

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-07

具有有序亲水通道的两性离子型溶致液晶 离子导体

黄海瑞^{1,2}, 冯训达^{1,2*}

(1. 东华大学 先进纤维材料全国重点实验室、材料科学与工程学院, 上海 201620;

2. 东华大学 先进低维材料中心, 上海 201620)

摘要:本文以可聚合两性离子型双亲分子SB11-1MA与LiCl水溶液共混形成的溶致液晶离子导体为研究对象。通过调节SB11-1MA含量和LiCl水溶液浓度,研究了液晶的室温相行为和离子传输性能。偏光显微镜和同步辐射小角X射线散射证明了该体系可形成正相六方柱状相(H_1)。同时,LiCl的引入使 H_1 相区间向较低SB11-1MA含量方向移动,并且能够拓宽相窗口。通过电化学阻抗谱发现其室温离子电导率最高可达 $1.1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$,并初步探讨了离子电导率与LiCl浓度和亲水通道结构的关系。

关键词:溶致液晶;两性离子双亲分子;离子传输;正相六方柱状相

中图分类号: 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0101 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0101

Zwitterionic lyotropic liquid-crystalline ion conductors featuring ordered hydrophilic channels

HUANG Hairui^{1,2}, FENG Xunda^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering,

Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Center for Advanced Low-Dimension Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In this study, ion conductors were constructed through lyotropic liquid-crystal self-assembly using a polymerizable zwitterionic amphiphile, SB11-1MA, and aqueous LiCl solutions as the model system. By varying the SB11-1MA content and the concentration of the LiCl aqueous solution, the room-temperature phase behavior and ion-transport properties of the liquid-crystalline system were systematically investigated. Polarized optical microscopy (POM) and small-angle X-ray scattering (SAXS) results show that this system forms a normal hexagonal phase (H_1). The introduction of LiCl shifts the H_1 phase region toward lower SB11-1MA contents and broadens the phase window. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements reveal that the liquid-crystalline material exhibits a maximum room-temperature ionic conductivity of $1.1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$, and that its ion-transport behavior is jointly governed by ion concentration and the structure of the hydrophilic channels.

Key words: Lyotropic liquid crystal; zwitterionic amphiphile; ion transport; normal hexagonal phase

收稿日期:2026-06-03;修订日期:2026-06-16.

1 引言

电解质是电化学储能器件中的关键组成部分,其离子传输能力、结构稳定性和界面适应性直接影响器件的综合性能^[1]。现有液态、凝胶和聚合物电解质在离子传导、电极润湿和器件稳定性等方面已经展现出良好的应用基础。随着储能器件对稳定性和传输调控能力要求的不断提高,在保持有效离子传导能力的基础上,进一步引入具有明确空间排列和可调尺寸的离子传输环境,是发展结构可设计电解质的重要方向。

有序纳米结构为解决上述问题提供了新的可能。液晶^[2-4]、嵌段共聚物^[5-6]和多孔晶体^[7]等自组装材料能够形成具有明确空间排列和可调尺寸的纳米通道,使离子传输环境由均相随机分布转向具有空间限域和结构可设计的有序体系。Kato等人指出液晶结构能够提供有序的离子和电子传输路径,并可用于电池、光伏和其他电化学器件^[2]。Gin等人进一步证明,可聚合溶致液晶在与有机碳酸酯电解液和锂盐共组装后,可形成具有三维互连纳米通道的聚合物电解质,从而在准固态结构中保留接近液态的离子迁移特征^[3]。随后,Kato和Ohno等发展了基于双连续立方液晶相的三维离子纳米通道聚合物膜,表明液晶相的拓扑连通性对离子传导效率具有重要影响^[8]。

在溶致液晶(LLC)相结构中,正相六方柱状相能够在较宽的相窗口保持有序结构,因而可以作为构筑离子导体的结构平台^[9-11]。H₁相中周期排列的柱状聚集体和连续水相区域能够为离子迁移提供明确的传输路径^[12]。因此,构筑易获得且可调控的H₁相溶致液晶体系,对于发展有序离子导体具有重要意义^[13]。

基于上述设计思路,本文选用可聚合两性离子型双亲分子与LiCl水溶液作为研究体系,探究二者协同自组装形成溶致液晶有序结构的相行为与结构特征。通过调节双亲分子含量和LiCl水溶液浓度,系统考察体系的室温相行为,并结合偏光显微镜、同步辐射小角X射线散射和电化学阻抗测试,分析组成变化对液晶相结构、特征尺寸和离子传输性能的影响。本文旨在建立可聚合两性离子型双亲分子和锂盐水相与溶致液

晶结构之间的关联,为构筑具有有序且可调的传输通道的离子导体提供实验基础。

2 实验

2.1 实验原料

二甲胺水溶液(40 wt%,阿拉丁),11-溴-1-十一醇(97%,萨恩化学),1,3-丙磺酸内酯(99%,上海麦克林),三乙胺(99%,上海泰坦),甲基丙烯酰氯(95%,阿拉丁),碳酸氢钠(99%,萨恩化学),4-甲氧基苯酚(上海泰坦,99%+),无水硫酸钠(99.5%,上海泰坦),碳酸钠(99%,上海泰坦),二氯甲烷(99.5%,上海泰坦),乙醇,甲醇,甲苯,乙醚,乙腈。

2.2 两性离子型双亲分子SB11-1MA的合成

双亲分子3-((11-(甲基丙烯酰氧基)十一烷基)二甲基铵基)丙烷-1-磺酸盐(SB11-1MA)的合成参照本课题组的前期工作^[14],具体合成路线如图1所示。

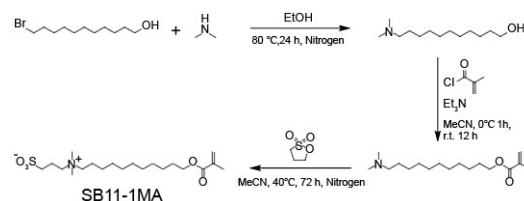


图1 双亲分子SB11-1MA的合成路线示意图

Fig. 1 Synthesis of the zwitterionic amphiphilic SB11-1MA

首先将11-溴-1-十一醇(20 g, 79.6 mmol)和40 wt%的二甲胺水溶液(70 mL, 557.2 mmol)溶解在300 mL乙醇中。反应溶液在氮气气氛下80 °C反应24 h。反应结束后,通过减压蒸馏除去溶剂和残余的二甲胺,得到白色固体。然后将该白色固体溶解在200 mL水中,使用Na₂CO₃调节溶液pH至9左右。完全溶解后用二氯甲烷萃取3次,每次100 mL,收集所有有机相。在萃取得到的有机相中加入无水Na₂SO₄除去溶解的水。通过抽滤除去固体杂质,旋蒸除去有机溶剂,最终获得白色固体状中间产物11-(二甲氨基)十一烷-1-醇(15.8 g,产率92.1%)。

将11-(二甲氨基)十一烷-1-醇(9 g, 41.7 mmol)、三乙胺(6.3 g, 62.3 mmol)和4-甲氧基苯酚

(0.1 g, 0.8 mmol)溶解在 100 mL 乙腈中,然后将溶液转移至 250 mL 圆底烧瓶中。圆底烧瓶置于 0 °C 的冰水混合物中。取甲基丙烯酸酐(4.4 g, 42.1 mmol)溶解在 10 mL 乙腈中并逐滴加入上述反应液中,滴加完成后在 0 °C 条件下搅拌 1 h。搅拌完成后恢复至室温,再搅拌 12 h。反应完成后,加入 200 mL 5 wt% 的 NaHCO_3 水溶液淬灭反应,然后使用 100 mL 二氯甲烷萃取 3 次。将有机相收集后使用无水 Na_2SO_4 除去有机相中的水,随后抽滤除去固体杂质。最终旋蒸除去有机溶剂,获得淡黄色澄清液体 11-(二甲氨基)十一烷基甲基丙烯酸酯(10.5 g, 产率为 88.5%)。

将 11-(二甲氨基)十一烷基甲基丙烯酸酯(7.4 g, 26.1 mmol)、1,3-丙磺酸内酯(5.4 g, 44.4 mmol)和 4-甲氧基苯酚(0.1 g, 0.8 mmol)溶解在 100 mL 乙腈中,在氮气气氛 40 °C 下反应 72 h。反应完成后,抽滤获得白色固体产物。使用乙醚将固体产物洗涤 3 次,然后转移至真空烘箱中在真空条件下室温干燥 24 h,获得最终目标产物 SB11-1MA(7.2 g, 产率为 68%)。 ^1H NMR (400 MHz, Deuterium Oxide) δ 6.08 (s, 1H), 5.63 (s, 1H), 4.13 (t, $J = 6.5$ Hz, 2H), 3.57-3.45 (m, 2H), 3.41-3.27 (m, 2H), 3.14 (s, 6H), 2.98 (t, $J = 7.0$ Hz, 2H), 2.32-2.16 (m, 2H), 1.92 (s, 3H), 1.78 (s, 2H), 1.72-1.59 (m, 2H), 1.34 (d, $J = 27.4$ Hz, 15H)。

2.3 液晶样品的制备

首先按照重量百分比配制 10 wt%、20 wt% 和 40 wt% 的 LiCl 水溶液。然后称取一定量的 SB11-1MA 并转移至 2 mL 的离心管中,移取相应浓度的 LiCl 水溶液加入到离心管中,对离心管中的混合物进行反复多次离心、搅拌、加热,直至均相。

2.4 分析测试方法及使用仪器

^1H 核磁共振氢谱表征:采用 Bruker AVANCE NEO 400 MHz 核磁共振波谱仪进行测试,测试时使用氘代水(D_2O , HDO 峰位于 $\delta = 4.80$ ppm)作为测试溶剂。

偏光显微镜(POM):采用 Motic BA310Pol 型偏光显微镜对液晶织构进行表征。取少量液晶样品,并置于载玻片上,盖上盖玻片,将液晶样品压平后置于 POM 下观察液晶织构。

同步辐射小角 X 射线散射(SAXS):SAXS 测试在上海同步辐射光源的 BL19U2 光束线站进行,所用 X 射线波长为 1.038 Å,探测器型号为 Pilatus 2M,样品曝光时间 0.5 s。测试前将溶致液晶样品装入自制的不锈钢样品槽中,用聚酰亚胺薄膜将液晶样品封住,避免样品吸水或失水。二维 SAXS 数据的标定使用了山嵛酸银(AgB)标准样品。利用软件 Saxsgui v2.15.01 生成一维积分散射曲线,并绘制散射强度(I)与散射矢量(q)之间的关系图。

离子电导率表征:采用上海辰华 CHI760E 电化学工作站对液晶样品进行电化学阻抗谱(EIS)测试,测试频率范围为 1 Hz~1 MHz,所有测试均在 25 °C、相对湿度 40% 条件下进行。测试前将液晶样品夹在两块涂附有氧化铟锡(ITO)的玻璃之间,使用 PI 胶带对整体进行固定,避免测试过程中电极接触面积和电极间距发生变化。

3 结果与讨论

3.1 液晶相图绘制

以 SB11-1MA 质量分数 2.5 wt% 为间隔,制备不同组成的 SB11-1MA/LiCl 水溶液共混样品。随后通过偏光显微镜观察液晶织构,并初步判断液晶相结构类型。室温下双亲分子 SB11-1MA 与不同浓度 LiCl 水溶液共混形成的液晶相图如图 2(a)所示,其中 Iso 代表无序流动相, H_1 代表正相六方柱状相, K 代表含有 SB11-1MA 晶体与水溶液的非均相共混相。

不同相结构对应的偏光织构如图 2(b)所示。当使用纯水配制液晶样品时, H_1 相对应的 SB11-1MA 质量分数范围为 65~82.5 wt%, 相窗口为 17.5 wt%。引入 LiCl 后, H_1 相区间整体向较低 SB11-1MA 含量方向移动。当使用 10 wt% LiCl 水溶液时, H_1 相区间为 57.5~75 wt%, 相窗口仍为 17.5 wt%; 当 LiCl 水溶液浓度提高至 20 wt% 时, H_1 相区间进一步拓宽至 52.5~75 wt%, 相窗口增大至 22.5 wt%; 当使用 40 wt% LiCl 水溶液时, H_1 相区间为 52.5~72.5 wt%, 相窗口略微减小至 20 wt%。上述结果表明, LiCl 的引入有利于 H_1 相在较低 SB11-1MA 含量下形成,并可拓宽其相稳定区间,其中 20 wt% LiCl 水溶液体系表现出最宽的 H_1 相窗口。

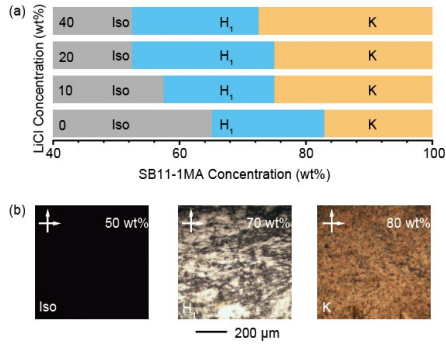


图2 室温下SB11-1MA与不同浓度LiCl水溶液共混获得的室温液晶相图;(b)室温下SB11-1MA与预配10 wt% LiCl水溶液共混所得液晶样品的偏光显微镜结构图。SB11-1MA质量分数分别为50、70和80 wt%。比例尺:200 μm。

Fig. 2 (a) Room-temperature LLC phase diagram obtained by blending SB11-1MA with aqueous LiCl solutions of different concentrations. (b) Polarized optical microscopy images of liquid-crystalline samples prepared by blending SB11-1MA with a 10 wt% aqueous LiCl solution at room temperature. The SB11-1MA mass fractions are 50, 70, and 80 wt%, respectively. Scale bar: 200 μm.

3.2 液晶样品的SAXS表征

图3(a)为典型的二维SAXS图,德拜环的半径满足H₁相所属的 $p6mm$ 空间群关系。部分样品的散射强度 I 随散射矢量 q 变化的一维积分曲线如图3(b~d)所示。样品均呈现出三个清晰的特征散射峰,其峰位 q 值之比为 $\sqrt{1}:\sqrt{3}:\sqrt{4}$,可分别归属于 $p6mm$ 的 $\{10\}$ 、 $\{11\}$ 和 $\{20\}$ 晶面反射,表明该体系形成了H₁相。根据 $p6mm$ 体系的晶格参数 a 和 q_{hk} 的关系(公式1),计算 a 的变化规律,结果见图4。

$$a = \frac{4\pi}{\sqrt{3} q_{hk}} \sqrt{h^2 + hk + k^2}. \quad (1)$$

当使用浓度为10 wt%的LiCl水溶液时,晶格参数 a 为3.91~3.99 nm;当LiCl水溶液浓度提高至20 wt%时, a 增大至4.06~4.15 nm;进一步提高LiCl水溶液浓度至40 wt%后, a 维持在4.10~4.14 nm。在相同LiCl水溶液浓度下,降低SB11-1MA质量分数会提高体系中的含盐水相比,从而促进亲水区域溶胀并增大六方柱状结构的中心距,因此晶格参数 a 整体呈增大趋势。

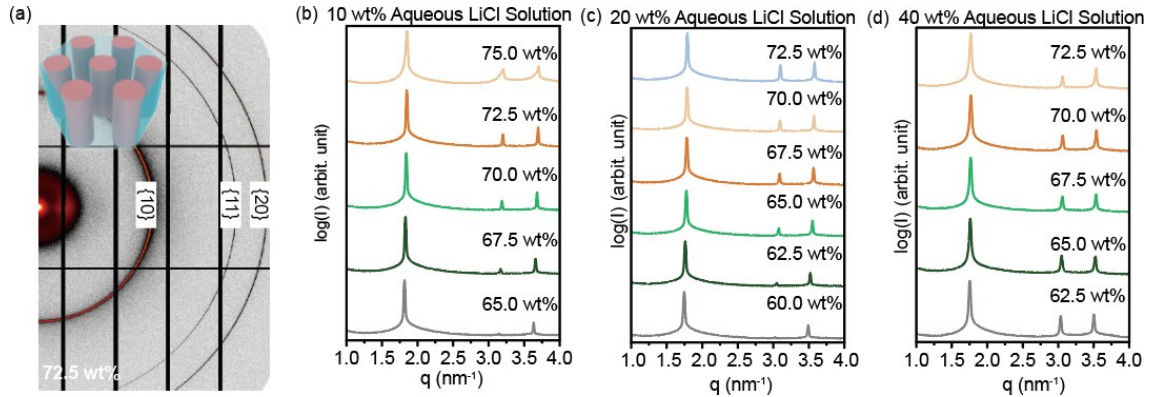


图3 (a)由72.5 wt% SB11-1MA与27.5 wt%的10 wt% LiCl水溶液共混获得液晶样品的二维SAXS谱图。插图为正相六方柱状相结构示意图,红色柱状区域代表由疏水烷基链聚集形成的疏水域,蓝色区域代表连续水相;(b~d) SB11-1MA分别与10、20和40 wt% LiCl水溶液共混所得液晶样品的一维SAXS积分曲线。

Fig. 3 (a) Two-dimensional SAXS scattering pattern of a liquid-crystalline sample prepared from 72.5 wt% SB11-1MA and 27.5 wt% of a 10 wt% aqueous LiCl solution. The inset shows the normal hexagonal phase, with red columns representing alkyl-chain-rich hydrophobic domains and blue regions representing the continuous aqueous phase. (b~d) One-dimensional SAXS profiles of the samples prepared with 10, 20, and 40 wt% LiCl aqueous solutions, respectively.

在相同SB11-1MA质量分数下,随着原始LiCl水溶液浓度升高,体系的离子强度增加,并改变两性离子头基附近的水合结构和局部静电环境。外加Li⁺和Cl⁻可屏蔽两性离子头基之间的铵盐-磺

酸盐静电关联,削弱头基间的紧密偶极缔合,从而增加极性头基区的有效体积,并促进亲水区域溶胀。该结构调节作用可解释六方柱状相晶格参数 a 随LiCl水溶液浓度升高而增大的趋势^[15-16]。

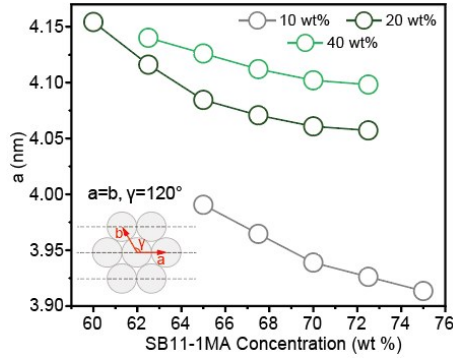


图4 SB11-1MA 与 LiCl 水溶液共混液晶的晶格参数 a 随 SB11-1MA 含量和 LiCl 水溶液浓度变化的曲线。插图为正相六方柱状相二维晶格示意图,晶格参数 a 、 b 和 γ ,其中 $a = b$, $\gamma = 120^\circ$ 为 a 轴与 b 轴之间的夹角。

Fig. 4 Variation in the lattice parameter a of SB11-1MA/LiCl aqueous LLCs with SB11-1MA content and LiCl aqueous solution concentration. The inset shows a schematic of the two-dimensional lattice of the normal hexagonal phase (H_1 phase), where $a = b$ and $\gamma = 120^\circ$, with γ denoting the angle between the a and b lattice vectors.

3.3 液晶样品的离子电导率

采用 EIS 测试 H_1 液晶的室温离子电导率,测试装置示意图如图 5(a) 所示。采用等效电路对 EIS 数据进行拟合,所用模型如图 5(b) 所示。图 5(c) 展示了由 60 wt% SB11-1MA 与 40 wt% 的 20 wt% LiCl 水溶液共混所得液晶样品的 Nyquist 图。不同液晶样品的离子电导率如图 5(d) 所示。

测试结果表明,液晶材料的室温离子电导率最高可达 $1.1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 。对比不同组成样品可以发现,当 LiCl 水溶液浓度为 10 wt% 时,随着 LiCl 水溶液含量提高,液晶样品的离子电导率呈现下降趋势,而当 LiCl 水溶液浓度为 20 wt% 和 40 wt% 时,离子电导率则随 LiCl 水溶液含量增加而逐渐升高。该差异表明,不同 LiCl 浓度体系中离子传输的主导因素并不相同^[17]。随着 SB11-1MA 含量降低, H_1 相晶格参数 a 增大,亲水传输通道尺寸增加。对于 20 wt% 和 40 wt% LiCl 体系,较高的 LiCl/SB11-1MA 摩尔比提供更多可迁移离子,而随 SB11-1MA 含量降低而扩大的亲水通道则有利于离子迁移。二者共同促进离子传输,最终表现为离子电导率

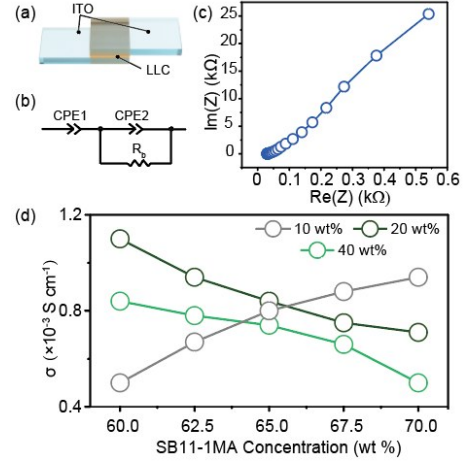


图 5(a) 离子电导率测试装置示意图;(b)用于拟合 EIS 数据的等效电路模型;(c)由 60 wt% SB11-1MA 与 40 wt% 的 20 wt% LiCl 水溶液共混所得液晶样品的 Nyquist 图;(d)离子电导率随 SB11-1MA 含量和 LiCl 水溶液浓度变化的曲线。

Fig. 5 (a) Schematic illustration of the ionic conductivity measurement setup. (b) Model used for fitting the EIS data. (c) Nyquist plot of the LLCs prepared by mixing 60 wt% SB11-1MA with 40 wt% of a 20 wt% LiCl aqueous solution. (d) Ionic conductivity of the LLCs as a function of SB11-1MA content and LiCl aqueous solution concentration.

随 SB11-1MA 含量降低而升高。相比之下,在 10 wt% LiCl 体系中, LiCl/SB11-1MA 摩尔比低于 20 wt% 和 40 wt% LiCl 体系,而晶格参数 a 的增幅相对更大,可能导致单位亲水通道体积内的有效离子浓度被稀释。因此,通道尺寸增加并未有效转化为更高的离子传输能力,使 10 wt% LiCl 体系表现出离子电导率随 SB11-1MA 含量降低而下降的趋势。这一结果说明, H_1 相离子传输性能并不单纯取决于亲水通道尺寸,还可能受到离子浓度、亲水区域体积分数和介观结构的共同影响。

4 结 论

本研究以可聚合两性离子型双亲分子 SB11-1MA 与 LiCl 水溶液为研究体系,通过溶致液晶自组装构筑有序液晶离子导体,并考察了组成变化对相行为、介观结构和离子传输性能的影响。结果表明, SB11-1MA/LiCl 水溶液能够形成 H_1

相。LiCl的引入使H_i相区间向较低SB11-1MA含量方向移动,并在适中浓度下拓宽相窗口,说明盐离子可调节两性离子头基的水合状态和分子堆积行为。

SAXS分析表明,液晶晶格参数受LiCl水溶液含量和LiCl浓度共同影响。降低SB11-1MA质量分数会增加亲水区域比例并促进其溶胀,从

而增大晶格参数;提高LiCl浓度也可增大晶格参数。电化学阻抗谱测试显示,该液晶离子导体的室温离子电导率最高可达 $1.1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ 。不同组成下离子电导率的变化表明,离子传输受到离子浓度、亲水区域体积分数和介观结构的共同调控。该体系为利用可聚合两性离子型溶致液晶构筑有序离子导体提供了实验基础。

参 考 文 献:

- [1] BAI Y, CAO Y, ZHANG J, *et al.* High-performance dye-sensitized solar cells based on solvent-free electrolytes produced from eutectic melts [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(8): 626-630.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ZHOU M, NEMADE P R, LU X, *et al.* New type of membrane material for water desalination based on a cross-linked bicontinuous cubic lyotropic liquid crystal assembly [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(31): 9574-9575.
- [5] YOUNG W S, KUAN W F, EPPS T H III. Block copolymer electrolytes for rechargeable lithium batteries [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2014, 52(1): 1-16.
- [6] SU L, LU F, LI Y, *et al.* Gyroid liquid crystals as quasi-solid-state electrolytes toward ultrastable zinc batteries [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(10): 7633-7643.
- [7] CHEN H, HU C, ZHANG X, *et al.* Porous crystalline frameworks as ion-conducting solid-state electrolytes [J]. *Accounts of Materials Research*, 2024, 5(11): 1303-1313.
- [8] 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.
- [9] LU F, GAO X, DONG B, *et al.* Nanostructured proton conductors formed via in situ polymerization of ionic liquid crystals [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(24): 21970-21977.
- [10] REN W, HOU Z, SU L, *et al.* Hexagonal liquid crystals as emerging quasi solid-state electrolytes for aqueous lithium-ion batteries [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 501: 157794.
- [11] BARİM G, ALBAYRAK C, YİLMAZ E, *et al.* Highly conducting lyotropic liquid crystalline mesophases of plurionics (P65, P85, P103 and P123) and hydrated lithium salts (LiCl and LiNO₃) [J]. *Langmuir*, 2014, 30(23): 6938-6945.
- [12] GAO X, LU F, SHI L, *et al.* Nanostructured aqueous lithium-ion conductors formed by the self-assembly of imidazolium-type zwitterions [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(24): 13312-13317.
- [13] GAO X, LU F, DONG B, *et al.* Temperature-responsive proton-conductive liquid crystals formed by the self-assembly of zwitterionic ionic liquids [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(78): 63732-63737.
- [14] WU H, XU F, GAO G, *et al.* Highly ordered interconnected 1 nm pores in polymers fabricated from easily accessible gyroid liquid crystals [J]. *Macromolecules*, 2021, 54(12): 5856-5865.
- [15] THOMAS J, CHUM S, DEUCHER W, *et al.* Thermal and structural properties of polyzwitterions: Effects of monomer chemistry and salt addition [J]. *Thermochimica Acta*, 2023, 730: 179617.
- [16] BRASNETT C, LONGSTAFF G, COMPTON L, *et al.* Effects of cations on the behaviour of lipid cubic phases [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8229.

- [17] GIFFIN G A. The role of concentration in electrolyte solutions for non-aqueous lithium-based batteries [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5250.

作者简介:



黄海瑞,男,博士研究生,2020年于上海应用技术大学获得硕士学位,主要从事基于可聚合溶致液晶制备有序聚合物的研究。E-mail: 1209033@mail.dhu.edu.cn



冯训达,男,博士,研究员,2013年于德国哥廷根大学获得博士学位,主要从事液晶等软物质材料的结构、动态、应用的研究。E-mail: xunda.feng@dhu.edu.cn