

金银花静电除杂装置设计与试验

王凤花¹ 林玉红¹ 赖庆辉² 王永杰¹ 田保宁¹ 苏微¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500)

摘要: 针对金银花除杂过程中编织袋丝去除效果不佳的问题, 本文基于静电分离技术, 设计了一种金银花静电除杂装置。通过理论分析, 推导了静电场中金银花和编织袋丝产生轨迹分离的临界条件, 验证了静电分离技术用于金银花除杂具有一定的可行性。基于单因素试验和 COMSOL 电场仿真, 进一步探究了各影响因素对除杂性能的影响, 确定了静电电极形状为圆弧形、静电电极角度 α 为 45° 。以高压静电发生器的输出电压 U 、静电电极与辊筒的间距 L 和辊筒转速 N 为试验因素, 开展 Box - Behnken 试验, 分别建立了除杂率和误除率的二次回归方程。采用响应面分析法探明了各试验因素对试验指标的影响规律。通过参数寻优, 确定了该装置的最优工作参数为 $U = 11.9 \text{ kV}$ 、 $N = 28 \text{ r/min}$ 以及 $L = 60 \text{ mm}$ 。台架试验结果显示, 除杂率和误除率分别为 94.47% 和 0.89%, 满足金银花除杂要求。

关键词: 金银花; 静电除杂; 电场; COMSOL

中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)08-0143-12

OSID:



Design and Experiment of Electrostatic Impurity Removal Device for Honeysuckle

WANG Fenghua¹ LIN Yuhong¹ LAI Qinghui² WANG Yongjie¹ TIAN Baoning¹ SU Wei¹

(1. College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on electrostatic separation technology, an electrostatic removal device for honeysuckle was designed to solve the problem of poor removal of woven bag filaments in the removal process. Through theoretical analysis, the critical conditions for the trajectory separation of honeysuckle and woven bag filaments in the electrostatic field were deduced, and the feasibility of electrostatic separation technology for honeysuckle impurity removal was verified. Single-factor experiments and COMSOL simulations were used to investigate the effects of electrostatic electrode shape, output voltage U of the high voltage electrostatic generator, electrostatic electrode angle α , the distance L between the electrode and the roller, and roller speed N on the removal performance. The electrode shape was determined as a circular arc, and the α was set to be 45° . The quadratic regression equations for the removal rate and the false removal rate were established by the Box - Behnken experiment, respectively. Response surface analysis was used to explore the influence of each experiment factor on the experiment index. The optimum operating parameters of the device were determined to be $U = 11.9 \text{ kV}$, $N = 28 \text{ r/min}$, and $L = 60 \text{ mm}$. The results of the bench experiment showed that the impurity and false removal rates were 94.47% and 0.89% respectively, which met the requirements for removing impurities from honeysuckle. The device proposed effectively removed woven bag filaments from honeysuckle and may provide a reference for the design of similar herb removal devices.

Key words: honeysuckle; electrostatic impurity removal; electric field; COMSOL

收稿日期: 2023-04-29 修回日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960366)

作者简介: 王凤花(1980—), 女, 副教授, 主要从事丘陵山地农业装备研究, E-mail: 158877172@qq.com

通信作者: 苏微(1979—), 女, 副教授, 主要从事农业机械化生产和管理研究, E-mail: laisubo@163.com

0 引言

近几年金银花的种植面积和产量接连增长。但在金银花的采摘、运输过程中,容易混入梗、叶和编织袋丝等杂质^[1-3],影响产品的质量和价格。因此,在金银花的初加工过程中,除杂处理是最为关键的环节之一。然而,当前金银花的除杂方式仍以人工为主,存在效率低和成本高的问题,严重制约了金银花产业的发展。解决金银花除杂效率低的问题对于提高金银花市场价值尤为重要。

风选技术、光电技术、振筛技术以及静电分离技术是农产品加工过程中常用的除杂技术^[4-8]。其中风选技术基于农产品与杂质的悬浮速度不同,一般用于清除较轻的杂质^[9]。而利用光电技术研制的色选机通常适用于大小相近、颜色差异大的农产品,如枸杞、大米和花椒等^[10-12]。振筛技术根据农产品与杂质外形尺寸的差异,通过更换不同间隙的筛网进行除杂分级^[13]。以上技术对于金银花中梗、叶的除杂具有一定分离效果,但对于编织袋丝这类形状细长、与金银花质量差异不明显的杂质,除杂效果不明显。

静电分离技术是利用静电吸附原理进行混合物分离的一类技术^[14],能将介电性能不同的混合物分离,不受形状、颜色等物料特性干扰。静电分离技术早期多用于分离工业领域中金属与非金属材料^[15],目前静电分离技术也逐步进入农业领域^[16]。郭淑霞等^[17]研制了高压静电籽棉残膜分离装置,实现了残膜与籽棉的分离。JAFARI 等^[18]将静电分离技术应用用于分离麦粒和秸秆,通过仿真预测了麦粒与秸秆的分离轨迹,仿真结果与样机试验结果吻合较好。杨永发等^[19]在制茶过程中,通过控制茶叶与茶梗的含水量实现静电分离。综上所述,静电分离技术在解决质量相近、形状相似的物质难以分离的问题上相比于其他除杂技术更具优势。静电分离技术为金银花除杂问题提供了一种解决思路。

为解决当前金银花中的编织袋丝去除效果不佳的难题,本文依据静电分离技术,设计一种金银花静电除杂装置并进行除杂试验。对金银花和编织袋丝的分离过程进行理论分析,基于 COMSOL 仿真和单因素试验确定除杂装置主要结构参数。对影响除杂性能的 3 个关键因素开展 Box - Behnken 试验,进行参数优化,确定最优工作参数。

1 除杂装置工作原理与设计

1.1 除杂机理理论分析

为验证静电分离技术对金银花除杂的可行性,

以常见的辊式静电分离结构为例,对金银花和编织袋丝进行受力分析。为方便研究,根据已有关于静电分离的文献^[20],做出以下假设:金银花与编织袋丝等效为球体颗粒。物料之间不存在干扰。受到的镜像力恒定,不随位置的改变产生耗散。忽略吸附时摩擦阻力的影响。

如图 1 所示,作用在颗粒上的力包括镜像力 F_i 、重力 F_g 、离心力 F_c 以及空气阻力 F_d 。

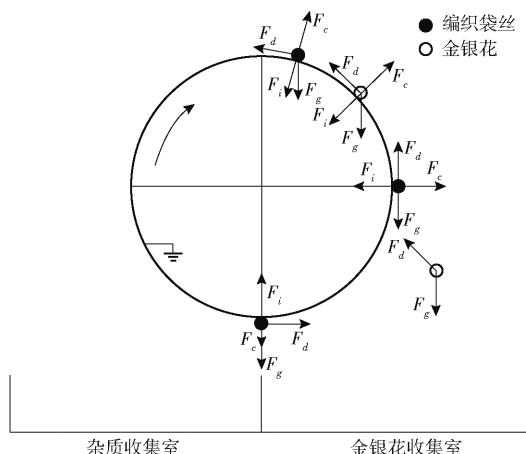


图 1 受力分析示意图

Fig. 1 Diagram of force analysis

物料的电容量 Q 与电场强度 E 成正比^[21],即

$$Q = 4\pi\epsilon_0 \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} r_s^2 E \quad (1)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数, F/m

ϵ_r ——物料介电常数, F/m

r_s ——物料的等效半径, m

镜像力 F_i 将电场中的物料吸附于辊筒表面,与 Q 的平方成比例,即

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_s)^2} \quad (2)$$

F_g 为物料所受重力,有

$$F_g = mg \quad (3)$$

式中 m ——物料质量, kg

g ——重力加速度, m/s²

物料随着辊筒转动时受到的离心力 F_c 为

$$F_c = m \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 R \quad (4)$$

式中 n ——辊筒转速, r/min

R ——辊筒半径, m

物料所受到的空气阻力 F_d 为

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A_p v^2 \quad (5)$$

式中 A_p ——物料投影面积, m²

v ——物料速度, m/s

C_d ——阻力系数

ρ ——空气密度, kg/m^3

其中空气阻力经计算, 约为 10^{-7} N , 相比于其他力可以忽略。

金银花发生脱离的位置通常在辊筒右侧, 按照金银花充电情况的不同, 可分为两种脱离情况。第 1 种情况: 金银花由于充电不足, 受到向心方向的镜像力不足以克服重力、离心力和向前的惯性; 此时金银花在辊筒右上侧脱落。第 2 种情况: 金银花充电充分, 受到镜像力较大, 因此被吸附在辊筒表面, 并随着辊筒转动, 到达辊筒右下侧区域; 在辊筒右下侧区域时, 随着辊筒的转动, 重力的影响不断加大; 当金银花受到的镜像力小于重力和离心力的合力时, 金银花脱离辊筒表面。由于第 1 种脱离情况对除杂效果影响较小, 因此着重分析第 2 种情况。

如图 2 所示, 可以看出, 当金银花到达辊筒底部时, 重力在竖直方向的分量达到最大, 而镜像力和离心力的大小是不变的。因此该位置为金银花的临界脱离点, 此时金银花的临界脱离条件可表示为

$$F_i \leq F_g + F_c$$

(6)

将各力的表达式代入式(6), 可得

$$\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2r_s)^2} \leq mg + m\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 R$$

(7)

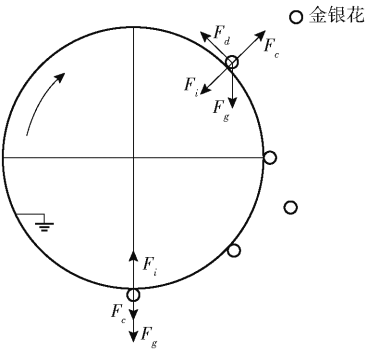


图 2 金银花受力示意图

Fig.2 Schematic of force of honeysuckle

如图 3 所示, 在除杂过程中, 编织袋丝被镜像力吸附在辊筒表面, 随着辊筒转动, 最终被辊筒左侧的毛刷刷下。在此过程中, 当编织袋丝位于辊筒底部时最容易脱离辊筒, 因此该点为编织袋丝的脱离临界点。为满足编织袋丝全程不脱离辊筒, 需满足条件

$$F_i \geq F_g + F_c$$

(8)

由此可得辊筒临界脱离转速 n_1 应满足的条件为

$$\frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2r_s)^2 m} - \frac{g}{R}} \geq n_1$$

(9)

编织袋丝受到的镜像力与获得的最大荷电量有关。为了确保荷电量达到最大, 应满足足够的充电

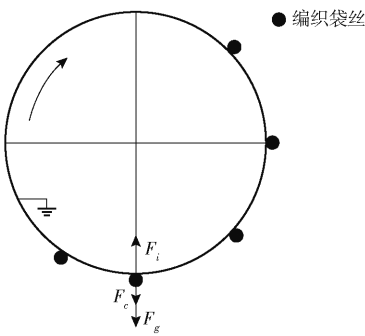


图 3 编织袋丝受力示意图

Fig.3 Schematic of force of woven bag filament

时间, 即满足辊筒转速不高于临界充电转速 n_2 。 n_2 计算式为^[22]

$$n_2 \leq \frac{3keq}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r R}$$

(10)

式中 k ——离子迁移率, $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
 q ——空间电荷密度, C/m^3
 e ——电晕荷电区域的宽度, m

综上所述, 静电分离技术可用于金银花与编织袋丝的分离, 但对于电场强度和辊筒转速, 需满足相应的条件。在分离过程中, 应保持辊筒转速不高于临界脱离转速和临界充电转速, 以确保编织袋丝顺利去除。同时电场强度的增大可以提高编织袋丝的分离效果, 但也不能过大, 避免金银花越过临界脱离点, 造成误除。

为进一步验证静电分离技术用于金银花除杂的可行性, 在特定参数下对位于临界脱离点即辊筒底部的金银花和编织袋丝进行受力计算与对比。计算所用的参数如表 1 所示, 计算结果为: 编织袋丝受到的镜像力、重力、离心力分别为 3.85×10^{-5} 、 2.96×10^{-5} 、 $3.02 \times 10^{-6} \text{ N}$; 金银花受到的镜像力、重力、离心力分别为 1.19×10^{-4} 、 1.99×10^{-4} 、 $2.03 \times 10^{-5} \text{ N}$ 。

表 1 计算参数

Tab.1 Calculation parameters

参数	数值
真空介电常数/ $(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	8.85×10^{-12}
金银花介电常数/ $(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	4.5
编织袋丝介电常数/ $(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	6.5
金银花密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.8
编织袋丝密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.1
金银花平均质量/g	2.03×10^{-2}
编织袋丝平均质量/g	3.02×10^{-3}
金银花所获电荷量/C	8.06×10^{-10}
编织袋丝所获电荷量/C	2.36×10^{-10}
电场强度/ $(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	285
辊筒半径/mm	125
辊筒转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	27

在编织袋丝的运动过程中,镜像力占主导作用,使得编织袋丝吸附在辊筒表面。在金银花的运动过程中,重力与离心力的合力占主导作用,使得金银花脱离辊筒。编织袋丝与金银花之间存在明显的受力差异,验证了静电分离技术用于去除金银花中的编织袋丝具有一定的可行性。

1.2 工作原理

金银花静电除杂装置工作原理如图 4 所示。上料机构将混有编织袋丝的金银花传输到输送带上,使得物料能够均匀、持续地进入辊筒表面。金银花中的编织袋丝经电晕电极充电,进入静电电极产生的电场中,从而受到了镜像力,黏附在辊筒表面。随着辊筒旋转,编织袋丝被毛刷刷落,落入左侧的杂质收集室。而金银花受到重力和离心力较大,克服镜像力后直接落入右侧的金银花收集室。

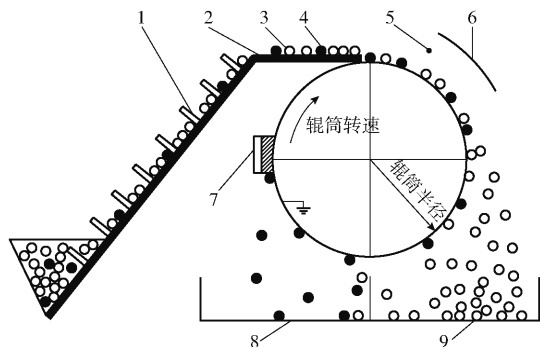


图 4 金银花静电除杂装置原理图

Fig. 4 Schematic of electrostatic impurity removal device

1. 上料机构 2. 输送带 3. 金银花 4. 编织袋丝 5. 电晕电极 6. 静电电极 7. 毛刷 8. 杂质收集室 9. 金银花收集室

1.3 整机结构设计

图 5 为金银花静电除杂装置结构示意图和实物图,金银花静电除杂装置主要包括上料机构、输送带、毛刷、辊筒、电晕电极、静电电极、凹槽板、蝶形螺母、大带轮、传动带、小带轮、电机、电机支架、收集室和高压静电发生器。

1.4 关键部件设计

1.4.1 辊筒设计

辊筒是静电除杂装置设计的关键,其结构参数对除杂性能有重要影响。通过查阅文献[23-25],静电除杂装置的辊筒直径选取范围通常为 150 ~ 300 mm,增大辊筒直径,有利于使编织袋丝充分带电,从而提高除杂性能,但会增大所需要的电压值。综合考虑,设计辊筒直径为 250 mm。辊筒采用不锈钢材质,辊筒空心且表面光滑有利于将编织袋丝吸附,辊筒长 240 mm,厚度 2 mm,两侧轴径为 26 mm。

1.4.2 电晕电极设计

电晕电极由直径为 0.25 mm 的铜线组成。为了确保辊筒表面的物料均能通过电晕电极带电,其

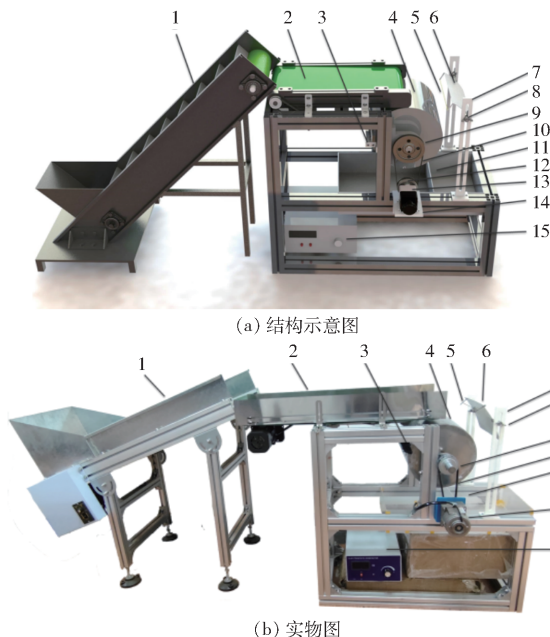


图 5 金银花静电除杂装置

Fig. 5 Honeysuckle electrostatic impurity removal device

1. 上料机构 2. 输送带 3. 毛刷 4. 辊筒 5. 电晕电极 6. 静电电极 7. 凹槽板 8. 蝶形螺母 9. 大带轮 10. 传动带 11. 收集室 12. 小带轮 13. 电机 14. 电机支架 15. 高压静电发生器

长度需大于辊筒的长度,因此电晕电极的长度取 250 mm。电晕电极位于静电电极前端,使得物料提前带电。依据文献[26-28],电晕电极与静电电极的距离选取范围通常为 10 ~ 40 mm,距离大有利于物料充电,但同时容易引起火花放电,造成静电发生器损坏。综合考虑,电晕电极与静电电极的距离选取为 20 mm。

1.4.3 静电电极设计

静电电极与高压静电发生器相连接,为除杂过程提供了稳定的电场区域。不同静电电极形状会影响电场分布情况^[29-30],因此本文选用 3 种静电电极,截面形状分别为圆弧形、长方形和圆形,尺寸参数如图 6 所示。为了确保辊筒处于电场区域中,其长度需大于辊筒的长度,因此静电电极的长度取 250 mm。

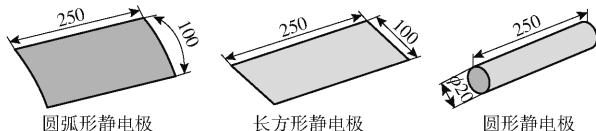


图 6 静电电极尺寸参数示意图

Fig. 6 Schematic of electrostatic electrode size parameters

2 仿真与试验设计

2.1 仿真条件设置

电场是影响镜像力的关键因素,因此可通过仿真分析电极结构以及电压对电场的影响,进而分析对除杂效果的影响。本文基于 COMSOL 软件对静

电除杂装置进行仿真,探究影响静电除杂装置电场的关键因素,确定最佳结构参数,为后续试验提供有力的理论支持。为了简化模型,降低仿真的复杂程度,做以下假设:空气的介电常数恒定且不受电场的影响。忽略带电的编织袋丝与金银花对整个装置的电场分布影响。忽略空气湿度、温度等外部环境对电场的影响。

图 7a 显示了简化后的静电除杂装置二维模型。二维模型由电晕电极、静电极以及辊筒组成。 U 为高压静电发生器的输出电压, L 为静电极与辊筒的间距, α 为静电极角度。通过改变以上参数进行仿真。在仿真过程中,辊筒的直径为 250 mm,电晕电极的直径为 0.25 mm。采用非结构化网格,最大单元尺寸设置为 31.8 mm,最小单元尺寸设置为 0.18 mm,最大单元生长率设置为 1.3,曲率因子设置为 0.3,狭窄区域分辨率设置为 1。模型的网格划分如图 7b。长方形表示仿真边界,边长分别为 600、500 mm。选用 AC/DC 物理场的静电模块进行场强分析,求解问题选为稳态。研究区域的电场强度为

$$E = - \nabla V$$

(11)

式中 V ——电势, V

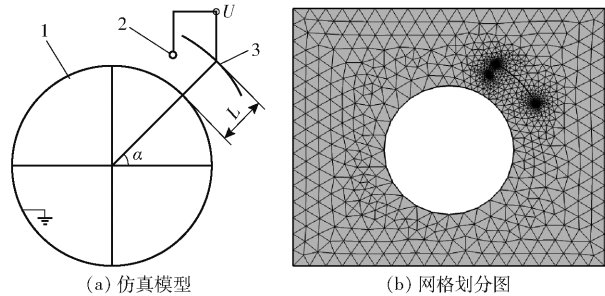


图 7 用于仿真的几何模型和网格

Fig. 7 Geometric model and meshes for electric field simulation

1. 辊筒 2. 电晕电极 3. 静电极

静电除杂装置的有效电场区域如图 8 所示。图中黄色区域即为实现分离编织袋丝与金银花的有效电场区域。为了更加直观地观察辊筒表面的电场强度,定义辊筒表面任一点与辊筒中心的连线与水平线的夹角为 θ , θ 的取值范围为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

2.2 单因素样机试验设计

为合理选取影响除杂性能的关键因素及其取值范围,以静电极形状、高压静电发生器的输出电压 U 、辊筒转速 N 、辊筒与静电极的间距 L 、静电极角度 α 为试验因素,除杂率、误除率为试验指标,对金银花静电除杂装置样机开展单因素试验。本试验采用金银花 3 号品种作为试验对象,该品种外观近似棒状,长 20 ~ 30 mm,平均直径 2.5 mm,平均质量约为 2.03×10^{-2} g。所使用的编织袋丝长 30 ~ 40 mm,平

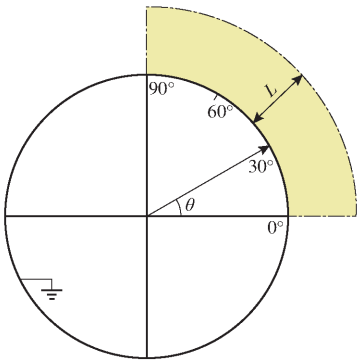


图 8 有效电场区域示意图

Fig. 8 Diagram of effective electric field areas

均质量约为 3.02×10^{-3} g。本试验选取的物料如图 9 所示。

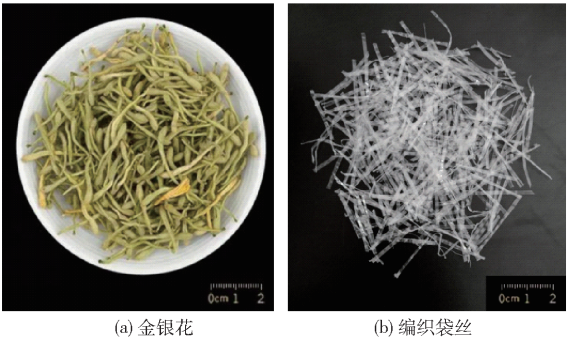


图 9 金银花与编织袋丝

Fig. 9 Honeysuckles and woven bag filament

试验环境温度为 20°C ,环境相对湿度为 40%。通过调研,在每 100 g 的金银花中加入编织袋丝 1.5 g,混合均匀后的混合物在金银花静电除杂装置上进行分离试验,测定除杂率以及误除率。每组试验重复 3 次,取 3 次试验的平均值作为试验结果。单因素试验的参数水平如表 2 所示。

表 2 单因素试验水平

Tab. 2 Single factor experiment factors levels

水平	因素				
	形状	电压/ kV	转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	间距/ mm	角度/ ($^{\circ}$)
1	圆弧形	6	9	50	25
2	长方形	10	18	60	35
3	圆形	14	27	70	45
4		18	36	80	55
5		22	45	90	65

除杂率 H 以及误除率 W 计算式为

$$H = \frac{m_s - m_g}{m_s} \times 100\%$$

(12)

$$W = \frac{m_n}{m_m} \times 100\%$$

(13)

式中 m_g ——金银花收集室中的编织袋丝质量, g
 m_s ——编织袋丝总质量, g

m_m ——金银花总质量, g
 m_n ——杂质收集室中金银花质量, g

2.3 Box – Behnken 样机试验设计

为寻找使得静电除杂装置具有最佳工作性能的因素组合, 基于仿真与单因素试验的结果, 采用 Box – Behnken 试验法, 以高压静电发生器的输出电压 A 、辊筒与静电极的间距 B 以及辊筒转速 C 为试验因素, 除杂率 Y_1 、误除率 Y_2 为响应值, 各试验因素编码如表 3 所示, 试验方案与结果如表 4 所示。

表 3 试验因素编码

编码	因素		
	电压 A/kV	间距 B/mm	转速 $C/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
- 1	10	50	18
0	12	60	27
1	14	70	36

表 4 试验方案与结果

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	A/kV	B/mm	$C/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$		
1	14	70	27	89. 8	1. 82
2	12	60	27	96. 0	0. 84
3	12	60	27	94. 5	0. 90
4	12	70	36	79. 2	0. 35
5	14	60	18	91. 1	2. 70
6	10	70	27	71. 2	0. 15
7	12	50	18	90. 7	2. 20
8	12	50	36	90. 2	1. 45
9	12	60	27	95. 0	0. 87
10	10	60	36	72. 0	0. 30
11	14	50	27	98. 0	3. 10
12	12	70	18	83. 7	1. 15
13	10	50	27	85. 2	1. 20
14	10	60	18	78. 5	0. 90
15	14	60	36	87. 6	1. 85
16	12	60	27	95. 6	0. 93
17	12	60	27	94. 0	0. 89

3 结果与分析

3.1 样机吸附试验

为探究金银花和编织袋丝被吸附的参数条件, 以输出电压 U 为试验因素, 吸附率为试验指标, 开展单种物料的吸附试验。选择静电极与辊筒的间距 L 作为对照变量, 取值分别为 50 mm 和 70 mm。其余参数选择为: $N=27\text{ r/min}$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、静电极形状为圆弧形。每组选取 20 根金银花或编织袋丝进行试验, 重复试验 3 次。当被吸附的金银花或编织袋丝到达辊筒左部, 则视为吸附成功, 计入吸附率的计

算。试验结果如图 10 所示。

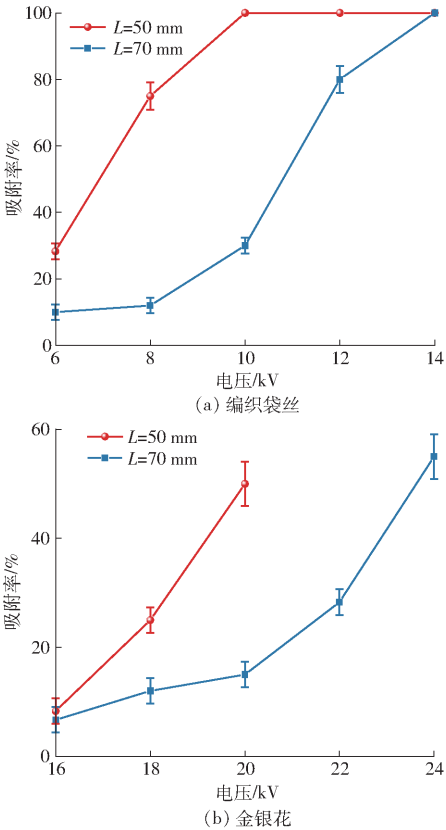


图 10 吸附试验结果

Fig. 10 Adsorption test results

如图 10a 所示, 当 L 为 50、70 mm, 编织袋丝刚好被吸附起的临界电压分别为 10、14 kV。由图 10b 可知, 当 $U<18\text{ kV}$, 金银花的吸附率维持一个较低水平。由于高电压情况下出现火花放电现象, 未能完成 $L=50\text{ mm}$ 、 $U>20\text{ kV}$ 以及 $L=70\text{ mm}$ 、 $U>24\text{ kV}$ 时的金银花吸附试验, 金银花的临界吸附电压需在后续研究中进一步探究。

3.2 仿真与单因素样机试验

3.2.1 静电极形状

当电压为 14 kV, 转速为 27 r/min, 间距为 60 mm, 静电极角度为 45° , 静电极形状分别为圆弧形、长方形、圆形时, 仿真与试验结果分别如图 11、12 所示。图 11a 显示了静电极下的电场分布情况, 圆形静电极产生的电场区域的范围以及强度最小, 圆弧形静电极产生的电场区域的范围以及强度最大。图 11b 显示了辊筒表面的电场强度, 3 种静电极下的电场强度均呈先增大后减小的趋势。电晕电极比静电极更加靠近辊筒, 因此电场峰值均出现在 $\theta=55^\circ$ 附近, 即接近电晕电极的位置。圆弧形电极因其外凸的弧形结构, 比长方形和圆形电极更加贴合辊筒表面, 所产生的电场分布更均匀, 电场强度也更大。因此在圆弧形静电极下编织袋丝受到的镜像力更大, 有利于编织袋丝的去除。

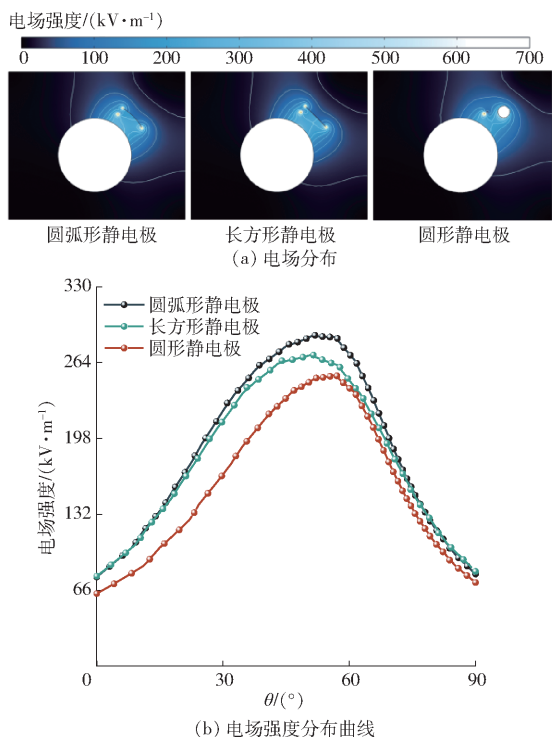


图 11 不同静电极形状下仿真结果

Fig. 11 Simulation results with different electrostatic electrode shapes

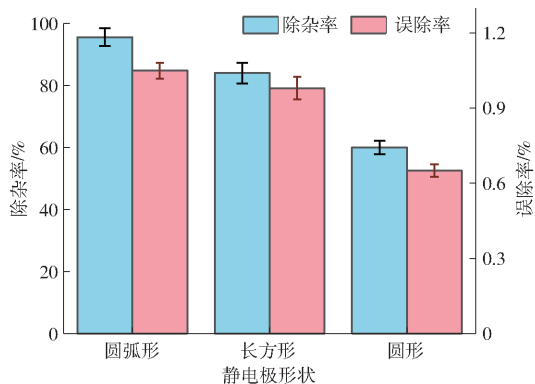


图 12 不同静电极形状下试验结果

Fig. 12 Experimental results with different electrostatic electrode shapes

图 12 显示了不同静电极形状下的除杂率和误除率。由图可知,当静电极为圆弧形时,除杂率为 95.6%,误除率为 1.05%;当静电极为长方形时,除杂率为 84%,误除率为 0.98%;当静电极为圆形时,除杂率为 60%,误除率为 0.65%。试验结果表明,圆弧形静电极与其他两种静电极相比,除杂性能更佳,因此后续试验中静电极确定为圆弧形。

3.2.2 电压

当转速为 27 r/min,间距为 60 mm,静电极角度为 45°,电压分别为 6、10、14、18、22 kV 时,仿真与试验结果分别如图 13、14 所示。图 13a 显示了电场分布的情况,随着电压的增大,电场区域的范围以及强

度均逐渐增大。图 13b 为辊筒表面的电场强度分布,由图可知,随着电压的增大,辊筒表面的电场强度逐渐增大。电场区域的范围越大以及电场强度越大越有利于辊筒表面的编织袋丝和金银花的镜像力增大。但当电压过小时,镜像力不足以吸附编织袋丝,导致除杂效果不佳;当电压过大时,部分较轻的金银花也被吸附。因此在实际应用中,不可以无限提高电压。

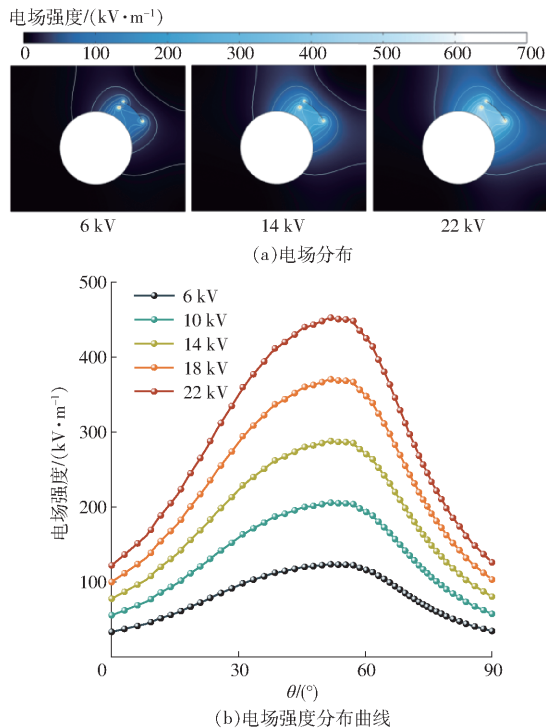


图 13 不同电压下仿真结果

Fig. 13 Simulation results with different voltages

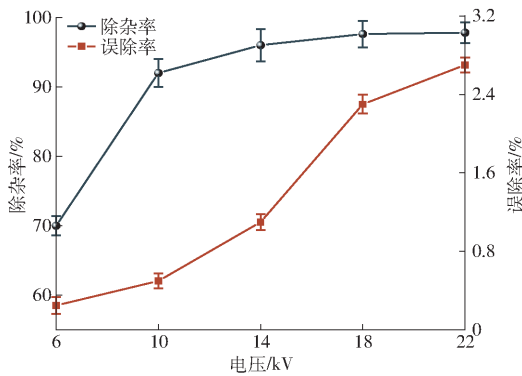


图 14 不同电压下试验结果

Fig. 14 Experimental results with different voltages

图 14 显示了不同电压下的除杂率和误除率。由图可知,当电压小于 10 kV 时,随着电压的增大,除杂率显著增大,误除率缓慢增加。电压越大,编织袋丝与金银花受到的镜像力越大,除杂率越高,同时误除率也缓慢增加。当电压大于 14 kV 时,除杂率逐渐趋于稳定,误除率显著增加。此时编织袋丝达到了充电临界值,继续增大电压,最大荷电量也不会

发生明显变化,因此镜像力的变化趋于稳定。而金银花在电压 14 ~ 18 kV 的变化过程中,逐渐达到充电临界值,受到的镜像力显著增加,导致了误除率的激增。综上,在一定程度内,通过增加电压,可以有效提高除杂性能。而电压超出一定范围后,增加电压,误除率会显著提高。因此需要选择合理的电压参数,来考虑电压对除杂率和误除率的影响。根据仿真与试验结果,确定后续试验的电压取值范围为 10 ~ 14 kV。

3.2.3 间距

当电压为 14 kV,转速为 27 r/min,静电极角度为 45°,间距分别为 50、60、70、80、90 mm 时,仿真与试验的结果分别如图 15、16 所示。图 15a 显示了电场分布的情况,随着间距的增大,电场区域的范围逐渐增大,但强度逐渐减小。图 15b 为辊筒表面的电场强度分布。由图可知,在各间距下辊筒表面的电场强度均呈现中间大两边小的趋势分布,且随着间距的减小,电场强度逐渐增大。当间距为 50 mm 时,电场强度显著增大。当电晕电极与辊筒的间距过小,会使得电极间的电场等势面密度过大,从而导致该区域的电场强度剧增。仿真结果表明,间距减小会造成电场区域的范围缩小,但所产生的电场区域仍在有效除杂范围内,并且电场强度显著增强。

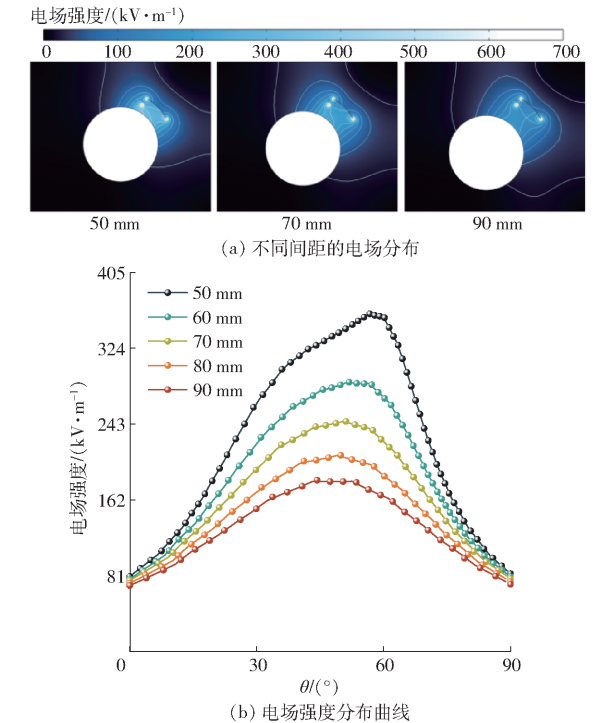


图 15 不同间距下仿真结果

Fig. 15 Simulation results with different spacings

图 16 为不同间距下的除杂率以及误除率。由图可知,随着间距的减小,除杂率呈逐渐增大的趋

势。当间距大于 60 mm 时,随着间距的增大,误除率逐渐降低。当间距为 50 mm 时,误除率剧增,这是因为此时产生的镜像力达到将金银花吸附于辊筒表面的临界值。此外在试验过程中发现,当间距取值小于 50 mm 时,出现了火花放电现象,不利于除杂。因此根据仿真与试验结果,确定后续试验间距取值范围为 50 ~ 70 mm。

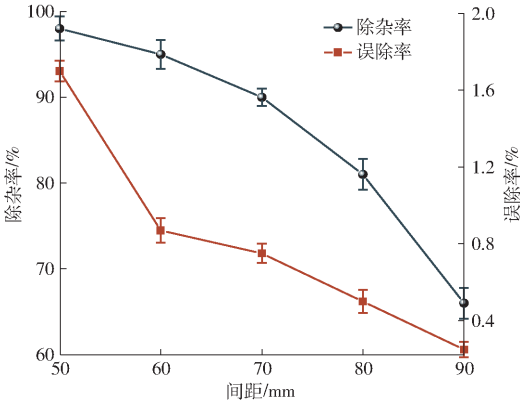


图 16 不同间距下的试验结果

Fig. 16 Experimental results with different spacings

3.2.4 静电极角度

当电压为 14 kV,转速为 27 r/min,间距为 60 mm,静电极角度分别为 25°、35°、45°、55°、65°时,仿真与试验的结果分别如图 17、18 所示。图 17a 显示了电场分布的情况,随着静电极角度的增大,有效电场区域内的电场范围以及强度先增大后减小。图 17b 为辊筒表面的电场强度。当静电极角度 $\alpha = 65^\circ$,电场强度率先达到峰值,随后进入下降趋势。当静电极角度 $\alpha = 25^\circ$,电场强度呈上升趋势,相比于其他的角度最晚到达峰值。电极角度决定了电场强度的分布,这影响到编织袋丝的充电质量,当 α 过大或过小时,编织袋丝在强电场区域中停留的时间较短,荷电量未能达到最大值,因此受到的镜像力较小。静电极在选择静电极角度时,应使得有效电场区域内的平均电场强度尽可能大。

图 18 为不同静电极角度下的除杂率以及误除率。由图可知,随着静电极角度的增大,除杂率呈现先增大后减小的趋势,误除率呈现逐渐减小的趋势。 $\alpha = 45^\circ$ 时,除杂率达到峰值。这说明该角度下有效电场区域内的平均电场强度达到了最大,编织袋丝充电充足,产生了更大的镜像力,因此实现更好的编织袋丝分离效果。而当 $\alpha > 45^\circ$ 或 $\alpha < 45^\circ$ 时,平均电场强度不同程度的减小,导致了除杂率的降低。此外,由于金银花的分离点主要集中于辊筒右侧中部, α 越大,意味着金银花在分离点前未能充分充电,金银花受到的镜像力较小,导致误除率降低。综上所述,为满足最优的除杂效果,在后续试验中选择静电

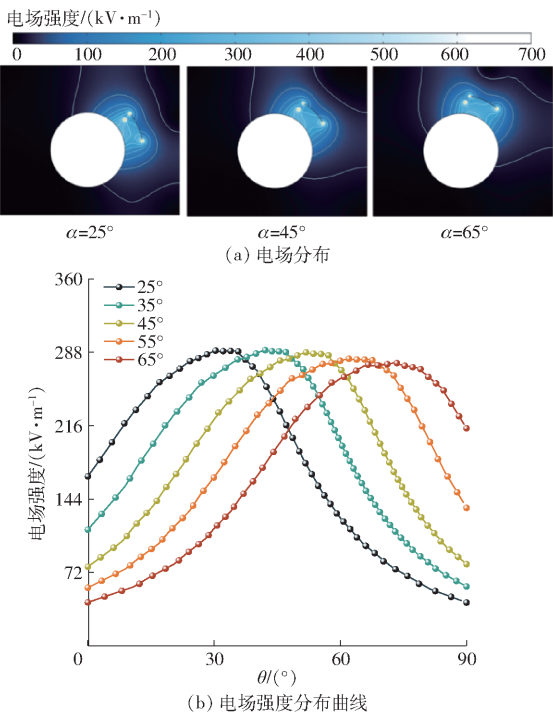


图 17 不同静电电极角度下仿真结果

Fig. 17 Simulation results with different electrostatic electrode angles

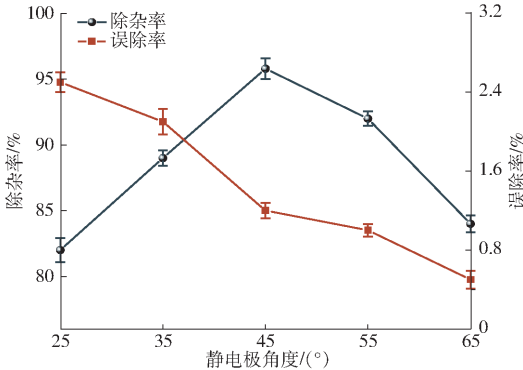


图 18 不同静电电极角度下试验结果

Fig. 18 Experimental results with different electrostatic electrode angles

极角度为 45° 。

3.2.5 辊筒转速

当电压为 14 kV, 间距为 60 mm, 静电极角度为 45° , 转速分别为 9、18、27、36、45 r/min 时, 试验的结果如图 19 所示。随着转速的提高, 除杂率和误除率呈下降趋势。由前文的理论分析可知, 编织袋丝要达到最好的分离效果, 应使得转速不高于临界脱离转速和临界充电转速。当转速大于 27 r/min 时, 除杂率由平稳趋势转为下降趋势。说明该转速附近出现了临界脱离转速和临界充电转速, 当越过临界转速, 编织袋丝受到的镜像力将减小, 而离心力增大, 因此除杂率急剧下降。对于金银花, 转速的提高有利于减小充电时间, 提高离心力, 因此误除率降低。为进一步确定辊筒的最佳工作转速, 选择后续试验

的转速范围为 18 ~ 36 r/min。

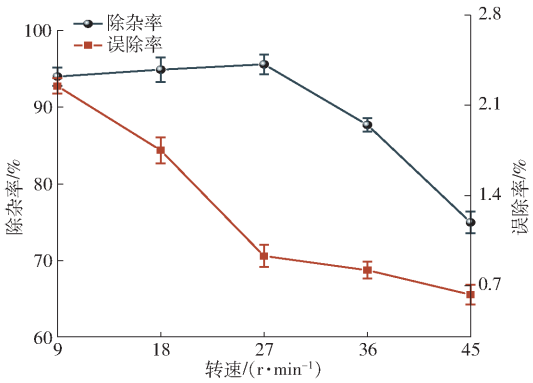


图 19 不同转速下试验结果

Fig. 19 Experimental results with different roller speeds

综上所述, 静电极形状、静电极角度、间距以及电压都会影响到有效电场区域内电场强度的分布和大小, 进而影响到除杂装置的除杂率和误除率。而辊筒转速直接影响到镜像力和离心力, 导致除杂率和误除率发生变化。

3.3 Box - Behnken 样机试验

为进一步分析各因素以及因素间交互作用对试验指标的影响, 本文应用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合, 显著性检验结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 除杂率 Y_1 和误除率 Y_2 的二次回归模型均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 失拟项均为不显著 ($P > 0.05$)。 R^2 分别为 0.991 7、0.998 5, 表明模型精度较高, 回归方程与数据拟合较好。因此, 可用该模型对除杂性能指标进行预测。在回归模型 Y_1 中, 回归项 A 、 B 、 C 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对 Y_1 影响极显著 ($P < 0.01$), 回归项 AB 对 Y_1 影响显著 ($P < 0.05$), AC 、 BC 对 Y_1 影响不显著。在回归模型 Y_2 中, 回归项 A 、 B 、 C 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对 Y_2 影响极显著 ($P < 0.01$), AB 、 AC 对 Y_2 影响显著 ($P < 0.05$), BC 对 Y_2 影响不显著。影响除杂率的主次因素顺序为: 高压静电发生器的输出电压、辊筒与静电极的间距、辊筒转速; 影响误除率的主次因素顺序为: 高压静电发生器的输出电压、辊筒与静电极的间距、辊筒转速。

将表 5 中回归模型不显著项剔除, 保证模型极显著、失拟项不显著, 重新拟合得到试验指标 Y_1 、 Y_2 的预测数学模型分别为

$$Y_1 = -242.315 + 37.235A + 1.8195B + 4.065C + 0.0725AB - 1.5775A^2 - 0.0266B^2 - 0.079136C^2 \tag{14}$$

$$Y_2 = 22.74175 - 1.79575A - 0.34040B - 0.0905C - 2.875 \times 10^{-3}AB - 3.47222 \times 10^{-3}AC + 0.10394A^2 + 2.6575 \times 10^{-3}B^2 + 1.67593 \times 10^{-3}C^2 \tag{15}$$

表 5 响应面试验方差分析

Tab.5 Variance analysis of response surface model

方差来源	除杂率				误除率			
	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
回归模型	1 096.39	9	92.51	<0.000 1 **	10.85	9	531.94	<0.000 1 **
<i>A</i>	444.02	1	337.18	<0.000 1 **	5.99	1	2 640.24	<0.000 1 **
<i>B</i>	202.00	1	153.40	<0.000 1 **	2.51	1	1 106.59	<0.000 1 **
<i>C</i>	28.13	1	21.36	0.002 4 **	1.13	1	496.22	<0.000 1 **
<i>AB</i>	8.41	1	6.39	0.039 4 *	0.013	1	5.83	0.046 4 *
<i>AC</i>	2.25	1	1.71	0.232 5	0.016	1	6.89	0.034 1 *
<i>BC</i>	4.00	1	3.04	0.124 9	0.000 6	1	0.28	0.615 8
<i>A</i> ²	167.65	1	127.31	<0.000 1 **	0.73	1	321.01	<0.000 1 **
<i>B</i> ²	29.79	1	22.62	0.002 1 **	0.30	1	131.16	<0.000 1 **
<i>C</i> ²	173.00	1	131.38	<0.000 1 **	0.078	1	34.22	0.000 6 **
残差	9.22	7			0.016	7		
失拟项	6.61	3	3.38	0.135 1	0.011	3	3.35	0.136 8
纯误差	2.61	4			0.004 5	4		
总离差	1 105.60	16			10.87	16		

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

图 20 为因素之间的交互作用对除杂率影响的响应曲面图。当转速为 27 r/min,电压为 10 kV 时,随着间距的减小,除杂率逐渐增大;当转速为 27 r/min,电压为 14 kV 时,随着间距的减小,除杂率先增大后趋于稳定。

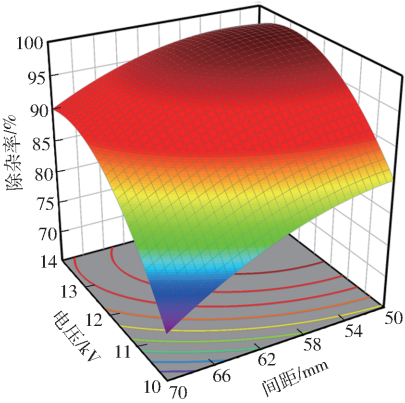


图 20 因素交互作用对除杂率影响的响应曲面
Fig.20 Response surface plots of each factor on impurity removal rate

图 21 为因素之间的交互作用对误除率影响的响应曲面图。如图 21a,当转速为 27 r/min,电压一定时,误除率随着间距的增大而减小;当电压较小,间距较大时,可获得较小的误除率。如图 21b,当间距为 60 mm,转速一定时,误除率随着电压的减小而减小;当电压较小,转速较大时,可获得较小的误除率。

为准确获得各因素的最优参数组合,以最大除杂率和最小误除率为最终优化目标,结合边界条件,建立的二次回归模型为多因素优化解,其目标函数及约束条件为

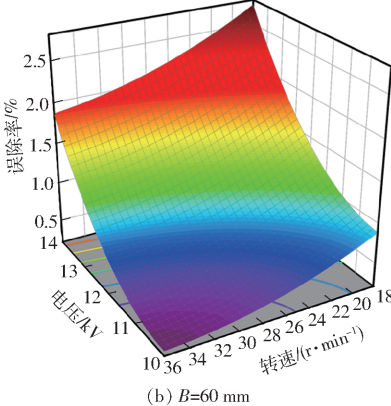
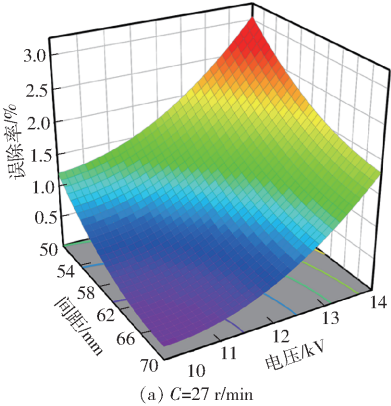


图 21 因素交互作用对误除率影响的响应曲面
Fig.21 Response surface plots of each factor on false removal rate

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ 10\text{ kV} \leq A \leq 14\text{ kV} \\ 50\text{ mm} \leq B \leq 70\text{ mm} \\ 18\text{ r/min} \leq C \leq 36\text{ r/min} \end{cases} \quad (16)$$

采用 Design-Expert 对该方案进行优化,得到最

优参数组合为:电压 11.9 kV、转速 28 r/min、间距 60 mm,在该参数组合下除杂率为 94.19%、误除率为 0.79%。在相同条件下进行验证试验,得到除杂率与误除率分别为 94.47% 和 0.89%,与预测值相比误差较小。

4 结论

(1)通过理论分析,确定了金银花与编织袋丝产生轨迹分离的临界条件。辊筒转速不宜大于临界脱离转速和临界充电转速,否则会导致编织袋丝的充电不足以及离心力的增大。基于特定参数下的计算,说明了金银花与编织袋丝由于介电性能和质量的不同的会出现明显的受力差异,进一步验证了静电分离技术用于去除金银花中编织袋丝的可行性。

(2)静电极形状和角度改变了有效电场区域内的电场分布和平均电场强度,从而影响到金银花与编织袋丝受到的镜像力,导致除杂率和误除率发生改变。通过单因素试验和仿真确定了静电极的最优形状为圆弧形,最优角度为 45°。在此参数下,有效区域内的平均电场强度达到最大值,编织袋丝能够充分充电,有利于编织袋丝的分离。

(3)采用响应面分析法,分别建立了除杂率和误除率的二次回归方程。多目标优化结果表明,当电压为 11.9 kV、转速为 28 r/min 以及间距为 60 mm 时,除杂效果最佳,在此条件下进行了台架验证试验,得到除杂率与误除率分别为 94.47% 和 0.89%,与预测值相比误差较小,优化后的静电除杂装置性能满足金银花除杂的技术要求。

参 考 文 献

[1] 周洁,邹琳,刘伟,等. 金银花商品规格等级标准研究[J]. 中药材,2015,38(4):701-705.
ZHOU Jie, ZOU Lin, LIU Wei, et al. Study on commercial specification of *Lonicerae japonicae* flos[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015,38(4):701-705. (in Chinese)

[2] 蒋林,周雯. 全国金银花资源产业发展现状与前景[C]//中国·巨鹿金银花产业发展论坛,2011.

[3] 李桂兰,刘洁,毕胜. 山东金银花的采收加工与贮存养护[J]. 时珍国医国药,2006,17(1):124-125.

[4] 康建明,解臣硕,王小瑜,等. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):91-98.
KANG Jianming, XIE Chenshuo, WANG Xiaoyu, et al. Design and test of screen hole clearing device for trommel sieve type membrane miscellaneous wind separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(9):91-98. (in Chinese)

[5] 张德高,刘敏基,谢焕雄. 农产品光电色选原理及色选机国内外研究发展现状[J]. 保鲜与加工,2020,20(3):233-237.

[6] 王钦明. 基于 FLUENT 的茶叶风选机流场模拟及结构改进研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
WANG Qinming. Simulation and improvement of structure on the flow field of tea winnowing machine based on FLUENT[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[7] 郭柄江,马学东,赵磊,等. 基于 DEM-CFD 耦合的谷物多级风选模拟研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(10):96-102.
GUO Bingjiang, MA Xuedong, ZHAO Lei, et al. Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM-CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(10):96-102. (in Chinese)

[8] 吉鹏. 研制一种梗丝中提取回收烟丝装置[J]. 中国新技术新产品,2017(8):135-136.

[9] 周宏喜,卢世杰,郎平振,等. 废旧动力电池破碎料立式风力分选试验研究[J]. 中国资源综合利用,2021,39(10):35-38,43.

[10] 张德高,刘敏基,谢焕雄. 农产品光电色选原理及色选机国内外研究发展现状[J]. 保鲜与加工,2020,20(3):233-237.

[11] 柴润泽,叶松,熊伟. 基于形状特征的花椒分选[J]. 桂林电子科技大学学报,2021,41(5):382-386.
CHAI Runze, YE Song, XIONG Wei. Sorting of Chinese prickly ash based on shape feature[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2021,41(5):382-386. (in Chinese)

[12] 李天华,敖邦乾,杨方. 基于 CMOS 图像传感器的 AFTB1 大米筛查技术研究[J]. 农机化研究,2013,35(3):221-223.
LI Tianhua, AO Bangqian, YANG Fang. Study on AFTB1 rice screening technology founded on CMOS image transducer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(3):221-223. (in Chinese)

[13] 鲁兵,胡灿,王旭峰,等. 振动筛式红枣多层除杂分级机的设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(1):152-157.
LU Bing, HU Can, WANG Xufeng, et al. Design and experiment on vibrating sieve type jujube multilayer purification and grader machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(1):152-157. (in Chinese)

[14] 窦伟国,乌力根代来,石辛民,等. 静电分选装置的试验研究[J]. 农业机械学报,1987,18(4):27-33.
DOU Weiguo, OORGANDALE, SHI Xinmin, et al. The study and experiment of electrostatic separating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1987,18(4):27-33. (in Chinese)

[15] 李轩甫,邢剑飞,胡灿,等. 静电技术在农业中的应用及发展前景[J]. 新疆农机化,2022(1):18-21.
LI Xuanfu, XING Jianfei, HU Can, et al. Application and development prospect of electrostatic technology in agriculture[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2022(1):18-21. (in Chinese)

[16] 韦柳花,杨理林,张凌云,等. 高压静电技术应用于农业生产领域的研究进展[J]. 农业与技术,2021,41(3):19-23.
WEI Lihua, YANG Lilin, ZHANG Lingyun, et al. Research progress of high voltage electrostatic technology applied in the field of agricultural production[J]. Agriculture and Technology, 2021,41(3):19-23. (in Chinese)

[17] 郭淑霞,坎杂,张若宇,等. 机采籽棉残膜静电分离装置分离试验[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊2):6-10.

- GUO Shuxia, KAN Za, ZHANG Ruoyu, et al. Separation test of electrostatic separating device for machine-harvested seed cotton and plastic film residue[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2): 6 – 10. (in Chinese)
- [18] JAFARI M, CHEGINI G, AKMAL A, et al. A roll-type corona discharge-electrostatic separator for separating wheat grain and straw particles[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(7): e13281.
- [19] 杨永发, 张炎, 陈帅. 静电电位对静电拣梗机拣梗率的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 86 – 89.
YANG Yongfa, ZHANG Ying, CHEN Shuai. Effects of electrostatic potentials on stalk rate[J]. Food & Machinery, 2015, 31(1): 86 – 89. (in Chinese)
- [20] MOHAMED M, WESSIM A, FODIL B M, et al. Modeling and simulation of nonconductive particles trajectories in a multifunctional electrostatic separator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 5244 – 5252.
- [21] DAS S, SAMUILA A, DRAGAN C, et al. Behaviour of charged insulating particles in contact with a rotating roll electrode [J]. Journal of Electrostatics, 2008, 67(2): 189 – 192.
- [22] LI Jia, LU Hongzhou, XU Zhenming, et al. Critical rotational speed model of the rotating roll electrode in corona electrostatic separation for recycling waste printed circuit boards[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1): 331 – 336.
- [23] DASCALESCU L, MORAR R, IUGA A, et al. Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(6): 1242.
- [24] 李轩甫. 高压静电吸附作用下膜-荏分离装置设计与试验[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2022.
LI Xuanfu. Design and experiment of membrane – stubble separation device under high voltage electrostatic adsorption[D]. Tarim: Tarim University, 2022. (in Chinese)
- [25] 黎土煜. 车用塑料摩擦高压静电分选荷电机理及运动特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
LI Tuyu. High-voltage triboelectrostatic separation and kinetic characteristics of plastic used in passenger vehicle [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [26] SARA M, THAMI Z, ABDELKADER M B, et al. Belt-type corona-electrostatic separator for the recovery of conductive and nonconductive products from micronized wastes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 1424 – 1430.
- [27] MOHAMED M, THAMI Z, WESSIM A, et al. Factors that influence the trajectories of charged insulating particles in roll-type electrostatic separators[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 115: 103672.
- [28] BENAUDA I, ZELMATI M E M, OUIIDDIR R, et al. Analysis of a novel insulating conveyor-belt tribo-electrostatic separator for highly humid granular products[J]. Journal of Electrostatics, 2019, 100: 103357.
- [29] LI Jia, LU Hongzhou, LIU Shushu, et al. Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1): 269 – 275.
- [30] RICHARD G, SALAMA A, MEDLES K, et al. Comparative study of three high-voltage electrode configurations for the electrostatic separation of aluminum, copper and PVC from granular WEEE[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 88: 29 – 34.

(上接第 131 页)

- [23] 蒋恩臣, 苏旭林, 王明峰, 等. 生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 121 – 124.
JIANG Enchen, SU Xulin, WANG Mingfeng, et al. Design of variable pitch spiral conveyor for biomass continual pyrolysis reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 121 – 124. (in Chinese)
- [24] 李帅, 宗望远, 马丽娜, 等. 油葵联合收获机割台搅龙与链耙输送机关键部件设计[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(1): 135 – 142.
LI Shuai, ZONG Wangyuan, MA Li'na, et al. Design on key components of the header auger and chain harrow conveyor of oil sunflower combine harvester[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(1): 135 – 142. (in Chinese)
- [25] 连国党, 魏鑫鑫, 马丽娜, 等. 轴流螺旋滚筒式食用向日葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 42 – 51.
LIAN Guodang, WEI Xinxin, MA Li'na, et al. Design and experiments of the axial-flow spiral drum threshing device for the edible sunflower[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 42 – 51. (in Chinese)
- [26] 廖庆喜, 徐阳, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 140 – 150.
LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 140 – 150. (in Chinese)
- [27] 陈海涛, 李昂, 史乃煜, 等. 玉米秸秆残茬侧向抛出动力学模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 76 – 83.
CHEN Haitao, LI Ang, SHI Naiyu, et al. Kinetics modeling and experiment of lateral throwing of corn straws [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 76 – 83. (in Chinese)
- [28] 方梅, 郁志宏, 张文杰, 等. 盘刀式铡草机粉碎物料运动过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 76 – 84.
FANG Mei, YU Zhihong, ZHANG Wenjie, et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of disc knife chaff cutter[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 76 – 84. (in Chinese)
- [29] 中国国家标准化管理委员会. 收获机械 联合收割机 试验方法: GB/T 8097—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.