

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.013

基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定

彭才望 周婷 宋世圣 方芹 朱海英 孙松林

(湖南农业大学机电工程学院,长沙 410128)

摘要: 为建立黑水虻幼虫与收集、输送、分离等机械工作部件间发生碰撞时的碰撞模型,基于黑水虻幼虫生物特性,应用 Hertz 弹性碰撞理论推导了黑水虻幼虫碰撞过程动力学方程,结合运动学方程原理构建了黑水虻幼虫恢复系数的测定装置并进行了黑水虻幼虫恢复系数测定试验。试验针对第 5 龄期的黑水虻幼虫,采用 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ 混合正交试验方案研究了碰撞材料、材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向、含水率等因素对黑水虻幼虫恢复系数的影响,然后对碰撞材料、材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向进行单因素试验,并获得了材料厚度、下落高度、碰撞角对恢复系数的影响规律与回归方程,且方程的决定系数均不小于 0.9427。试验结果表明,影响黑水虻幼虫恢复系数的因素影响由大到小为:碰撞材料、下落高度、碰撞角、跌落方向、碰撞材料厚度、含水率,其中含水率对恢复系数影响不显著。单因素试验结果可得:黑水虻幼虫与 Q235 钢、铝合金、有机玻璃、橡胶等碰撞材料间的恢复系数依次降低,随下落高度的增大而逐渐减小,随材料厚度的增加而逐渐增大,恢复系数随碰撞角的增大而整体呈增大趋势,且横向跌落方向大于纵向跌落方向。该文研究结果可为黑水虻幼虫收集、输送、分离等机械相关工作部件优化设计提供参考依据。

关键词: 黑水虻幼虫;恢复系数;Hertz 接触理论;碰撞试验

中图分类号: S817.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0125-10

OSID: 

Measurement and Analysis of Restitution Coefficient of Black Soldier Fly Larvae in Collision Models Based on Hertz Contact Theory

PENG Caiwang ZHOU Ting SONG Shisheng FANG Qin ZHU Haiying SUN Songlin
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to build a collision model between black soldier fly larvae and key parts of collecting, transporting or separating equipment, a restitution coefficient measuring device based on biological nature of black soldier fly larvae and kinematics was designed, and the restitution coefficient of black soldier fly larvae was measured and analyzed by experiment. Research on the collision materials, the thickness of collision materials, falling height, collision angle, drop direction and moisture content of black soldier fly larvae's effect on the restitution coefficient of the 'the fifth age' black soldier fly larvae was conducted by a mixed orthogonal experiment based on the scheme of $L_{16}(4^4 \times 2^3)$. Then, single factor experiments for factors, including the collision materials, thickness of collision materials, falling height, collision angle, drop direction were carried out and the corresponding regression equations were obtained by analysis. Results of orthogonal experiments showed that the order of significance of restitution coefficient influencing factors was as follows: collision material, falling height, collision angle, drop direction, material thickness and moisture content. The influence of falling height and drop direction were extremely significant ($P < 0.01$), and the influence of material thickness, material thickness and collision angle were significant ($P < 0.05$), and the moisture content was not significant. Single-factor experiments were carried out for the following factors: collision material, material thickness, falling height, collision angle and drop direction. Regression equations were established between restitution coefficient and collision material, material thickness, falling height, collision angle and drop direction, with all the regression

收稿日期: 2021-08-01 修回日期: 2021-09-09

基金项目: 湖南省农机装备与技术创新研发项目(湘财农指[2020]0107)和湖南省大学生创新训练计划项目(S202110537054)

作者简介: 彭才望(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业与畜牧业机械设备研究,E-mail: hnnpcw@163.com

通信作者: 孙松林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设备研究,E-mail: hnnssl@163.com

coefficients no less than 0.942 7. Results of single-factor experiments of collision materials showed that restitution coefficient was decreased in the order as follows: Q235 steel, aluminum alloy, acrylic glass and rubber. From collision experiments of black soldier fly larvae with Q235 steel, restitution coefficient was decreased with the increase of falling height, increased with the increase of steel thicknesses and collision angle, and restitution coefficient was larger when the lateral fall of black soldier fly larvae collided with the steel than the vertical drop. Those results above can be an important reference in the designing and developing of collecting, transporting or separating equipment for black soldier fly larvae.

Key words: black soldier fly larvae; restitution coefficient; Hertz contact theory; collision test

0 引言

黑水虻幼虫取食畜禽粪便进行生物转化,获得有机肥与黑水虻幼虫^[1](黑水虻幼虫阶段分为5个龄期,其中第5龄期为预蛹前期,仍属于黑水虻幼虫,以下简称黑水虻幼虫),其中黑水虻幼虫富含粗蛋白^[2],作为家禽^[3]、家畜^[4]和鱼类^[5]的良好活体饲料或饲料添加成分,促进畜禽养殖低碳、可持续发展。然而,文献统计发现黑水虻幼虫机械化收集、输送、分离等相关方面的研究明显落后于黑水虻幼虫生长发育^[6]、生物转化效率^[7]、幼虫营养价值及利用^[8]、有机肥肥效与应用^[9]等方面的基础或应用研究。生物转化畜禽粪便过程中的第5龄期黑水虻幼虫即将进入预蛹阶段,需要完成有机肥收集、虫粪分离,以促进资源化利用。因此,需对第5龄期黑水虻幼虫碰撞恢复这一基础物理特性进行积累性探索研究。

黑水虻幼虫的恢复系数是进行黑水虻幼虫清选、筛分、收集、输送等环节相关工作部件参数设计与性能分析的基础数据,同时也是衡量黑水虻幼虫碰撞时变形恢复能力的重要参数,定义为碰撞后法向分离速度与碰撞前法向接近速度的比值^[10]。在进行黑水虻幼虫分离、收集、输送等作业时,黑水虻幼虫的虫体间、虫体与机械部件间均发生碰撞、反弹、挤压、滚动等形式的运动,易导致虫体发生弹性变形或塑形变形,引起虫体表面组织损伤,黑水虻幼虫损伤概率增大,影响分离、收集、输送等环节的作业效果。随着我国畜禽养殖规模化发展,黑水虻幼虫生物转化畜禽粪便促进资源化利用已成为当前研究的热点之一^[11]。为实现机械化收集、输送、分选黑水虻幼虫与有机肥混合物,降低劳动强度,提高产业规模化程度,文献[12-14]设计并公开了黑水虻养殖与分离方面的装置或方法,但缺乏具体的理论成果报道;笔者前期围绕黑水虻虫沙收集、输送,设计了双向螺旋集料装置^[15-16]、斗式取料转移输送装置^[17],一定程度上提高了黑水虻虫沙集料与输送效率,但黑水虻幼虫与有机肥的收集、输送、分离等环节的机械作业性能仍有很大的提升空间。因此,黑

水虻幼虫恢复系数的测定与分析对黑水虻虫沙相关的机械设备设计均具有重要的意义。

恢复系数的研究比较广泛^[18-20]。文献[21-25]分别测定分析了包衣水稻种子、小麦、油菜籽、苹果、马铃薯等物料对象的恢复系数;文献[26]对蝇蛆间碰撞模型中的恢复系数进行了研究和测定分析。然而,黑水虻幼虫与蝇蛆在生物特性、虫体表征等方面具有明显的差异性,目前,关于黑水虻幼虫恢复系数的测定与研究尚未见报道。

本文选择湖南农业大学黑水虻科研基地养殖的黑水虻幼虫(4日龄幼虫生物转化猪粪10d后分离获得),综合考虑黑水虻幼虫自身的生物特征,基于Hertz弹性碰撞理论推导黑水虻幼虫碰撞过程动力学方程;应用物性分析仪测量黑水虻幼虫受力情况并结合运动学原理设计黑水虻幼虫恢复系数测试装置。采用混合正交试验方法研究影响黑水虻幼虫恢复系数的主要因素及其显著程度,并对碰撞材料、材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向等重要因素进行单因素试验以获得影响规律及回归方程,以期在黑水虻幼虫分离、收集、输送等机械相关工作部件的设计提供基础数据和参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文研究对象为黑水虻幼虫,来源于湖南农业大学黑水虻科研基地,由4日龄黑水虻幼虫在含水率为70%~75%的新鲜猪粪中生物转化10d后分离获得,如图1所示。通过测量获得黑水虻幼虫的尺寸、含水率等基本参数,如表1所示(因生物转化工艺差异,虫体参数略有不同)。黑水虻幼虫表面光滑、外形扁平状,中间段断面椭圆形。将第5龄期的黑水虻幼虫初步清理和筛选,去除其中即将化蛹的暗褐色或生长缓慢的黑水虻幼虫,该部分虫体数量占样本数量的比例少于8%,对试验结果影响较小。随机挑选筛选过的黑水虻幼虫50条作为试验样本,应用游标卡尺(精度为0.01mm)重复测量,自然状态下测得黑水虻幼虫首尾体长为19.4~23.3mm,虫体中间段宽为4.5~5.5mm,黑水虻幼

虫长宽比为 4.04 ~ 4.75, 试验发现长宽比为 4.24 ~ 4.53 的黑水虻幼虫数量为 36 条, 占样本的 72%。为消除黑水虻虫体的长宽对试验结果的影响, 进一步以长宽比为 4.24 ~ 4.53 的黑水虻幼虫作为试验对象, 用天平(精度为 0.001 g)测量该范围的 50 条黑水虻幼虫质量, 重复 3 次, 单条幼虫质量均值为 0.177 g。采用卤素水分测定仪(HC - SFY001 型, ±0.5%, 上海花潮实业有限公司)测量黑水虻幼虫含水率, 测量精度为 0.001 g。



图 1 不同龄期黑水虻幼虫

Fig. 1 Black soldier fly larvae of different ages

表 1 黑水虻幼虫主要参数

Tab. 1 Main parameters of black soldier fly larvae

| 参数 | 数值 | 平均值 |
|-----------|---------------|-------|
| 长度/mm | 19.4 ~ 23.3 | 22.46 |
| 宽度/mm | 4.5 ~ 5.5 | 4.96 |
| 5 龄期含水率/% | 71.25 ~ 74.19 | 72.72 |

1.2 碰撞接触理论分析

黑水虻幼虫自由落体碰撞模型如图 2 所示, 假定黑水虻幼虫与碰撞板接触过程中没有产生相对滑移。黑水虻幼虫中间段部位表面为多个球面连接, 虫体为长条形椭球体, 接触时近似看作质量均匀的球形凸面接触。图 2 中点 A 为黑水虻幼虫与碰撞板碰撞起始点; 点 B 为黑水虻幼虫压缩阶段向回弹阶段的过渡点, 此时相对速度为零, 但黑水虻幼虫的弹性变形处于最大; 点 C 为黑水虻幼虫离开碰撞板的位置点。其中 AB 段是黑水虻幼虫压缩阶段, BC 段是黑水虻幼虫反弹阶段。

从黑水虻幼虫自身生物特性出发, 其具有粘弹性。黑水虻幼虫与碰撞板之间的碰撞过程为弹塑性碰撞, 如图 2 所示。图中 AB 段是压缩阶段, 黑水虻幼虫与碰撞板相互压缩受力, 黑水虻幼虫在压缩阶段的变形依次经历了弹性阶段(AD 段)和屈服阶段(DB 段), 随着黑水虻幼虫变形量的逐渐增大, 碰撞接触力 F 逐渐增大。由于黑水虻幼虫在屈服阶段存在不可逆的塑性变形, 当接触力达到最大值时, 黑水虻幼虫的压缩变形持续增加, 碰撞接触力 F 逐渐减小。当压缩变形达到最大值时, 黑水虻幼虫的相

对速度为 0。黑水虻幼虫进入反弹阶段 BC, 逐渐远离碰撞板, 压缩变形逐渐恢复, 碰撞接触力 F 逐渐减小。图中, v_0 为黑水虻幼虫碰撞前速度, m/s; v_1 为 v_0 的法向速度, m/s; v_2 为 v_0 的切向速度, m/s; v_3 为黑水虻幼虫反射速度, m/s; v_4 为 v_3 的法向速度, m/s; v_5 为 v_3 的切向速度, m/s; ω 为黑水虻幼虫的角速度, rad/s; α_1 为碰撞前入射角, ($^\circ$); α_2 为碰撞后反射角, ($^\circ$)。

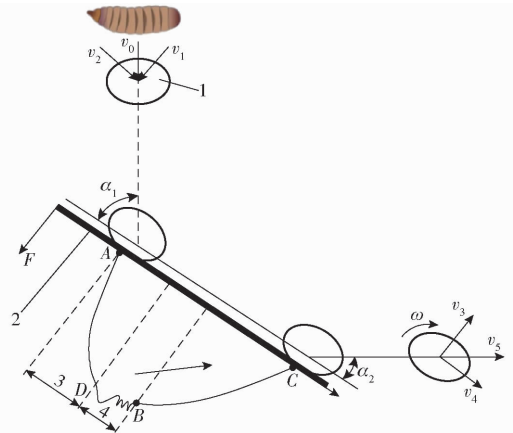


图 2 黑水虻幼虫碰撞过程运动学模型

Fig. 2 Kinematics model of black soldier fly

larvae collision process

1. 黑水虻幼虫模型 2. 碰撞板

黑水虻幼虫与碰撞板碰撞时的接触区域相比于物体尺寸非常小, 针对黑水虻幼虫虫体规则的凸面接触情况, 对于法向接触, 基于 Hertz 弹性接触理论, 将黑水虻幼虫虫体凸面和碰撞板接触区域视为弹性半空间, 且接触面的摩擦力很小, 可以忽略不计, 黑水虻幼虫与碰撞板接触碰撞示意图如图 3 所示。在碰撞力作用下接触区域可近似看作半径为 a 的圆, 接触面的任一点的法向位移为 b , 其到接触中心的水平距离为 r , 黑水虻幼虫球形凸面压入半空间的最大深度为 c 。接触区域压力 $P(r)$ 可表示为

$$P(r) = P \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \quad (r \leq a) \quad (1)$$

式中 P ——接触区域的中心压力, N

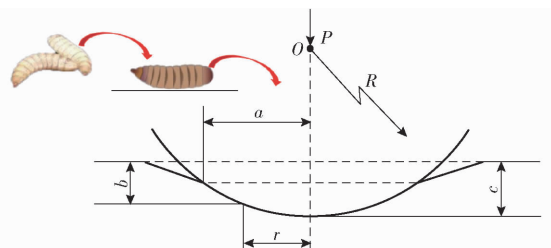


图 3 黑水虻幼虫与碰撞板接触碰撞示意图

Fig. 3 Schematic of contact collision between black soldier fly larvae and collision plate

碰撞力 F 和碰撞半径之间的关系可以表示为

$$F = \int_0^a P(r) 2\pi dr = \frac{2}{3} \pi P a^2 \quad (2)$$

黑水虻幼虫球形凸面单元体在法向作用力下,其表面的法向位移可表示为

$$w(r) = \frac{\pi a P}{4} \frac{1 - \nu^2}{E} \left(2 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (r \leq a) \quad (3)$$

式中 E ——黑水虻幼虫球形凸面物体单元弹性模量

ν ——黑水虻幼虫球形凸面物体单元泊松比

对于黑水虻幼虫虫体半径为 R 的外凸曲面对称虫体,当接触面与其横截面比非常小时,法向位移可简化为

$$w(r) \approx \delta - \frac{r^2}{2R} \quad (4)$$

其中 $\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi a P}{2E}$ (5)

式中 δ ——黑水虻幼虫与碰撞板接触中心的压缩位移求和

δ_1, δ_2 ——黑水虻幼虫凸面球形单元和碰撞板的压缩位移, mm

联合式(1)~(5)推导出黑水虻幼虫接触半径与碰撞力之间的关系为

$$a = \sqrt[3]{\frac{3FR}{4E}} \quad (6)$$

其中 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $E = \frac{1}{\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}}$

式中 R_1, R_2 ——黑水虻幼虫凸面球形和碰撞板在接触区域的曲率半径, mm

E_1, E_2 ——黑水虻幼虫凸面球形单元和碰撞板的弹性模量

ν_1, ν_2 ——黑水虻幼虫凸面球形单元和碰撞板的泊松比

式(6)确定了黑水虻幼虫凸面球形体与碰撞板接触时的碰撞接触面半径,对于黑水虻幼虫低速碰撞问题,可用于评估该碰撞过程的最大接触半径及其二者之间的接触力。

1.3 试验方法

1.3.1 力学试验

针对黑水虻幼虫这一特殊对象,进行碰撞试验前,必须考虑黑水虻幼虫所能承受的极限作用力,以免黑水虻虫体表面严重损伤。因此,利用 TA.XT Plus-36/R 型物性分析仪在室内温度为 20~30℃,相对湿度为 50%~60% 环境下,对被测黑水虻幼虫进行压缩试验,如图 4 所示。物性分析仪所用传感器量程范围为 0~5 kg,压缩试验时,将黑水虻幼虫

水平放置在平板上,设定加载速度和加载时间分别为 1 mm/s 和 3 s,使用直径为 36 mm 的圆柱形探头,沿黑水虻幼虫厚度方向加载直至黑水虻虫体挤压受损后停机。利用软件后处理模块得到黑水虻幼虫压缩试验过程中的载荷-位移数据,重复试验 3 次(试验过的黑水虻幼虫不重复试验),取加载最大作用力 F 的平均值。

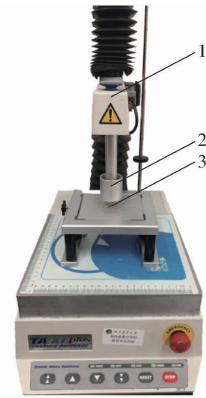


图 4 黑水虻幼虫压缩试验

Fig. 4 Compression experiment of black soldier fly larvae

1. 物性分析仪 2. 检测探头 3. 黑水虻幼虫

假定黑水虻幼虫从高 H 处自由落体下落时,落到地面后瞬间反弹高度记为 h_0 ,则

$$F = \frac{mHg}{h_0} \quad (7)$$

式中 m ——黑水虻幼虫质量, g

g ——重力加速度, m/s^2

由式(7)可知,黑水虻幼虫自由落体与地面之间的作用力 F 与 H 和 m 成正比,与 h_0 成反比, g 取 $9.81 m/s^2$ 。 H 大于 h_0 , 因此, F 总是大于黑水虻幼虫的重力 G , 本文由物性分析仪测得黑水虻幼虫最大承受作用力 F 为 2.94 N。

1.3.2 碰撞试验

黑水虻幼虫的虫体中间段为椭球体,沿虫体长度方向的厚度不一致,虫体表面柔软,虫体与接触材料碰撞接触时,可近似看作虫体某部位的球形对象之间的对心碰撞^[27]。参照文献[28-29],黑水虻幼虫恢复系数的测定采用基于质点对固定面的碰撞测试方法,图 5 为恢复系数测试装置图和黑水虻幼虫跌落运动分析图。如图 5 所示,碰撞板与竖直线呈夹角 θ (碰撞角, $^\circ$) 安装在试验台的支撑杆上,碰撞板在支撑杆上高度可调,且与水平面的倾斜角 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内可调,碰撞板上可安放相同尺寸的不同碰撞材料(Q235 钢、有机玻璃、橡胶板、铝板)。试验时,将预先筛选过的黑水虻幼虫从养殖基料中取出,从设定的高度水平投料基准平面的点 A 投料孔投放,点 A 投料孔设计 2 种形状(黑水虻幼虫体

长方向矩形投料孔和黑水虻幼虫体宽方向的圆形投料孔), 投料面板厚度为 10 mm, 可保证跌落方向的可靠性, 以实现黑水虻幼虫 2 种不同的部位与碰撞板接触碰撞。黑水虻幼虫自投料孔 A 处自由落体后与安装倾角为 θ 的碰撞板接触发生碰撞, 经反弹后以抛物线轨迹运动后落到铺满养殖基料的物料收集台上的点 B 位置, 高速相机记录黑水虻幼虫落料点位置。调整物料收集台的高度, 为减小试验误差, 重新选取一条黑水虻幼虫, 测量其自由落体经碰撞后的落料位置点 C , 得到 2 组黑水虻幼虫的运动水平位移 s_1 、 s_2 和竖直位移 h_1 、 h_2 。根据牛顿恢复系数定义^[10], 基于碰撞试验原理及运动学方程计算相应条件下的黑水虻幼虫恢复系数。

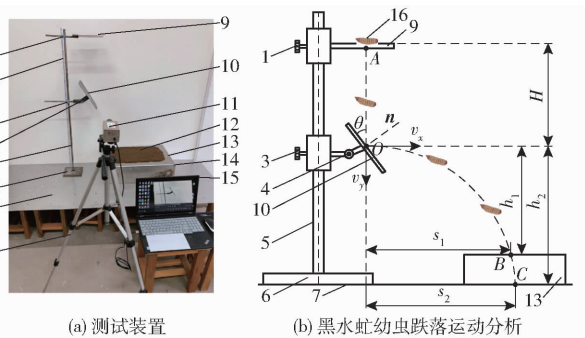


图 5 恢复系数测定装置及运动分析

Fig. 5 Diagrams of measuring device and motion analysis of black soldier fly larvae

1、3. 锁紧螺钉 2. 竖向标尺 4. 碰撞面角度调整螺钉 5. 支撑杆 6. 支撑底座 7. 试验台平面 8. 三脚架 9. 投放基准面 10. 碰撞板 11. 高速相机 12. 基料 13. 物料收集台 14. 横向标尺 15. 计算机 16. 黑水虻幼虫

1.4 试验原理

(1) 黑水虻幼虫从试验台高度为 H 的投料孔自由落体后, 与下方的碰撞板发生接触碰撞, 碰撞板的倾斜角可调, 且碰撞板上碰撞材料可置换。黑水虻幼虫受重力影响, 根据运动学公式可计算黑水虻幼虫与碰撞板发生碰撞前的瞬时运动速度, 即

$$\begin{cases} v_0 = gt \\ H = \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 t ——自由落体下落时间, s

由式(8)可得黑水虻幼虫在碰撞板点 O 处碰撞前瞬时速度 v_0 为

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (9)$$

(2) 假设黑水虻幼虫与碰撞板碰撞结束后, 其反弹运动轨迹以水平方向分速度 v_x 作水平匀速直线运动和以竖直方向分速度 v_y 作加速恒定的匀变速直线运动, 忽略黑水虻幼虫非线性几何形状的影响, 近似认为黑水虻幼虫反弹轨迹为抛物线, 根据抛

物运动规律可知

$$\begin{cases} s = v_x t_1 \\ h = v_y t + \frac{1}{2}gt_1^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 t_1 ——黑水虻幼虫反弹运动时间, s

s ——运动的水平位移, m

h ——黑水虻幼虫碰撞后自由落体高度, m

因黑水虻幼虫自由落体下落时间很难准确测量, 式(10)无法直接求解 t_1 、 v_x 、 v_y , 因此, 调整接料盘高度(高度差为 150 mm), 进行 2 次试验。测得 2 组不同物料收集台高度条件下的黑水虻幼虫运动水平位移和竖直位移。通过测量工具获得黑水虻幼虫自碰撞点反弹后的水平位移 s_1 、 s_2 和竖直位移 h_1 、 h_2 , 得到其水平方向分速度 v_x 和竖直方向分速度 v_y , 即

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gs_1 s_2 (s_1 - s_2)}{2(h_1 s_2 - h_2 s_1)}} \\ v_y = \frac{h_1 v_x}{s_1} - \frac{gs_1}{2v_x} \end{cases} \quad (11)$$

定义恢复系数为碰撞结束时接触点的瞬时法向分离速度与碰撞前法向接近速度比值, 计算公式为

$$e = \frac{v_n}{v_{0n}} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \cos(\theta + \arctan \frac{v_y}{v_x})}{v_0 \sin \theta} \quad (12)$$

式中 e ——恢复系数

v_n ——碰撞后法向分离速度, m/s

v_{0n} ——碰撞前法向接近速度, m/s

结合黑水虻幼虫在收集、输送、分离过程中的机械运动情况, 进行黑水虻幼虫自由落体碰撞试验, 调整图 5 中碰撞板角度, 使得 θ 为 90° , 让黑水虻幼虫与碰撞板垂直碰撞, 下落高度为 1 000 mm (远大于落差最大的筛分机械物料下落高度差) 通过高速相机拍摄黑水虻幼虫反弹高度 h_0 为 2.3 mm。根据式(7)可知, 碰撞力为 0.754 N, 远小于黑水虻幼虫所受碰撞最大作用力(2.94 N), 因此, 一般机械作业的高度落差不会对黑水虻幼虫造成严重的碰撞冲击损伤, 本文试验最大自由落体高度 H 为 500 mm。

1.5 试验设计

基于黑水虻幼虫在分离、收集、输送等环节机械作业情况, 黑水虻幼虫恢复系数受碰撞材料种类、跌落方向、碰撞角、碰撞材料厚度、自由落体高度、含水率等关键因素的影响, 为减少试验次数, 本文设计 $L_{16}(4^4 \times 2^3)$ 正交表, 对上述影响黑水虻幼虫恢复系数的关键因素进行混合正交试验研究, 确定各因素水平对黑水虻幼虫恢复系数影响的主次顺序及显著性水平, 然后对影响显著因素分别进行单因素试验,

求出对应的回归方程及决定系数,为黑水虻幼虫恢复系数预估提供基础数据支撑。

1.5.1 混合正交试验因素与水平

混合正交试验因素水平如表2所示。为研究各因素对黑水虻幼虫恢复系数的影响程度,各因素水平取值时,黑水虻幼虫分离、收集、输送等机械相关部件材料主要考虑有机玻璃、橡胶、铝合金、Q235钢等材料,因此,碰撞材料类型主要选取以上4种。结合课题组前期调研黑水虻幼虫筛分、收集、输送等机械设备,同时根据力学试验,黑水虻幼虫承受自由落体最大高度极限,黑水虻幼虫与机械设备表面的高度差范围为20~500 mm,自由落体下落高度因素水平分别取20、180、340、500 mm(不同高度通过锁紧螺钉固定)。结合机械设备制造情况和制造材料实际厚度范围,材料厚度分别取1、2、3、4 mm。不同含水率的养殖基料对黑水虻幼虫生长发育及其对养殖基料的生物转化效率具有较大差异,研究结果表明,以获得黑水虻幼虫增重最大为原则,黑水虻幼虫在含水率为60%~80%的养殖基料中,增重较为明显^[30-31]。结合黑水虻幼虫生物转化猪粪工艺^[7],统计分析黑水虻幼虫在含水率为70%~75%的新鲜猪粪中生物转化后其幼虫含水率为71.25%~74.19%,因此,试验选取含水率为71.25%和74.19%的黑水虻幼虫作为研究对象。考虑黑水虻幼虫与机械分离、收集、输送设备接触碰撞角,分别选取1°、15°、30°、45°,碰撞板倾角借助数显倾角仪(东莞三量量具有限公司生产,精度为0.01°)确定(不同碰撞角可通过碰撞板旋转)。结合黑水虻幼虫与碰撞材料碰撞的主要部位,选择黑水虻幼虫的虫体横向和纵向2种状态朝下投放,通过高速相机记录对应碰撞部位碰撞时的图像并保存。

表2 混合正交试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal experiment

| 水平 | 碰撞材料 | 材料厚度/mm | 下落高度/mm | 碰撞角/° | 跌落方向 | 含水率/% |
|----|-------|---------|---------|-------|------|-------|
| 1 | 橡胶 | 1 | 20 | 1 | 纵向 | 71.25 |
| 2 | 铝合金 | 2 | 180 | 15 | 横向 | 74.19 |
| 3 | Q235钢 | 3 | 340 | 30 | | |
| 4 | 有机玻璃 | 4 | 500 | 45 | | |

1.5.2 单因素试验的因素水平

为进一步明确相关因素对黑水虻幼虫恢复系数的影响规律,针对影响显著的因素进行单因素试验,并求出对应的回归方程。碰撞材料因素无法量化,不做回归分析,只做单因素试验。单因素试验时,因机械设备分离、输送黑水虻虫粪混合物常采用Q235钢,因此为接近实际情况,选取Q235钢作为试验材

料;材料厚度选取常用的2 mm;碰撞高度选取分离、输送作业过程跌落高度差的中间值340 mm;碰撞角选取中间值30°;因自身重力影响,黑水虻幼虫横向跌落概率较大,选取横向跌落作为试验条件。含水率变化范围小,对黑水虻幼虫恢复系数影响不显著。

2 结果与分析

2.1 混合正交试验结果与方差分析

混合正交试验设计与结果如表3所示,A、B、C、D、E、F为因素水平值。由表3中极差分析可知,影响黑水虻幼虫恢复系数的主次顺序为:碰撞材料、下落高度、碰撞角、跌落方向、材料厚度、含水率。为确定这6种因素的影响程度,对正交试验结果进行方差分析(表4),由表4可知,下落高度和跌落方向对恢复系数的影响极显著($P < 0.01$),碰撞材料、材料厚度、碰撞角对恢复系数的影响显著($P < 0.05$),含水率对恢复系数影响不显著。

2.2 单因素试验结果与分析

从表4可知,碰撞材料、材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向是影响恢复系数的主要因素。因此,分别针对碰撞材料、材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向进行单因素试验。

2.2.1 碰撞材料

混合正交试验表明,试验因素中碰撞材料对黑水虻幼虫恢复系数的影响极显著。在黑水虻幼虫碰撞材料厚度为2 mm、下落高度为340 mm、碰撞角为30°、跌落方向为横向的试验条件下,以碰撞材料为单因素的试验结果进一步表明,黑水虻幼虫与各种碰撞材料间恢复系数从大到小依次为:Q235钢、铝合金、有机玻璃、橡胶,分别为0.363 5、0.334 1、0.297 6、0.221 8。原因在于,Q235钢的硬度与强度最大,碰撞时黑水虻幼虫接触面积小,碰撞能量损失最低,恢复系数最大;而橡胶的硬度和强度最弱,碰撞时黑水虻幼虫接触面积大,变形量最大,恢复系数最小。在机械分离黑水虻幼虫时,分离部件应尽量选用恢复系数较大的材料,以增加黑水虻幼虫的反弹能力,提高分离效率;而对于机械输送、收集黑水虻幼虫时,在满足强度要求前提下,应选用恢复系数较小的材料降低黑水虻幼虫的碰撞反弹,提高稳定输送效果。

2.2.2 材料厚度

材料厚度影响其刚度,当碰撞材料厚度较大时,黑水虻幼虫碰撞后的碰撞材料发生的变形量更小,引起的损失能量较小,导致黑水虻幼虫与碰撞材料间的恢复系数较大。同时,黑水虻幼虫质量与碰撞材料的质量比很小,碰撞发生前,黑水虻幼虫自身能

表 3 正交试验方案及结果

Tab.3 Orthogonal experiment scheme and results

| 试验号 | 碰撞材料 A | 材料厚度 B | 下落高度 C | 碰撞角 D | 跌落方向 E | 含水率 F | 空列 G | 恢复系数 |
|-------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.216 9 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.241 8 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 0.289 8 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 0.307 5 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0.277 4 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 2 | 0.246 1 |
| 7 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.368 4 |
| 8 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0.322 5 |
| 9 | 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 0.299 6 |
| 10 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0.385 0 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0.359 2 |
| 12 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.396 3 |
| 13 | 4 | 1 | 4 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0.387 9 |
| 14 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0.377 8 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 0.234 5 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 0.255 0 |
| k_1 | 0.264 0 | 0.295 4 | 0.269 3 | 0.339 8 | 0.290 5 | 0.309 9 | 0.310 1 | |
| k_2 | 0.303 6 | 0.312 7 | 0.287 5 | 0.327 8 | 0.330 3 | 0.310 8 | 0.310 6 | |
| k_3 | 0.360 0 | 0.313 0 | 0.322 4 | 0.301 8 | | | | |
| k_4 | 0.313 8 | 0.320 3 | 0.362 2 | 0.271 9 | | | | |
| R | 0.096 0 | 0.024 9 | 0.092 9 | 0.067 9 | 0.039 8 | 0.001 0 | 0.000 5 | |
| 因素排列 | A > C > D > E > B > F > G | | | | | | | |

表 4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

| 来源 | 自由度 | 偏差平方和 | 平均偏差平方和 | F | P |
|------|-----|-----------|-----------|----------|----------|
| 碰撞材料 | 3 | 0.018 694 | 0.006 231 | 5 930.94 | 0.010 * |
| 材料厚度 | 3 | 0.001 335 | 0.000 445 | 423.63 | 0.036 * |
| 下落高度 | 3 | 0.020 166 | 0.006 722 | 6 398.04 | 0.009 ** |
| 碰撞角 | 3 | 0.010 904 | 0.003 635 | 3 459.63 | 0.012 * |
| 跌落方向 | 1 | 0.006 332 | 0.006 332 | 6 027.06 | 0.008 ** |
| 含水率 | 1 | 0.000 004 | 0.000 004 | 3.53 | 0.311 |
| 误差 | 1 | 0.000 001 | 0.000 001 | | |
| 总和 | 15 | 0.057 436 | | | |

注：** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)，* 表示影响显著 ($P < 0.05$)。

量也较低,对碰撞材料的影响程度低。试验选用常用的 Q235 钢作为碰撞材料、下落高度为 340 mm、碰撞角为 30°、跌落方向为横向试验条件下,材料厚度对恢复系数的影响如图 6 所示。图 6 表明,在一定范围内,恢复系数随着碰撞材料厚度的增加而逐渐增大,但碰撞材料厚度达到一定值后,恢复系数增长趋势趋于平缓。原因在于,随着 Q235 钢厚度的增加,刚度变大,碰撞时相对变形量更小,碰撞能量损失更低,结合碰撞能量守恒定律,黑水虻幼虫在厚度越大的 Q235 钢料上反弹速度越高,恢复系数越大;但是,当 Q235 钢料厚度达到一定值后,其变形量变

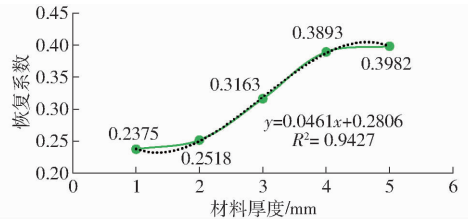


图 6 材料厚度对恢复系数的影响

Fig.6 Effect of material thickness on restitution coefficient

化相当小,此时,恢复系数增加趋势变得平缓。本文研究对象黑水虻幼虫质量相对碰撞材料非常小,因此,对碰撞材料的形变影响很低,与表 3 极差分析结果一致,相对其他因素碰撞材料厚度对恢复系数的影响较小。对于机械分离黑水虻幼虫部件,为增加其反弹能力,减小堆积现象,应选用厚度较大的材料;而对于转移、输送黑水虻幼虫机械部件,应选用厚度小的材料,提高稳定输送能力。

2.2.3 下落高度

所有因素中下落高度对黑水虻幼虫恢复系数的影响仅次于碰撞材料。在碰撞材料为 Q235 钢、碰撞角为 30°、跌落方向为横向、材料厚度为 2 mm、试验条件下,下落高度对恢复系数的影响如图 7 所示。由图 7 可知,黑水虻幼虫恢复系数随下落高度的增加而逐渐减小。原因在于,黑水虻幼虫自由落体的高度越大,碰撞时的初速度越大,其虫体本身为软体

组织,碰撞的相对变形量很大,碰撞过程能量损失增大。因此,碰撞后的反弹速度降低,导致恢复系数减小。相反,自由落体高度越小,碰撞能量损失越小,恢复系数越大。自由落体高度影响黑水虻幼虫反弹前的瞬时速度和反弹后的水平分速度,与此相关的环节如机械筛分机构的结构参数、输送后下落收料装置结构参数等设计过程中需要重点考虑。

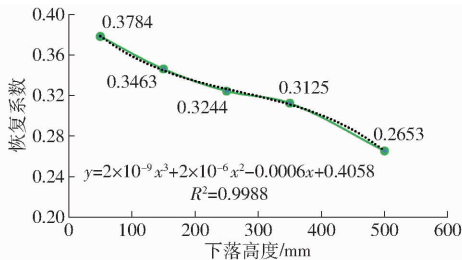


图7 下落高度对恢复系数的影响

Fig. 7 Effect of falling height on restitution coefficient

2.2.4 碰撞角

碰撞角对黑水虻幼虫恢复系数的影响显著性仅次于碰撞材料、下落高度,在碰撞材料为 Q235 钢、下落高度为 340 mm、跌落方向为横向、材料厚度为 2 mm 的试验条件下,其单因素试验结果如图 8 所示。由图 8 可知,恢复系数总体随碰撞角的增大而增大,具体表现为:碰撞角为 $1^\circ \sim 30^\circ$ 时,恢复系数随碰撞角增加而增大;当碰撞角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,恢复系数随碰撞角的增大而逐渐减小;当碰撞角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,恢复系数随碰撞角增大而增大。原因在于:当碰撞角为 $1^\circ \sim 30^\circ$ 时,黑水虻幼虫与碰撞材料接触主要为摩擦做功和虫体表面弹性变形,碰撞角小,恢复系数较小,碰撞角增大,摩擦损失能量减少,斜面撞击概率增大,反弹速度增加,恢复系数增大;当碰撞角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,黑水虻幼虫与碰撞材料主要为斜面撞击,黑水虻幼虫虫体表面某凸起点与碰撞材料发生碰撞时,产生旋转、摩擦等运动,能量损失增大,恢复系数有所降低;而当碰撞角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,黑水虻幼虫自由落体后与碰撞材料发生正面碰撞可能性不断增加,接触时间缩短,摩擦与旋转消耗能量减少,恢复系数增大。图 9 为不同碰撞角下,黑水虻幼虫自离开碰撞点、相同单位时间后的落点位置。由图 9 可知,碰撞角影响黑水虻幼虫横向速度 v_x 和纵向速度 v_y ,黑水虻幼虫碰撞后的反弹速度随碰撞角增大而增大,但在碰撞角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,有所降低,而碰撞角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,反弹速度不断增大,反弹距离增大。图 8 和图 9 的结果分析一致。因此,对于黑水虻幼虫与有机肥混合物在螺旋输送集料、转移输送过程中,满足强度条件下尽可能减小碰撞角,以降低黑水虻幼虫在作业过程中的反弹飞溅损失。而对于滚筒筛或

其他筛分分离部件,可适当考虑增大碰撞角,提高黑水虻幼虫反弹概率,增加透筛流动性。

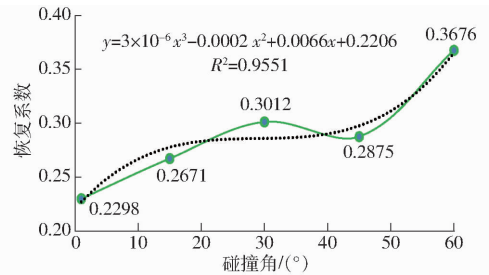


图8 碰撞角对恢复系数的影响

Fig. 8 Effect of collision angle on restitution coefficient

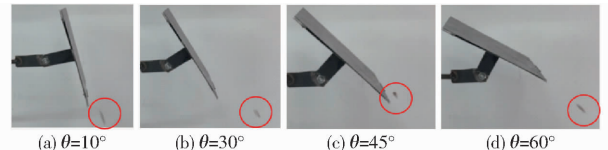


图9 不同碰撞角下相同单位时间后的黑水虻幼虫落点

Fig. 9 Landing points of black soldier fly larvae after the same unit time at different impact angles

2.2.5 跌落方向

黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定试验中,为使黑水虻幼虫自由落体过程更加符合黑水虻幼虫在收集、输送、分离机械上的实际运动和抛送运动情况,选取黑水虻幼虫与投料基准面呈纵向垂直和横向平行 2 种跌落方向,在碰撞材料为 Q235 钢、下落高度为 340 mm、碰撞角为 30° 、材料厚度为 2 mm 的试验条件下,跌落方向单因素试验结果为:纵向跌落方向的恢复系数为 0.2217,横向跌落方向下的恢复系数为 0.3325,不同的跌落方向造成黑水虻幼虫碰撞过程中能量损失不一致。原因在于,黑水虻幼虫纵向跌落,自由落体过程中,黑水虻幼虫根据虫体自身重心进行调整,将产生一定程度的旋转,能量损失较大;另外,碰撞发生时,黑水虻幼虫纵向端为头部或尾部接触瞬间,生物应激性最为明显,产生蜷缩,形变较大,能量损失增大,一定程度降低了反弹运动速度,恢复系数较小;而横向跌落,自由落体过程中状态较为稳定,虫体本身较软,但表皮具有一定的硬度且接触点面积较大,碰撞瞬间形变较小,恢复系数较大。

3 结论

(1) 混合正交试验结果表明:黑水虻幼虫碰撞过程中恢复系数的影响因素影响由大到小为:碰撞材料、下落高度、碰撞角、跌落方向、碰撞材料厚度、含水率。其中,下落高度与跌落方向对恢复系数影响极显著 ($P < 0.01$),碰撞材料、材料厚度、碰撞角对恢复系数影响较显著 ($P < 0.05$),而含水率对恢

复系数影响不显著。

(2) 单因素试验结果表明: 在材料厚度、下落高度、碰撞角、跌落方向一致情况下, 黑水虻幼虫与 Q235 钢、铝合金、有机玻璃、橡胶等碰撞材料的恢复系数依次降低; 在其他相同条件下, 恢复系数随碰撞材料厚度的增加而逐渐增大, 随下落高度的增加而逐渐减小, 随碰撞角的增大而整体呈增大趋势, 并且得到材料厚度、下落高度、碰撞角与恢复系数的回归方程, 决定系数分别为 0.942 7、0.998 8、0.955 1。

(3) 在机械收集、输送、分离黑水虻幼虫等部件设计过程中, 对于需要减少黑水虻幼虫反弹的

环节(如收集、输送)应尽可能选用恢复系数较小的材料如橡胶等, 同时降低使用材料的厚度并选取适宜的下落高度; 而对于机械分离黑水虻幼虫环节(如振动筛、弹跳筛或滚筒筛、风选等), 需要提高分离效率与物料的流动性, 则尽量增加材料厚度并选取合适下落高度。而第 5 龄期黑水虻幼虫含水率分布范围分布很小, 对恢复系数的影响最小, 且影响不显著。同时, 黑水虻幼虫碰撞过程中除了受文中所述一些因素外, 可能还受其自身生物应激蠕动特性等难以控制的因素影响, 得到的结果可能会存在差异。

参 考 文 献

- [1] 朱芬. 黑水虻[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2019.
- [2] CUTRIGNELLI M I, MESSINA M, TULLI F, et al. Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute; intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens[J]. *Research in Veterinary Science*, 2018, 117: 209 – 215.
- [3] WANG X Y, GAO Q, LIU X H, et al. Metallothionein in *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) larvae (Diptera: Stratiomyidae), a potential biomarker for organic waste system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(6): 5379 – 5385.
- [4] 张放, 朱建平, 张政, 等. 黑水虻虫粉对育肥猪生长性能、血清指标和养分消化率的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(6): 130 – 133, 146.
ZHANG Fang, ZHU Jianping, ZHANG Zheng, et al. Effects of black soldier fly meal on growth performance, serum indices and nutrient apparent digestibility in growing-finishing pigs[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(6): 130 – 133, 146. (in Chinese)
- [5] 刘世胜. 黑水虻幼虫替代鱼粉在鲤鱼饲料中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
LIU Shisheng. The study of replacement of fish meal with black soldier fly meal in feed for common carp[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [6] 徐齐云, 龙镜池, 叶明强, 等. 黑水虻幼虫的发育速率及食物转化率研究[J]. *环境昆虫学报*, 2014, 36(4): 561 – 564.
XU Qiyun, LONG Jingchi, YE Mingqiang, et al. Development rate and food conversion efficiency of black soldier fly, *Hermetia illucens*[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36(4): 561 – 564. (in Chinese)
- [7] 袁橙, 魏冬霞, 解慧梅, 等. 黑水虻幼虫处理规模化猪场粪污的试验研究[J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51(11): 49 – 53.
YUAN Cheng, WEI Dongxia, XIE Huimei, et al. Research on treatment of fecal pollution on large scale pig farms with black soldier fly larvae[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 51(11): 49 – 53. (in Chinese)
- [8] YU M, LI Z M, CHEN W D, et al. Use of *Hermetia illucens* larvae as a dietary protein source; effects on growth performance, carcass traits, and meat quality in finishing pigs[J]. *Meat Science*, 2019, 158: 107839.
- [9] NEWTON L, SHEPPARD C, WATSON D W, et al. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure[D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2005.
- [10] 姜付锦. 康普顿效应及其弹性碰撞恢复系数的推证[J]. *物理通报*, 2015, 33(11): 57 – 59.
JIANG Fujin. Proving on Compton effect and its elastic restitution coefficient[J]. *Physics Bulletin*, 2015, 33(11): 57 – 59. (in Chinese)
- [11] 余苗, 李贞明, 容庭, 等. 黑水虻在低碳畜牧业中的应用研究进展[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(12): 122 – 133.
YU Miao, LI Zhenming, RONG Ting, et al. Research progress in the application of *Hermetia illucens* in low-carbon animal husbandry[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(12): 122 – 133. (in Chinese)
- [12] 段永改, 陈伟. 一种小型黑水虻自动养殖系统及其养殖方法: 201910515101. 5[P]. 2019 – 06 – 14.
- [13] 卢强林. 一种黑水虻养殖装置和养殖方法: 201710932511. 0[P]. 2017 – 10 – 10.
- [14] 毛洪, 魏敏, 李燕. 一种用于处理厨余垃圾的黑水虻幼虫筛分装置: 202011132396. 7[P]. 2020 – 10 – 21
- [15] 彭才望, 宋世圣, 谢焯林, 等. 黑水虻虫沙双向集料装置参数优化与试验[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(4): 689 – 697, 714.
PENG Caiwang, SONG Shisheng, XIE Yelin, et al. Parameter optimization and experiment for *Hermetia illucens* and bidirectional aggregating device[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(4): 689 – 697, 714. (in Chinese)
- [16] 彭才望, 孙松林, 贺喜, 等. 双向螺旋黑水虻虫沙收集装置设计与试验[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 46(5): 637 – 646.
PENG Caiwang, SUN Songlin, HE Xi, et al. Design and experiment of bidirectional spiral collecting device for *Hermetia illucens*

- insect sand[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2020, 46(5): 637-646. (in Chinese)
- [17] 彭才望, 贺喜, 孙松林, 等. 斗式黑水虻处理猪粪有机肥取料机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 145-156. PENG Caiwang, HE Xi, SUN Songlin, et al. Design and experiment on shoveling device of pig manure organic fertilizer by *Hermetia illucen* transforming based on bucket-wheel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 145-156. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210213&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.013. (in Chinese)
- [18] HASTIE D B. Experiment measurement of the coefficient of restitution of irregular shaped particles impacting on horizontal surfaces[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 101(9): 828-836.
- [19] DURDA D D, MOVSHOVITZ N, RICHARDSON D C, et al. Experimental determination of the coefficient of restitution for meter-scale granite spheres[J]. Icarus, 2011, 211(1): 849-855.
- [20] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程设计中的应用现状和展望[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1-20. ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1-20. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.001. (in Chinese)
- [21] 杨明金, 李伟清, 李庆东. 包衣稻种弹性特性试验研究[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(1): 87-89. YANG Mingjin, LI Weiqing, LI Qingdong. Experimental research of elastic property of coated rice seed[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2001, 23(1): 87-89. (in Chinese)
- [22] 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 274-279. WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds incollision models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 274-279. (in Chinese)
- [23] 黄小毛, 查显涛, 潘海兵, 等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 22-29. HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, PAN Haibing, et al. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient inpoint-to-plate collision model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 22-29. (in Chinese)
- [24] 卢立新, 王志伟. 苹果跌落冲击力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 254-258. LU Lixin, WANG Zhiwei. Dropping impact mechanical characteristics of apple[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 254-258. (in Chinese)
- [25] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 50-57. FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tuberscollision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50-57. (in Chinese)
- [26] 蔡静. 基于 DEM 的蛆粪混合物动力学与多维振动筛的优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. CAI Jing. Dynamics of maggots and manure based on DEM and optimal design of the multi-dimensional sieving machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [27] 李逸良, 邱信明, 张雄. 恢复系数的不同定义及其适用性分析[J]. 力学与实践, 2015, 37(6): 773-777. LI Yiliang, QIU Xinming, ZHANG Xiong. Different definitions and corresponding applicabilities of the coefficient of restitution [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(6): 773-777. (in Chinese)
- [28] 秦志英, 陆启韶. 基于恢复系数的碰撞过程模型分析[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(4): 294-298. QIN Zhiying, LU Qishao. Analysis of impact process model based on restitution coefficient[J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(4): 294-298. (in Chinese)
- [29] 耿宏章, 张卫强, 周开学. 恢复系数的测量[J]. 物理实验, 2002, 23(1): 39-41. GENG Hongzhang, ZHANG Weiqliang, ZHOU Kaixue. Measurement of restitution coefficient[J]. Physics Experimentation, 2002, 23(1): 39-41. (in Chinese)
- [30] 杨霞, 王定美, 麦力文, 等. 不同含水率饲料对黑水虻生长发育的影响及其对饲料的转化特征研究[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(5): 1183-1190. YANG Xia, WANG Dingmei, MAI Liwen, et al. Growth and development and utilizing transformation characteristics with diet under different moisture content of black soldier fly (*Hermetia illucens*) [J]. Journal of Environmental Entomology, 2020, 42(5): 1183-1190. (in Chinese)
- [31] 何国宝. 黑水虻人工饲料含水量优化与产酶枯草芽孢杆菌研究[D]. 广州: 中山大学, 2010. HE Guobao. Research on the artificial diet water content optimization and enzyme-secreting *Bacillus subtilis* of black soldier fly (*Hermetia illucens*) [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2010. (in Chinese)