硅烷改性椰壳粉对热塑性弹性体表面性能的影响及应用

程帅[1]，钱善华[1,2]，吴越[1]，刘利国[1]，倪自丰[1]，俞经虎[1,2]

（1.江南大学 机械工程学院，江苏 无锡 214122；
2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘 要：目的 研究经硅烷（GPTMS）改性后的椰壳粉（G-CSP）作为添加剂对热塑性弹性体（TPE）表面性能的影响及其潜在应用。**方法** 通过热压法制备 G-CSP 质量分数为 0%、5%、10%和 15%的 G-CSP-TPE 样品，采用 Alpha 红外光谱仪对 GPTMS、CSP 和 G-CSP 进行红外光谱试验。用 MFP-D 三维形貌仪观测 G-CSP-TPE 样品的表面形貌，在 JC2000CS 接触角测量仪上测试不同液体在 G-CSP-TPE 表面的静态接触角。基于陶瓷球与 G-CSP-TPE 组成的摩擦副，在 MFT-5000 摩擦磨损试验机上研究不同载荷和滑动速度下液体介质的摩擦性能。**结果** 红外光谱显示，GPTMS 中的某些官能团成功地接枝到 CSP 中。随着 G-CSP 质量分数的增加，试样表面粗糙度和接触角均呈增加趋势。去离子水和葵花油的平均摩擦系数与滑动速度和载荷有关，当滑动速度超过 2 mm/s 时，其平均摩擦系数总体上与载荷呈负相关，在 0.8 N 和 4 mm/s 的条件下，去离子水和葵花油的平均摩擦系数差值最大。与其他样品相比，含 10%G-CSP 的 G-CSP-TPE 样品区别去离子水和葵花油平均摩擦系数的能力更强，基于该样品，脂肪含量为 3.6 g 和 4.4 g 的 100 mL 两种牛奶的平均摩擦系数分别为 0.68 和 0.576。**结论** 经 GPTMS 改性后的 CSP 能够改善 TPE 的表面性能，含 10%G-CSP 的 G-CSP-TPE 样品最有可能被应用于食品口感评价和功能食品的研发。

关键词：热塑性弹性体；椰壳粉；硅烷；表面性能；摩擦系数；脂肪含量
中图分类号：TH117 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)06-0138-07
DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.020

Effect and Its Application of Silane-modified Coconut Shell Powder on Surface Properties of Thermoplastic Elastomers

CHENG Shuai[1], *QIAN Shan-hua*[1,2], *WU Yue*[1], *LIU Li-guo*[1], *NI Zi-feng*[1], *YU Jing-hu*[1,2]

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of silane (GPTMS)-modified coconut shell powder (G-CSP) as an additive on the surface properties of thermoplastic elastomer (TPE) as well as its potential applications. These G-CSP-TPE samples with G-CSP

收稿日期：2018-03-31；修订日期：2018-04-13
Received：2018-03-31；**Revised**：2018-04-13
基金项目：国家自然科学基金项目（51775244）；江苏省自然科学基金项目（BK20161134）；中国博士后科学基金项目（2017M611691）
Fund：Supported by National Natural Science Foundation of China (51775244), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20161123) and China Postdoctoral Science Foundation (2017M611691)
作者简介：程帅（1991—），男，硕士研究生，主要研究方向为摩擦学。
Biography：CHENG Shuai (1991—), Male, Master, Research focus: tribology.
通讯作者：钱善华（1980—），男，博士，副教授，主要研究方向为摩擦学和仿生设计。
Corresponding author：QIAN Shan-hua (1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: tribology and bio-design.

mass fractions of 0, 5%, 10% and 15% were prepared in hot-pressing method. Infrared spectrum tests of GPTMS, CSP and G-CSP were performed with Alpha infrared spectrometer. Surface morphology of G-CSP-TPE samples was observed with MFP-D three-dimensional morphology instrument. Static contact angles of the three different fluids on G-CSP-TPE samples were measured on JC2000CS contact angle instrument. Based on friction pairs consisting of ceramic ball and G-CSP-TPE samples, friction properties of different fluids were investigated with a MFT-5000 friction-wear testing machine at different loads and sliding speeds. The infrared spectrum showed that certain functional groups in GPTMS were successfully grafted into CSP. As the mass fraction of G-CSP increased, both surface roughness and contact angle increased as well. Average friction coefficient of deionized water and sunflower oil were related to sliding speed and load. As sliding speed exceeded 2 mm/s, the average friction coefficient of functioned as a negative correlation with the load. Under the condition of 0.8 N and 4 mm/s, the difference in the average coefficient of friction between deionized water and sunflower oil was the highest. Compared with other G-CSP-TPE samples, 10%G-CSP-TPE sample was more capable of differentiating the average friction coefficient of deionized water and sunflower oil. Based on the 10%G-CSP-TPE sample, average friction coefficient of two types of milk with fat content of 3.6 g/100 mL and 4.4 g/100 mL, was 0.68 and 0.576, respectively. GPTMS-modified CSP can improve surface properties of TPE, and 10%G-CSP-TPE samples are most likely to be used for food taste evaluation and functional food development.

KEY WORDS: thermoplastic elastomer; coconut shell powder (CSP); silane; surface properties; friction coefficient; fat content

热塑性弹性体（Thermoplastic elastomer，TPE）是一种由热塑性树脂和弹性体所组成的嵌段共聚物，兼备橡胶的高弹性和热塑性树脂的热塑加工性[1-2]，因具有高强度、高韧性以及较大的改性空间等优点，被广泛应用于汽车、医疗以及仿生材料等领域[3-5]。而 TPE 材料的表面特性在其工程应用中显得极其重要，在评估食物口感属性的摩擦装置中，德邦等[6]使用 TPE 作为摩擦副表面获取蔗糖溶液与葵花油的摩擦系数，通过液体摩擦系数的差异，评估其口感部分属性。德邦的研究工作表明，TPE 材料能区分不同液体的摩擦系数。但随着人们对美好生活的不断追求，对食品部分感官属性的要求也越来越高，希望能区分出更多食品的细微差异，这将对 TPE 材料表面性能提出更高的要求。

迄今为止，改善制备工艺、添加稀土元素和碳纳米管等处理方法均可以改善 TPE 的表面性能[7-9]，但应用于医疗或仿生材料等领域更需要关注复合材料的安全性及生物降解性[10]。天然纤维在聚合物复合材料中能够发挥增强机械性能和改善表面性能等作用，并具有安全无毒、生物降解性极好[11-12]等特征，如麦秸秆纤维增强热塑性复合材料的强度等机械性能[13]，木浆纤维改善热塑性树脂的机械及表面性能[14]，椰壳纤维改性后的天然橡胶拉伸、撕裂强度得到有效提升[15]。椰子壳的产量巨大，成本较低，且椰壳纤维的高韧性能够满足化学改性的工艺要求，已在聚合物改性研究中被初步证实[16-18]。但天然纤维和聚合物基质间的相容性较差，这会导致界面粘附性差、填料润湿不充分、填料颗粒凝聚等现象，最终降低其综合性能[19]。为了提高纤维和基质间的相容性，硅烷偶联剂能够增加纤维的润湿性和粘附性等性能[20-21]。然而，对将硅烷修饰后的椰壳纤维添加到 TPE 后的性能研究还比较少，能否改变 TPE 的表面性能需进一步探索。

因此，本文拟采用硅烷修饰后的椰壳粉作为添加剂，通过热压法制备出 G-CSP-TPE 试样，测量 G-CSP-TPE 的表面粗糙度和接触角，在陶瓷球和复合 TPE 试样的摩擦配副上开展不同液体摩擦系数的变化研究，讨论 G-CSP 含量对 TPE 表面性能的影响，揭示 G-CSP-TPE 的潜在应用价值，研究结果将对 TPE 材料的工程应用和功能食品研发具有一定的指导意义。

1　材料与方法

1.1　实验材料

本文选用 TC4MGZ 型颗粒（胶宝系列，德国）和 CSP（西安恒基化工有限公司，陕西）分别作为 TPE 的原材料和添加剂，其中 CSP 颗粒的粒径约为 60 μm，选用 3-缩水甘油氧基丙基三甲氧基硅烷（GPTMS，酷尔化学试剂公司，北京）和过氧化二异丙苯（DCP，远成科技公司，武汉）分别作为硅烷偶联剂和硫化剂。

试验时，先取 50 g CSP 浸没于去离子水中，搅拌均匀后静置并滤去杂质和多余水分，放入 70 ℃的鼓风干燥箱中干燥 24 h。同时，在 90%（体积分数）乙醇溶液中加入 0.4 g GPTMS 和 0.2 g DCP，用乙酸将混合溶液的 pH 值调节至 3.5 并连续搅拌 1 h。取 40 g CSP 浸入混合溶液中并匀速搅拌 10 min，静置后滤去溶剂，并将反应后的 CSP（G-CSP）置于 70 ℃的鼓风干燥箱中干燥 24 h。将 G-CSP 添加到 TPE 颗粒中，经混合均匀后置于金属模具中，并在 230 ℃的

干燥箱中加热 5 h，冷却至室温后获得成型的 G-CSP-TPE 试样，G-CSP 质量分数分别为 0%、5%、10%和 15%，其中质量分数为 0%的 G-CSP 即为未改性的 TPE 试样。同时，从超市购置的葵花油和两种品牌的牛奶（Milk1、Milk2）用于评价复合 TPE 的表面性能，两种品牌的牛奶营养成分如表 1，发现它们在脂肪含量上有细微差别。

表 1　两种牛奶的营养成分
Tab.1 Nutrition facts of two kinds of milk

Species	Per 100 mL Milk1	Per 100 mL Milk2	Nutrient reference value/%	
			Milk1	Milk2
Calories	270 kJ	309 kJ	3	4
Protein	3.0 g	3.6 g	5	6
Fat	3.6 g	4.4 g	6	7
Carbohydrates	5.0 g	5.0 g	2	2

1.2　实验方法

采用 Alpha 红外光谱仪（Bruker，德国）GPTMS 和 CSP 进行红外光谱试验，分析 GPTMS、CSP 和 G-CSP 官能团差别。采用 MFP-D 三维形貌仪（Rtec，美国）观测复合 TPE 试样的表面形貌和粗糙度，在 JC2000CS 接触角测量仪（中晨数字技术设备有限公司，上海）上分别测试去离子水和葵花油与复合 TPE 试样的静态接触角，每组测 3 次，取平均值。在 MFT-5000 多功能磨损试验机（Rtec，美国）上开展不同液体的摩擦试验研究，其示意图如图 1 所示。将半径为 3 mm 的陶瓷球固定在金属夹具上，将复合 TPE 试样粘贴在容器的底部（容器固定在试验机上），所测液体覆盖于复合 TPE 的试样表面。在外载荷作用下，当陶瓷球与 TPE 试样开始接触和滑动时，试验机传感器能够测定 X 方向摩擦力及该方向的位移，外载荷、滑动速率、滑动行程和滑动时间均由试验机的程序控制。

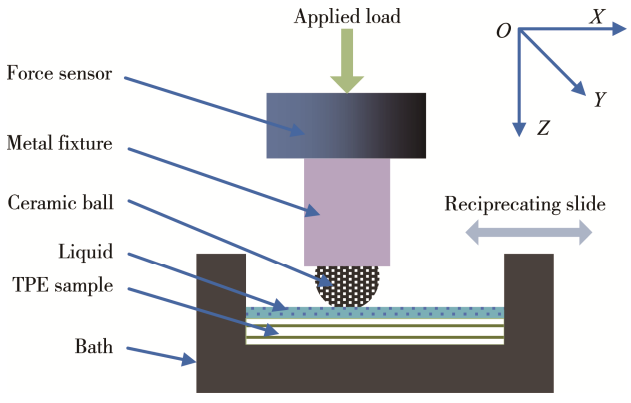


图 1　球盘摩擦试验的示意图
Fig.1 Schematic diagram of ball-disc friction test

试验时，先采用陶瓷球和纯 TPE 开展离子水和葵花油两种液体的摩擦性能研究，所采用的试验参数为：载荷 0.5、0.8、1、1.5、2 N，滑动速度 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 mm/s，滑动行程 10 mm。每组试验均往复滑动 3 次，以获得两种液体摩擦系数区分度最大的工况参数。在此基础上，以复合 TPE 试样为板型摩擦副开展两种液体的摩擦性能测试，研究 G-CSP 的含量对两种液体摩擦性能的影响，以获得两种液体摩擦系数区分度最大的 G-CSP-TPE。最后，以市场上脂肪含量差别较小的两种牛奶制品开展摩擦性能测试，来验证改性后的 TPE 潜在的工程应用价值。值得说明的是，每组试验重复进行 3 次，且每组试验结束后均更换新的试验材料和陶瓷球以开展下一组试验。

2　结果与讨论

2.1　红外光谱

GPTMS、CSP 和 G-CSP 的红外光谱如图 2 所示，在 CSP 的红外光谱中，1036 cm^{-1} 处是仲醇中的—C—O 振动吸收峰[19]。在 GPTMS 的红外光谱中，820 cm^{-1} 处是 Si—CH_3 特征吸收峰[22]；1083 cm^{-1} 和 1193 cm^{-1} 处是聚硅氧烷 Si—O—Si 键的特征吸收峰[23]；1462、2841、2943 cm^{-1} 处是硅烷中—CH_3 的吸收峰[24]，这些峰同样出现在 G-CSP 红外光谱的 895、1024、1151、1462、2853、2922 cm^{-1} 处。这表明 GPTMS 与 CSP 已发生了接枝反应。

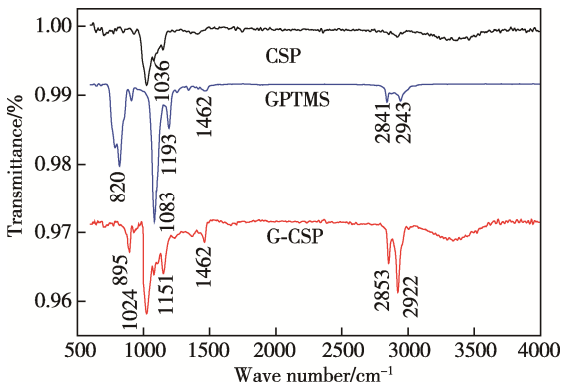


图 2　CSP、GPTMS 和 G-CSP 的红外光谱图
Fig.2 Infrared spectrum of CSP, GPTMS, and G-CSP

2.2　表面形貌

试验用 G-CSP-TPE 试样的三维表面形貌和表面粗糙度分别如图 3 和表 2 所示，发现 G-CSP-TPE 试样的表面凹凸峰值和表面粗糙度均随 G-CSP 质量分数的增加而增大，这可能是由于 G-CSP 含量较多的复合试样，其纤维素更易于在混合物表面暴露出来[19]。

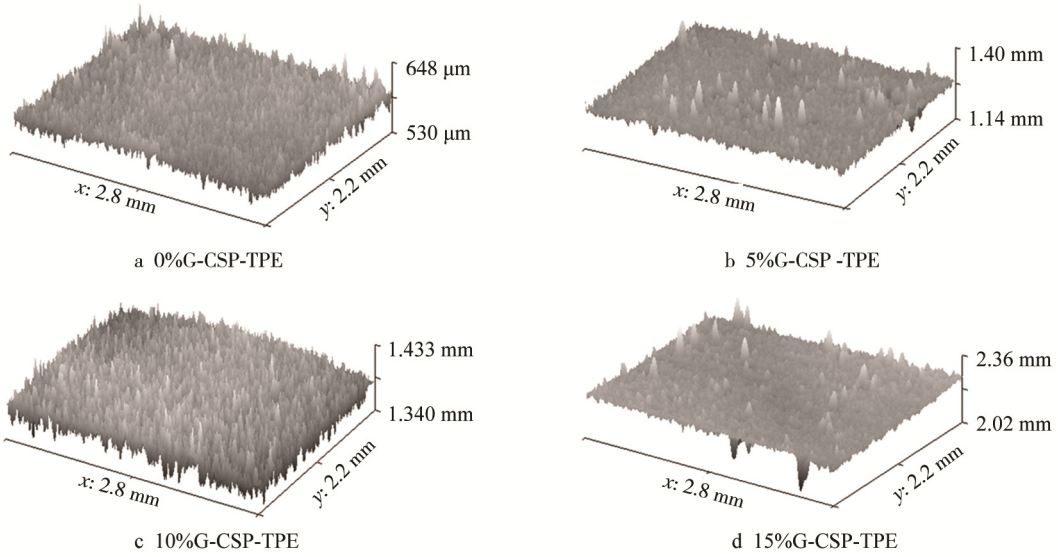


图 3　G-CSP-TPE 试样的三维表面形貌

Fig.3 Three-dimensional surface morphology of G-CSP-TPE samples

表 2　G-CSP-TPE 试样的表面粗糙度

Tab.2 Surface roughness of G-CSP-TPE samples

TPE	0%G-CSP-TPE	5%G-CSP-TPE	10%G-CSP-TPE	15%G-CSP-TPE
Ra/μm	6.61	9.4	10.4	12.5

2.3　表面接触角

去离子水和葵花油在 G-CSP-TPE 试样上的静态接触角如图 4 所示，可以看出随着 G-CSP 质量分数的增加，两种液体的接触角均呈增大趋势，即表现为较低的亲水性和亲油性。去离子水在 G-CSP-TPE 试样上的接触角高于葵花油，这表明该材料的亲油性高于亲水性，且 10%G-CSP-TPE 和 15%G-CSP-TPE 表现出一定的疏水性，这是因为 GPTMS 的修饰作用使 CSP 的疏水性增强，从而提高 CSP 与 TPE 的相容性[19]。而 G-CSP 含量对亲油性的影响相对较小。

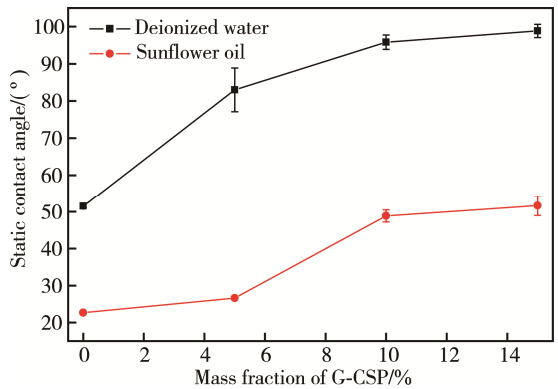


图 4　去离子水和葵花油在 TPE 试样上静态接触角随 G-CSP 质量分数的变化曲线

Fig.4 Variation of static contact angle of deionized water and sunflower oil on TPE samples with mass fraction of G-CSP

2.4　TPE 的摩擦性能

图 5 为采用去离子水时，在载荷为 1 N、滑动速度为 2 mm/s 的工况下，陶瓷球与 0% G-CSP-TPE 滑动时摩擦系数随时间的变化曲线，即摩擦系数在往复滑动时随滑行长度和时间的空间运动轨迹。在同一滑行方向的端点处，因滑动方向的改变，摩擦力和摩擦系数急剧降低至零，并从零急剧上升到某一数值。因此，在 2~8 mm 的滑动区间内取摩擦系数的测试结果，获得其平均摩擦系数，从而避免端点处的摩擦系数波动对测试结果的影响，后续结果均基于平均摩擦系数进行分析。

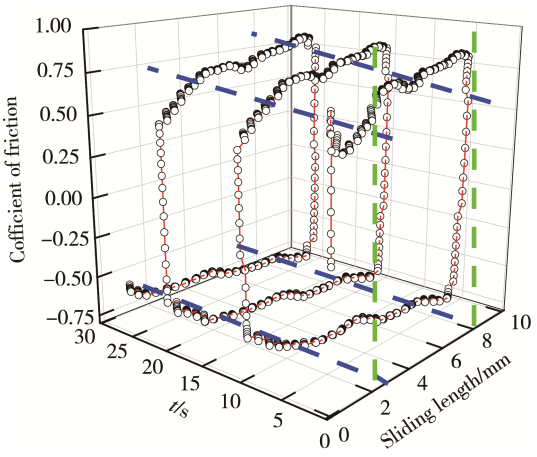


图 5　摩擦系数随时间和位移的变化曲线

Fig.5 Variation of friction coefficient with time and displacement

以 0%G-CSP-TPE 为摩擦副，不同载荷工况下去离子水和葵花油的平均摩擦系数随速度的变化如图 6 所示。对于去离子水溶液，除载荷为 2 N 时的工况外，去离子水的平均摩擦系数随滑动速度的增大而增加，

且当滑动速度大于 2 mm/s 时，平均摩擦系数随载荷的增大而减小。同时，滑动速度对葵花油平均摩擦系数的影响较小，这可能与其数值较小有关，当滑动速度大于 2 mm/s 时，平均摩擦系数基本随载荷的增大而减小，但载荷为 0.8 N 的平均摩擦系数却小于载荷为 1 N 的平均摩擦系数。同等测试工况下，去离子水和葵花油平均摩擦系数的差值如图 7 所示，发现载荷为 0.8 N 时，两种液体的平均摩擦系数差值最大，除载荷为 2 N 的工况外，平均摩擦系数的差值随滑动速度的增大而增加。因此，选择载荷为 0.8 N、滑动速度为 4 mm/s 作为测试条件，开展 G-CSP-TPE 的摩擦性能研究。

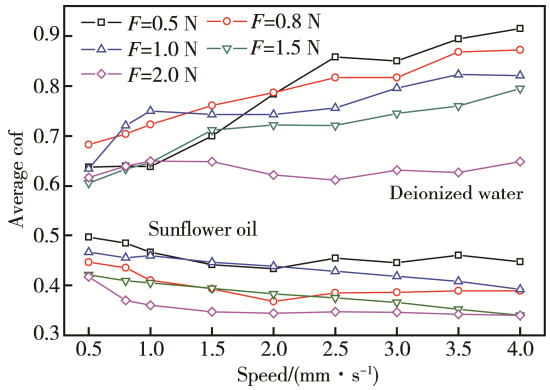


图 6　基于 0%G-CSP-TPE 试样下去离子水和葵花油的平均摩擦系数随载荷和速度的变化关系

Fig.6 Variation of average coefficient of friction of deionized water and sunflower oil with loads and speeds based on 0%G-CSP-TPE sample

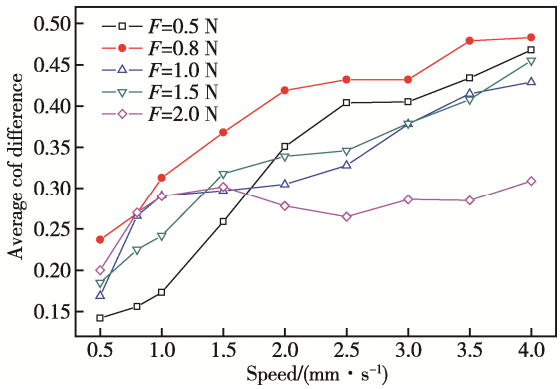


图 7　基于 0%G-CSP-TPE 试样下去离子水和葵花油的平均摩擦系数差值随载荷和速度的变化关系

Fig.7 Variation of difference between average friction coefficient of deionized water and sunflower oil with loads and speeds based on 0%G-CSP-TPE sample

2.5　G-CSP-TPE 摩擦性能

在载荷为 0.8 N、滑动速度为 4 mm/s 的条件下，去离子水和葵花油在四种 G-CSP-TPE 试样上的平均摩擦系数如图 8 所示。发现去离子水在 G-CSP 质量分数为 0%、5%、10%、15%的 G-CSP-TPE 试样上，平均摩擦系数分别为 0.872、0.78、0.761 和 0.73，这表明去离子水的平均摩擦系数随 G-CSP 质量分数的增加而减小。此外，在四种 G-CSP-TPE 试样下，葵花油的平均摩擦系数分别为 0.39、0.279、0.239 和 0.256，当 G-CSP 质量分数小于 10%时，葵花油的平均摩擦系数随 G-CSP 质量分数的增加而减小，而 15%G-CSP-TPE 试样的平均摩擦系数相较于 10%G-CSP-TPE 略有增加，这与 G-CSP-TPE 的表面润湿性能和表面粗糙度有关。随着 G-CSP 质量分数的增加，TPE 材料的亲水、亲油性降低，使得水和油的摩擦系数降低，但是 TPE 试样表面的粗糙度会增加，使两者的摩擦系数提高。

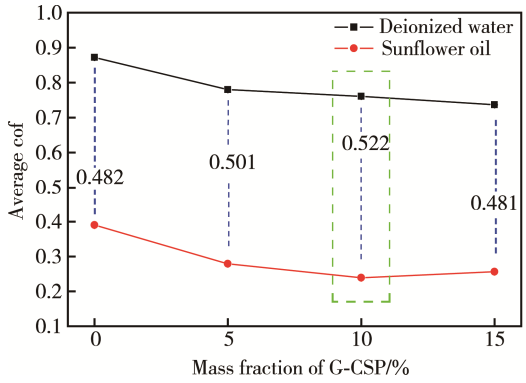


图 8　去离子水和葵花油在 TPE 试样上的平均摩擦系数随 G-CSP 质量分数的变化关系

Fig.8 Variation in average coefficient of friction of deionized water and sunflower oil on TPE samples with the mass fraction of G-CSP

通过比较得到，去离子水和葵花油在 G-CSP 质量分数为 0%、5%、10%、15%的 G-CSP-TPE 试样上，平均摩擦系数的差值分别是 0.482、0.501、0.522 和 0.481，5%G-CSP-TPE 和 10%G-CSP-TPE 试样均起到提高水和油的平均摩擦系数差值的作用，10%G-CSP-TPE 样品的作用更显著，但 15%G- CSP-TPE 样品对水油差值的改善较小。这是由于 G-CSP 对表面润湿性能和表面粗糙度的综合作用，造成 G-CSP-TPE 试样对水油摩擦系数的区分能力出现峰值。

上述研究结果表明，相较于其他三种 TPE，10%G-CSP-TPE 区分水和油摩擦系数的能力最强，将应用于脂肪含量差别较小的两种品牌的牛奶(100 mL 中脂肪含量 3.6 g 和 4.4 g)的性能评定。在载荷为 0.8 N、滑动速度为 4 mm/s 的条件下，所测试的摩擦结果如图 9 所示。Milk1 和 Milk2 的平均摩擦系数分别为 0.68 和 0.576，而对应的接触角分别为 88.89°和 85.14°，这表明牛奶中脂肪含量越高，其接触角和摩擦系数越小。这可能是由于牛奶中的脂肪含量不同，影响其在 TPE 试样上的表面润湿性和滑动摩擦性能，但从测试结果来看，平均摩擦系数的差别比接触角更显著。同时表明，10%G-CSP-TPE 能将液体介质中脂肪含

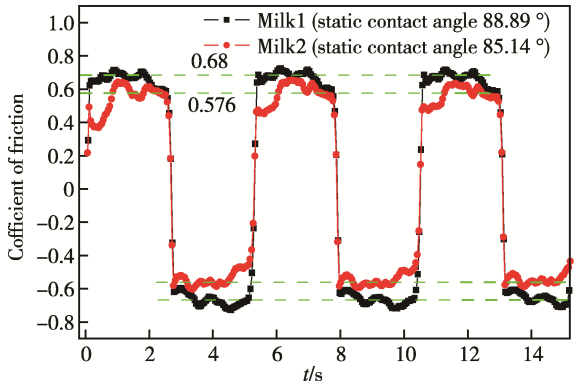


图 9　基于 10%G-CSP-TPE 试样上两种牛奶摩擦系数随时间的变化关系

Fig.9 Variation of friction coefficient of two kinds of milk with time based on 10%G-CSP-TPE sample

量的微小差别通过摩擦系数来评估，在某种程度上能够区分两种产品的口感差异，有助于新产品的研发。

3　结论

1）G-CSP 作为添加剂加入到 TPE 材料中，改变 TPE 的表面性能，即 G-CSP-TPE 的表面粗糙度和接触角与 G-CSP 的质量分数呈正相关，较高 G-CSP 含量的 G-CSP-TPE 样品产生较大的表面粗糙度和较高的接触角。

2）去离子水和葵花油的平均摩擦系数与滑动速度和载荷有关，当滑动速度超过 2 mm/s 时，其平均摩擦系数总体上与载荷呈负相关。

3）在 0.8 N 和 4 mm/s 的条件下，去离子水和葵花油的平均摩擦系数差值最大。与其他样品相比，含 10%G-CSP 的 G-CSP-TPE 样品区别去离子水和葵花油平均摩擦系数的能力更强，其研究结果有望应用于食品口感评价和功能食品研发，也为 TPE 材料的表面研究提供参考。

参考文献：

[1] OZORIO M D S, REIS E A P D, TEIXEIRA S R, et al. Sugarcane Bagasse Ash as a Reinforcing Filler in Thermoplastic Elastomers: Structural and Mechanical Characterizations[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(7): 41466.

[2] SHARUDIN R W B, OHSHIMA M. Preparation of Microcellular Thermoplastic Elastomer Foams from Polystyrene-b-ethylene-butylene-b-polystyrene (SEBS) and Their Blends with Polystyrene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 128(4): 38104.

[3] ISMAIL S M R S, CHATTERJEE T, NASKAR K. Development of Novel Polar Thermoplastic Vulcanizates Based on Ethylene Acrylic Elastomer and Polyamide 12 with Special Reference to Heat and Oil Aging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132 (41): 42655.

[4] KAKROODI A R, RODRIGUE D. Reinforcement of Maleated Polyethylene/Ground Tire Rubber Thermoplastic Elastomers Using Talc and Wood Flour[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(8): 40195.

[5] 付蒙, 陈福林, 岑兰. 热塑性弹性体的改性与应用进展[J]. 塑料科技, 2014, 42(3): 130-134.
FU Meng, CHEN Fu-lin, CEN Lan. Research Progress in Modification and Application of TPE[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(3): 130-134.

[6] 德邦 S J J, 范赫梅尔里克 J G R, 拜尔 S K, 等. 使用摩擦装置评估食物口感属性的方法: 中国, 200880101737. 5 [P]. 2008-06-04.
DEBON S J J, VANHEMELRYCK J G R, BAYER S K, et al. Method for Evaluating Food Texture Attributes Using Friction Devices: China, 200880101737. 5 [P]. 2008-06-04.

[7] 邢胜俐, 李倩倩, 陆云, 等. 苯乙烯基雾面、低 VOC、低压缩变形及耐磨热塑弹性体的制备研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(11): 24-26.
XING Shen-li, LI Qian-qian, LU Yun, et al. Preparation and Properties of Styrene-based Thermoplastic Elastomer with Matte Surface Low VOC, Low Compression Set and Good Wear Resistance[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(11): 24-26.

[8] 王彩峰. 稀土改性热塑性聚氨酯弹性体制备及其性能研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
WANG Cai-feng. Fabrication and Performance of Rare Earth Modified Thermoplastic Polyurethane Elastomer [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015.

[9] 代丽. 碳纳米管/热塑性聚氨酯超低表面能材料制备及性能研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
DAI Li. Preparation and Performance of Carbon Nanotubes/Thermoplastic Polyurethane Ultralow Surface Energy Material[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015.

[10] 余庆彦, 田洪池, 韩吉彬, 等. 热塑性弹性体的研究与产业化进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(2): 24-32.
SHE Qing-yan, TIAN Hong-chi, HAN Ji-bin, et al. Study of Thermoplastic Elastomer and Its Industrialization[J]. Progress of Materials in China, 2012, 31(2): 24-32.

[11] 于晶晶, 吴杨敏, 赵文杰, 等. 纤维增强环氧树脂复合材料抗固体颗粒流冲蚀磨损研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 29-36.
YU Jing-jing, WU Yang-min, ZHAO Wen-jie, et al. Erosive Wear Resistance of Fiber-reinforced Epoxy Resin to Solid Particle Flow[J]. Surface Technology, 2017, 46(11): 29-36.

[12] JOHN M J, THOMAS S. Biofibres and Biocomposites [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71: 343-364.

[13] PANTHAPULAKKAL S, ZERESHKIAN A, SAIN M. Preparation and Characterization of Wheat Straw Fibers for Reinforcing Application in Injection Molded

Thermoplastic Composites[J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 265-272.

[14] KHALIL H A, BHAT A, YUSRA A I. Green Composites from Sustainable Cellulose Nanofibrils: A Review [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87: 963-979.

[15] SAREENA C, RAMESAN M, PURUSHOTHAMAN E. Utilization of Coconut Shell Powder as a Novel Filler in Natural Rubber[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31: 533-547.

[16] RIMDUSIT S, DAMRONGSAKKUL S, WONGMANIT P, et al. Characterization of Coconut Fiber-filled Polyvinyl Chloride/Acrylonitrile Styrene Acrylate Blends[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30: 1691-1702.

[17] SARKI J, HASSAN S, AIGBODION V, et al. Potential of Using Coconut Shell Particle Fillers in Eco-composite Materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 2381-2385.

[18] BLEDZKI A K, MAMUN A A, VOLK J. Barley Husk and Coconut Shell Reinforced Polypropylene Composites: The Effect of Fibre Physical, Chemical and Surface Properties[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70: 840-846.

[19] BAIAN K A, PARAMBIL S M, VAKYATH S, et al. Coconut Shell Powder Reinforced Thermoplastic Polyurethane/Natural Rubber Blend-composites: Effect of Silane Coupling Agents on the Mechanical and Thermal Properties of the Composites[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(11): 6712-6725.

[20] 张志坚, 花蕾, 李焕兴, 等. 硅烷偶联剂在玻纤增强复合材料领域中的应用[J]. 玻璃纤维, 2013(3): 11-22.
ZHANG Zhi-jian, HUA Lei, LI Huan-xing, et al. Use of Silane Coupling Agents in Glass Fiber Reinforced Composites[J]. Fiber Glass, 2013(3): 11-22.

[21] 罗霞, 俞科静, 王梦蕾, 等. 硅烷偶联剂对玻璃纤维/聚氨酯复合材料性能的影响研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(8): 81-83.
LUO Xia, YU Ke-jing, WANG Meng-lei, et al. The Influence of Silane Coupling Agent on Property of Glass Fiber/Polyurethane Composite[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(8): 81-83.

[22] 许惠英, 陈雪松, 李成平. 壳聚糖与聚硅氧烷接枝共聚的研究[J]. 浙江树人大学学报, 2006, 6(3): 27-30.
XU Hui-ying, CHEN Xue-song, LI Cheng-ping. Study of Graft Copolymerization of Chitosan and Polysiloxane[J]. Journal of Zhejiang Shuren University, 2006, 6(3): 27-30.

[23] GWON J G, SUN Y L, DOH G H, et al. Characterization of Chemically Modified Wood Fibers Using FTIR Spectroscopy for Biocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(6): 3212-3219.

[24] TSAO C H, HSIAO Y H, HSU C H, et al. Stable Lithium Deposition Generated from Ceramic-cross-linked Gel Polymer Electrolytes for Lithium Anode[J]. Acs Applied Materials and Interfaces, 2016, 8(24): 15216.