高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

基于单体直接合成的聚酯杂化材料的结构与性能

李岩潼[1]，梁倩倩[2,3]，何　利[1]，龙欣怡[1]，
张迦宇[1]，李佳乐[1]，孙　囡[1]，张全平[1]
（1. 西南科技大学环境友好能源材料国家重点实验室/材料与化学学院，绵阳 621010；
2. 四川大学高分子材料工程国家重点实验室/高分子科学与工程学院，成都 610065；
3. 四川东材科技集团股份有限公司，绵阳 621030）

摘要　聚合物杂化材料中掺杂少量无机组分会显著提升材料的力学和介电储能等物理性能. 溶液共混等传统加工策略过程复杂，碳排放较高，较难规模化实施. 本文采用双原位策略从有机-无机单体直接合成出聚酯杂化材料，并利用光谱分析技术研究了有机-无机单体至聚酯杂化材料的分子结构变化. 结果表明，聚酯原位聚合与无机组分原位生长同步，且聚合物分子链和无机组分在分子尺度相互扩散，形成了典型的有机-无机杂化结构；聚酯杂化材料的拉伸强度和断裂伸长率分别从纯聚酯的58.23 MPa和17.14%提升至68.98 MPa和33.69%，介电常数约为纯聚酯的2.1倍，击穿强度从纯聚酯的235.03 MV/m上升至418.38 MV/m(100 ℃)，最终储能密度从纯聚酯的5.38 J/cm^{3}提高到10.64 J/cm^3(10 Hz)，提升了97.77%. 本文提供了一种低碳制备高性能聚酯杂化材料的策略，拓展了聚酯材料功能开发和应用新思路.

关键词　聚对苯二甲酸乙二醇酯；有机-无机杂化材料；力学性能；介电性能
中图分类号　O631；O633　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20250060

Structure and Properties of Polyester Hybrid Materials Directly Synthesized from Monomers

LI Yantong[1], LIANG Qianqian[2,3], HE Li[1], LONG Xinyi[1],
ZHANG Jiayu[1], LI Jiale[1], SUN Nan[1], ZHANG Quanping[1*]
(*1. State Key Laboratory of Environment-friendly Energy Materials, School of Materials and Chemistry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *China*;
2. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, College of Polymer Science and Engineering Sichuan University, Chengdu 610065, *China*;
3. Sichuan Dongcai Science and Technology Group Co., Ltd., Mianyang 621030, *China*)

Abstract　In polymer hybrid materials, a small quantity of inorganic components can significantly enhance physical properties such as mechanical and dielectric energy storage. However, traditional processing strategies like solution blending present complex procedures, high carbon emissions, and scalability challenges. This study employs a dual *in situ* strategy to directly synthesize polyester hybrid materials from organic-inorganic monomers, meanwhile spectroscopic analysis is utilized to investigate molecular structural evolution from monomers to the hybrid materials. The results demonstrate polyester *in situ* polymerization synchronizes with *in situ* growth of inorganic components

收稿日期：2025-02-28. 网络首发日期：2025-05-28.
联系人简介：张全平，男，博士，副教授，主要从事高分子功能材料合成与电介质薄膜方面的研究. E-mail：zhangqp@swust.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金(批准号：22309151)和四川省自然科学基金(批准号：2025ZNSFSC0343)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22309151) and the Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (No.2025ZNSFSC0343).

during synthesis. More importantly, molecular-scale interdiffusion between polymer chains and inorganic components establishes a characteristic organic-inorganic hybrid structure. Tensile strength and elongation at break increase from 58.23 MPa and 17.14% for pure polyester to 68.98 MPa and 33.69%, respectively. The dielectric constant reaches approximately 2.1 times to that of pure polyester, while breakdown strength improves from 235.03 MV/m to 418.38 MV/m at 100 ℃. Consequently, the energy storage density surges from 5.38 J/cm^3 to 10.64 J/cm^3, representing a 97.77% enhancement. This work provides a low-carbon fabrication strategy for high-performance polyester hybrid materials, which expands functional development avenues and application potential for polyester-based materials.

Keywords Polyethylene terephthalate; Organic-inorganic hybrid material; Mechanical property; Dielectric property

聚合物杂化材料的有机和无机组分在分子尺度上相互作用，展现出奇特的物理化学响应[1~3]. 目前，聚合物杂化材料主要采用溶液共混或原位合成等策略制备[4~6]. 然而，溶液共混包括聚合物合成、无机组分表面修饰、共混及溶剂去除等多重步骤，制备程序复杂，碳排放较高，特别是溶剂去除需要长时间的高温高真空处理；原位合成策略也需要无机组分表面修饰和原位聚合分步实施. 可见，溶液共混及原位合成策略制备聚合物杂化材料的过程复杂，碳排放较高，尤其是考虑到溶剂使用、去除和回收等环节，以及节能减排等发展趋势，较难规模化制备及推广应用.

聚对苯二甲酸乙二醇酯(简称聚酯，PET)具有耐高温、耐腐蚀、成本低廉、绝缘性和力学性能优良等特性，占全球塑料产能20%左右，广泛应用于包装、纺织、先进交通及电子电器等领域[7]. 本课题组[8,9]报道的双原位策略无需无机组分表面修饰、聚合物合成和共混等多重步骤，可从单体直接合成聚酯纳米复合材料. 其次，聚酯聚合条件同时也为无机组分生长提供了溶剂热环境，有利于无机组分前驱体和聚酯单体在分子尺度上相互作用，较易通过氢键、配位键或相互扩散等方式形成有机-无机杂化材料[10,11]. 即双原位策略能在分子尺度上调控聚酯体系有机无机相互作用，提供材料结构和性能调控新方法.

近年来，大量研究工作表明，引入少量无机组分便会显著提升聚合物的物理性能，从而使其具有力学、介电储能及刺激响应等多种优良性质[12~16]. 聚合物分子链和无机组分相互扩散形成了完全不同于无机组分和聚合物基体的有机-无机杂化结构，独特的界面区域引起各种奇特的物理化学响应. 双原位合成过程中，无机组分溶解于聚酯单体乙二醇中，即有机-无机组分前驱体在分子尺度上相互作用，具备杂化结构形成的基本条件. 聚合过程中有机-无机组分能通过分子间作用力相互扩散，在界面区域形成物理杂化结构，或聚酯(如主链中的醚氧原子)和无机组分(如硼酸盐中的硼氧三面体或四面体)以孤对电子和空轨道相互配位，形成化学杂化结构[10,11].

本文采用双原位策略，由单体(钡硼酸酯、乙二醇和对苯二甲酸)直接合成出聚酯杂化材料，研究了有机无-机组分分子尺度结构变化和界面杂化区域，考察了聚酯杂化材料力学、介电常数、击穿强度及储能密度等物理性能，初步探索了材料界面区域的有机-无机杂化结构与物理性能之间的关联. 此外，聚酯分子链中的C—O键比聚烯烃(如聚乙烯、聚丙烯等)中的C—C键更容易断裂，聚酯更易实现聚合物绿色循环[17,18]. 采用低碳属性的双原位策略合成高性能和多功能聚酯杂化材料有利于扩大其市场份额，也有助于解决全球日益严峻的白色污染问题[19].

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

钡基硼酸酯(BBE，A. R. 级)和乙二醇(EG，C. P. 级)、四川东材科技集团股份有限公司；对苯二甲酸(PTA，C. P. 级)、三氧化二锑(Sb_2O_3，A. R. 级)、无水乙醇(EtOH，A. R. 级)、1,1,2,2-四氯乙烷($C_2H_2Cl_4$，A. R. 级)、苯酚(PhOH，A. R. 级)、三氯甲烷(TM，A. R. 级)、氢氧化钾(KOH，A. R. 级)和溴酚蓝(BTB，A. R. 级)，成都市科隆化学品有限公司.

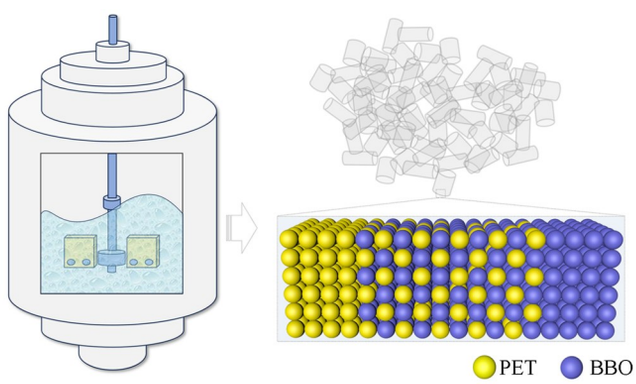
5L聚酯反应釜，扬州凯米克工程科技有限公司；薄膜双向拉伸试验机，汕头市金平区德华机械

厂；Fisher Nicolet iS50型红外光谱仪(IR)，美国Thermo公司，测试范围为4000~400 cm^{-1}；In Via型激光拉曼光谱仪(Raman)，英国Renishaw公司，激光波长为514.5 nm，波数范围为500~4000 cm^{-1}；FS5型稳态/瞬态荧光光谱仪，英国爱丁堡公司；III HD 400 MHz型核磁共振波谱仪(^{1}H NMR，^{11}B NMR)，德国Bruker Avance公司；Sigma 360型扫描电子显微镜，德国Zeiss公司；CMT5000型微机控制电子万能试验机，深圳新三思实验设备有限公司；4294A型精密阻抗分析仪，美国Agilent公司；TF 3000型铁电极化测试仪，德国GmbH aixACCT公司；RK2671AM型耐压测试仪，深圳美瑞克公司.

1.2 实验过程

1.2.1 聚酯杂化材料刻蚀 为进一步观察无机功能粒子与有机聚合物基体分子尺度的相互作用，采用苯酚/四氯乙烷混合液对聚酯杂化材料在105 ℃下进行多次刻蚀，最终获得以无机组分硼钡酸为主的固体样品(BBO).

1.2.2 超低填充聚酯杂化材料的制备 通过双原位法合成复合聚酯切片，合成路线如Scheme 1所示. 将BBE加入EG中，在160 ℃下搅拌至BBE溶解，得到BBE/EG胶体溶液. 然后将BBE/EG胶体溶液、PTA及Sb_2O_3加入聚酯反应釜中，分别经酯化(240 ℃，0.35 MPa)和缩聚(276.5 ℃，压力≤30 Pa)后得到含有不同无机组分的聚酯杂化材料(BBO/PET). BBO/PET的介电常数随无机组分含量的变化见本文支持信息图S1，合成聚酯切片样品图片与基础参数见本文支持信息图S2及表S1. 本文选择BBO质量分数为3%的BBO/PET(0.3%BBO/PET)作为研究对象，其具有最佳的介电常数.



Scheme 1 Schematic diagram of direct synthesis of polyester hybrid materials from monomers based on dual *in situ* strategy

1.2.3 冲击样条和介电薄膜的制备 将聚酯杂化材料注塑为符合GB/T 1040.1-2018要求的样条，用于力学拉伸与冲击测试；将聚酯杂化材料在150 ℃下烘干4 h，之后在275 ℃下热压制备得到厚度为100 μm的薄膜，经双轴拉伸(150 ℃预热，拉伸时间2 s，拉伸倍数2.8)得到厚度<10 μm的聚酯杂化薄膜材料，用以进行介电相关表征与测试.

1.2.4 其它性能测试及其样品制备 冲击样条与薄膜材料喷金试样照片见本文支持信息图S3和图S4. 样品的冲击、拉伸、介电、击穿及铁电性能测试方法见本文支持信息S1~S3.

2 结果与讨论

2.1 光谱分析

为了考察双原位合成过程中无机组分的分子结构变化，首先，利用核磁共振波谱技术表征了无机组分单体钡硼酸酯(BBE)及其乙二醇溶液(BBE/EG)，以及聚酯杂化材料经苯酚刻蚀所得的固体样品(BBO). 由^{1}H NMR谱图[图1(A)]可以看出，无机组分单体中与刻蚀固体样品的特征峰差异明显，材料中H的化学环境差异显著，说明无机组分在双原位合成过程中分子结构发生了重组. 由^{11}B NMR谱图[图1(B)]可以看出，无机组分单体是典型的$B(OR)_3$三面体硼酸酯配位结构，溶于乙二醇后形成五元环硼酸酯配位结构，而双原位合成之后硼酸酯配位结构并未保留，说明钡硼酸酯首先与乙二醇反应形成中间产物，然后在双原位合成过程中重新生长形成新无机组分(BBO)，且聚酯分子链在分子尺度上存在与BBO的相互作用.

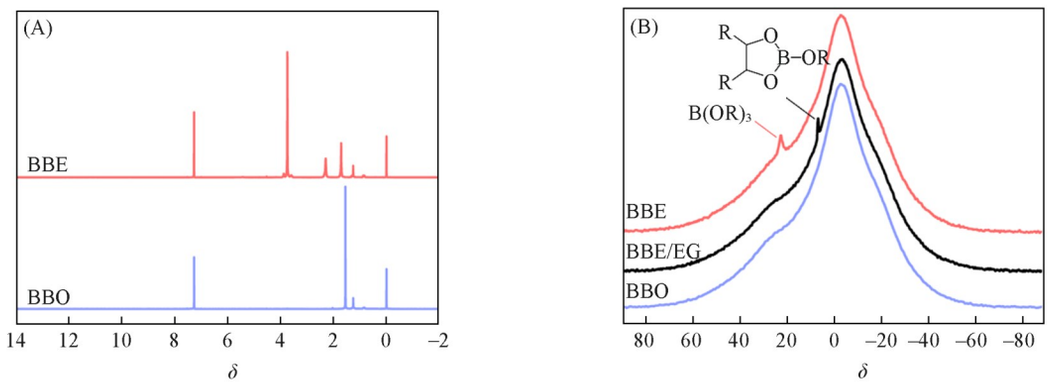


Fig. 1　^{1}H NMR(A) and ^{11}B NMR(B) spectra of inorganic components during dual *in situ* synthesis

其次，利用分子荧光光谱技术表征了无机组分单体BBE，EG，BBE/EG溶液及BBO样品[图2(A)]. 由图2(A)可以看出，BBE/EG溶液荧光强度明显高于BBE与BBO，这是因为BBE与EG反应形成五元环硼酸酯配位结构，这种配位体同时与钡原子作用形成了螯合环，从而形成刚性平面结构，增强了荧光吸收. BBO荧光吸收强度略高于BBE，且峰位置发生了红移，说明聚酯杂化材料中同样存在配位结构增强荧光吸收，也再次印证了双原位合成过程中无机组分单体先转变成中间产物，然后重新形成新的无机组分. 最后，利用拉曼光谱技术对比研究了纯聚酯和聚酯杂化材料. 由图2(B)可以看出，与纯聚酯相比，0. 3%BBO/PET的所有吸收峰强度均增加，在1130和1300 cm^{-1}处出现明显吸收峰，表明无机组分在双原位合成过程中与聚酯存在分子尺度相互作用. 结合分子荧光和核磁共振光谱数据，0. 3%BBO/PET中有机-无机组分分子尺度上的相互作用极可能诱导形成新配位结构，引起拉曼光谱信号变化.

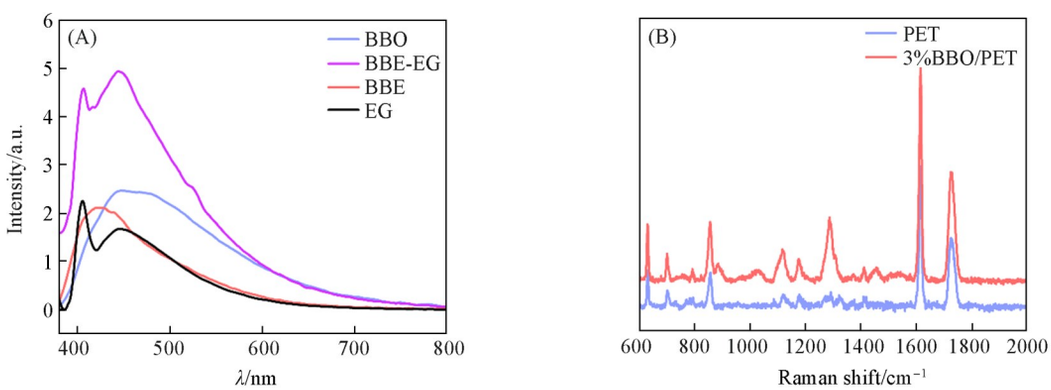


Fig. 2　Molecular fluorescence spectra of inorganic components during dual *in situ* synthesis(A) and Raman spectra of neat PET and 0. 3%BBO/PET(B)

2.2　形貌表征

SEM观测过程中，在0. 3%BBO/PET样品中很难观察到明显的无机组分，其形貌特征接近于纯聚酯[图3(A)]. 将样品进一步刻蚀处理后，TEM照片显示无机组分尺寸约为几纳米，且尺寸分布均匀

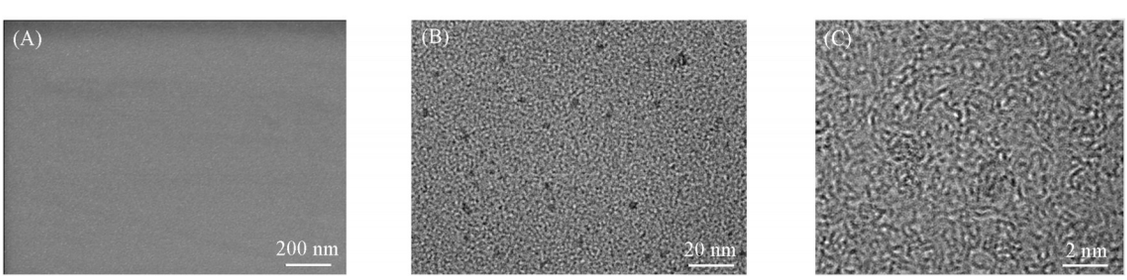


Fig. 3　SEM(A), TEM(B) and HRTEM(C) images of 0. 3%BBO/PET

[图3(B)]. 从TEM高分辨照片[图3(C)]中可以观察到无机组分呈现部分规则的晶格条纹，更重要的是，形成了不同于有机-无机组分的杂化结构. 形貌观察结果表明，在聚酯原位聚合和无机组分原位生长的双原位过程中，聚酯分子链和无机组分发生相互扩散，在界面区域形成了独特的有机-无机杂化结构，即聚酯杂化材料.

2.3 DSC曲线分析

图4为3%BBO/PET和纯聚酯的DSC曲线. 可以看出，引入少量无机组分显著影响了聚酯链的运动行为. 虽然无机组分添加量(质量分数)仅为0.3%，但是有机-无机相互扩散的杂化结构能吸附聚酯分子链，有效阻碍聚酯分子链运动，与纯聚酯相比，聚酯杂化材料表现出更高的玻璃化转变温度(T_g，℃)[图4(A)]. 同时，纳米级无机组分也能作为成核剂，与纯聚酯相比，聚酯杂化材料更早开始结晶，在升温曲线中表现出更低的冷结晶温度(T_{cc}，℃)，在降温曲线中表现出更高的熔融结晶温度(T_c，℃)[图4(B)]. 此外，高温时聚酯链运动更容易，有利于聚酯更充分结晶及形成更完善的晶体，聚酯杂化材料表现出更高的结晶度和更高的熔点(T_m，℃).

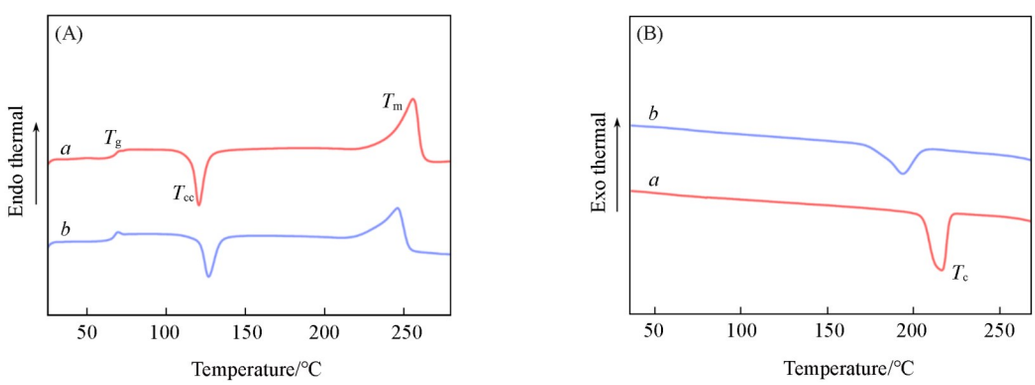


Fig. 4 DSC curves of 3%BBO/PET(*a*) and neat PET(*b*)

(A) Heating curves; (B) cooling curves.

2.4 力学性能

图5为聚酯杂化材料和纯聚酯的力学性能测试结果. 应力-应变曲线表明，聚酯杂化材料的拉伸强度和断裂伸长率分别为68.98 MPa和33.69%，分别是纯聚酯的1.18倍和1.96倍[图5(A)]. 简支梁无缺口冲击试验结果表明，聚酯杂化材料抗冲击强度为160 kJ/m^2，比纯聚酯的136 kJ/m^{2}提升了15%[图5(B)].

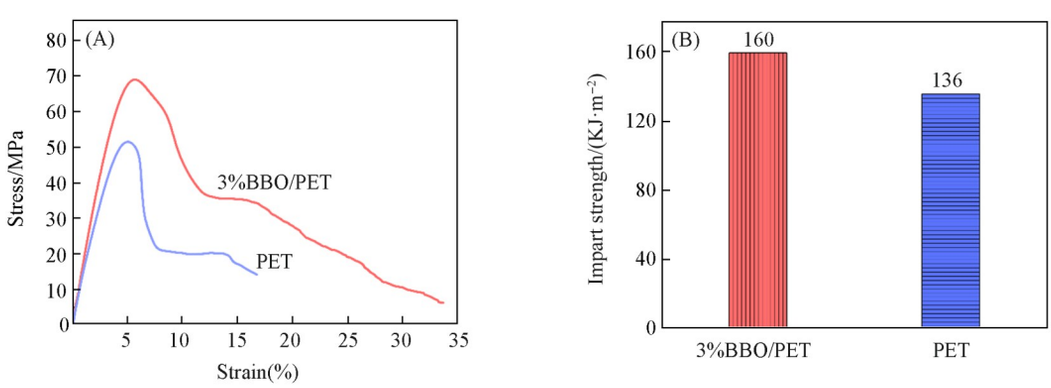


Fig. 5 Stress-strain behaviors(A) and impact properties(B) of 0.3%BBO/PET and neat PET

与纯聚酯相比，聚酯杂化材料同时表现出更优异的强度和韧性. 材料韧性的提升源自于聚酯材料中有机-无机组分相互扩散的杂化结构[图3(C)]，独特的界面区域改变了材料在断裂过程中耗散能量的模式，从主要通过化学键断裂耗散转变为通过杂化结构聚合物链拔出和伸直耗散[13]. 此杂化结构能吸附数个聚酯链，在应力加载时聚酯链从杂化结构中拔出而形成纳米纤维结构(图6)，引起能量耗散，

宏观上表现为材料具有更优异的强度与韧性，避免材料过早破坏．材料强度增强主要是因为少量无机组分作为异相成核剂加速聚酯结晶并提高了结晶度．

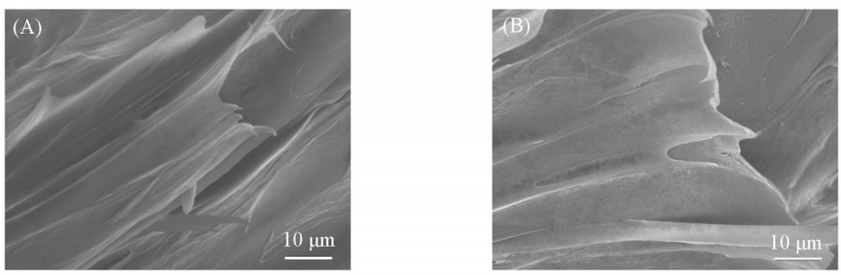


Fig. 6　SEM images of the cross-section of 3%BBO/PET(A) and neat PET(B)

2.5　介电性能

图7(A)和(B)分别示出了聚酯杂化材料和纯聚酯的介电常数和介质损耗．可以看出，3%BBO/PET的介电常数明显高于纯聚酯，当频率为1 kHz时，0. 3%BBO/PET的介电常数为6. 2，约为纯聚酯的2. 1倍[图7(A)]，这是因为无机硼酸盐配位特点是以缺电子性硼原子为核心，表现为高Lewis酸性，较易通过sp^3杂化与聚酯链中具有富电子特征的醚氧原子配位[20]，引起有机-无机组分在分子尺度相互扩散，在界面处生成配位键，形成新的偶极矩，贡献了额外偶极极化，最终显著提升介电常数．同时，两者的介电损耗随频率变化不大[图7(B)]，说明聚酯杂化材料中分子尺度有机-无机相互作用在提升介电常数的同时并未明显增加介电损耗．

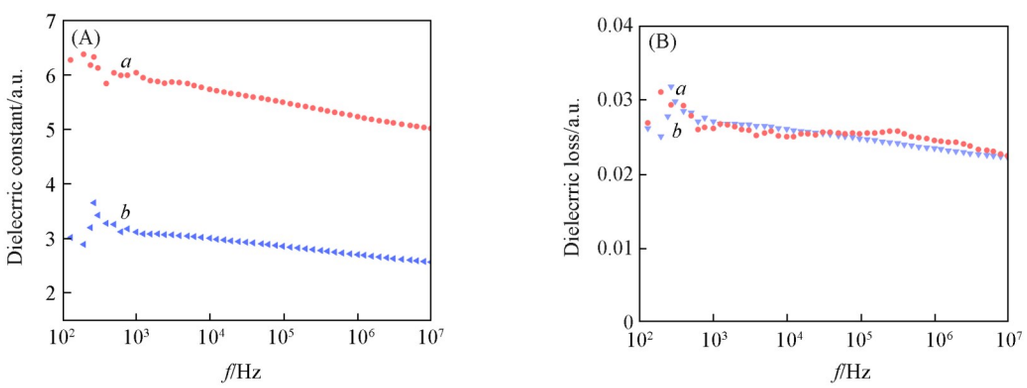


Fig. 7　Dielectric constant(A) and dielectric loss(B) of 3%BBO/PET(*a*) and neat PET(*b*)

图8(A)和(B)比较了聚酯杂化材料与纯聚酯的击穿强度(E_b，MV/m)和漏电电流．100 ℃下，聚酯杂化材料的击穿强度明显高于纯聚酯，从纯聚酯的约235 MV/m提升至约418 MV/m，提升程度达到78%[图8(A)]．漏电电流测试结果表明，聚酯杂化材料表现出更低的漏电电流，在10 MV/m下，聚酯

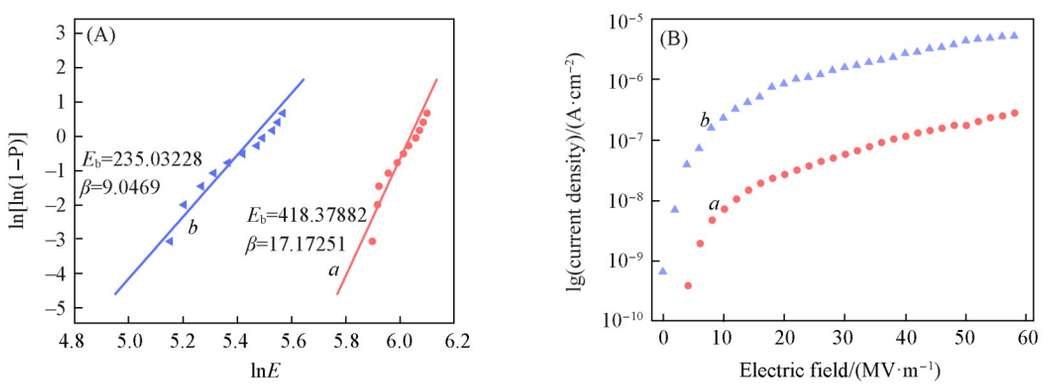


Fig. 8　Weibull breakdown strength(A) and leakage current density at 100 ℃(B) of 3%BBO/PET(*a*) and neat PET(*b*)

杂化材料漏电电流经对数运算后相较纯聚酯降低了一个数量级[图8(B)]，这是由于无机-有机界面存在介电常数的差异，从而形成了微观电容结构，导致内部存在局部的电荷积累，能够产生反向电场，抑制了载流子的迁移[21]；且界面区域配位键的形成在一定程度上也能阻碍分子链运动，减少偶极子的弛豫损耗，有效抑制载流子运动，降低漏电电流产生，从而有助于提高聚酯杂化材料的击穿强度．同时，无机组分中Ba的大原子半径使得聚酯杂化材料界面区产生畸变，形成了可以减少载流子数量、缩短载流子自由程、降低导电损失、提升击穿强度的电荷深陷阱结构[22~25]．

图9比较了聚酯杂化材料和纯聚酯的介电储能性能．聚酯杂化材料在550 MV/m下极化强度从纯聚酯的1.42 μC/cm²提升至3.13 μC/cm²，在600 MV/m时也达到2.76 μC/cm²，同时，两者剩余极化差异不大[图9(A)和(B)]．这是因为聚酯杂化材料中除了聚酯基体和无机组分之外，还存在有机-无机杂化界面相，诱导形成额外偶极子贡献了额外极化，增加了极化强度．同时，聚酯杂化材料低漏电电流及高结晶度有助于增强深陷阱程度，最终提升了击穿强度．聚酯杂化材料表现出高介电常数和高击穿强度及低漏电电流和低介电损耗，最终展现出高储能密度和高充/放电效率(图10)．

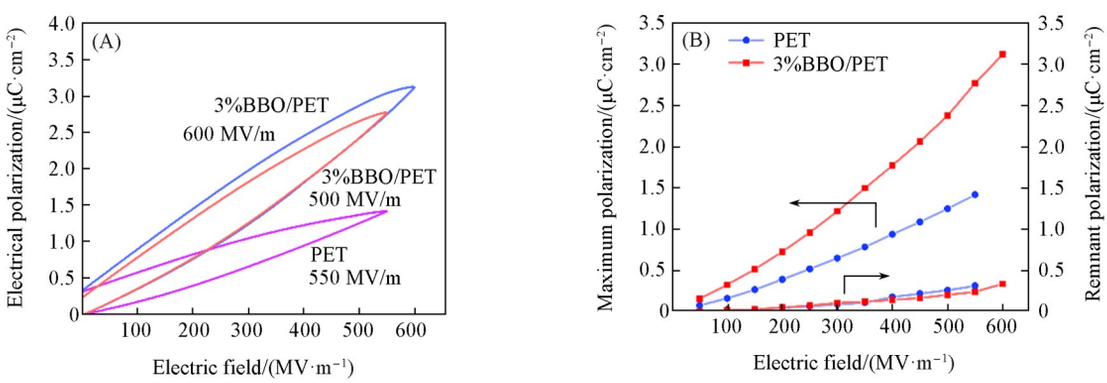


Fig. 9　*P-E* loop(A), and polarization value(B) of 3%BBO/PET and neat PET

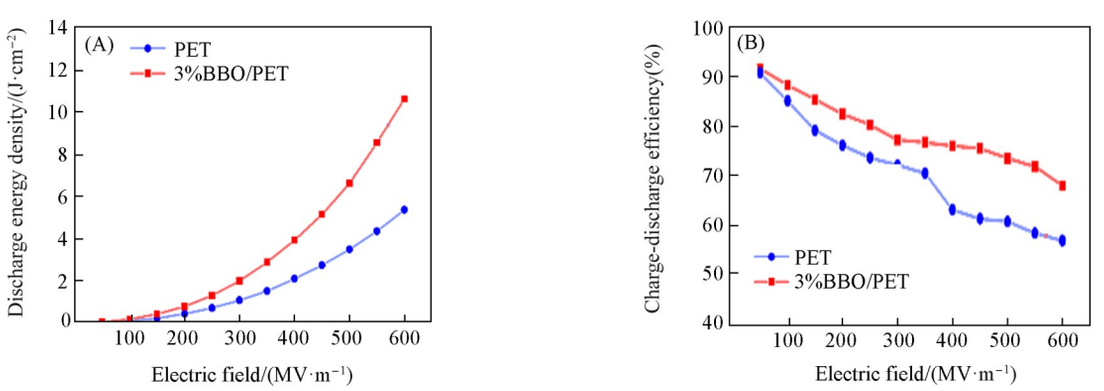


Fig. 10　Energy density(A) and energy storage efficiency(B) at various electric fields

3　结　　论

采用双原位策略从单体直接合成出高性能聚酯杂化材料．无机硼酸酯能与乙二醇反应，然后在聚酯原位聚合时重新原位生长形成新的无机组分，更重要的是，聚酯分子链和无机组分在分子尺度相互扩散，形成了典型的有机-无机杂化结构；拉伸强度和断裂伸长率分别从纯聚酯的58.23 MPa和17.14%提升至68.98 MPa和33.69%；介电常数达到6.2，约为纯聚酯的2.1倍，击穿强度在100 ℃时从纯聚酯的235.03 MV/m上升至418.38 MV/m；储能密度从纯聚酯的5.38 J/cm³上升至10.64 J/cm³，提升了97.77%．本文提供了一种高性能聚酯杂化材料的低碳制备策略，不仅能拓展聚酯材料功能开发和应用新思路，还可以推动节能减排，降低聚合物纳米复合材料加工能耗．

支持信息见 http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503./cjcu20250060.

参 考 文 献

[1] Yi J., Zou G., Huang J., Ren X., Tian Q., Yu Q., Wang P., Yuan Y., Tang W., Wang C., Liang L., Cao Z., Li Y., Yu M., Jiang Y., Zhang F., Yang X., Li W., Wang X., Luo Y., Luo X. J., Li G., Hu B., Liu Z., Gao H., Chen X., *Nature*, **2023**, *624*(7991), 295—302
[2] Hao Y., Zhang X., Jiang L., *Nanoscale Horizons*, **2019**, *4*(5), 1029—1036
[3] Zhao H., Liu S., Wei Y., Yue Y., Gao M., Li Y., Zeng X., Deng X., Kotov N. A., Guo L., Jiang L., *Science*, **2022**, *375*(6580), 551—556
[4] Bailey E. J., Winey K. I., *Prog. Polym. Sci.*, **2020**, *105*, 101242
[5] He H., Shen X., Nie Z., *Prog. Polym. Sci.*, **2023**, *143*, 101710
[6] Yang K., *Controllable Fabrication and Property Regulation of Polymer Nanocomposites with High Dielectric Constant and Low Dielectric Loss*, Shanghai Jiao Tong University, Shang Hai, **2015**(杨科. 高介电低损耗聚合物纳米复合材料的可控制备与性能调控, 上海: 上海交通大学, **2015**)
[7] Cornwall W., *Science*, 2021, *373*(6550), 36—39
[8] Luo F. Y., Li Y. T., He L., Zhang J. Y., Li J. L., Sun N., Zhang Q. P., *Acta Polym. Sinica*, **2024**, *55*(9), 1207—1215(罗非艳, 李岩潼, 何利, 张迦宇, 李佳乐, 孙囡, 张全平. 高分子学报, **2024**, *55*(9), 1207—1215)
[9] Luo F. Y., Li Y. T., Zhang J. Y., He L., Li J. L., Sun N., Li G. L., Jiang Y., Zhou K., Liang Q. Q., Guo L., Wei H. Y., Wei X. H., Zhou Y. L., Yuan J., Zhang Q. P., *Small*, **2024**, *20*(38), 2401308
[10] Deng J. X., Liu Z. Q., Pan C. Y., Liu Y., Li J., Zhao F. H., Lin L., *Inorg. Chem.*, **2019**, *58*(3), 2012—2019
[11] Yu S. J., Gu X. Y., Deng T. T., Huang J. H., Cheng J. W., Yang G. Y., *Inorg. Chem.*, **2017**, *56*(21), 12695—12698
[12] Zhao Y. X., Feng X., Feng C. X., Wang Y. H., Cheng J. X., Yu X. L., *Polym. Mater. Sci. Eng.*, **2023**, *39*(5), 173—181(赵宇霄, 冯鑫, 冯晨曦, 王玉辉, 程金雪, 于晓亮, 高分子材料科学与工程, **2023**, *39*(5), 173—181)
[13] Neumann S. E., Kwon J., Gropp C., Ma L., Giovine R., Ma T., Hanikel N., Wang K., Chen T., Jagani S., Ritchie R. O., Xu T., Yaghi O. M., *Science*, **2024**, *383*(6689), 1337—1343
[14] Zhang H., Heng T. T., Fang Z. G., Hu X., Fang L., Lu C. H., *Acta Mater. Compos. Sin.*, **2021**, *38*(7), 2107—2122(张慧, 衡婷婷, 房正刚, 胡欣, 方亮, 陆春华. 复合材料学报, **2021**, *38*(7), 2107—2122)
[15] Zhang T., Chen X., Thakur Y., Lu B., Zhang Q., Runt J., Zhang Q. M., *Science Advances*, **2020**, *6*(4), eaax6622
[16] Chen J., Cai Z. E., Jiao S. L., Zhang X., Hu Z. J., Liu M., Sun B. W., Hua X. N., *Acta Chimica Sinica*, **2023**, *81*(5), 480(陈剑, 蔡卓尔, 焦淑琳, 张祥, 胡进忠, 刘敏, 孙伯旺, 花秀妮. 化学学报, **2023**, *81*(5), 480)
[17] Simon N., Raubenheimer K., Urho N., Unger S., Azoulay D., Farrelly T., Sousa J., Asselt H., Carlini G., Sekomo C., Schulte M. L., Busch P. O., Wienrich N., Weiand L., *Science*, **2021**, *373*(6550), 43—47
[18] Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K., *Science*, **2016**, *351*(6278), 1196—1199
[19] MacLeod M., Arp H. P. H., Tekman M. B., Jahnke A., *Science*, **2021**, *373*(6550), 61—65
[20] Bull S. D., Davidson M. G., van den Elsen J. M. H., John S. F., Toby A. J., Jiang Y. B., Yuji K. F. M., Kazuo S., Zhao J. Z., Tony D. J., *Acc. Chem. Res.*, **2013**, *46*(2), 312—326
[21] Meng Z. T., Zhang T. D., Zhang C. H., Shang Y. N., Lei Q. Q., Chi Q. G., *Adv. Materials*, **2024**, *36*(52), 2310272
[22] Shahat M., Anis H. I., *IEEE Access*, **2022**, *10*, 54697—54702
[23] Li S., Min D., Wang W., Chen G., *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul.*, **2016**, *23*(5), 2777—2785
[24] Min D., Cui H., Wang W., Wu Q., Xing Z., Li S., *Compos. Sc. Techn.*, **2019**, *184*, 107873
[25] Min D., Yan C., Mi R., Ma C., Huang Y., Li S., Wu Q., Xing Z., *Polymers*, **2018**, *10*(11), 1207

(Ed.: W, K, M)