

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.013

基于 Comsol 的退役乘用车塑料高压静电分离

许胜麒, 张洪申

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650000)

摘要: 以退役乘用车塑料为研究对象, 通过实验和 Comsol 模拟相结合的方式, 开展乘用车塑料粒子荷电及其高压静电分离研究。首先探索了聚丙烯 (PP)/ 聚氨酯 (PUR)/ 聚氯乙烯 (PVC), PP/ 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS)/ PVC 和 PP/ 聚酰胺 (PA) 6/ ABS 三组典型乘用车塑料粒子在聚甲基丙烯酸甲酯摩擦桶中的荷电量, 得到了三组粒子的摩擦荷电量。进而基于 Comsol 对粒子在两级高压静电场分布特性、粒子在电场中的运动特性进行了仿真分析, 发现粒子荷电量越大, 受电场力影响越大, 轨迹偏移越明显。此外, 通过模拟得出三组混合粒子最优分选参数, 可为下一步开展粒子分选实验及开发车用聚合物粒子摩擦荷电分离设备提供参考。

关键词: 车用塑料; 静电分选; 电场模拟; 粒子轨迹

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0072-06

High Voltage Electrostatic Separation of Retired Passenger Vehicle Plastics Based on Comsol

Xu Shengqi, Zhang Hongshen

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Abstract : With the retired passenger car plastics as the research object, through the combination of experiment and Comsol simulation, the passenger car plastic particles charged and high voltage electrostatic separation were carried out. Firstly, the charge quantity of three groups of plastics particles in PP/PUR/PVC, PP/ABS/PVC and PP/PA6/ABS in PMMA friction bucket was explored, and the friction charge quantity of three groups of plastics particles was obtained. Furthermore, based on Comsol, the distribution characteristics of particles in the two-stage high-voltage electrostatic field and the movement characteristics of particles in the electric field were simulated and analyzed. It is found that the larger the particle charge is, the more affected by the electric field force is, and the more obvious the trajectory deviation is. In addition, the optimal separation parameters of three groups of mixed particles are obtained through simulation, which can provide reference for the particle separation experiment and the development of friction charged separation equipment for vehicle polymer particles.

Keywords : automotive plastics ; electrostatic separation ; electric field simulation ; particle trajectories

据公安部交通管理局统计,截至2021年3月,全国机动车保有量达3.78亿辆,其中乘用车保有量超过2.8亿辆^[1]。巨大的汽车保有量,意味着汽车在制造和消费过程中不仅需消费大量的材料和能源,同时也会产生大量的报废汽车。

塑料具有质量轻、减震良好和耐化学腐蚀的特点,符合当前汽车轻量化技术、安全吸能设计要求,在汽车尤其是乘用车上广泛应用。乘用车上的

塑料零部件,已经从普通装饰件发展到结构件和功能件等^[2]。目前,乘用车上的塑料零部件主要有保险杠、散热格栅、照明灯、仪表板(含副仪表板)、座椅、车门内板、顶棚、杂物箱、燃油箱等^[3]。塑料成分包括聚丙烯(PP)、聚氨酯(PUR)、聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、聚碳酸酯(PC)、聚酰胺(PA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚苯醚(PPO)、聚对苯二甲酸丁二酯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52065034)

通信作者: 张洪申,副教授,博士,主要研究方向为绿色设计与制造

收稿日期: 2021-09-06

引用格式: 许胜麒,张洪申. 基于 Comsol 的退役乘用车塑料高压静电分离[J]. 工程塑料应用,2021,49(11): 72-77.

Xu Shengqi, Zhang Hongshen. High voltage electrostatic separation of retired passenger vehicle plastics based on Comsol[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 72-77.

(PBT) 以及聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 等。塑料材料在乘用车整车质量中占比为 8%~15%。部分常用塑料在乘用车部件中的应用见表 1^[2]。

表 1 部分常用塑料在乘用车部件中的应用

部件名称	主要成分
仪表板 (含副仪表板)	PUR, PP, ABS, PVC
座椅	PUR, PVC
车门内板	PP, ABS
顶棚 (含后窗内饰板)	PUR, PP, ABS, PVC
后备箱 (含后备箱垫及地垫)	PP, 软质 PVC

退役乘用车塑料等零部件回收利用技术的发展,不仅可促进汽车再制造业的发展,同时也符合国家循环经济的发展要求^[4-5]。前期研究发现回收塑料的力学性能和化学性能并无太大改变,加以回收再利用,可实现可持续发展,节约自然资源^[6]。将混合的塑料废料分离成单一成分可以极大地提高它们的再利用价值,降低环境风险^[7],同时创造巨大的经济效益。如何将各种不同的塑料进行高效分离成为乘用车塑料回收亟待解决的难题之一。目前我国常用的塑料回收分选技术主要有手工分选法、密度分选法、光谱分选法、静电分选法、组合分选法^[8]。相较其它分选方法,高压静电分选技术具有设备简单、容易操作、能耗低、分选效果较好等优点,是一种绿色分离技术,得到了广泛关注。

笔者以高压静电分选技术为基础,以乘用车塑料为研究对象,开展其高压静电分离中静电腔电极结构及其电场分布研究,并基于 Comsol 仿真软件探索粒子在两级高压静电场的动力学特性,为多种车用塑料粒子的高压静电分选提供参考。

1 塑料高压静电分选

静电分选法具有高效、清洁、设备简单、不会造成二次污染和塑料粒子无需进行脱水处理等优点,在塑料回收领域受到越来越多的关注^[9-10]。分离过程中,粒子首先摩擦带电,然后被送入高压电场。根据极性和电荷量的不同,粒子轨迹在电场中发生偏转^[11-14]。

Silveira 等^[15]利用摩擦高压静电分离方法成功回收了不同废弃塑料组合的混合物,他们将废弃物清洗、干燥、粉碎后摩擦充电,再用辊式电极进行分选,实验表明摩擦高压静电分离塑料的分选效果较好,回收率和纯度均在 90.2% 以上。Nouredine 等^[16]通过采用高压旋转圆盘摩擦静电分离器,成功分离微细塑料颗粒,回收率和纯度均较高。分析发现,施加在电极两端的高压电平的大小将会影响塑料

粒子的分选率。Labair 等^[17]建立了自由落体带电粒子在高压电场中的运动轨迹模型,通过计算机模拟高度为 1.5 m 的高压电极,可以分离平均粒径为 4 mm 的 PVC/ABS 颗粒。发现增加高压静电场强度或电极的高度都可以改善弱带电塑料粒子的偏离轨迹。李佳^[18]通过自主研发破碎机与高压静电分选机,最终实现可工业应用的处理废电路板的成套生产线,为推动高压静电分选技术走向工业应用奠定了基础。

张洪申等^[5]以研究再生乘用车保险杠塑料为例,验证了再生乘用车塑料实现再上车同等性能再利用的可行性,为实现其它再生乘用车塑料同等性能等高附加值再利用提供了有益参考。黎土煜^[8]通过对车用塑料摩擦高压静电分选荷电机理及运动特性研究,基于高压静电分选技术,对 PP, PVC, PA, ABS, PUR 以及 PE 开展摩擦高压静电分选,通过对分选结果进行二次分选,从而确定不同混合塑料二次静电分选实验参数,为车用塑料的高压静电分选提供理论和技术支撑。

笔者以乘用车塑料粒子为研究对象,探索其在摩擦桶式荷电装置中的荷电量,进而基于 Comsol 仿真软件开展其在两级高压静电分离中电极布置、电场分布及其运动特性等研究,为开发车用塑料粒子高压静电分离设备提供参考。

2 乘用车塑料粒子摩擦荷电实验

粒子荷电量是影响其高压静电分离的关键因素。研究中采用摩擦荷电方式使粒子荷电,所采用的装置为滚筒型荷电装置,其原理如图 1 所示。退役乘用车塑料经过清洗破碎后,由斗式上料机构送入摩擦荷电滚筒,由电机带动摩擦荷电滚筒运行,实现粒子摩擦荷电。为了使塑料粒子充分摩擦,滚筒内部安装有翅片。荷电完成的混合粒子经过下料口

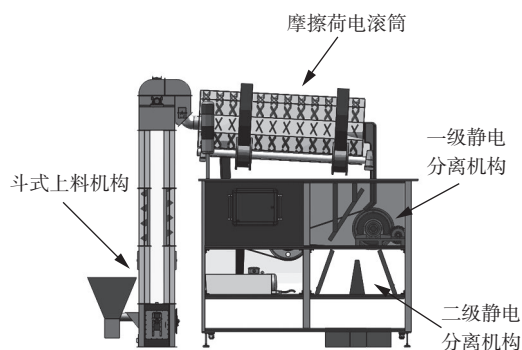


图 1 乘用车塑料摩擦分离设备原理

进入一级静电分离腔进行静电分离,接着进入二级静电分离腔进行静电分离。不同塑料粒子荷电序列不同,导致摩擦后带电量与电性不同。实验选用乘用车上几种常用塑料进行组合,一共分为三个实验组,各实验组塑料粒子如下:

(1) 第一组为 PP/PUR/PVC 混合物, PP, PUR, PVC 三种塑料粒子各 50 g;

(2) 第二组为 PP/ABS/PVC 混合物, PP, ABS, PVC 三种塑料粒子各 50 g;

(3) 第三组为 PP/PA6/ABS 混合物, PP, PA6, ABS 三种塑料粒子各 50 g。

将以上三组粒子分别放入图 2 的 PMMA 材质摩擦荷电滚筒中进行摩擦荷电,充分荷电完成后用法拉第桶测量粒子平均电荷量,结果见表 2。实验时环境温度 21℃,相对湿度 46%。实验结果将作为高压静电模拟的原始数据,实验过程发现,由于粒子荷电序列不同,同一塑料粒子和不同塑料粒子组合摩擦后,粒子电荷极性亦不相同。

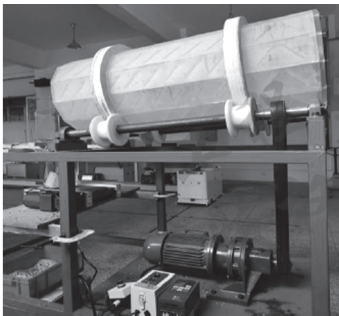


图2 摩擦荷电滚筒

表2 塑料电荷量

混合塑料类型	粒子	电荷极性	电荷量/C
第一组 PP/PUR/PVC	PP	正电荷	1.8×10^{-11}
	PUR	负电荷	5×10^{-12}
	PVC	正电荷	1.16×10^{-10}
第二组 PP/ABS/PVC	PP	负电荷	1.7×10^{-11}
	ABS	正电荷	5.6×10^{-11}
	PVC	正电荷	3×10^{-12}
第三组 PP/PA6/ABS	PP	负电荷	4.5×10^{-11}
	PA 6	正电荷	3×10^{-12}
	ABS	正电荷	1.25×10^{-10}

3 高压静电分选腔模拟

根据课题组前期研究,高压静电分选腔分为两级,一级静电分离腔采用方电极和辊式圆电极,二级静电分离腔采用方电极。塑料粒子经过摩擦荷电滚筒荷电之后,不同塑料粒子带电量不同,带电塑料粒子首先经过第一级静电分离腔初步分离,之后进入第二级静电分离腔进行进一步分离。塑料粒子分选

率主要取决于电极之间的电场分布,而电场分布则取决于电极间距和电压大小。实验采用二维平面简化模型进行模拟仿真,静电分离腔方电极和圆电极布置如图 3 所示。

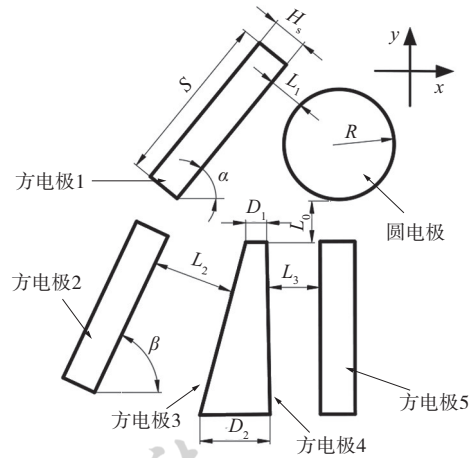


图3 电极布置图

图中圆电极半径 $R=150$ mm,方电极截面的高度 $H_s=50$ mm,方电极截面的长度 $S=400$ mm,方电极的摆角 $\alpha=45^\circ$,其中方电极 2 平行于方电极 3,方电极 4 平行于方电极 5,且方电极 5 竖直放置。由于乘用车塑料种类较多,不同塑料粒子组合摩擦荷电后所带电荷量相差较大,且实验所用电压高达几万伏,有一定危险系数,因此基于 Comsol 软件模拟影响粒子分离的各参数值(见表 3)。基于仿真结果,得到电极布置的各个参数值,为后续开发乘用车塑料摩擦荷电分离设备提供参考。

表3 影响粒子分离的各参数

符号	意义	单位
U_0	圆电极的电压	V
$U_1 \sim U_5$	方电极 1~5 的电压	V
L_0	一级静电分离腔与二级静电分离腔之间的距离	mm
L_1	方电极和圆电极间距	mm
L_2	方电极 2 和方电极 3 间距	mm
L_3	方电极 3 和方电极 4 间距	mm
β	方电极 2 的倾角	°
D_1	方电极 3 和方电极 4 上部距离	mm
D_2	方电极 3 和方电极 4 下部距离	mm

利用 Comsol 仿真软件对分选过程中的塑料粒子运动轨迹进行仿真模拟。PP, PUR, PA6, ABS 和 PVC 的密度分别为 0.92,1.1,1.15,1.05,1.38 g/cm³。粒子类型均设置为固体粒子。分选的效果取决于粒子带的电荷量和电极电压大小,软件默认的输入电荷数,需要将电荷量转化为电荷数 Q 。根据表 2 中测得的粒子带电荷量,由式 (1) 可计算塑料

粒子携带的电荷数。

$$Q = q/e \quad (1)$$

式中: q ——粒子所带电荷量, C;

e ——元电荷, 取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

塑料粒子携带的电荷数见表 4。塑料粒子从下料口出来具有一定的初速度, 实验测量所得塑料的初速度, 数据如下: x 轴向的分速度 -0.1 m/s , y 轴向的分速度为 -0.2 m/s 。粒子的释放通过时间控制, 设置粒子的释放时间为 0 s , 每隔 0.01 s 释放一次粒子, 持续 1 s 。模拟中更改电极电压及电极间距等参数后, 三组塑料粒子均能明显分离开来。

表 4 塑料电荷数

混合塑料类型	粒子	电荷极性	电荷数
PP/PUR/PVC	PP	正电荷	1.125×10^8
	PUR	负电荷	3.125×10^7
	PVC	正电荷	7.25×10^8
PP/ABS/PVC	PP	负电荷	1.0625×10^8
	ABS	正电荷	3.5×10^8
	PVC	正电荷	1.875×10^7
PP/PA6/ABS	PP	负电荷	2.8125×10^8
	PA6	正电荷	1.875×10^7
	ABS	正电荷	7.813×10^8

4 仿真结果分析

使用 Comsol 仿真软件对高压电场进行模拟仿真, 可以有效减少实验次数, 降低风险, 为分离装置的研究及实际分选提供参考。

(1) PP/PUR/PVC 混合塑料粒子分选。

模拟中, 高压静电分离腔电场分布如图 4 所示, 箭头方向表示电场线方向。通过数值模拟得出, 当静电场分离参数为 $U_0=10\,000 \text{ V}$, $U_1=-30\,000 \text{ V}$, $U_2=-30\,000 \text{ V}$, $U_3=0 \text{ V}$, $U_4=-10\,000 \text{ V}$,

$U_5=30\,000 \text{ V}$, $L_0=80 \text{ mm}$, $L_1=60 \text{ mm}$, $L_2=60 \text{ mm}$, $L_3=60 \text{ mm}$, $D_1=20 \text{ mm}$, $D_2=127 \text{ mm}$, $\beta=75^\circ$ 时, 能成功分离 PP, PUR 和 PVC 三种塑料粒子, 分离轨迹如图 5 所示。从图中可以看出, 三种混合粒子在第一级高压静电分离腔中 PVC 首先分离出去, PP 和 PVC 塑料粒子到达第二级高压静电分离腔时运动轨迹明显分离, 这种电极布置方式可以有效分离 PP/PUR/PVC 三种混合塑料粒子。

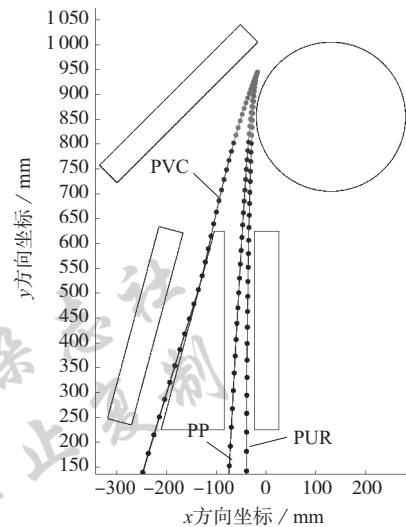


图 5 PP/PUR/PVC 分离运动轨迹

(2) PP/ABS/PVC 混合塑料粒子分选。

模拟中, 高压静电分离腔电场分布如图 6 所示。通过数值模拟得出, 当分离参数为 $U_0=20\,000 \text{ V}$, $U_1=-20\,000 \text{ V}$, $U_2=-2\,000 \text{ V}$, $U_3=10\,000 \text{ V}$, $U_4=-10\,000 \text{ V}$, $U_5=30\,000 \text{ V}$, $L_0=100 \text{ mm}$, $L_1=50 \text{ mm}$, $L_2=60 \text{ mm}$, $L_3=60 \text{ mm}$, $D_1=13 \text{ mm}$, $D_2=120 \text{ mm}$,

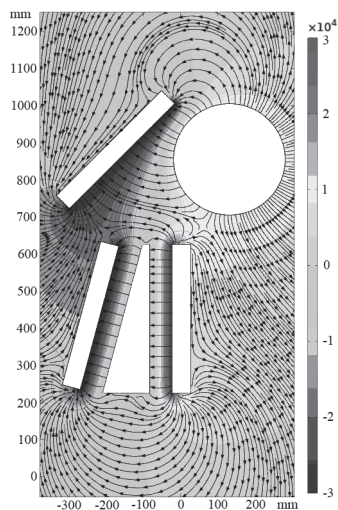


图 4 PP/PUR/PVC 分离电场分布图

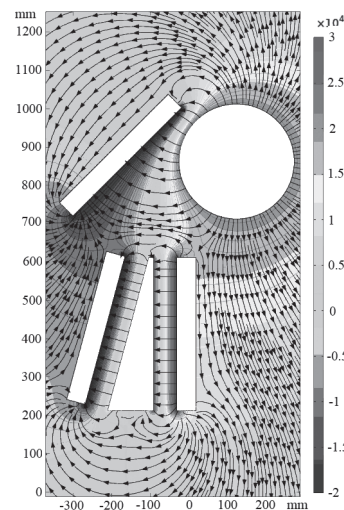


图 6 PP/ABS/PVC 分离电场分布图

$\beta=75^\circ$ 时,能成功分离 PP, ABS 和 PVC 三种塑料粒子,分离轨迹如图 7 所示。

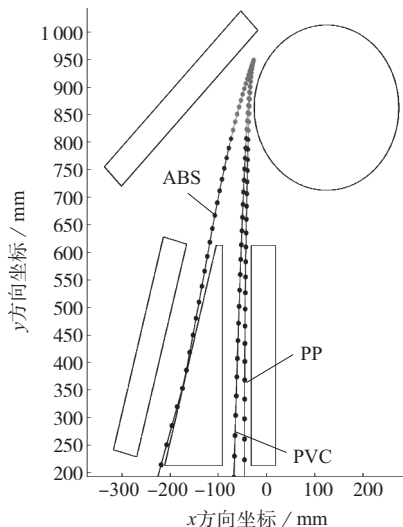


图 7 PP/ABS/PVC 分离运动轨迹

(3) PP/PA6/ABS 混合塑料粒子分选。

模拟中,高压静电分离腔电场分布如图 8 所示。通过模拟得出:当分离参数为 $U_0=20000\text{ V}$, $U_1=-20000\text{ V}$, $U_2=0\text{ V}$, $U_3=0\text{ V}$, $U_4=-20000\text{ V}$, $U_5=20000\text{ V}$, $L_0=100\text{ mm}$, $L_1=60\text{ mm}$, $L_2=80\text{ mm}$, $L_3=80\text{ mm}$, $D_1=33\text{ mm}$, $D_2=140\text{ mm}$, $\beta=75^\circ$ 时,能成功将 PP, PA6 和 ABS 三种塑料粒子分离,分离轨迹如图 9 所示。

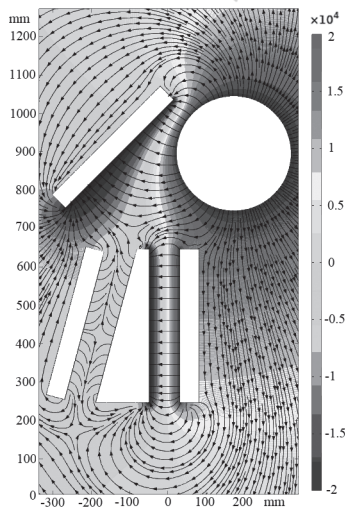


图 8 PP/PA6/ABS 分离电场分布图

通过 Comsol 数值模拟,得出了 PP/PUR/PVC, PP/ABS/PVC 及 PP/PA6/ABS 三组混合塑料粒子静电场分选参数的变化范围,分别为:电压 U 为 $-20\sim 30\text{ kV}$, L_0 为 $80\sim 100\text{ mm}$, L_1 为 50

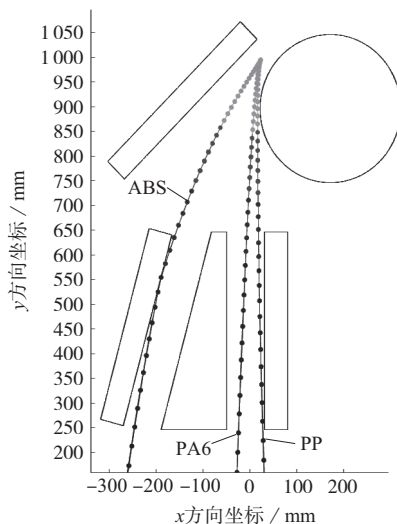


图 9 PP/PA6/ABS 分离运动轨迹

$\sim 80\text{ mm}$, L_2 为 $60\sim 80\text{ mm}$, L_3 为 $60\sim 80\text{ mm}$, D_1 为 $13\sim 33\text{ mm}$, D_2 为 $120\sim 140\text{ mm}$, β 为 75° 。可以看出,各电极电压变化范围较大,主要原因在于三组粒子摩擦荷电的荷电量差异较大,如 PP/PUR/PVC 摩擦荷电后, PUR 的正电荷数量仅为 3.1255×10^7 ,而 PP, PVC 均达到了 10^8 个,在静电场分选中 PUR 则需要负电极具有更高的电压提供更大的电场力,将其吸引至电极侧实现分离。此外,各电极间距参数也直接影响电场强度和粒子的运动轨迹,必须在一定合理区间。同时,研究发现方电极 2 的倾角 β 变化对第二级电场中粒子的运动轨迹影响较大。倾角过小,粒子难以进入二级电场,进而影响分离效果;倾角过大,分离后的粒子易出现二次混合,影响分离效率。当 β 为 75° 时,三组粒子的分选效果较好。

5 结论

不同乘用车塑料粒子高效清洁分离是其高附加值再利用的先决条件。针对退役乘用车塑料粒子摩擦荷电及高压静电分选展开研究,进行了三种混合塑料粒子摩擦荷电实验,并对两级高压电场分布及粒子在分选腔的运动轨迹进行了仿真分析,结论如下:

(1) 通过实验得出,由于粒子摩擦后得失电子能力差异,不同塑料粒子摩擦后,带电极性和带电量均不相同。

(2) 通过模拟分析得出,静电分选腔场强的大小取决于电极间距、电压大小;场强随着电极间距的减小而增大,随着电压的增大而增大。

(3) 塑料粒子分离运动轨迹模拟显示,粒子荷电量越大,受电场力影响越大,轨迹偏移越明显。此外,通过模拟得出 PP/PUR/PVC, PP/ABS/PVC, PP/PA6/ABS 三组混合粒子最优分选参数,为下一步开展粒子分选实验及开发车用聚合物粒子摩擦荷电分离设备提供了参考。

参考文献

- [1] 交通管理局. 2021 年一季度新注册登记机动车 966 万辆. 公安部. (2021-04-06)[2021-7-30].<https://www.mps.gov.cn/n7944517/n7944597/n7945888/c7829360/content.html>.
Transportation Administration Bureau. In the first quarter of 2021, 9.66 million new motor vehicles were registered. The Ministry of Public Security. (2021-04-06)[2021-7-30].<https://www.mps.gov.cn/n7944517/n7944597/n7945888/c7829360/content.html>.
- [2] 张洪申, 赵清华, 陈铭. 报废汽车典型塑料零部件回收利用技术现状 [J]. 汽车与配件, 2011(2):13-15.
Zhang Hongshen, Zhao Qinghua, Chen Ming. Status quo of recycling technology for typical plastic parts of scrapped vehicles[J]. Automobile & Accessories, 2011(2):13-15.
- [3] Zhang H S, Chen M. Triboelectrostatic separation for PP and ABS plastics in end of life passenger vehicles[J]. Journal of Material Cycles & Waste Management, 2017, 19(2):884-897.
- [4] 张洪申, 陈铭. 退役汽车塑料材料 NIRS 识别技术及设备研究 [J]. 工程塑料应用, 2013(6):69-75.
Zhang Hongshen, Chen Ming. Research on NIRS identification technology and equipment of retired automobile plastic materials[J]. Engineering Plastics Application, 2013(6):69-75.
- [5] 张洪申, 黎土煜, 陈铭. 退役乘用车保险杠塑料同等性能再利用探索 [J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(8):182-190.
Zhang Hongshen, Li Tuyu, Chen Ming. Exploration on reuse of retired passenger car bumper plastics with same properties[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(8):182-190.
- [6] 张洪申. 退役乘用车塑料同等性能再利用关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Zhang Hongshen. Research on key technologies of reuse of retired passenger car plastics with equivalent properties[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [7] Li Jia, Xu Zhenming. Compound tribo-electrostatic separation for recycling mixed plastic waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019.doi:10.1016/j.jhazmat.2018.12.017.
- [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.
- Li Tuyu. Study on charging mechanism and motion characteristics of friction high voltage electrostatic separation for automotive plastics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [9] Benaouda I, Zeghloul T, Medles K, et al. Insulating conveyor-belt-type electrostatic separator for triboelectrically-charged granular plastic wastes[C]//2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2019.
- [10] Bouteffaha A, Bendaoud A, Reguig A, et al. Effects of the grid geometry on the performances of a triode-type corona electrode system[J]. Journal of Electrostatics, 2019.doi:10.1016/j.elstat.2019.103367.
- [11] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, et al. Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 301:12-67.
- [12] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, et al. Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(6):631-637.
- [13] Tilmatine A, Medles K, Younes M, et al. Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4):1 564-1 569.
- [14] Tilmatine A, Bendimerad S, Younes M, et al. Experimental analysis and optimisation of a free-fall triboelectric separator of granular plastic particles[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2009, 2(3):184-191.
- [15] Silveira A, Santana M P, Tanabe E H, et al. Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 169:91-98.
- [16] Noureddine B, Elmouloud Z M, Tilmatine A. Micronized plastic waste recycling using two-disc tribo-electrostatic separation process[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(3):625-631.
- [17] Labair H, Touhami S, Tilmatine A, et al. Study of charged particles trajectories in free-fall electrostatic separators[J]. Journal of Electrostatics, 2017, 88:10-14.
- [18] 李佳. 废旧印刷电路板的破碎和高压静电分离研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Li Jia. Study on crushing and high voltage electrostatic separation of waste printed circuit board[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.