

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.11.027

张齐东, 孙松林, 陈俊伟, 等. 基于EDEM的黑水虻虫沙振动分选装置参数研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(11): 214-221, 228

Zhang Qidong, Sun Songlin, Chen Junwei, et al. Parameters of vibration sorting device for black soldier fly insect sand based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(11): 214-221, 228

基于 EDEM 的黑水虻虫沙振动分选装置参数研究*

张齐东, 孙松林, 陈俊伟, 彭才望

(湖南农业大学机电工程学院, 长沙市, 410128)

摘要:为解决虫沙混合物在筛分时透筛率低等问题,优化设计一种非平面凸柱型方孔筛振动装置,研究振动筛结构和振动参数对虫沙混合物透筛性能的影响。以黑水虻虫沙为研究对象,采用 EDEM 离散元软件,以虫粪透筛率、筛选损失率为评价指标,以凸柱率、凸柱高度、振幅、振频、振动方向角为试验因素进行仿真试验。结果表明,虫粪透筛率、损失率影响显著顺序由大到小均为振频、振幅、振动方向角、凸柱率、凸柱高度,且振幅、振频两交互因素影响显著。最优工作参数组合:凸柱率为 1.25%,凸柱高度为 21 mm,振幅为 12 mm,振频为 8 Hz,振动方向角为 15°。在此条件下进行台架验证试验,得到透筛率为 77.1%、损失率为 24.19%,与仿真试验结果基本一致,误差较小。

关键词:黑水虻虫沙;振动筛;离散元;响应面

中图分类号:S226.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2025)11-0214-09

Parameters of vibration sorting device for black soldier fly insect sand based on EDEM

Zhang Qidong, Sun Songlin, Chen Junwei, Peng Caiwang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China)

Abstract: This study focused on optimizing a vibrating screen device to significantly reduce screening efficiency, a non-planar convex column-type square hole vibrating screen was designed and refined to improve the separation process. The research investigated how the structural design of the screen and various vibration parameters influenced the screening performance of the larvae-manure mixture. Using EDEM discrete element method software, the black soldier fly larvae and manure mixture were modeled as the test material. The screening rate and manure loss rate were selected as evaluation indicators, while convex column ratio, convex column height, amplitude, frequency, and vibration direction angle were set as the experimental factors for simulation. The results indicated that the order of influence on screening and loss rate, from most to least significant, was frequency, amplitude, vibration direction angle, convex column ratio, and convex column height. A notable finding was the significant interaction between amplitude and frequency. The optimal combination of working parameters was determined to be a convex column ratio of 1.25%, a convex column height of 21 mm, an amplitude of 12 mm, a frequency of 8 Hz, and a vibration direction angle of 15°. A bench test conducted under these optimized conditions yielded a screening rate of 77.1% and a loss rate of 24.19%, which closely aligned with the simulation results and showing only a small margin of error.

Keywords: black soldier fly insect sand; vibrating screen; discrete element; response surface

0 引言

近年来,黑水虻作为腐生性昆虫受到广泛关注,取

食畜禽粪便、餐厨垃圾等有机固体废弃物后,经其自身生物转化可获得高价值的虫粪有机肥和黑水虻幼虫^[1]。随着黑水虻养殖规模化、产业化的不断发展,机

收稿日期:2025年1月21日 修回日期:2025年3月5日

* 基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30310);湖南省教育厅资助科研项目(22A0169)

第一作者:张齐东,男,2000年生,湖南益阳人,硕士研究生;研究方向为现代农业机械化设备。E-mail: hunauzqd@163.com

通讯作者:彭才望,男,1988年生,湖南衡山人,博士,副教授;研究方向为畜禽废弃物资源化处理和利用。E-mail: hnndpcw@163.com

械化、自动化养殖是大势所趋。由于黑水虻幼虫与虫粪有机肥各自应用场所不同,如何在养殖后期将其二者分离,获得较为干净的黑水虻幼虫与虫粪有机肥,是目前研究中较为薄弱的一环。高效筛分黑水虻幼虫和虫粪有机肥是本文研究的重点。

筛选是利用振动筛将具有不同粒度的混合物分离,以获得具有特定粒度的物料颗粒,剔除混合物中其他物料的过程,其被广泛应用于农业和工业等领域^[2]。筛选装置振动性能对筛选作业质量有着重要影响^[3],根据筛分对象以及筛选应用领域的不同,可以将振动筛按照筛体形状、筛孔结构及排布形式进行分类。在筛分领域中常见的振动筛有平面圆孔筛、贝壳筛、编织筛、鱼鳞筛、圆筒筛、香蕉筛等^[4-6]。针对常规振动筛筛分效果差、损失率高等问题,许多专家对筛体的结构进行了改进和优化。邓嘉鸣等^[7]设计了一种基于单自由度两回路空间机构的并联振动筛,比较了并联振动筛与传统直线振动筛在常规平面筛面、非平面波浪筛面、非平面凹坑型筛面上的筛分性能;王立军等^[8]对比了平面、凸面、凹面编织筛的性能,提出了一种正弦曲面筛,提高了筛面不同区域的利用率以及对不同物料的适应性;李菊等^[9]设计了一种基于凸柱筛面的单轴三维输出运动并联振动筛,提高了筛上物料的分散度,且试验结果表明,适当数量的凸柱可以对物料颗粒起到疏松、防堵的作用。Li 等^[10, 11]设计了一种具有滑指结构的阶梯筛,试验表明,该筛体能够有效提高筛上物料的分散效果,解决平面筛上颗粒堆积问题。研究表明,振动筛体结构的创新可有效改进筛选装置的工作性能,提高物料的筛选效率。

方芹等^[12]设计了一种筛孔分段式滚筒筛,黑水虻虫沙混合物通过两段孔径大小不同的筛网,有利于虫沙混合物分离,但受惯性影响下部分虫沙无法由出料口落入收集箱中,整体损失率较高;曾雪银等^[13]设计了一种多段振动筛分装置,通过连续多条振动筛选带的分离,可避免多次分选收集过程中人力、物力的浪费,但没有考虑黑水虻虫沙的物料物理特性,对黑水虻虫沙的适应性较差;裴亚欣等^[14]设计的一种摆动式筛分装置,通过电机驱动摆动筛,黑水虻虫沙在通过多层筛网后实现分级收获;干燥装置可以解决虫沙含水率大造成的筛孔堵塞问题,但用电量较大,不适合在大规模黑水虻养殖企业中推广。

针对上述问题,本文借助离散元分析软件 EDEM,以虫粪透筛率、筛选损失率为评价指标,通过比较非平面筛面(凸柱筛、凹槽筛)与平面筛面(方孔筛、圆孔筛)的透筛特性,设计一种凸柱型振动筛分装置。通过单因素试验与响应面分析确定各因素对评价指标的影响规律,通过极差分析获得最佳筛分参数组

合,最后通过台架试验验证可行性。以期为黑水虻虫粪振动筛分设计提供参数依据。

1 材料与方法

1.1 试验台架结构与工作原理

试验台架装置主要由输送带、振动筛网、调频电机、偏心轮、橡胶、振动筛边板、机架等组成,如图 1 所示。该装置工作时,待分离的黑水虻虫沙混合物由传送带输送,在重力作用下下落至振动筛网上,经过振动筛分,虫粪聚团振动分散,虫粪散体颗粒落入下方的收集箱中,未完全透筛的虫粪聚团和黑水虻幼虫落入黑水虻幼虫收集箱中,完成筛分。整机工作时,动力来源于电机,通过偏心轮带动振动筛运动,传送带可以保证黑水虻虫沙匀速通过。

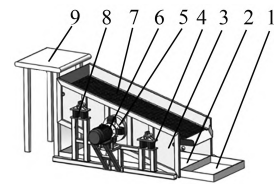


图 1 振动试验台结构

Fig. 1 Structure of vibration testbed

1. 黑水虻幼虫收集箱 2. 虫粪小颗粒收集箱 3. 振动筛边板 4. 橡胶
5. 偏心轮 6. 电机 7. 振动筛网 8. 机架 9. 输送带

1.2 黑水虻虫沙混合物物理参数

试验采用湖南某公司提供的黑水虻虫沙混合物样品,该样品是 8~10 日龄黑水虻幼虫投放到含水率为 70%~80% 的鸡粪中养殖 9~10 d 后获得。经筛分测量,该虫粪有机肥颗粒极大部分近似球体,分布范围为 1.2~2.6 mm,大部分粒径集中在 1.6~2.2 mm,平均粒径为 2.0 mm,极小部分呈疏松团状。黑水虻幼虫由于自身应激性会形成伸直和蜷曲 2 种状态,通过重复测量测得黑水虻幼虫体长 16~23 mm,平均体长为 21.8 mm;黑水虻幼虫体宽 3.5~4.5 mm,平均体宽为 4.0 mm。

1.3 仿真模型

1) 仿真模型建立。以振动筛为参考对象进行三维建模,如图 2 所示,筛体入料口高 500 mm,筛面长度为 1 000 mm,高度为 200 mm,筛面倾角为 2°,为节省计算量、降低计算难度,筛面宽度设置为 200 mm。

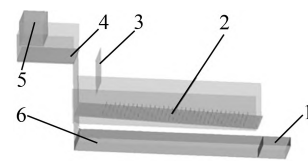


图 2 振动筛几何模型

Fig. 2 Geometric model of vibrating screen

1. 黑水虻幼虫收集箱 2. 振动筛网 3. 挡板 4. 输送带
5. 入料口 6. 虫粪小颗粒收集箱

除建立振动筛仿真模型之外,还需建立待筛物料

的仿真模型。黑水虻幼虫由于自身生物应激性会产生体长变化而呈现出伸直和蜷曲2种状态,为建立合乎实际的黑水虻幼虫模型,模拟不同形态黑水虻幼虫在筛面上的运动;试验结合实际工况,利用离散元法采用16个球颗粒两两重叠组合的方式,建立黑水虻幼虫仿真模型,其中伸直状态黑水虻体长23 mm,蜷曲状态黑水虻体长19 mm,2种体态黑水虻虫宽均为4.9 mm,伸直状态与蜷曲状态的黑水虻数量分布比例为3:2,离散元模型如图3所示。

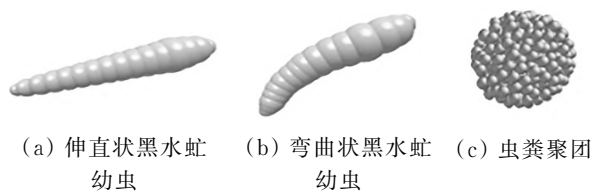


图3 离散元模型

Fig. 3 Discrete element model

黑水虻幼虫取食高含水率物料时,表面存在一定黏性,黏附力难以测量,据文献[15],在 EDEM 软件中应用 Hertz—Mindlin with JKR 接触模型。

虫粪有机肥颗粒由于自身含水率会黏附形成虫粪聚团如图3所示,虫粪聚团与筛网接触时,聚团内部各颗粒间存在法向接近速度引起了颗粒间的挤压碰撞,而虫粪聚团存在一定水分,颗粒间液桥显著影响了其相对运动。为较好地模拟湿颗粒间的黏结约束,采用 Hertz—Mindlin with Bonding 接触模型^[16]。

2) 仿真参数设置。查阅相关文献^[17-19],结合 EDEM 通用颗粒材料数据,确定仿真参数设置如表1和表2所示。

表1 材料物理参数

Tab. 1 Physical parameters of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
幼虫	0.3	8.67	350
虫粪有机肥	0.2	7	2 000
钢	0.3	79 000	7 860

表2 颗粒接触力学参数

Tab. 2 Contact mechanical parameter of materials

接触颗粒类型	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数	表面能/(J·m ⁻²)
幼虫—幼虫	0.2	0.43	0.32	0.35
幼虫—钢	0.3	0.6	0.45	0
虫粪有机肥—虫粪有机肥	0.46	0.8	0.15	0.1
虫粪有机肥—钢	0.51	0.65	0.09	0

由于接触模型对于时间步长较敏感,因此在 EDEM 软件中固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的5%,在振动筛模型入料口静态生成50个虫粪聚团大

颗粒、8 000个虫粪小颗粒、150个幼虫,在0.1 s时完成颗粒替换。

1.4 试验设计与方法

1) 筛面选型。针对黑水虻虫沙混合物在筛分过程中易在筛面产生聚集、堵塞等问题,结合平面筛面的工作特点,为提高黑水虻虫粪透筛率,设计2种非平面筛面(凸柱筛、凹槽筛),并与平面筛面(方孔筛、圆孔筛)进行对比,确定最佳筛面型式。基于筛分理论与计算分析,设计平面筛面筛孔尺寸为3 mm,横纵间距均为1 mm。为保证试验准确性,根据预试验,设置振动筛装置振幅为13 mm,振频为8 Hz,振动方向角为20°。设置凸柱筛:凸柱率为1.06%,凸柱高度为23 mm;凹槽筛:在平面方孔筛上设计10个边长为80 mm、深1 mm的正方形凹槽^[20]。筛选性能评价指标采用虫粪透筛率 Y_1 和筛选损失率 Y_2 ,计算如式(1)和式(2)所示。

$$Y_1 = \frac{t_1}{t_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{t_3 + t_4}{t_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: t_0 ——未筛分时的虫粪小颗粒质量,kg;

t_1 ——筛下虫粪收集箱中的虫粪小颗粒质量,kg;

t_2 ——未筛分时的黑水虻虫沙质量,kg;

t_3 ——筛下黑水虻虫收集箱中虫粪小颗粒质量,kg;

t_4 ——筛面未筛分的黑水虻虫沙质量,kg。

2) 单因素试验。根据筛面选型试验结果,探究不同结构参数(凸柱率、凸柱高度)和不同振动参数(振幅、振频、振动方向角)下虫粪小颗粒的透筛效果和黑水虻虫沙筛分损失程度,根据预试验,确定各因素的范围:凸柱率(0.27%~2.53%)、凸柱高度(3~43 mm)、振幅(2~22 mm)、振频(4~12 Hz)、振动方向角(5°~45°),以虫粪透筛率 Y_1 和筛选损失率 Y_2 为评价指标,设计单因素试验,以获得各振动参数的较优取值区间。

3) 优化试验。利用 Design—Expert 10.0.7 软件进行凸柱率、凸柱高度、振幅、振频、振动方向角五因素,虫粪透筛率和筛选损失率三水平组合试验与分析。如表3所示。

表3 试验因素编码

Tab. 3 Test factor codes

编码	因素				
	凸柱率 $X_1/\%$	凸柱高度 X_2/mm	振幅 X_3/mm	振频 X_4/Hz	振动方向角 $X_5/(\text{°})$
-1	1.06	13	7	6	5
0	1.59	23	12	8	15
1	2.12	33	17	10	25

2 结果与分析

2.1 不同筛面型式下仿真试验结果分析

不同筛面型式下的黑水虻虫沙混合物的筛分试验结果如图 4 所示。不同筛面虫粪透筛率由高到低分别为凸柱方孔筛、凹槽筛、方孔筛、凸柱圆孔筛、圆孔筛；筛选损失率由高到低分别为圆孔筛、凸柱圆孔筛、方孔筛、凹槽筛、凸柱方孔筛。在当前试验条件下，方孔筛的筛分性能明显优于圆孔筛，非平面筛的筛分性能明显优于平面筛。原因在于：在筛孔半径相同情况下，方孔筛有效筛分面积大于圆孔筛，故虫粪有机肥在筛分过程中虫粪透筛率大。凹槽筛作业时，整个筛箱演化为由多个小的浅筛箱组成的大筛箱，能向物料提供上下、前后、左右方向透筛机会，即该结构筛面具有三维透筛性^[21]。但该种型式的筛面设计难度较大，成本较高。而凸柱型筛面在作业时，凸柱的存在虽降低了有效筛分面积，但能对虫粪有机肥等含水率较高且易在重力作用下产生堆积的虫粪聚团起到松散作用，加速聚团外围虫粪小颗粒分离，从而提高透筛率；另一方面，凸柱推动了黑水虻幼虫向筛后方移动。这种结构间接提高了透筛率及物料在筛面的运输速度，且该筛面结构加工制作较为简单。故主要针对非平面凸柱方孔筛面进行试验研究与分析。

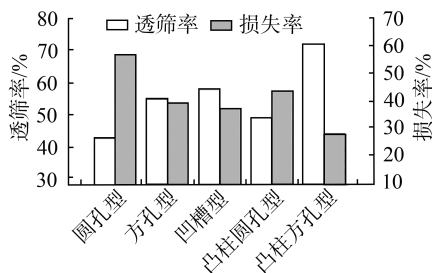


图 4 不同筛面型式的筛分仿真结果

Fig. 4 Simulation results of screening with different screen surface types

2.2 单因素对黑水虻虫沙分离的影响

1) 凸柱率。在凸柱高度为 23 mm、振幅为 12 mm、振频为 8 Hz、振动方向角为 35°时，凸柱率对黑水虻虫沙振动筛分效果如图 5(a)所示。随着凸柱率的增大，虫粪透筛率先增大后减小，筛选损失率先减小后增大，损失率在凸柱率为 0.27%~1.59% 时降幅较大，凸柱率超过 1.59% 后逐渐上升。原因是：在凸柱的作用下，增加了虫粪聚团与凸柱筛面的接触碰撞，虫粪聚团外围颗粒脱落，更多颗粒可以透筛，使透筛率逐渐增加；但随着凸柱的增多，凸柱对黑水虻虫沙疏松作用变弱，而阻碍物料特别是阻碍黑水虻虫向筛尾运动作用增加，造成黑水虻虫无法顺利运动到筛尾，造成损失率

逐渐增加。在凸柱率为 1.06%~2.12%，损失率较小且透筛率较大，故将其作为后续响应面试验凸柱率取值范围。

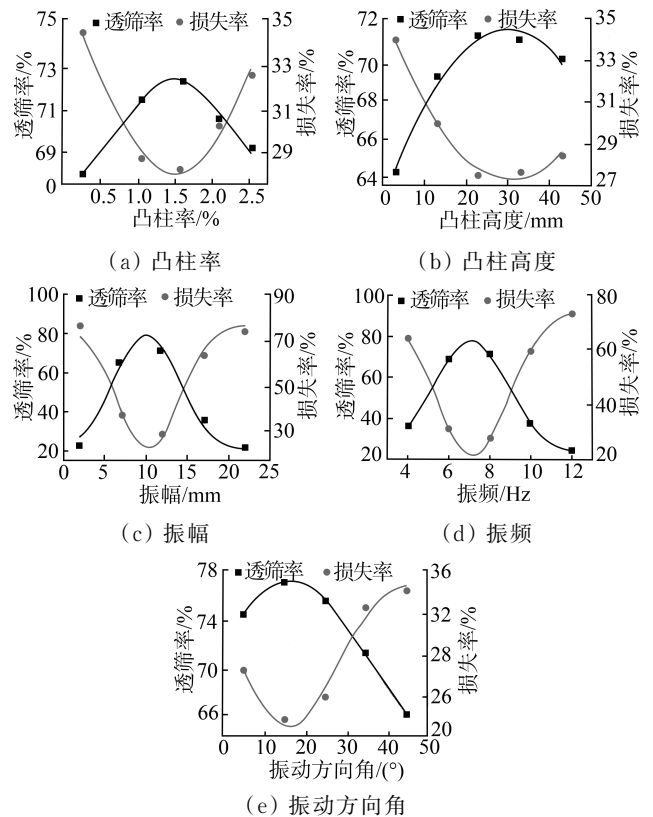


图 5 黑水虻虫沙振动筛分试验透筛率、损失率变化曲线

Fig. 5 Screening rate and impurity content in screening tests with different vibration direction angle in black soldier fly sand mixture

2) 凸柱高度。在其他条件相同情况下，凸柱高度对黑水虻虫沙振动筛分效果如图 5(b)所示。随着凸柱高度的增加，透筛率先增大后减小，筛选损失率先减小后增大，且在凸柱高度为 3~23 mm 时，筛选损失率增幅最大。在凸柱高度为 3 mm 时，透筛率最小，损失率最大。原因是：凸柱高度在 3 mm 时，凸柱过低，对物料的疏松作用不明显，造成筛分效果不佳。随着凸柱高度的增加，虫粪聚团和虫粪小颗粒与凸柱接触面积增加，物料层在高度方向上得以疏松，物料分层、透筛较好、损失减少。但当凸柱高度增加到一定范围后，物料在筛受到的运动阻力增大，使少部分虫粪聚团，黑水虻虫滞留在筛面上，造成损失率增大。综合考虑，选择凸柱高度为 13~33 mm 作为后续响应面试验因素水平。

3) 振幅。在其他条件相同情况下，振幅对黑水虻虫沙振动筛分效果如图 5(c)所示。随着振幅增加，透筛率先增大后减小，筛选损失率先减小后增大。原因是：前期振幅较小，虫沙后移速度较小，在凸柱阻挡的作用下，一部分虫沙无法在振动筛作用下向后移动，导致透筛率小，损失率大；随着振幅的增大，黑水

虹虫沙与筛面的碰撞越激烈,虫沙分层效果较好,更多虫粪小颗粒得到透筛,透筛率逐渐增加,损失率逐渐减小;在振幅达到一定数值后,随着振幅的增加,虫沙后移速度逐渐加大,虫沙在筛面的停留时间变短,颗粒与筛面的碰撞次数减少,透筛率减少,且由于虫沙后移速度加快,随着黑水虻幼虫进入黑水虻幼虫收集箱中的虫粪小颗粒增多,透筛率降低,损失率增大。综合考虑,选择振幅为7~17 mm作为后续响应面试验因素水平。

4) 振频。在其他条件相同时,振频对黑水虻虫沙振动筛分效果如图5(d)所示。随着振频的增加,透筛率先增大后减小,筛选损失率先减小后增大。原因是:随着振频的增大,虫粪颗粒在筛面上进行往复碰撞运动的次数增加,虫粪散体颗粒分层透筛效果较好,且聚团外围黏结键破碎率增加,二者叠加使虫粪颗粒的透筛率逐渐增加;伴随着振频的进一步增大,虫粪外围黏结键的破碎率趋于稳定,但虫沙物料迅速向出料口移动,使颗粒在筛面上滞留时间逐渐缩短,减少了颗粒的透筛次数,导致虫粪颗粒透筛率明显减小,损失率增大^[22]。根据试验结果,故选择6~10 Hz振频作为后续响应面试验因素水平。

5) 振动方向角。在其他条件相同时,振动方向角对黑水虻虫沙振动筛分效果如图5(e)所示。随着振动方向角的增加,透筛率先增大后减小,筛选损失率先减小后增大。在振动方向角为15°左右时,透筛率最大,损失率最小。原因是:当振动方向角较小时,黑水虻虫沙在与筛面碰撞时,受平行于筛面方向的作用力大于受垂直于筛面方向的作用力,虫粪聚团于筛面碰撞后,不仅有反弹力同时还伴随着旋转力,即剪切—碰撞式分离^[23],聚团外部的颗粒沿接触点切线方向分离透筛,使透筛率增大,同时黑水虻幼虫受平行于筛面方向的作用力随振动向出料口移动,使损失率减小;但随着振动方向角的继续增大,聚团受垂直于筛面作用力大于平行于筛面作用力,碰撞方式转换为重力—碰撞式分离,由于聚团下落高度相同,聚团破碎透筛趋势逐渐平缓,使透筛率减小^[24],同时黑水虻幼虫受平行于筛面方向作用力减小,滞留在筛面上,使损失率增加。综合考虑,选择5°~25°振动方向角作为后续响应面试验因素水平。

2.3 正交试验结果分析

1) 试验方案与结果分析。五因素三水平试验结果如表4所示,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 为各因素编码值。在不同试验因素水平值条件下,评价指标中虫粪透筛率 Y_1 的变化范围为23.8%~80.2%,筛选损失率 Y_2 的变化范围为21.7%~71.6%。

表4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental protocol and results

编号	因素					评价指标	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	0	0	0	77.3	23.5
2	1	-1	0	0	0	77.4	23.3
3	-1	1	0	0	0	76.8	25.8
4	1	1	0	0	0	77.5	23.2
5	0	0	-1	-1	0	38.2	62.9
6	0	0	1	-1	0	69.3	33
7	0	0	-1	1	0	67.7	34.7
8	0	0	1	1	0	23.8	71.6
9	0	-1	0	0	-1	74.4	28
10	0	1	0	0	-1	74.3	27.2
11	0	-1	0	0	1	74.1	26.2
12	0	1	0	0	1	77.2	23.5
13	-1	0	-1	0	0	68.1	33.8
14	1	0	-1	0	0	61.2	40.8
15	-1	0	1	0	0	53.5	45.3
16	1	0	1	0	0	54.2	44.4
17	0	0	0	-1	-1	72.8	29.3
18	0	0	0	1	-1	57.8	40.8
19	0	0	0	-1	1	71.8	30.5
20	0	0	0	1	1	51.3	47.2
21	0	-1	-1	0	0	66.9	34.7
22	0	1	-1	0	0	63.2	38.9
23	0	-1	1	0	0	50.9	46.6
24	0	1	1	0	0	56.4	42.6
25	-1	0	0	-1	0	73.1	29.2
26	1	0	0	-1	0	70.4	31.4
27	-1	0	0	1	0	56.9	41.4
28	1	0	0	1	0	58.9	36.9
29	0	0	-1	0	-1	69.3	34.6
30	0	0	1	0	-1	58.8	39.6
31	0	0	-1	0	1	65.4	36.6
32	0	0	1	0	1	47.5	50.9
33	-1	0	0	0	-1	75.8	26.7
34	1	0	0	0	-1	75.9	26.3
35	-1	0	0	0	1	76.2	24.1
36	1	0	0	0	1	75.3	25.5
37	0	-1	0	-1	0	70.3	31.7
38	0	1	0	-1	0	68.1	34.1
39	0	-1	0	1	0	55.4	43.2
40	0	1	0	1	0	57.5	41.3
41	0	0	0	0	0	78.4	21.7
42	0	0	0	0	0	79.3	22.4
43	0	0	0	0	0	74.3	26.8
44	0	0	0	0	0	78.2	21.9
45	0	0	0	0	0	77.4	22.7
46	0	0	0	0	0	80.2	21.8

2) 回归模型及显著性分析。表5为方差分析结果。

表 5 回归模型方差分析
Tab. 5 Regression model ANOVA

评价指标	方差来源	均方	自由度	平方和	F 值	P 值
Y ₁	模型	6 304.56	20	315.23	42.81	<0.000 1**
	X ₁	2.98	1	2.98	0.40	0.530 8
	X ₂	1.16	1	1.16	0.16	0.695 4
	X ₃	457.96	1	457.96	62.19	<0.000 1**
	X ₄	685.13	1	685.13	93.04	<0.000 1**
	X ₅	25.76	1	25.76	3.50	0.073 2
	X ₁ X ₂	0.090	1	0.090	0.012	0.912 9
	X ₁ X ₃	14.44	1	14.44	1.96	0.173 7
	X ₁ X ₄	5.52	1	5.52	0.75	0.394 7
	X ₁ X ₅	0.25	1	0.25	0.034	0.855 3
	X ₂ X ₃	21.16	1	21.16	2.87	0.102 5
	X ₂ X ₄	4.62	1	4.62	0.63	0.435 7
	X ₂ X ₅	2.56	1	2.56	0.35	0.560 8
	X ₃ X ₄	1 406.25	1	1 406.25	190.96	<0.000 1**
	X ₃ X ₅	13.69	1	13.69	1.86	0.184 9
	X ₄ X ₅	7.56	1	7.56	1.03	0.320 6
	X ₁ ²	2.99	1	2.99	0.41	0.529 7
	X ₂ ²	19.26	1	19.26	2.61	0.118 4
	X ₃ ²	2 451.59	1	2 451.59	332.91	<0.000 1**
	X ₄ ²	1 404.39	1	1 404.39	190.70	<0.000 1**
	X ₅ ²	18.83	1	18.83	2.56	0.122 4
残差	184.11	25	7.36			
失拟项	163.33	20	8.17	1.97	0.233 7	
纯误差	20.77	5	4.15			
总和	6 488.67	45				
Y ₂	模型	5 131.02	20	256.55	35.86	<0.000 1**
	X ₁	0.25	1	0.25	0.035	0.853 2
	X ₂	0.023	1	0.023	0.003	0.955 7
	X ₃	203.06	1	203.06	28.38	<0.000 1**
	X ₄	351.56	1	351.56	49.14	<0.000 1**
	X ₅	9.00	1	9.00	1.26	0.272 7
	X ₁ X ₂	1.44	1	1.44	0.20	0.657 6
	X ₁ X ₃	15.60	1	15.60	2.18	0.152 2
	X ₁ X ₄	11.22	1	11.22	1.57	0.222 0
	X ₁ X ₅	0.81	1	0.81	0.11	0.739 3
	X ₂ X ₃	16.81	1	16.81	2.35	0.137 9
	X ₂ X ₄	4.62	1	4.62	0.65	0.429 1
	X ₂ X ₅	0.90	1	0.90	0.13	0.725 4
	X ₃ X ₄	1 115.56	1	1 115.56	155.93	<0.000 1**
	X ₃ X ₅	21.62	1	21.62	3.02	0.094 4
	X ₄ X ₅	6.76	1	6.76	0.94	0.340 3
	X ₁ ²	2.54	1	2.54	0.36	0.556 6
	X ₂ ²	21.14	1	21.14	2.95	0.098 0
	X ₃ ²	2 325.27	1	2 325.27	325.02	<0.000 1**
	X ₄ ²	1 258.04	1	1 258.04	175.84	<0.000 1**
	X ₅ ²	29.00	1	29.00	4.05	0.055 0
残差	178.86	25	7.15			
失拟项	159.71	20	7.99	2.09	0.212 8	
纯误差	19.15	5	3.83			
总和	5 309.88	45				

注：**表示 P<0.01 水平上影响显著。

根据表 5 中试验结果,进行回归拟合和方差分析,剔除不显著项,得到虫粪透筛率 Y₁ 和筛选损失率 Y₂ 回归模型分别为式(3)和式(4)。

$$Y_1 = 77.97 - 5.35X_3 - 6.54X_4 - 18.75X_3X_4 - 16.76X_3^2 - 12.69X_4^2 \quad R^2=0.971 6 \quad (3)$$

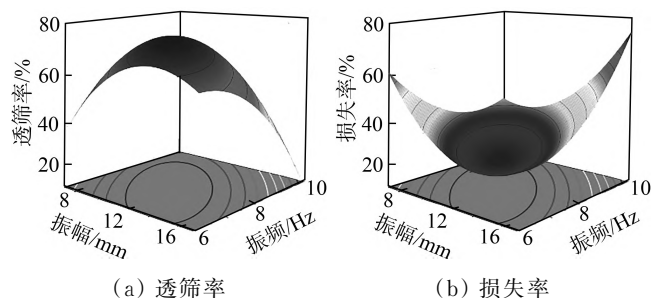
$$Y_2 = 22.88 + 3.56X_3 + 4.69X_4 + 16.7X_3X_4 + 16.32X_3^2 + 12.01X_4^2 \quad R^2=0.966 3 \quad (4)$$

由表 5 可知,虫粪透筛率 Y₁、筛选损失率 Y₂ 的二次回归模型 P 值<0.01,证明所建立回归模型极显著。失拟项 P 值>0.05,不显著,证明该回归模型无失拟项,即试验误差小。说明所拟合的二次回归方程与实际相符,能正确反映虫粪透筛率 Y₁、筛选损失率 Y₂ 与凸柱率 X₁、凸柱高度 X₂、振幅 X₃、频率 X₄、振动方向角 X₅ 之间的关系,回归模型可较好地试验中的各种结果进行预测。对透筛率的影响,X₃、X₄、X₃X₄、X₃²、X₄² 极显著,各因素对透筛率影响的显著顺序从大到小为振频、振幅、振动方向角、凸柱率、凸柱高度;对损失率的影响,X₃、X₄、X₃X₄、X₃²、X₄² 极显著,各因素对损失率影响的显著顺序从大到小依次为振频、振幅、振动方向角、凸柱率、凸柱高度。

3) 响应面分析。图 6(a)为凸柱率为 1.59%、凸柱高度为 23 mm、振幅方向角为 15°时,振幅、振频对虫粪透筛率交互影响的响应曲面图。随着振幅的增大,透筛率呈先快速增加后缓慢减少的趋势;随着振频的增大,透筛率呈先缓慢增加后减少的趋势。原因是:随着振幅的增大,筛面运动幅度越大,虫粪与凸柱筛面的碰撞越激烈,虫沙物料在筛面上有明显的分层现象,更多颗粒可以尝试透筛,透筛率增大;当振幅较大时,虫沙后移速度加大,虫粪在筛面停留时间变短,颗粒与凸柱筛面碰撞次数减少,透筛率缓慢减小;当振频较小时,筛面单位时间内运动次数较少,筛面对虫粪提供的应力无法使较多虫粪接触筛面,而当振频较大时,由于虫粪在筛面上运动的速度和加速度较大,使其迅速向出料口移动,使透筛率减小。

图 6(b)为凸柱率为 1.59%、凸柱高度为 23 mm,振幅方向角为 15°时,振幅、振频对筛选损失率交互影响的响应曲面图。随着振幅的增大,损失率呈先减少后增大的趋势,这是因为当振幅较小时,虫沙颗粒后移速度较小,在凸柱的阻挡下,一部分虫沙无法向出料口移动,使损失率较大。当振幅较大时,虫沙颗粒后移速度较大,使部分虫沙落入黑水虻幼虫收集箱中,损失率较大;随着振频的增大,损失率呈先减少后增加的趋势,原因是:随着振频的增加,虫沙颗粒在筛面上的往复运动次数增多,虫粪小颗粒分层效果好,虫粪聚团外围黏结颗粒破碎,使损失率减少,但当振频增大到一定值时,虫粪外围黏结颗粒破碎率趋于稳定,虫沙颗粒向出料口移动速度

较大,颗粒在筛面上运动时间较短,使损失率增大。



(a) 透筛率

(b) 损失率

图6 各因素交互作用对评价指标的影响

Fig. 6 Influence of the interaction of factors on the evaluation index

2.4 参数优化

为进一步提升黑水虻虫沙混合物分选作业性能,在各试验因素水平约束条件下,以寻求使虫粪透筛率最大、筛选损失率最小的最优筛选因素水平组合。利用 Design—Expert 10.0 软件中的 Optimization 模块对两评价指标的全因子二阶回归模型进行优化求解,根据振动筛的实际工作条件与作业要求,确定目标函数和约束条件如式(5)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } Y_1 \\ \text{Min } Y_2 \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{array}{l} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \\ -1 \leq x_4 \leq 1 \\ -1 \leq x_5 \leq 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (5)$$

优化后得到的最优参数组合:凸柱率为 1.25%,凸柱高度为 21.196 mm,振幅为 11.73 mm,振频为 7.55 Hz,振动方向角为 13.59°,该参数组合下的预测透筛率为 79.16%,损失率为 22.26%。根据优化结果对数据进行取整,取整后的参数组合:凸柱率为 1.25%,凸柱高度为 21 mm,振幅为 12 mm,振频为 8 Hz,振动方向角为 15°,在该组合下,黑水虻虫沙振动筛分具有较好的透筛性。

2.5 台架试验验证

根据正交试验优化结果,在湖南农业大学综合实训中心搭建黑水虻虫沙振动分选试验台并开展参数最优组合验证试验,如图 7 所示。筛面总长 1.2 m,筛面倾角为 2°。试验材料:将 8~10 日龄黑水虻幼虫投放到含水率为 70%~80% 的鸡粪中养殖 9~10 天后,将养殖托盘中收集的黑水虻虫沙混合物搅拌均匀,随机选取 2 kg。利用电热烘干箱测定黑水虻虫沙混合物的含水量为 32.5%。根据最佳参数组合设定试验台架相应参数,每次试验结束后计算透筛率和损失率 2 个指标,试验重复 5 次,验证试验结果见表 6。由

表 6 可知,在该参数组合下,虫粪透筛率均值为 77.1%,损失率均值为 24.19%,黑水虻幼虫—虫粪分离效果较好,与仿真试验结果基本一致,误差较小。

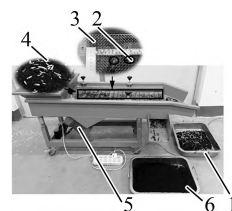


图7 振动分选试验台

Fig. 7 Vibrating sorting test bench

1. 黑水虻虫沙 2. 筛网 3. 凸柱 4. 黑水虻幼虫收集盒
5. 黑水虻虫沙收集盒 6. 振动筛调频电机

表6 台架试验验证结果

Tab. 6 Verification results of bench

序号	透筛率/%	损失率/%
1	76.76	24.37
2	77.39	23.87
3	75.88	25.16
4	78.55	22.84
5	76.91	24.73
平均值	77.10	24.19
预测值	79.16	22.26
相对误差/%	2.60	8.69

3 结论

针对黑水虻虫沙混合物表面黏结、易结块,在筛分时容易堵孔造成筛分效率低等问题,设计一种非平面凸柱型方孔振动筛装置,研究凸柱率、凸柱高度、振幅、振频和振动方向角 5 个参数对黑水虻虫沙混合物与筛面基体界面黏附特性的影响。

1) 通过对比平面筛(圆孔筛、方孔筛)与非平面筛(凸柱筛、凹槽筛)对黑水虻虫沙振动分选性能的影响,得出方孔筛透筛率、损失率明显优于圆孔筛,非平面筛的透筛率、损失率明显优于平面筛,凸柱方孔型筛面透筛率为 72.2%,损失率为 28.6%,筛分性能最佳。故设计一种非平面凸柱方孔型筛振动装置。

2) 通过开展单因素试验,分析 2 种结构参数和 3 种振动参数对黑水虻虫沙振动分选透筛率和损失率的影响规律,确定各参数较优水平区间:凸柱率为 1.06%~2.12%,凸柱高度为 13~33 mm,振幅为 7~17 mm,振频为 6~10 Hz,振动方向角为 5°~25°。

3) 通过正交试验,得到黑水虻虫沙振动分选透筛率、损失率关于结构参数与振动参数的数学模型以及最优组合,最优参数组合:凸柱率为 1.25%,凸柱高度为 21 mm,振幅为 12 mm,振频为 8 Hz,振动方向角为 15°。不同结构参数与振动参数对黑水虻虫沙振动分选

透筛率、损失率的影响次序由大到小依次为振频、振幅、振动方向角、凸柱率、凸柱高度, 振幅和振频对黑水虻虫沙振动分选透筛率和损失率存在交互作用影响。

4) 通过台架试验验证, 在最佳参数组合下筛分透筛率均值为 77.1%, 损失率均值为 24.19%, 与仿真试验结果基本一致, 误差较小。为黑水虻虫沙振动筛分装置相关参数提供参考。

参 考 文 献

- [1] 张晓林, 段永改, 贺永惠. 餐厨垃圾与鸡粪饲养黑水虻虫条件优化[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(6): 1200—1203, 1258.
Zhang Xiaolin, Duan Yonggai, He Yonghui. Optimization of black soldier fly larvae raising with kitchen waste and chicken manure [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(6): 1200—1203, 1258.
- [2] 李懿航. 基于蚯蚓头部轮廓的玉米籽粒仿生筛设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
Li Yihang. Design and experiment of bionic sieve based on contour of earthworm's head for maize grains cleaning [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [3] 李杰, 闫楚良, 杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(5): 701—704.
- [4] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 1—17.
Wang Lijun, Song Lianglai, Feng Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1—17.
- [5] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1—16.
Xu Lizhang, Li Yang, Li Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1—16.
- [6] Huang L, Pan M, Jiang H, et al. Kinematic characteristics of banana screen surface and operational parameter optimization for coal classification [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2022, 42(5): 1373—1392.
- [7] 邓嘉鸣, 沈惠平, 李菊, 等. 三维并联振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 342—346, 328.
Deng Jiaming, Shen Huiping, Li Ju, et al. Design and experiment for three-dimensional parallel kinematics vibration sieve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 342—346, 328.
- [8] 王立军, 武振超, 冯鑫, 等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 90—101.
Wang Lijun, Wu Zhenchao, Feng Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 90—101.
- [9] 李菊, 王增彪, 沈惠平, 等. 凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 150—154, 158.
- [10] Li Y, Xu Y, Cui T, et al. Improving particle dispersion characteristics with a novel cleaning screen: Parameter design and numerical simulation [J]. Powder Technology, 2022, 397: 116987.
- [11] Li Y, Fan H, Xu Y, et al. CFD—DEM investigation of particle dispersion degree on a novel vibrating screen [J]. Powder Technology, 2022, 404: 117497.
- [12] 方芹, 宋世圣, 周婷, 等. 两级分段式黑水虻虫沙滚筒筛分装置设计与试验[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3): 130—139.
Fang Qin, Song Shisheng, Zhou Ting, et al. Design and experiment of a two-stage segmented drum screening device for black soldier fly insect sand [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(3): 130—139.
- [13] 曾雪银, 黄志亮, 郭晓静, 等. 黑水虻分选系统[P]. 中国专利: CN202123440355.7, 2022—08—09.
- [14] 裴亚欣, 杨森, 孙梦晓, 等. 一种黑水虻筛分装置及其筛分方法[P]. 中国专利: CN202210699598.2, 2022—09—16.
- [15] 彭才望, 周婷, 孙松林, 等. 基于堆积试验的黑水虻离散元仿真参数标定与分析[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 814—823.
Peng Caiwang, Zhou Ting, Sun Songlin, et al. Calibration of parameters of black soldier fly in discrete method simulation based on response angle of particle heap [J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2022, 34(4): 814—823.
- [16] Song S, Wang Y, Zhou T, et al. Process analysis and parameters optimization of black soldier fly sand mixture with two-stage sieve surface vibration separating machine [J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2099.
- [17] 彭才望, 周婷, 宋世圣, 等. 基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 125—134.
Peng Caiwang, Zhou Ting, Song Shisheng, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125—134.
- [18] 蔡影峰, 牛世华, 刘朔, 等. 黑水虻幼虫处理鸡粪后虫体营养及虫沙评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 2006—2013.

(下转第 228 页)

- investigation for the influence of the nozzle length on jet fertilizer injector performance [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(6): 210–216.
- [8] 吴江虹. 水肥一体化技术在农业循环经济中的应用研究[J]. *农业装备技术*, 2023, 49(6): 4–8.
- [9] 汤攀, 李红, 骆志文, 等. 比例施肥泵驱动活塞受力分析及内部流动模拟与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 93–100.
- Tang Pan, Li Hong, Luo Zhiwen, et al. Force analysis of drive piston and simulation and experiment of internal flow for proportional fertilizer pump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 93–100.
- [10] 张建阔, 李加念, 吴昊, 等. 基于双吸肥口的低压文丘里施肥器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 115–121.
- Zhang Jiankuo, Li Jianian, Wu Hao, et al. Design and experiment of low pressure venturi injector based on double fertilizer inlets [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 115–121.
- [11] 王永涛, 刘坚, 李家, 等. 并联四文丘里管施肥器“旁路吸肥”模式性能分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39(9): 959–965.
- Wang Yongtao, Liu Jian, Li Jia, et al. Performance analysis of “bypass suction fertilizer” mode of parallel four-Venturi tube fertilizer applicator [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(9): 959–965.
- [12] 周佳华, 刘天雨, 周逸飞. 自适应模糊PID在营养液制备系统中的研究与应用[J]. *节水灌溉*, 2023(12): 98–104.
- [13] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 105–110.
- Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 105–110.
- [14] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 22–30.
- Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(16): 22–30.
- [15] 李加念, 马泽宇, 吴昊. 一种变量灌溉施肥装置及其控制方法[P]. 中国专利: CN201510376413.4, 2017–08–25.
- [16] 沈海军, 吴宏飞. 基于正交实验及CFD的低比转速离心泵优化设计[J]. *装备制造技术*, 2023(9): 41–44.
- (上接第 221 页)
- Cai Yingfeng, Niu Shihua, Liu Shuo, et al. Evaluation of growth performance and nutrient composition of black soldier fly larvae treated with laying hen manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 2006–2013.
- [19] 郑维扬, 于永民, 蒋本豫, 等. 基于鸡粪养殖的黑水虻幼虫复合滚筒筛参数研究[J]. *河南农业大学学报*, 2024, 58(1): 115–122.
- Zheng Weiyang, Yu Yongmin, Jiang Benyu, et al. Research on parameters of the double-layer asynchronous roller screen for the larvae of black soldier based on chicken manure culture [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2024, 58(1): 115–122.
- [20] 樊荣. 荞麦作物机械收获清选动力学特性研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2022.
- Fan Rong. Experimental study on cleaning kinetic characteristics of buckwheat crops harvested by machinery [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.
- [21] 袁驰. 1836圆振动弛张筛动力学参数设计及运动特性分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Yuan Chi. Dynamics parameter design and kinematics characteristics analysis of 1836 circular vibration flip-flow screen [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [22] 程超, 付君, 陈志, 等. 收获机振动筛振动参数影响不同湿度脱出物粘附特性[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 29–36.
- Cheng Chao, Fu Jun, Chen Zhi, et al. Effect of vibration parameters of vibrating screen for harvester on adhesion characteristics of threshed mixtures with different moistures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 29–36.
- [23] 焦杨, 章新喜, 孔凡成. 潮湿细粒煤聚团碰撞分离的物理过程和微观力学机制[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(10): 2092–2099.
- Jiao Yang, Zhang Xinxi, Kong Fancheng. Impact breakage process and micro-mechanics of the wet fine coal agglomerates [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(10): 2092–2099.
- [24] 程超, 付君, 郝付平, 等. 清选筛运动参数对玉米芯轴堵筛规律的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(1): 351–360.
- Cheng Chao, Fu Jun, Hao Fuping, et al. Effect of motion parameters of cleaning screen on corn cob blocking law [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(1): 351–360.