

· 研究论文 ·

废弃尼龙升级化学回收制备铝基金属-有机框架材料 及其光伏发电性能

张鑫瑶 朱小艳 温雪莹 胡桂新 王慧悦 戴郅焜 牛冉 龚江*

(华中科技大学化学与化工学院 能量转换与存储材料化学教育部重点实验室 材料化学与服役失效湖北省
重点实验室 武汉 430074)

摘 要 废弃尼龙难降解且高值化利用途径有限, 将其转化为功能材料具有重要意义. 本研究以废弃尼龙 66 为原料, 经碱性水解获得的降解液无需分离纯化, 直接在水相中引入铝盐, 其中的降解产物己二酸 (adipic acid, 简称 ADP) 作为有机配体构筑铝基金属-有机框架 (MOF) 材料 (命名为 Al-ADP), 实现了由废弃尼龙到功能 MOF 材料的绿色升级转化. Al-ADP 具有 MIL-53(Al) 型结构, 呈由纳米棒组装形成的纳米花形貌, 并具有微介孔协同的分级孔结构. 进一步将 Al-ADP 与聚乙烯醇交联后负载于粘胶无纺布表面, 构筑柔性光伏发电膜器件, 在 20 °C、相对湿度 59% 条件下可稳定输出 0.41 V 电压和 4.76 μ A 电流. 户外集成测试 20 个器件实现了 6.59 V 的串联输出电压与 38 μ A 的并联输出电流. 分子动力学模拟结果表明, Na^+ 扩散系数高于 Cl^- , 证明 Al-ADP 膜蒸发器可通过界面双电层与连续传输通道协同促进离子选择性迁移, 从而实现稳定电荷分离. 本研究实现了废弃尼龙向功能 MOF 材料的高值化转化, 为蒸发驱动发电材料设计及废弃塑料资源化利用提供了新思路.

关键词 金属-有机框架材料; 废弃尼龙; 升级化学回收; 光伏发电; 废塑料高值化利用

引用: 张鑫瑶, 朱小艳, 温雪莹, 胡桂新, 王慧悦, 戴郅焜, 牛冉, 龚江. 废弃尼龙升级化学回收制备铝基金属-有机框架材料及其光伏发电性能. 高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26133.

Citation: Zhang, X. Y.; Zhu, X. Y.; Wen, X. Y.; Hu, G. X.; Wang, H. Y.; Dai, Z. K.; Niu, R.; Gong, J. Construction of aluminum metal-organic frameworks via upcycling chemical recycling of waste nylon for hydrovoltaic power generation. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26133.

随着全球塑料消费量的急剧增长, 废弃塑料带来的环境压力日益突出^[1-3]. 尼龙作为五大工程塑料之首, 广泛应用于纺织、渔网及工业材料等领域, 2025 年全球尼龙市场规模约为 405 亿美元^[4-6]. 然而, 其优异的化学稳定性也导致尼龙在自然环境中难以降解, 目前的填埋和焚烧等方法处理废弃尼龙会造成资源浪费和二次环境污染^[7-9]. 尽管近年来研究者提出了生物降解与化学降解的回收方法, 但这些路线仍面临显著的局限性. 生物降解仍然受限于酶制剂培育成本高昂、

降解效率偏低且难以实现规模化应用^[10,11]. 而传统的化学解聚法仅聚焦于获取小分子单体以实现闭环循环, 该过程不仅依赖昂贵的催化剂, 单体分离纯化工艺极其繁琐, 且最终产物的附加值极低^[12]. 因此, 将废弃尼龙转化为高附加值功能材料具有重要的环境与经济意义. 金属-有机框架 (MOF), 也被称为多孔配位聚合物, 凭具有可设计的孔结构和可调界面环境等优势^[13]. 得益于此, MOF 被广泛应用于催化^[14,15]、气体吸附分离^[16]以及电化学储能^[17]等领域. 近年来, 将废塑

多孔聚合物专题; 2026-04-22 收稿, 2026-05-13 录用,

网络出版.

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 52373099).

* 通信联系人, E-mail: gongjiang@hust.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26133; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7627

料转化为高附加值MOF的研究受到了广泛关注。这是因为废塑料,例如废聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚酰亚胺,可以降解为对苯二甲酸或芳香族四羧酸等多元酸,而这些多元酸恰恰是制备MOF最重要的有机配体之一。前期的研究表明,可以利用废塑料合成UiO-66、MIL-53和MIL-101等多种结构规整、性能优异的MOF^[18]。2022年至今,我们课题组致力于废塑料制备MOF的研究,提出了球磨等多种方法实现废弃PET化学回收制备MOF^[19-24]。遗憾的是,前期的绝大部分研究主要局限于利用聚酯制备刚性的对苯二甲酸基MOF,而利用废弃尼龙(如尼龙66)制备柔性MOF鲜有报道。相比于传统的芳香族配体,尼龙66含有柔性的己二酸结构单元,构成的脂肪族羧酸MOF的柔性长链骨架不仅具有较低的空间位阻,有利于极性官能团在界面处的充分暴露以构建高密度双电层,从而显著提升界面传质效率。若能将其降解所得的己二酸作为配体构筑MOF材料,则不仅可实现资源的绿色回收与高值化利用,还有望为构建兼具结构调控与界面功能的柔性MOF提供新策略。

另一方面,开发可持续、低成本的能源转换技术已成为应对全球能源需求与环境问题的重要研究方向^[25]。国际能源署预计2035年全球电力需求将增长约40%。在此背景下,水蒸发发电技术因其无需外加能量输入、可在环境条件下持续运行等特点而受到广泛关注^[26,27]。该类体系通常依赖蒸发驱动液体在多孔介质中持续流动,诱导离子在固-液界面发生迁移并建立电势差,从而为低功耗电子器件和离网地区自供能系统提供新的能量途径^[28,29]。已有研究表明,带电微纳米通道中的双电层是蒸发发电体系实现离子分离和电荷运输的核心基础^[30,31]。Xue等^[32]首次发现水在碳材料表面蒸发过程中可产生电信号,揭示了水蒸发发电的可行性。相较于传统多孔材料,MOF凭借有序且尺寸可调的限域通道、可设计的骨架结构及界面化学环境,在蒸发发电中展现出优良的离子传输潜力,有利于增强界面电荷分离并维持稳定电势输出。例如,研究人员利用具备高孔隙率和丰富表面电荷的MIL-53^[20]、MOF-303^[33]和UiO-66-NH₂^[34]等MOF构建了功能化纳米通道,借助水分子在孔道内的持续毛细流动诱导了高效的离子选择性传输,在自然蒸发条件下实现了优

异的开路电压输出。Wang等^[35]制备了具有亚纳米级通道的MOF材料,通过精确筛分水合离子实现单极性溶液流动,展现了其在海水等高盐度水体中进行蒸发发电的潜力。尽管上述研究验证了蒸发发电的可行性,但当前仍面临挑战。一方面,在海水的高离子强度中,扩散层被压缩,界面电动效应减弱,输出性能受到明显限制。另一方面,蒸发过程、界面离子迁移与宏观电信号输出之间的耦合关系尚缺乏清晰认识,制约了材料设计与器件性能的进一步提升。因此,制备兼具高离子传输效率、良好环境适应性及低成本MOF材料仍具挑战。

基于以上背景,本研究以废弃尼龙为原料,经碱性降解获得前驱液后,利用降解液中的己二酸(adipic acid,简称ADP)直接在全水相体系中引入铝盐构筑MOF材料(Al-ADP),避免了配体分离纯化及常规有机溶剂合成步骤,实现了从废塑料到功能MOF材料的绿色升级转化。并将其负载于粘胶纤维膜制备器件应用于水光伏发电(图1)。MOF中丰富的羧基及Al—O配位结构在固-液界面形成稳定的双电层,并构建连续的离子传输通道,从而实现蒸发驱动下的离子选择性迁移。结果表明,该体系在不同环境条件下均表现出稳定的发电性能,并在多器件集成条件下实现电压与电流的有效调控。结合分子动力学模拟,揭示了离子迁移在电势形成中的关键作用。本工作不仅为蒸发驱动发电材料的设计提供了新思路,也为废弃尼龙高值化利用拓展了新方向。

1 实验部分

1.1 主要原料与试剂

废弃渔网(尼龙66材质)来自武汉的一家回收站。十八水合硫酸铝、氢氧化钠、聚乙烯醇(PVA,聚合度为1750±50)、乙醇和其他药品均购买自国药集团药业股份有限公司。

1.2 废弃尼龙降解液直接构筑Al-ADP纳米花

废弃尼龙降解:将3.000 g废弃尼龙66与0.916 g NaOH加入到60 mL去离子水中。随后将其转移到100 mL水热反应釜中,在200 °C下反应24 h,得到尼龙降解液。

Al-ADP纳米花的制备:将25.440 g Al₂(SO₄)₃·18H₂O溶解于200 mL去离子水,随后加入200 mL尼龙降解液,在90 °C下回流反应

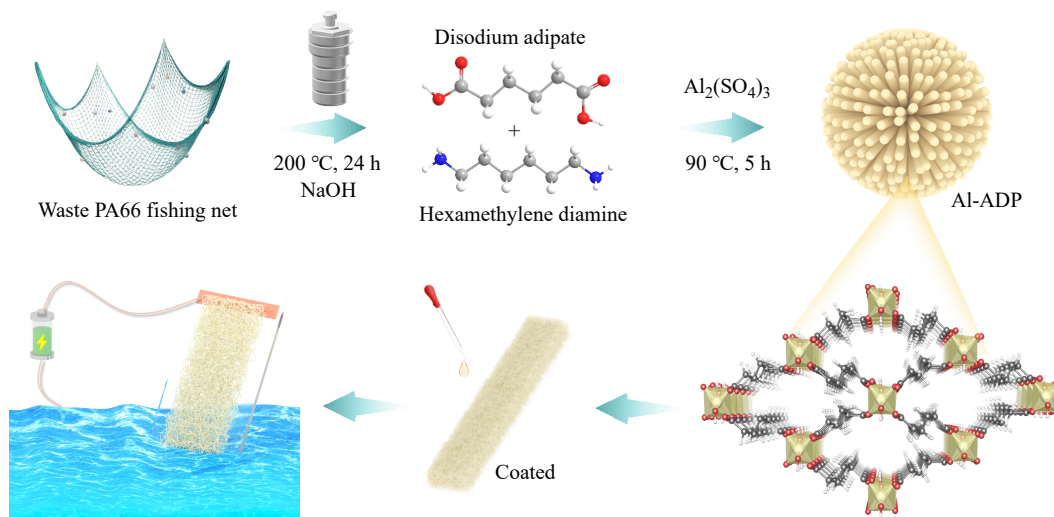


Fig. 1 Schematic illustration for the synthesis of Al-ADP from waste PA66 towards evaporation-driven electricity generation.

5 h. 沉淀物经去离子水、乙醇洗涤干燥后即可得到 Al-ADP 纳米花状 MOF 材料, 其产率按公式(1)计算:

$$\text{Al-ADP 产率} = \frac{m_{\text{Al-ADP}}}{M_{[\text{Al}(\text{OH})(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4)]} \times \frac{m_{\text{PA66}}}{M_{\text{PA66}}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $m_{\text{Al-ADP}}$ 为实验测得的 Al-ADP 产物质量, 理论的 Al-ADP 的摩尔质量根据分子式 $[\text{Al}(\text{OH})(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4)]$ 记为 $188 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; m_{PA66} 为降解溶液中 PA66 的初始投料质量; M_{PA66} 是 PA66 中重复单元的分子量 $226 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 计算得到由尼龙 66 回收制备的 Al-ADP 产率为 61.24%.

1.3 水蒸发发电器件的制备

将 35 mg Al-ADP 分散在 0.8 mL 的 2 wt% 聚乙烯醇溶液中(该比例基于前期预实验优化所得, 能够平衡涂层的 Al-ADP 密度与基底的海水传输通道). 之后均匀涂覆于 $1.5 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ 的黏胶无纺布上, 干燥后用导电铜胶将其固定于塑料板上, 采用环氧树脂封装下端铜胶得到 Al-ADP 发电器件.

1.4 仪器与表征

通过核磁共振氢谱($^1\text{H-NMR}$, NMR-600M, AscendTM)表征尼龙降解液的成分. 采用傅里叶红外光谱(FTIR, Bruker VERTEX 70)测定分析尼龙降解液、Al-ADP 及无纺布表面的官能团. 采用 X-射线衍射法(XRD, SmartLab-SE)表征 Al-ADP 的物相. 使用透射电子显微镜(TEM, Tecnai G2 F30)和扫描电子显微镜(SEM, SU8010)观察 Al-ADP 的微观形貌. 比表面积及孔径分析(Matrix

1000)用于孔结构表征, 并通过 DFT 模型计算孔径分布. 使用 X-射线光电子能谱(XPS, Thermo Scientific K-Alpha)进行元素以及结构分析. 使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Agilent 720ES)测量 Al-ADP 中的 Al 含量. 接触角测量(Dataphysics OCA15EC)表征膜的亲水性. 采用 Keysight DAQ970A 数据采集系统测量电压与电流.

2 结果与讨论

2.1 废弃尼龙的降解产物

为验证废弃尼龙的降解过程及产物组成, 对废弃尼龙 66、降解产物及重结晶得到的己二酸进行了 FTIR 与 $^1\text{H-NMR}$ 表征. FTIR 结果如图 2(a) 所示, PA66 在约 3300 cm^{-1} 处存在 N-H 伸缩振动峰, 在 1630 cm^{-1} (酰胺 I 带, C=O) 和 1540 cm^{-1} (酰胺 II 带) 处表现出典型酰胺特征吸收峰. 降解液及重结晶产物中, 上述酰胺特征峰基本消失, 同时在 1700 cm^{-1} 处出现羧基 C=O 特征峰, 表明酰胺键发生断裂并转化为羧基结构, 说明尼龙已成功降解. 进一步通过 $^1\text{H-NMR}$ 对降解产物进行分析, 图 2(b) 结果显示降解液中在 $\delta=2.70$ 和 $1.35 \sim 1.5$ 处出现特征信号, 分别归属于 1,6-己二胺中的 $-\text{CH}_2-$ 和 $-\text{NH}_3$. 经降温重结晶后所得产物在 $\delta=1.50$ 、 2.20 和 12.00 处分别对应己二酸的亚甲基及羧基质子信号. 上述结果表明, 废弃尼龙降解为 1,6-己二胺与己二酸. 该降解液无需分离纯化配体即可用于后续 Al-ADP 的水相构筑, 从而简化

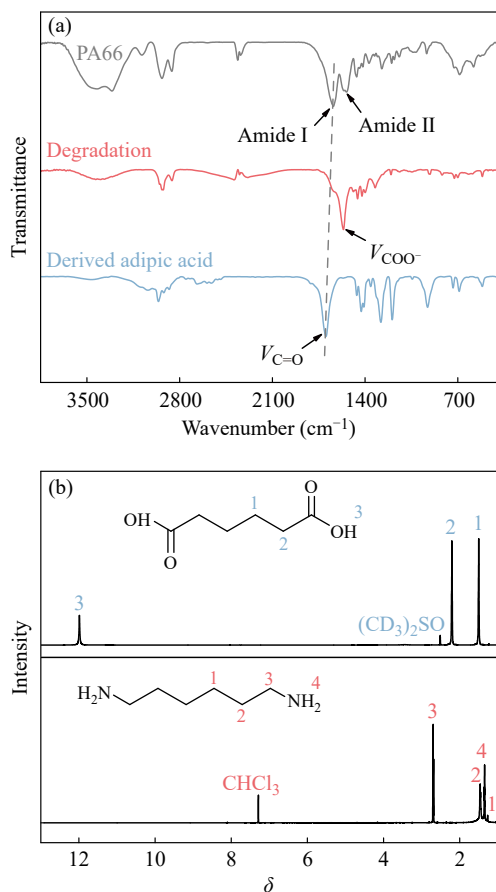


Fig. 2 (a) FTIR spectra and (b) ^1H -NMR spectra of the nylon degradation solution and the recrystallized product.

了MOF的制备流程.

2.2 Al-ADP的晶体结构

在合成Al-ADP后,为了确认其晶体结构,对其进行了结构解析与模拟分析.如图3(a)所示,Al-ADP的实验粉末X射线衍射谱图与模拟标准谱图^[36]基本一致,表明所合成的Al-ADP具有良好的结晶性和元素组成纯度.电感耦合等离子体(ICP)测得样品中Al的质量分数为14.6%,与理论计算值(14.36%)一致,进一步证实了Al-ADP的纯度. Al-ADP的配位模式如下图3(b)所示, Al^{3+} 中心呈现典型的六配位构型,由6个氧原子构成 AlO_6 配位八面体.其中,2个氧原子来源于Al—O—Al桥联结构,其余4个氧原子分别来自4个不同己二酸配体的羧基氧,从而形成稳定的次级结构单元.在此基础上,如图3(c)所示,每个己二酸配体中的4个羧基氧分别与4个不同的Al中心发生配位,表现出多齿桥联配位模式, AlO_6 配位八面体通过羧基桥联沿特定方向延展,形成一维无限延伸的链状结构单元,这些链状单

元进一步通过有机配体连接构筑二维层状结构,并经层间堆积形成三维有序框架,见图3(d), Al-ADP的整体拓扑结构与经典的MIL-53(Al)型框架一致.

2.3 Al-ADP的微观形貌

为探究Al-ADP的微观形貌及元素分布,对其进行了TEM、SEM及EDS表征.如图4(a)所示,TEM图像表明Al-ADP主要由长度约200~500 nm、直径约100 nm的纳米棒组成,表现出较为规整的晶体形貌.如图4(b)所示,在低倍SEM图像中,样品整体呈现出由纳米棒自组装形成的纳米花状结构,单个纳米花的尺寸约为3 μm ,分布较为均匀.图4(c)高倍SEM图像可见这些纳米花由大量纳米棒沿径向组装而成,形成层级结构,表面较为粗糙且具有丰富的微观结构特征.该类由一维纳米结构构筑的三维分级结构有助于提供更多暴露的活性位点.为确认材料的元素组成及分布情况,对其进行了EDS元素分布分析.如图4(d)~4(f)所示,C、O和Al元素在整个纳米花结构中均匀分布,未观察到明显的元素偏析或者相分离现象.

2.3 Al-ADP的孔结构与电子结构

为系统分析Al-ADP的孔结构特征,对其进行了 N_2 吸附-脱附等温线及DFT孔径分布测试.如图5(a)所示,Al-ADP的吸附等温线在低相对压力区域($P/P_0 < 0.1$)表现出缓慢的吸附增加,说明材料中存在一定的微孔.随着相对压力的升高,吸附量在中压区($0.1 < P/P_0 < 0.8$)持续增加,表明吸附过程主要由外表面吸附及介孔填充所主导.在高相对压力区域($P/P_0 > 0.9$),吸附量的跃升以及吸附-脱附曲线之间存在显著滞后回线表明材料中存在典型的毛细凝聚行为.根据IUPAC分类,该结果可归属于典型的IV型等温线,说明Al-ADP具有介孔结构特征.通过DFT方法分析其孔径分布可知,Al-ADP存在小于1 nm的微孔结构,对应于MOF骨架本身的亚纳米孔道,Al-ADP中也存在尺寸为4 nm的介孔结构,该部分主要来源于纳米棒组装形成的纳米花结构及其堆积孔隙. Al-ADP具有由骨架微孔与结构介孔协同构成的分级孔结构,其中微孔有助于实现离子的限域与选择性传输,而介孔及颗粒间孔隙则有利于水分子与电解质的快速扩散,从而在蒸发驱动发电过程中同时提升离子迁移效率与电势输出稳

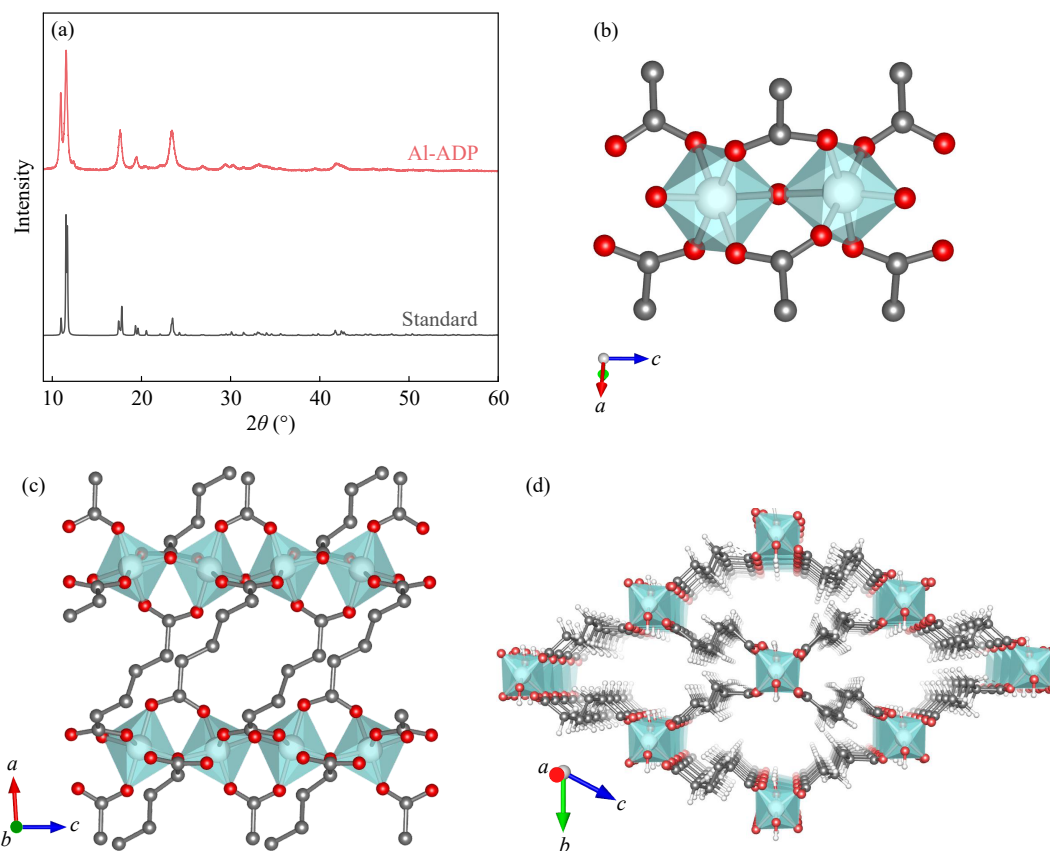


Fig. 3 Crystal structure of Al-ADP with a MIL-53(Al)-type topology: (a) XRD patterns; (b–d) The coordination environment and framework connectivity.

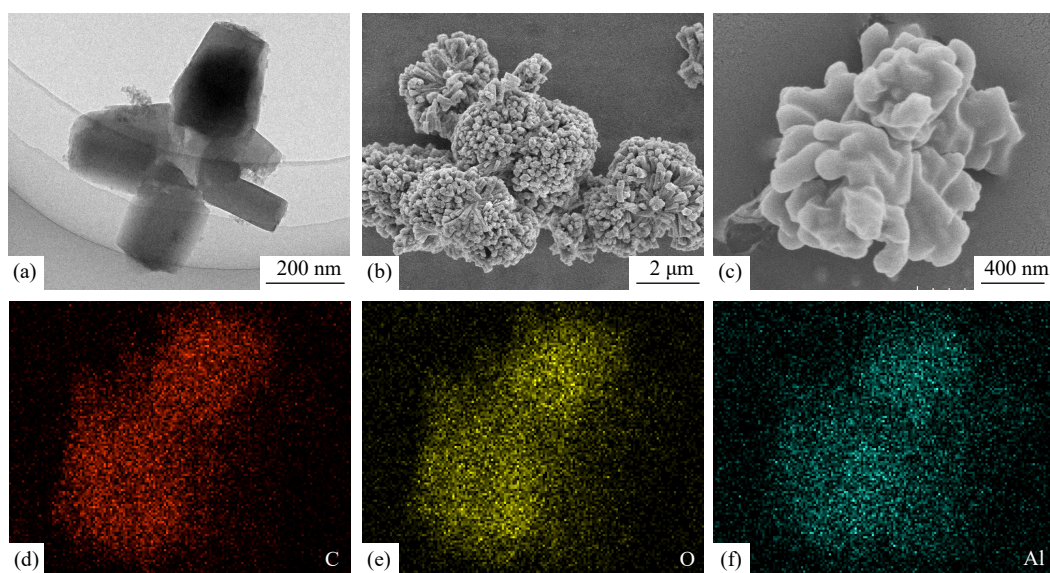


Fig. 4 Morphology and elemental distribution of Al-ADP. (a) TEM image of Al-ADP; (b) Low-magnification SEM image showing the overall morphology; (c) High-magnification SEM image revealing the detailed surface structure; (d–f) EDS elemental mapping images of C, O and Al.

定性^[35].

为了分析 Al-ADP 的表面元素组成及其化学态，对其进行了 X 射线光电子能谱(XPS)测试。

图5(b)高分辨 Al 2p 谱在约 74.5 eV 处呈现单一对称峰，对应于 Al^{3+} 的特征结合能，表明 Al 主要以三价形式存在，并与氧原子形成稳定的配位环

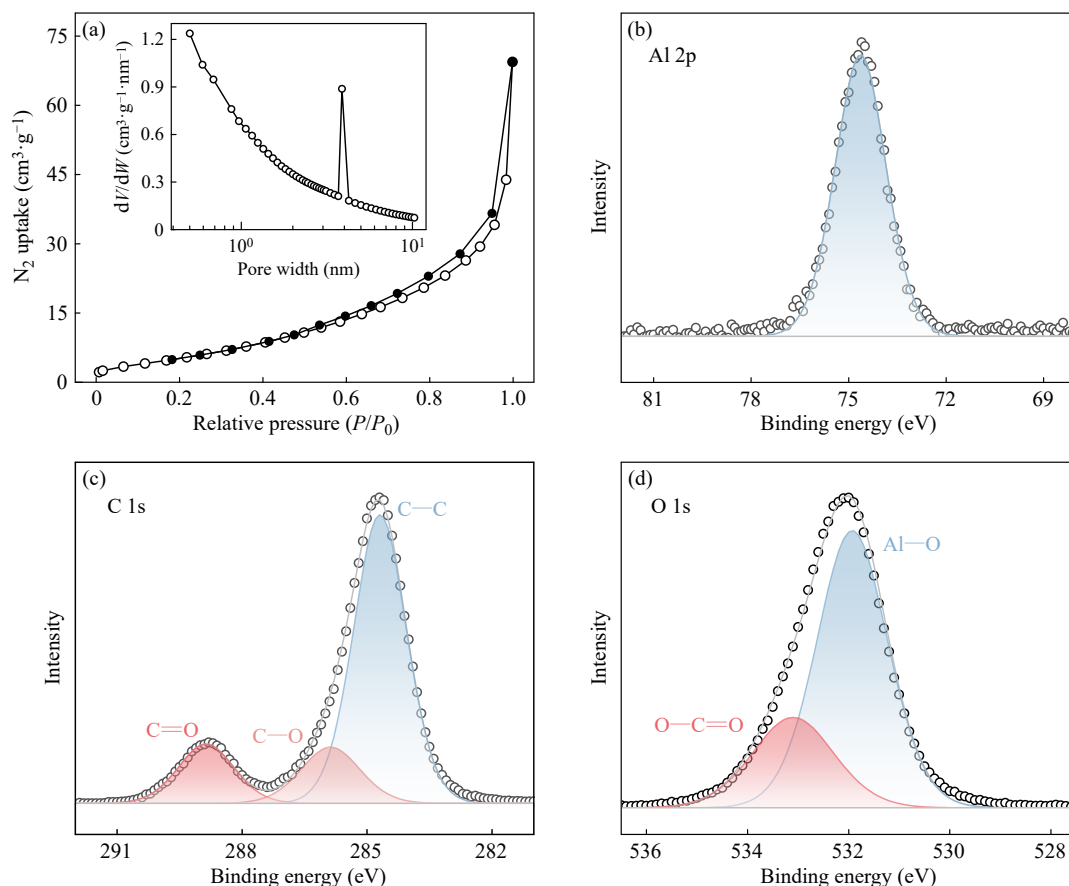


Fig. 5 (a) N_2 adsorption-desorption isotherms of Al-ADP and DFT pore size distribution; (b-d) High-resolution spectra of Al 2p, C 1s and O 1s.

境. 图5(c) C 1s谱可分解为3个特征峰, 分别位于 284.8 eV (C—C/C—H)、286.0 eV (C—O) 和 288.5 eV (O—C=O), 其中羧基相关峰的存在表明己二酸配体中的羧基结构得以保留并参与金属配位. 与此同时, 图5(d) O 1s谱在 531.9 eV 处出现的特征峰可归属于 Al—O 键, 在 533.1 eV 处出现的特征峰可归属于羧基中的 C=O 键, 证明了 Al^{3+} 与羧基氧之间形成稳定的配位结构.

2.4 Al-ADP膜的形貌与性能

为了探究 PVA 与 Al-ADP 交联后膜材料的表面形貌, 对其进行了 SEM 表征. 在低倍图 6(a) 中可以观察到黏胶纤维无纺布基底构成相互交错的三维纤维网络, 纤维直径约为 10~20 μm . 涂覆后的黏胶纤维表面粗糙, 表明 Al-ADP 负载于基底表面, 并沿纤维表面均匀分布. 高倍图 6(b) 显示, 交联后的 Al-ADP 仍保留纳米花形貌, 说明 PVA 作为高分子黏结剂, 凭借其丰富的羟基与 MOF 表面极性官能团形成稳定的多重氢键作用, 既实现了活性材料在纤维表面的牢固附着, 又未造成完全遮盖. 同时, PVA 在颗粒间构建的氢键网络

将分散的 Al-ADP 纳米花连接起来, 在纤维表面形成连续且稳定的功能涂层. 该多孔涂层与无纺布基底的亲水网络协同作用, 不仅确保水分子的快速渗透与持续供应, 还在微观尺度上构建了连续的离子传输路径. Al-ADP 自身丰富的带电界面、限域孔隙结构以及粗糙表面, 进一步增强了水分子铺展与界面接触, 为蒸发驱动下的离子定向迁移及电势形成提供了有利的结构保障.

为评估 Al-ADP 膜的实际应用潜力, 对其宏观尺寸、化学稳定性及机械性能进行了表征. 如图 6(c) 所示, 该膜可实现大面积制备 (长 200 cm $\times$ 宽 20 cm), 且整体结构均匀连续, 表明该材料体系具有良好的可扩展性和实际应用可行性. 图 6(d) 在强碱条件 (pH=14) 下浸泡 24 h 后, 膜的表面材料未发生明显脱落或者溶解, 说明 PVA 与 Al-ADP 之间形成的多重氢键网络能够实现良好的化学稳定性, 使其在极端环境中仍保持结构完整. 此外, 图 6(e) 可以看出膜在外力作用下可发生明显弯曲, 表现出优异的柔性, 这主要归因于无纺布基底的纤维网络结构以及 PVA 的物理交

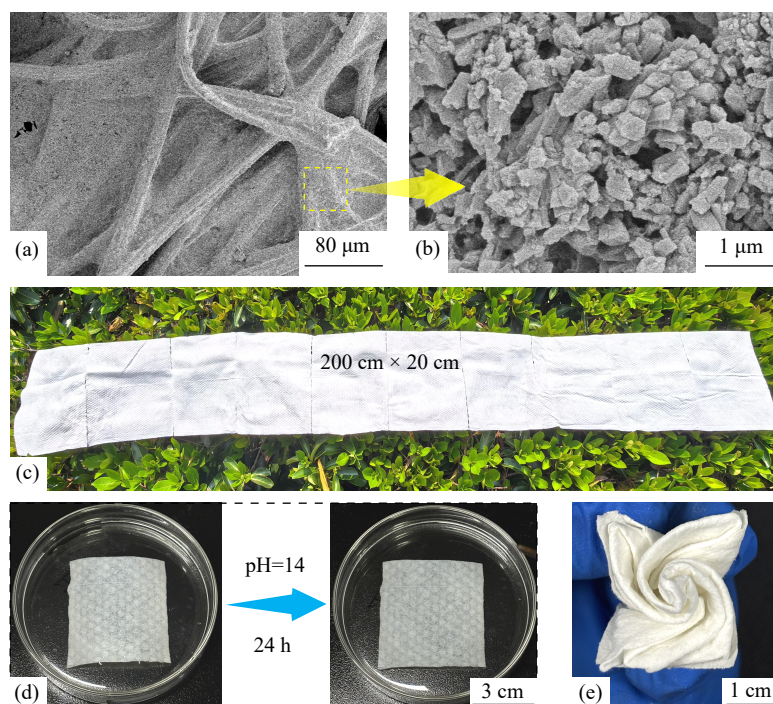


Fig. 6 (a, b) SEM images of the PVA/Al-ADP coated membrane; (c) Large-area membrane; (d) Stability under strong alkaline conditions; (e) Mechanical flexibility under deformation.

联作用. 综合来看, 该复合膜兼具宏量可制备性、优异的化学稳定性及良好的机械柔性, 为在实际发电及复杂环境中的应用提供了可靠保障.

如图 7(a)所示, 为了验证 Al-ADP 在粘胶无纺布表面的成功负载及其对膜表面化学性质的调控, 对基底膜、Al-ADP 及涂覆后的 Al-ADP 膜进行了红外表征. 黏胶纤维膜基底在约 $1000\sim 1100$ 和 900 cm^{-1} 处出现明显的 C—O 伸缩振动和 C—H 键吸收, 体现出纤维素基底的典型结构特征. 而纯 Al-ADP 不仅在 $1400\sim 1470\text{ cm}^{-1}$ 处出现 $-\text{CH}_2-$ 骨架振动, 也在 $1580\sim 1600$ 、 $1200\sim 1300$ 以及 $600\sim 700\text{ cm}^{-1}$ 处分别出现了强烈的羧酸盐 C=O 不对称伸缩振动、O—H 振动以及 Al—O 特征配位吸收峰. 这不仅证实了己二酸配体中羧基与金属中心的稳定配位, 也表明 MOF 中富含极性含氧基团. 对于复合后的 Al-ADP 膜, 其红外谱图保留了基底的 C—O/C—H 特征峰与 Al-ADP 的 C=O、Al—O 吸收峰. 随后通过润湿性能测试评估 Al-ADP 膜的亲水性. 如图 7(b)和 7(c)所示, 仅涂覆 PVA 的基底膜的水接触角约为 98° , 水滴完全铺展所需时间约为 10.7 s. 而 Al-ADP 膜的初始水接触角降低至约 73° , 水滴完全铺展时间显著缩短至 1.8 s. 这表明 Al-ADP 的引入提升了膜

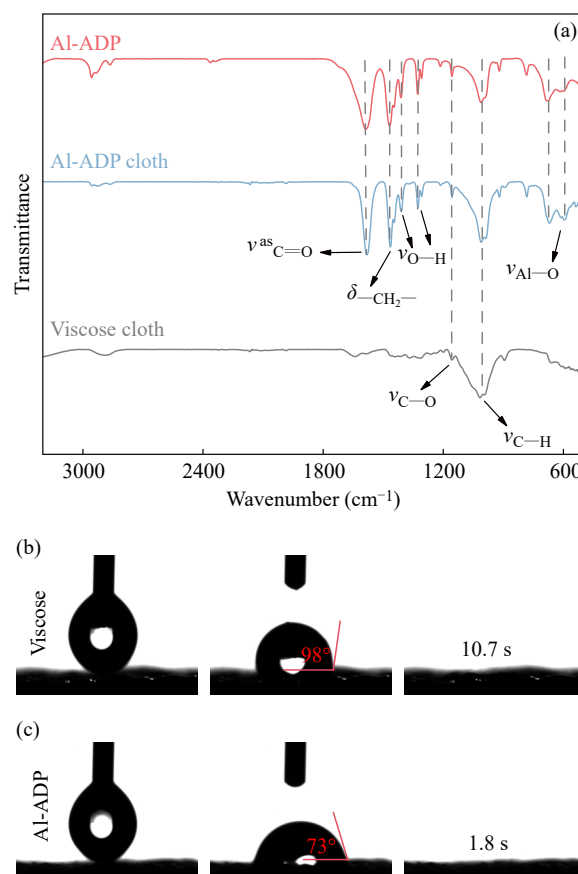


Fig. 7 (a) FTIR spectra of viscose cloth, Al-ADP, and Al-ADP cloth; (b, c) Water contact angle images of viscose cloth and Al-ADP cloth.

表面的润湿性和水扩散能力. 其原因主要在于 Al-ADP 中丰富的羧基和金属-氧配位结构提高了表面极性, 且涂覆后形成的粗糙结构增强了水分子在界面处的铺展与渗透. 上述结果说明, Al-ADP 不仅附着于纤维基底, 还有效改善了膜的表面化学环境与润湿行为, 利于增加固-液界面的负电荷位点, 为蒸发驱动下构建稳定的双电层及实现离子的选择性迁移奠定了基础.

2.5 Al-ADP 器件的海水发电性能

为评估 Al-ADP 器件的发电性能进行了室内发电测试, Al-ADP 器件下端浸于海水溶液以实现持续供水. 在这一过程中, 水分由下向上持续迁移, 并在膜表面发生蒸发, 同时伴随着电信号的产生. 图 8(a) 示意了蒸发驱动发电装置的工作原理, 其中膜两端通过铜胶连接外部数据采集器以实时记录电压和电流信号. 在水分流动过程

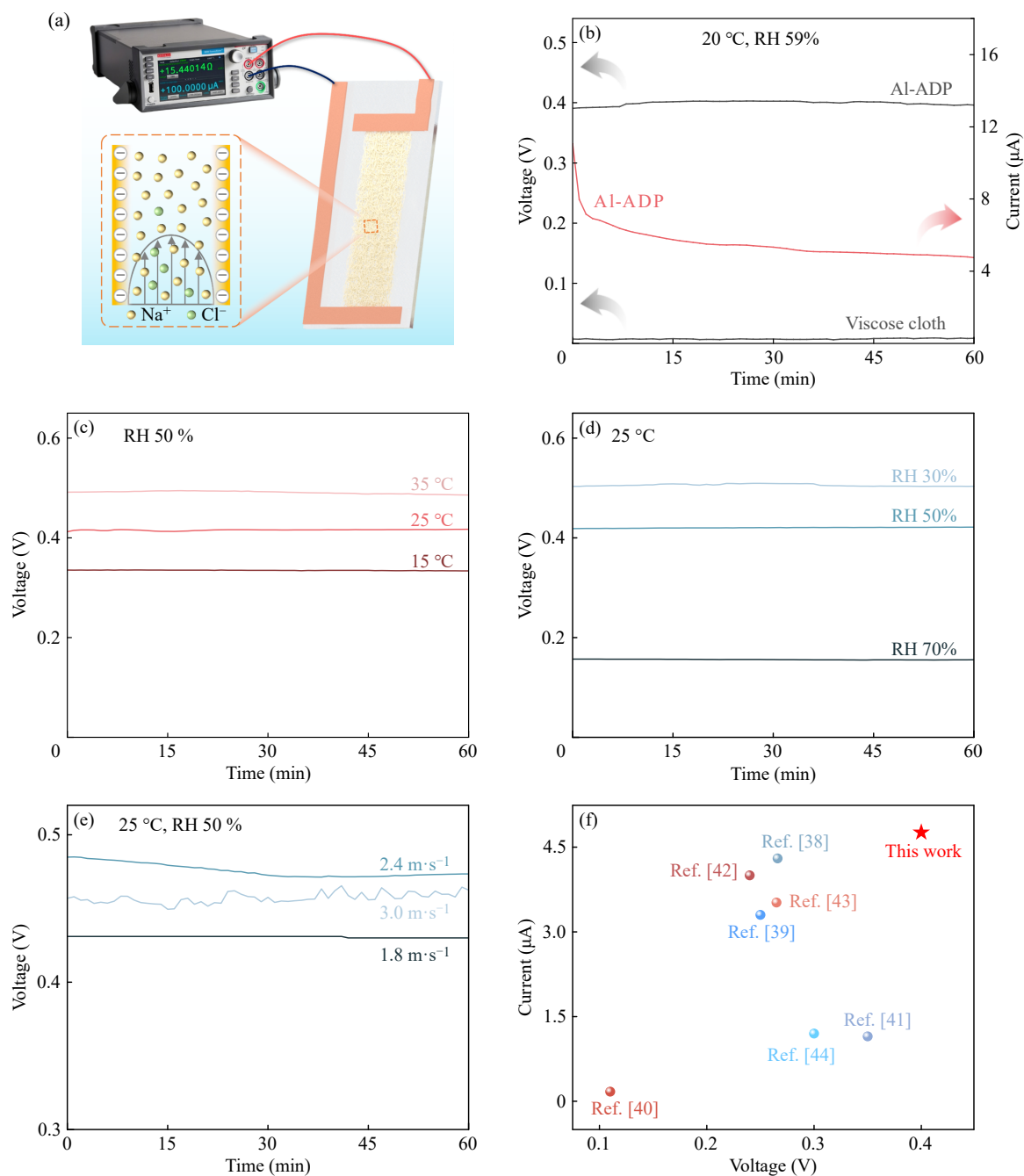


Fig. 8 (a) Schematic illustration of the evaporation-driven power generation device; (b) Output voltage and current as a function of time; Output voltage at (c) different temperatures, (d) different relative humidity levels, and (e) different wind speeds; (f) Performance comparison with some reported systems.

中,膜表面带电基团与溶液中的离子相互作用,在固-液界面形成双电层结构.当水分持续蒸发时,液体流动会驱动双电层中的反离子沿特定方向迁移,而同号离子受到排斥,从而在膜两端形成电荷分离并输出电势^[37].该蒸发-离子传输耦合过程实现了无需外部能量输入的持续电能输出.如图8(b)所示,在20℃、RH 59%条件下,粘胶布的输出电压为7.3 mV,输出电流0.033 nA,Al-ADP器件的输出电压在60 min内维持在0.39~0.41 V,表明体系具有良好的稳定性.输出电流由11.06 μ A逐渐衰减至4.76 μ A,说明器件在启动阶段具有较高的离子迁移通量,随后逐渐达到蒸发-海水流动-离子输运之间的动态平衡状态.

接着在稳定的恒温恒湿箱中测试环境因素对器件输出电压的影响,发现温度对器件输出具有显著促进作用.如图8(c)所示,在RH 50%条件下,随着温度由15℃提升至35℃,输出电压由约0.335 V增加至0.491 V,呈连续上升趋势.这一结果表明温度升高能够增强水分蒸发速率,从而提高界面离子迁移驱动力并促进电势输出.同时,不同温度下电压曲线均保持较高稳定性,说明该体系在较宽温度范围内具有可靠的工作能力.相比之下,相对湿度对性能的调控更为显著.图8(d)中25℃条件下,当RH从30%提高至70%时,输出电压由约0.501 V显著下降至0.156 V.该结果表明湿度升高显著削弱蒸发驱动力,从而抑制离子定向迁移过程,是限制蒸发驱动发电体系性能的关键因素.此外,风速对器件输出表现出非单调调控行为.如图8(e)所示,25℃、RH 50%条件下,随着风速由1.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至2.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,输出电压由0.431 V提升至0.476 V,但增加至3.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,电压下降至0.457 V.这一结果说明适度的风能够通过增强蒸发速率提高输出性能,但过高风速可能导致蒸发与海水传输速度失配,从而限制电势进一步提升,表明该体系存在最优蒸发-传输耦合条件.综合上述结果可以看出,Al-ADP膜的发电性能主要受蒸发驱动过程控制,其中湿度为主导调控因素,温度与风速起辅助调节作用.与图8(f)的既往研究相比,Al-ADP膜的发电性能优于目前报道的多数蒸发诱导发电器件.

2.6 Al-ADP的水伏发电机理

为探究在Al-ADP膜中的离子传输行为,在

模拟海水环境中对 Na^+ 和 Cl^- 的扩散过程进行了分子动力学模拟.如图9(a)所示,初始状态下, Na^+ 和 Cl^- 在体系中呈均匀分布.如图9(b)所示,10 ns后离子分布发生明显变化,表现出沿特定方向的迁移趋势,表明体系中存在定向离子传输过程.图9(c)为 Na^+ 与 Cl^- 的均方位移(MSD)随时间的线性变化关系,表明2种离子在体系中均表现出稳定的扩散行为.根据MSD-时间关系计算得到的扩散系数(D)分别为 $D_{\text{Na}^+}=0.8014\times 10^{-5} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $D_{\text{Cl}^-}=0.6035\times 10^{-5} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$,显示 Na^+ 的迁移能力明显高于 Cl^- .

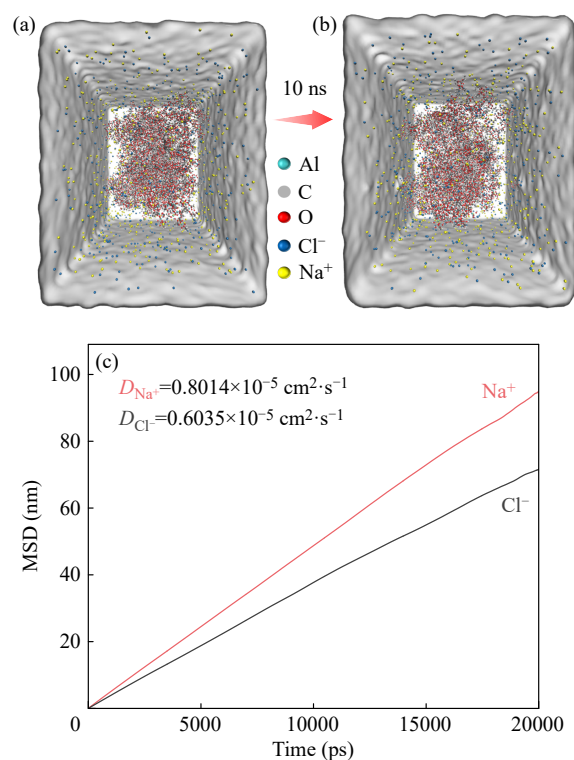


Fig. 9 Molecular dynamics simulation (MSD) of ion transport in the Al-ADP system. (a) Initial configuration and (b) final configuration after 10 ns simulation in simulated seawater; (c) Mean square displacement (MSD) curves of Na^+ and Cl^- , together with the corresponding diffusion coefficients.

这一扩散差异可归因于材料界面结构与化学环境的协同调控.一方面,Al-ADP中丰富的羧基及Al-O配位结构使膜表面带有负电荷,从而在固-液界面形成双电层,并对离子产生选择性作用,使 Na^+ 作为反离子更易在界面附近富集并参与迁移.另一方面,Al-ADP构建的连续网络结构为离子提供了稳定的传输路径,而该结构对不同离子的传输阻力不同,从而放大了阳阴离子

的迁移速率差异. 在蒸发驱动条件下, 这种由材料结构与界面双电层共同调控的离子迁移差异, 将直接导致界面处电荷分离的增强, 即 Na^+ 在蒸发诱导流动中优先沿界面迁移, 而 Cl^- 的迁移受到限制, 从而在膜两端形成稳定电势输出. 此外, MSD 曲线在整个模拟时间内保持良好的线性增长, 说明体系中不存在离子阻塞现象, 表明该结构能够提供连续且有效的离子传输通道, 这与实验中观察到的稳定电压输出结果一致.

2.7 AI-ADP集成器件的户外发电性能

为了评估 AI-ADP 器件的发电性能, 对其在不同环境条件下的输出特性进行了定量分析. 首先, 为评估 AI-ADP 器件在实际环境中的应用潜

力, 于 2026 年 3 月 13 日在校园化学楼 4 楼天台 (实测器件表面温度为 $19\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境湿度为 $45\%\sim 55\%$) 采用 20 个器件搭建如图 10(a) 所示的装置进行了户外集成测试, 并分别构建串联与并联连接方式. 在串联连接模式下, 各单元器件输出电压电流见图 10(b), 发现电压能够有效叠加, 整体稳定在 6.0 V , 最高可达 6.59 V . 同时, 输出电流随时间逐渐衰减并趋于稳定, 其在 120 min 时的稳态电流为 $1.3\text{ }\mu\text{A}$. 该结果表明, 在多器件串联过程中, 各单元之间具有良好的匹配性与协同输出能力, 在实现电压放大的同时仍能够维持稳定的离子输运过程.

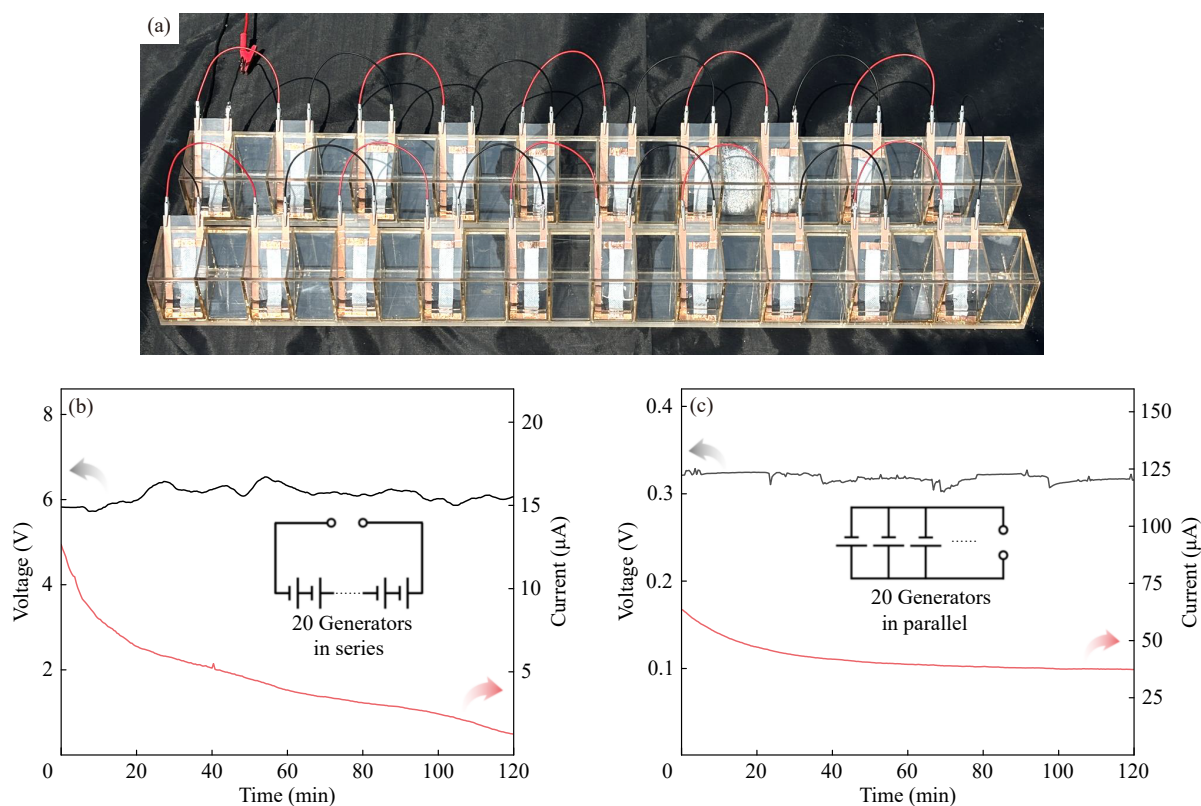


Fig. 10 (a) Schematic illustration of the outdoor test with 20 devices; (b) Output performance of 20 devices connected in series; (c) Output performance of 20 devices connected in parallel.

相比之下, 在并联连接模式下, 各单元器件输出电压电流见图 10(c), 体系输出电流显著增强, 而电压基本维持在单器件水平. 实验结果表明, 并联体系的平均输出电压为 0.32 V , 而电流随时间逐渐衰减并最终稳定在 $38\text{ }\mu\text{A}$. 这说明各器件在并联状态下能够协同提供稳定电流输出, 且未出现明显的电流分配不均或异常衰减现象. 在户外环境及多单元集成条件下, 器件仍能够维

持稳定的输出, 说明蒸发驱动的离子迁移机制在复杂环境中依然有效. AI-ADP 膜器件不仅具备优异的单器件性能, 还具有良好的规模化集成能力与环境适应性, 为其在实际自供能系统中的应用提供了重要基础.

3 结论

以废弃尼龙为原料, 通过碱性降解液直接与

铝盐反应, 在水相中构筑了具有分级孔结构的 Al-ADP, 实现了从废弃高分子到功能 MOF 材料的绿色升级转化. 得益于 Al-ADP 较低的空间位阻与柔顺性, 兼具内部连续的限域多孔通道与充分暴露的极性丰富的官能团, 在固液界面形成稳定的双电层, 有效调控了离子传输行为. 电化学性能测试表明, Al-ADP 膜在蒸发驱动条件下能够实现 0.41 V 的稳定的电压与 4.76 μA 的电流输出, 并探究了温度、湿度及风速等环境因素对其发电性能的影响. 在户外条件下, 通过多器件集成进一步实现了电压与电流的放大输出, 其中 20 个器件串联可达到 6.59 V 的输出电压, 而并联连接可达到 38 μA 的输出电流, 表明该体系具有良好的可扩展性与实际应用潜力. 结合分子动

力学模拟结果发现, Na^+ 与 Cl^- 在体系中表现出明显的迁移差异性, 其中 Na^+ 具有更高的扩散能力. 在 Al-ADP 带电界面与纳米通道结构的协同作用下, 离子选择性迁移得以增强, 从而在蒸发驱动过程中形成稳定的电荷分离与电势输出. 因此, Al-ADP 膜的发电行为可归因于蒸发驱动流体运输、双电层诱导的离子分离以及官能团增强的离子选择性迁移的协同作用. 本工作不仅为蒸发驱动发电材料的设计提供了新的思路, 该策略还避免了传统 MOF 合成中配体预分离纯化和有机溶剂体系的使用, 为废弃塑料衍生 MOF 材料的绿色可控制备提供了新路径, 在环境能源收集与可持续材料领域具有重要意义.

REFERENCES

- 1 Liu, Y.; Yan, P. L.; Li, X. D.; Li, Q. Y.; Li, S. M.; Han, H.; Chu, M. Y.; Fu, J.; Cao, M. H.; Xu, P. P.; Zhang, Q.; He, L.; Chen, J. X. Selective recycling of mixed polyesters *via* heterogeneous photothermal catalysis. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(7), 2412740.
- 2 Zhang, S.; Xu, W. H.; Zhao, X.; Liu, Y. F.; Yan, L.; Liu, X. H.; Xu, S. M.; Wang, Y. Z. Adjustable upcycling of polyethylene terephthalate to biodegradable polymer monomers by Mn-catalyzed solvent switching strategy. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, 64(32), e202505490.
- 3 Wen, X. Y.; Niu, R.; Tang, T.; Gong, J. Atmospheric, continuous degradation of poly(ethylene terephthalate) waste by ZnO. *Appl. Catal. B Environ. Energy*, **2025**, 377, 125485.
- 4 Wu, X. Y.; Bangalore Ashok, R. P.; Wang, X.; Webber, M. S.; Brenner, A. E.; Drake, G.; Miscall, J.; Lincoln, C.; Van Roijen, E.; Haugen, S. J.; DesVeaux, J. S.; Uekert, T.; Shao-Horn, Y.; Stahl, S. S.; Beckham, G. T.; Román-Leshkov, Y. Alcoholysis of nylon 6 waste to ϵ -caprolactam promoted by phosphoric acid. *Chem*, **2026**, 102966.
- 5 Kumar, A.; von Wolff, N.; Rauch, M.; Zou, Y. Q.; Shmul, G.; Ben-David, Y.; Leitus, G.; Avram, L.; Milstein, D. Hydrogenative depolymerization of nylons. *J. Am. Chem. Soc.*, **2020**, 142(33), 14267–14275.
- 6 梁程耀, 黄威蕾, 高宇, 俞森龙, 相恒学, 朱丽萍, 胡泽旭, 成艳华, 朱美芳. 熔融纺高强度聚酰胺纤维及其凝聚态结构调控研究进展. *高分子学报*, **2026**, 57(1), 79–94.
- 7 Gama, N.; Penzo, D.; Godinho, B.; Rossignolo, G.; Quinteiro, P.; Dias, A. C.; Modesti, M.; Ferreira, A.; Lorenzetti, A.; Barros-Timmons, A. Rethinking nylon recycling: a novel chemical approach for sustainable polyamide valorization. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2026**, 14(1), 120988.
- 8 刘雪辉, 徐世美, 张帆, 汪秀丽, 王玉忠. 高分子材料的化学升级回收. *高分子学报*, **2022**, 53(9), 1005–1022.
- 9 Chu, M. Y.; Tu, W. L.; Zhang, Q.; Huang, W. Y.; Chen, J. X.; Ma, D. Co-recycling of plastics and other waste materials. *Nat. Rev. Clean Technol.*, **2025**, 1(5), 320–332.
- 10 de Witt, J.; Luthe, T.; Wiechert, J.; Jensen, K.; Polen, T.; Wirtz, A.; Thies, S.; Frunzke, J.; Wynands, B.; Wierckx, N. Upcycling of polyamides through chemical hydrolysis and engineered *Pseudomonas putida*. *Nat. Microbiol.*, **2025**, 10(3), 667–680.
- 11 Bayer, T.; Palm, G. J.; Berndt, L.; Meinert, H.; Branson, Y.; Schmidt, L.; Cziegler, C.; Somvilla, I.; Zurr, C.; Graf, L. G.; Janke, U.; Badenhorst, C. P. S.; König, S.; Delcea, M.; Garscha, U.; Wei, R.; Lammers, M.; Bornscheuer, U. T. Structural elucidation of a metagenomic urethanase and its engineering towards enhanced hydrolysis profiles. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(38), e202404492.
- 12 Lv, W. X.; Li, M. S.; Tao, Y. H. Bridged bicyclic lactam enables chemically recyclable nylon. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(19), e202402541.

- 13 刘辉, 高佳莲, 朱金佗, 李湘, 刘志扬, 黄壮, 张昌伟, 汪少振, 张生辉, 李晓鹏, 赵越, 徐欢. 界面键合调控双金属有机框架在聚乳酸纳纤原位生长及其纳米颗粒物捕集性能研究. *高分子学报*, **2026**, 57(4), 877–888.
- 14 Sun, N. N.; University, X. J.; Ahmad Shah, S. S.; Lin, Z. Y.; Zheng, Y. Z.; University, X. J.; University, X. J.; Jiao, L.; Jiang, H. L. MOF-based electrocatalysts: an overview from the perspective of structural design. *Chem. Rev.*, **2025**, 125(5), 2703–2792.
- 15 Zhang, X. Y.; She, Y.; Wen, X. Y.; Hu, G. X.; Yu, X. P.; Li, X. Y.; Zhu, X. Y.; Niu, R.; Feng, L. L.; Gong, J. Upcycling waste plastic into electrocatalyst: waste nylon fishnet-derived flexible & rigid Co/Fe-MOF for efficient oxygen evolution reaction. *Appl. Catal. B Environ. Energy*, **2026**, 384, 126184.
- 16 Kumar, N.; Patial, B.; Navdeep, Gupta, R.; Bansal, A. From framework to function: MOF-derived nanoparticles in photocatalysis, electrocatalysis, adsorption, and energy storage. *Coord. Chem. Rev.*, **2026**, 550, 217391.
- 17 Niu, Y. W.; Wang, Y. H.; Zhang, H. J. MOF in catalysis, sensing and energy storage applications. *Nano Energy*, **2026**, 147, 111598.
- 18 Wang, C. Y.; Chu, H. Y.; Wang, C. C. Converting waste PET plastics to high value-added MOFs-based functional materials: a state of the art review. *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 518, 216106.
- 19 He, P. P.; Hu, Z.; Dai, Z. K.; Bai, H. Y.; Fan, Z. F.; Niu, R.; Gong, J.; Zhao, Q.; Tang, T. Mechanochemistry milling of waste poly(ethylene terephthalate) into metal-organic frameworks. *ChemSusChem*, **2023**, 16(2), e202201935.
- 20 She, Y.; Hu, G. X.; Wen, X. Y.; Wang, H. Y.; Yang, M.; Feng, L. L.; Dai, Z. K.; Wei, Q. Y.; Niu, R.; Gong, J. High-performance freshwater-hydroelectricity co-generation by porous carbon through waste polyester-derived MOF-assisted carbonization. *Sci. China Mater.*, **2026**, 69(3), 1508–1517.
- 21 Rao, W. Q.; Chen, F.; Gong, J. Waste-to-MOF: upcycling of waste polyimide into europium-based metal-organic framework as efficient fluorescence sensor of biogenic amines. *Chem.*, **2026**, 32(9), e03426.
- 22 She, Y.; Han, W. K.; Liu, H. J.; Hu, G. X.; Wang, H. Y.; Wen, X. Y.; Liu, L. J.; Feng, L. L.; Zhang, X. Y.; Gong, J. Trace solvents-assisted mechanochemistry of waste poly(ethylene terephthalate) into MIL-53Al for efficient hydroelectricity generation. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 515, 163895.
- 23 Liu, L. J.; Liu, H. J.; Fan, Z. F.; Liu, J.; Wen, X. Y.; Wang, H. Y.; She, Y.; Hu, G. X.; Niu, R.; Gong, J. Simultaneous solar-driven interfacial evaporation and photo-Fenton oxidation by semiconducting metal-organic framework from waste polyimide. *Energy Environ. Mater.*, **2025**, 8(2), e12812.
- 24 范子芬, 刘华健, 刘丽洁, 牛冉, 刘洁, 龚江. 废弃聚对苯二甲酸乙二醇酯升级再造为碳材料和金属-有机框架材料. *高分子通报*, **2023**, 36(11), 1454–1470.
- 25 Farber, E. M.; Seraphim, N. M.; Tamakuwala, K.; Stein, A.; Rücker, M.; Eisenberg, D. Porous materials: the next frontier in energy technologies. *Science*, **2025**, 390(6772), eadn9391.
- 26 Li, P. Y.; Hu, Y. J.; He, W. Y.; Lu, B.; Wang, H. Y.; Cheng, H. H.; Qu, L. T. Multistage coupling water-enabled electric generator with customizable energy output. *Nat. Commun.*, **2023**, 14, 5702.
- 27 Xu, J. X.; Wang, P. F.; Bai, Z. Y.; Cheng, H. H.; Wang, R. Z.; Qu, L. T.; Li, T. X. Sustainable moisture energy. *Nat. Rev. Mater.*, **2024**, 9(10), 722–737.
- 28 Wang, X. F.; Lin, F. R.; Wang, X.; Fang, S. M.; Tan, J.; Chu, W. C.; Rong, R.; Yin, J.; Zhang, Z. H.; Liu, Y. P.; Guo, W. L. Hydrovoltaic technology: from mechanism to applications. *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, 51(12), 4902–4927.
- 29 Zhang, J. J.; Cui, P.; Wang, J. J.; Meng, H.; Ge, Y.; Feng, C.; Liu, H. M.; Meng, Y.; Zhou, Z. K.; Xuan, N. N.; Zhang, B.; Cheng, G.; Du, Z. L. Paper-based hydroelectric generators for water evaporation-induced electricity generation. *Adv. Sci.*, **2023**, 10(31), 2304482.
- 30 Hu, G. X.; Liu, H. J.; Liu, K. K.; Wang, H. Y.; Wen, X. Y.; Liu, L. J.; She, Y.; Feng, L. L.; Niu, R.; Gong, J. All-In-one carbon foam evaporators for efficient co-generation of freshwater and electricity. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(27), 2423781.
- 31 Liu, K. K.; Liu, H. J.; Gong, J.; Zhao, Q. High-performance double-drive water evaporation-induced generator operating without liquid water sources. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(43), e10119.
- 32 Xue, G. B.; Xu, Y.; Ding, T. P.; Li, J.; Yin, J.; Fei, W. W.; Cao, Y. Z.; Yu, J.; Yuan, L. Y.; Gong, L.; Chen, J.; Deng, S. Z.; Zhou, J.; Guo, W. L. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials. *Nat. Nanotechnol.*, **2017**, 12(4), 317–321.
- 33 Sun, X. L.; Pan, C. L.; Ye, Q.; Du, J. Y.; Ji, X. Y.; Xia, Y.; Wu, X. Synergy of solar interfacial evaporation and hydrovoltaics in MOF-303 hydrogel for simultaneous desalination and electricity generation. *Water Res.*, **2026**, 289, 124943.

- 34 Lee, J. H.; Kim, D.; Lee, Y.; Kim, Y.; Shin, K.; Lee, H. J.; An, H.; Cheong, J. Y.; Choi, S. J.; Kim, H. Y.; Choi, J.; Lee, J. S.; Yoon, K. R.; Yun, T. G. Sustainable electrical energy harvesting *via* atmospheric water collection using dual-MOF systems. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 303, 112574.
- 35 Wang, Z. Y.; Huang, Y. C.; Zhang, T. S.; Xu, K. Q.; Liu, X. L.; Zhang, A. R.; Xu, Y.; Zhou, X.; Dai, J. W.; Jiang, Z. N.; Zhang, G. A.; Liu, H. F.; Xia, B. Y. Unipolar solution flow in calcium-organic frameworks for seawater-evaporation-induced electricity generation. *J. Am. Chem. Soc.*, **2024**, 146(2), 1690–1700.
- 36 Reinsch, H.; Pillai, R. S.; Siegel, R.; Senker, J.; Lieb, A.; Maurin, G.; Stock, N. Structure and properties of Al-MIL-53-ADP, a breathing MOF based on the aliphatic linker molecule adipic acid. *Dalton Trans.*, **2016**, 45(10), 4179–4186.
- 37 Liu, C. R.; Wang, Z.; Tong, X.; Wu, Z. H.; Zhou, L.; Zou, H. Y.; Ogunjuyibe, A.; Lin, H. J.; Yan, D. F.; Yang, W. H.; Dong, L. X.; Wang, G. F.; Wang, Z. L. Water-evaporation-induced direct current electricity generation based on stretchable hydrogel/ Al_2O_3 . *Matter*, **2025**, 8(10), 102200.
- 38 Qian, Q. F.; Xu, L. N.; Li, H. T. Evaporation-driven dual-function wood composites: integrating hydrovoltaic generation and thermal management in architectural applications. *Adv. Mater.*, **2026**, 38(2), e13000.
- 39 Xu, S.; Zhao, Y. X.; Jiao, S. P.; Wang, Z. Y.; Yu, Z.; Sun, C.; Liu, X. H. Microalgae film-derived water evaporation-induced electricity generator with negative carbon emission. *Adv. Sci.*, **2024**, 11(25), 2400856.
- 40 Lu, W.; Cheng, Y. P.; Liu, X. Y.; Liao, Z. X.; Shuai, S.; Wang, H.; Liu, M. Y.; Huan, S. Q.; Li, Z. G.; Liu, Y. All-weather adaptive water-electricity cogeneration enabled by a wooden evaporator. *Chem. Eng. J.*, **2026**, 528, 172335.
- 41 Xu, M. J.; Wang, H. Y.; Wen, X. Y.; Liu, H. J.; Hu, G. X.; Wei, Q. Y.; Niu, R.; Pan, R. K.; Zhang, H.; Gong, J. Upcycling waste polypropylene separators into carbon nanotubes for efficient interfacial solar-driven evaporation and hydroelectric power generation. *J. Mater. Chem. A*, **2025**, 13(17), 12277–12286.
- 42 Liu, J.; Li, R. Q.; Hu, G. X.; Yao, N.; He, J.; Tao, R.; Jia, T. T.; Lu, L.; Zhao, L. P.; Gong, J. Mechanochemistry synthesis of Al-fumarate MOF towards high-performance in solar-driven interfacial water evaporation and electricity generation. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2026**, 14(2), 121834.
- 43 Yu, J. H.; Liu, G.; Xia, M.; Zhao, J. H.; Li, J. K.; Wang, D.; Lu, L.; Xiao, J. X. Kapok fiber-based phase change aerogel for all-day solar evaporation and synergistic hydrovoltaic generation. *Desalination*, **2026**, 628, 120048.
- 44 Zhao, L. Y.; Chu, W. C.; Li, L. Y.; Wang, C.; Wei, Z. L.; Deng, W.; Nie, R. M. Starch cross-linked glass fibers for water evaporation-induced electricity generation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(42), 57544–57551.

Research Article

Construction of Aluminum Metal–Organic Frameworks *via* Upcycling Chemical Recycling of Waste Nylon for Hydrovoltaic Power Generation

Xin-yao Zhang, Xiao-yan Zhu, Xue-ying Wen, Gui-xin Hu, Hui-yue Wang, Zhi-kun Dai, Ran Niu, Jiang Gong*

(Key Laboratory of Material Chemistry for Energy Conversion and Storage, Ministry of Education,

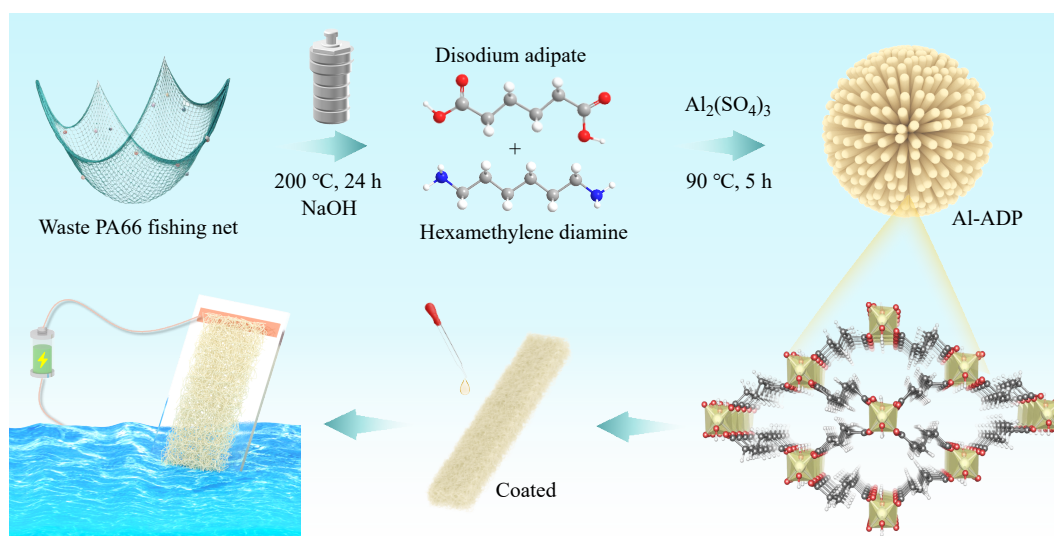
Hubei Key Laboratory of Material Chemistry and Service Failure, School of Chemistry and Chemical Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The staggering accumulation of plastic waste necessitates advanced strategies for the upcycling of engineering plastics like nylon 66 (PA66), which was characterized by high chemical stability and limited high-value recycling pathways. Herein, we reported a sustainable and green upcycling strategy that transformed waste PA66 fishing nets into high-performance aluminum-based metal-organic framework (MOF) nanomaterials (named as Al-ADP) for evaporation-driven hydrovoltaic energy harvesting. Through an efficient alkaline hydrothermal process, PA66 was depolymerized into a monomer-rich solution containing adipic acid (ADP), which served as the organic ligand for the direct aqueous synthesis of Al-ADP. This direct synthesis strategy bypassed the laborious separation and purification of ligands, significantly enhancing the environmental and economic efficiency of the recycling process. The synthesized Al-ADP possessed a MIL-53(Al)-type topology

* Corresponding author: Jiang Gong, E-mail: gongjiang@hust.edu.cn

and a hierarchical porous nanoflower morphology assembled from one-dimensional nanorods. By cross-linking Al-ADP with poly(vinyl alcohol) (PVA) and loading it onto a flexible viscose non-woven fabric, a robust hydrovoltaic generator was fabricated. Under typical ambient conditions (20 °C, 59% relative humidity), a single device yielded a stable output voltage of 0.41 V and a current of 4.76 μ A. Comprehensive environmental testing demonstrated that the device performance is highly responsive to temperature, humidity, and wind speed, with relative humidity identified as the dominant regulatory factor. To evaluate practical scalability, an array of 20 integrated devices was tested in an outdoor environment, successfully delivering a series output of 6.59 V and a parallel output of 38 μ A. Furthermore, molecular dynamics (MD) simulations provided molecular-level insights into the hydrovoltaic mechanism. It was discovered that the diffusion coefficient of Na^+ is substantially higher than that of Cl^- within the Al-ADP channels. This ionic selectivity is driven by the synergistic effect of the charged Al-ADP interfaces (abundant in carboxyl and Al—O coordination sites) and the continuous nanostructured pathways, which together facilitate effective charge separation during evaporation-induced fluid transport. This work not only establishes a closed-loop system for waste plastic upcycling but also offers a scalable and low-cost material platform for sustainable off-grid power generation.



Keywords Metal-organic framework; Waste nylon; Upcycling chemical recycling; Hydrovoltaic power generation; High-value utilization of waste plastics