BOPET 基镀铝薄膜静电场中表面吸附能力的研究

谢冬柏[1]，李大武[2]，史力民[2]，吕石磊[1]
（1.新疆警察学院，乌鲁木齐 830013；2.中国刑事警察学院，沈阳 110854）

摘 要：目的 通过对一种双向拉伸聚酯（BOPET）基镀铝薄膜表面高压静电场中吸附能力的研究，找到提高高压静电提取灰尘足迹能力的途径。**方法** 使用普通提取灰尘足迹用高压静电提取仪，对 BOPET 基镀铝薄膜表面施加高压静电场，控制电极与镀铝薄膜之间的距离，并采用不同粒径的 SiO_2 颗粒对薄膜在静电场中的吸附能力进行表征。使用光学显微镜、电子显微镜、XRD 分析技术及精密分析天平，对薄膜组织结构进行了研究，分析了在高压静电场环境中影响薄膜表面静电吸附能力的原因，并对引起变化的因素进行了讨论。**结果** BOPET 薄膜在静电场中会向下压紧物体表面，压紧和静电吸附力会随高压电极与镀铝薄膜表面距离的变化而不同。薄膜对颗粒的吸附能力与其带电量显著相关，随颗粒带电量的增加，薄膜表面的吸附能力明显增强。减小电极与薄膜之间的距离可增大薄膜附近的电场强度，是提高其表面静电吸附能力的有效途径。**结论** BOPET 基镀铝薄膜在高压静电场中会与其下的地面构成平板电容器。静电场中颗粒所带电荷的大小与其形状显著相关，微米颗粒所带电荷较多，从而在 BOPET 薄膜表面的吸附增重率最大。随电极与薄膜间距离的增加，电场强度降低，颗粒所带电量同时减小，吸附增重率迅速降低，15~10 mm 的距离为电场对不同颗粒的静电吸附能力变化最大区间。

关键词：表面；BOPET；镀铝；薄膜；足迹
中图分类号：TG335.22 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)12-0162-06
DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.026

Surface Adsorption Capacity of BOPET-based Al-Coated Film in Electrostatic Field

XIE Dong-bai[1], *LI Da-wu*[2], *SHI Li-min*[2], *LYU Shi-lei*[1]
(1.Xinjiang Police College, Urumqi 830013, China; 2.Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110854, China)

ABSTRACT: The work aims to improve footprint extraction capability of the BOPET aluminum-plating film in electrostatic field by studying adsorption capacity of a biaxially-oriented polyester film (BOPET) surface in high voltage electrostatic field. High voltage electrostatic field was applied to the surface of BOPET-based Al-coated film with a common electrostatic footprint extractor for dust footprint extraction use. Distance between electrode and the Al-coated film was controlled, and absorption efficiency of the film in electrostatic field was characterized with different sized SiO_2 particles. Film microstructure was studied with optical microscope, electron microscope, XRD analysis technology and precision analytical balance. Causes affecting elec-

收稿日期：2017-07-26；修订日期：2017-11-22
Received：2017-07-26；**Revised**：2017-11-22
基金项目：公安部科技强警基础工作专项（2017GABJC11）；新疆高等学校重点项目（XJEDU2014I050）
Fund: Supported by the Specific Fundamental Research Program for Strengthening Police with Science and Technology of the Ministry of Public Security (2017GABJC11) and Key Program of Scientific Research in Higher Education of Xinjiang Uygur Autonomous Region (XJEDU2014I050)
作者简介：谢冬柏（1973—），男，博士，副教授，主要研究方向为刑事科学技术。
Biography：XIE Dong-bai (1973—), Male, Doctor, Assistant professor, Research focus: forensic science.

trostatic adsorption capacity of the film surface in high-voltage electrostatic field were analyzed. Factors leading to the changes were discussed as well. The BOPET film would push down object surface in electrostatic field, the compaction and electrostatic adsorption force were significantly associated with carried charge. The adsorption capacity of film surface significantly improved as carried charge of the particles increased. Reducing the distance between the electrode and film could increase electric field intensity near the film, which was an effective way of improving the surface electrostatic adsorption capacity. The BOPET-based Al-coated film will constitute a plate condenser with the ground beneath in high-voltage electrostatic field. Electrical charge carried by the particles in electrostatic field is significantly related to particle shape. Microparticles carried much more electric charge, hence adsorption mass gain rate of the BOPET film surface is the highest. As the distance between the electrode and film increases, the electric field intensity decreases, electric quantity carried by particles declines and adsorption mass gain rate decreases rapidly. The greatest change in electrostatic adsorption capacity of electric field to different particles is present in the distance of 15~10 mm.

KEY WORDS: surface; BOPET; Al-coating; film; footprint

自 20 世纪 50 年代初双向拉伸聚酯薄膜(BOPET) 实现了工业生产以来，因其独有的化学物理特性，已得到广泛使用[1]。以这种薄膜材料为基材，在其表面施镀金属层，所得到的双层结构薄膜不但具有与基材相似的机械物理性能，同时又拥有良好的气密性、金属材料的导电性、高的介电常数和良好的单向绝缘性，已被成功用于包装和电器设备的制造[2]。目前广泛使用的金属镀层，是使用真空蒸镀的方法在表面制备一极薄的铝层。为提高这种复合薄膜材料的使用性能，针对 BOPET 及其表面镀铝层的研究已进行多年，有效降低了薄膜生产过程中的表面缺陷，成功提高了镀铝层与薄膜之间的附着力[3]。在警察业务中，利用表面铝层优良的导电性、基体层的良好绝缘性，以及薄膜材料柔软、质量小、易与物体表面贴合等特性，将 BOPET 镀铝薄膜广泛用于灰尘等固体颗粒所形成足迹的显现和提取[4]。基本原理是在镀铝层表面施加静电高压后，会产生电荷，并形成均匀的电场，使 BOPET 层下所覆盖物体表面形成足迹的灰尘等固体颗粒极化，并在静电作用下吸附于绝缘的 BOPET 表面，从而反映出现场存在的足迹形态。本文在分析 BOPET 铝复合薄膜高压静电场环境中足迹提取原理的基础上，使用不同粒径的固体颗粒对高压静电场中固体颗粒的吸附行为进行了量化研究，探索提高这种足迹提取方法的有效途径，并通过对不同粒径固体颗粒及电极位置对 BOPET 表面固体颗粒静电吸附能力影响的对比研究，得到高压静电提取灰尘足迹的最佳参数。

1　实验方法

所用 BOPET 镀铝薄膜厚度为 50 μm，基体为 BOPET，表面铝层厚度为 20 nm。将 BOPET 镀铝薄膜裁剪为 15 cm×15 cm 的正方形，然后将其置于无水乙醇与 50%（质量分数，后同）丙酮的混合溶液中，经超声波清洗 5 min 后取出，用电吹风机将其表面液体吹干后称量。进行静电吸附实验时，将薄膜置于 30 mm 的圆形容器表面，镀铝层朝上，容器中填满粒径分别为 10~50 μm、100~500 nm 及 10~50 μm 和 100~500 nm 各 50%（体积分数）的 SiO_2 粉末进行实验。电极电压为 20 kV，负极接地，电极与薄膜间的距离取 5、10、15、20、25 mm，放电时间为 5 s，放电结束后，将薄膜取出再次称量，以得到薄膜表面所吸附 SiO_2 粉末的质量。每种实验条件下，同一实验重复 5 次，并取平均值。

使用美国 FEI 公司生产的 Inspect F50 扫描电子显微镜对薄膜表面进行分析。对 BOPET 表面、SiO_2 颗粒进行分析时，在观察前将其表面进行喷金处理，以提高图像的质量。使用 Sartorius BP211D 型电子天平进行称量，称量精度为 0.01 mg。对镀铝层的物相使用荷兰 X'Pert PRO 公司的 X 射线衍射仪进行分析，分析范围为 10°~100°，GIXRD 的掠射角为 0.5°。使用 Jade 6.5 软件分析衍射花样，其相应的 PDF 卡片为 PDF2004。

2　实验结果

图 1 为所用 BOPET 薄膜的 XRD 谱图。由于表面镀铝层厚度只有 20 nm，在 XRD 中未检出。从图 1 可见基体 BOPET 材料的标准峰[5]，这是由于 BOPET 分子的结构高度对称，具有一定的结晶取向能力。但是普通的加工工艺不能得到完全具有晶体结构的 BOPET，通常所生产的 BOPET 是半晶体材料，它是一种同时具有晶态和非晶态两种结构的混合物，其中结晶态结构所占比例不超过 90%[6]。结晶态部分是由大量微小的形核源在冷却时形成的，而较大的晶体结构是其在高温时结晶或由高温熔化状态经缓慢冷却

而生成[7]。

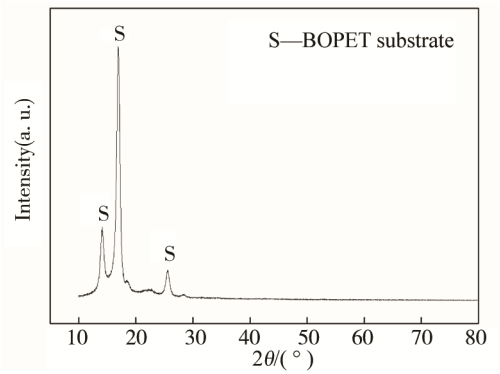


图 1　BOPET 薄膜的 XRD 谱图

Fig.1 XRD spectra of BOPET film

图 2 为静电场中 3 种不同粒径 SiO_2 在 BOPET 薄膜表面的吸附增重曲线。可知随电极与薄膜间距离的减小，SiO_2 颗粒在薄膜表面的吸附增重率增加，3 种粒径颗粒吸附增重率的差异增大，其中微米 SiO_2 颗粒的吸附增重率最大。当距离大于 15 mm 时，颗粒的吸附增重率随距离的增加未见显著变化，超过 20 mm 后，不同粒径颗粒的吸附增重率基本相同。距离小于 15 mm 时，SiO_2 颗粒的吸附增重率明显增加，其中微米 SiO_2 颗粒的吸附增重率的增加速度最快。在所有距离范围内明显可见微米 SiO_2 颗粒的吸附增重率值最大，而纳米 SiO_2 颗粒的增重率值最小，微米和纳米混合 SiO_2 颗粒的增重率位于中间。

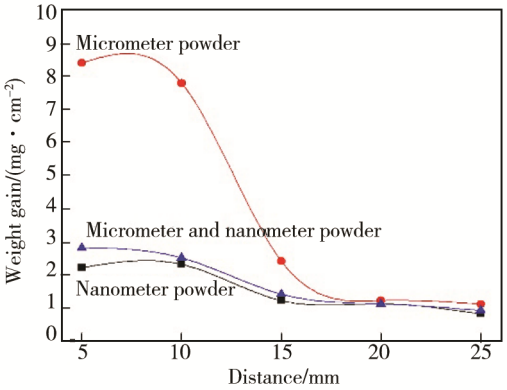


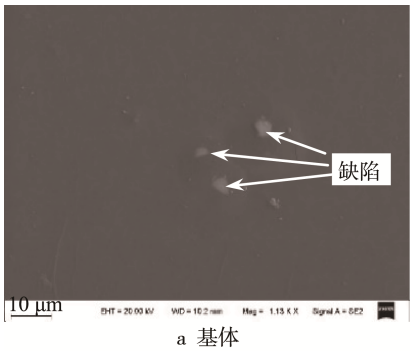
图 2　静电场中不同粒径 SiO_2 在 BOPET 薄膜表面的吸附增重曲线

Fig.2 Mass gain curves of different sized SiO_2 on BOPET film in electrostatic field at different distance

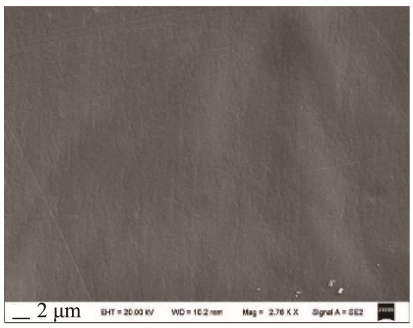
图 3 为所用 BOPET 基体和镀铝层的表面形貌照片，可见基体 BOPET 薄膜的表面光滑，局部可见缺陷。镀铝层表面完好呈镜面，涂层未见划伤，高倍下观察可见表面有皱纹出现，这是由于 BOPET 薄膜基体并不完全平整而引起的。

图 4 为微米、纳米和微纳米粒径各 50%混合的 SiO_2 颗粒，在静电场中吸附于 BOPET 薄膜表面后的状态。土壤成分复杂，种类很多，BOPET 薄膜表面的灰尘静电吸附能力与灰尘组成颗粒的大小密切相关。土壤中的粉粒主要成分是石英，具有一定的可塑性、粘结性和吸附性。其中 10~50 μm 粒径的颗粒易浮动，是组成灰尘的主要成分[8-9]，实验所选用的微米 SiO_2 颗粒即在此范围内。从图 4a 可见，微米 SiO_2 颗粒在静电场中吸附在薄膜表面的密度最大，经高倍观察可见颗粒为扁平状，且有尖角，均匀分布在薄膜表面，未见粒子团聚。粒径小于 1 μm 的土壤颗粒为胶粒，是土壤中最细小的颗粒，为土壤分散系统中的分散相，液体水可以分散介质的形式在胶粒周围存在，形成一个复杂的土壤多元分散系统[10]。

图 4c 为纳米 SiO_2 颗粒在静电场中吸附于 BOPET 薄膜表面后的状态。纳米 SiO_2 颗粒在静电场中并没有均匀吸附，在薄膜表面呈现明显的团簇形状。在高倍下可见，纳米 SiO_2 颗粒的微细粒子在静电场作用下形成了粒子短链聚集体，链和链之间相互吸引，在电场中吸附在薄膜表面。实际土壤中的纳米粉粒之间可形成孔隙，自然条件下这些孔隙会被更小的土粒填充。图 4e 为微米和纳米粒径各 50%的 SiO_2 混合颗粒，在静电场中吸附于 BOPET 薄膜表面后的状态，可见混合 SiO_2 颗粒的吸附极不均匀，经吸附后的颗粒尺寸明显大于原始微米粉粒径，经高倍观察可见，其中的大尺寸颗粒是由高表面能的纳米 SiO_2 颗粒，在静电场作用下聚集成粗大粒子，并在微米 SiO_2 颗粒表面团聚而形成。



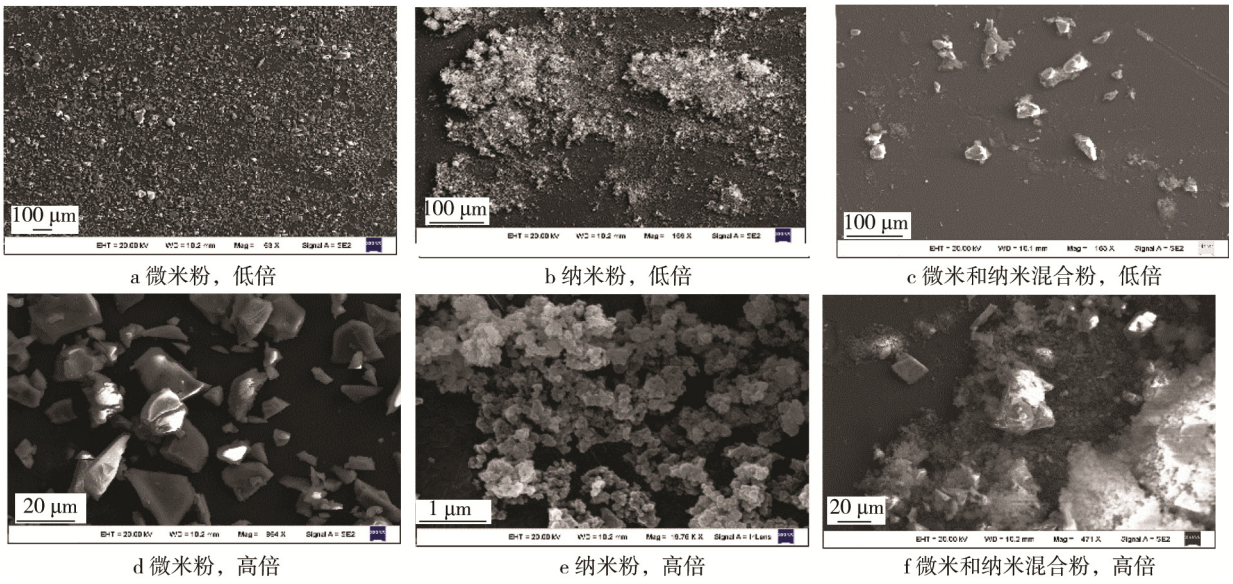
a 基体



b 镀铝层

图 3　BOPET 基体和镀铝层的表面形貌

Fig.3 Surface morphology (SEM images) of (a) BOPET substrate and (b) Al-coated film



a 微米粉，低倍　b 纳米粉，低倍　c 微米和纳米混合粉，低倍

d 微米粉，高倍　e 纳米粉，高倍　f 微米和纳米混合粉，高倍

图 4　不同粒度 SiO_2 粉末在 BOPET 薄膜表面的吸附状态

Fig.4 Adsorption state of different sized SiO_2 powder on BOPET film (a)(d) micron powder and (b)(e) nano powder (c)(f) micron and nano powder

3　讨论

土壤是形成灰尘足迹的主要物质，它是由大小不同的颗粒构成，其中矿物质占到土壤干重的 90%以上，主要成分是 SiO_2[11]。土壤中的颗粒大小直接影响足迹的提取效果，研究表明，深度在 0~25 cm 之间的表土层土壤中，以粗砂（粒径 2000~200 μm）、细砂（粒径 200~20 μm）、粉砂（粒径 20~2 μm）和粘粒（粒径 2 μm 下）构成[12]，其中最容易浮动、分散的颗粒粒径为 50~10 μm，这也是提取足迹痕迹的灰尘粒径的主要尺寸范围。

土壤中的大部分颗粒是介电性粒子[13-14]，在有外电场存在时，介电性粒子会被外电场极化，粒子表面出现极化电荷，粒子之间相互吸引。灰尘足迹的静电吸附法，就是利用外界环境中广泛存在土壤粒子的介电属性，在电场中被驱动附着在黑色 BOPET 薄膜基材表面，形成可观察拍照固定的足迹形态。

静电吸附提取灰尘足迹时，在静电场中，BOPET 薄膜首先会压紧地面，原理如图 5 所示。高压静电发生器电极会产生直流电压 U，形成很强的静电电场强度，使空气发生电离，在空气中产生大量的空间电荷，此时正电荷充斥在电极周围，形成空间正电荷 Q_1，并在电场作用下向 BOPET 薄膜表面的镀铝层运动而形成电流。正离子到达镀铝层后，由于 BOPET 薄膜具有良好的绝缘性能，使得正离子无法穿过 BOPET 薄膜而只能堆积在薄膜表面的镀铝层，形成电荷 Q_2。由于同种电荷的相互排斥作用，使得 Q_1 和 Q_2 之间形成了排斥力 F，于是 BOPET 薄膜在 F 作用下与物体表面紧密吸附贴合在一起，此时静电吸附力 F 可由公式(1)计算：

$$F=\frac{Q_1Q_2}{d^2}\frac{1}{4\pi\varepsilon} \tag{1}$$

式中：F 为吸附力；d 为电极与薄膜间的距离；ε 为空气的介电常数；Q_1 为电极周围的电荷；Q_2 为薄膜表面镀铝层中的电荷，来自于早时产生的电荷 Q_1，若薄膜静止，可认为 Q_2=Q_1。显然由于镀铝层良好的导电性，电荷在其中可均匀分布，此时下压力也沿薄膜表面均匀分布，薄膜可与地面良好接触。从而有：

$$F=\frac{Q_1^2}{d^2}\frac{1}{4\pi\varepsilon} \tag{2}$$

式（2）中的电量 Q_1 与电极电压 U 相关，其他条件不变时，高电压显然会加大对薄膜的下压力。静电提取仪的电压一般取 20 kV，就是为了在电场中薄膜能受到较大的下压力，使其与表面紧密接触，从而提高足迹的提取效果。

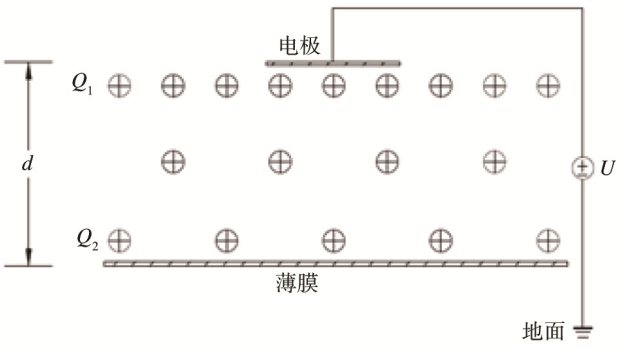


图 5　静电吸附时的下压力模型

Fig.5 Schematic diagram of down force during electrostatic adsorption

由图 6 所示的足迹提取仪静电吸附电场模型可见，电极放电形成稳定的静电场后，BOPET 上表面的镀铝层会充满正电荷，并形成一个均匀的电场，与表面镀铝层相比，其下的 BOPET 薄膜有极大的电阻率，可高达 $1.0\times10^{15}\,\Omega\cdot m$ 以上（GB 13950—92），使表面电荷不能穿过薄膜而滞留在表面金属铝层，而薄膜下部常见的土壤或混凝土导电性均较差（GB/T 50065—2011 附录 J），此时整个静电吸附系统构成一平板电容，其中表面镀铝层作为电容器的正极板，电容器的负极板由地表深处导电性较好的部分充当，其间土壤及表面灰尘颗粒视为极板间的非导电介质[15]。在两极板间的电场作用下，正电荷沿电场方向向下移动，而负电荷反向运动，使土壤灰尘等极性分子的取向发生改变，在颗粒上部聚积较多的负电荷，在颗粒下部聚积正电荷。土壤灰尘颗粒越接近薄膜，其所带的负电荷越多；越远离薄膜，其所带的正电荷越多。在正极板所带正电荷的吸引下，灰尘颗粒会向 BOPET 薄膜表面运动，并在静电力的作用下，在表面绝缘 BOPET 层吸附。

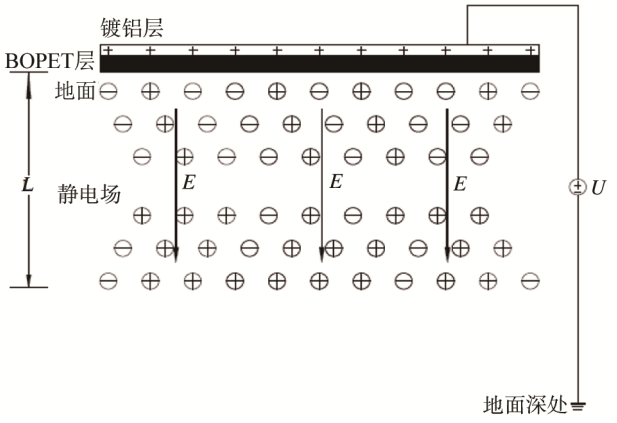


图 6　静电吸附电场模型

Fig.6 Schematic diagram of electrostatic adsorption field

显然当颗粒所受的电场力 F 大于自身重量时，会被吸附到 BOPET 薄膜表面，此时土壤灰尘颗粒质量满足：

$$m<\frac{F}{g}=\frac{qE}{g}=\frac{qU}{gL} \tag{3}$$

式中：U 为电场电压；q 为颗粒所带电量；L 为电极与薄膜间的距离；g 为重力加速度常数。实验结果表明，随电极与薄膜间距离的减小，同种粒子在薄膜表面的吸附增重率增加，显然满足公式（3）中“L 减少，静电吸附力增大”的条件，从而提高了颗粒的吸附增重率。当距离大于 15 mm 时，粒子吸附增重率随距离的增加未见显著变化，超过 20 mm 后，不同粒径粒子的吸附增重率基本相同。这是由于随 L 的增加，颗粒表面所带静电电量会减小，L 的增大与 q 的减少同时会降低 SiO_2 颗粒的吸附增重率，使薄膜的吸附增重率迅速降低，这一变化曲线的拐点出现在电极距薄膜距离 15 mm 附近。同样，L 的减小会使颗粒表面所带静电电量增大，从而提高颗粒的静电吸附能力。当电极距薄膜距离为 10 mm 左右时，薄膜吸附增重率的提高最显著；当距离减小到 5 mm 时，对纳米及微米混合颗粒的吸附能力并没有明显提高，这是因为 BOPET 是半晶体材料，它是一种同时具有晶态和非晶态两种结构的混合物，随 L 的降低，高压电场中的场强 E 提高，将使之极化，会对表面所吸附的颗粒产生排斥，这种排斥现象对微小颗粒最明显，从而降低了 L 减少对吸附率提高的影响。

在同一条件下，微米粉体 SiO_2 的吸附增重率最大，这与颗粒所带电量 q 相关。在静电场中，颗粒所带电荷的大小与其形状显著相关，微米颗粒具有扁平状形态，且带有尖角。同样形状、质量、面积的颗粒，颗粒形状越“狭长”，带有尖角越多，所带静电电量越大[16]，可见与纳米粉体的球形相比，微米 SiO_2 的带电量会显著增加。据公式（3）可见，q 的增大可使微米 SiO_2 的吸附增重率提高。

4　结论

1）BOPET 基镀铝薄膜在高压静电场中，会与地面构成平板电容器，其表面镀铝层作为电容器的正极板，电容器的负极板由地表深处导电性较好的部分充当，其间土壤及表面灰尘颗粒视为极板间的非导电介质。

2）静电场中颗粒所带电荷的大小与其形状显著相关，微米粉体所带电荷较多，从而在 BOPET 薄膜表面的吸附增重率最大。

3）随电极与薄膜间距离的增加，电场强度降低，颗粒所带电量同时减小，吸附增重率迅速降低，电场对不同颗粒静电吸附能力变化的最大区间为 10~15 mm。

参考文献：

[1] 杨始堃, 陈洁茹. 聚酯的应用和发展趋势[J]. 合成技术及应用, 1996, 11(1): 24-30.
YANG Shi-kun, CHEN Jie-ru. Appliction and Development Trend of Polyester [J]. Synthetic Technology and Application, 1996, 11(1): 24-30.

[2] 谈述战, 杨有财, 刘毅. 双向拉伸聚酯薄膜的高性能化研究进展[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(6): 112-116.
TAN Shu-zhan, YANG You-cai, LIU Yi. High-performance Research Progress of Biaxially Oriented Polyester (BOPET) Film [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(6): 112-116.

[3] JÜRGEN B. Biaxially Oriented Films for Packaging

Applications[J]. Plastic Films in Food Packaging, 2013, 63: 53-70.

[4] 陈振乾, 史海青, 王贵容. 几种情况下的灰尘足迹静电提取方法比较[J]. 河北公安警察职业学院学报, 2006, 6(4): 44-46.
CHEN Zhen-qian, SHI Hai-qing, WANG Gui-rong. On Comparison of Methods to Draw Dust Footprint by Means of Static Electricity under Several Conditions[J]. Journal of Hebei Vocational College of Public Security Police, 2006, 6(4): 44-46.

[5] FARAJ M G, IBRAHIM K A. PET as a Plastic Substrate for the Flexible Optoelectronic Applications [J]. Optoelectronics and Advanced Materials, 2011, 5(8): 879-882.

[6] BOYER R F. Glassy Transitions in Semi-crystalline Polymers[J]. Journal of Polymer Science Polymer Symposia, 2010, 50(1): 189-242.

[7] MUNK P, AMINABHAVI T M. Introduction to Macromolecular Science[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[8] WILLIAMS G. Some Aspects of the Eolian Saltation Load [J]. Sedimentology, 1964, 3(4): 257-287.

[9] BAGNOLD R A. The Nature of Saltation and of Bed-load Transport in Water Proceedings [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1973, 332: 473- 504.

[10] ESHEL G, LEVY G J, MINGELGRIN U. Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle Size Distribution Analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 736-743.

[11] ARYA L M, PARIS J F. A Physic-empirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle-size Distribution and Bulk Density Data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1023-1030.

[12] POSADAS A D, GIMENNEZ P D, BITTELLI M, et a1. Multi Fractal Characterization of Soil Particle-size Distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5): 1361-1367.

[13] KAYA A, FANG H Y. Identification of Contaminated Soils by Dielectric Constant and Electrical Conductivity[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, 123: 169-177.

[14] DARAYAN S, LIU C, SHEN L C. Measurement of Electrical Properties of Contaminated Soil [J]. Geophysical Prospecting, 1998, 46: 477-488.

[15] ITAKURA T, MASUDA H, OHTSUKA C. The Contact Potential Difference of Powder and the Tribo-charge [J]. Journal of Electrostatics, l996, 38: 213-226.

[16] NIEH S, NGUYEN T. Effects of Humidity, Conveying Velocity, and Particle Size on Electrostatic Charges of Glass Beads in a Gaseous Suspension Flow[J]. Journal of Electrostatics, 1988, 21: 99-114.