

打叶复烤二次静电除杂工艺参数仿真与验证

秦建¹, 张腾健², 彭小冬¹, 卢敏瑞², 潘峰², 秦华²

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建武夷烟叶有限公司, 福建 邵武 354000)

摘要: 建立了杂物在静电场中的运动轨迹模型, 运用多物理场耦合模型对静电辊表面的电场分布、杂物在电场中的运动轨迹进行仿真分析; 采用单因素实验法研究各种摩擦式静电除杂样机除杂率的影响。结果表明: 试验效果与仿真结果的趋势基本一致, 在环境湿度为 60% RH、静电辊转速为 25 r/min 时, 杂物的挑出率为 98.77%, 相较于最初的工艺参数平均挑出率提高了 20.51%。研究为提高摩擦式静电除杂机的除杂率提供参考。

关键词: 烟叶碎片除杂; 运动轨迹; 多物理场耦合; 电辊转速; 环境湿度

中图分类号: TS443

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)01-0014-06

Simulation and verification of process parameters for secondary impurity removal in tobacco leaf threshing and rebaking

QIN Jian¹, ZHANG Tengjian², PENG Xiaodong¹, LU Minrui², PAN Feng², QIN Hua²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Wuyi Leaf Tobacco Co., Ltd., Shaowu 354000, China)

Abstract: The trajectory model of impurities in electrostatic field was established, and the electric field distribution on the surface of electrostatic roller and the trajectory of impurities in the electric field were simulated and analyzed by means of multi-physical field coupling model. The single factor experiment was used to study the effect of various friction electrostatic impurity removal prototypes. Results show that the trend of test results is basically consistent with that of simulation results. When the ambient humidity is 60% RH and the speed of electrostatic roller is 25r/min, the pick-out rate of impurities is 98.77%, which is 20.51% higher than the average pick-out rate of initial process parameters. This study can provide reference for improving the impurity removal rate of friction electrostatic impurity remover.

Keywords: impurity removal of crumbled tobacco; trajectory; multi-physical field coupling; electric roller rotation speed; ambient humidity

打叶复烤生产线上配备的除杂设备主要为风选除杂机、金属探测仪、光电除杂机、除麻丝机以及人工挑杂等。由于杂物本身细小且颜色与烟叶碎片相近, 利用现有设备剔除机和人工挑拣相结合的方法除杂效果有限。

近年来, 关于静电分选除杂技术已有大量研究, 根据静电产生的不同, 可分为摩擦式和高压静

电式分选除杂。国外现有研究多为高压静电式分选^[1-2], 并且主要集中在颗粒物分选领域; 而国内主要以残膜为研究对象, 利用自制的高压静电式分离装置及计算机仿真软件研究残膜的最佳分离率^[3-6]。本文利用多物理场耦合仿真结合单因素实验法探究了不同因素对烟叶碎片除杂效果的影响, 并针对一次风选除杂后挑出的含杂碎片进行

收稿日期: 2022-12-12

第一作者简介: 秦建(1994—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向: 烟叶静电除杂。

通信作者: 潘峰(1968—), 男, 福建邵武人, 高级农艺师, 研究方向: 烟叶分级。

二次摩擦静电吸附除杂实验,以优化摩擦式静电除杂机的工艺参数。

1 杂物去除机理分析

应用静电除杂时,极板上的高压静电产生静电场,杂物在电场中会产生与极板电荷相反的感应电荷,如图 1 所示,此时电场作用力充当了吸住杂物的吸附力^[7]

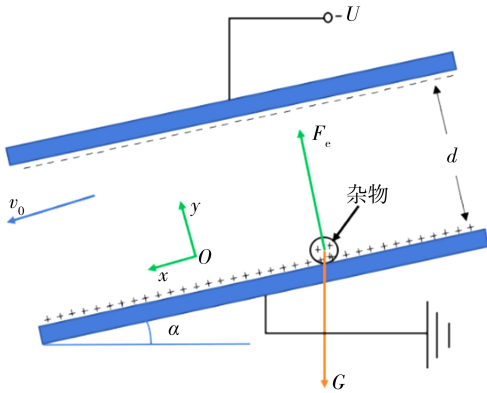


图 1 杂物在静电场中的受力分析

Fig.1 Force analysis of impurities in electrostatic field

$$F_e = \frac{U}{d}q \quad (1)$$

式中, U 为极板电压,V; d 为极板间距,mm; q 为杂物携带的电荷量,C。

通过式(1)得到以下结论:吸附电极与杂物表面间的距离不变,增加吸附电极上的电压可以提高电场力,但是极板上的电压增加到一定程度时会导致空气击穿产生电火花,影响设备及人员的安全;极板上的电压不变,杂物表面与吸附电极间的距离是提高吸附力的主要因素,减小距离可以提高吸附力。

杂物在电场中运动时不仅受到重力及电场力的影响,还会受到空气阻力的影响,因为杂物的迎风面积很小且实际生产中杂物相对于空气的速度极小,其受到的空气阻力对其运动产生的影响可以忽略,所以杂物在电场中 y 方向上运动的动力方程:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_e \cos \alpha - G \quad (2)$$

式中, m 为杂物质量,kg; y 为杂物运动的距离,m; t 为杂物运动的时间,s。

由于静电辊和振动输送台之间为非均匀电场,故电场力 F_e 与杂物在电场中的位置有关,即

F_e 与杂物在电场中运动的时间有关,此处假设电场力 F_e 仅仅是时间 t 的函数, S_y 表示位移,对式(2)二重积分:

$$S_y = \frac{1}{2} \left(\frac{U \cos \alpha}{md} q t^2 - g t^2 \right) \quad (3)$$

则杂物在 x 方向的运动位移 S_x :

$$S_x = v_0 t + \frac{G \sin \alpha}{2m} t^2 \quad (4)$$

式中, v_0 为杂物在 x 方向上的水平初速度,m/s。

即杂物在静电辊电场中的运动轨迹:

$$\begin{cases} S_y = \frac{1}{2} \left(\frac{U \cos \alpha}{md} q t^2 - g t^2 \right) \\ S_x = v_0 t + \frac{G \sin \alpha}{2m} t^2 \end{cases} \quad (5)$$

由于实际生产中烟叶碎片的质量较大,所以在 U 取合适的值时,可以保证烟叶碎片所受到的重力比它在静电场中受到的静电力大,即烟叶碎片在静电辊电场中 y 方向的运动远小于杂物在静电辊电场中的运动,因此可将烟叶碎片中的杂物通过静电辊与振动输送台之间的静电场吸附分离去除。

2 杂物与烟叶碎片静电吸附分离仿真与实验

2.1 杂物与烟叶碎片静电吸附分离仿真

2.1.1 仿真模型建立及仿真参数设置

运用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立简化的仿真模型,采用软件中的 AC/DC 模块与流体流动颗粒跟踪模块多物理场耦合进行粒子在静电场中运动的轨迹仿真。将模型简化为二维平面模型,如图 2 所示。其中橡胶静电辊简化为圆,其直径为 140 mm,与橡胶静电辊摩擦的羊毛毡并未给出,而是直接在仿真软件中给定静电辊电压参数;振动输送台充当接地电极;长方形表示仿真的边界,边长分别为 500、350 mm;质点表示简化后的塑料丝、塑料片,根据实验所用的设备物料入口到静电辊的距离测量得知:质点与静电辊圆心的水平距离为 130 mm。利用仿真软件对摩擦式静电除杂结构的电场分布及杂物在电场中的粒子轨迹进行仿真模拟。仿真默认烟叶碎片的质量都比杂物的质量大;一次只考虑一种烟叶碎片中的杂物,并且杂物都分布在烟叶碎片的表面;不考虑杂物的形状对静电吸附去除效果的影响,杂物在电场

中只考虑重力与电场力。

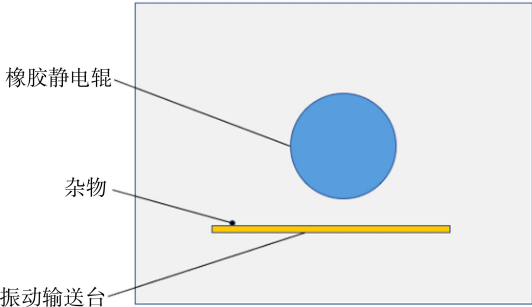


图 2 简化后仿真模型

Fig.2 Simplified simulation model

应用静电模块,在静电辊表面施加大小一定的电势,并且将振动输送台以及空气域的边界接地;在流体流动颗粒跟踪模块中的粒子属性界面设

置粒子携带的电荷数;烟叶碎片中塑料丝与塑料片的材质都是聚丙烯,通过查阅文献^[8]可知,聚丙烯粒子在电场中的饱和荷电电荷数为 1.0×10^8 ,对静电吸附除杂结构的电场分布和杂物在电场中的运动轨迹进行仿真。

2.1.2 仿真结果与分析

由图 3 可知,在静电辊与振动输送台距离不变时,随着静电辊表面电压的增加,静电场的分布情况基本一样,但是从图 3 中表示电场的箭头可以看出,静电场的场强随着静电电压的增大而增大,并且随着静电辊表面电压的增加,静电场中出现电场强度较大的区域也在增加,当静电辊表面电压为 12 kV 时,电场强度最大,电场强度较大的区域面积也最大。图 4 和图 5 为仿真结果。

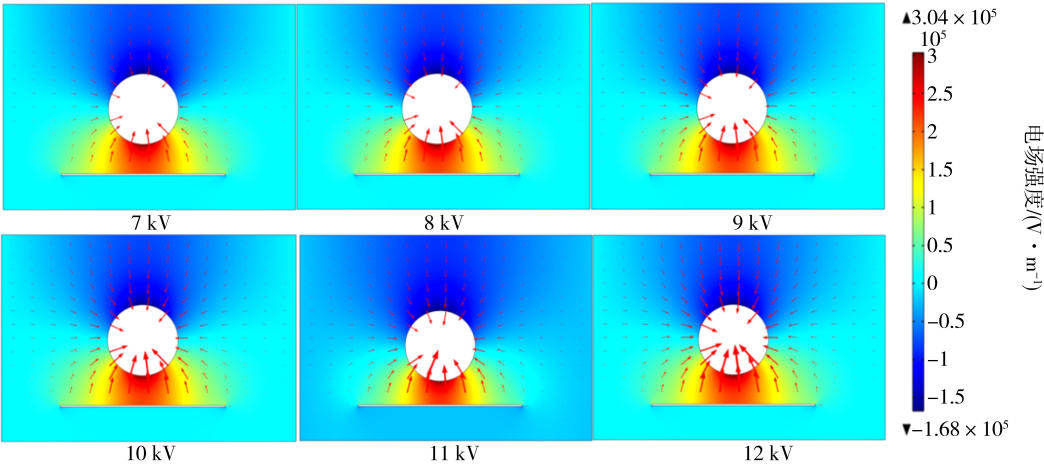


图 3 静电辊在不同电压时的静电场

Fig.3 Electrostatic field of the electrostatic roller under different voltages

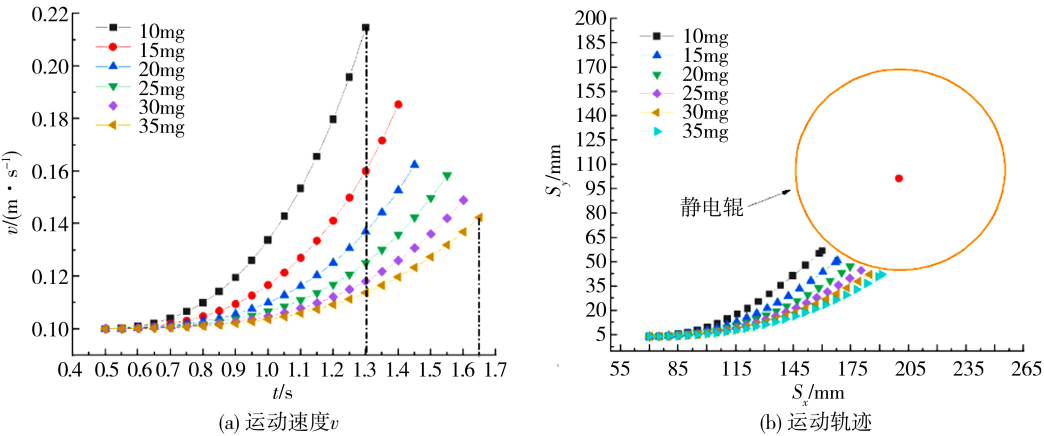


图 4 不同质量杂物的仿真结果

Fig.4 Simulation results of impurities of different masses

通过图 4 和图 5 仿真的结果可以得出:

(1)图 4 中仿真参数静电辊与振动输送台的

距离 5 cm,静电辊表面的电压 11 kV。随着杂物质量的增加,杂物在静电场中运动速度骤降为零

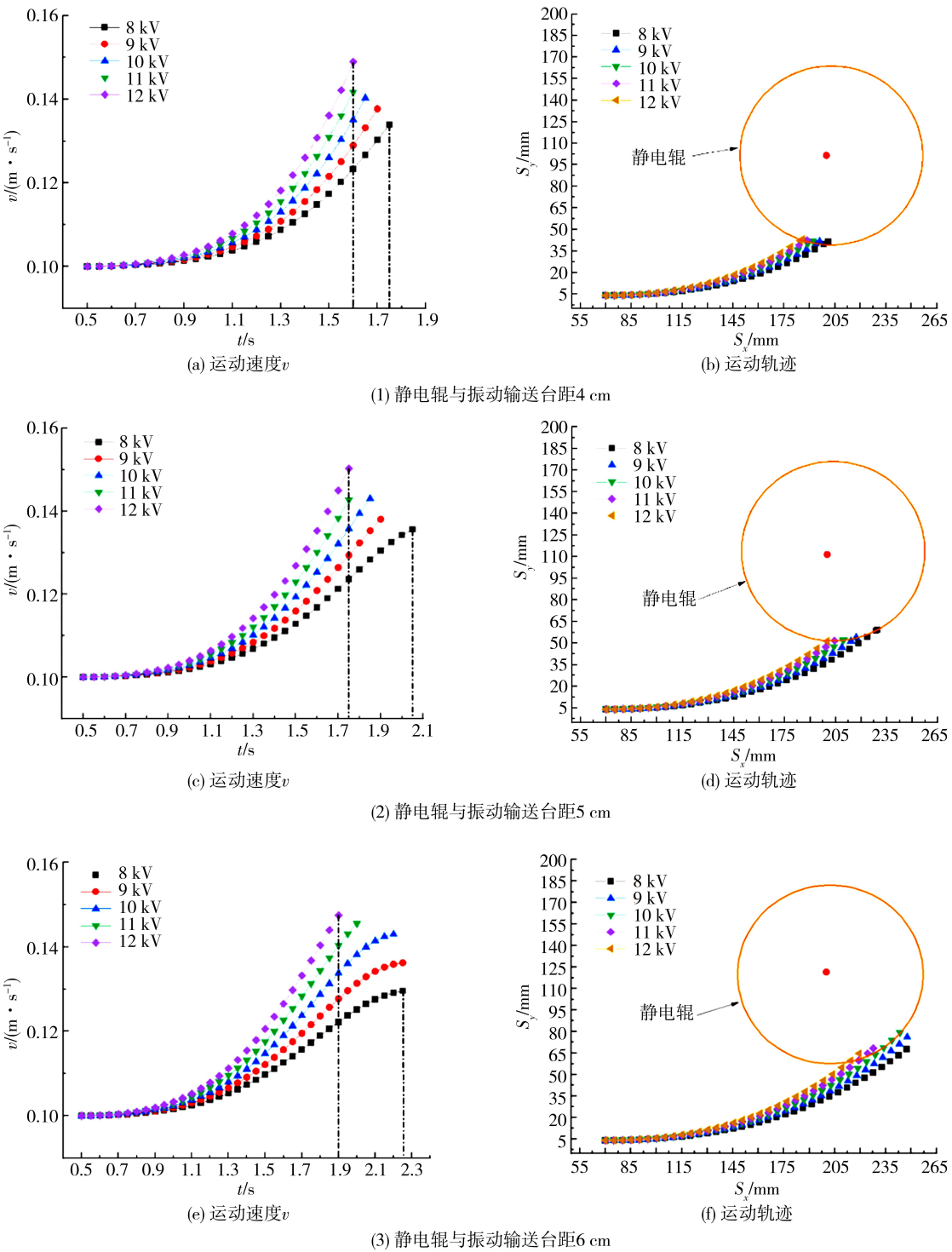


图 5 不同静电电压的仿真结果

Fig.5 Simulation results of different static voltages

所需的时间会逐渐增加,但最终都被静电辊吸附:其中 10 mg 的杂物从释放到被吸附所需时间为 1.3 s,而 30 mg 的杂物从释放到被吸附所需的时间为 1.65 s。

(2)随着静电辊与振动输送台距离增加,静

电辊对杂物的吸附效果变得越来越差,杂物运动速度最终降为零时所需要的静电辊表面电压越来越高;当静电辊与振动输送台的距离为 6 cm 时,静电辊表面的电压只有达到 11 kV 时,杂物才有可能被静电辊吸附去除。

(3)随着静电辊表面电压的增加,杂物在静电场中的运动速度逐渐增加直至被静电辊吸附即杂物运动速度骤降至零,并且在杂物质量一定时,电压越高,杂物被吸附所需的时间越短,在静电辊到振动输送台的距离为 4 cm,静电辊表面电压为 12 kV 时,杂物在释放后 1.6 s 时速度降为零,即被静电辊吸附。

2.2 摩擦式静电除杂实验

2.2.1 实验装置和方法

摩擦式静电除杂样机,如图 6 所示。FMX-003 型静电场测试仪(感量 0.01 kV);TH101B 型温湿度计;CPA223S 型电子天平(感量 0.001 g);FLUKE-931 接触式数字转速计。烟叶样品为浙江中烟 HN2119BCF 批次中风力除杂设备风选后的烟叶碎片和杂物。

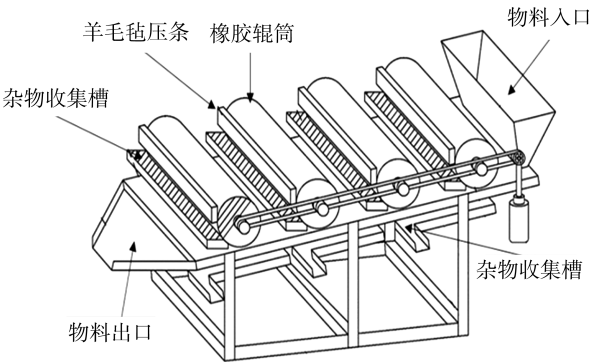


图 6 静电除杂样机结构简图

Fig.6 Structure sketch of electrostatic impurity removal prototype

将静电辊转速设定为 20 r/min,利用静电场测试仪测试摩擦式静电除杂机在不同环境湿度时,静电辊表面摩擦产生的静电电压的大小;在不同湿度环境下,调节静电辊的转速为 8、12、20、25、31 r/min,分析湿度与静电辊转速对静电辊表面静电电压产生的影响;分别取 7 个不同质量的塑料片及塑料丝,测试各个杂物被摩擦式静电除杂机吸附去除时的静电辊表面的静电电压值;根据上述的实验结果,将摩擦式静电除杂机置于自然环境湿度下,静电辊的转速调节至合适的大小,将烟叶碎片与杂物混合后放在摩擦式静电除杂样机上进行杂物去除实验,测试摩擦式静电除杂机的除杂效果;将静电辊至振动输送台的距离调节为 5 cm,静电辊转速调节为 25 r/min,在不同湿度下进行实验。

杂物剔出率的计算方法:

$$n = \frac{N_1}{N} \times 100\%$$

式中: n 为杂物剔出率; N_1 为杂物剔出个数,个; N 为杂物总个数,个。

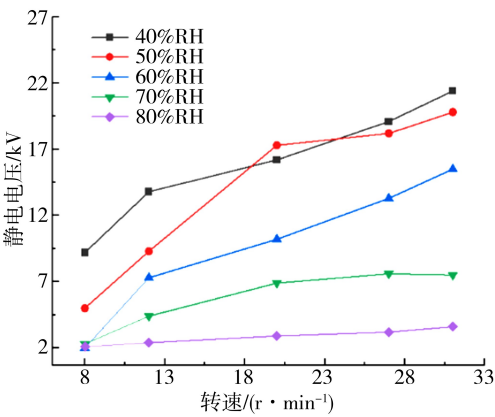


图 7 不同湿度及静电辊速度时的静电电压

Fig.7 Electrostatic voltage at different levels of humidity and electrostatic roller speed

2.2.2 实验结果与分析

从图 7 中看出:处较低环境湿度(40%~60% RH)下,静电辊摩擦产生的静电电压总体偏大,静电辊表面的电压值同静电辊转速成一定的正相关,即随着静电辊转速的增大,静电辊表面的静电电压随之增高,当转速为 25 r/min,静电电压达到 19.4 kV,继续加大转速,静电电压的波动变化不大;在不同湿度环境下时,同一静电辊转速下的静电辊表面的静电电压值有比较明显的区别:随着湿度的增加,静电辊表面的静电电压随之降低,因为空气中的水气为导体,湿度增加则橡胶静电辊的表面电导率增加,使物体积蓄的静电荷可以更快地泄漏。

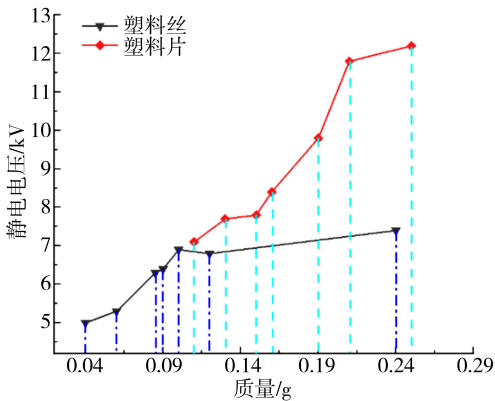


图 8 不同质量的杂物被吸附时的静电电压

Fig.8 Electrostatic voltage when different masses of impurities are adsorbed

从图 8 中可以看出:

(1)随着塑料丝与塑料片的质量增加,被吸附起时的静电电压也随之增大,并且随着质量的增加,塑料丝、塑料片被吸附起时的静电电压增加的趋势相似。

(2)在塑料丝与塑料片质量相差不大的情况下,塑料丝被吸附起时的静电电压要比塑料片的小,可能的原因是:塑料片的形状不利于电子在其一端聚集,导致塑料片所需的静电电压比电子更易聚集的塑料丝高。

通过表 1 中的数据可以看出,通过羊毛毡与橡胶辊筒相互摩擦产生静电以吸附去除烟叶碎片中的杂物是可行的,并且在环境湿度为 76% RH (自然环境)、静电辊转速 20 r/min 时,杂物的平均挑出率为 78.26%;在不同湿度下的实验结果如表 2 所示,在湿度为 60%RH 时,摩擦式静电除杂样机的挑出率为 98.77%。

表 1 摩擦式静电除杂机测试

Tab.1 Frictional electrostatic impurity removal machine testing

碎片质量/g	杂物质量/g	除杂机在线剔出杂物	
		质量/g	剔出率/%
2 504.2	2.4	1.8	75.00
2 433.6	2.7	2.0	74.07
2 435.0	2.8	2.4	85.71

表 2 不同湿度环境下静电除杂实验对比

Tab.2 Comparison of electrostatic impurity removal experiments in different humidity environments

温度/℃	湿度/%	碎片质量/g	杂物质量/g	杂物剔出率/%
19	50	1 068.2	0.57	94.74
19	60	917.9	0.81	98.77
19	70	960.9	0.63	60.32

3 结论

1)静电辊表面电压、静电辊与振动输送台的距离以及杂物本身的质量都对摩擦式静电除杂机二次除杂的挑出率有较大影响;杂物的质量一定时、静电辊表面的电压为 12 kV、静电辊与振动输送台的距离为 4 cm 时,杂物被吸附去除的时间最短。

2)静电辊的转速与环境湿度对羊毛毡与静电辊表面摩擦产生的静电场电压有显著影响,并且杂物在被吸附时所需的静电电压随着杂物重量的增加而逐渐增加,并且在环境湿度为 60%RH、静电辊转速为 25 r/min 时,杂物的挑出率为 98.77%,相较于最初工艺参数的平均挑出率提高了 20.51%。

参考文献:

[1] 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,2017,88:29-34.

[2] RODRIGUES B M,SARON C. Electrostatic separation of polymer waste by tribocharging system based on friction with PVC [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2022,19(3):1293-1300.

[3] 徐爱英,马少辉,胡芸莎,等. 含水率与电压对静电分离装置效率的影响[J]. 农机化研究,2018,40(1):155-159.

[4] 祁禹衡,杨永发,王园园. 残膜静电回收装置吸附试验研究[J]. 农机化研究,2021,43(9):164-168.

[5] 李轩甫. 高压静电吸附作用下膜-荏分离装置设计与试验[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2022.

[6] 李阳阳. 针辊式籽棉残膜静电分离装置的仿真分析及试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2021.

[7] 王黎明,胡青春. 应用于爬壁机器人的静电吸附原理建模及关键因素分析[J]. 电工电能新技术,2012,31(1):64-68.

[8] 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.

(责任编辑:陈雯)