

滚筒式堆肥物料筛分机设计与试验

查德翔¹ 吴德胜² 李辉² 刘祥¹ 张春颖¹ 边远²

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中机华丰(北京)科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对现有滚筒筛分设备应用在堆肥行业中部件易损耗、筛分效率低且能耗高等问题,设计了一种滚筒式堆肥物料筛分机,设计了新型传动方式,增设了清筛装置。构建了滚筒筛分机物料颗粒运动数学模型,确定了关键部件结构参数,对影响筛分机工作性能的主要因素进行了试验和分析。以滚筒筛分机的喂料量、滚筒转速和滚筒倾角为试验因素,基于最优筛分效果,采用三因素五水平试验,分析筛分效率和功耗的最佳参数组合。结果表明:当喂料量 39.6 t/h、滚筒转速 12.4 r/min、滚筒倾角 5.6°时,滚筒筛分机筛分效果最佳,筛分效率为 96%,功耗为 2.55 kW。通过工厂试验验证,在最优参数组合条件下,筛分效率为 95%,功耗为 2.69 kW,与模型预测结果的相对误差为 1.1% 和 5.5%,满足物料筛分质量要求。

关键词: 滚筒筛分机; 堆肥; 正交试验

中图分类号: X71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0434-08

Design and Experiment of Trommel Screening Machine for Composting

ZHA Dexiang¹ WU Desheng² LI Hui² LIU Xiang¹ ZHANG Chunying¹ BIAN Yuan²

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. MAE Wellful Industries Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of rapid deterioration of the components, low screening efficiency and high energy consumption of the existing drum screening equipment in the composting industry, a trommel screening machine for composting was designed, a transmission mode was designed, and a screen cleaning device was added. The fraction model of the trommel screening machine was constructed, the structural parameters of the key components were determined. In order to explore the performance of trommel screening machine, some relevant tests were carried out. Firstly, the three factors experiment was employed with feeding capacity, rotation speed and angle of trommel as the impact factor. Then based on the above screening effect, the experiment of three factors and five levels was executed, so as to study the influence law of screening efficiency and average power on screening performance and achieve the optimal combination of each factors. The results indicated that the trommel screening machine had the optimal screening efficiency and the power consumption, which were 96% and 2.55 kW, respectively, when the feeding rate was set at 39.6 t/h, the trommel speed was set at 12.4 r/min and the trommel angle was set at 5.6°. Through the verification test, the screening efficiency was 95% and the power consumption was 2.69 kW under the influence of the same factors. The relative errors were 1.1% and 5.5% with the theoretical results, which could satisfy the requirements of material screening quality.

Key words: trommel screening machine; composting; orthogonal test

0 引言

随着人民生活条件的逐步提高,根据《中国食物与营养发展纲要(2014—2020年)》,国民的肉蛋

奶消费量与占比逐年上升^[1-4]。与此同时,我国规模化养殖业发展迅速,大规模畜禽场所的逐步出现导致的畜禽粪污成为威胁工厂生产和人民健康的重要因素^[5-6]。粪污堆肥是畜禽粪污处理中最主要一

收稿日期: 2021-07-13 修回日期: 2021-09-09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800604)
作者简介: 查德翔(1995—),男,硕士生,主要从事畜牧工程与有机固废处理工程研究,E-mail: zhadexiangac@163.com
通信作者: 吴德胜(1963—),男,研究员,主要从事饲料饲养和有机废弃物处理设备研究,E-mail: wudsen@163.com

环。筛分设备是保障畜禽粪污堆肥过程顺利进行的重要设备。在堆肥过程中需要大型设备如翻抛机、立式堆肥仓^[7-8]等在堆肥物料中进行翻抛或者搅拌以提供好养发酵环境,若其中含有大量石块、塑料、绳索等杂物,与设备中搅拌部件长期碰撞会降低堆肥设备使用寿命甚至直接破坏堆肥设备。同时,由于在堆肥过程中需要添加大量含碳填料以保证物料有适宜的 pH 值、含水率、碳氮比和原料粒径等^[9-13],在堆肥过程结束后需要清选出未反应完的大块填料,只保留肥料。因此筛分设备不仅可以在堆肥前阶段对物料进行除杂,降低堆肥设备的损耗,且可以在堆肥后阶段保证后续物料加工的顺利进行、循环利用填料以控制成本。

针对堆肥物料筛分问题,国内开发了不同的筛分设备,包括振动筛、摇动筛、滚轴筛、滚筒筛等^[14]。振动筛一次性投资成本较小,但因其工作特点,硬物对筛面破坏程度较大,且容易糊筛不便清理。圆盘筛具有较强的物料翻转能力且耐磨损能力较强,但其使用受孔径限制,不适用于堆肥后阶段物料的筛分。滚筒筛分机作为回转运动筛分设备,工作平稳,在粮食分级、精选以及矿产分选中应用较为广泛^[15-23],但应用在堆肥行业中鲜有报道。部分企业使用的传统滚筒筛分机机械传动方式安装复杂,直接应用在堆肥行业中,由于较高的处理量常出现断轴等现象,又由于堆肥物料特殊性(湿度较高、腐蚀性强),其辐条结构容易损坏。现阶段大部分堆肥筛分的设备借鉴自其他行业,解决了堆肥物料筛分的一些问题,但并不能很好地适应堆肥物料的特点,容易出现糊筛、部件易腐蚀损害、大处理量下功耗高等问题,严重影响了筛分作业质量。

为解决堆肥物料筛分时传统滚筒筛机械传动方式复杂,应用在堆肥行业中易糊筛,筛分效率低,负载大等问题,本文设计一种外传动式托轮滚筒筛分机,将中心轴式传动方式转换为滚筒外链条齿轮的传动方式,增大滚筒筛承载能力,避免传动以及支撑部件腐蚀损坏;同时增设清筛装置,在滚筒筛运行过程中,对筛网持续进行刷刮,保证滚筒筛不被大面积糊筛,提高筛分效率并降低滚筒负载。采用回归分析和响应面分析,获取最佳工作参数组合,为进一步提高筛分性能提供技术和理论基础。

1 结构和工作原理

1.1 滚筒筛分机主体结构

滚筒筛分机的主体结构如图 1 所示,适用于物料的清选和除杂。滚筒筛分机主要由进出料口、传动系统、清筛装置、机架与外罩、滚筒等关键部件

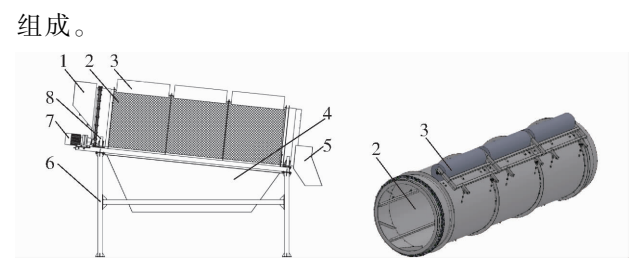


图 1 滚筒筛分机主体结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of trommel screening machine

1. 进料口 2. 滚筒筛 3. 清筛装置 4. 筛下物料出料口 5. 筛上物出料口 6. 机架 7. 传动系统 8. 托轮

1.2 工作原理

电机动力输出与减速机动力输入相连,为滚筒筛分机提供充足的运行动力,而滚筒旋转所需动力则通过双排或单排链条传动匹配输送。堆肥物料由皮带机输送,在入料口的集料作用下进入滚筒筛内腔。高速旋转的滚筒利用内壁上的抄板装置将物料反复抄至内腔最高处,随后利用重力坠落,物料颗粒经此过程反复经过筛网筛分。又由于滚筒放置于具有一定倾斜角的机架上,在每次的抄料过程中,物料颗粒逐渐向出料口移动,经此往复,合格颗粒通过筛网进入设备下方传送带,进行下一步工序,不合格物料由出料口收集。

2 关键部件设计与参数确定

筛筒是滚筒筛的核心工作部件,物料在筛分过程中是否能被有效筛分取决于滚筒的属性,包括滚筒直径、滚筒长度以及滚筒筛倾斜角等结构参数,以及滚筒转速等运动参数。物料颗粒在筛面上的运动形式一定程度上决定了筛分设备的最终筛分效果^[24]。对颗粒在滚筒内的运动进行分析,并得出各结构参数与运动参数之间的关系,有助于确定滚筒的基本结构参数以及基本运动模型,为今后设计滚筒筛提供理论基础和设计方向。

2.1 筛内颗粒动力学分析

单个颗粒在滚筒中的运动规律如图 2 所示,虚线为颗粒在一个运动周期内的运动轨迹,不考虑互相碰撞的情况下,颗粒在滚筒中的运动轨迹由前部分的沿着滚筒内壁的圆弧以及后部分脱离滚筒壁的抛物线组成。颗粒进入筛面后,受到滚筒提供的摩擦力以及自身重力的作用,颗粒随着滚筒一起做圆周运动,在运动过程中,当所受合力不足以提供圆周运动所需离心力时,物料颗粒脱离滚筒,以一定的速度射出,做抛物线运动,并重新回到筛面。

实际筛分过程中颗粒运动情况如图 3 所示。由此建立数学模型,首先假设颗粒与筛面之间没有相对滑动,又由于是对单一颗粒进行分析,需要

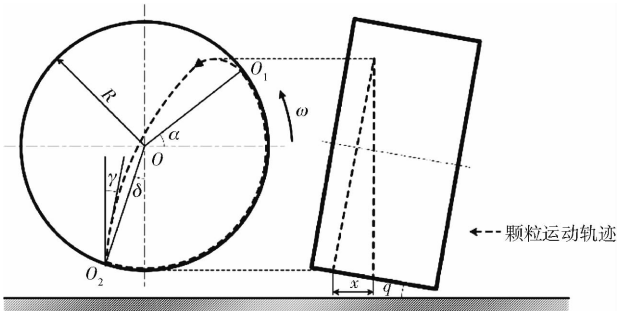


图 2 颗粒运动轨迹示意图
Fig. 2 Particle trajectory diagram



图 3 颗粒实际运动图
Fig. 3 Actual particle motion picture

忽略颗粒之间的相互作用。颗粒运动的受力分析如图 4 所示,此时颗粒与水平面夹角为 α 。

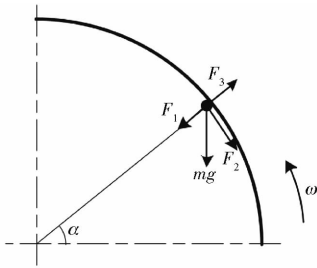


图 4 颗粒受力分析图
Fig. 4 Force analysis diagram of particle

对物料颗粒在该点的受力分析可知

$$F_1 = mgs\sin\alpha \tag{1}$$

$$F_3 = m\omega^2 R \tag{2}$$

式中 m ——颗粒质量,kg
 F_1 ——颗粒重力沿法线方向的分力,N
 F_3 ——颗粒做旋转运动时的离心力,N
 ω ——滚筒角速度,rad/s
 R ——滚筒半径,mm
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

由此得颗粒恰好离开筛面时的方程为

$$\frac{\omega^2 R}{g} = \sin\alpha \tag{3}$$

依据颗粒透筛概率最大理论,假设颗粒下坠时落点为滚筒最低点,即颗粒落点的径向方向与竖直方向的夹角 $\delta = 0^\circ$ 。

颗粒离开 O_1 后,垂直方向上的运动距离为

$$R(1 + \sin\alpha) = \frac{1}{2}gt^2 - \omega R t \cos\alpha \tag{4}$$

式中 t ——颗粒离开筛面后的运动时间,s
将式(3)代入式(4)可得
$$\omega t = \sin\alpha \cos\alpha + [\sin^2\alpha \cos^2\alpha + 2\sin\alpha(1 + \sin\alpha)]^{1/2} \tag{5}$$

同样可得物料颗粒在水平方向上的运动距离为

$$R \cos\alpha = \omega R t \sin\alpha \tag{6}$$

将式(5)代入式(6)可得

$$\cos^3\alpha = [\sin^2\alpha \cos^2\alpha + 2\sin\alpha(1 + \sin\alpha)]^{1/2} \sin\alpha \tag{7}$$

当 δ 不为 0° 时,式(5)一般化为

$$\omega t = \sin\alpha \cos\alpha + [\sin^2\alpha \cos^2\alpha + 2\sin\alpha(\cos\delta + \sin\alpha)]^{1/2} \tag{8}$$

式(7)一般化为

$$\cos^3\alpha + \sin\delta = [\sin^2\alpha \cos^2\alpha + 2\sin\alpha(\cos\delta + \sin\alpha)]^{1/2} \sin\alpha \tag{9}$$

由式(9)解得

$$\begin{cases} \sin\delta = -\cos(3\alpha) \\ \cos\delta = \sin 3\alpha \end{cases} \tag{10}$$

即
$$\delta = 3\alpha - \pi/2 \tag{11}$$

物料到达筛面时速度方向与竖直方向的夹角 γ 为

$$\cos\gamma = \frac{1}{\sin\alpha} \left(3 - \sin^2\alpha + \frac{2\cos\delta}{\sin\alpha} \right)^{1/2} \tag{12}$$

根据颗粒的透筛概率最大理论^[25-27],当 $\gamma = \delta$ 时物料通过筛网的概率最大。解得,当 $\alpha = 0.190\pi$ (34.3°) 时, $\gamma = \delta = 0.0711\pi$ (12.8°)。由此可得滚筒内径与转速的关系为

$$\frac{\omega^2 R}{g} = 0.563 \tag{13}$$

颗粒在滚筒中的实际运动轨迹如图 5 所示,呈螺旋线,经计算可得滚筒中颗粒沿轴向方向的速度 v 为

$$v = \frac{2R \tan q}{\frac{1}{\omega} \{ \sin\alpha \cos\alpha + [\sin^2\alpha \cos^2\alpha + 2\sin\alpha(\cos\delta + \sin\alpha)]^{1/2} \}} \tag{14}$$

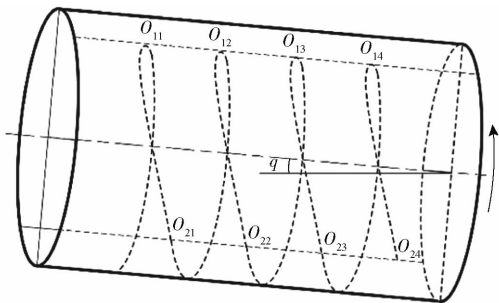


图 5 颗粒空间运动轨迹
Fig. 5 Trajectory of particle in space

式中 q ——滚筒倾角, ($^{\circ}$)

2.2 结构参数和工艺参数确定

结合 2.1 节分析,可以得到滚筒的计算半径 R_c 和工作角速度 ω 的计算公式为

$$R_c = 2[20Q_d/(\rho FK_V g^{0.5} \tan q)]^{0.4} \tag{15}$$

$$\omega = K_n K_r \sqrt{g/R} \tag{16}$$

式中 Q_d ——设计产量, t/h

ρ ——物料容重, kg/m³

F ——物料填充比例, %

K_V ——倾角修正系数, $q=6^{\circ}$ 时, 其值为 2

K_n ——转速比例, 一般取 0.35 ~ 0.85

K_r ——滚筒扰动系数

将表 1 中的设计参数分别代入式 (15)、(16) 中, 计算得结构参数滚筒直径为 1.5 m, 滚筒长度为 5 m, 参考相似型号设备的尺寸系列, 选择 R 为 0.75 m, 并计算得该尺寸下滚筒最佳转速为 7.5 ~ 12.5 r/min。

表 1 设计参数
Tab.1 Design parameters

参数	数值
设计产量/(t·h ⁻¹)	40
物料容重/(kg·m ³)	852.6
物料填充比例/%	20
滚筒倾角/($^{\circ}$)	6
转速比	0.35 ~ 0.85

2.3 传动装置

为避免传统中心轴式滚筒筛分机转轴部分与堆肥物料接触过多导致腐蚀损坏, 且由于负载在中心轴处导致断轴, 以及外齿轮啮合大齿轮造价过高等, 特设计一种齿轮与链条外啮合传动方式, 如图 6 所示。传动方面, 链条采用分段式, 如图 7 所示, 分段式链条通过支撑耳连接, 并由支撑耳将链条固连在滚筒外壁上, 区别于传统式只有一个接头的整体式链条, 有效避免了整体链条部分损坏即全部拆换的缺点, 方便维修。在整体支撑方面, 由原来的筛筒内重量由轴与辐条全部承担转换为 4 个托轮以及支架限位的方式, 避免了在较高的处理量下, 主轴既承担转动传递扭矩又承担筛筒整体重量可能带来的断轴、辐条破坏、筛网损坏等问题。且筛网内没有多余的部件, 减少了堆肥物料与设备部件的接触, 降低腐蚀损耗。在负载方面, 将传动机构放置滚筒外侧, 增大了电机给滚筒带来的扭矩, 滚筒筛所能承受的负载随之增加。

经过 EDEM 仿真, 得到最大喂料量时滚筒筛分过程中滚筒所受最大扭矩, 经计算得到链条位置承

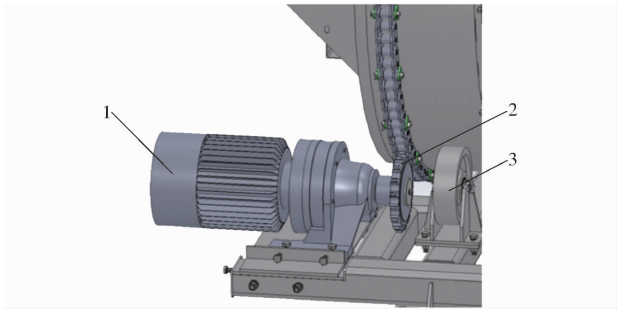


图 6 传动机构示意图

Fig. 6 Schematic of transmission mechanism
1. 减速器电机 2. 齿轮链条传动机构 3. 托轮



图 7 分段式链条示意图

Fig. 7 Schematic of segmented chain
1. 分段式链条 2. 支撑耳

受的切向载荷, 选取 A 级节距 $P=44.45$ mm 的链条 28 A, 其抗拉载荷为 200 MPa。

链条所处圆环直径为 1 540 mm, 链板高度为 41.5 mm, 经计算链条节数为 $z_2=112.38$ 节, 圆整后取偶数 112 节, 减速器输出转速为 93 r/min, 后期试验所需最大转速为 14 r/min, 即传动比为 6.64, 齿轮齿数 z_1 计算式为

$$z_1 = \frac{n_2}{n_1} z_2 \tag{17}$$

式中 n_2 ——链条转速

n_1 ——减速器输出转速

取齿轮齿数为 17。齿轮分度圆直径 d_1 为

$$d_1 = \frac{P}{\sin \frac{180^{\circ}}{z_1}} = 241.90 \text{ mm} \tag{18}$$

2.4 清筛装置

由于堆肥物料含水率比一般筛分物料高, 在物料过筛时, 有很大概率造成糊筛, 针对此问题, 增加了清筛装置。

如图 8 所示, 清筛装置由筛网、清筛刷辊、支撑架、弹簧稳定机构组成。放置在滚筒斜上侧, 利用自身重力以及弹簧机构施加的弹力, 将清筛刷辊与筛网紧紧贴合, 而清筛刷辊两端通过轴承与支架连接, 保证了清筛刷辊能贴合滚筒一同转动。同时, 该弹

簧稳定机构可以吸收清筛刷辊经过支撑架带来的振动,增加滚筒筛整体运行的稳定性。

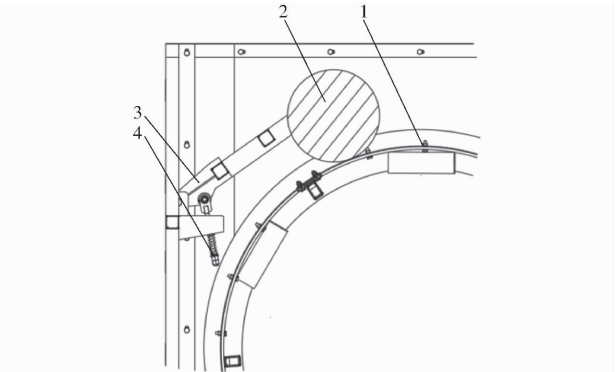


图 8 清筛装置结构示意图

Fig. 8 Schematic of screen cleaning device

1. 筛网 2. 清筛刷辊 3. 支撑架 4. 弹簧稳定机构

3 性能试验

3.1 试验方案与方法

参照文献[28],经过多次试验,选择影响筛分过程中的主要工作参数,即滚筒转速、滚筒倾角和喂料量作为试验因素。此外,以滚筒筛分效率最大化以及能耗最低为原则,选择滚筒筛分效率以及设备功耗作为评价指标。采用三因素五水平二次旋转正交中心组合试验,对滚筒筛分机的工作性能进行了评价。根据 2.2 节中设计参数以及前期试验可设定滚筒倾角为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$,滚筒筛转速为 $5.5 \sim 14 \text{ r/min}$,喂料量为 $30.5 \sim 77.5 \text{ t/h}$ 。表 2 为试验因素编码,表 3 为试验方案及结果, A 、 B 、 C 为因素编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experiment factors and codes

编码	因素		
	喂料量 $M/$ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	滚筒转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	滚筒倾角 $q/$ ($^{\circ}$)
-1.682	30.5	5.5	5.0
-1	40.0	7.3	5.5
0	54.0	9.8	6.0
1	68.0	12.3	6.5
1.682	77.5	14.0	7.0

2020 年 10—12 月,在河北省廊坊市三河市万禾工厂进行了滚筒筛分机的筛分试验,试验工厂场地面积 500 m^2 ,试验畜禽粪便为经堆肥后的牛粪。经测量,其含水率 39%,容重 852.6 kg/m^3 。所需物料为直径 6 mm 以下,即选用筛网孔径 6 mm 的不锈钢筛网。

采用齿轮齿条外啮合传动方式的 GS1500 型滚筒筛分机进行试验,并严格按照 GB/T 20781—2006

表 3 试验方案及结果

Tab. 3 Experiment schemes and results

试验 序号	因素			试验指标	
	A	B	C	筛分效率 $\eta/\%$	功耗 W/kW
1	-1	-1	-1	86	2.96
2	1	-1	-1	80	3.42
3	-1	1	-1	96	2.58
4	1	1	-1	94	3.23
5	-1	-1	1	84	2.66
6	1	-1	1	82	3.04
7	-1	1	1	88	2.55
8	1	1	1	81	2.85
9	-1.682	0	0	90	2.36
10	1.682	0	0	81	3.38
11	0	-1.682	0	82	3.00
12	0	1.682	0	90	2.73
13	0	0	-1.682	89	3.00
14	0	0	1.682	81	2.50
15	0	0	0	87	2.58
16	0	0	0	86	2.62
17	0	0	0	85	2.70
18	0	0	0	86	2.66
19	0	0	0	88	2.58
20	0	0	0	85	2.51
21	0	0	0	84	2.55
22	0	0	0	86	2.47
23	0	0	0	84	2.58

《固体肥料和土壤调理剂筛分试验》的操作规范和性能要求进行筛分试验。在每次测试之前,对滚筒筛分机的运行参数进行测试、校准和调整,以获得稳定的数据。在试验过程中,首先调整倾角,固定好整机后设置不同的操作参数(滚筒转速、喂料量),每次试验称量结束后对入料口以及出料口挡板进行调整以及清理,保证物料能完好筛分和接收,以保证测定区域的试验精度。每次试验结束时,通过磅秤称取筛上物质量,然后计算出筛上物占比,再计算出筛分效率。使用功率仪测量出设备功耗。

待所有物料筛分完成后,测得筛下物质量记为 m_l ,测得筛上物质量记为 m_u ,滚筒筛分机筛分效率 η 为

$$\eta = \frac{m_l}{(m_l + m_u)N} \times 100\%$$

(19)

式中 N ——筛下物比例

同一条件下进行 3 次试验,分别计算筛分效率,取 3 次试验的平均值作为筛分设备的筛分效率。

其中筛下物比例的计算方式为:取混和待筛分物料 500 g 左右,使用标准检查筛对初始物料进行筛分,取全部筛下物称量,记录其质量 m_x 。待筛分

物料中筛下物比例计算式为

$$N = \frac{m_x}{m_z} \times 100\%$$

(20)

式中 m_z ——筛分物料总质量,kg

经计算得该次筛分物料筛下物比例为 84%。

3.2 试验结果与分析

应用 Design-Expert 11 软件对评价指标 η 和 W 回归模型中的回归系数进行 F 检验和方差分析 (ANOVA), 结果如表 4、5 所示, 其中 F 值分别为 15.92、29.9, 模型回归项 $P < 0.001$, 回归极显著, 说明回归结果具有一定的可靠性。失拟项 P 值分别为 0.181 1、0.199 3 (不显著), 说明回归分析中不存在损失因子, 回归模型表现出较高的拟合度。

表 4 筛分效率回归模型方差分析

Tab.4 ANOVA of η regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	348.22	9	38.69	15.92	<0.000 1 **
A	83.74	1	83.74	34.45	<0.000 1 **
B	119.83	1	119.83	49.29	<0.000 1 **
C	86.92	1	86.92	35.76	<0.000 1 **
AB	0.125 0	1	0.125 0	0.051 4	0.824 1
AC	0.125 0	1	0.125 0	0.051 4	0.824 1
BC	55.12	1	55.12	22.68	0.000 4 **
A^2	1.11	1	1.11	0.458 0	0.510 4
B^2	1.11	1	1.11	0.458 0	0.510 4
C^2	0.125 4	1	0.125 4	0.051 6	0.823 9
残差	31.60	13	2.43		
失拟项	17.60	5	3.52	2.01	0.181 1
纯误差	14.00	8	1.75		
总和	379.83	22			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$), 下同。

表 5 功耗回归模型方差分析

Tab.5 ANOVA of W regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.83	9	0.203 7	29.90	<0.000 1 **
A	0.902 9	1	0.902 9	132.55	<0.000 1 **
B	0.127 8	1	0.127 8	18.77	0.000 8 **
C	0.273 5	1	0.273 5	40.16	<0.000 1 **
AB	0.001 6	1	0.001 6	0.238 5	0.633 4
AC	0.021 8	1	0.021 8	3.21	0.096 7
BC	0.008 8	1	0.008 8	1.30	0.275 1
A^2	0.207 9	1	0.207 9	30.53	<0.000 1 **
B^2	0.207 9	1	0.207 9	30.53	<0.000 1 **
C^2	0.087 2	1	0.087 2	12.81	0.003 4 **
残差	0.088 6	13	0.006 8		
失拟项	0.048 1	5	0.009 6	1.90	0.199 3
纯误差	0.040 4	8	0.005 1		
总和	1.92	22			

剔除不显著项后得出各因素对筛分效率、功耗

的回归方程为

$$\eta = -22.075 - 0.181M + 13.148n + 20.762q - 0.021nq$$

(21)

$$W = 17.1590 - 0.0039M - 0.5790n - 3.6972q + 0.0006M^2 + 0.0183n^2 + 0.2964q^2$$

(22)

依据 ANOVA 分析结果, 可以确定测试中的每个影响因素的显著性 P 值。对于评价指标 η , A 、 B 、 C 、 BC 影响极显著。对于评价指标 W , A 、 B 、 C 、 A^2 、 B^2 、 C^2 影响极显著。由各因素的 F 值可知, 各个试验因素对筛分效率 η 和功耗 W 的影响的主次顺序分别为: 滚筒转速 n 、滚筒倾角 q 、喂料量 M , 喂料量 M 、滚筒倾角 q 、滚筒转速 n 。

3.3 各因素交互效应分析

由图 9a、9b 可知, 筛分效率随着喂料量的升高而降低, 是因为滚筒内颗粒在整个筛分的过程中同时需要经过筛孔的颗粒增多, 如果全部合格颗粒都要经过筛孔, 则需要增加抛起的次数, 而滚筒长度是一定的, 在倾角一定的情况下颗粒被抛起的次数是一定的, 所以部分合格颗粒尚未经过筛孔就到达了出料口, 导致筛分效率下降。同样可以看出筛分效率 η 随着滚筒转速的增加而增加, 是因为当滚筒转速增加时, 物料颗粒可以在更高的地方被抛下, 物料更分散, 同时间经过筛孔的物料更多, 所以筛分效率会增加。

筛分效率 η 随着滚筒倾角 q 的增加而降低, 是由于当滚筒倾角增加时, 颗粒被抛起的次数减少且实际筛分水平距离减少, 颗粒经过筛网的次数降低, 筛分效率因此降低。

由图 9c 可知, 在滚筒倾角较小时, 筛分效率随着滚筒转速的增加而增加。综合上述分析, 转速增加可以让物料分散, 增大通过率; 而在滚筒倾角较大时, 筛分效率反而随着滚筒转速的增加而减小, 是由于滚筒倾角较大时, 如果转速过快, 物料颗粒被抛起过高, 下落时水平方向的移动距离会增加, 减少其过筛的次数, 所以筛分效率反而降低。

由图 9d 可知, 在滚筒倾角一定时, 相同的转速下功耗随着喂料量的增加快速上升, 而在喂料量一定时, 随着滚筒转速增加, 功耗呈现先下降后上升的趋势, 是由于当滚筒转速提高后, 物料可以更快地被筛分, 大部分合格物料会离开滚筒, 从而减少了滚筒的负载, 耗电量随之降低, 而进一步提高转速后, 筛分效率逐渐稳定, 负载平衡后, 再提高转速则能耗增加。

由图 9e 可知, 功耗随着喂料量的增加而增加, 当喂料量较小时, 功耗随着滚筒倾角的增加先减

小后增大,但变化不是很明显,可能是由于当喂料量较小时,滚筒筛尚未完全利用,大部分物料在滚筒前段已经被筛分,即使角度减小,物料也不会大

量堆积,负载因此较小且变化不大。当滚筒倾角较小时,喂料量的增加导致功耗急速上升,是因为滚筒倾角小,更容易囤积物料,负载快速增加。

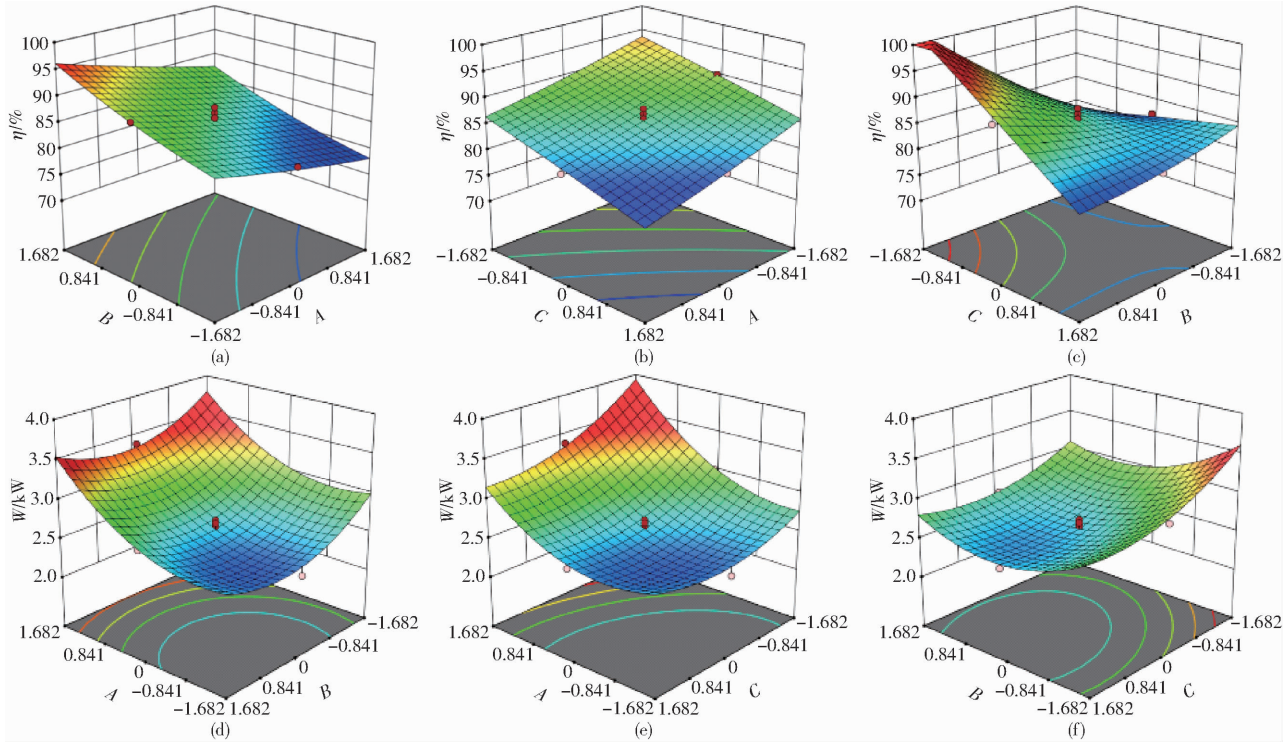


图9 交互因素对筛分效率、功耗影响的响应面

Fig. 9 Effect of interaction between factors on screening efficiency and power consumption

3.4 综合优化设计

利用 Design-Expert 软件由 Optimization 模块对上述数学模型进行优化求解处理,优化目标为

$$\begin{cases} \max \eta(M,n,q) \\ \min W(M,n,q) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 30.5 \text{ t/h} \leq M \leq 77.5 \text{ t/h} \\ 5.5 \text{ r/min} \leq n \leq 14 \text{ r/min} \\ 5^\circ \leq q \leq 7^\circ \end{cases} \end{cases}$$

求解得到影响滚筒筛分机筛分效率 η 和功耗 W 的最佳参数组合为:喂料量 39.6 t/h、滚筒转速 12.4 r/min、滚筒倾角 5.6°,此时滚筒筛分效率为 96%,功耗为 2.55 kW。

4 验证试验

为验证优化结果的可靠性以及滚筒筛分机结构的合理性,对滚筒筛分机在最佳参数组合下进行工厂性能验证试验。试验于 2021 年 1 月在河北省廊坊市三河市万禾工厂进行,试验结果见表 6,筛分机在工厂作业质量如图 10 所示。得到滚筒筛的筛分效率为 95%,功耗为 2.69 kW,与模型仿真试验数据进行对比分析,可以看出,滚筒筛分机在该最佳参数组合下表现出优异的性能,与模型预测结果基本一致,相对误差分别为 1.1% 和 5.5%。

表 6 验证试验结果

Tab. 6 Experiment verification results		
试验序号	筛分效率/%	功耗/kW
1	95	2.41
2	96	2.79
3	93	2.88
平均值	95	2.69



图10 验证试验效果

Fig. 10 Experiment verification effect

5 结论

- (1) 设计了一种滚筒式堆肥物料筛分机,设计了新型传动方式,增设了清筛装置,通过分析颗粒在滚筒中运动状态,建立相应的数学模型,以所需处理量为输入参数,对滚筒筛分机的主要部件滚筒的结构参数进行理论分析和计算。
- (2) 通过三因素五水平试验得出滚筒转速、喂料量、滚筒倾角与筛分效率以及滚筒功耗的回归

方程。各因素对筛分效率的影响由大到小依次为滚筒转速、滚筒倾角、喂料量;各因素对滚筒功耗的影响由大到小依次为喂料量、滚筒倾角、滚筒转速。

(3) 采用响应面组合试验法对滚筒筛分机参数进行优化,使用 Design-Expert 11 软件对响应面进行优化求解,工厂试验表明,当喂料量 39.6 t/h、滚筒转速 12.4 r/min、滚筒倾角 5.6°时,滚筒筛分效率为 95%,功耗为 2.69 kW,与模型预测值相近,说明建模合理。

参 考 文 献

[1] 邓翔,张思元. 中国居民生活水平的估计与调整[J]. 云南财经大学学报, 2008,24(1):18-25.

[2] 郭燕枝,孙君茂. 实现《中国食物与营养发展纲要(2014—2020 年)》发展目标的思考[J]. 营养学报,2016,38(3):218-221.

GUO Yanzhi,SUN Junmao. Toughts on the goals of China's food and nutrition development outline (2014—2020) [J]. Acta Nutrimenta Sinica,2016,38(3):218-221. (in Chinese)

[3] 刘爱民,贾盼娜,王立新,等. 我国饲(草)料供求及未来需求预测和对策研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5):39-44.

LIU Aimin, JIA Panna, WANG Lixin, et al. Supply and demand analysis, future demand forecast, and countermeasure studies for forage materials in China[J]. Strategic Study of CAE,2018, 20(5):39-44. (in Chinese)

[4] 李红娜,吴华山,耿兵,等. 我国畜禽养殖污染防治瓶颈问题及对策建议[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(2):4-9.

LI Hongna, WU Huashan, GENG Bing, et al. The bottleneck and countermeasures in the pollution control of livestock and poultry breeding in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2020, 10(2):4-9. (in Chinese)

[5] 张继义,陈哲,孙玉江. 畜牧养殖环境污染的现状与治理[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2008(6):104-106.

[6] 吴二社,张松林,刘焕萍,等. 农村畜禽养殖与土壤重金属污染[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3):285-288.

WU Ershe, ZHANG Songlin, LIU Huanping, et al. Livestock and poultry breed in rural areas and soil heavy metal pollutions [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3):285-288. (in Chinese)

[7] 彭宝良,胡志超,王海鸥,等. FP2500A 型有机肥翻抛机的研制[J]. 农业工程学报, 2008,24(11):126-129.

PENG Baoliang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Development of FP2500A type stack-turnning machine for organic fertilizer [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(11):126-129. (in Chinese)

[8] 朱能武,邓昌彦. 猪场废弃物强制通风静态仓堆肥系统的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(2):38-41.

[9] 韩萌,张彩杰,刘明. 堆肥工艺参数对高氮污泥堆肥氨气产生的影响[J]. 环保科技, 2014, 20(3):4-6.

[10] 王若斐,刘超,操一凡,等. 不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥效[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6):127-134.

WANG Ruofei, LIU Chao, CAO Yifan, et al. Research on the composting of pig manure and rice husk with different C/N and plant growth promotion effects of the products[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(6):127-134. (in Chinese)

[11] 黄懿梅,苟春林,来航线,等. 两种添加剂对猪粪玉米秸秆堆肥氮素转化和堆肥质量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005(6):116-122.

HUANG Yimei, GOU Chunlin, LAI Hangxian, et al. Influence of two amendments on the nitrogen changing and compost quality in the composting of pig manure and corn straw[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005(6):116-122. (in Chinese)

[12] 刘宁,周嘉良,马双双,等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥主要氮素形态含量影响与保氮机制简[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12):233-239.

LIU Ning,ZHOU Jialiang, MA Shuangshuang, et al. Impacts of biochar on major forms contents and conservation mechanism of nitrogen during aerobic composting of chicken manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):233-239. (in Chinese)

[13] 王晓娇,李铁冰,杨改河,等. 牛粪、鸡粪和稻秆混合的沼气发酵特性与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010,41(3):104-108.

WANG Xiaojiao, LI Yibing, YANG Gaihe, et al. Fermentation and process optimization of mixed cow dung, chicken manure and rice straw for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(3):104-108. (in Chinese)

[14] 魏源送,李承强,樊耀波,等. 浅谈堆肥设备[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 1(5):17-20.

[15] 胡良龙,田立佳,王海鸥,等. 5XY-5 型种子圆筒筛分级设备的研制[J]. 农机化研究,2007,29(2):90-92,96.

HU Lianglong, TIAN Lijia, WANG Haiou, et al. Design of 5XY-5 cylinder screen grader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(2):90-92,96. (in Chinese)

[16] 汪正保,鲍昌华,龚为. 一种新型圆筒筛分装置的设计研究[J]. 机电产品开发与创新,2012,25(3):58-59.

WANG Zhengbao, BAO Changhua, GONG Wei. Research on the design of new type rotary sieve[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2012, 25(3):58-59. (in Chinese)

[17] 宋井玲. 圆筒筛式玉米种子分级机的设计[J]. 农机化研究,2007,29(1):146-147.

SONG Jingling. Design of the cylinder screen seed corn grader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007, 29(1):146-147. (in Chinese)

ZHANG Xiuhua, WANG Zehe, ZHANG Lili, et al. Wheel directional device for shrimp based on the friction characteristics of it's back and abdomen[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2015, 38(1): 122 – 127. (in Chinese)

[13] 赵庆龙, 张秀花, 李铎, 等. 对辊式对虾定向机的设计[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 410 – 412.

[14] 赵玉达, 张秀花, 王泽河, 等. 对虾背腹定向装置试验[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(2): 356 – 358.

[15] 张秀花, 赵庆龙, 王泽河, 等. 对虾头尾与背腹定向的摩擦特性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 344 – 347.

[16] 周彤, 徐皓. 北欧渔业装备情况考察[J]. 渔业现代化, 2000, 27(6): 3 – 6.

ZHOU Tong, XU Hao. Investigation report of fishery equipments situation in nordiccountries[J]. Fishery Modernization, 2000, 27(6): 3 – 6. (in Chinese)

[17] ANDRESEN H, HAMMEREN J E, OPPHEIM P A, et al. Device for orientating fish: EP2498616A1[P]. 2012 – 09 – 19.

[18] LEANDER L. Method and apparatus for orientation of fish upon a conveyor: US5115903A[P]. 1992 – 05 – 26.

[19] PEGORARO G, WADELL L G A. Fish feed apparatus and method: EP0548383[P]. 1994 – 09 – 28.

[20] 万鹏, 黄俊, 谭鹤群, 等. 淡水鱼腹背定向装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 28 – 35.

WAN Peng, HUANG Jun, TAN Hequn, et al. Design and test of orientation device for freshwater fishes' abdomen and back[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 28 – 35. (in Chinese)

[21] 熊师, 方宪法, 牛康, 等. 对虾定向输送装置设计与参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 324 – 331.

XIONG Shi, FANG Xianfa, NIU Kang, et al. Design and parameter optimization of directional conveying device for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 324 – 331. (in Chinese)

(上接第 441 页)

[18] 阚建文, 何芳, 汪裕安. 一种新型圆筒筛的性能分析[J]. 农业机械学报, 1996, 27(3): 67 – 70.

[19] 樊绍良. 立式圆筒筛的试验及工业实践[J]. 化工矿物与加工, 1990(2): 39 – 41.

[20] 左向韶, 李林芳. 自磨机排矿圆筒筛的改进[J]. 化工矿物与加工, 2000(8): 35.

[21] 王浩, 林恩玉, 邬斌, 等. 红土镍矿筛分用圆筒筛的优化设计[J]. 山东工业技术, 2015(3): 120.

[22] 杜长龙, 王力. 搅拌磨新型介质分离筛的设计研究[J]. 矿山机械, 2006, 34(1): 78 – 79.

[23] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27 – 35.

WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rap combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27 – 35. (in Chinese)

[24] 尹守仁. 筛分基础理论和筛分过程物料运动规律的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 1999.

[25] 王亭杰. 概率筛分过程透筛概率问题的研究[J]. 江苏煤炭, 1991(4): 26 – 29.

[26] 陈松. 离心筛透筛的概率原理[J]. 长沙铁道学院学报, 1989(3): 43 – 51.

[27] 李占福, 童昕, 周广涛. 基于离散单元法的平摆筛设计及其透筛机理分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 155 – 159.

LI Zhanfu, TONG Xin, ZHOU Guangtao. Vibration screen based on composite motion of swing and translation and the 3D DEM research of particle penetration[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(1): 155 – 159. (in Chinese)

[28] 刘廷发. 堆肥滚筒筛分机开发研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2017.