_g/GPa	70
颗粒间碰撞恢复系数 e_p	0.1[22]
颗粒间静摩擦因数 μ_{rp}	0.9[22]
颗粒间滚动摩擦因数 μ_{sp}	0.015[22]
颗粒-几何体碰撞恢复系数 e_w	0.557[23]
颗粒-几何体静摩擦因数 μ_{rw}	0.61[23]
颗粒-几何体滚动恢复系数 μ_{sw}	0.07[23]

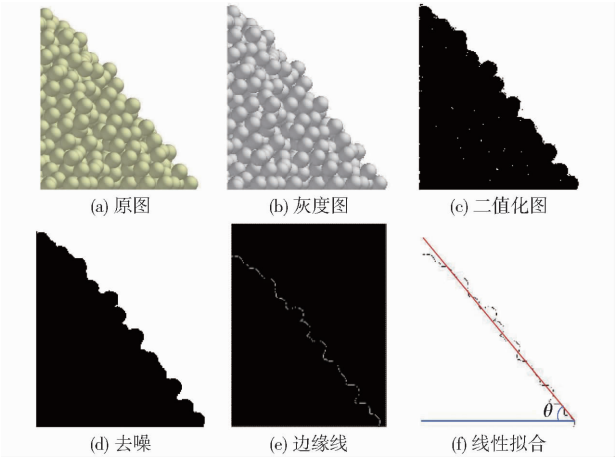


图 4　颗粒堆图像处理步骤

Fig. 4　Steps of image processing of particle pile

表 2　不同表面能时休止角模拟结果

Tab. 2　Simulation results of repose angle with different surface energy parameters

γ_p 表面能/(J·m^{-2})	休止角模拟值/(°)	与休止角实验值相对误差/%
1.55	45.4	8.7
1.60	46.9	5.6
1.65	50.3	1.2
1.70	52.3	5.2
1.75	55.0	10.7

2.3　离散元仿真参数设定及区域划分

螺旋喂料机材料为钢，实验物料为碳酸钙粉体。EDEM 螺旋喂料仿真参数见表 1，表面能 γ_p 取 1.65 J/m^2。在螺旋输运管进料口释放碳酸钙颗粒，

参考喂料漏斗长度,颗粒自由下落至螺旋喂料机时速度为 0.217 m/s。颗粒生成速率为 2×10^4 个/s,时长 2 s。螺旋喂料机螺杆旋转速度为 300 r/min,顺时针旋转,重力加速度设置为 9.81 m/s^2。Rayleigh 时间步长为 20%,模拟总时长 4 s,且每隔 0.001 s 保存一次数据,用于分析输运过程中数据。

为了方便后续对连续性和分散性分析,将喂料机末端颗粒出口处 42 mm×42 mm×14 mm 的长方体定义成出口区域,用于对喂料机出口处连续性和分散性分析,如图 5、6 所示。将出口区域划分成 8 个部分,每个部分皆为边长为 14 mm 的立方体,8 个立方体完全覆盖整个出口处,中心螺杆处除外。对每块立方体予以编号 1~8,简称 1 区、2 区等,详见图 5、6。此外,针对喂料机 B 结构特点,将螺旋叶片末端至分散叶片之间的区域划分成颗粒填充区域,为 42 mm×42 mm×6 mm 的长方体;将分散叶片所处的区域划分成叶片区域,为 42 mm×42 mm×8 mm 的长方体。

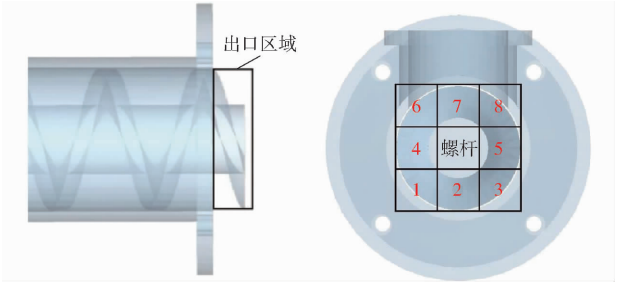


图 5 喂料机 A 区域划分

Fig. 5 Region division of feeder A

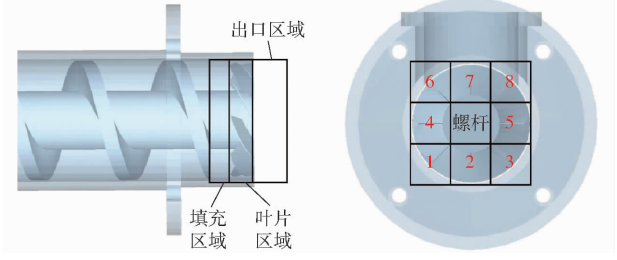


图 6 喂料机 B 区域划分

Fig. 6 Region division of feeder B

2.4 仿真结果分析

2.4.1 颗粒输运连续性分析

图 7 为喂料机 A 和喂料机 B 出口区域颗粒数随时间变化情况,时间间隔为 0.01 s。可以看出,无论有无打散装置,在喂料机出口处颗粒变化都会呈现周期性的上升和下降。由于设定 2 s 后不再有颗粒持续喂入,随着时间推移,出口区域物料颗粒数最终趋于零。由于喂料机 A 没有打散装置,出口区域颗粒数的变化幅度很大,且存在颗粒数为零的情况,出料不连续,而且具有间歇性。由于喂料机 B 增加了打散装置,出口区域颗粒数的变化幅度减小,且出口区域始终有颗粒输出,出料连续性明显优于喂料机 A。不过,由于螺旋喂料机 B 存在颗粒填充区域,因此会出现颗粒出料滞后于喂料机 A。另外,经计算喂料机 A 和喂料机 B 平均输运速率分别为 2×10^4 个/s 和 1.8×10^4 个/s,喂料机 B 的输运速率有所下降。

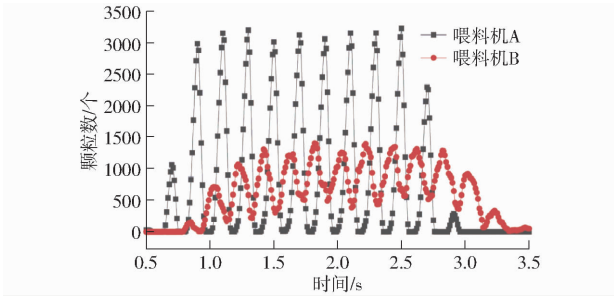


图 7 喂料机出口区域颗粒数变化曲线

Fig. 7 Change of particle number in outlet area of feeder

为量化出口区域粉体出料连续性,引入反映数据离散程度的变异系数[29],计算公式为

$$c_v=\frac{\sigma}{\mu} \tag{5}$$

式中 c_v——喂料机出口区域颗粒数变异系数

σ——喂料机出口区域颗粒数标准差

μ——喂料机出口区域颗粒数平均值

变异系数越大,数据离散程度就越大,即喂料连续性越差;反之,喂料连续性越好。

经计算,喂料机 A 和喂料机 B 在出口区域颗粒数变异系数分别为 1.122 和 0.523,喂料机 B 变异系数相较于喂料机 A 减小 53.4%,即喂料机 B 输运颗粒的连续性优于喂料机 A。究其原因,喂料机 B 相较于喂料机 A 安装了打散装置,形成颗粒填充区域。图 8 为喂料机 B 颗粒填充区域的颗粒数随时间的变化曲线。设定 2 s 后不再有颗粒持续喂入,喂料机 B 在颗粒填充区域的颗粒数在初期会随着时间快速增加,即图中的颗粒填充阶段;在堆积到一定数量后,颗粒数增加趋缓,达到动态平衡。颗粒数在 2.65 s 开始减少,直至稳定状态。需要强调的是,颗粒从喂料口到填充区域需要一段时间,因此填充

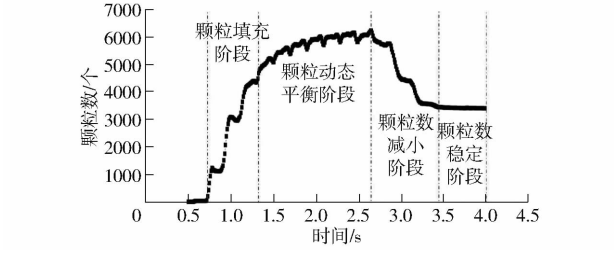


图 8 喂料机 B 颗粒填充区域颗粒数变化曲线

Fig. 8 Change of particle number in particle filled area of feeder B

区域的颗粒数变化的时间节点相对于喂料的时间节点会有延时。由于颗粒填充区域内颗粒不会立刻被输运，而是在颗粒填充区域聚集，一旦达到饱和状态，它们便会在后续进入填充区域颗粒的影响下，被分散叶片逐步输运出去，形成持续的动态平衡过程。因此，喂料机 B 能够持续稳定地输运颗粒，呈现较好的颗粒输运连续性。

2.4.2　颗粒输运分散性分析

对 2 种喂料机在出口区域中 8 个子区域的颗粒数进行统计：每间隔 0.02 s 保存一次数据，求取分布在 8 个区域颗粒数分布的变异系数，并求取整个时间周期内变异系数平均值。喂料机 A 与喂料机 B 出口区域颗粒数分布变异系数分别为 1.889、1.202，喂料机 B 的变异系数相较于喂料机 A 减小 36.4%，即喂料机 B 输运颗粒的分散性要优于喂料机 A。图 9 为在间隔时间相同的情况下，喂料机 A 和喂料机 B 在不同时刻颗粒数分布图。对于喂料机 A，颗粒主要分布在 1、2、3、4 区，5、6、7、8 区没有颗粒，颗粒都堆积在左下方被输运出螺旋喂料机，说明在出口区域颗粒分布不均匀。这是由于螺杆转动时，在螺旋叶片的推送下粉体物料沿着喂料机输送管的底部向前运动。螺杆顺时针旋转时，在重力和摩擦力的作用下，粉体由出料口的左下方排出。对于喂料机 B，尽管颗粒也主要分布在左下方，但是由于打散叶片对颗粒的撞击作用改变其运动方向，在其余各区域会有所分布，不同区域分布不同，颗粒分布较为分散。因此，整个出口区域的颗粒分布变异系数较小，即分散装置提升了螺旋喂料机输运分散性。

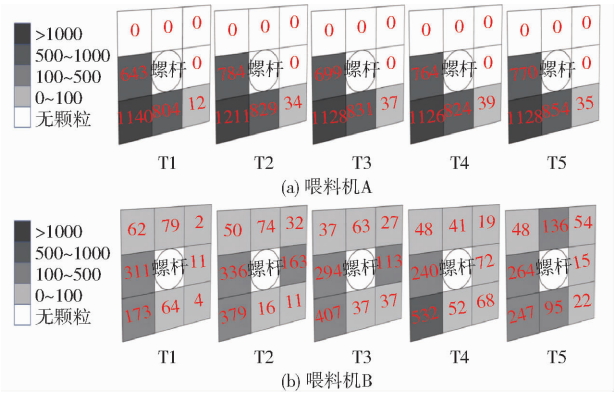


图 9　喂料机出口区域颗粒分布个数统计

Fig. 9　Statistics of particle distribution in outlet area of feeder

2.4.3　颗粒团聚性分析

由公式(2)可知，颗粒两两接触的重叠量与颗粒接触半径和表面能有关。由于模拟过程中颗粒接触半径和表面能不变，因此颗粒接触重叠量不变。用团聚体总重叠量评估颗粒团聚性：出口处团聚体在下落过程中重叠量越大，颗粒团聚程度越大，反之团聚程度越小。图 10 为喂料机 A 和喂料机 B 在出口区域下方的颗粒下落图。经计算团聚体最大重叠量分别为 2.977 mm 和 1.219 mm，表明喂料机 B 输运出的粉体团聚程度更小，分散性更好。由于团聚体在通过喂料机 B 打散装置时会受到分散叶片的作用力，当颗粒团通过分散叶片间通道时，随着叶片旋转，颗粒会被分散并甩出，因此喂料机 B 输运出的粉体分散性更好。为了进一步说明打散装置对颗粒分散的影响，观察颗粒在喂料机 A 和 B 出口处的分布情况，如图 11 所示。可以看出一部分大颗粒团受到分散叶片的撞击，所受外力远大于颗粒间的粘附力，被打散后成为小颗粒团以及单颗粒。可见，打散装置有助于团聚体解团，进而优化喂料机输运的分散性。

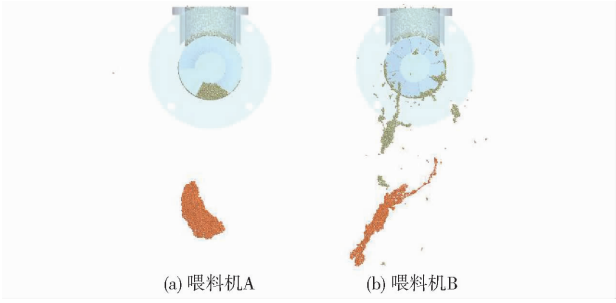


图 10　喂料机出口下方颗粒下落图

Fig. 10　Particles falling process below feeder outlet

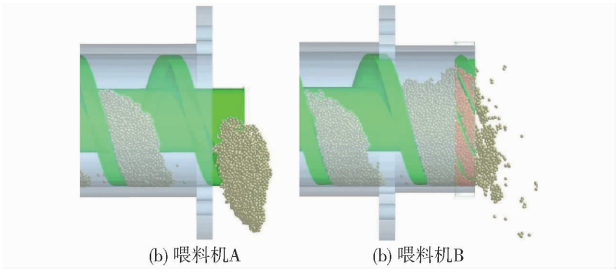


图 11　颗粒在出口处分布图

Fig. 11　Distribution diagram of particles at outlet area

3　颗粒输运实验分析

3.1　传送带输运粉体实验

实验选取的材料为碳酸钙粉体(河北省石家庄市灵寿县裕川矿产有限公司)，密度为 2 930 kg/m^3，颗粒粒度体积微分分布如表 3 所示。

为模拟粉体输运过程粉体下落状态，同时避免粉体在静止表面堆积而丢失粉体的输运特征，设计传送带输运粉体实验，使粉体从出料口掉落至传送带上。传送带设备尺寸为 500 mm × 100 mm × 70 mm，速度调节范围为 0.01 ~ 0.06 m/s。由于传送带最大传动速度为 0.06 m/s，因此螺旋喂料机喂料速度不宜过大，取螺旋喂料速度为 2.4 kg/h，以适

表 3 碳酸钙粉体颗粒粒度体积微分分布

Tab. 3 Particle size differential distribution of calcium carbonate powder

颗粒粒径/μm	体积微分分布/%
<5	12.11
5~12	17.12
12~15	5.64
15~23	13.56
23~35	15.71
35~48	15.81
48~66	10.06
66~82	7.13
>82	2.86

配传送带速度,得到有明显特征的粉体状态。喂料高度参考涡流空气分级机喂料机粉体出口到分级机风口的高度,取 0.2 m。传送带模拟粉体输运实验示意图见图 12,传送带运动速度 v 方向为螺旋喂料机螺杆轴向方向。粉体落到传送带上的状态如图 13 所示。可以看出,粉体由喂料机 A 输运后,下落在传送带上的分布明显不连续,粉体呈团状堆积,掉落时飞溅程度较大;粉体由喂料机 B 输运后,下落在传送带上的分布连续,粉体呈分散状,掉落时基本没有飞溅现象。这是由于碳酸钙粉体较粘,在螺旋输运的过程中会出现堆积和结块现象,待粉体输运到出料口时,结块的粉体靠自身重力下落,使粉体输运连续性和分散性较差;喂料机 B 由于增加了打散装置,待粉体输运到出料口时会受到分散叶片的剪切作用,解决粉体结块问题,同时在套筒作用下,粉体填充率增大,使粉体输运的连续性增强。

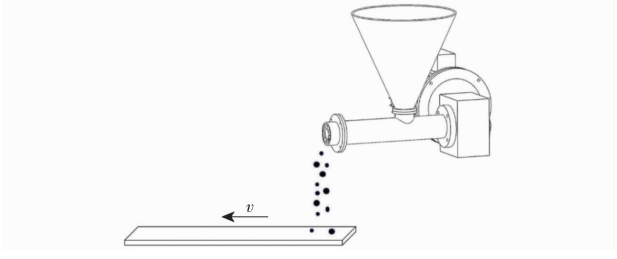


图 12 传送带输运粉体实验示意图

Fig. 12 Powder transport using conveyor belt

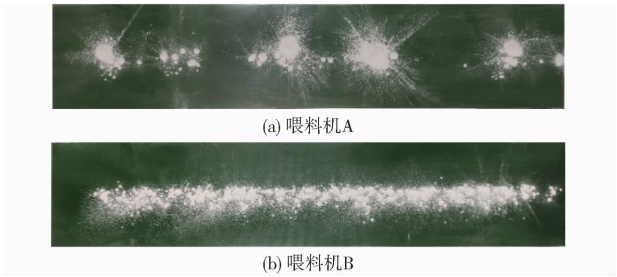


图 13 传送带上粉体分布图

Fig. 13 Powder distribution on conveyor belt

3.2 粉体下落实验

高速摄像机选用 MV-CA013-A0UM 型工业面阵相机(杭州海康威视数字技术股份有限公司),分辨率为 1 280 像素 × 1 024 像素,焦距为 10~50 mm,最低曝光时间为 5 μm。采用 LED 光源(中山市光影摄影器材有限公司)为高速摄像机拍摄粉体下落过程提供合适的环境亮度,该光源的色温范围为 3 200~5 700 K,显色等级为 Ra96+。搭建粉体下落时粉体运动图像采集装置,示意图如图 14 所示。图像采集装置分别由喂料装置、光源、上位机以及高速摄像机组成。喂料速度分别为 12、18、24 kg/h,选择 200 f/s,分别连续拍摄 500 幅图像。

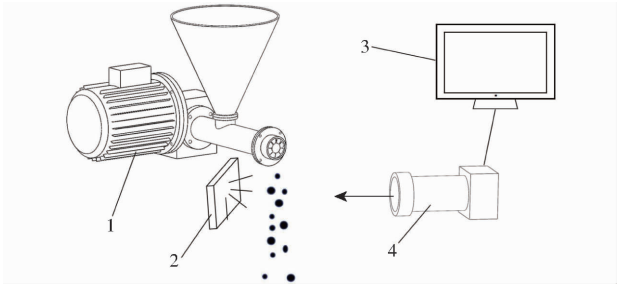


图 14 图像采集示意图

Fig. 14 Schematic of image acquisition

1. 喂料装置 2. 光源 3. 上位机 4. 高速摄像机

3.2.1 粉体下落连续性分析

图 15 为在喂料速度 12 kg/h 时喂料机 A 和喂料机 B 在同一视图区域连续截取的 t_1~t_8 时刻的 8 帧图像。可以看到,喂料机 A 粉体下落时团聚程度较大且连续性较差,喂料机 B 粉体下落时团聚程度较小且连续性较好。

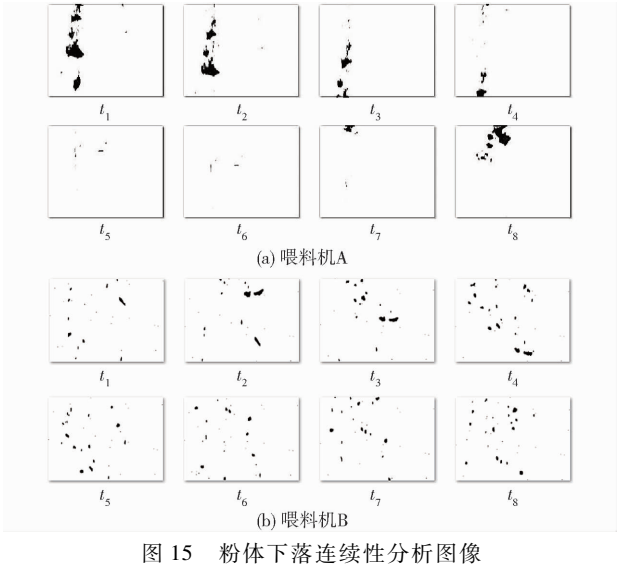


图 15 粉体下落连续性分析图像

Fig. 15 Images of powder falling continuity analyse

为了分析粉体下落中的分布情况,需要对粉体下落图像进行处理,求取图像中黑色区域的面积,以此代表粉体下落时的分布面积。图像处理方法为:

首先基于亮度加权平均法，将图 16a 所示原图 RGB 图像转换成灰度图像[25]，如图 16b 所示；边缘是图像局部亮度变化最明显的部分，对灰度图的边缘进行处理，提取形状特征，通过 Sobel 算子将灰度图转换成边缘梯度二值掩膜图[26]，如图 16c 所示；膨胀二值掩膜是一种形态学处理算法，用于扩张目标区域并消除图像中的部分空洞，将边缘梯度二值掩膜图转换成膨胀二值掩膜图像，如图 16d 所示；对膨胀二值掩膜图像进行填充空洞操作，得到填充空洞后的图像[30]，如图 16e 所示；使用四联通方法[31]将填充空洞后的图像划分成不同的连通区域[32]，并计算每个连通区域像素大小，以所有连通区域实际像素数之和作为粉体分布面积。

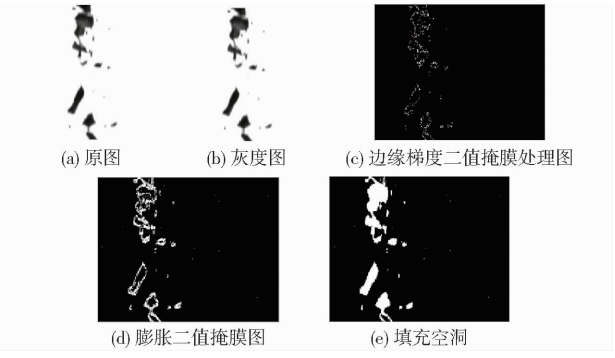


图 16　粉体分布图像处理步骤

Fig. 16　Steps of image processing of powder distribution

为表征不同喂料机送料连续性，计算每幅图像粉体分布面积并按式(5)求取其变异系数。此处，c_v 为喂料机喂料连续时刻粉体面积分布变异系数，σ 为喂料机喂料连续时刻粉体面积分布标准差，μ 为喂料机喂料连续时刻粉体面积分布平均值。变异系数越大，数据离散程度越大，喂料连续性越差；反之，喂料连续性越好。绘制有无打散装置的粉体分布变异系数散点图，如图 17 所示。可以看出，粉体由喂料机 B 输运时粉体在出料口的粉体分布变异系数远远小于喂料机 A，在不同喂料速度下，变异系数分别减小 74.8%、75.0%、68.2%。喂料机 B 输运的粉体在出料口的连续性要优于喂料机 A，与传送带模拟粉体输运实验一致，说明打散装置可以显著改善粉体喂料的连续性。此外，喂料机 A 中粉体在出料口的粉体分布变异系数随着喂料速度的增加而显著减小。这是由于随着喂料速度的增加，粉体在螺旋喂料机中的流动速度加快，提高了喂料的连续性，同时出料量增大会使连续时刻粉体面积变化变小，因此粉体面积分布的变异系数减小；喂料机 B 粉体分布变异系数受喂料速度的影响并不大。这是由于喂料机 B 安装了打散装置，在末端形成一段粉体填充区域，即使喂料速度较小的情况下，在粉体

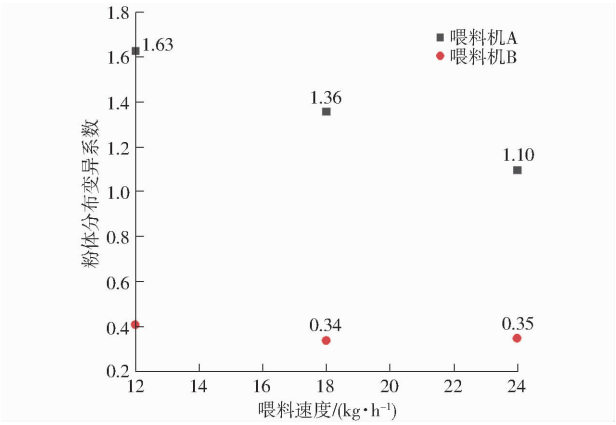


图 17　粉体分布变异系数

Fig. 17　Variation coefficient of powder distribution

输运过程中也会形成动态平衡过程，能够持续稳定地输运颗粒，呈现较好的颗粒输运连续性。当增大喂料速度，仍然保持较稳定的输出状态，连续时刻粉体面积变化不大，因此粉体面积分布变异系数变化较小。可见打散装置对螺旋喂料机输运物料的连续性有很大提升且受喂料速度的影响较小。

3.2.2　粉体下落分散性分析

对粉体下落图像进行图像处理，计算单个连通区域粉体面积，将面积最大的连通区域记作 S，以此作为判断粉体下落分散性的依据。S 越大表示粉体的团聚程度越大，即粉体下落的分散性越差；反之分散性越好。图 18 为在喂料速度 12 kg/h 时经过图像处理后的粉体下落图像，图中圈出的区域为当前图像中最大的连通区域。将喂料机 A 粉体下落的第 i 幅图像中的最大连通区域面积记作 S_{Ai}，喂料机 B 的记作 $S_{Bi}(0<i\leqslant 500)$。

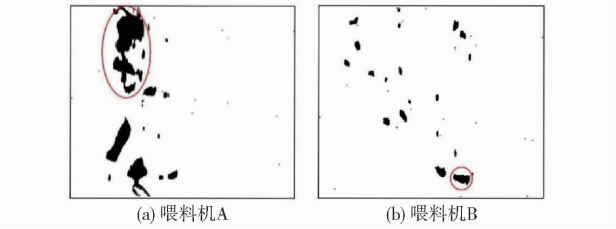


图 18　粉体下落分散性分析图像

Fig. 18　Images of powder falling dispersity analyse

计算连续的 500 幅图像中的最大连通区域面积，计算公式为

$$S_A = \mathrm{Max}\{S_{Ai}(0<i\leqslant 500)\} \tag{6}$$

$$S_B = \mathrm{Max}\{S_{Bi}(0<i\leqslant 500)\} \tag{7}$$

式中　S_A——喂料机 A 在连续的 500 幅图像中最大的连通区域面积

S_B——喂料机 B 在连续的 500 幅图像中最大的连通区域面积

计算结果见表 4。

表 4 粉体下落的最大连通区域面积

Tab.4 Maximum connected area of powder falling process

像素

喂料速度/(kg·h^{-1})	S_A	S_B
12	60 827	9 340
18	78 025	13 258
24	88 942	14 826

由表 4 可见,随着喂料速度的增大,喂料机 A、B 粉体下落的最大连通区域面积都会增大,说明粉体下落时的团聚程度随喂料速度增大而加剧。这是由于当喂料速度增大,粉体受到螺旋叶片推力增大,导致粉体颗粒间的接触更加紧密,在输运过程中粉体的团聚程度会增加,表现为最大连通区域面积增大。另外,在不同喂料速度下,喂料机 B 最大连通区域面积均小于喂料机 A,在不同喂料速度下分别减小 84.6%、83.0%、83.3%。这说明喂料机 B 输运的粉体颗粒团聚程度要小于喂料机 A,也就是喂料机 B 输运的粉体分散性更好。这是由于打散装置的分散叶片会将团聚的粉体打散送出,降低了粉体的的团聚程度,提高了粉体输运的分散性。

4 结论

(1)设计了一种用于螺旋喂料机的打散装置,通过数值模拟和粉体输运实验,对比分析了打散装置对螺旋喂料机物料输运连续性和分散性的影响。

(2)引入粗粒化技术,通过休止角标定法获得粉体表面能参数,用离散元方法数值模拟微细颗粒输运,以解决计算量庞大和计算成本高昂等问题。对碳酸钙粉体休止角进行标定,当表面能为 1.65 J/m^2 时,1 000 μm 粗粒化颗粒模拟得到的休止角与 10 μm 原始颗粒实验得到的休止角误差为 1.2%,以此表面能作为数值模拟中表面能参数。

(3)以喂料机出口区域的颗粒数变异系数量化喂料机喂料连续性,以出口区域颗粒数分布变异系数量化喂料机颗粒输运分散性,颗粒输运离散元仿真结果表明:相较于无打散装置螺旋喂料机,安装打散装置喂料机出口区域颗粒数变异系数可减小 53.4%,出口区域颗粒数分布变异系数可减小 36.4%。安装打散装置可以有效提高喂料机喂料连续性和颗粒输运分散性。

(4)在粉体输运实验中,以喂料机喂料连续时刻粉体面积分布变异系数量化喂料时粉体连续性,采用最大连通区域面积量化喂料时粉体分散性。图像处理结果表明:当喂料速度为 12、18、24 kg/h 时,安装打散装置的喂料机喂料连续时刻粉体面积分布变异系数分别减小 74.8%、75.0%、68.2%,打散装置可显著改善喂料的连续性;最大连通区域面积分别减小 84.6%、83.0%、83.3%,喂料时粉体团聚程度明显降低,粉体分散性明显提升。

参 考 文 献

[1] 徐雪萌,李飞翔,申长璞,等. 小麦粉等距螺旋喂料装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):150 - 157.
XU Xuemeng, LI Feixiang, SHEN Changpu, et al. Optimization design and experiment of wheat flour equal pitch screw feeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):150 - 157. (in Chinese)

[2] 陈海涛,董冰哲,柴誉铎,等. 秸秆纤维制取机配套强制喂料装置的优化设计及试验[J]. 东北农业大学学报,2017,48(7):83 - 90.
CHEN Haitao, DONG Bingzhe, CHAI Yuduo, et al. Design and optimization of forced feeding device for straw fiber extruder [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017,48(7):83 - 90. (in Chinese)

[3] 罗自生,徐晓玲,徐庭巧,等. 壳聚糖添加纳米碳酸钙助剂对鲜切山药品质的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(4):125 - 128.
LUO Zisheng, XU Xiaoling, XU Tingqiao, et al. Effect of chitosan coating with Nano - $CaCO_3$ appendix on quality of fresh cut yam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):125 - 128. (in Chinese)

[4] 张荣荣. 益生菌豆乳奶酪在成熟过程中品质的变化[D]. 晋中:山西农业大学,2023.
ZHANG Rongrong. Changes in the quality of probiotic soy milk cheese during maturation[D]. Jinzhong:Shanxi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[5] 阿日根图亚. 发酵蒙古马骨粉丸剂制作工艺研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
A Rigentuya. Study on preparation technology of mongolian horse bone powder granules [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[6] KIM Mi-kyung, LEE Jeong-a, JO Mi-rae, et al. Cytotoxicity, uptake behaviors, and oral absorption of food grade calcium carbonate nanomaterials[J]. Nanomaterials, 2015, 5:1938 - 1954.

[7] LI X, HOU Q, DONG K, et al. Promote cohesive solid flow in a screw feeder with new screw designs[J]. Powder Technology, 2020, 361: 248 - 257.

[8] GAO X, XIE G, XU Y, et al. Application of a staggered symmetrical spiral groove wheel on a quantitative feeding device and investigation of particle motion characteristics based on DEM[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117650.

[9] 王特栋,葛正浩,赵向娟,等. 螺旋喂料器变径变螺旋结构设计与性能仿真分析[J]. 包装工程,2023,44(7):250 - 257.
WANG Tedong, GE Zhenghao, ZHAO Xiangjuan, et al. Design and simulation analysis of variable diameter and variable pitch spiral structure of screw feeders[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 250 - 257. (in Chinese)

[10] 吴晓明，梁兵. 具破拱搅拌机构的螺旋喂料机：CN215827678U[P]. 2022－02－15.
[11] DALENJAN M B, JAMSHIDI E, EBRAHIM H A. A screw-brush feeding system for uniform fine zinc oxide powder feeding and obtaining a homogeneous gas-particle flow[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(1): 303－308.
[12] WANG A, ZOU P, XU J, et al. Investigation on reduction in compaction of ultrasonic vibration-assisted powder feeding for additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2024, 435: 119414.
[13] HUANG T, QIAN H, LI Z, et al. Promoting pellet feed flow in a screw feeder with an agitator[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(15): 6273－6284.
[14] BULGAKOV V, IV ANOVS S, BELOEV I, et al. Study on power parameters of moving grain materials with pneumatic screw conveyor[J]. Engineering for Rural Development, 2023, 22: 576－581.
[15] 武涛，黄伟凤，陈学深，等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报，2017，38(3)：93－98.
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93－98. (in Chinese)
[16] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1971, 324(1558): 301－313.
[17] 赵婷婷，冯云田. 大规模颗粒系统的精确缩尺和粗粒化离散元方法[J]. 计算力学学报，2022，39(3)：365－372.
ZHAO Tingting, FENG Yuntian. Exact scaling laws and coarse-grained discrete element modelling of large scale granular systems[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(3): 365－372. (in Chinese)
[18] KOSAKU Y, TSUNAZAWA Y, TOKORO C. A coarse grain model with parameter scaling of adhesion forces from liquid bridge forces and JKR theory in the discrete element method[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 268: 118428.
[19] 李永祥，李飞翔，徐雪萌，等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报，2019，35(16)：320－327.
LI Yongxiang, LI Feixiang, XU Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 320－327. (in Chinese)
[20] ZHOU J, ZHANG L, HU C, et al. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117005.
[21] SU M, WANG Z, WANG J, et al. Study on tribocharging of $CaCO_3$ particles based on CFD－DEM gas-solid two-phase flow coupling[J]. Powder Technology, 2021, 393: 610－618.
[22] ARTHUR T B, SEKYI N K G, RAHMANIAN N. DEM simulation of a single screw granulator: the effect of liquid binder on granule properties[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 203: 233－242.
[23] QIN R, FANG H, LIU F, et al. Study on physical and contact parameters of limestone by DEM[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252: 5.
[24] 徐庄威，王士林，易中懿，等. 基于 JKR 模型的辣椒籽离散元参数标定[J]. 中国农机化学报，2023，44(9)：85－95.
XU Zhuangwei, WANG Shilin, YI Zhongyi, et al. Parameter calibration of chili seed discrete element based on JKR model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 85－95. (in Chinese)
[25] 贾坡. 基于机器视觉的烧结型滚抛磨块缺陷检测方法研究[D]. 太原：太原理工大学，2022.
JIA Po. Research on defect inspection method of sintered abrasive blocks based on machine vision[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)
[26] 张敏. 多源图像融合关键技术研究及应用[D]. 西安：西安电子科技大学，2017.
ZHANG Min. Research and application on the key techniques of multi-source image fusion[D]. Xian: Xidian University, 2017. (in Chinese)
[27] 杨鹰，于哲峰，胥建宇，等. 基于 CCD 相机图像的烧蚀模型表面温度与材料发射率测量方法[J]. 实验流体力学，2025，39(2)：23－29.
YANG Ying, YU Zhefeng, XU Jianyu, et al. Measuring method of ablative model's temperature and emissivity based on CCD camera image[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2025, 39(2): 23－29. (in Chinese)
[28] 李忠虎，薛婉婷，吕鑫，等. 基于图像融合的风电塔筒边缘检测及提取方法[J]. 国外电子测量技术，2022，41(3)：90－95.
LI Zhonghu, XUE Wanting, LV Xin, et al. Edge detection and extraction method of wind turbine tower based on image fusion [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(3): 90－95. (in Chinese)
[29] 罗良清. 统计学[M]. 长沙：湖南大学出版社，2014.
[30] 邓向武. 基于深度学习的稻田杂草种类识别及其位置检测方法研究[D]. 广州：华南农业大学，2022.
DENG Xiangwu. The research of the categories identification and target detection with weeds based on deep learning in the paddy field[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[31] 林书庆. 粗集料粒形及级配对混凝土强度离散性的影响[D]. 重庆：重庆交通大学，2022.
LIN Shuqing. Influence of coarse aggregate shape and gradation on dispersion of concrete strength[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
[32] 李波，董明利，张帆. 端面不透光的 PDMS 微柱阵列制备与图像处理方法研究[J]. 红外与激光工程，2018，47(12)：380－387.
LI Bo, DONG Mingli, ZHANG Fan. Research of preparation and image processing method of PDMS micropost arrays with opaque top surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 380－387. (in Chinese)