

· 亮点评述 ·

## 动态微界面聚合：二维聚合物片层制备的新策略及高性能准固态电解质应用

曲晋于中振\*

(北京化工大学材料科学与工程学院 有机无机复合材料全国重点实验室 北京 100029)

**摘要** 发展二维有机材料的普适性合成策略, 是丰富其结构体系、充分释放其在储能、催化等领域应用潜能的关键. 近日, 耿建新等提出一种动态微界面聚合来合成二维聚合物片层的策略. 该方法操作简单, 仅需通过对不相溶的聚丙二醇双(2-氨基丙醚)的离子液体溶液和1,3,5-苯三甲酰氯的正己烷溶液进行搅拌, 即可高效合成新型二维聚合物片层PEO-BTA. 该片层具有优异的加工性, 既可使用氢氧化钠进行化学改性得到钠离子导体聚合物PEO-BTA-Na, 也可与金属有机框架HKUST-1复合得到MOF@PEO-BTA-Na复合物, 随后经真空抽滤即可得到对应的自支撑薄膜. 这类薄膜吸收电解液后可用作准固态电解质, 后者的离子电导率达 $2.80 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 钠离子迁移数达0.95, 两项指标均处于领域领先水平. 基于该电解质组装的钠金属电池在界面稳定性、倍率性能与循环寿命方面均展现出突出优势. 动态微界面聚合策略不仅具备二维有机材料合成的普适性和规模化双重潜力, 同时为高性能准固态电解质的设计与制备提供了重要材料基础.

**关键词** 动态微界面聚合; 二维有机材料; 准固态电解质; 钠金属电池

**引用:** 曲晋, 于中振. 动态微界面聚合: 二维聚合物片层制备的新策略及高性能准固态电解质应用. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26059.

**Citation:** Qu, J.; Yu, Z. Z. Dynamic microinterfacial polymerization: a new strategy for preparing two-dimensional polymer sheets and their application in high-performance quasi-solid-state electrolytes. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26059.

2004年, 石墨烯的成功制备开启了二维材料研究的新篇章<sup>[1]</sup>. 二维有机材料虽具有轻质、结构可设计性强、生物相容性优异等独特优势, 但相较于石墨烯、六方氮化硼、过渡金属硫族化合物等二维无机材料, 不仅研究起步较晚, 发展进程也相对滞后<sup>[2]</sup>. 究其原因, 主要在于有机单体或结构单元的拓扑对称性较低、构象自由度较高, 在组装过程中难以在二维平面内实现长程有序生长. 近年来, 随着研究的深入, 通过界面聚合、模板辅助聚合等策略已能够实现部分非拓扑对称性单体的二维有序组装, 在一定程度上丰富了二维有机材料的种类<sup>[3-5]</sup>. 但现有策略仍存在制备效率低下、产物尺寸与厚度难以精准调控、反

应条件苛刻等诸多共性问题. 因此, 发展普适性强、制备效率高的合成策略, 已成为推动二维有机材料发展的关键挑战.

近日, 天津工业大学耿建新研究团队提出了一种动态微界面聚合策略, 为二维有机材料的制备提供了新思路<sup>[6]</sup>. 该策略的核心机制在于, 通过外部机械搅拌, 将传统界面聚合中的静态宏观界面转换为动态微观界面. 这一转变在大幅增加两相单体的接触面积的基础上, 显著提高了单体的反应速率和转化率. 团队将聚丙二醇双(2-氨基丙醚) (PEA)的离子液体溶液和1,3,5-苯三甲酰氯 (TMC)的正己烷溶液混合, 经机械搅拌30 min, 即可成功制备出新型二维聚合物片层PEO-BTA

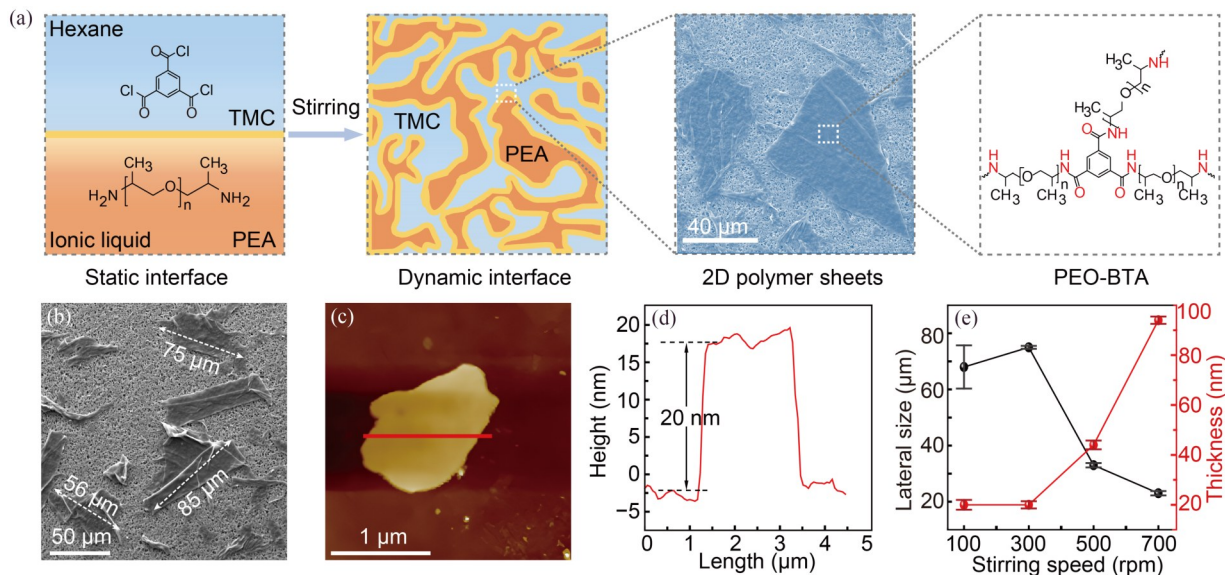
2026-02-25收稿, 2026-04-07录用, 网络出版.

\* 通信联系人, E-mail: yuzz@mail.buct.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26059; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7603

(图 1(a)), 反应中 TMC 的单体转化率高达 93%. 这类聚合物片层的横向尺寸与厚度具有明显的搅拌转速依赖性: 在较低转速(100 和 300  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 下, 所得片层平均横向尺寸为 75  $\mu\text{m}$ , 厚度为

20 nm; 当转速提高至 500  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  及以上时, 片层横向尺寸随转速增加单调递减, 厚度则单调递增(图 1(b)~1(e)).



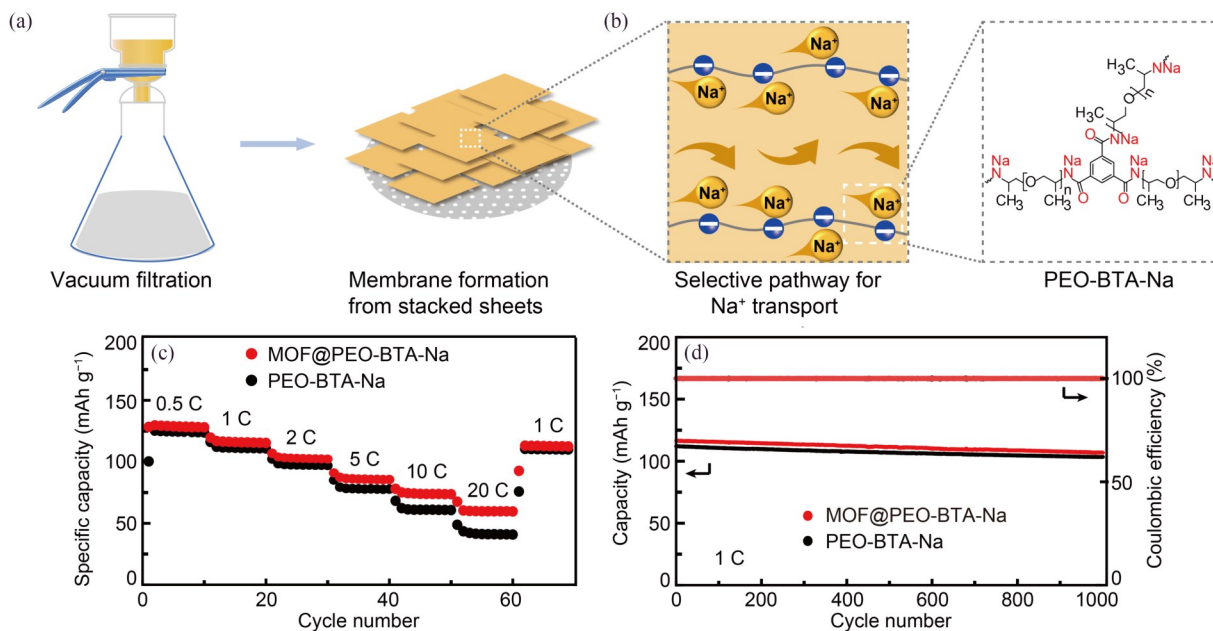
**Fig. 1** (a) Synthesis of 2D PEO-BTA sheets *via* a dynamic microinterfacial polymerization; (b) Scanning electron microscopy image; (c) Atomic force microscopy topography image of the 2D PEO-BTA sheets that were synthesized at a stirring speed of 300 rpm, and (d) corresponding height profile along the line shown in panel c; (e) Lateral size and thickness of the 2D PEO-BTA sheets as a function of stirring speed (Reprinted with permission from Ref. [4]; Copyright (2026) Wiley VCH).

PEO-BTA 片层具有优异的结构稳定性. 经过氢化钠处理后, 可转化为钠离子导体聚合物材料 PEO-BTA-Na; 进一步与金属有机框架 HKUST-1 共混, 可得到 MOF@PEO-BTA-Na 复合材料. 所得二维材料在上述处理中均保持了二维形貌. 所得二维片层展现出优异的加工性, 通过简单的真空抽滤即可得到自支撑柔性薄膜(图 2(a)和 2(b)). 所得薄膜在吸收电解液后可用作钠金属电池准固态电解质(QSSE)使用, 钠离子传输遵循跳跃迁移机制. 其中, MOF@PEO-BTA-Na QSSE 的钠离子传输性能(离子电导率为  $2.80 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 钠离子迁移数为 0.95)显著优于 PEO-BTA-Na QSSE ( $1.34 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 0.92), 与文献中钠金属电池 QSSE 相比处于领先水平. MOF@PEO-BTA-Na QSSE 更优异的钠离子传输性能归因于 HKUST-1 的引入: HKUST-1 既拓宽了聚合物骨架的  $\pi$ - $\pi$  堆叠间距, 提升了聚合物链段的运动能力, 同时其路易斯酸性位点和规则孔道可协同促进钠离子的选择性迁移.

使用上述 2 种 QSSE 组装的钠金属电池(包括 Na//Cu、Na//Na 和 Na// $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  电池)均表现

出优异的电化学性能, 其中, 含有 MOF@PEO-BTA-Na QSSE 的电池的电化学性能更为突出. 具体而言, Na//Cu 电池的库伦效率可高达 97.7%; Na//Na 电池在  $0.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  电流密度、 $0.5 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$  比容量的测试条件下可稳定循环 1000 h; Na// $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  电池在 0.5 C 下的初始比容量高达  $129.1 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ , 在 20.0 C 高倍率下比容量高达  $60.0 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$  (图 2(c)), 在 1.0 C 下循环 1000 圈后容量保留率高达 92% (图 2(d)).

综上所述, 耿建新等提出的动态微界面聚合策略, 为解决二维有机材料领域的核心科学与技术难题提供了创新解决方案. 首先, 该策略为二维有机材料的普适性合成提供了新思路. 传统界面聚合受扩散过程主导, 体系内热量与物质传递不均, 易导致成膜质量差或反应失败, 且适用的聚合反应体系比较单一. 而动态微界面聚合通过引入机械搅拌, 可加速单体向界面的扩散, 提高聚合反应速率, 同时, 还可确保反应体系热量与浓度的均匀分布, 从而生成结构均一的聚合物片层. 因此, 这一策略能够兼容更广泛的单体结构与聚合反应体系, 不仅为合成多种高质量二维聚



**Fig. 2** (a) Preparation of PEO-BTA-Na membranes; (b) Schematic illustration of single/selective  $\text{Na}^+$  conduction in the PEO-BTA-Na membrane; (c) Rate capability data recorded for  $\text{Na}/\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  cells containing the different QSSEs at current rates ranging from 0.5 C to 20.0 C; (d) Cycling stabilities measured for  $\text{Na}/\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  cells containing the different QSSEs at 1 C. (Reprinted with permission from Ref. [4]; Copyright (2026) Wiley VCH).

合物片层提供了可行路径,也使得多功能二维共聚材料的一步法合成成为可能.其次,该策略为二维有机材料的规模化制备提供了潜在途径.传统界面聚合对设备和反应环境的要求较为严苛,而动态微界面聚合在持续搅拌中能够形成稳定的浓度场和温度场,使二维材料的成核及生长始终保持均匀,因此所得片层结构均一、批次差异性小.此方法对设备及反应环境的依赖性显著降低,同时具备高的单体转化率和产物产率,因而为二维有机材料的大批量、低成本制备提供了有效的技术方案.此外,所得二维有机材料具有优异的溶液加工性,可突破特殊聚合物材料成型加工难的技术瓶颈.传统方法所得薄膜的厚度与尺寸严重受限于初始反应条件与容器构型,成型后难以进行二次加工.而基于动态微界面聚合制备的二维聚合物纳米片具备出色的溶液分散性,可借助简单的真空抽滤工艺,便捷、可重复地制备厚度与尺寸可控的自支撑薄膜.这种低成本、高

效率的加工方式,开创了聚合物材料加工的新范式.得益于出色的溶液分散性,该类纳米片还可能适配刮涂、滚涂、喷涂等多种规模化加工工艺,实现大面积自支撑膜的直接成型.最后,该策略在准固态电解质之外的其它领域也具有应用潜力.例如,在海水淡化、气体分离、生物医用等膜分离领域,依托该策略对单体结构与聚合体系的高兼容性,可通过膜结构的定向设计,实现对不同尺寸与电荷物种的精准筛分;在柔性传感、柔性显示等柔性电子领域,依托该策略的制备优势,可低成本制备大面积柔性二维聚合物薄膜,为器件提供核心功能载体.因此,动态微界面聚合这一策略不仅填补了二维有机材料在普适性合成与宏量制备方面的技术空白,也为该领域的发展提供了全新的研究思路.随着该策略的持续优化与拓展,二维有机材料有望在更多前沿领域实现突破性应用,推动有机功能材料领域的持续创新与发展.

## REFERENCES

- Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, **2004**, 306(5696), 666–669.
- Dong, R.; Zhang, T.; Feng, X. Interface-assisted synthesis of 2D materials: trend and challenges. *Chem. Rev.*, **2018**, 118(13), 6189–6235.

- 3 Colson, J.; Dichtel, W. Rationally synthesized two-dimensional polymers. *Nature Chem.*, **2013**, 5(6), 453–465.
- 4 Evans, A. M.; Strauss, Michael. J.; Corcos, A. R.; Hirani, Z.; Ji, W.; Hamachi, L. S.; Aguilar-Enriquez, X.; Chavez, A. D.; Smith, B. J.; Dichtel, W. R. Two-dimensional polymers and polymerizations. *Chem. Rev.*, **2022**, 122(1), 442–564.
- 5 Ren, Y.; Xu, Y. Recent advances in two-dimensional polymers: synthesis, assembly and energy-related applications. *Chem. Soc. Rev.*, **2024**, 53(4), 1823–1869.
- 6 Ji, X.; Ma, J.; Wang, Z.; Shi, X.; Wang, J.; Meng, X.; Bielawski, C. W.; Geng, J. Dynamic microinterfacial polymerization enables scalable synthesis of two-dimensional polymer sheets for quasi-solid-state electrolytes in sodium-metal batteries. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2026**, 65(9), e24650.

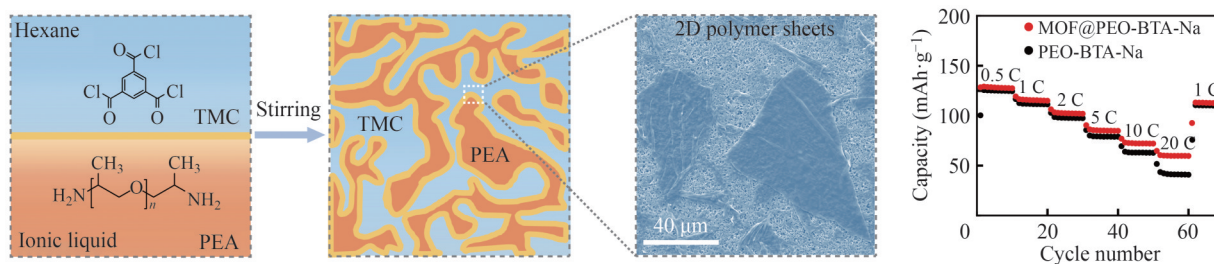
## Highlight

## Dynamic Microinterfacial Polymerization: A New Strategy for Preparing Two-dimensional Polymer Sheets and Their Application in High-performance Quasi-solid-state Electrolytes

Jin Qu, Zhong-zhen Yu\*

(State Key Laboratory of Organic and Inorganic Composite Materials, School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

**Abstract** The development of universal strategies for synthesizing two-dimensional (2D) organic materials is crucial to expanding their structural diversity and exploring their applications in fields such as energy storage and catalysis. Recently, Geng *et al.* proposed a dynamic microinterfacial polymerization for the synthesis of 2D polymer sheets. This method features facile operation, as 2D polymer sheets (designated as PEO-BTA) can be prepared *via* simple stirring of immiscible solutions of poly(propylene glycol)bis(2-aminopropyl ether) in an ionic liquid and 1,3,5-benzenetricarbonyl trichloride in *n*-hexane. 2D PEO-BTA sheets exhibit excellent processability. They can be chemically modified with sodium hydride to yield a material with high Na<sup>+</sup> conductivity (designated as PEO-BTA-Na) or physically composited with HKUST-1, a prototypical metal-organic framework, to form 2D composite sheets (MOF@PEO-BTA-Na) while maintaining their inherent 2D morphology. The resulting 2D sheets can be readily assembled into free-standing membranes *via* vacuum filtration. Upon absorption of a liquid electrolyte, these membranes function as quasi-solid-state electrolytes (QSSEs) for sodium metal batteries. Notably, the MOF@PEO-BTA-Na QSSE exhibits an ionic conductivity of 2.80 mS·cm<sup>-1</sup> and a sodium ion transference number of 0.95, which outperform those reported for QSSEs in the literature. Sodium metal batteries assembled with MOF@PEO-BTA-Na QSSE exhibit exceptional electrochemical performance in terms of interfacial stability, rate capability, and cycling lifespan. The dynamic microinterfacial polymerization thus holds great potential for the scalable synthesis of diverse 2D polymer materials, while opening a new avenue for the preparation of high-performance QSSEs.



(Reprinted with permission from *Angew. Chem. Int. Ed.* **2026**, e24650; Copyright (2026) Wiley VCH)

**Keywords** Dynamic microinterfacial polymerization; Two-dimensional organic materials; Quasi-solid-state electrolytes; Sodium-metal batteries

\* Corresponding author: Zhong-zhen Yu, E-mail: yuzz@mail.buct.edu.cn