

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.028

聚合物基电介质薄膜电容器研究进展

张博钊¹, 刘志英²

(1. 西南民族大学化学与环境学院, 成都 610025; 2. 唐山市食品药品综合检验检测中心, 河北唐山 063000)

摘要: 简述了聚合物基电介质薄膜电容器的研究现状, 主要包括聚丙烯(PP)、聚酰亚胺(PI)以及聚偏二氟乙烯(PVDF)三大类。分析了PP、PI、PVDF三类电介质的介电及理化性质, 比较了不同改性手段、加工方式、结构设计等对PP、PI、PVDF电介质电性能的提高程度。对聚合物基电介质薄膜电容器的进一步发展进行了展望。

关键词: 薄膜电容器; 聚合物电介质; 聚丙烯; 聚偏二氟乙烯; 聚酰亚胺

中图分类号: TM53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0171-04

Research Process in Energy Storage Performance of Polymer Dielectric Film Capacitors

Zhang Bozhao¹, Liu Zhiying²

(1. College of Chemistry and Environment, Southwest Minzu University, Chengdu 610025, China;

2. Tangshan Food and Drug Comprehensive Inspection and Testing Centre, Tangshan 063000, China)

Abstract : The current research status of polymer-based dielectric film capacitors was briefly described, mainly including polypropylene (PP), polyimide (PI) and polyvinylidene fluoride (PVDF). The dielectric and physicochemical properties of PP, PI and PVDF dielectrics were analysed, and the enhancement of the electrical properties of PP, PI and PVDF dielectrics by different modification means, processing methods and structural design were compared. The further development of polymer-based dielectric film capacitors was prospected.

Keywords : film capacitor ; polymer dielectrics ; polypropylene ; polyvinylidene fluoride ; polyimide

“双碳”目标的提出促进了可再生能源如风能、太阳能、潮汐能的发展^[1-6]。然而,大多数可再生资源的性质都是间歇性的,这对目前工业体系的电力系统是一个巨大的挑战。为了很好地利用“绿色”能源,制造高能量密度的储能装置/设备是至关重要的。在现有的电力储能装置和设备中,每种都有其优缺点^[7-9]。能量储存系统通常可分为两类,包括各种电池和电容器。电池具有较高的能量密度,但由于其放电速度较低,功率密度也很低,这局限于电极的化学反应^[10-12]。与锂离子电池相比,电介质电容器^[13-15]具有更高的功率密度,但能量密度很低。随着对紧凑、可靠和高效电力系统的需求不断增加,大功率和高能量密度电容器是商业消费和军事系统开发的主要使用技术之一。聚合物电介质因具有质轻、高耐压、易加工成型等天然优势而备受瞩目。因此,如果能实现高能量密度聚合物电介质材料的研发,聚合物薄膜电容器将会显著减少混动汽车电力系统的体积、并减轻质量和降低成本。

电容器是三大电子元器件之一,是电子线路中必不可少

的基础元件,它可以通过快速电场诱导电介质极化来存储电能^[16-17]。电容器通常由导电板或箔片组成,这些导电板或箔片之间由一层薄薄的绝缘介质隔开,电容器的两端由电压源充电,该带电系统产生的电能存储在极化的绝缘介质和电极上分离的表面电荷中。电容器允许电能较长的充电时间内存储,然后在受控条件下按要求在很短的时间(亚微秒到数百万分秒)内释放。平行板电容器是最简单,也是最基本的电容器,几乎所有的电容器都是平行板电容器的变形。典型的平行板电容器是由一层介电层和两层导电层组成的多层结构,在没有施加外部电压的情况下,相应的电荷分布处于平衡状态。通过在电极上施加电压,会出现一个净偶极矩,从而在介电材料的两侧产生表面电荷密度。

电介质材料作为电容器的核心器件^[18],其储能特性通常用公式(1)描述,其中 U_e 为储能密度, ϵ_0 为真空介电常数(8.85×10^{-12} F/m), ϵ_r 为电介质相对介电常数, E 为电介质被施加的电场强度。

通信作者: 刘志英,正高级,从事档案管理工作

收稿日期: 2023-05-26

引用格式: 张博钊, 刘志英. 聚合物基电介质薄膜电容器研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 171-174.

Zhang Bozhao, Liu Zhiying. Research process in energy storage performance of polymer dielectric film capacitors[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 171-174.

$$U_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \quad (1)$$

可释放效率(η)同样是一个重要的储能参数,通常用公式(2)描述其中 U_{loss} 是指能量的损耗。它表示在一次充放电循环中,有多少储存的电荷能量能有效地释放。

$$\eta = \frac{U_e}{U_e + U_{\text{loss}}} \quad (2)$$

从公式(1)和(2)可以得到,对于综合性能优异的电介质材料,需要具备高的介电常数、高的耐击穿特性以及高的可释放效率。然而,高的介电常数往往导致大的损耗和低的击穿场强。因此,如何通过材料的结构与设计,更好地优化这三者之间的关系是决定电介质材料储能特性的关键。

笔者综述了最近几年关于聚丙烯(PP)、聚酰亚胺(PI)以及聚偏二氟乙烯(PVDF)电介质材料的介电及储能特性,为高性能聚合物基电介质材料的研究和发展提供参考。

1 PP类电介质

PP薄膜是工业电容器制造中使用最广泛的介电材料^[19],市场份额约为50%。PP是由丙烯重复基团的加成聚合形成的聚合物,其易形成规则的聚合物链。因此,PP是一种半结晶非极性聚合物,具有高击穿强度(>700 MV/m)、低介电损耗(<0.000 2)、优异的力学性能、几乎与频率和温度无关的介电常数以及可靠的自愈能力。更重要的是,与其它介电聚合物相比,双向拉伸PP(BOPP)制造的薄膜电容器更便宜。因此,PP的这些综合优势使其成为实际应用中薄膜电容器使用最广泛的介电聚合物。然而,PP的介电常数相对较低(小于2.2),因此能量密度在800 MV/m时仅为6 J/cm³。为了确保在实际工作条件下长期可靠运行,降低工作电压,BOPP薄膜电容器的能量密度要低得多。除此之外,BOPP的耐温性能不佳(<85 °C),高温下储能性能急剧下降,远不能满足实际的需求。因此,通过物理(共混、复合)或者化学(接枝、交联)的手段去提升介电及耐温特性是有效地提升BOPP的综合储能特性的方式。

Zhou等^[20]报道了基于PP的纳米复合材料的界面调制,该纳米复合材料在高温下显著改善了电容性能。嵌入的纳米颗粒用聚丙烯接枝马来酸酐(PP-g-MAH)层进行功能化,以更好地与PP基体结合。PP-g-MAH部分不仅通过提供深的能量陷阱来抑制高温下的导电,而且由于极性分子元素的存在,有利于提高介电常数,并结合计算模拟得到了证实。通过使用开尔文探针力显微镜的原位表征,直接检测和定量探测由调制界面引入的局部深陷阱,进一步验证了此方法的基本原理。所得聚合物纳米复合材料在400 MV/m和120 °C下显示出1.66 J/cm³的放电能量密度和大于90%的超高充放电效率,是相同条件下原始PP薄膜的615%。在复合材料体系中,填料的分散对复合体系的性能影响很大。Xie等^[21]通过简便的高速挤出技术制备了一系列PP基纳米复合材料,以解决填料聚集和介电常数较低问题。首先,在高速挤出的帮助下,作者制备了完全均匀的PP/钛酸钡(BT)纳米复合材

料,获得了适度的内电场分布以及增强的击穿强度和能量密度。同时,作者揭示了典型PP/BT系统中填料分散与介电储能性能之间的关系。作者发现,挤出速度越高,获得的填料分散性越好,从而带来更高的击穿强度和更高的介电常数、更低的介电损耗以及更高的能量密度。之后,作者在PP中进一步引入BT/氮化硼(BN)杂化填料,以抑制高介电常数BT附近的电场畸变,提升体系的击穿强度。最终,PP/BT/BN三元体系与其它PP/高介电常数填料复合材料相比具有显著优势,在469 MV/m的低电场下具有2.82 J/cm³的高可释放能量密度。此外,受益于BN的高带隙,PP/BT/BN的介电损耗被抑制低至0.001 2。此工作可加深对介质纳米复合材料中填料分散、杂化填料和储能性能之间关系的理解。在高电场下电荷的持续注入会严重危害聚合物电介质的使用寿命。为改善这个问题,Xiong等^[22]通过化学气相沉积(CVD)将高度绝缘的聚合物层沉积在BOPP薄膜的一个或两个表面上。作者筛选具有高熔点和深陷阱能级的不同聚对二甲苯衍生聚合物,并在BOPP表面引发沉积,以显著增强PP薄膜的介电储能性能。在室温30 °C,最大储能密度为10.10 J/cm³,且可释放效率大于90%,是相同条件下原始BOPP薄膜的54倍。同时,在120 °C高温条件下,在可释放效率大于90%的情况下,储能密度高达5.52 J/cm³,是同条件下原始BOPP薄膜的42倍。鉴于CVD技术的无损性、精确的厚度控制、低温、保形沉积和易于扩展的沉积,该方法提供了一种高效、可控、温和的提高BOPP薄膜介电储能性能的方法。此外,所提出的基于CVD工艺的表面官能化方法可以很容易地扩展到各种聚合物介电薄膜。化学改性可以有效地避免复合体系的界面问题。Liu等^[23]采用光催化氧化法制备了表面接枝羟基的BOPP膜,表面接枝的BOPP薄膜有效地提高了介电常数和储能密度。这得益于BOPP表面引入C—OH基团可以形成深陷阱,从而捕获电极注入的载流子,抑制载流子迁移,因此改性膜表现出优异的储能密度和充放电效率。在85 °C时,储能密度从1.45 J/cm³增加到2.77 J/cm³。此研究结果为现代电网中制造先进电容器提供了理论参考和基本方法。在高温下,PP绝缘性能下降,因此难满足金属化薄膜电容器的应用要求。Xiao等^[24]通过长链支化改性和添加不同种类的成核剂提高PP的介电性能。添加成核剂有有机磷酸盐成核剂(NA-21)、山梨醇成核剂、稀土成核剂和酰氨基成核剂。结果表明,长链分支促进了非均相成核,抑制了分子链的运动,从而增强了高温下的介电性能。成核剂调节长链支化PP(LCBPP)的晶体形貌,导致载流子平均自由程度降低,捕集能级和捕集密度增加,因此导电性降低,击穿强度提高。在添加的成核剂中,NA-21对LCBPP薄膜的电性能有显著改善。在125 °C时,与PP相比,改性薄膜的击穿强度提高了26.3%,能量密度提高了66.1%。该方法为改善PP的介电性能提供了参考。

2 PVDF类电介质

PVDF由于其良好的热稳定性、抗氧化性、抗辐射性和

耐溶剂性,以及优良的压电和热释电,已广泛应用于物理、化学和工程领域。此外,由C和F原子之间的电负性差异引起的高极性C—F键会导致PVDF内部的高极化,因此PVDF具有高的介电常数(>10),这使其成为静电储能应用中具有吸引力的介电聚合物。PVDF的缺点在于较低的耐击穿特性和较低的可释放效率,近年来通过接枝改性、多层复合、共混改性等方法已明显改善PVDF基聚合物的综合储能特性。

Wang等^[25]采用溶液浇注法制备了PVDF纳米复合材料柔性薄膜,系统研究了聚乙烯吡咯烷酮(PVP)表面改性钛酸钡填料对复合薄膜介电性能和储能密度的影响。结果表明,纳米复合材料在低体积分数的钛酸钡填充下表现出增强的介电常数和改善的击穿电场强度。首先,表面改性的钛酸钡纳米复合材料的介电常数高于未处理的直接复合材料体系,并且在体积分数40%时介电常数达到33.9(1 kHz)的最大值。用体积分数5%的PVP改性的钛酸钡制备的纳米复合膜在270 MV/m时获得了5.1 J/cm³的最大储能密度,比纯PVDF高182%。体积分数5%的PVP改性的钛酸钡纳米复合材料的可释放效率在100 MV/m以下的电场下高于80.7%,并且在270 MV/m的电场下仍然高于64.6%。这种显著的介电性能的增强与钛酸钡的表面改性和顺电行为的综合作用密切相关。这一结果可能为使用表面改性陶瓷填料开发用于储能应用的陶瓷-聚合物纳米复合材料提供一条途径。Xu等^[26]通过表面转化反应和原位聚合的结合,合成了核壳结构的二氧化钛@钛酸钡@聚多巴胺纳米线(TiO₂@SrTiO₃@PDA NWs),然后掺入PVDF基体。研究表明,少量的TiO₂@SrTiO₃@PDA NWs可以同时提高纳米复合材料(NC)薄膜的击穿强度和电位移,从而提高能量储能能力。与原始的PVDF相比,质量分数5%的TiO₂@SrTiO₃@PDA NWs/PVDF NC显示出1.72倍的最大放电能量密度(198 MV/m时10.34 J/cm³,170 MV/m时6.01 J/cm³)。此外,含有质量分数5% TiO₂@SrTiO₃@PDA NWs的NC也表现出优异的充放电效率(198 MV/m时为69%)。储能性能的提高是由于其多个界面之间的分层界面极化、大长径比以及TiO₂@SrTiO₃纳米粒子的表面改性。这项研究的结果为制备具有出色放电能量密度的聚合物NC提供了指导和基础。Yu等^[27]通过雾化法构建了BTO和氧化石墨烯(GO)的核壳结构,并将其掺入PVDF基体中。高绝缘特性的GO层显著提高了复合体系的击穿强度,抑制了介电损耗,同时改善了BT填料的分散性,实现填料与基体间强的界面相互作用。研究表明,质量分数0.4%的BT@GO/PVDF薄膜在200 MV/m的电场下表现出2.9 J/cm³的高放电能量密度,比PVDF薄膜提高70%,同时保持了高的充放电效率(86%)。此外,超低含量的填料可以极大地保留聚合物的加工特性。Zhao等^[28]通过熔融共挤出工艺制备了线性甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯(MG)共聚物与PVDF的复合材料,以提高PVDF的介电和储能性能。MG的引入降低了PVDF的介电常数,抑制了介电和漏电损耗,复合材料表现出更高的击穿强度,从

纯PVDF的300 MV/m增加到PVDF/MG质量分数40%的540 MV/m。尽管MG极性较弱,但增强的击穿强度为PVDF/MG复合材料提供了优异的放电能量密度和效率,放电能量密度从3.75 J/cm³提高到9.2 J/cm³,并保持了84%的高效率。该研究为全有机复合膜提供了可行的设计思路。Zhang等^[29]通过点击化学,在聚偏二氟乙烯-三氟乙烯-三氟氯乙烯[P(VDF-TrFE-CTFE)]上引入适量聚乙烯醇,通过进一步水解产生羟基,进而在P(VDF-TrFE-CTFE)内部形成氢键网络。强氢键相互作用可以有效地提高非晶相的模量,抑制离子传导,从而提高击穿场强。同时,氢键相互作用有助于形成纳米晶体铁电畴,这导致了具有较低残余极化(300 MV/m时为0.2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$)和窄的电滞回线。当聚乙烯醇接枝物质的量分数为23%时,放电能量密度达到13.6 J/cm³和高的充放电效率(在500 MV/m时为63%)。这充分地表明,改变氢键是调节PVDF基铁电聚合物铁电性能的另一种有前途的策略。Meng等^[30]提出了一种简单的压制和折叠工艺来生产 β -聚偏二氟乙烯(β 相含量小于98%),在分子量($>534\text{ kg/mol}$)的PVDF中观察到类似弛豫的行为,而不需要任何有害气体、溶剂、电或化学处理。在压制和折叠的PVDF(670~700 kg/mol)中实现了超高能量密度(35 J/cm³)和高效率(74%),高于其他报道的聚合物基介电电容器储能性能。

3 PI类电介质

PI是一类高性能聚合物,具有优异的力学性能、良好的耐化学药品性、优越的热稳定性、低介电损耗和高击穿强度。这些特性使PI成为聚合物电介质有力的候选者。然而,低介电常数(小于3.5)是PI的最大劣势。通过与高介电常数的无机粒子复合是提升PI介电常数的有效途径。

Dang等^[31]将巨介电常数钛酸铜钙(CCTO)作为功能无机填料,热固性PI为聚合物基体,制备了具有高介电常数和良好热稳定性的功能杂化膜。当CCTO填料的体积分数为40%时,介电常数高达49(100 Hz),是纯PI基体的14倍。Xu等^[32]通过静电纺丝和热压工艺制备了具有优异介电性能的三相纳米复合材料,将多壁碳纳米管(MWCNT)均匀分散在PI基体中,并用BT颗粒(BTP)进行分离。铁电陶瓷填料BTP和导电填料MWCNT的协同增强导致介电性能显著提高。研究表明,所制备的具有体积分数40%的BTP和体积分数10%的MWCNTs负载的三相纳米复合材料在100 Hz下的介电常数高达1 061.98,同时介电损耗较低为0.23,相应的储能密度为4.773 J/cm³,是纯PI的11倍,在现代微电子领域具有广阔的应用前景。但无机填料与聚合物基体间较差的相容性是无法避免的,这通常会带来大的界面损耗,严重降低可释放效率,通过全有机复合策略可以较好地改善这一问题。Ahmad等^[33]提出了一种以聚对二甲苯(Py)为外层,PI为内层,并结合化学气相沉积聚合技术方法制备了厚度可调的全有机夹层结构的Py/PI/Py复合薄膜。全有机薄膜材料界面优异的附着力使得复合薄膜结合了两种聚合物的优点,耐压和介电性能同步提高,最终当Py层厚度为1 μm 时,复合薄

膜在 460 MV/m 的电场下获得 4.72 J/cm^3 的优异储能密度,同时保持高的可释放效率。与复合改性对比,化学接枝能更好地从分子角度调控材料的结构与性能。Wu 等^[34]通过原位共聚方法成功制备了含有苯胺三聚体(ACAT)共轭结构的 PI 薄膜。ACAT 共轭结构的存在促进了 PI 分子链的偶极矩和载流子迁移率,改善了电子极化,从而提高 ACAT-PI 膜的介电性能。随 ACAT 物质的量增至 5 mol, ACAT-PI 的介电常数从 PI 的 3.6 增至 7.4。在 426 kV/mm 的电场下,具有物质的量分数为 5% 的 ACAT 的 PI 膜表现出 3.6 J/cm^3 的最大能量密度,比原始 PI (450 kV/mm 时为 3.0 J/cm^3) 高约 20%,比 BOPP (640 kV/mm 时为 1.2 J/cm^3) 高约 300%。Xu 等^[35]将 4,4'-二氨基二苯醚和 3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐制备的 PI-a 和 PI-b 混合,以改善聚合物链之间的偶极极化和分子间相互作用。当 PI-a 的比例为 40% 时,PI 共混物显示出 6.68 的本征巨介电常数、低介电损耗(<0.05),最高储能密度可达 2.87 J/cm^3 ,并具有优异的力学性能和优异的热稳定性,极大拓宽了 PI 薄膜电容器的实际应用。氰基(CN)具有大的偶极矩,对介电常数的提高十分明显。Treffeld 等^[36]系统地研究一系列含有高极性 CN 的 PI 样品。介电性能表征结果表明,在 PI 结构中加入 CN 偶极子增加材料的介电常数,特别是在二胺单元的基础上。同时,3 个 CN 比 1 个 CN 能更有效地增加介电常数。因为在具有 3 个 CN 的极性 PI 样品中,二酐的偶极矩也起到重要作用。虽然含 CN 的 PI 样品实现了更高的介电常数,但是介电损耗也有所增加。这是由于 CN 偶极子直接连接到 PI 主链上,CN 的翻转带来了大的分子链内摩擦。最后作者表明,在后续的工作中尝试在 PI 侧链引入 CN,以抑制主链旋转时产生的高损耗,期望实现更高的介电常数和电能存储,同时保持低介电损耗。

4 总结与展望

聚合物基薄膜电容器具有优异的可加工性、击穿特性以及低成本,已成为目前薄膜电容器研究的热门领域。但低的介电常数以及较差的耐温性能是目前聚合物电介质的主要弊端。目前,大量研究,比如共混高介电常数的填料(BT, Cu),接枝极性基团(—OH, —CN),多层复合体系等(三明治结构)等已被用来提升聚合物电介质的综合储能性能,并取得了一定的效果,但距离理想的聚合物基薄膜电容器还相差甚远。现有聚合物基薄膜电容器亟待解决的问题如下:

(1)有机/无机复合体系中,复杂的界面问题仍然模糊不清,需要进一步深入探究其中的物理模型和影响机制。

(2)受限于聚合物的碳链骨架,聚合物的高温储能性能远远不及陶瓷材料,如何从材料设计角度突破这一限制是解决该问题的有效方法。

(3)介电常数-击穿场强-加工韧性三者相互联系和制约,如何解耦三者的关系,是制备理想聚合物基薄膜电容器的关键因素。

参考文献

[1] Wei J, et al. Progress in Polymer Science, 2020, 106. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101254.
[2] He I, et al. Journal of Energy Storage, 2022, 52:33–45.

[3] Zhang Z, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 148. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111263.
[4] Sepulveda N A, et al. Nature Energy, Nature Publishing Group, 2021, 6(5):506–516.
[5] 王旭浩. 世界环境, 2023(1):72–74. Wang Xuhao. World Environment, 2023(1):72–74.
[6] 李明达. 自动化应用, 2023, 64(5):36–38. Li Mingda. Automation Applications, 2023, 64(5):36–38.
[7] Zhang M, et al. Advanced Materials, 2008. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.10.010.
[8] Wu T, et al. Energy, Pergamon, 2022, 248:145–152.
[9] Zhang D, et al. Advanced Energy Materials, 2022, 12(19). DOI: 10.1002/aenm.202103689.
[10] Kim T, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(7):2 942–2 964.
[11] Olabi A G, et al. Energy, 2022, 254:98–103.
[12] Zhao Z, et al. Journal of Energy Chemistry, 2022, 67:621–639.
[13] Liu G, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(30): 16 384–16 394.
[14] Wu X, et al. Energy Storage Materials, 2022, 44:29–47.
[15] 王琦桐, 等. 化学进展, 2023, 35(1):168–176. Wang Qitong, et al. Advances in Chemistry, 2023, 35(1):168–176.
[16] Yan F, et al. Chemical Engineering Journal, 2021, 417. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127945.
[17] Gnonhoue O G, et al. Polymers, 2021, 13(5). DOI: 10.3390/polym13050766
[18] Li H, et al. CEnergy & Environmental Science, 2020, 13(4):1 279–1 286.
[19] 郑明胜, 等. 绝缘材料, 2022, 55(10):1–5. Zheng Mingsheng, et al. Insulation Materials, 2022, 55(10):1–5.
[20] Zhou Y, et al. Energy Storage Materials, 2020, 28:255–263.
[21] Xie Z, et al. Polymer, 2021, 214. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.10.010
[22] Xiong J, et al. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(46): 24 611–24 619.
[23] Liu H, et al. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5):1 539–1 546.
[24] Xiao M, et al. Materials, 2022, 15(9). DOI: 10.3390/ma15093071.
[25] Wang J, et al. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 587–592.
[26] Xu J, et al. Scientific Reports, 2020, 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-73884-6
[27] Yu Y, et al. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(9): 9 553–9 562.
[28] Zhao X, et al. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5(10):12 693–12 706.
[29] Zhang M, et al. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(8):8 454–8 464.
[30] Meng N, et al. Nature Communications, 2019, 10. DOI: 10.1038/s41467-019-12391-3.
[31] Dang Z-M, et al. Advanced Materials, 2009, 21(20):2 077–2 082.
[32] Xu W, et al. Materials Letters, 2014, 135:158–161.
[33] Ahmad A, et al. Macromolecular Rapid Communications, 2023, 44 (2):2200568. DOI: 10.1002/marc.202200568.
[34] Wu Z M, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(11). DOI: 10.1002/mame.202100456.
[35] Xu T, et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(7). DOI: 10.1007/s10854-022-09482-1.
[36] Treffeld I, et al. J Mater Chem A, 2014, 2(48):20 683–20 696.