doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.026

针带式秸秆饲料残膜静电分离装置设计与试验

郭文松[1,2]　蒋皓洁[1,2]　陈柏宇[1,2]　王旭峰[1,2]

(1.塔里木大学机械电气化工程学院,阿拉尔 843300;
2.南疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室,阿拉尔 843300)

摘要:针对新疆秸秆饲料中残膜人工清除存在劳动强度高、效率低等问题,本文设计了一种针带式秸秆饲料残膜静电分离装置。该装置基于静电吸附原理,由高压静电发生器、驻极放电棒和金属式输送带等核心部件组成。通过理论分析推导了残膜与秸秆饲料分离临界条件,验证了针带式静电分离技术应用于残膜去除的可行性。基于 COMSOL 仿真软件研究了电晕针几何参数和操作参数对电场分布及负离子密度的影响,确定了最佳参数为:针尖锥角 12°、针长 14 mm、针间距 20 mm。单因素试验结果表明,电极间距(40 ~ 60 mm)、电压(15 ~ 25 kV)、输送带速度(21 ~ 28 m/min)和物料喂入量(8 ~ 12 kg/min)对分离率有显著影响。采用 Box - Behnken 试验设计建立了二次回归模型,确定了装置最佳参数组合为:电极间距 51.3 mm、电压 22.9 kV、输送速速度 24.5 m/min、喂入量 9.5 kg/min。通过验证试验测得分离率为 91%,与预测值 92.6% 吻合良好,满足秸秆饲料剔除残膜技术要求。

关键词:秸秆饲料;残膜;静电分离;负离子

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0268-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Needle-belt Type Electrostatic Separation Device for Residual Plastic Films in Straw Feed

GUO Wensong[1,2]　JIANG Haojie[1,2]　CHEN Baiyu[1,2]　WANG Xufeng[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar* 843300, *China*
2. *Xinjiang Production and Construction Corps(XPCC) Key Laboratory of Utilization and Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, Alar* 843300, *China*)

Abstract: Aiming to tackle the issues of high labor intensity and low efficiency associated with manual removal of residual plastic film from straw feed in Xinjiang, a needle-belt type electrostatic separation device for residual plastic film in straw feed was designed. Based on the principle of electrostatic adsorption, the device consisted of core components, including a high-voltage electrostatic generator, electret discharge rod, and metal conveyor belt. Through theoretical analysis, the critical conditions for separating residual plastic film from straw feed were deduced, verifying the feasibility of applying the needle-belt type electrostatic separation technology to residual plastic film removal. Using COMSOL simulation software, the effects of geometric parameters and operating parameters of corona needles on electric field distribution and negative ion density were studied, and the optimal parameters were determined as follows: needle tip cone angle was 12°, needle length was 14 mm, and needle spacing was 20 mm. Single-factor experiments showed that the electrode spacing (40 ~ 60 mm), voltage (15 ~ 25 kV), conveyor belt speed (21 ~ 28 m/min), and material feeding rate (8 ~ 12 kg/min) had significant impacts on the separation efficiency. A quadratic regression model was established by using the Box - Behnken experimental design, and the optimal parameter combination of the device was determined as follows: electrode spacing was 51.3 mm, voltage was 22.9 kV, belt speed was 24.5 m/min, and feeding rate was 9.5 kg/min. Finally, the separation efficiency measured in the verification experiment was 91%, which was in good agreement with the predicted value of 92.6%, meeting the technical requirements for removing residual plastic film from straw feed.

Key words: straw feed; residual plastic film; electrostatic separation; negative ions

收稿日期:2025 - 07 - 26　修回日期:2025 - 08 - 23

基金项目:塔里木大学校长基金项目(TDZKZH202301)和国家自然科学基金项目(32360440)

作者简介:郭文松(1985—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:541577947@qq.com

通信作者:王旭峰(1974—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail:wxfwyq@126.com

0　引言

近年来，新疆畜牧业持续发展推动了当地养殖企业积极实施秸秆饲料化利用[1-2]。然而，膜下滴灌技术在当地广泛应用[3]，导致秸秆饲料在收获、运输过程中易混入残膜（破碎地膜）等杂质[4]。此类含膜秸秆饲料若直接粉碎用于畜牧饲喂，可能导致动物（尤其是反刍动物）消化阻塞、中毒、生长发育受阻甚至死亡，对养殖安全构成重大威胁[5-6]。目前，此类残膜清除仍依赖人工拣选，效率低、成本高，严重制约养殖企业发展。因此，解决秸秆饲料中残膜清除问题对于新疆畜牧业具有重要意义。

国内外针对秸秆饲料残膜分离研究相对较少，其设计思路可借鉴农产品除杂领域研究成果。现有技术主要包括人工拣选、机械筛分[7-9]和气流分选等[10-11]。近年来，机器视觉剔除[12-14]及静电吸附分离技术[15-16]等也逐步发展。人工拣选劳动密集且效率低，不适合规模化；机械筛分与气流分选虽在除秸秆饲料中滴灌带和塑料绳有一定分离效果，但对于残膜这类与秸秆饲料物料特性相近的杂质，分离效果有限。倪超等[17]提出的基于机器视觉识别剔除技术虽有成效，但成本高，难以规模化应用。相较之下，静电分离凭借低能耗、高效率等优势，已逐步由工业领域拓展至农业生产环节[18-19]。

静电分离技术早期多用于工业领域分离不同介电性能的混合物[20]，文献[21-22]将带式电晕-静电分离装置用于导电与非导电物料分选，分选率达 92% ~ 97%；SALAMA 等[23]使用滚筒式静电分离器从废弃电线中回收铜和铝，取得了较好的分选效果。农业方面，JAFARI 等[24]将静电分离技术应用于小麦籽粒与秸秆颗粒分离；SUN 等[25]设计的针辊静电分离装置适用于未轧棉残膜分离，分离率为 91.7%，但未考虑物料与残膜缠绕问题；王凤花等[26]设计的静电除杂装置可剔除金银花中编织袋纤维，除杂率为 94.47%，满足了金银花除杂要求。滚筒式结构在处理轻质量物料时，下落轨迹易受电场离子风扰动[27]，导致分选率降低。而带式分离结构限制了电场对其轨迹的影响，为剔除轻质量残膜提供了新思路。

为解决秸秆饲料残膜剔除难题，本文基于静电分离原理，设计一种秸秆饲料残膜分离装置。通过秸秆饲料和残膜分离理论分析，结合 COMSOL 仿真和单因素试验，确定残膜清除装置核心参数。采用 Box-Behnken 试验设计方法，对影响残膜清除率的 4 个主要因素进行优化，确定残膜清除装置最佳工作参数。

1　整机结构与工作原理

1.1　整体结构

图 1 为针带式秸秆饲料残膜静电分离装置实物图，主要包括匀料装置、驻极放电棒、高压静电发生器、电极支架、金属式输送带、静电毛刷、收集室等。



图 1　针带式秸秆饲料残膜静电分离装置

Fig. 1　Needle-belt type electrostatic separation device for residual plastic film in straw feed

1. 高压静电发生器　2. 静电毛刷　3. 胶辊　4. 上料箱　5. 压料板　6. 金属式输送带　7. 翻转装置　8. 电极支架　9. 驻极放电棒　10. 收集室

1.2　关键部件设计

1.2.1　匀料装置

匀料装置将粉碎后的秸秆饲料以单层形式均匀铺展于金属式输送带表面，增大残膜与输送带的有效接触面积，减少残膜与秸秆饲料的堆叠概率，从而有利于残膜荷电（即通过负离子轰击使物料表面带电的过程）。该装置由上料箱、压料板与胶辊等组成，其中，胶辊外层覆盖橡胶，通过与压料板协同作用完成抓取、拉拽物料，确保下落物料均匀，并同步控制下料速度，胶辊长度为 880 mm，直径为 300 mm。

1.2.2　驻极放电棒

驻极放电棒由多根钨钢电晕针阵列排布，线路采用树脂胶整体封装，以增强耐高压防护性能并提高耐腐蚀性，外壳设有凹槽，便于电极的固定，其结构如图 2 所示。电晕针锥角、电晕针长度及针间距等参数均会影响电场分布特性[28]。驻极放电棒位于金属式输送带出料口前端，以使物料在进入分选区前预先荷电。为确保物料充分处于电场作用区域，电极长度需大于物料输送宽度，因此本装置静电极长度设定为 900 mm。

1.3　工作原理

秸秆饲料除膜装置工作原理如图 3 所示，在装置运行过程中，金属式输送带保持接地，驻极放电棒接负高压。匀料装置先将秸秆饲料残膜混合物铺展

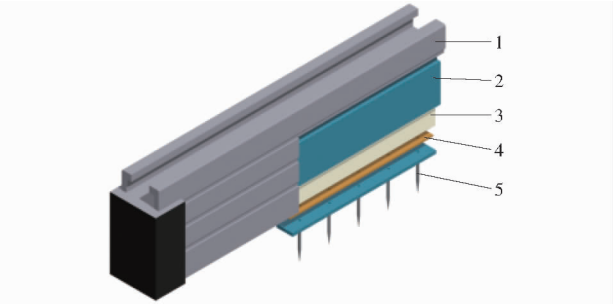

图 2 驻极放电棒

Fig. 2 Electrified discharge rod

1. 外壳 2. 散热块 3. 定位槽 4. 铜导片 5. 钨钢电晕针

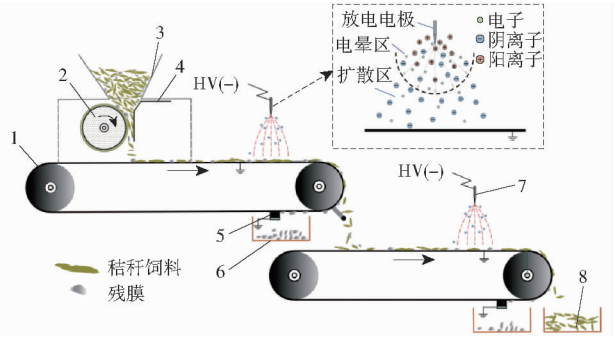

图 3 秸秆饲料残膜静电分离装置原理图

Fig. 3 Schematic of electrostatic separation device for straw feed and residual film

1. 金属式输送带 2. 胶辊静电毛刷 3. 上料箱 4. 压料板 5. 静电毛刷 6. 残膜收集室 7. 驻极放电棒 8. 秸秆饲料收集室

为均匀薄层,使其持续进入放电棒生成的强电场。电场中自由电子经加速、碰撞后被空气分子捕获,形成稳定负离子;这些负离子在电场作用下向输送带移动[29],并无规则地射入到物料表面,同时物料发生极化而整体荷负电。由于秸秆饲料与残膜在导电性及材料特性上的差异,导电性较强的秸秆饲料可迅速将电荷导至地面,难以持续吸附,在重力与惯性作用下脱离带面;残膜则因电荷转移缓慢而滞留于带面,随后被静电刷导入残膜收集室。物料经匀料装置翻面后进入二级静电除膜单元,完成残膜二次分离。

1.4 理论分析

针对秸秆饲料与残膜分离需求,采用带式电晕-静电分离结构,对秸秆饲料和残膜进行受力分析。为简化研究,作如下假设:物料之间无相互干扰;镜像力恒定,不随位置变化而耗散;忽略吸附过程中摩擦阻力的影响。如图 4 所示,作用在物料上的力包括镜像力F_i、重力F_g、离心力F_c以及空气阻力F_d。

镜像力F_i将电场中的物料吸附于金属式输送带表面,与物料电荷量 Q 平方成正比[30],即

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 (2r_s)^2} \tag{1}$$

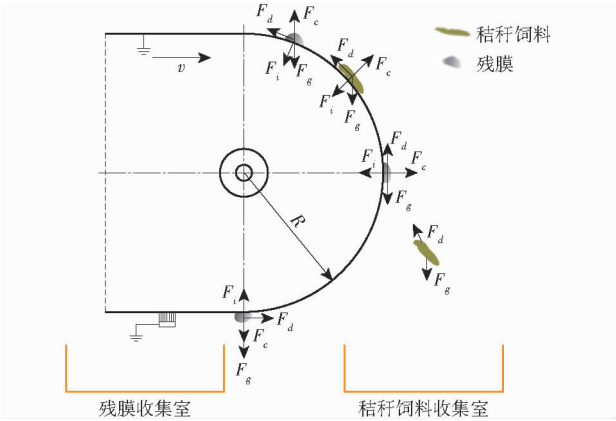

图 4 受力分析示意图

Fig. 4 Forces analysis schematic

式中 ε_0——真空介电常数,F/m

r_s——物料等效半径,m

物料所受重力为

$$F_g = mg \tag{2}$$

式中 m——物料质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

物料随着输送带在回程区时受到的离心力F_c为

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \tag{3}$$

式中 v——物料速度,m/s

R——驱动滚筒半径,m

物料所受到的空气阻力F_d为

$$F_d = \frac{1}{2}\rho C_d A_p v^2 \tag{4}$$

式中 A_p——物料投影面积,m^2

C_d——阻力系数

ρ——空气密度,kg/m^3

经计算,空气阻力约为 10^{-7} N,相比于其他力可忽略。

对秸秆饲料临界脱离情况进行分析,随着输送带转动,当秸秆饲料到达输送带驱动滚筒底部时,秸秆饲料重力在竖直方向的分量达到最大,而镜像力和离心力保持恒定,此时秸秆饲料所受镜像力F_{i1}小于重力F_{g1}和离心力F_{c1}合力,可表示为

$$F_{i1} < F_{g1} + F_{c1} \tag{5}$$

残膜经荷电后,其表面带有大量负电荷,且所积累电荷不易流失。在镜像力作用下,残膜倾向于吸附在输送带表面,最终被静电毛刷收集到残膜收集室。在此过程中,残膜在输送带驱动滚筒底部时最易脱落,为确保残膜在输送带表面不脱离,需满足残膜所受镜像力F_{i2}大于等于重力F_{g2}和离心力F_{c2}合力,即

$$F_{i2} \geqslant F_{g2} + F_{c2} \tag{6}$$

在物料运动过程中,镜像力占主导作用,而镜像

力主要取决于物料所获得的荷电量，为确保荷电量符合临界脱附值，将式(1)～(4)代入式(5)、(6)，可得残膜与秸秆饲料临界带电量 Q 与质量 m 关系为

$$\begin{cases}\dfrac{Q^2}{m_1}<4\pi\varepsilon_0(2r_{s1})^2\left(g+\dfrac{v^2}{R}\right)\\ \dfrac{Q^2}{m_2}\geqslant 4\pi\varepsilon_0(2r_{s2})^2\left(g+\dfrac{v^2}{R}\right)\end{cases}\tag{7}$$

为进一步验证静电分离技术用于秸秆饲料残膜清除的可行性，在特定参数条件下(表 1)，对处于临界脱离点的秸秆饲料和残膜进行分析。通过式(7)确定残膜电荷阈值下限与秸秆饲料电荷阈值上限，静电分离临界点电荷特性对比如图 5 所示。

表 1　计算参数

Tab. 1　Calculation parameters

参数	数值
真空介电常数/(F·m^{-1})	8.85×10^{-12}
秸秆饲料密度/(kg·m^{-3})	216
残膜密度/(kg·m^{-3})	781
辊筒半径/m	0.08
金属式输送带速度/(m·min^{-1})	21

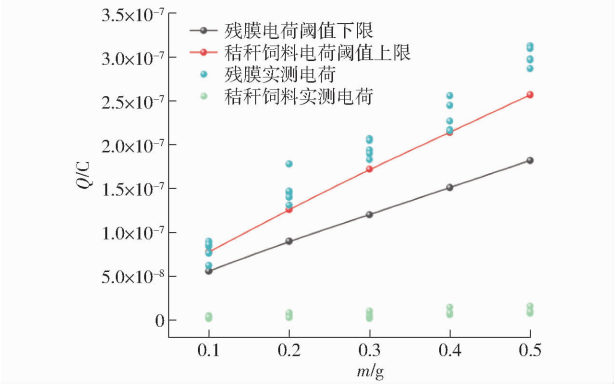

图 5　静电分离临界点电荷特性对比

Fig. 5　Comparison chart of critical point charge characteristics for electrostatic separation

由于秸秆饲料与残膜物料特性上的差异，二者所携带的电荷量显著不同。在上述参数条件下的分离过程中，在电压 15 kV 下对其进行瞬时电荷，所测残膜实际电荷量高于其电荷阈值下限，在此状态下，镜像力占据主导作用，使残膜吸附于输送带表面。而秸秆饲料实测电荷接近于零，远低于其电荷阈值上限，此时重力与离心力合力占据主导作用，秸秆饲料脱落。残膜与秸秆饲料因电荷量差异显著，其受力情况也截然不同，验证了静电分离技术应用于去除秸秆饲料中残膜的可行性。

2　仿真

2.1　仿真试验设计

在电晕荷电过程中，尖端效应使得电荷主要集中于针尖区域，针尖电场强度是影响输送带表面负离子密度的关键因素，进而影响荷电能力[31]，采用 COMSOL 放电模块对秸秆饲料残膜静电分离装置进行仿真，通过分析针尖场强以及输送带表面负离子密度，探讨其对物料荷电效果的影响，确定最佳结构参数，为后续试验提供理论支持。为简化模型，降低仿真复杂程度，作以下假设：多针头静电驻极简化为 5 根，针尖末端圆弧半径近似为锥形，忽略外部环境以及带电秸秆饲料与残膜对电场分布的影响。静电驻极模型如图 6 所示。

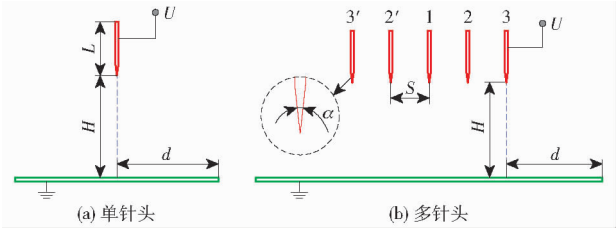

图 6　驻极简化模型

Fig. 6　Simplified model of electret

图 6b 为多针头驻极秸秆饲料残膜静电分离装置二维模型。在该模型中，正中心针头设为 1 号，其右侧第 1 个为 2 号针头，左侧对应为 2′号针头，依次类推。仿真时对针头施加电压边界条件，金属式输送带设为接地边界条件。通过设置不同参数模型进行仿真模拟，其中 U 为高压静电发生器输出电压，L 为电晕针长度、H 为电晕电极与输送带间距(电极间距)，S 为不同针之间间距(针间距)、α 为针尖锥角角度，d 为边缘针距输送带边缘距离。在仿真过程中，d 为 50 mm，金属式输送带厚度为 2 mm。秸秆饲料残膜静电分离的有效荷电区域如图 7 所示，图中蓝色区域为相邻针头负离子的有效叠加区域。

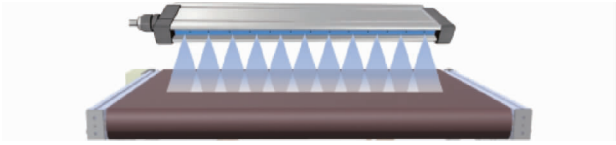

图 7　有效电场区域示意图

Fig. 7　Diagram of effective electric field areas

2.2　仿真试验结果和分析

2.2.1　电晕针锥角对电场和负离子分布的影响

在电压 15 kV、针长 22 mm、电极间距 50 mm 的单针头驻极条件下，不同锥角(12°、14°、16°、18°、20°)仿真结果如图 8 所示。由图 8a、8c 可知，最大电场强度与针尖锥角呈负相关。随着锥角从 12°增至 20°，针尖几何半径扩大使电荷聚集效应显著弱化[32]，导致电场峰值下降。由图 8b、8d 可知，输送带表面横向负离子密度呈以针尖投影为中心的单峰分布特征。较小锥角可通过强化尖端效应提升针尖场强，进而促进电离，使得负离子密度随锥角增大而

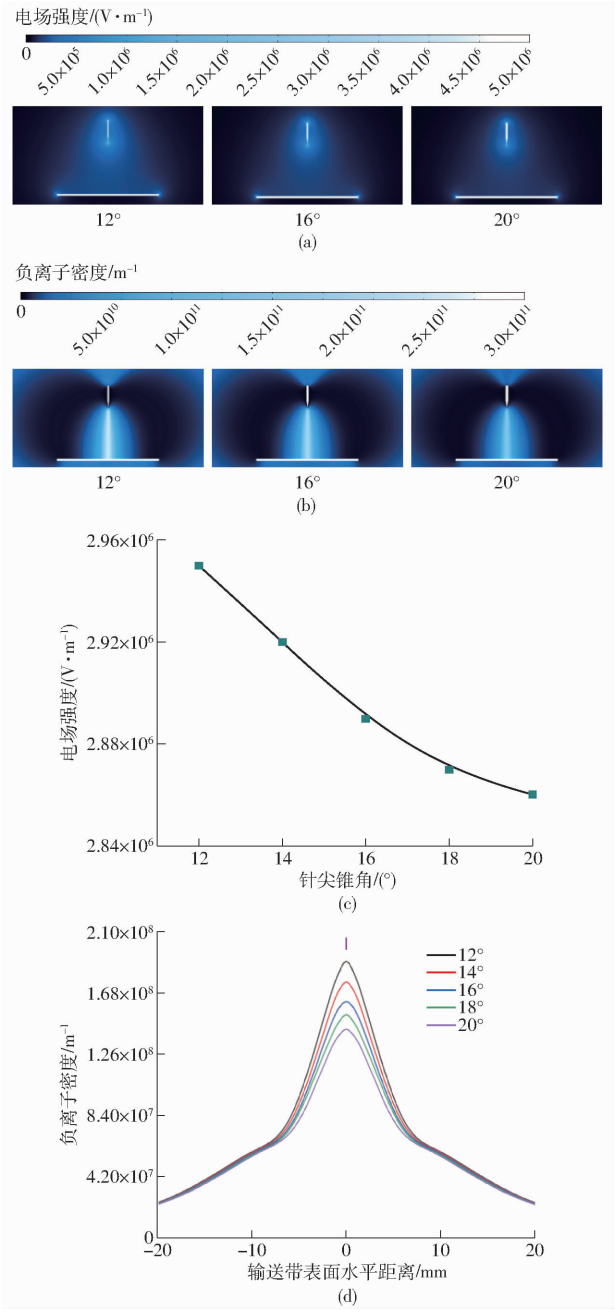

图 8 不同针尖锥角下仿真结果

Fig. 8 Simulation results of different needle tip cone angles

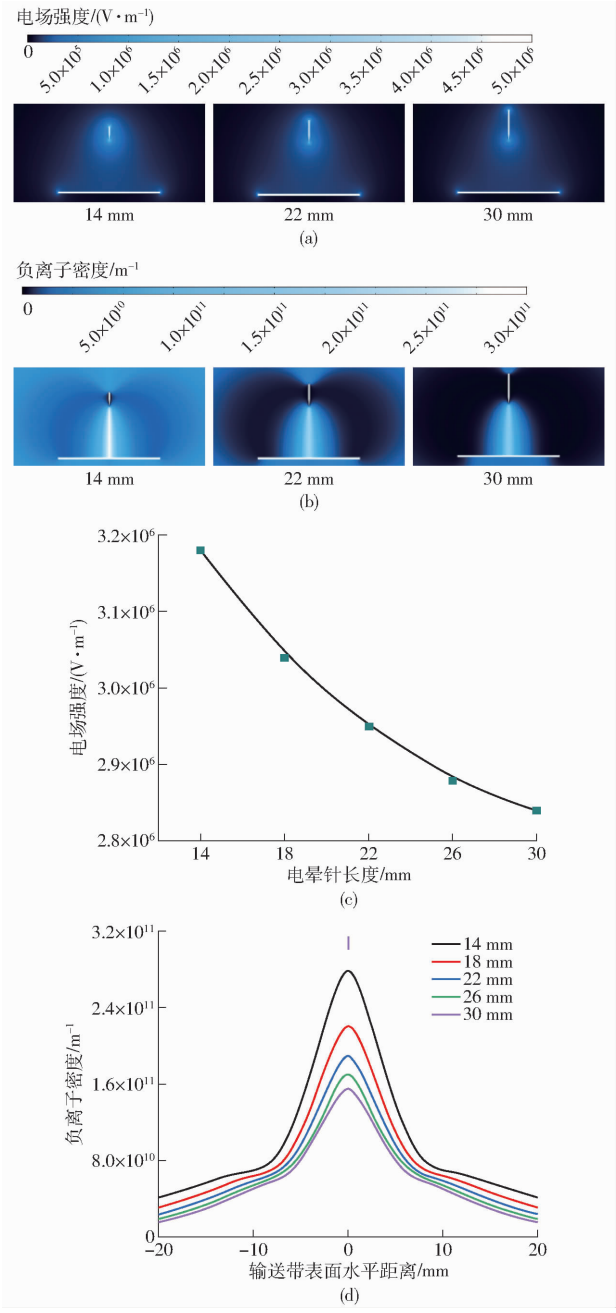

图 9 不同电晕针长度下仿真结果

Fig. 9 Simulation results under different corona needle lengths

呈递减规律,但在实际应用中锥角过小会增加空气击穿风险,且不利于安装,故选择 12°锥角的针头。

2.2.2 电晕针长度对电场和负离子分布的影响

在电压 15 kV、电极间距 50 mm、锥角 12°的单针头驻极条件下,不同针长(14、18、22、26、30 mm)仿真结果如图 9 所示。由图 9a、9c 可知,针长与电场强度呈显著负相关。在恒定电压下,针长增加导致电极表面积增长,使空间电荷分布密度降低[33],进而削弱场强峰值。由图 9b、9d 可知,针长增加会减弱输送带表面负离子密度,降低空气电离效率。理论上较短的针长可增强荷电效果,但结合装配便利性角度考虑,选择针长为 14 mm。

2.2.3 针间距对电场和负离子分布的影响

针对单针头驻极在荷电效率及大面积荷电能力上的局限。针对多针头驻极系统,通过调整针间距、电极间距及电压等关键参数,提高金属式输送带表面负离子密度的均匀性和荷电效率。

在电压 15 kV、电极间距 50 mm 的多针头驻极条件下,不同针间距(10、15、20、25、30 mm)仿真结果如图 10 所示。由图 10a、10c 可知,当针间距从 10 mm 增至 30 mm 时,整体场强呈增长趋势,且边缘针与中心针场强差逐渐减小,原因为针间距增大缓解了相邻针尖间的库仑排斥作用,从而改善了场强分布均匀性。由图 10b、10d 可知,随着针间距增大,

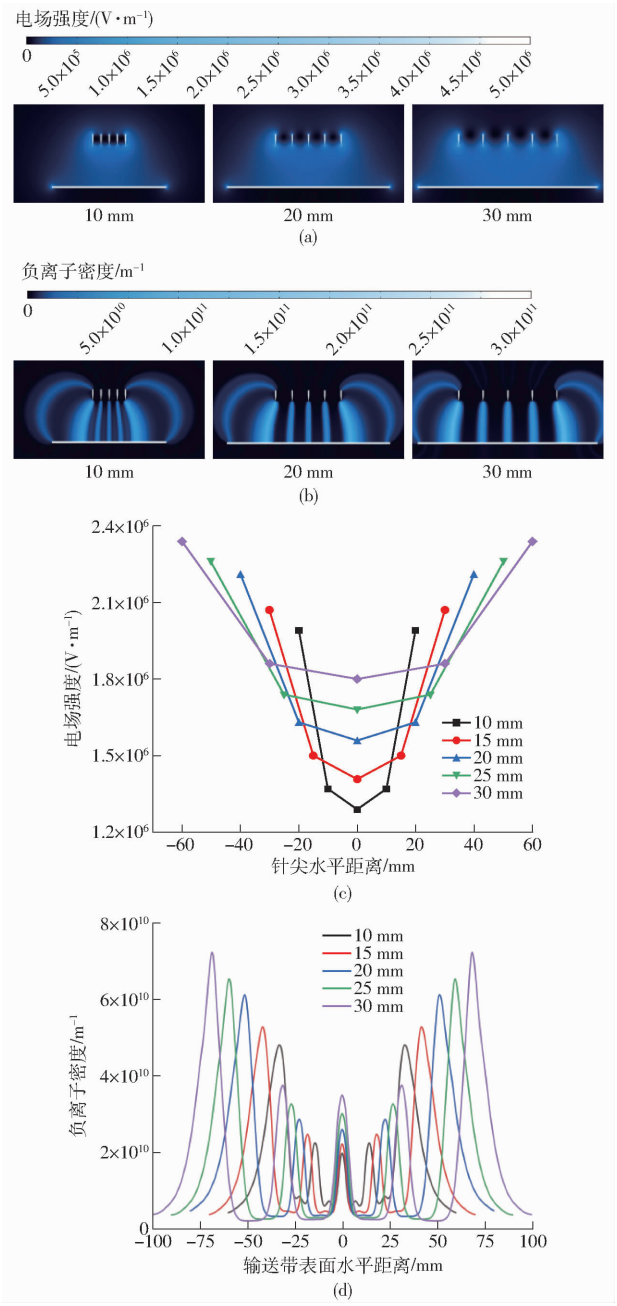

图 10　不同针间距下仿真结果

Fig. 10　Simulation results of different needle spacings

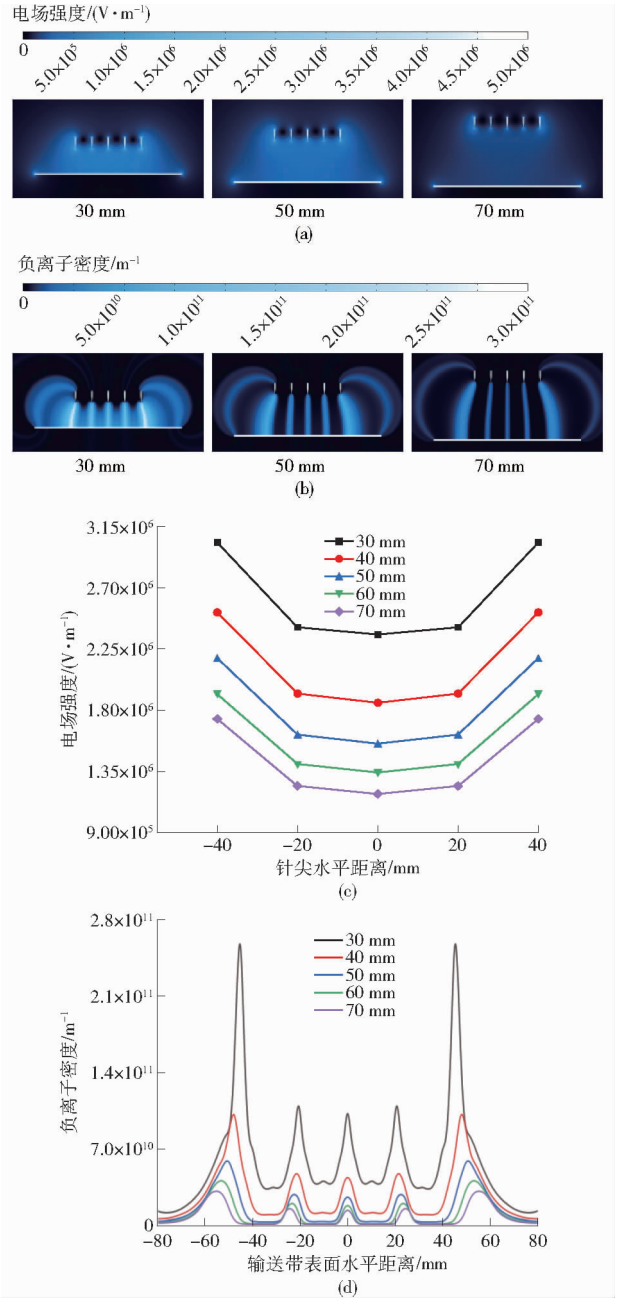

图 11　不同电极间距下仿真结果

Fig. 11　Simulation results of different electrode spacings

负离子边缘密度高、中心密度低差异更为明显(边缘效应),且相邻针头电离有效叠加区域逐渐减小,使得中间区域负离子密度呈减弱趋势。而针间距较小时,相邻针间强库仑斥力限制了负离子扩散,导致负离子密度分布不均且局部波动显著。综合考虑负离子叠加效果与分布稳定性,选择针间距 20 mm。

2.2.4　电极间距对电场和负离子分布的影响

在电压 15 kV、针间距 20 mm 的多针头驻极条件下,不同电极间距(30、40、50、60、70 mm)的仿真结果如图 11 所示。由图 11a、11c 可知,恒定电压下,随电极间距增大,电场强度整体呈下降趋势,边缘效应减小。由图 11b、11d 可知,电极间距与输送带表面负离子密度呈现负相关。当电极间距为 30 mm 时,电场集中使两端出现显著峰值,负离子密度分布产生大幅波动;当电极间距增大至 70 mm 时,增加了迁移过程中与其他粒子发生复合或散射概率,到达输送带表面负离子数量减少。负离子密度曲线随电极间距增加呈整体下移趋势,直观反映了负离子密度减小的变化规律。

2.2.5　电压对电场和负离子分布的影响

在针间距 20 mm、电极间距 50 mm 的多针头驻极条件下,不同电压(5、10、15、20、25 kV)仿真结果如图 12 所示。由图 12a、12c 可知,随电压升高,整体电场强度呈现增强趋势,且边缘针头的局部强场

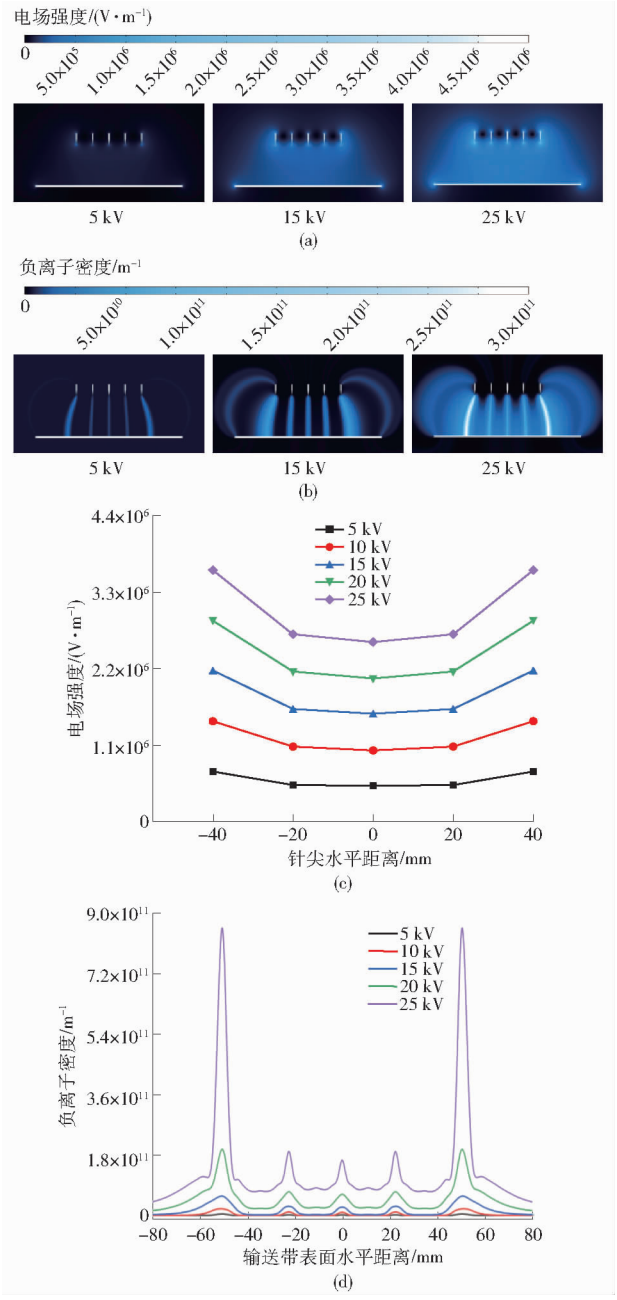

图 12 不同电压下仿真结果

Fig. 12 Simulation results of different voltages

特性在高电压下更为突出，与中心针头的场强差异随电压升高显著增加。由图 12b、12d 可知，输送带表面负离子密度与电压呈现显著正相关，场强增大可显著提升离子迁移速率，促使更多负离子在电场作用下快速迁移至输送带表面，但边缘效应更为明显，导致系统稳定性下降，因此需要选择合理的电压。

3 试验

3.1 单因素试验

3.1.1 单因素试验设计

为合理选取影响残膜分离性能的关键因素及其取值范围，以电极间距 A、高压静电发生器输出电压 B、输送带速度 C 以及物料喂入量 D 为试验因素，以分离率 Y 为试验指标，对秸秆饲料残膜静电分离开展单因素试验。采用图木舒克安欣牧业有限责任公司五十一团羊场玉米秸秆饲料作为试验对象，玉米秸秆饲料外观近似棒状，长 10 ~ 80 mm，平均直径 7 mm，残膜面积为 4 ~ 50 cm^2，选取的物料如图 13 所示。

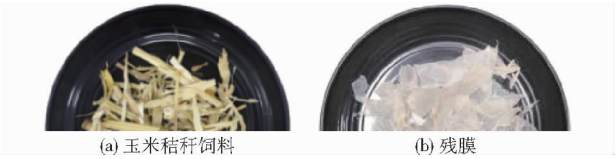

图 13 玉米秸秆饲料与残膜

Fig. 13 Corn stover feed and residual mulch film

试验环境温度为 25℃，相对湿度为 35%。每次试验取 2 000 g 玉米秸秆饲料与 50 片随机残膜均匀混合，试验重复 5 次，单因素试验因素水平如表 2 所示。

表 2 单因素试验水平

Tab. 2 Single factor experiment factors and levels

水平	因素			
	电极间距/mm	电压/kV	输送带速度/(m·min⁻¹)	喂入量/(kg·min⁻¹)
1	30	5	7	6
2	40	10	14	8
3	50	15	21	10
4	60	20	28	12
5	70	25	35	14

分离率 Y 计算式为

$$Y = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{8}$$

式中 n——分离残膜片数

N——试验前秸秆饲料中混合总残膜片数

3.1.2 单因素试验结果及分析

图 14 为电极间距、电压、输送带速度和喂入量对秸秆饲料残膜分离率影响的试验结果。

图 14a 为电极间距对残膜分离率的影响规律。当电压为 15 kV、针间距为 20 mm、输送带速度为 21 m/min、喂入量为 10 kg/min 时，电极间距为 30 ~ 70 mm 时，分离率随间距增大呈先升后降趋势。原因为当电极间距小于 40 mm 时，高压电场易击穿空气形成电弧，造成能量损耗，且过近的电极距离会增加物料堵塞风险。当电极间距大于 60 mm 时，输送带表面负离子密度急剧下降，导致残膜荷电不充分，分离率显著降低。而当电极间距为 40 ~ 60 mm 时，残膜分离率较高。因此确定多因素试验时电极间距为 40 ~ 60 mm。

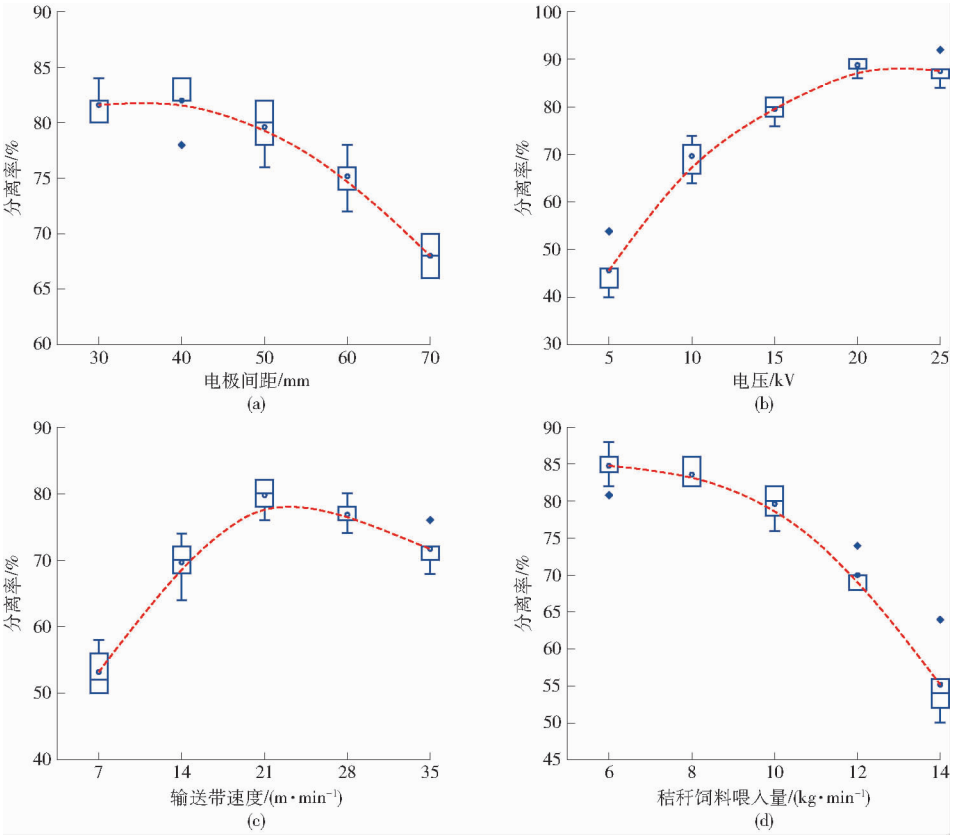

图 14　单因素试验结果

Fig. 14　Experimental results under different single factors

图 14b 为电压对残膜分离率的影响规律。在针间距为 20 mm、电极间距为 50 mm、输送带速度为 21 m/min、喂入量为 10 kg/min 条件下，当电压为 5 ~ 25 kV 变化时，分离率随电压升高显著提升。但当电压超过 20 kV 时，分离率不再增加。这是因为高场强下会产生强烈的离子风，阻碍了残膜进入电场，进而影响分离率。尽管电压升高可提高分离率，但过高电压容易引起空气击穿，故实际应用中电压不可无限增大，因此确定多因素试验电压为 15 ~ 25 kV。

图 14c 为输送带速度对残膜分离率的影响规律。当电压为 15 kV、针间距为 20 mm、电极间距为 50 mm、喂入量为 10 kg/min 时，当输送带速度为 7 ~ 35 m/min 变化时，分离率随输送带速度提高呈先升后降趋势。当输送带速度为 7 ~ 21 m/min 时，分离率随输送带速度增加而上升，这是由于固定喂入量下，输送带速度提高可减弱残膜与秸秆饲料的堆叠，增加残膜与输送带的吸附面积从而提高了分离率；而输送带速度超过 28 m/min 时，分离率逐渐降低，原因在于输送带速度升高会增大残膜离心力，同时缩短荷电时间，残膜镜像力减弱。因此确定多因素试验时输送带速度为 14 ~ 28 m/min。

图 14d 为喂入量对残膜分离率的影响规律。当电压为 15 kV、针间距为 20 mm、电极间距为 50 mm、输送带速度为 21 m/min 时，当秸秆饲料喂入量为 6 ~ 14 kg/min 变化时，随着混合物喂入量提高，分离率随喂入量增加呈下降趋势。喂入量提高会增加残膜与秸秆饲料堆叠概率，导致输送带无法充分吸附残膜；且当喂入量大于 10 kg/min 时，分离率急剧下降。尽管降低秸秆饲料喂入量有利于残膜分离，但会显著影响工作效率，因此确定多因素试验喂入量为 8 ~ 12 kg/min。

3.2　Box – Behnken 试验

3.2.1　试验设计

为寻找秸秆饲料残膜静电分离最佳参数组合，采用 Box – Behnken 试验法，以单因素试验筛选的关键因素及其对应的取值范围作为试验因素。分离率 Y 为响应指标，各试验因素编码如表 3 所示，试验方案与结果如表 4 所示，A、B、C、D 为因素编码值。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Coding of experiment factors

编码	因素			
	电极间距/mm	电压/kV	输送带速度/(m·min⁻¹)	喂入量/(kg·min⁻¹)
-1	40	15	14	8
0	50	20	21	10
1	60	25	28	12

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experiment design and results

序号	因素				分离率/%
	电极间距 A	电压 B	输送带速度 C	喂入量 D	
1	0	0	0	0	86
2	0	1	0	-1	92
3	0	-1	-1	0	70
4	1	-1	0	0	76
5	0	0	0	0	90
6	-1	-1	0	0	82
7	1	1	0	0	86
8	-1	0	-1	0	74
9	0	0	0	0	90
10	1	0	0	1	70
11	0	0	0	0	90
12	0	0	-1	-1	84
13	1	0	-1	0	72
14	-1	0	1	0	84
15	0	-1	0	1	70
16	-1	1	0	0	86
17	0	-1	0	-1	84
18	0	0	0	0	88
19	0	0	-1	1	62
20	0	1	0	1	72
21	1	0	0	-1	86
22	0	0	1	1	82
23	0	-1	1	0	78
24	1	0	1	0	86
25	0	1	-1	0	72
26	0	0	1	-1	90
27	-1	0	0	-1	88
28	-1	0	0	1	74
29	0	1	1	0	88

3.2.2 试验结果与分析

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，应用 Design-Expert 13 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，分离率 Y 二次回归模型达到极显著水平（$P<0.01$），失拟项不显著（$P>0.05$）。R^2 为 0.970 1，表明模型精度较高，拟合效果良好，可用该模型对分离性能指标进行预测。在回归模型中，回归项 B、C、D、CD、A^2、B^2、C^2、D^2 对 Y 影响极显著（$P<0.01$），回归项 A、AB、AC、AD、BC、BD 对 Y 影响不显著。各因素的影响主次顺序为 D、C、B、A。基于此，拟合得到二次多元回归方程

$$Y=88.8-A+3B+6.17C-7.83D+3.5CD-3.4A^2-4.4B^2-6.15C^2-4.65D^2$$

图 15 为因素之间交互作用对分离率的影响。当电极间距为 50 mm、电压为 20 kV 时，输送带速度较低条件下，随喂入量增加，分离率呈逐渐下降；此时喂入量增加会增加物料在输送带表面的堆叠概率，干扰分离过程，分离率下降；高输送带速度时，喂入量对分离率影响减弱。但输送带速度过高时，物料通过电场速度加快导致荷电不充分，分离率提升受限。最佳组合为高输送带速度配合中等喂入量。

表 5 方差分析结果

Tab. 5 Analysis of variance results

项目	平方和	自由度	F	P
模型	1 789.56	14	32.46	<0.000 1 **
A	12.00	1	3.05	0.102 8
B	108.00	1	27.42	0.000 1 **
C	456.33	1	115.88	<0.000 1 **
D	736.33	1	186.98	<0.000 1 **
AB	9.00	1	2.29	0.152 8
AC	4.00	1	1.02	0.330 6
AD	1.00	1	0.2539	0.622 2
BC	16.00	1	4.06	0.063 4
BD	9.00	1	2.29	0.152 8
CD	49.00	1	12.44	0.003 3 **
A^2	74.98	1	19.04	0.000 6 **
B^2	125.58	1	31.89	<0.000 1 **
C^2	245.34	1	62.3	<0.000 1 **
D^2	140.25	1	35.61	<0.000 1 **
残差	55.13	14		
失拟项	42.33	10	1.32	0.423 3
纯误差	12.80	4		
总和	1 844.69	28		

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$）。

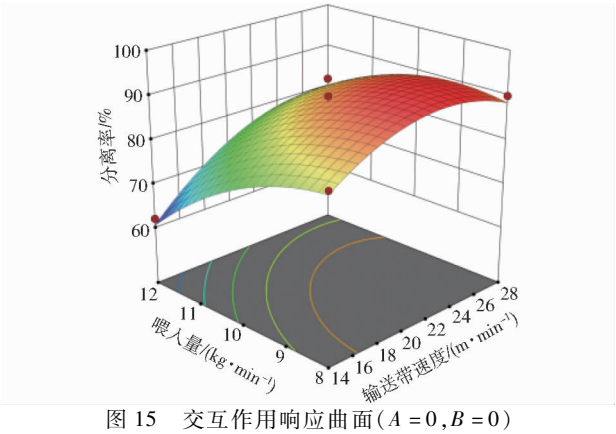

图 15 交互作用响应曲面（$A=0$，$B=0$）

Fig. 15 Interaction response surface

3.3 验证试验

为进一步验证 3.2 节中的模型准确性及最优参数组合的可靠性，进行验证试验。经响应曲面分析及模型求解，确定最优参数组合为：电极间距 51.3 mm、电压 22.9 kV、输送带速度 24.5 m/min、喂入量 9.5 kg/min，在此参数下分离率达 92.6%。基于该最优参数组合进行 4 次重复验证试验，测得分离率平均值为91%（表 6），与预测值误差较小，其

表 6　验证试验结果

Tab. 6　Validation test results

试验号	分离率/%
1	92
2	86
3	94
4	92
平均值	91

误差源于残膜形态差异与喂入均匀性偏差，结果表明，回归模型具有较高可靠性。

4　结论

（1）基于秸秆饲料与残膜介电特性差异，设计了一种针带式秸秆饲料残膜静电分离装置，主要由高压静电发生器、驻极放电棒和金属式输送带等核心部件组成。基于静电吸附原理通过理论分析确定了秸秆饲料与残膜分离的临界条件，验证了静电分离技术用于去除秸秆饲料中残膜的可行性。

（2）基于 COMSOL 仿真研究了电晕针几何参数（锥角、针长、针间距）以及工作参数（电极间距、电压）对电场分布和负离子密度的影响。确定了针尖锥角为 12°、针长为 14 mm、针间距为 20 mm。

（3）单因素试验表明，电极间距、电压、输送带速度和物料喂入量对分离率影响显著。当电极间距为 40 ~ 60 mm、电压为 15 ~ 25 kV、输送带速度为 21 ~ 28 m/min 以及物料喂入量为 8 ~ 12 kg/min 时，分离率维持在较高水平。

（4）采用响应面分析法建立分离率二次回归模型，求解得最优参数组合为：电极间距 51.3 mm、电压 22.9 kV、输送带速度 24.5 m/min、喂入量 9.5 kg/min。验证试验测得分离率为 91%，与预测值误差较小，表明该装置可满足秸秆饲料残膜清除的技术要求。

参　考　文　献

[1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2024.

[2] 江惠，王明利，励汀郁，等. 新疆草原畜牧业转型升级：发展现状、现实困境与实现路径[J]. 华中农业大学学报，2023，42(5)：42 - 52.
JIANG Hui, WANG Mingli, LI Tingyu, et al. Transformation and upgrading of grassland animal husbandry in Xinjiang: development status, realistic dilemmas and realization paths[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 42 - 52. (in Chinese)

[3] 胡灿，王旭峰，陈学庚，等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报，2019，35(24)：223 - 234.
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 223 - 234. (in Chinese)

[4] 胡德强，高超，朱俊标，等. 作物秸秆中滞留塑料制品残渣对集约化羊场生产的影响[J]. 新疆农垦科技，2023，46(1)：42 - 44.

[5] 花尔. 地膜残留对牛羊养殖的潜在风险与应对策略[J]. 北方牧业，2024(13)：16.

[6] 杨猛，张延化，张冲，等. 先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：112 - 121.
YANG Meng, ZHANG Yanhua, ZHANG Chong, et al. Design and experiment of fan-sieve combined peanut film-seedling separation device based on shredding and separating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 112 - 121. (in Chinese)

[7] 戴飞，赵武云，刘国春，等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(8)：140 - 147.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, LIU Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 140 - 147. (in Chinese)

[8] 张佳，谢建华，杜亚坤，等. 滚刀-轴流滚筒组合式膜杂混合物切碎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(6)：409 - 421，456.
ZHANG Jia, XIE Jianhua, DU Yakun, et al. Design and experiment of rotary knife-axial flow drum combined device for chopping and separating film residue mixtures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 409 - 421, 456. (in Chinese)

[9] 谢建华，刘旺，曹肆林，等. 逆流钩拽式残膜混合物清洗分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(6)：397 - 408.
XIE Jianhua, LIU Wang, CAO Silin, et al. Design and test of countercurrent hook-type residual film mixture cleaning and separating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 397 - 408. (in Chinese)

[10] 曹成茂，罗坤，彭美乐，等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报，2019，50(9)：105 - 112.
CAO Chengmao, LUO Kun, PENG Meile, et al. Experiment on winnowing mechanism and winnowing performance of hickory material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 105 - 112. (in Chinese)

[11] 谢建华，李沅泽，刘迎春，等. 分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(11)：329 - 341，428.
XIE Jianhua, LI Yuanze, LIU Yingchun, et al. Design and test of segmented drum pneumatically assisted *Potosia brevitarsis larvae* residual film mixture separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,

55(11): 329 – 341,428. (in Chinese)
[12] 胡永光,靳筱天,张志,等. 基于 AW – CPSO – Fuzzy – PID 的茶鲜叶分级输送速度控制器研究[J]. 农业机械学报,2025,56(4):275 – 283.
HU Yongguang, JIN Xiaotian, ZHANG Zhi, et al. Research on controller of fresh tea leaves grading transport speed based on AW – CPSO – Fuzzy – PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 275 – 283. (in Chinese)
[13] ZHAO X, GUO X, LUO J, et al. Efficient detection method for foreign fibers in cotton[J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(3): 320 – 328.
[14] 张晨,孙世磊,石文轩,等. 基于嵌入式系统的异纤清除机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(8):43 – 52.
ZHANG Chen, SUN Shilei, SHI Wenxuan, et al. Design and test of foreign fiber removal machine based on embedded system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 43 – 52. (in Chinese)
[15] RICHARD G, TOUHAMI S, ZEGHLOUL T, et al. Experimental and numerical evaluation of two electrode systems for plate-type electrostatic separators[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 85: 1 – 10.
[16] 王巧华,翁富炯,张洪洲,等. 机采棉中残地膜静电吸附法分级去除[J]. 农业机械学报,2019,50(6):140 – 147.
WANG Qiaohua, WENG Fujiong, ZHANG Hongzhou, et al. Graded removal of residual plastic film in machine-picked cotton by electrostatic adsorption method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 140 – 147. (in Chinese)
[17] 倪超,李振业,张雄,等. 基于短波近红外高光谱和深度学习的籽棉地膜分选算法[J]. 农业机械学报,2019,50(12):170 – 179.
NI Chao, LI Zhenye, ZHANG Xiong, et al. Film sorting algorithm in seed cotton based on near-infrared hyperspectral image and deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 170 – 179. (in Chinese)
[18] 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)
[19] 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 – 21,46.
LI Xuanfu, XING Jianfei, HU Can, et al. Application and development prospect of electrostatic technology in agriculture[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2022(1): 18 – 21,46. (in Chinese)
[20] 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.
[21] REGUIG A, BENDAOUD A, DORDIZADEH P, et al. Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 88: 232 – 235.
[22] IMEN B, THAMI Z, KARIM M, et al. Corona-charged insulating belt electrode conveyor-type electrostatic separator for granular plastic wastes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6997 – 7004.
[23] SALAMA A, RICHARD G, MEDLES K, et al. Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator[J]. Waste Management, 2018, 76: 207 – 216.
[24] JAFARI M, CHEGINI G, AKMAL S A 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.
[25] SUN Yue, HU Chunling, LI Yangyang, et al. Experimental research on a needle roller-type electrostatic separation device for separating unginned cotton and residual films[J]. Agriculture, 2023, 13(2): 324.
[26] 王凤花,林玉红,赖庆辉,等. 金银花静电除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):143 – 154.
WANG Fenghua, LIN Yuhong, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of electrostatic impurity removal device for honeysuckle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 143 – 154. (in Chinese)
[27] SARA M, THAMI Z, ABDELKADER B M, 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.
[28] 刘延波,马兴鹏,和星雨,等. 多针头静电驻极熔喷布电场仿真及其过滤性能研究[J]. 棉纺织技术,2024,52(12):7 – 14.
LIU Yanbo, MA Xingpeng, HE Xingyu, et al. Electric field simulation and filtration performance study of multi-needle electrostatically electreted melt-blown fabric[J]. Cotton Textile Technology, 2024, 52(12): 7 – 14. (in Chinese)
[29] MOHAMED M, WESSIM A, FODIL M B, 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.
[30] SOFIANE M B, THAMI Z, ZEHIRA Z, et al. Experimental characterization of electric potential uniformity at the surface of polymer plates corona charged by multiple-row needle-type electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 115:103656.
[31] CHEN S, NOBELEN Y P C J, NIJDAM S. A self-consistent model of ionic wind generation by negative corona discharges in air with experimental validation[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2017, 26(9): 095005.
[32] MOHAME 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.
[33] 刘志. 电晕放电下的液滴凝并仿真研究与分析[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
LIU Zhi. Simulation research and analysis of droplet coalescence under corona discharge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)