

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.015

机采棉中残地膜静电吸附法分级去除

王巧华^{1,2} 翁富炯^{1,2} 张洪洲^{1,3} 袁成^{1,2} 李理^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

3. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 提出一种基于静电吸附方法分级去除机采棉中残地膜的方法, 以新疆阿拉尔地区种植的新陆早 26 号机采棉为研究对象, 根据机采棉中残地膜曲直形态与荷电化程度存在一定的相关性, 利用图像处理提取机采棉中各种残地膜杂质特征并进行聚类算法分级, 将残地膜分成 I、II、III 等级。搭建静电吸附分离平台, 对掺有不同等级残地膜的机采棉进行不同荷电时间、飞入速度、极板电压下的试验, 以除杂率为测定指标, 找出对应级别残地膜的最佳参数组合, 以期达到残地膜杂质与机采棉的分离最大化。试验表明, 对除杂率影响显著的因素由大到小为: 飞入速度、荷电时间、极板电压。掺有 I 级残地膜的机采棉除杂最佳荷电时间为 24 s, 飞入速度为 4.7 m/s, 极板电压为 39 kV, 分离率为 96.2%; II 级最佳荷电时间为 29.8 s, 飞入速度为 5.8 m/s, 极板电压为 37.6 kV, 分离率为 98.1%; III 级最佳荷电时间为 30.1 s, 飞入速度为 3.5 m/s, 极板电压为 46.2 kV, 分离率为 97.2%。研究结果表明: 基于静电吸附分级去除残地膜的方法可行, 能够满足实际生产需要。

关键词: 机采棉; 残地膜; 分离; 静电吸附

中图分类号: S129 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)06-0140-08

Grading Removal of Residual Plastic Film in Machine-harvested Cotton Using Electrostatic Adsorption Method

WANG Qiaohua^{1,2} WENG Fujiong^{1,2} ZHANG Hongzhou^{1,3} YUAN Cheng^{1,2} LI Li^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

Abstract: A method based on electrostatic adsorption for grading removal of residual plastic film in machine-harvested cotton was proposed. The machine-harvested cotton of Xinluzao No. 26 planted in Alaer region of Xinjiang was the research object. According to the correlation between the degree of polarization charge and the curved form of the residual plastic film in machine-harvested cotton, the characteristics of various residual plastic film in machine-harvested cotton were extracted by image processing, and then the residual film was graded by clustering algorithm and divided into I, II and III grades. Then the electrostatic adsorption separation platform was constructed, and factors of different charge times, flying speed and polar plate voltage of machine-harvested cotton with different grades of residual plastic film were tested. Taking the impurity removal efficiency as the index, the optimum combination of the external influencing factors of the corresponding grade residual plastic film was found in order to achieve the maximum separation between the residual plastic film and machine-harvested cotton. The results indicated that the factors affecting the removal impurity efficiency were: charge time, flying speed, and polar plate voltage. The optimum charging time of machine-harvested cotton with grade I residual plastic film was 24 s, flying speed was 4.7 m/s, plate voltage was 39 kV, and separation rate was 96.2%; grade II: charging time was 29.8 s, flying speed was 5.8 m/s, plate voltage was 37.6 kV, separation rate was 98.1%; grade III: charging time was 30.1 s, flying speed was 3.5 m/s, plate voltage was 46.2 kV, and the separation rate was 97.2%. The results showed that the method of grading removing residual film based on electrostatic adsorption was feasible and met the needs of practical development.

Key words: machine-harvested cotton; residual plastic film; separation; electrostatic adsorption

收稿日期: 2018-09-03 修回日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760340)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662017PY120)、塔里木大学-华中农业大学联合基金项目(TDHNH201703)和自治区级塔里木大学现代农业工程重点实验室开放课题项目(TDNG20170101)

作者简介: 王巧华(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: wqh@mail.hzau.edu.cn

0 引言

棉花机械采收时,因混入质量较轻、透明且不易被发现的残地膜,给棉花的加工处理带来了极大的困难^[1-4]。多年来许多学者一直致力于寻找有效去除机采棉中残地膜的方法,但收效甚微。

目前残地膜去除方法主要有:人工手动除杂方法、传统机械除杂方法^[5-8]、机器视觉检测并剔除方法^[9-11]、静电吸附方法^[12-14]等。传统人工除杂劳动强度大、工作效率低、作业环境差,不适合推广;温浩军等^[15]采用机械方法,主要利用多道工序开松棉花,使棉花和杂质分开,不仅除杂效果不理想,还对棉花品质有很大损坏,尤其对长绒棉的品质影响较大;张晨等^[16]提出利用机器视觉除杂,但对于细小杂质识别效果不佳,且采用高压喷阀和风机控制较复杂,去除杂质不彻底,对工作环境要求高且成本大,不符合实际需要;郭淑霞等^[12]提出利用静电吸附方法除杂,静电除杂无污染、无噪声,对工作环境要求低,对棉花品质影响小,但该文仅仅使用静电方法且未分级除杂,故除杂效果仍是不佳。BUTUNOI等^[17]从电学角度研究了小麦种子的清洗以及分离小麦种子和其他种子混合物,GONTRAN等^[18]利用静电吸附方法将聚乙烯薄膜和金属混合物中的聚乙烯薄膜分离出来,虽效果较佳,但没有对物料的电特性进行深入的研究。可见,静电除杂方法相对其他方法优势突出,值得重点研究。

当前有关棉花清杂的研究包括物理清洗、机械清洗、多次鼓风式、振动式和探测式除杂等。而对杂质的物理特性却鲜有研究。本课题组通过前期的试验研究,已初步确定在机采棉静电除杂过程中,除杂效果与残地膜的几何等级存在一定的相关关系。为进一步确定除杂效果与残地膜的几何等级之间的关系,本文提出一种静电与风力结合的分级除杂方法。利用图像处理提取机采棉中残地膜面积等外形特征,并将其分为3级,在自行搭建的机采棉残地膜静电吸附分离平台上,针对掺有不同等级残地膜的机采棉进行不同荷电时间、飞入速度、极板电压的多因素试验,以除杂率为判别指标,获取不同级别残地膜与机采棉分离率最高时的最佳参数组合。

1 材料和方法

1.1 试验材料

取机采棉新陆早26号30kg,人工控制其含水率在4%~7%之间。在30kg机采棉中随机选取3kg作为试验样本,采用人工方法从3kg的机采棉中挑选出所有残地膜杂质,将其编号。由于残地膜

在机采棉中形态各异,需要根据外形特征进行分级分类。

1.1.1 图像预处理

在机器视觉平台上采集图像,利用Matlab软件对从3kg机采棉中分离出来的残地膜图像进行二值化、孔洞填充、边缘检测、边界追踪、边界细化处理^[19-20],如图1所示。然后提取出每片残地膜的周长 L 、面积 S 、圆形度 C 、维数 D ^[21-22]。



图1 残地膜图像处理

Fig. 1 Residual plastic film image processing

1.1.2 残地膜分级

将提取的特征信息利用K-means聚类算法^[23-24]进行聚类分级,输入:聚类的数目 $K=3$ (根据人工经验及分拣情况判断,残膜可分为3级,故设 $K=3$)和包含598个(3kg机采棉中残地膜总片数 n)对象的数据集。输出:3个聚类中心。执行算法后系统可自动将残地膜进行分级,分级结果如图2所示。

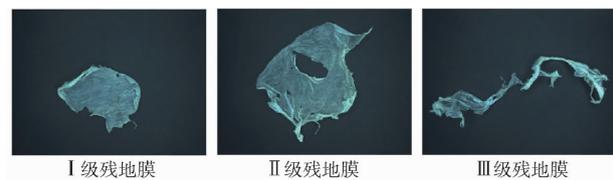


图2 残地膜分级结果

Fig. 2 Residual plastic film classification results

由图2可以看出,I级残地膜圆形度较大;III级残地膜维数最大,形状最为复杂;各级残地膜区分度较高,分级效果良好。各等级残地膜具体参数见表1。

表1 各等级残地膜参数

Tab. 1 Residual plastic film parameters of each grade

等级	周长/像素	面积/像素	圆形度	维数
I	$0 \sim 2.5 \times 10^3$	$0 \sim 1.5 \times 10^5$	$0.6 \sim 1$	$1.0 \sim 1.1$
II	$2.5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$	$> 3.5 \times 10^5$	$0.4 \sim 0.6$	$1.1 \sim 1.2$
III	$> 5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$	$0 \sim 0.4$	$1.2 \sim 1.3$

1.2 试验装置及工作原理

1.2.1 机采棉残地膜静电吸附平台结构

自行搭建的机采棉残地膜静电吸附分离简易平台如图3所示,主要由机架、电机、风机、绝缘传送带、绝缘石墨板组成。其中吸附箱中下极板接高压电,上极板接地。

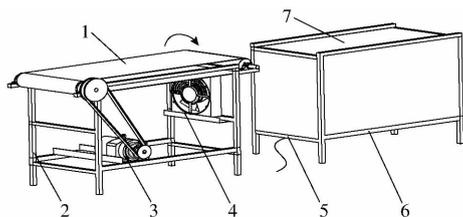


图3 机采棉残地膜静电吸附分离平台结构示意图

Fig.3 Schematic of removing impurities from cotton

based on electrostatic

1. 绝缘传送带 2. 机架 3. 电机 4. 风机 5. 接高压电的石墨板 6. 绝缘石墨板 7. 绝缘石墨板(接地)

1.2.2 工作原理

吸附平台工作时,机架以及上极板接地,下极板接高压电极。将机采棉和残地膜混合并均匀平铺在绝缘传送带上,利用荷电装置对其进行荷电。荷电完毕后,机采棉带正电,残地膜带负电^[25-27]。开启传送带以某恒定速度运行,机采棉与残地膜在传送带上做匀速运动,运动至末端时做类平抛运动,并在机架下风机的吹动下进入高压静电箱。机采棉和残地膜由于本身质量和所带电量的不同,残地膜在电场中受到的电场力大于棉花的束缚力,因而实现棉花和残地膜之间的分离。

1.3 试验方法

残地膜和棉花的荷电极化程度是除杂的重要环节,而极化程度又受外界条件以及残地膜自身几何形态的影响。不同物质因其自身结构以及存在状态的复杂性,进行高压极化时,荷电时间、电压等外界因素与几何形态有着很大的联系^[28-30]。故要达到较高除杂率,需要对残地膜进行细分分级,找出对各级残地膜去除时的最佳影响参数,逐级去除。

利用图像处理提取机采棉中残地膜面积、周长、圆形度等特征并利用聚类算法将其分为3级,取I、II、III等级的残地膜分别与之前的人工分拣出杂质的机采棉进行混合,力求与残地膜在机采棉中原存在状态一致。这里将机采棉与I级残地膜混合的机采棉称为1号棉花,II级称为2号棉花,III级称为3号棉花,原30 kg挑选剩下的27 kg机采棉称为4号棉花。在机采棉残膜静电吸附分离平台上进行试验,测定除杂率;每组试验重复做10次,取10次试验除杂率的平均值为最后计算除杂率的数值。

实验室环境温度为25~28℃,相对湿度20%~40%。试验所用主要仪器:BM101型高压直流静电发生器(无锡博亚电子科技有限公司)、ZGF-200/10型直流高压发生器(武汉国电铭科电气有限公司)。

1.4 测定指标

衡量机采棉与残地膜之间分离效果的指标为除杂率,这里定义除杂率 Y 为清除出的残地膜质量 m

占原混入的残地膜质量 M 的百分比。

1.5 单因素试验

根据上述试验平台结构特征以及试验时发现,影响最终除杂效果因素有:飞入速度、荷电时间、极板电压。为确定是否对结果产生影响,进行单因素试验设计。试验方案为:取4号棉花中的5 kg进行试验,改变一个因素,保持另外两个因素不变,记录观察试验结果。

1.6 残地膜分级响应面试验

根据单因素试验中确定的3个影响因素,采用试验设计中的响应面分析方法设计试验^[31]。试验方案为:分别取1、2、3号棉花进行试验,其中自变量为:飞入速度、荷电时间、极板电压,响应值为最终除杂率。各因素参数选取根据单因素试验以及大量预试验结果,荷电分离试验参数见表2。

表2 荷电分离试验参数

Tab.2 Charge separation parameters

残地膜等级	荷电时间 t/s	飞入速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	极板电压 U/kV
I	16, 20, 24	4, 5, 6	10, 30, 50
II	26, 30, 34	4, 5, 6	10, 30, 50
III	30, 34, 38	4, 5, 6	10, 30, 50

2 试验结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 除杂率与飞入速度关系

保持极板电压在40 kV,荷电时间选择35 s,设定不同的极板电压进行试验并测定除杂率。采用OriginPro8软件对试验数据进行处理^[32],图4为除杂率 Y 和飞入速度 v 之间关系曲线。从图中曲线可以看出,随着飞入速度 v 的增大除杂率 Y 也增大,但增大到4.5 m/s时,再增加速度时除杂率反而有所下降,因此最佳飞入速度在4.5 m/s左右。对速度在0~4.5 m/s范围内数据进行相关性分析,得到 v 与 Y 相关系数 R 为0.965,说明飞入速度和除杂率

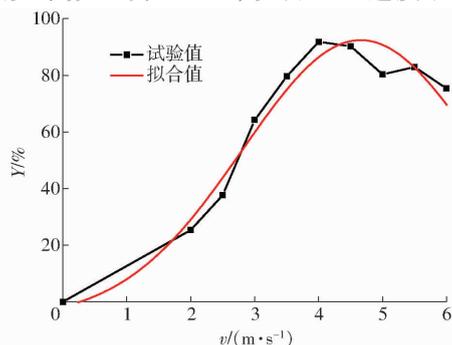


图4 除杂率 Y 与飞入速度 v 关系曲线

Fig.4 Relationship curves of impurity removal rate and fly-in speed

相关性显著。

2.1.2 除杂率与荷电时间关系

保持极板电压在 40 kV, 飞入速度为 4.5 m/s, 设定不同的荷电时间进行试验并测定除杂率。图 5 为除杂率 Y 和荷电时间 t 之间关系曲线。从图中可以看出, 随着荷电时间的增大除杂率也增大, 但增大到 35 s 左右时, 再增加荷电时间除杂率反而有所下降。因此最佳荷电时间在 35 s 左右。对荷电时间在 0 ~ 35 s 范围内数据进行相关性分析, 得到 t 与 Y 相关系数 R 为 0.954, 说明荷电时间和除杂率相关性显著。

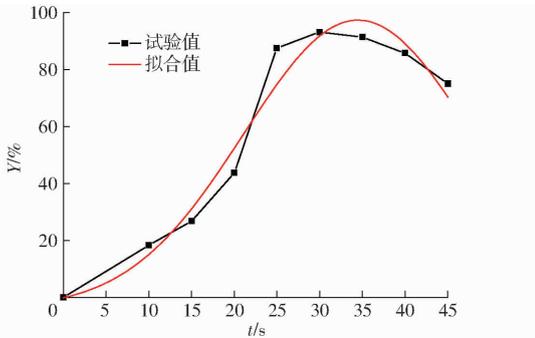


图 5 除杂率 Y 和荷电时间 t 关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of impurity removal rate and charge time

2.1.3 除杂率与极板电压关系

保持飞入速度为 4.5 m/s, 荷电时间选择 35 s, 设定不同的极板电压进行试验并测定除杂率。图 6 为除杂率 Y 和极板电压 U 之间关系曲线。从图中可以看出, 随着极板电压的增大除杂率也增大, 但增大到了 40 kV 时, 再增大极板电压时除杂率几乎保持不变。因此最佳极板电压在 40 kV 左右。对极板电压在 0 ~ 40 kV 范围内数据进行相关性分析, 得到 U 与 Y 相关系数 R 为 0.95, 说明极板电压和除杂率相关性显著。

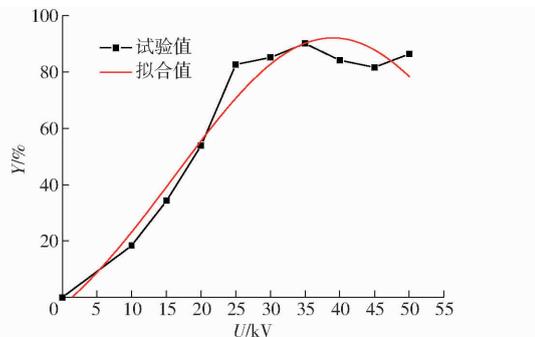


图 6 除杂率 Y 和极板电压 U 关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of impurity removal rate and plate voltage

2.2 残地膜分级响应面试验

2.2.1 1 号棉花回归方程与方差显著性分析

以飞入速度 v 、荷电时间 t 、极板电压 U 为自变

量, 以除杂率 Y 为因变量, 应用 Box - Behnken 响应面分析法^[33-35]以及软件 Design-Expert 进行响应面分析方案设计, 试验因素编码见表 3, 试验设计方案与结果见表 4。A、B、C 为因素编码值。

表 3 1 号棉花试验因素编码

Tab. 3 Factors and codes of test No. 1 cotton

编码	因素		
	飞入速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	荷电时间 t/s	极板电压 U/kV
-1	4	16	10
0	5	20	30
1	6	24	50

表 4 1 号棉花试验设计方案与结果

Tab. 4 Test design plan and results of No. 1 cotton

试验序号	飞入速度 A	荷电时间 B	极板电压 C	除杂率 Y/%
1	0	0	0	85.3
2	1	0	1	90.2
3	-1	-1	0	75.2
4	0	-1	-1	30.6
5	0	-1	1	80.1
6	-1	0	1	80.4
7	1	1	0	80.6
8	-1	0	-1	20.4
9	1	-1	0	85.7
10	0	0	0	85.3
11	0	1	-1	20.7
12	-1	1	0	75.9
13	0	0	0	85.2
14	1	0	-1	35.6
15	0	0	0	85.1
16	0	1	1	75.8
17	0	0	0	85.4

对上述试验结果采用响应面分析法进行多元回归方程拟合, 所得拟合回归方程为

$$Y = -216.145 + 56.625v + 4.9t + 5.5695U - 0.3625vt + 0.07vU - 0.016875tU - 5.38v^2 - 0.033125t^2 - 0.0702U^2 \quad (1)$$

在多元线性回归方程分析中, 相关系数 R 反映了一个变量与多个变量之间的线性相关程度。此拟合的回归方程的相关系数 $R = 0.983$, $|R|$ 接近 1, 说明除杂率与各个自变量组成的线性方程线性关系密切。对多元回归方程进行方差分析, 方差分析结果见表 5。

由表 5 的方差分析可知, 用 F 检验法检验拟合方程的显著性, 结果表明回归方程高度显著, 结合上述相关系数 R 可以得出: 所拟合的二次多元回归方程较为合理, 能正确反映出因变量与各自变量之间的内在关系。根据回归方程, 设置 Y 取最大值, 对

表 5 1号棉花回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression equation of No.1 cotton

方差来源	平方和	自由度	F	P
回归模型	9 817.56	9	110.38	<0.000 1 **
A	202.01	1	5.19	0.000 4 **
B	43.25	1	20.74	0.023 7 *
C	6 006.08	1	627.41	<0.000 1 **
AB	8.41	1	0.65	0.245 0
AC	7.29	1	0.65	0.276 0
BC	7.84	1	0.65	0.260 1
A ²	1.18	1	9.34	0.648 7
B ²	121.87	1	0.061	0.001 9 **
C ²	3 319.94	1	635.62	<0.000 1 **
残差	35.56	7		
总和	9 854.12	16		

注：*表示显著($P < 0.05$)；**表示极显著($P < 0.01$)。

3个自变量求解最优参数组合,可得当荷电时间 $t = 24$ s、飞入速度 $v = 4.7$ m/s、极板电压 $U = 39$ kV 时,除杂率 $Y = 96.27\%$ 。同时设定实验室环境与上述试验环境保持一致,根据上述确定条件在试验平台上进行 10 次试验验证,取 10 次试验结果平均值,为 96.2%。

由以上试验可分析,由于 I 级残地膜的质量、面积、周长等特征相对于其他两级残地膜来说数值较小,与棉花接触面积也相对较小,因此在进行静电分离试验时所需的荷电时间较小,故在通过高压静电场做平抛运动时,只需要足够大速度则将其分离,与拟合的回归方程相似度很高。

2.2.2 2号棉花回归方程及方差显著性分析

2号棉花试验因素编码见表 6,试验设计方案与结果见表 7,采用响应面分析法进行多元回归方程拟合。所得拟合回归方程为

$$Y = -207.695 + 25.225v + 8.53125t + 5.94325U - 0.26875vt + 0.12125vU - 0.031562tU - 1.8925v^2 - 0.11203t^2 - 0.070481U^2 \quad (2)$$

拟合回归方程的相关系数 $R = 0.971$, $|R|$ 接近 1,说明除杂率与各个自变量组成的线性方程线性关系密切。

表 6 2号棉花试验因素编码

Tab.6 Factors and codes of test No.2 cotton

编码	因素		
	飞入速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	荷电时间 t/s	极板电压 U/kV
-1	4	26	10
0	5	30	30
1	6	34	50

表 7 2号棉花试验设计方案与结果

Tab.7 Test design plan and results of No.2 cotton

试验序号	飞入速度 A	荷电时间 B	极板电压 C	除杂率 Y/%
1	0	1	-1	30.4
2	-1	1	0	85.3
3	-1	0	1	80.4
4	1	0	1	90.1
5	0	1	1	85.7
6	0	0	0	90.6
7	0	0	0	90.4
8	0	0	0	90.3
9	-1	-1	0	85.8
10	1	-1	0	90.6
11	1	1	0	85.8
12	-1	0	-1	35.7
13	0	0	0	90.8
14	0	-1	-1	30.4
15	1	0	-1	35.7
16	0	-1	1	95.8
17	0	0	0	90.7

对拟合方程进行方差检验分析, P 值远小于 0.000 1,说明所拟合的二次多元回归方程较为合理。根据回归方程,设置 Y 取最大值,对 3 个自变量求解最优参数组合。可得当荷电时间 $t = 29.8$ s、飞入速度 $v = 5.8$ m/s、吸附电压 $U = 37.6$ kV 时,除杂率 $Y = 98.19\%$ 。进行试验验证,试验结果为 98.1%。

由于 II 级残地膜相对于 I 级残地膜面积、周长等各项特征均有所增大,在机采棉中存在状态与 I 级类似,因此此类残地膜荷电吸附规律应与 I 级残地膜吸附规律类似。II 级残地膜与棉花接触面积较大,在进行静电吸附试验时,为达到较满意吸附效果,荷电时间适当延长。通过回归方程可以看出,荷电时间的偏回归系数相对于 I 级残地膜有所增大,试验结果与实际情况比较贴近。

2.2.3 3号棉花回归方程及方差显著性分析

3号棉花试验因素编码见表 8,试验设计方案与结果见表 9,同样采用响应面分析法进行多元回归方程拟合,所得拟合回归方程为

$$Y = 125.6125 - 6.67063t - 8.275v + 5.67663U - 0.00625vt - 0.01625tU - 0.18125vU + 0.089688t^2 + 1.31v^2 - 0.049287U^2 \quad (3)$$

表 8 3号棉花试验因素编码

Tab.8 Factors and codes of test No.3 cotton

编码	因素		
	飞入速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	荷电时间 t/s	极板电压 U/kV
-1	4	30	10
0	5	34	30
1	6	38	50

表9 3号棉花试验设计方案与结果

Tab.9 Test design plan and results of No.3 cotton

试验序号	飞入速度 A	荷电时间 B	极板电压 C	除杂率 Y/%
1	-1	-1	0	80.1
2	1	0	1	75.2
3	0	-1	-1	35.2
4	1	-1	0	80.1
5	0	0	0	75.8
6	0	-1	1	90.9
7	-1	0	1	85.7
8	1	0	-1	34.7
9	0	0	0	75.0
10	0	0	0	74.3
11	0	0	0	74.9
12	-1	1	0	75.4
13	0	1	1	75.6
14	0	1	-1	25.1
15	1	1	0	75.3
16	-1	0	-1	30.7
17	0	0	0	74.9

回归方程的相关系数 $R = 0.966$, $|R|$ 接近 1, 说明除杂率与各个自变量组成的线性方程线性关系密切。

对拟合方程进行方差检验分析, P 值远小于 0.000 1, 说明所拟合的二次多元回归方程较为合理, 能正确反映出因变量与各自变量之间的内在关系。根据回归方程, 设置 Y 取最大值, 对 3 个自变量求解最优参数组合。可得当荷电时间 $t = 30.1$ s、飞入速度 $v = 3.5$ m/s、极板电压 $U = 46.2$ kV 时, 除杂率 $Y = 97.87\%$ 。进行试验验证, 试验结果为 97.2%。

由分级结果可知, III 级残地膜与其它两级残地膜的存在状态有很大不同, 与棉花接触状态也较为复杂, 质量与前两种相比明显较大, 因此此类残地膜为各级残地膜中最难去除一种。推测与前两级残地膜荷电吸附规律有很大不同, 在进行静电分离试验时, 因其重力较大, 由传送带进入高压极板做类平抛运动时只需要施加足够大电压即可使得残膜所受重力与静电力之和大于棉花对其的束缚力, 从而实现分离。通过拟合的回归方程以及 3 个因素的偏回归系数可以看出, 满足上述分析。

2.3 试验结果讨论

由上述回归方程以及试验结果可知, 3 个级别残地膜在除杂率最高时的各因素参数组合不同, 原因可能在于: 每一级别残地膜在机采棉中存在状态有平铺舒展的、扭曲成条状的、裹在棉絮当中的等, 在进行荷电极化时因极化程度不同而导致所带电荷不同, 故在高压电场中所受到的静电力不同。首先从力学角度来讲, 残地膜在高压静电场中所受力有静电力、重力、棉花对其束缚力、空气阻力等, 因为各级残地膜特性的不同, 所以分离所需要的外界影响因素不同。其次从运动学角度来讲, 机采棉与残地膜从传送带进入高压静电场时的运动情况可分为两个阶段: 第一个阶段为过渡阶段, 机采棉和残地膜的混合体从传送带飞入静电场做类平抛运动; 第二阶段为分离阶段, 因为 I 级残地膜质量较小, 在机采棉中以舒展状态存在, 机采棉对其束缚力较小, 最早被吸出, 水平方向运动距离相对较短。III 级残地膜与机采棉接触状态最为复杂, 所以机采棉对其束缚力相对较大, 又因质量较大, 为达到最大除杂率, 在通过静电场时, 水平方向运动距离则最长。

3 结论

(1) 在搭建的机采棉与残地膜静电分离装置平台上进行了以除杂率为判别指标的分离试验, 试验证明, 采用静电与风力结合的分级去除机采棉中残地膜的方法可行, 且效果较好。

(2) 通过单因素试验得出, 本静电分离装置平台对除杂率影响显著的因素由大到小为: 荷电时间、飞入速度、极板电压。

(3) 为达到较高除杂率, 对 3 个等级的残地膜分别进行了由单因素试验确定的荷电时间、飞入速度、极板电压的三因素三水平响应面试验, 并对结果进行了分析, 得知: 不同等级的残地膜在最佳分离效果时所对应的荷电时间、飞入速度、极板电压有很大区别。由残地膜面积等特征参数进行分级时, 3 个级别的残地膜除杂分离效果均较好。分级去除时残地膜的几何特征对除杂效果有较大影响, 除杂效果与残地膜的几何等级存在相关关系。

参 考 文 献

- [1] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5-10.
WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5-10. (in Chinese)
- [2] 李岩, 陈契, 马丽芸, 等. 新疆机采棉品质现状与分析[J]. 棉纺织技术, 2016, 44(2): 4-9.
LI Yan, CHEN Qi, MA Liyun, et al. Status and analysis of Xinjiang machine picked cotton quality[J]. Cotton Textile Technology, 2016, 44(2): 4-9. (in Chinese)
- [3] 宋敏, 王海标, 高文伟, 等. 新疆早熟植棉区机采棉和手摘棉纤维品质比较[J]. 中国棉花, 2015, 42(12): 4-6.

- SONG Min, WANG Haibiao, GAO Wenwei, et al. Fiber quality comparison between mechanical harvest cotton and manual harvest cotton in Xinjiang early-maturing cotton zone[J]. *China Cotton*, 2015, 42(12): 4-6. (in Chinese)
- [4] 孟俊婷, 魏守军, 唐淑荣, 等. 浅析残膜对棉田及棉花产品的危害与风险[J]. *棉花科学*, 2014, 36(4): 9-11.
MENG Juntao, WEI Shoujun, TANG Shurong, et al. Review of the hazard and risk on plastic film to cotton field and cotton products [J]. *Cotton Sciences*, 2014, 36(4): 9-11. (in Chinese)
- [5] 坎杂, 郭文松, 张若宇, 等. 网状滚筒式机采籽棉残膜分离机的设计[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 95-99.
KAN Za, GUO Wensong, ZHANG Ruoyu, et al. Design of mesh roller-type separator for machine-harvested seed cotton and film remnant[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 95-99. (in Chinese)
- [6] 黄铭森, 石磊, 张玉同, 等. 统收式采棉机载籽棉预处理装置的优化试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 21-29.
HUANG Mingsen, SHI Lei, ZHANG Yutong, et al. Optimization tests of machine-mounted seed cotton pre-treatment apparatus for cotton stripper harvester [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(21): 21-29. (in Chinese)
- [7] 董成全, 冯显英. 基于CFD离散相模型的气流式皮棉清理机参数优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 9-16.
DONG Quancheng, FENG Xianying. Parameters optimization of flow-through air lint cleaner based on CFD discrete phase model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(2): 9-16. (in Chinese)
- [8] 由佳翰, 张本华, 温浩军, 等. 铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 97-104.
YOU Jiahao, ZHANG Benhua, WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 97-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.012. (in Chinese)
- [9] 付伟, 于培亮. 机器视觉技术在棉花杂质在线检测上的应用[J]. *可编程控制器与工厂自动化*, 2011(12): 80-82.
FU Wei, YU Peiliang. Application of machine vision technology on the on-line inspection of cotton impurities [J]. *Programmable Controller & Factory Automation*, 2011(12): 80-82. (in Chinese)
- [10] 张成梁, 李蕾, 董成全, 等. 基于颜色和形状特征的机采棉杂质识别方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 28-34.
ZHANG Chengliang, LI Lei, DONG Quancheng, et al. Recognition method for machine-harvested cotton impurities based on color and shape features[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 28-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.005. (in Chinese)
- [11] 李碧丹, 丁天怀, 郝东耀. 皮棉异性纤维剔除系统设计[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(1): 107-110.
LI Bidan, DING Tianhui, JIA Dongyao. Design of a sophisticated foreign fiber separator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(1): 107-110. (in Chinese)
- [12] 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(Sup.2): 6-10. (in Chinese)
- [13] WEI J, REALFF M J. Design and optimization of free-fall electrostatic separators for plastics recycling[J]. *Aiche Journal*, 2010, 49(12): 3138-3149.
- [14] BOUKHOULDA M F, MILOUDI M, MEDLES K, et al. Testal modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(6): 2375-2381.
- [15] 温浩军, 陈学庚, 康建明. 梳齿式采棉机籽棉清理装置的研制[J]. *农机化研究*, 2010, 32(10): 59-62.
WEN Haojun, CHEN Xuegeng, KANG Jianming. The design of comb-type cotton picker cotton clear equipment [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(10): 59-62. (in Chinese)
- [16] 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/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 43-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170804&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.004. (in Chinese)
- [17] BUTUNOI T, BUDA G, DRAGOS C, et al. Wheat seeds separation in high-intensity electric field [J]. *International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, 2011, 5(1): 1-6.
- [18] GONTRAN R, ABDELHADY S, KARIM M, 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*, 2017, 88: 29-34.
- [19] 杨丹. MATLAB 图像处理实例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [20] 杜永忠, 平雪良, 何佳唯. 圣女果表面缺陷检测与分级系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 194-199.
DU Yongzhong, PING Xueliang, HE Jiawei. Surface defect detection and classification system for cherry tomatoes [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Sup.1): 194-199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s135&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.035. (in Chinese)
- [21] 曹乐平, 温芝元, 陈理渊. 基于分形维数的柑橘形状与光滑度的机器视觉分级[J]. *测试技术学报*, 2009, 23(5): 407-411.

- CAO Leping, WEN Zhiyuan, CHEN Liyuan. Citrus fruits grading by shape and smoothness based on machine vision and fractal dimension[J]. Journal of Test and Measurement Techol, 2009, 23(5):407-411. (in Chinese)
- [22] 李立. 基于分形理论的碳纳米管分散状态评价方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
- [23] 霍迎秋, 秦仁波, 邢彤燕, 等. 基于 CUDA 的并行 K-means 聚类图像分割算法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11):47-53.
HUO Yingqiu, QIN Renbo, XING Caiyan, et al. CUDA-based parallel K-means clustering algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):47-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.008. (in Chinese)
- [24] 柏宇轩. K-means 应用与特征选择[J]. 电子技术与软件工程, 2018(1):186-187.
- [25] 颜玉庆, 贾首星. 浅析机采棉残膜静电分离装置残膜吸附原理[J]. 机电信息, 2016(9):117-118.
- [26] EILMES A, MUNN R W, MAVRANTZASV G, et al. Microscopic calculation of the static electric susceptibility of polyethylene[J]. Journal of Chemical Physics, 2003, 119(21):11458-11466.
- [27] DHIMA P, VILA F. The influence of the corona discharge on electrostatic charge of polyethylene[C]//Aip Conference. AIP Publishing LLC, 2016:675-682.
- [28] 董怡为. 极化型静电分级机设计理论[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8):41-44.
DONG Yiwei. Study on design theory of polarization electrostatic grader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8):41-44. (in Chinese)
- [29] 唐燕妮. 超大规模集成电路多孔电介质介电常数与分形维数[J]. 电子测试, 2016(11):54-55.
TANG Yanni. Very large scale integrated circuit porous dielectric permittivity and fractal dimension[J]. Electronic Test, 2016(11):54-55. (in Chinese)
- [30] 徐龙君, 刘成伦, 鲜学福. 煤介电常数的分形特征[J]. 中国矿业, 2000, 9(2):69-71.
XU Longjun, LIU Chenglun, XIAN Xuefu. Fractal characteristic of dielectric constant of coal [J]. China Mining Magazine, 2000, 9(2):69-71. (in Chinese)
- [31] 吴明亮, 官春云, 汤楚宙, 等. 油菜茎秆切割力影响因素试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6):141-144.
WU Mingliang, GUAN Chunyun, TANG Chuzhou, et al. Tests on influencing factors of cutting force of rape stem [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6):141-144. (in Chinese)
- [32] 肖信. Origin 8.0 实用教程:科技作图与数据分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.
- [33] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式玉米膜上直插穴播机前进速度补偿机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8):87-94.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):87-94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.009. (in Chinese)
- [34] 林静, 官元娟, 李宝筏, 等. 食用菌培养料搅拌机的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4):62-65.
LIN Jing, GONG Yuanjuan, LI Baofa, et al. Design and testal study of a mixer for culture medium of edible fungus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4):62-65. (in Chinese)
- [35] 周显青, 张玉荣. 小麦胚微波稳定化工艺参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1):105-109.
ZHOU Xianqing, ZHANG Yurong. Optimization of technological parameters of microwave stabilization for wheat germ using response surface analysis method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):105-109. (in Chinese)