

文章编号:1007-2780(2022)04-0437-07

液晶材料自组装构筑离子传输电解质

苗宗成^{1*}, 褚雅琴², 朱文庆²

(1. 西北工业大学 光电与智能研究院, 陕西 西安 710072;

2. 安徽工程大学 化学与环境工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:液晶态兼具了固态和液态的优点,作为电解质材料可以兼顾安全性、离子传输率、加工性能、电化学稳定性和界面相容性等特点,受到了越来越多的关注和研究。热致液晶材料可以通过自组装构筑完整的一维、二维或三维离子传输通道,它是电解质研究中广泛关注的领域,特别是近晶相液晶态电解质构筑的稳定二维锂离子传输通道受到了广泛关注,相较于其他液晶态电解质如柱状相、双连续立方相或离子型液晶,在离子传输率方面具有明显优势。本文主要综述了热致液晶材料作为离子电池电解质的起源、发展及其所具备的结构特点,并详细介绍了近年来液晶态电解质的国内外研究进展和应用现状。

关键词:液晶;离子电池;电解质;离子传输

中图分类号:O753⁺.2;TQ317.4;TK02 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0013

Ion transport electrolyte by self-assembly of liquid crystal materials

MIAO Zong-cheng^{1*}, CHU Ya-qin², ZHU Wen-qing²

(1. School of Artificial Intelligence, Optics and Electronics (iOPEN), Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Chemical and Environmental Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Liquid crystal has the advantages of both solid and liquid. As a battery electrolyte material, it has attracted more and more attention and research for safety, ion transfer rate, processability, electrochemical stability and interface compatibility. Thermotropic liquid crystal materials can construct complete one-dimensional, two-dimensional or three-dimensional ion transport channels through self-assembly, which is a field of widespread concern in electrolyte research. In particular, the stable two-dimensional ion transport channels constructed by smectic liquid crystalline electrolytes have received extensive attention. Compared with other liquid crystalline electrolytes such as columnar phase, bicontinuous cubic phase or ionic liquid crystals, smectic phase has obvious advantages in ion transfer rate. In this paper, the origin,

收稿日期:2022-01-13;**修订日期:**2022-02-22.

基金项目:国家自然科学基金(No. 52173263);安徽省自然科学基金(No. 2108085J11);中央高校基本科研业务费-西北工业大学(No. D5000210825)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52173263); Natural Science Foundation of Anhui Province, China (No. 2108085J11); Fundamental Research Funds for the Central Universities, Northwestern Polytechnical University (No. D5000210825)

*通信联系人, E-mail: miaozongcheng@nwpu.edu.cn

development and structural characteristics of thermotropic liquid crystal materials as ion battery electrolytes are reviewed, and the research progress and application status at home and abroad in recent years are introduced in details.

Key words: liquid crystal; ion battery; electrolyte; ion transport

1 引言

为了降低人类对矿物燃料的依赖,新能源领域迫切需求高能量和高功率密度的电池,但能量转换与存储成为制约电池发展的关键问题^[1]。对于离子电池而言,除电极材料的因素外,电解质对能量转换与存储起到最重要的影响^[2]。研发高离子传输率、高热力学稳定性和高电化学稳定性的电解质开始受到人们的关注,并逐渐成为国际研究的热点^[3-7]。由于液晶材料通过分子设计可实现电池工作温度范围具有优异的热力学和电化学稳定性,以及液晶分子中可引入碳酸亚乙酯等基团而获得对 Li^+ 、 Na^+ 等金属盐的溶解能力^[8],进而可将液晶材料应用于电解质领域的研发,获得液晶态电解质。

采用液晶这种长程有序的流体作为电解质,可在一定程度上避免传统液态电解质和固态电解质的弊端。一是液晶态电解质的可流动性克服了固态电解质离子传输率低、加工困难、与电极材料界面相容性差等显著缺点^[9],具有安全、易于加工、电化学稳定性好、界面相容性好等优点,能够与电极之间形成良好的浸润性^[9],在一定程度上可以抑制枝晶生长^[10]。二是液晶态电解质的介晶相特性克服了液态电解质易挥发、易泄露的缺点,却可以通过对自身分子结构的调整获得高的离子传输效率。

对于离子型电池而言,合适的有机电解质必须具备以下两个特征:一是含有给电子能力强的原子,如氧原子、硫原子、氮原子等,它们能与碱金属阳离子形成配位键^[11],对离子有一定的“溶解作用”,使得电解质中存在负载电荷的载体;二是液态电解质要有较低的粘度,有机固态电解质分子链要足够柔顺,电解质与碱金属阳离子配位后,在外电场或浓度差的作用下要能使载电荷离子在电解质机体中能进行扩散运动,使离子有较大的迁移率^[12]。线性聚乙烯醚(PEO)由于具有良好的盐溶解性和离子传导性被广泛用于聚合

物电解质,但是聚乙烯醚的半结晶特性导致线性聚醚在室温下较低的离子传导性^[13-14]。近年来,非聚醚材料,如聚碳酸酯和聚酯,由于具有高的碱金属离子转移数量和宽的电化学窗口而被作为电解质广泛地研究^[15]。然而,他们与 PEO 一样,在室温下都显示了低的离子传输率,这是由于他们分子链结构刚性过大的原因^[16]。

液晶态电解质可有效解决聚合物分子链刚性而引起的低离子传输率,而且可以通过在液晶分子中引入柔性基团等方法尽量减小液晶态电解质的粘度。在固体电解质发展过程中,碳酸亚乙酯衍生物的高介电常数由于对碱金属盐具有高的溶解性和良好的电化学稳定性,进而具有较高的电化学性能^[17]。适当在液晶分子中引入寡聚乙烯醚或酯基基团,寡聚乙烯醚或酯基基团不仅有助于降低液晶分子的刚性、减小粘度,而且能够辅助碳酸亚乙酯“溶解”碱金属阳离子,提高离子传输效率^[8]。

2 基于液晶材料自组装的一维传输通道

液晶态电解质在锂电池中离子传输模拟如图 1 所示。液晶材料一维传输通道主要由热力学稳定的盘装液晶自组装形成^[18],主要用于光子的传输^[19-20],这种自组装形成的相分离通道有效提高了光子传输性能^[21]。在液晶与纤维通过氢键形成聚合体相分离结构时,苯并菲分子的电荷迁移率提高了 3 倍^[18]。

同时,使用盘装液晶与离子形成的六方柱状相能够形成一维的离子传输通道,当 Li 离子与嵌段基团(如聚氧乙烯,PEO)混合可以获得纳米尺度的液晶六方柱状相^[22],PEO 在柱状相内部形成离子传输通道,对 Li 离子具有一定的溶解作用,而分子结构中的碳链则是作为离子绝缘体^[23]。除此之外,两性液晶材料与锂盐组合在一起也可以形成 1D 的离子传输通道,结果如图 2 所示^[24],

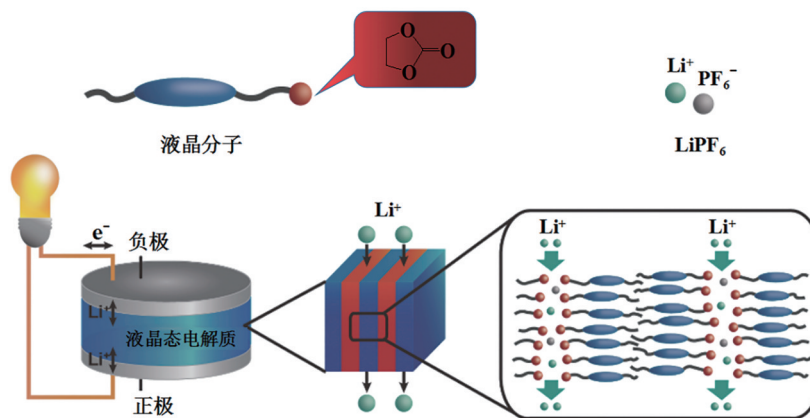


图1 液晶态电解质离子传输示意图

Fig. 1 Schematic of ion transport in liquid crystal electrolytes

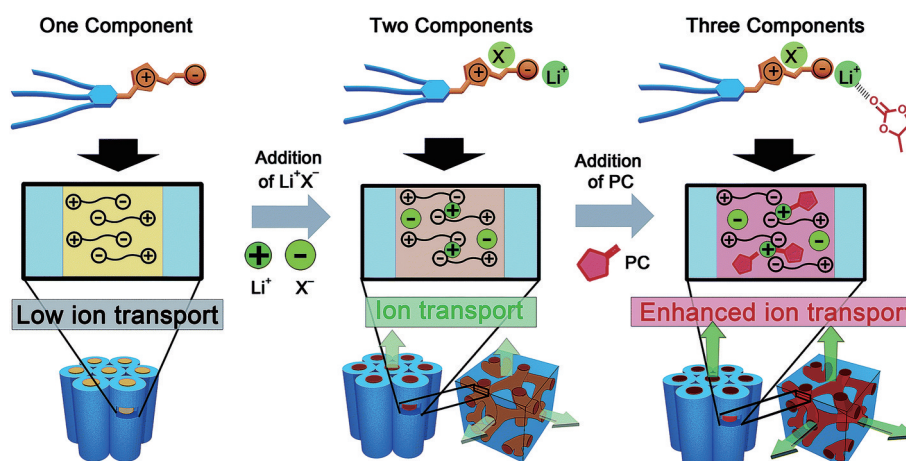
图2 基于两性离子液晶、锂盐和碳酸丙烯酯自组装形成的锂离子传输。绿色箭头表示离子传输的方向。离子通道根据其组成以黄色、橙色或红色显示,脂肪族部分以蓝色显示^[24]。

Fig. 2 Lithium ion transport based on a zwitterionic liquid crystal, a lithium salt and propylene carbonate (PC). Green arrows indicate the direction of ion transport. The ionic channels are shown in yellow, orange, or red colors depending on their composition and the aliphatic parts are indicated in blue.

该体系离子传输率可达 $6 \times 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。与此同时,使用碳酸丙烯酯作为添加剂,离子传输率可达到 $10 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。Takashi Kato 报道了一种分子结构中含有碳酸乙烯酯的扇形液晶分子,与三氟磺酸锂自组装成六方柱状相的一维各向异性离子导体(如图3所示)^[25],碳酸乙烯酯基团对于液晶分子电场取向形成六方柱状相起到了关键性的作用。在未加电场时该体系的离子传输率为 $2.2 \times 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$,当施加 $2.5 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$, 1 kHz 交流电场 90 min 后,离子传输率可增加 4.3 倍。同时,Kato 认为碳酸乙烯酯基团对于液晶作为离子型电解质材料的应用具有广泛的前景^[25]。

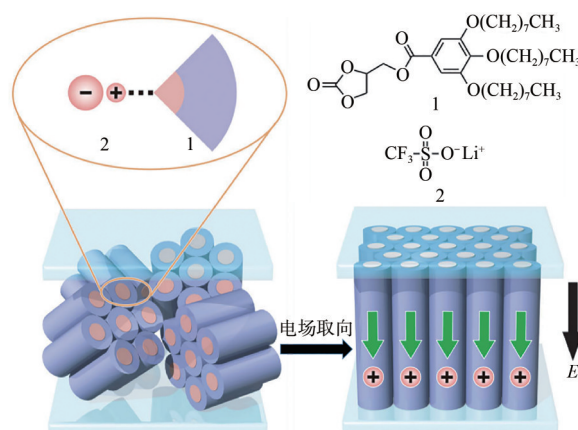
图3 柱状液晶通过电场排列一维离子传输通道^[25]

Fig. 3 One-dimensional ion transport channels through columnar liquid crystals arranging

3 基于液晶材料自组装的二维传输通道

受到传输机理的限制,单纯液晶材料一维传输通道的离子传输效率并不高,大约在 $10^{-8} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 附近^[26],这是由于离子传输通道只能沿着柱轴方向传输,传输通道少,导致传输效率低^[25]; M. O' Neill 于 2011 年报道了基于近晶相液晶自组装形成的二维传输通道的半导体电活性材料,并指出液晶自组装形成的二维传输通道可用于高效的离子传输^[27]。在二维通道中,离子进入自组装形成的层状结构中而实现有效传输^[25]。特别是近晶相液晶更倾向于形成各向同性的单畴,进而能够容易地产生长程离子传输通道^[28]。液晶作为离子型电解质材料分子结构中要包含离子传输基团,一般为聚醚或者碳酸亚乙酯基团,通过进一步的自组装形成离子传输通道,并于 LiTFSI 等锂盐复合获得锂电池电解质材料^[29]。在液晶材料中加入摩尔分数为 10% 的 LiTFSI,在 0~114 °C 的温度区间范围内呈现典型的热致近晶 A 相,离子传输率为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$,电化学稳定性达到 2 V vs. Li/Li⁺。此外,还实现了由锂金属、LC 电解质和 LiFePO₄ 或 Li₄Ti₅O₁₂ 电极组成的半电池的可逆充放电^[29]。

Kato 等人通过传统离子液体和端羟基 LC 分子的自组装,实现了二维纳米级离子传输通道,如图 4 所示^[30]。液晶的羟基部分和离子液体之间

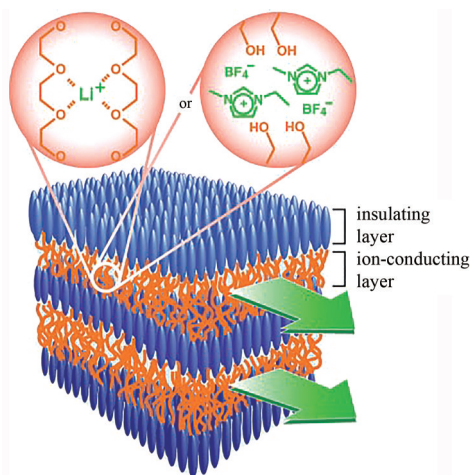


图 4 近晶相液晶材料自组装二维离子传输通道^[30]

Fig. 4 Two-dimensional ion transport channels through columnar liquid crystals arranging

的相互作用稳定了层状组装结构,这种结构在电极之间具有稳定的单畴,进而获得具有各向异性的离子导电性。在近晶相中,平行于近晶层的离子传输率达到 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$,比垂直于近晶层的离子电导率高 100~1 000 倍^[29]。因为,通过液晶自组装产生的二维离子传输通道展现出了更高的应用价值。

4 基于液晶材料自组装的三维传输通道

双连续立方液晶相构筑的三维离子传输通道,由于通道之间内部互联,即使某一单通道发生堵塞,其他通道仍然继续进行离子传输,进而具有广泛的应用^[31]。在楔形铵盐和膦盐形成具有 3D 离子通道中,即使在多畴液晶态存在的条件下仍然能够表现出良好的离子传输性能,液晶态物质的流动性能有效地促进离子传输性能^[32-36]。具有三维离子传输通道的液晶态电解质通常为高分子化合物,为聚醚嵌段液晶高分子与锂盐的混合物^[37],在低于 40 °C 的情况下离子传输率可达到 $10^{-6} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[38],Kishimoto 报道的最高可以达到 $10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[39]。Robert 等人设计了一种包含锂盐和碳酸丙烯酯基团(PC)的液晶聚合物电解质^[33],当 15% (质量分数) 0.245 mol/L LiClO₄-PC 混合于电解质中时,离子传输率可以达到 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$,如图 5 所示。Kishimoto 同时声称通过去除液晶聚合物表面层,增加 PC 基团含量或者改变液晶基团结构有助于增加离子传输率。

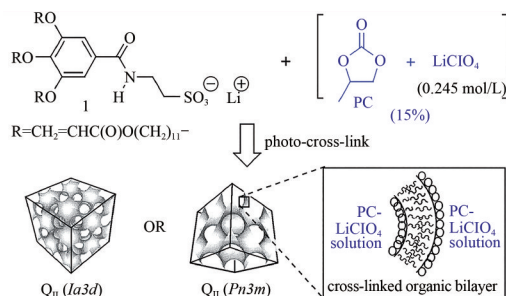


图 5 交联型液晶材料自组装三维锂离子通道^[35]

Fig. 5 Three-dimensional ion transport channels through columnar liquid crystals arranging

郑利强报道了一种反转双连续立方液晶自

组装薄膜结构,通过降低离子迁移阻力,能够对阴离子产生良好的3D离子传输通道^[40]。研究发现除了基于尺寸的排斥机制外,3D互连离子通道的曲折性对跳跃离子和扩散离子之间的渗透选择性也起着关键作用。研究表明了液晶材料自组装形成的三维传输通道在离子传输方向具有卓越潜力,同时为液晶态电解质的结构-形态-性能关系提供了一定支撑。但是这种3D通道只能够使用聚合物网络固定结构,但聚合物网络提高了电解质的加工难度^[41],而在可流动的液晶态下,3D离子传输通道会被液晶的流动性所破坏^{[[39,42]},因此液晶材料自组装的二维传输通道展现出了更好的应用前景。

5 结论与展望

本文介绍了液晶材料通过自组装构筑的离子型电池电解质的国内外研究进展,主要包含液晶材料自组装形成的一维、二维和三维的离子传输通道。液晶离子传输的通道包含能够与离子相互作用基团,使得离子能够通过与通道壁在浓度差的作用下进行离子交换,进而实现在充放电

过程中可选择的和有效的离子传输。离子在液晶中的传输可归纳为两种类型。第一种是包含能络合离子的非离子棒状液晶,例如:将冠醚、环氧乙烷、碳酸亚乙酯和二元醇基团连接到非离子棒状和楔形部分,然后与碱金属盐络合。通过离子偶极相互作用,两个分子能够自组装成纳米结构的通道形成近晶或柱状液晶相。第二种类型是离子型液晶(由阳离子、阴离子和两性离子基团组成)通过自组装形成离子纳米尺寸的通道。咪唑鎓、铵、磷、磺基甜菜碱、膦酸或磺酸等基团被设计到液晶分子中,进而能够进行离子传输。由于非离子棒状液晶材料通常粘度较低,并且由于加工的便利性形成的二维离子通道更加适用于电解质,进而展现出了更加广泛的应用前景。

虽然根据实验结果可知液晶分子和自组装结构之间的关系,但是基于分子结构预测离子传输通道的性质仍然很困难。这是因为通过分子组装形成复杂的纳米结构是由形状、分子体积比和分子间相互作用的微妙平衡决定的^[13]。因此,在液晶材料自组装电解质纳米结构的设计中,分子行为的模拟和建模研究将变得越来越重要,将会是未来重要研究方向之一。

参 考 文 献:

- [1] LI M, LU J. Cobalt in lithium-ion batteries [J]. *Science*, 2020, 367(6481): 979-980.
- [2] LIU C X, XIE X S, LU B G, *et al.* Electrolyte strategies toward better zinc-ion batteries [J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(3): 1015-1033.
- [3] LI Q, LI H S, XIA Q T, *et al.* Extra storage capacity in transition metal oxide lithium-ion batteries revealed by in situ magnetometry [J]. *Nature Material*, 2021, 20(1): 76-83.
- [4] LI W D, LEE S, MANTHIRAM A. High-nickel NMA: a cobalt-free alternative to NMC and NCA cathodes for lithium-ion batteries [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(33): 2002718.
- [5] PENDER J P, JHA G, YOUN D H, *et al.* Electrode degradation in lithium-ion batteries [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(2): 1243-1295.
- [6] HOU J B, YANG M, WANG D Y, *et al.* Fundamentals and challenges of lithium ion batteries at temperatures between -40 and 60 °C [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(18): 1904152.
- [7] MANTHIRAM A. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1550.
- [8] MARKEVICH E, SALITRA G, AURBACH D. Fluoroethylene carbonate as an important component for the formation of an effective solid electrolyte interphase on anodes and cathodes for advanced Li-ion batteries [J]. *ACS Energy Letters*, 2017, 2(6): 1337-1345.
- [9] AHMADA Z, HONG Z J, VISWANATHAN V. Design rules for liquid crystalline electrolytes for enabling dendrite-free lithium metal batteries [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(43): 26672-26680.

- [10] RONG G L, ZHANG X Y, ZHAO W, *et al.* Liquid-phase electrochemical scanning electron microscopy for in situ investigation of lithium dendrite growth and dissolution [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(13): 1606187.
- [11] LIU H, CHENG X B, HUANG J Q, *et al.* Controlling dendrite growth in solid-state electrolytes [J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(3): 833-843.
- [12] SHIVARAJA S J, GUPTA R K, KUMAR S, *et al.* Effect of functionalised silver nanoparticle on the elastic constants and ionic transport of a nematic liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(12): 1868-1876.
- [13] WANG C, WANG T, WANG L, *et al.* Differentiated lithium salt design for multilayered PEO electrolyte enables a high-voltage solid-state lithium metal battery [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(22): 1901036.
- [14] SHIN D W, GUIVER M D, LEE Y M. Hydrocarbon-based polymer electrolyte membranes: importance of morphology on ion transport and membrane stability [J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(6): 4759-4805.
- [15] SAIELLI G, MARGOLA T, SATOH K. Tuning Coulombic interactions to stabilize nematic and smectic ionic liquid crystal phases in mixtures of charged soft ellipsoids and spheres [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(30): 5204-5213.
- [16] SANO K, KIM Y S, ISHIDA Y, *et al.* Photonic water dynamically responsive to external stimuli [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12559.
- [17] MIAO Z C, WANG D, ZHANG Y M, *et al.* Asymmetrical phenyldiacetylenes liquid crystalline compounds with high birefringence and characteristics of selective reflection [J]. *Liquid Crystals*, 2012, 39(10): 1291-1296.
- [18] MIZOSHITA N, MONOBE H, INOUE M, *et al.* The positive effect on hole transport behaviour in anisotropic gels consisting of discotic liquid crystals and hydrogen-bonded fibres [J]. *Chemical Communications*, 2002(5): 428-429.
- [19] ADAM D, SCHUHMACHER P, SIMMERER J, *et al.* Fast photoconduction in the highly ordered columnar phase of a discotic liquid crystal [J]. *Nature*, 1994, 371(6493): 141-143.
- [20] BODEN N, BUSHBY R J, CLEMENTS J, *et al.* Mechanism of charge transport in discotic liquid crystals [J]. *Physical Review B*, 1995, 52(18): 13274-13280.
- [21] SAUTTER A, THALACKER C, WÜRTHNER F. Control of liquid crystallinity of diazadibenzoperylene dyes by covalent and hydrogen-bonded attachment of mesogens [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2001, 40(23): 4425-4428.
- [22] PERCEC V, HECK J A, TOMAZOS D, *et al.* The influence of the complexation of sodium and lithium triflate on the self-assembly of tubular-supramolecular architectures displaying a columnar mesophase based on taper-shaped monoesters of oligoethylene oxide with 3,4,5-tris[*p*-(*n*-dodecan-1-yloxy)benzyloxy]benzoic acid and of their polymethacrylates [J]. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 1993(12): 2381-2388.
- [23] KATO T. Self-assembly of phase-segregated liquid crystal structures [J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2414-2418.
- [24] SOBERATS B, TOSHIO M, ICHIKAWA T, *et al.* Zwitterionic liquid crystals as 1D and 3D lithium ion transport media [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(21): 11232-11238.
- [25] SHIMURA H, YOSHIO M, HAMASAKI A, *et al.* Electric-field-responsive lithium-ion conductors of propylene-carbonate-based columnar liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(16): 1591-1594.
- [26] FACCHETTI A, DENG Y, WANG A C, *et al.* Tuning the semiconducting properties of sexithiophene by α , ω -substitution— α , ω -diperfluorohexylsexithiophene: the first n-type sexithiophene for thin-film transistors [J]. *Angewandte Chemie*, 2000, 112(24): 4721-4725.
- [27] O'NEILL M, KELLY S M. Ordered materials for organic electronics and photonics [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(5): 566-584.
- [28] ZHENG Y G, GIBAUD A, COWLAM N, *et al.* Structure and conductivity in LB films of low-dimensional polymer electrolytes [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2000, 10(1): 69-77.
- [29] OHTAKE T, OGASAWARA M, ITO-AKITA K, *et al.* Liquid-crystalline complexes of mesogenic dimers containing oxyethylene moieties with LiCF_3SO_3 : self-organized ion conductive materials [J]. *Chemistry of Materials*, 2000, 12(3): 782-789.
- [30] KATO T, YOSHIO M, ICHIKAWA T, *et al.* Transport of ions and electrons in nanostructured liquid crystals [J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(4): 17001.

- [31] YOSHIO M, MUKAI T, KANIE K, *et al.* Layered ionic liquids: anisotropic ion conduction in new self-organized liquid-crystalline materials [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(5): 351-354.
- [32] KATO T. From nanostructured liquid crystals to polymer-based electrolytes [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 49(43): 7847-7848.
- [33] ICHIKAWA T, YOSHIO M, HAMASAKI A, *et al.* Induction of thermotropic bicontinuous cubic phases in liquid-crystalline ammonium and phosphonium salts [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(5): 2634-2643.
- [34] KERR R L, MILLER S A, SHOEMAKER R K, *et al.* New type of Li ion conductor with 3D interconnected nanopores via polymerization of a liquid organic electrolyte-filled lyotropic liquid-crystal assembly [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(44): 15972-15973.
- [35] FUNAHASHI M, SHIMURA H, YOSHIO M, *et al.* Functional liquid-crystalline polymers for ionic and electronic conduction [M]//KATO T. *Liquid Crystalline Functional Assemblies and Their Supramolecular Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 151-179.
- [36] JUDEINSTEIN P, ROUSSEL F. Ionic conductivity of lithium salt/oligo (ethylene oxide)-based liquid-crystal mixtures: the effect of molecular architecture on the conduction process [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(6): 723-727.
- [37] YOSHIO M, KAGATA T, HOSHINO K, *et al.* One-dimensional ion-conductive polymer films: alignment and fixation of ionic channels formed by self-organization of polymerizable columnar liquid crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(16): 5570-5577.
- [38] ICHIKAWA T, YOSHIO M, HAMASAKI A, *et al.* Self-organization of room-temperature ionic liquids exhibiting liquid-crystalline bicontinuous cubic phases: formation of nano-ion channel networks [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(35): 10662-10663.
- [39] KISHIMOTO K, SUZAWA T, YOKOTA T, *et al.* Nano-segregated polymeric film exhibiting high ionic conductivities [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(44): 15618-15623.
- [40] SUN N, LU F, MARIANI A, *et al.* Anion exchange membrane electrolyte preserving inverse $Ia\bar{3}d$ bicontinuous cubic phase: effect of microdomain morphology on selective ion transport [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 605: 118113.
- [41] CHO B K, JAIN A, GRUNER S M, *et al.* Mesophase structure-mechanical and ionic transport correlations in extended amphiphilic dendrons [J]. *Science*, 2004, 305(5690): 1598-1601.
- [42] ICHIKAWA T, YOSHIO M, HAMASAKI A, *et al.* Induction of thermotropic bicontinuous cubic phases in liquid-crystalline ammonium and phosphonium salts [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(5): 2634-2643.

作者简介:



苗宗成(1979—),男,山东胶南人,博士,教授,2010年于陕西科技大学获得博士学位,主要从事液晶显示及光电探测方面研究。E-mail:miaozongcheng@nwpu.edu.cn