

石墨烯对 Al_2O_3 / 聚酰亚胺薄膜力学及介电性的影响

李胜利¹, 刘洋¹, 翁凌¹, 王家宁¹, 王子龙¹, 宋伟¹, 王暄²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要: 为了提高聚酰亚胺(Polyimide, PI)薄膜的综合性能,使其能够在实际中进行应用。本研究通过两组对比试验研究氧化石墨烯和纳米 Al_2O_3 颗粒的添加对 PI 薄膜性能的影响。一组是在 PI 薄膜中添加质量分数分别为 0%、0.5%、1% 的纳米 Al_2O_3 颗粒,另一组是在质量分数为 1% Al_2O_3 / PI 薄膜基础上添加质量分数分别 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 的氧化石墨烯,然后分别对不同组分薄膜的热稳定性、拉伸强度、断口形貌、介电频谱、击穿场强等进行表征。研究结果表明: PI 中纳米 Al_2O_3 颗粒含量的增加使薄膜在 400℃ 以上时的热稳定性明显降低,氧化石墨烯的添加对于 Al_2O_3 / PI 薄膜的热稳定性起到显著改善的效果; 适量氧化石墨烯的添加有助于复合薄膜力学性能的提升; 氧化石墨烯的添加使复合薄膜介电常数增大,但对薄膜的电导率影响较小。薄膜介电损耗正切值随氧化石墨烯含量的增大先减小后增加,在氧化石墨烯质量分数为 0.6% 时最小。此外,氧化石墨烯的添加对 Al_2O_3 / PI 薄膜的击穿场强起到显著提升的效果。

关键词: 聚酰亚胺薄膜; 氧化石墨烯; 复合薄膜; 抗拉强度; 介电性能

DOI: 10.15938/j.jhust.2020.01.020

中图分类号: TQ316.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2020)01-0134-06

Effects of Graphene on the Mechanical and Dielectric Properties of Al_2O_3 / Polyimide Films

LI Sheng-li¹, LIU Yang¹, WENG Ling¹, WANG Jia-ning¹, WANG Zi-long¹, SONG Wei¹, WANG Xuan²

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Engineering Dielectric and Application of Key Laboratory of Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive performance of Polyimide (PI) film in practice, the comparison tests were conducted to study the effects of graphene oxide and Al_2O_3 nanoparticles on the performance of PI films. One group added Al_2O_3 particles with mass fractions of 0%, 0.5%, and 1% to the PI film. The other group added graphene oxide with mass fractions of 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, and 1% to the 1% Al_2O_3 / PI film. The thermal stability, tensile strength, fracture morphology, dielectric spectrum, and breakdown field strength of the different composition films were characterized. The results show that the increase of Al_2O_3

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51604090); 黑龙江省自然科学基金(E2017050); 黑龙江省高校创新人才培养计划(UNPYSCT-2015042)。

作者简介: 李胜利(1992—),男,硕士研究生;

翁凌(1979—),男,博士,副教授,博士研究生导师。

通信作者: 刘洋(1985—),男,博士,副教授,硕士研究生导师, E-mail: lyang805@163.com。

nanoparticle content in PI leads to a significant decrease in the thermal stability of the film above 400 °C. The addition of graphene oxide can significantly improve the thermal stability of Al_2O_3 /PI film. The addition of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ can increase the mechanical properties of the composite film. The addition of graphene oxide increases the dielectric constant of the composite film, but has little effect on the electrical conductivity of the film. The dielectric loss tangent of the film decreases first and then increases with the increase of graphene oxide content, and it is the smallest when the graphene oxide mass fraction is 0.6%. In addition, the addition of graphene oxide significantly improves the breakdown field strength of the Al_2O_3 /PI film.

Keywords: polyimide film; graphene; composite films; tensile strength; dielectric properties

0 引言

随着电子技术的发展,电子系统进一步向着微小化、集成化和多功能化的方向发展^[1-3]。与硬性基板相比,柔性基板(FPC)技术形状多变,可以通过弯曲折叠等形式形成立体结构,完成3D互联,有利于各种产品的结构配合。为了研究在服役状态下对其形状的改变,从而更加适应未来多功能、高灵活性的应用需求,广泛应用于航天、军事、消费电子等相关产业^[6-12]。

柔性印刷线路板所采用的基材以聚酰亚胺(PI)和铜(Cu)为主。其中Cu主要作为线路板中的电路支撑,PI用于基板绝缘^[13-14]。由于柔性电路板中的PI层厚度较薄,在确保其具备足够绝缘能力的同时提升其高温稳定性、力学性能、抗电击穿能力具有十分重要的意义。通过在PI薄膜中添加其它组分是改善PI性能的最佳手段。Wu等^[1]在PI薄膜中添加了不等比例的 Al_2O_3 颗粒,研究表明 Al_2O_3 颗粒的添加对PI薄膜的热稳定性、力学性能起到改善效果。Xie等^[18]在PI中添加平均直径约为2 μm 的氮化铝(AlN)颗粒,当添加比例达到30 wt%时,PI热导率由0.22 W/mK增大至0.8 W/mK。此外,自2004年Novoselov和Geim等^[19]发现石墨烯以来,有关石墨烯材料的制备工艺、性能、应用等相关研究取得显著进展。石墨烯具有优异的导电、导热能力,有悖于PI的绝缘需求。通过化学转化生成氧化石墨烯(GO)可显著降低石墨烯导电性能,使其作为添加组元优化PI性能成为可能。

本研究以二氨基二苯醚(ODA)和均苯四甲酸二酐(PMDA)为原料,通过机械共混法添加不同质量分数的纳米 Al_2O_3 颗粒和氧化石墨烯制备GO/

Al_2O_3 /PI复合薄膜。对GO/ Al_2O_3 /PI复合薄膜进行热失重(TGA)测试,拉伸测试,电击穿测试和介电性能测试,系统分析氧化石墨烯的引入对复合薄膜力学及介电性能的影响规律。

1 实验材料及方法

本实验所用的材料为4,4'-二氨基二苯醚(ODA),化学纯;均苯四甲酸二酐(PMDA);N,N-二甲基乙酰胺(DMAc),分析纯;直径为30 nm的 Al_2O_3 颗粒;氧化石墨烯。

将称好的ODA、PMDA、 Al_2O_3 及氧化石墨烯放入烘箱中,在温度100℃条件下干燥12 h;将ODA取出超声震荡2 h之后搅拌30 min,然后将称好的PMDA粉末分多次加到其中,当ODA与PMDA比例为1:1.03时,PMDA粉末即加入完毕。当出现爬杆时,即得PAA混合溶液,用铺膜机将其在非常干净的玻璃板上铺展成厚度均匀的薄膜;将薄膜放入烘箱中,进行聚酰胺酸热亚胺化反应,亚胺化温度为80℃时升温,每升温40℃亚胺化0.5 h,最后到320℃保持2 h制得薄膜。本文采用原位聚合法制备出了8种纳米复合薄膜,其中3种是质量分数分别为0% Al_2O_3 、0.5% Al_2O_3 、1% Al_2O_3 的 Al_2O_3 /PI纳米复合薄膜,剩下5种是在 Al_2O_3 质量分数恒为1%时,添加质量分数分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1%氧化石墨烯的薄膜,制备的薄膜平均厚度为20 μm 。

借助差示扫描量热仪(Pyris Diamond DSC),对薄膜热稳定性进行表征,测试温度为-170℃~725℃。同时采用AGS-J10装置对制备的复合薄膜进行拉伸测试,拉伸试验速度为200 mm/min。借助SEM及EDS对薄膜断口形貌与成分进行表征。通

过使用德国 Novocontrol 公司的 Alpha-A 型宽频介电谱分析仪对聚酰亚胺复合薄膜的介电谱进行测量,测试范围为 $10 \sim 10^7$ Hz。利用桂林电器科学研究所生产的 HT-400 型击穿电压测试仪对材料进行介电强度测试,测试电压分别为交流 100 kV 和直流 100 kV。

2 测试结果与分析

2.1 氧化石墨烯对复合薄膜热稳定性的影响

采用热重分析对聚酰亚胺复合薄膜的热稳定性进行分析,结果如图 1 所示。

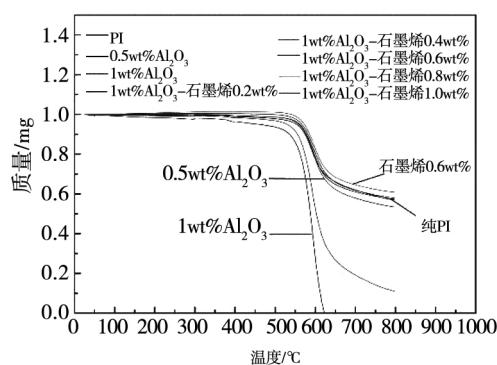


图1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜的热重分析图

Fig. 1 Thermogravimetric analysis of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ composite films

从图 1 可以看出,随着纳米 Al_2O_3 含量的增加, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜在温度范围为 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 时出现明显的失重现象,薄膜热稳定性明显降低。随着 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜中氧化石墨烯含量的增加,薄膜的热稳定性显著提升。对于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜而言,纳米 Al_2O_3 为薄膜中的高密度组元。高温状态下薄膜中的聚酰亚胺分解导致 Al_2O_3 颗粒失去与薄膜中高分子组元之间的连接,进而从复合薄膜中脱离,导致薄膜出现明显的热失重现象。同时,这一现象随着 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜中 Al_2O_3 含量的增加而加剧。当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜中添加氧化石墨烯组元后,氧化石墨烯在薄膜中的弥散分布增强了 Al_2O_3 在薄膜中的“钉扎”效果。从而使复合薄膜的高温热稳定性得到改善。

2.2 复合薄膜的显微结构

图 2 为 Al_2O_3 的质量分数分别为 0%、0.5%、1% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜断面 SEM。由图可知,随着纳米 Al_2O_3 含量增加时,出现 Al_2O_3 团聚现象,但

是其分散相对均匀。图 3 为在 Al_2O_3 质量分数恒为 1%, 分别添加 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 的氧化石墨烯的断面 SEM。图中氧化石墨烯是以片状出现,而且随着氧化石墨烯含量的增加,呈片状的石墨烯数量越来越多,而 Al_2O_3 的团聚现象减少,分散均匀。

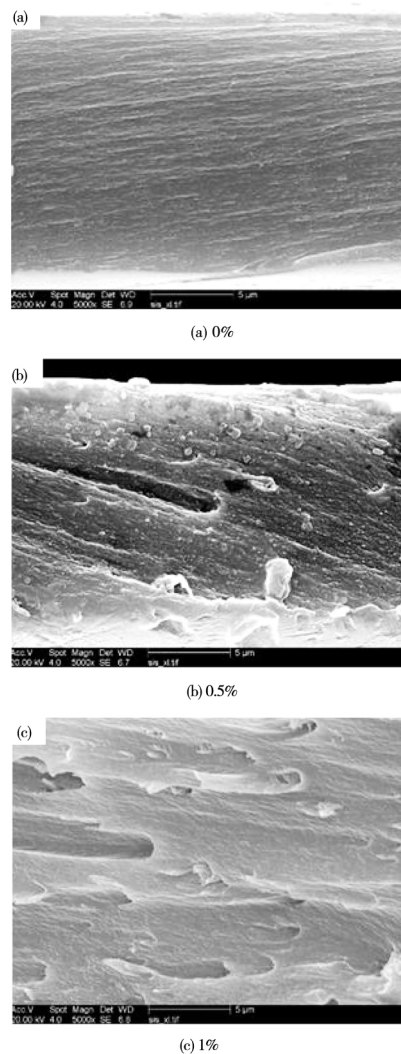
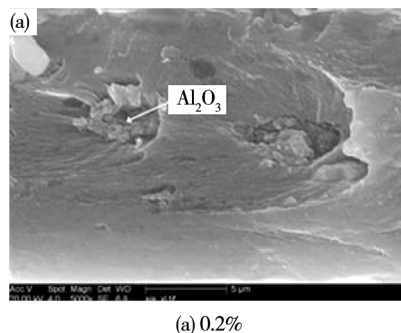
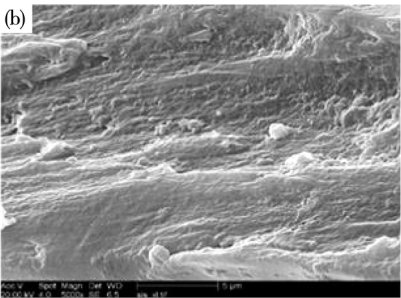


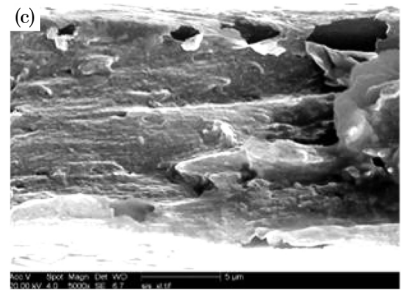
图2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜添加不同含量的 Al_2O_3 的断面 SEM

Fig. 2 SEM of the fractures of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ film with different Al_2O_3 content

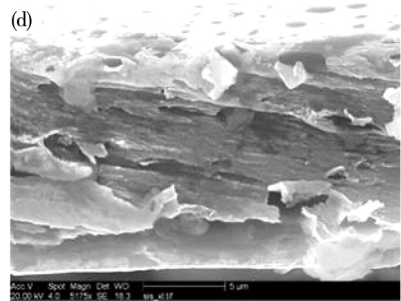




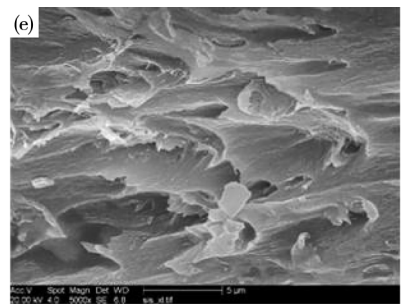
(b) 0.4%



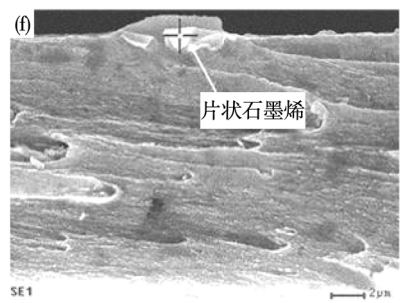
(c) 0.6%



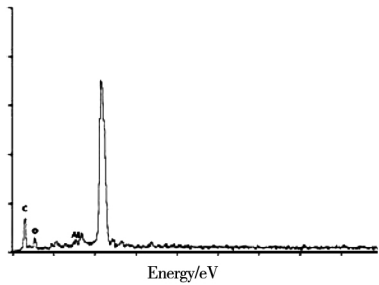
(d) 0.8%



(e) 1%



(f) 0.2%



Element	Wt%	At%
CK	69.48	75.96
OK	27.51	22.58
AlK	03.01	01.47
Matrix	Correction	ZAF

GO/ Al_2O_3 /PI断面能谱图

图 3 不同含量的氧化石墨烯添加到 Al_2O_3 /PI 复合薄膜的断面 SEM

Fig.3 SEM of the fractures of Al_2O_3 /PI film with different GO content

2.3 氧化石墨烯对复合薄膜抗拉强度的影响

复合薄膜的拉伸强度测试结果如图 4 所示。图中红色线代表纳米 Al_2O_3 质量分数恒为 1%，随着氧化石墨烯质量分数的增加，复合薄膜的抗拉强度变化曲线。黑色线代表在纯 PI 薄膜中只添加不同含量纳米 Al_2O_3 的抗拉强度变化曲线。从中可以看出，随着石墨烯含量增加，聚酰亚胺薄膜的抗拉强度先增加后降低，在石墨烯质量分数为 0.6% 时 PI 薄膜的抗拉强度最大，要远高于 Al_2O_3 /PI 薄膜的抗拉强度。由于氧化石墨烯属于高强度组元，在薄膜中添加适量的氧化石墨烯可起到弥散强化的效果。然而，当薄膜中氧化石墨烯含量继续增大时，则会导致聚酰亚胺中高分子组元之间的连接面积降低，进而影响薄膜的整体强度。可见，在进行复合薄膜性能优化时应应对氧化石墨烯添加比例进行控制。

2.4 氧化石墨烯对聚酰亚胺复合薄膜介电性能的影响

图 5 为氧化石墨烯对薄膜介电常数的影响。对于 Al_2O_3 /PI 薄膜而言，随着纳米 Al_2O_3 质量分数的增加，PI 薄膜的介电常数明显增加。吴广宁等^[2]研究表明：PI 薄膜中纳米 Al_2O_3 的添加促使 PI 分子的末端官能团与 Al_2O_3 之间纳米复合电介质的界面的形成。由于该界面导致的界面极化，使得复合材料的介电常数增加。当薄膜中氧化石墨烯含量从 0.2% 增大至 1% 时，薄膜介电常数从 4 增大至 7。当薄膜中氧化石墨烯含量介于 0.2% ~ 0.6% 之间时，

复合薄膜的介电常数低于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜; 当薄膜中氧化石墨烯含量大于 0.8% 时, 复合薄膜的介电常数高于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 薄膜。由于少量的氧化石墨烯添加可以对聚合物大分子起到缠结效果, 限制其转向, 从而降低薄膜的介电常数。然而, 随着薄膜中氧化石墨烯含量的增加, 聚合物分子与氧化石墨烯之间的界面比例相对增大, 从而促进界面极化, 使复合材料介电常数增大。

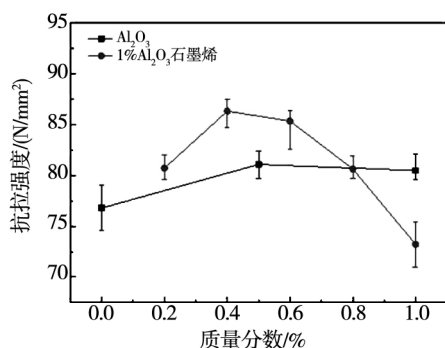


图4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜抗拉强度图

Fig. 4 Strength of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ films

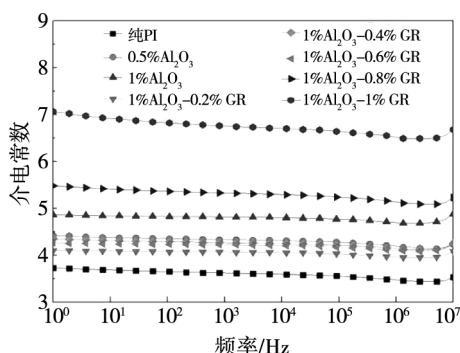


图5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜介电常数图

Fig. 5 Dielectric constant of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ films

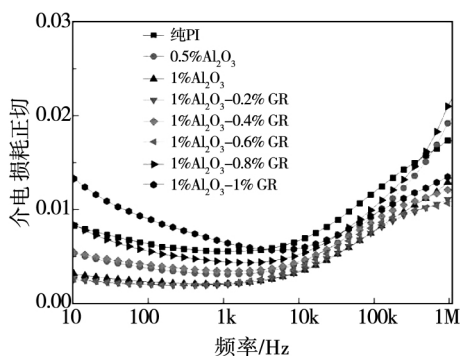


图6 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜介电损耗图

Fig. 6 Dielectric loss of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ films

图6为氧化石墨烯对薄膜介电损耗正切曲线的影响, 由图可见, 当复合薄膜中氧化石墨烯含量低于

0.8% 时, PI 薄膜中微量的纳米 Al_2O_3 及氧化石墨烯添加能够降低薄膜的介电损耗。而当复合薄膜中氧化石墨烯含量达到 1% 时, 复合薄膜在低频区的介电损耗高于纯 PI 薄膜。根据图 6 所示各组分薄膜介电常数的变化规律及其分析, 可知当复合薄膜中氧化石墨烯含量低于 0.8% 时, 氧化石墨烯的添加可以对聚合物大分子起到缠结效果, 限制其转向。因此, 由于偶极子转向极化导致的弛豫损耗降低。当复合薄膜中氧化石墨烯含量较高时, 由于界面极化导致的弛豫损耗增大。

图 7 为氧化石墨烯对薄膜电导率的作用曲线, 由图中可以看出, 纳米 Al_2O_3 及氧化石墨烯对 PI 复合薄膜在高频区则几乎没有影响, 在低频区的电导率存在微弱的影响。由图可见, 本研究中的几种复合薄膜在 10 Hz 时的电导率均介于 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ S/m}$ 之间。可见 PI 薄膜中少量的纳米 Al_2O_3 及氧化石墨烯添加对薄膜的绝缘性影响微弱。

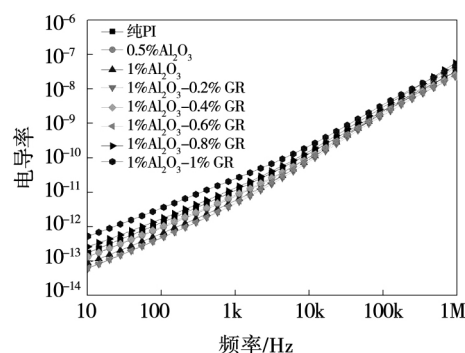


图7 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜电导率图

Fig. 7 Electrical conductivity of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ films

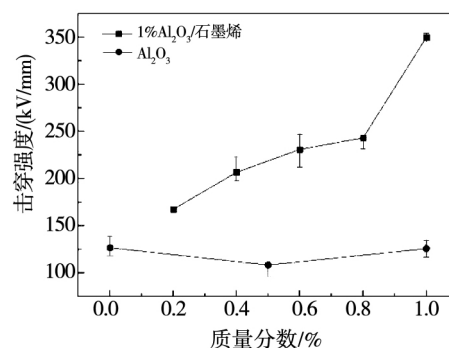


图8 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 和 $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ 复合薄膜击穿电压图

Fig. 8 Breakdown voltage of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ and $\text{GO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PI}$ films

图 8 为单纯添加不同质量分数的纳米 Al_2O_3 和在纳米 Al_2O_3 质量分数恒为 1%, 不同氧化石墨烯质量分数下二者对聚酰亚胺薄膜击穿场强的对比图。由图可知, 在只改变纳米 Al_2O_3 质量分数的条

件下,PI 薄膜的击穿场强在纳米 Al_2O_3 质量分数为 1% 时达到最大;当纳米 Al_2O_3 保持不变的情况下,随着氧化石墨烯质量分数的增加,PI 薄膜的击穿场强增加,并且在氧化石墨烯质量分数为 0.6% ~ 1% 的范围内时达到最大值。由于氧化石墨烯具有优异的电子传递能力,复合薄膜中氧化石墨烯的添加可有效避免电场作用下局部电荷的聚集,从而使复合薄膜的抗击穿性能得到改善。

3 结 论

1) Al_2O_3 /PI 薄膜中氧化石墨烯弥散分布增强了纳米 Al_2O_3 在薄膜中的钉扎效果,使复合薄膜的高温热稳定性得到改善。

2) 薄膜中添加适量的氧化石墨烯起到弥散强化的效果,促进薄膜抗拉强度的提升。对于本研究采用的 Al_2O_3 /PI 薄膜而言,当薄膜中氧化石墨烯含量为 0.6% 时其抗拉强度最大。

3) 当复合薄膜中氧化石墨烯含量介于 0.2% ~ 0.6% 时,复合薄膜介电常数及介电损耗低于 Al_2O_3 /PI 薄膜;当石墨烯含量为 0.8% ~ 1% 时,复合薄膜介电常数及介电损耗高于 Al_2O_3 /PI 薄膜。

4) 复合薄膜中氧化石墨烯的添加可有效避免电场作用下局部电荷的聚集,从而使复合薄膜的抗击穿性能得到改善,当薄膜中氧化石墨烯含量为 1% 时其击穿电压值最大。

参 考 文 献:

- [1] CHO J, GOODSON K E. Thermal Transport: Cool Electronics [J]. Nature Materials, 2015, 14(2): 136.
- [2] 孙涛,张颜,郭建,等. 石墨烯/氧化锡复合透明导电薄膜的制备及性能 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(1): 114. SUN Tao, ZHANG Yan, GUO Jian, et al. The Preparation and Property of Graphene /Tin Oxide Transparent Conductive Film [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(1): 114.
- [3] MATIVENGA M, GENG D, KIM B, et al. Fully Transparent and Rollable Electronics [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(3): 1578.
- [4] INUI T, KOGA H, NOGI M, et al. A Miniaturized Flexible Antenna Printed on a High Dielectric Constant Nanopaper Composite [J]. Advanced Materials, 2015, 27(6): 1112.
- [5] BETTINGER C J. Materials Advances for Next-generation Ingestible Electronic Medical Devices [J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(10): 575.
- [6] LEONG W C, ABDULLAH M Z, KHOR C Y. Application of Flexible Printed Circuit Board (FPCB) in Personal Computer Motherboards: Focusing on Mechanical Performance [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(4): 744.
- [7] 张明艳,程同磊,高升,等. 碳纳米管的表面处理对 MWNTs /PI 杂化薄膜拉伸性能的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(4): 87. ZHANG Mingyan, CHENG Tonglei, GAO Sheng, et al. The Effect on Tensile Property of Surface Treatment of MWNTs on MWNTs/PI Films [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(4): 87.
- [8] 陈昊,范勇,杨瑞霄,等. 聚酰亚胺薄膜绝缘材料耐电晕机理研究 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5): 28. CHEN HAO, FAN Yong, YANG Ruixiao. Study on the Corona-resistance Mechanism of the Polyimide Films [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(5): 28.
- [9] KIM U, LEE D-H, YOON W J, et al. Force Sensor Integrated Surgical Forceps for Minimally Invasive Robotic Surgery [J]. Robotics, IEEE Transactions on, 2015, 31(5): 1214.
- [10] YOUN B D, CHOI S, OH H, et al. An Empirical Model to Describe Performance Degradation for Warranty Abuse Detection in Portable Electronics [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015.
- [11] 徐庆玉,范和平,王洛礼. 低热膨胀聚酰亚胺研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(6): 29. XU Qingyu, FAN Heping, WANG Luoli. Progress of Polyimide with Low Thermal Expansion Coefficient [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2002, 18(6): 29.
- [12] KIM K-R, CHO J-H, LEE N-Y, et al. High-precision and Ultra-fast UV Laser System for Next-generation Flexible PCB Drilling [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 38: 107.
- [13] PENG J-Y, LU M S. A Flexible Capacitive Tactile Sensor Array With CMOS Readout Circuits for Pulse Diagnosis [J]. Sensors Journal, IEEE, 2015, 15(2): 1170.
- [14] HARR K-M, KIM S-C, KIM Y-M, et al. Development of Chip-on-flex Bonding Using Sn-based Bumps and Non-conductive Adhesive [J]. Microelectronics Reliability, 2015, 142: 92.
- [15] HSU S C, WHANG W T, HUNG C H, et al. Effect of the Polyimide Structure and ZnO Concentration on the Morphology and Characteristics of Polyimide /ZnO Nanohybrid Film [J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2005, 206(2): 291.
- [16] DAMACEANU M, CONSTANTIN C P. The Chronic and Electrochemical Response of CoCl_2 -Filled Polyimide Materials for Sensing Applications [J]. Sensors & Actuators: B. Chemical, 2016, 234: 549.
- [17] WU J, YANG S, GAO S, et al. Preparation, Morphology and Properties of Nano-sized Al_2O_3 /Polyimide Hybrid Films [J]. European Polymer Journal, 2005, 41(1): 73.
- [18] XIE S-H, ZHU B-K, LI J-B, et al. Preparation and Properties of Polyimide/Aluminum Nitride Composites [J]. Polymer Testing, 2004, 23(7): 797.
- [19] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [J]. science, 2004, 306(5696): 666.
- [20] 吴广宁,刘洋,罗杨,等. 方波脉冲下纳米氧化铝掺杂对聚酰亚胺介电性能的影响 [J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1929. WU Guangning, LIU Yang, LUO Yang, et al. Influences of Nano-alumina on the Dielectric Property of Polyimide Under the Condition of Square Impulses [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1929.

(编辑: 温泽宇)