高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
综合评述

碳基湿气发电器件的研究进展

李奇军[1,3], 赵宏佳[1,3], 刘龙涛[3], 鹿春怡[2,3], 谈　静[2,3]
(1. 扬州大学机械工程学院, 2. 物理科学与技术学院, 3. 碳中和技术研究院, 扬州 225009)

摘要　湿气发电是近年来兴起的一种新型能源转化方式, 它可以将大气环境湿气中的能量直接转化为电能, 且不会衍生任何污染物及有害气体. 得益于大气中无处不在的水汽和清洁无污染的发电过程, 这一发电技术适应性极宽, 不受时间、地域及环境等自然条件限制, 因此"水汽发电"具有非常好的发展前景. 本文简单回顾了湿气发电技术的演进历程, 讨论了湿气与发电材料之间的相互作用机理, 主要包括离子梯度扩散和流动电势两个方面, 并对新型碳基吸湿层材料的种类、特性及其优缺点进行了分析, 综合评述了湿气发电技术在最新应用领域的发展情况, 最后, 讨论了碳基湿气发电器件在应用中所面临的挑战和障碍, 并对未来该领域的研究方向进行了展望.

关键词　水汽; 吸湿层; 电极; 湿气发电
中图分类号　O631　　**文献标志码**　A　　doi: 10.7503/cjcu20240413

Research Progress of Carbon-based Moisture Power Generation Devices

LI Qijun[1,3*], ZHAO Hongjia[1,3], LIU Longtao[3], LU Chunyi[2,3], TAN Jing[2,3*]
(*1. School of Mechanical Engineering, 2. School of Physical Science and Technology, 3. Institute of Technology for Carbon Neutralization, Yangzhou University, Yangzhou* 225009, *China*)

Abstract　Moisture-enabled electricity generation(MEG), an emerging energy-harvesting technology, has attracted significant attention in recent years. Owing to the ubiquitous presence of water vapor and the pollution-free nature of the power generation process, MEG technology demonstrates strong adaptability, that is, it is not limited by natural conditions such as season, region and environment. This paper presents a comprehensive review of the evolution of MEG technology. It discusses the interaction mechanism between moisture and power generation materials, primarily focusing on ion gradient diffusion and streaming potential. It also provides a detailed analysis of the types, characteristics, advantages and disadvantages of new carbon-based hygroscopic layer materials. Furthermore, it describes the development of moisture power generation technology in the latest application fields.

Keywords　Water vapor; Hygroscopic layer; Electrode; Moisture power generation

随着化石燃料不断消耗带来的能源危机以及全球变暖问题日益加剧, 可持续和绿色能源的开发显得尤为重要. 电力作为现代社会不可或缺的次生能源, 已然成为第二次工业革命的标志性成果, 其应

收稿日期: 2024-09-02. 网络首发日期: 2024-10-18.
联系人简介: 李奇军, 男, 博士, 教授, 主要从事多色磷光碳点制备及信息防伪应用、激光直写碳基光电器件、湿气发电器件制备及自供电传感应用等方面的研究. E-mail: liqijun@yzu.edu.cn
谈　静, 女, 博士, 教授, 主要从事碳基光电材料与器件(湿气发电器件产电性能提升、光信息存储与防伪、柔性智能光功能传感器、太赫兹隐身与屏蔽)等方面的研究. E-mail: tanjing0916@163.com
基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52473281)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20231537)和中国博士后科学基金(批准号: 2023M732973)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.52473281), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(No. BK20231537) and the China Postdoctoral Science Foundation(No.2023M732973).

用和普及成为推动社会和经济快速发展的关键因素之一. 当前, 研究人员正致力于探讨利用各种可再生自然资源进行发电的潜能, 包括但不限于太阳能、风能、水能、潮汐能、地热能以及生物质能等. 其中, 水力发电因其卓越的稳定性和较高的电力输出受到了广泛关注[1]. 传统水力发电技术主要聚焦于水相变过程中能量转换机制的开发, 其核心原理是借助机械装置将水流的动能或位能(即势能)转化为电能. 尽管此方法呈现出显著的优势, 但同时也面临若干限制. 首先, 水力发电站的建设严重依赖于特定地区的水资源状况, 仅适宜于水资源丰富的地区. 此外, 其建设成本高昂, 限制了水力发电技术的广泛应用. 鉴于地理及经济因素的局限性, 传统水力发电技术在全球的推广与应用面临着显著的挑战.

湿气发电(Moisture-enabled electric generator, MEG)是近年来兴起的一种创新型水力发电技术, 区别于传统水力发电技术, 其特性在于可以直接将大气中的湿气能量转化为电能, 且过程中不产生任何污染物和有害气体. 由于大气中水汽资源的广泛分布, 以及发电过程的清洁、无污染特性, 湿气发电技术展现出极高的适应性, 不受时间、地理位置及环境等自然条件的影响. 因此, 湿气发电具有广阔的发展潜力. 19世纪, 科学家发现了当水在压力差的作用下通过狭小的腔道或缝隙流动时, 会产生流动电势等动电效应(Electrokinetic effect). 这一发现是纳米材料与水相互作用产电的科学基础之一. 2015年, Qu等[2]构建了一种含氧官能团浓度梯度的氧化石墨烯结构, 并率先通过湿度变化驱动该氧化石墨烯膜产生电能, 实现了伏特级、亚毫安级的电输出. 此成果标志着湿气发电技术的一项重要突破. 他们发现氧化石墨烯结构能够快速响应相对湿度的变化, 通过水分子在活性层(如MEG活性层)表面的吸附过程中, 电荷在水分子与活性层材料分子间的转移, 生成自由电荷. 在浓度梯度的驱动下, 这些自由电荷定向迁移, 从而有效实现了直流电的输出. 这项研究工作迅速引起了学术界对活性层材料的关注, 并促进了湿气发电相关理论模型的快速发展[3]. 特别的, 研究者将这种水分子与活性层材料分子之间的电荷转移现象称为“水伏效应(图1)[4]”. 迄今为止, 关于湿气发电技术的综合性报道仍较少, 这一领域面临的主要挑战包括开发历程较短、缺乏对规律性机制的全面总结, 特别是近几年新兴的碳基湿气发电器件尚缺乏系统性的综合归纳.

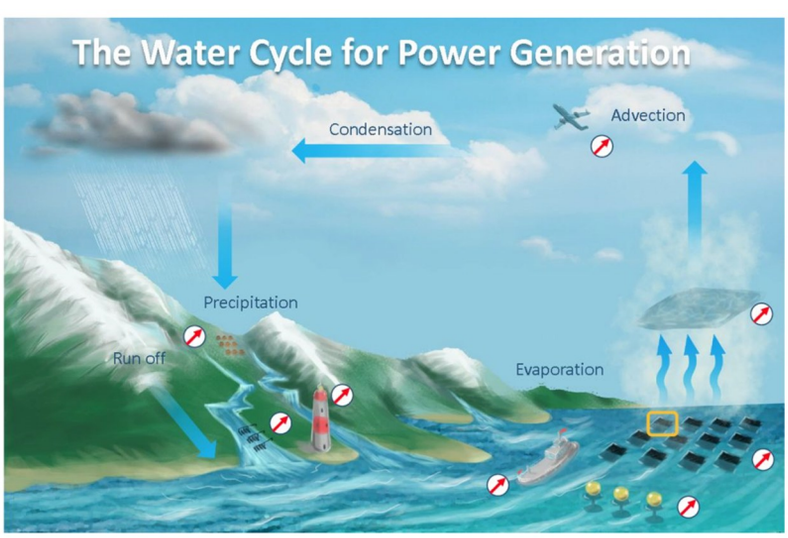


Fig. 1 Schematic diagram of ubiquitous moisture in the air caused by natural evaporation, transpiration, respiration and sublimation[4]

Copyright 2018, the Royal Society of Chemistry.

本文首先阐述了湿气发电机的基本发电原理, 讨论了湿气与发电材料之间的相互作用机制, 主要包括离子梯度扩散与流动电位两方面, 并对新型碳基吸湿层材料的种类、特性及其优缺点进行了分析; 此外, 还综合评述了湿气发电技术在最新应用领域的发展情况. 期望本文能够促使研究人员进一步深入探讨新型湿气发电器件的潜力, 以期扩展其在能源及传感等相关领域的应用前景.

1 湿气发电机的基本原理

1.1 离子梯度扩散

湿气发电器件由一对惰性电极和带有丰富基团(如—OH, —COOH 和—SO_3H)吸湿材料层组成(图2)[3]. 在一定的空气湿度下, 水分子将与吸湿材料层含氧官能团发生水合作用电离出大量的氢离子. 由于含氧官能团不对称分布, 官能团较多的一端会电离出更多的离子, 在浓度扩散作用力下, 离子将沿着浓度梯度由高浓度区域向低浓度区域迁移, 导致电荷不均衡分布, 最终形成电势差. 当电路连接时, 由于电势差的存在, 电子会从电压低的一侧流向电压高的一侧, 从而形成电流, 实现电能的输出. 2015年, Qu等[2]首次实现了氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)材料的湿气发电. 他们首先将制备的氧化石墨烯压成片状, 并在两端施加电压, 使其形成梯度分布的含氧官能团. 然后利用氧化石墨烯的亲水性能, 在一定的湿度下, 水分子一方面可吸附在其表面形成离子输运通道, 另一方面使表面的含氧基团电离释放离子型载流子. 梯度分布的官能团引起浓度高载流子向低浓度的一端扩散, 从而在两端形成电压, 实现电能的输出.

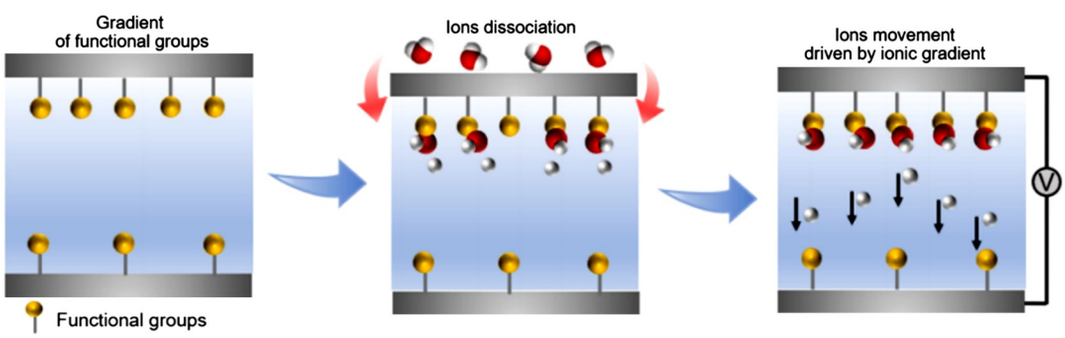


Fig. 2 Diagram of the mechanism of concentration gradient diffusion[3]

Open Access.

为了构建不对称官能团分布, 通常需要利用一些物理化学手段[5]先将材料处理成不对称的官能团分布, 而对于不易处理的材料, 则无计可施, 具有一定的局限性.

1.2 流动电位

流动电位/电流是指当液体通过多孔结构或微/纳米通道时, 液-固体界面产生的自由电荷迁移的电动力学现象, 也被用来解释部分 MEG 的发电机理. 当电解质溶液接触带有电荷的绝缘表面过程中主要受静电吸引和排斥力的影响. 溶液中带有与表面电荷相反的离子会靠近表面并形成一层紧密的吸附层, 而带有与表面电荷相同的离子则在更远的区域形成扩散层, 这两层共同构建了“双电层”的结构. 当外部力量作用于电解质溶液, 使其通过微通道(如多孔隔膜或毛细管)时, 这种定向流动会带动双电层中扩散层的带电荷粒子迁移. 这导致了溶液下游区域的电荷积累, 从而在上下游之间形成电位差, 即流动电位(图3)[3]. 同时, 带电荷粒子的运动不仅产生了电位差, 还会产生相应的电流, 称为流动电

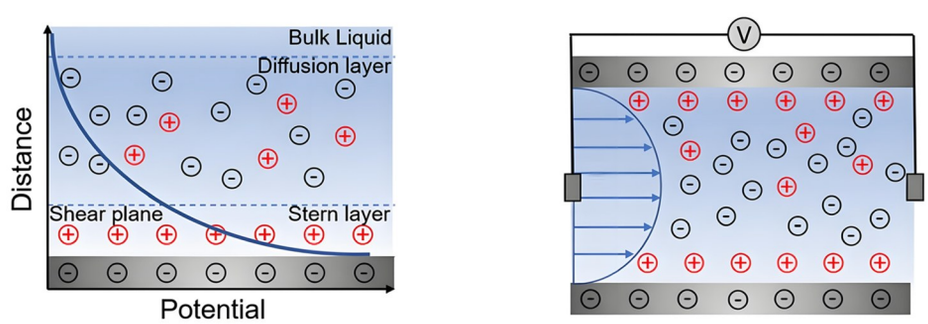


Fig. 3 Mechanistic diagram of the flow potential[3]

Open Access.

流．2017年，Zhou等[6]制备了一种多孔碳纳米颗粒薄膜发电器件，利用水蒸发过程中的毛细现象来驱动碳纳米颗粒间的相对运动，从而在碳层中产生流动电位，实现了高达1 V的电压输出．

2 湿气发电器件的结构

2.1 湿气发电器件结构分类

根据结构设计的不同，湿气发电器件可分为三明治式[图4(A)][7]和平面式[图4(B)][8]．三明治式湿气发电器件主要通过两片电极夹持中间吸湿层的方式来实现电能产生．在早期研究中，湿气发电器件大多采用三明治结构．2015年，Qu等[2]以氧化石墨烯薄膜为产电活性层，制备了三明治结构的湿气发电器件．该器件能够提供约35 mV的开路电压输出，功率密度达到4.2 mW/m^2，能量转换效率高达62%．然而，传统三明治型MEG往往需要复杂的材料预处理过程，同时刚性硬质电极的使用导致严格且繁琐的器件组装和封装过程，极大限制了器件的高效规模化集成和实际应用．与传统的夹层式器件相比，平面型器件的突出优点是易与其它电子器件进行有效的集成．2023年，Qu等[8]开发了一种基于调制聚阳离子和聚阴离子墨水的全印刷平面湿气发电器件，仅0.3 cm^{2}的器件单元可产生高达1.1 V的开路电压以及2.6 μW/cm^{2}的功率密度．全印刷的MEG阵列不仅可为商用小型电子设备按需供电，还可与柔性电路兼容集成，显示了在便携式、集成化自供电系统中的应用潜力．

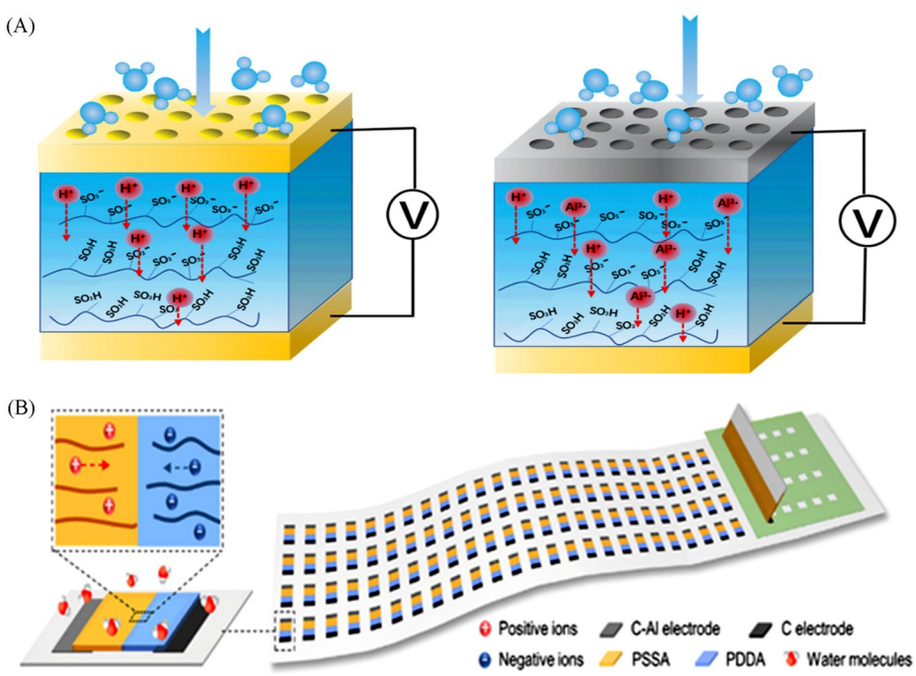


Fig. 4 Sandwich type moisture power generation device(A)[7] and planar moisture power generation device(B)[8]

(A) Copyright 2021, the Royal Society of Chemistry; (B) Copyright 2023, Elsevier.

2.2 湿气发电器件的吸湿层材料

2.2.1 碳基材料 2015年，Qu等[2]首次将GO材料应用于湿气发电领域，通过对GO层两端施加电压，使其形成梯度分布的含氧官能团，实现了输出脉冲的电压为20 mV、电流密度为5 μA/cm^{2}的电能输出．随后，他们[9]对此器件进行了优化，通过冷冻干燥技术制备了三维结构氧化石墨烯．相比于之前的片状堆积，三维氧化石墨结构具有孔洞大，水分子容易自由通过，因此制备的供电装置在性能上有了极大的提高．在75%的相对湿度(RH)下，可输出260 mV的电压，当将这些装置进行并联后，可点亮小功率的LED灯[图5(A)和(B)]．该研究团队进一步开发了异质结构的氧化石墨烯材料的制备方法，通过界面设计辅助和调控内部载流子的输运行为，首次将单个湿气发电器件的输出电压提高到1.5 V[10]．Ni等[11]以碳化木胞室(CWCC)为衬底，设计并制备了高柔韧性、可变形性的碳化木胞室-还原

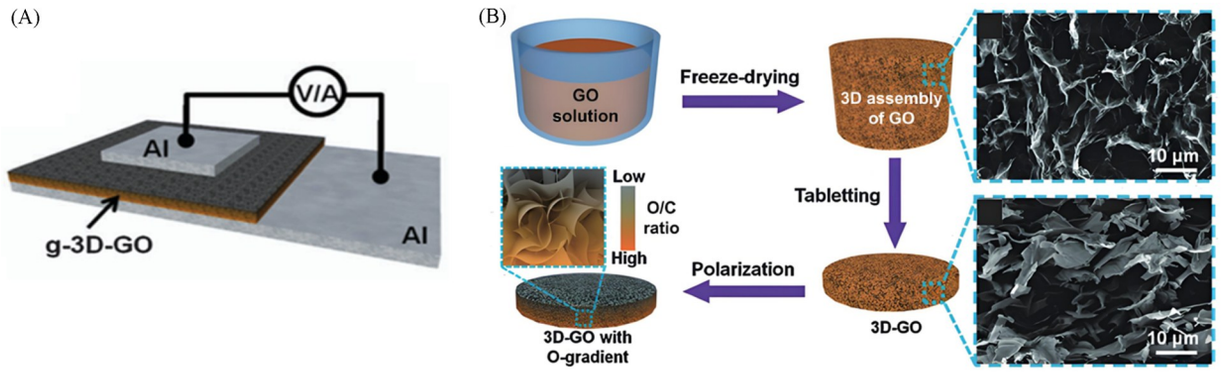


Fig. 5 Schematic diagram of the prototype chemical potential energy harvester(CPEh) based on g-3D-GO(A) and preparation of g-3D-GO by a three-step strategy of freeze-drying, tableting and polarization(B)[9]

(A, B) Copyright 2016, the Royal Society of Chemistry.

石墨烯 oxide@PVA(CWCC-rGO@PVA)复合材料. 富含 CWCC-rGO-PVA 的羟基酸盐与周围环境中的水形成氢键, 在浓度梯度的作用下产生高达 5.7 μA 的电流. Chu 等[12]通过盐酸酸化氧化石墨烯的含氧基团, 极大提高了 MEGs 器件的电力输出, 可实现 0.85 V 和 92.8 μA/cm^2 的电能输出.

除了二维氧化石墨烯材料外, 新兴的零维碳纳米点材料也被用于 MEGs[13]. 常见的碳纳米点包含石墨烯量子点、碳化聚合物点、碳纳米管量子点和炭黑量子点等.

石墨烯量子点(Graphene quantum dots, GQDs)是由石墨烯片段裁剪而成的纳米结构, 直径通常小于 10 nm, 具有球形或近球形的形貌特征. 表面通常富含羧基、羟基和氨基等官能团, 这些官能团赋予其良好的吸湿性和化学反应性[14].

早在 2017 年, Qu 等[15]以 GQDs 为吸湿性材料, 制造了一种高性能的湿气发电器. 石墨烯量子点通过直接氧化和刻蚀方法从天然石墨粉中合成, 尺寸在 2~5 nm 之间, 并拥有丰富的含氧官能团, 在 70% RH 条件下实现了高达 0.27 V 的输出电压. 2019 年, Han 等[16]合成了高负电荷和极小[(2.42±0.38) nm]的 GQDs, 通过将其掺杂氧化石墨烯片中, 极大提升了器件的产电性能, 电荷密度提升至 1.12 mC/m^2, 离子电导率提升至 21 nS/m. 2021 年, Gupta 等[17]研制了 GQDs 增强聚偏氟乙烯(PVDF-HFP)柔性纳米发电机, 与原始 PVDF-HFP 纳米发电机相比, 其输出电压和电流分别提升至 6 V 和 25 nA.

与石墨烯量子点相比, 碳化聚合物点(Carbonized polymer dots, CPDs)拥有更丰富的表面基团, 因此, 也可以用于 MEG 器件的制备. CPDs 是一类由 sp^2/sp^3 碳内核和外层有机官能团组成的单分散零维碳纳米材料[18]. CPDs 概念最早被杨柏团队[19]归纳提出, 一直作为发光材料被研究者所认知. 随着研究的不断深入, CPDs 的优势不断被挖掘. CPDs 不仅具有吸湿性强、制作成本低、合成材料来源广泛且易得等产电材料的优良特性, 而且 CPDs 表面具有有机分子特性[20], 使其在可设计性、拓展性以及宽广性上具有巨大优势, 这些有利条件为“理想产电材料”的构建奠定了基础.

2018 年, 我们团队[21]首次将 CPDs 应用到湿气发电领域(图 6). 将 CPDs 打印在纸质基质上, 通过构建非对称吸湿结构实现器件湿气发电. 单个器件可持续对外供电 100 min, 输出最大电压为 40 mV, 电流为 142 nA[图 7(A)~(D)]. 利用器件对湿度的响应特性, 开展了器件呼气传感和触觉传感应用, 展示了良好的稳定性和可重复性. 2022 年, Shan 等[22]以柠檬酸为前驱体合成具有亲水性表面的 CPDs, 并制备了 CPDs 基湿度传感器. 研究发现, 该器件具有高灵敏度、优越的稳定性和重复性, 该湿度传感器在 94% RH 下具有较高的响应灵敏度(5318%), 在较大的 RH 范围内(11%~94%)具有优异的长期稳定性和重复性. 这些优异的湿度传感性能归因于 CPDs 表面的亲水性官能团. 2023 年, Hu 等[23]利用甲酸和过氧化氢的混合物对煤沥青进行选择性氧化刻蚀, 得到 CPDs 悬浮液, 将 CPDs 悬浮液引入聚(4-苯乙烯磺酸)(PSS)和聚乙烯醇(PVA)的聚电解质膜, 获得了高效的湿气发电器件. 该湿气发电器件能产生 0.83 V 的持续电压输出和 5.20 μA/cm^2 的短路电流.

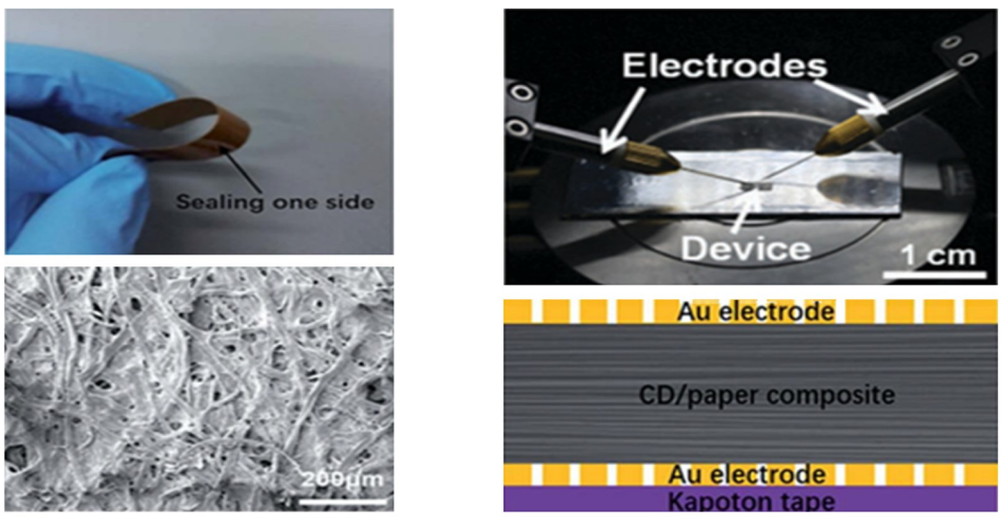


Fig. 6 Schematic diagram and actual exhibition of CDs/paper-based moisture power generation devices, bending properties and SEM images of CDs/paper-based moisture power generation devices[21]

Copyright 2018, the Royal Society of Chemistry.

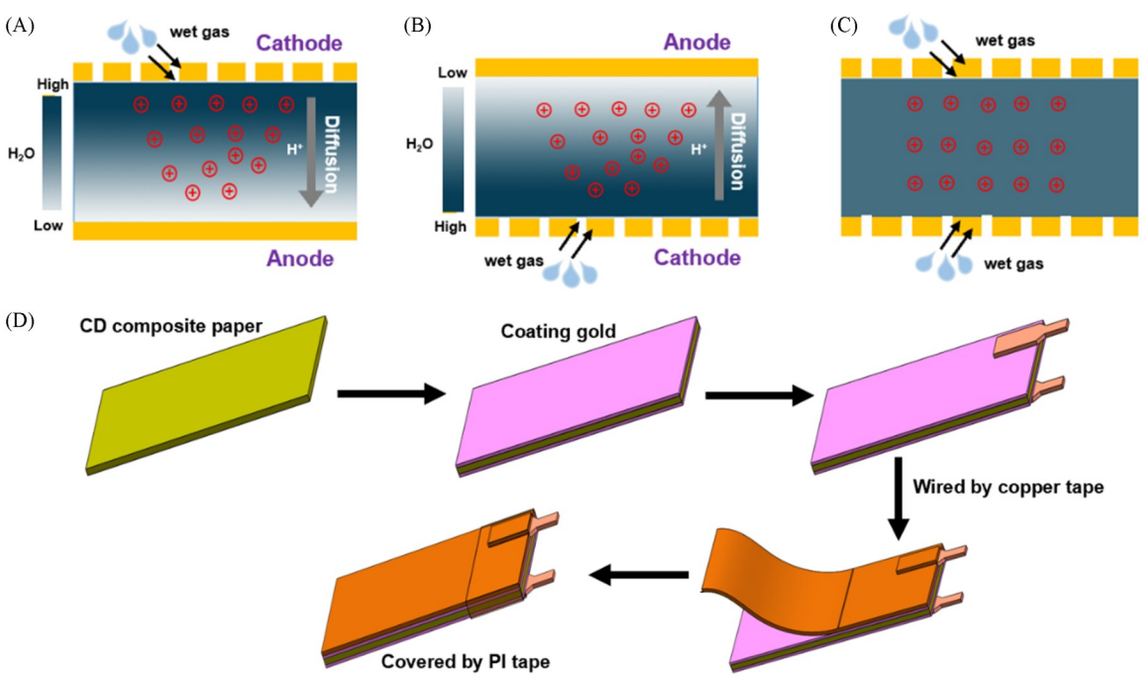


Fig. 7 Moisture generator mechanism of positive sealing(A), reverse sealing(B) and unsealed at both ends(C), schematic diagram of the preparation of asymmetric flexible power generation devices(D)

面向可持续绿色能源技术对湿气发电器件的高功率、全天候、集成化特性的需求，2023年，我们团队[24]通过调控CPDs表面基团和设计异质电极结构，开发了全天候适用、高效、可集成的CPDs湿气发电机(图8). 在85%的空气湿度下，该器件可持续稳定工作，输出电压高达0.8 V[图9(A)]，电流密度高达1.6 mA/cm^2[图9(B)]，是目前所有湿气发电器件的最高电流值和功率密度. 即使在15%的低空气湿度下，器件也能提供0.65 V的电压和12 μA/cm^{2}的电流输出. 通过研究CPDs表面基团种类对器件输出功率的影响，明确了CPDs高吸湿、强电离能力增强器件电能输出产电机制. 借助于CPDs可印刷性，通过丝网印刷实现了器件的大规模集成，获得了210 V和40 mA的电能输出[图9(C)]，并可为商用微电子设备供电.

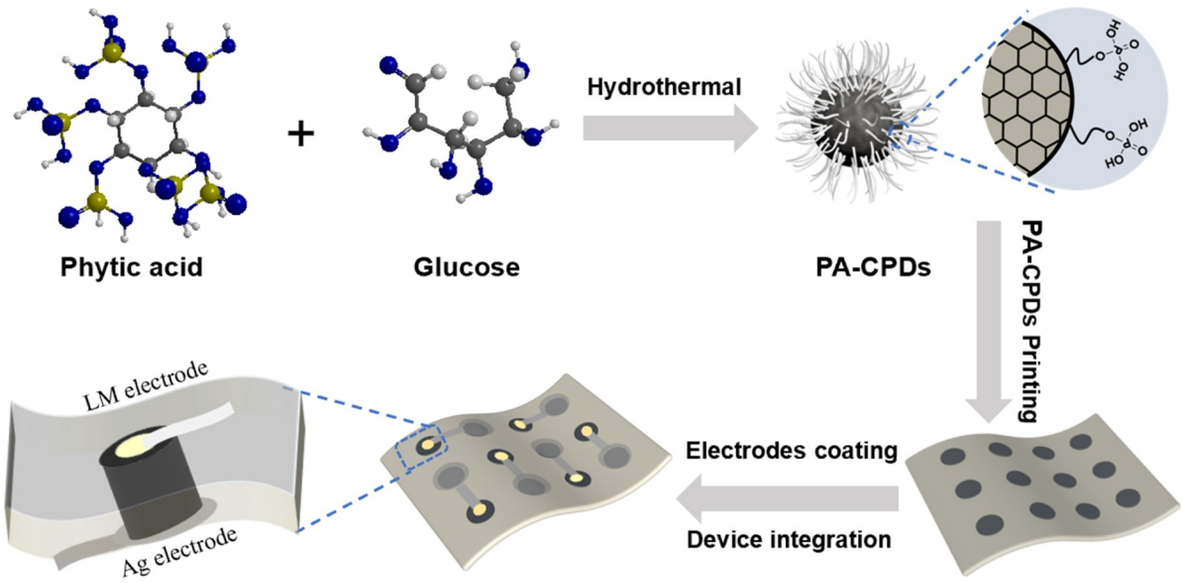


Fig. 8　Diagram of the preparation process for CPD based MEG devices[24]

LM: liquid metal; PA: phytic acid. Copyright 2023, John Wiley and Sons.

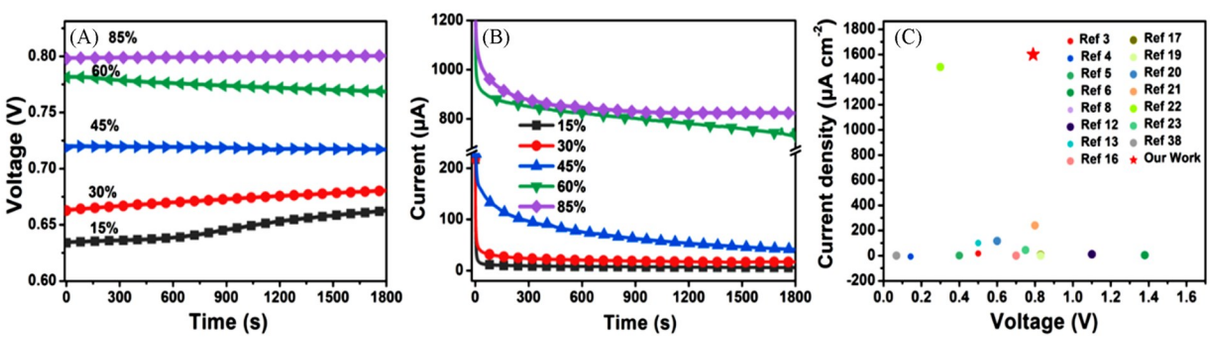


Fig. 9　Measurement voltage of PA-CPD-based MEG equipment(A), measurement current of PA-CPD-based MEG devices(B), performance comparison of MEGs(C)[24]

Copyright 2023, John Wiley and Sons.

2.2.2　*生物质材料*　生物材料包括天然材料和合成材料[图10(A)][25]，通常由大量的羟基、氨基和羧基等亲水官能团组成[图10(B)][26]. 生物材料是一种丰富、可再生的生物质资源，来源广泛，如木材、秸秆和废弃植物等，具有出色的可降解性和生物相容性，这些特性使其在湿气发电器件方向具有巨大的潜力[27]. 目前，众多生物材料已被应用于MEG器件中，包括生物纳米原纤维、醋酸纤维素、棉织物、天然木材和蛋白质纳米线等[图10(C)~(E)][26]. 纸作为一种易于制备、成本低廉、可生物降解的生物纤维素材料，其在MEG中得到广泛应用. 在先前研究[28]中，通过使用不对称电极，一张纸可以产生约0.25 V和15 nA的电输出，这证明纤维素在发电领域的巨大潜力. Guo等[29]将一平方厘米大小的器件置于环境湿度中，因为纤维素纸内带负电荷的通道和持续的水流蒸发过程，使得器件的电力输出和使用寿命得到明显改善，能够产生约0.78 V的电压和约7.5 μA的电流，并且持续发电超过10 d. 在生物蛋白质材料的研究进程中，明胶和丝绸能在潮湿环境中分别产生0.71和0.12 V的开路电压. 随后，Chu等[30]通过调节乳清蛋白材料表面电荷和亲水性实现了MEG器件的高效输出. 当室内相对湿度为40%时，MEG的最高输出电压为1.45 V. 此外，该MEG可以在极端温度(−20 ℃或50 ℃)下正常工作，能够在相对湿度为26%的沙漠中为位置跟踪器供电，具有高可持续性和高可靠性.

除了上述的优势外，生物材料也存在明显的缺陷，首先就是这类材料具有较高的扩散阻力，这一特性导致其对湿气的反应速度相对较缓. 此外，大部分生物材料的环境稳定性也相对较差，在面对恶

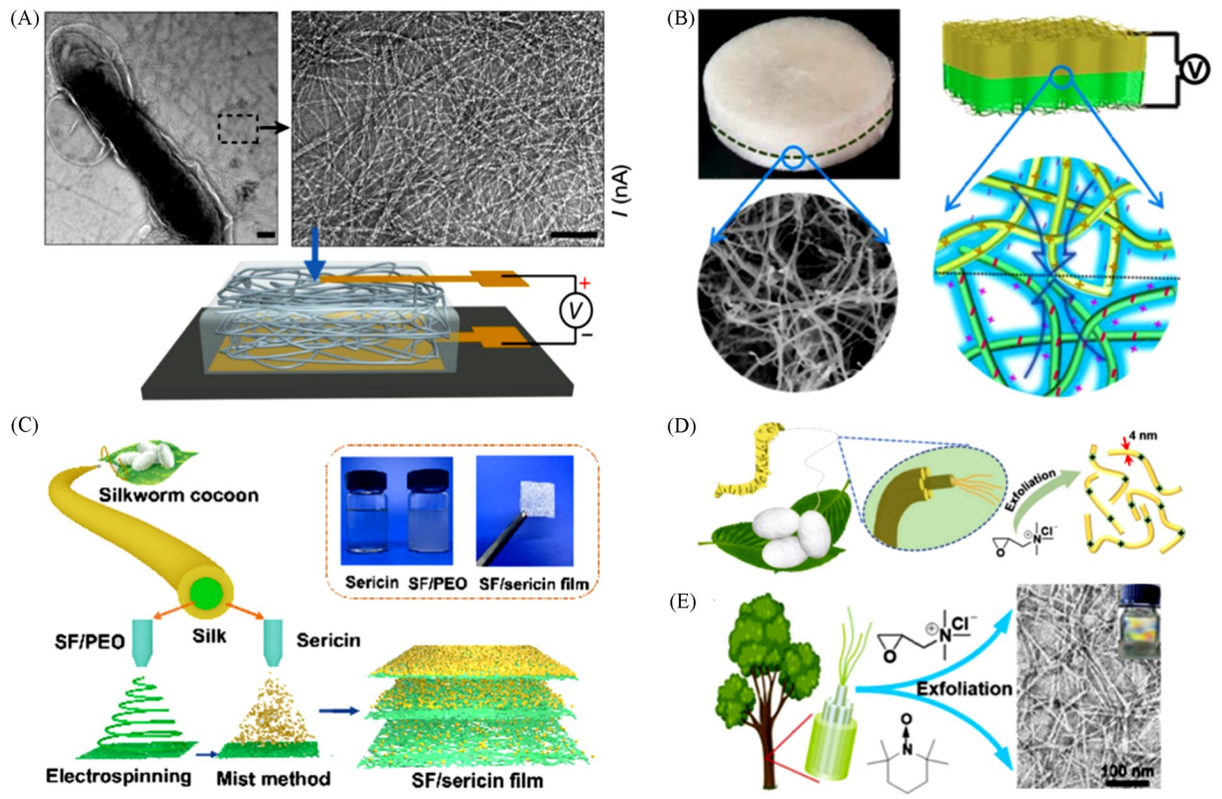


Fig. 10 TEM image of a network of purified nanowires generated by microorganisms, with a diagram of the device structure at the bottom(A)[25], NaClO-silk nanofibers(SNFs)/Quatern-SNFs aerogels and their SEM images, schematic diagram of NaClOSNFs/Quatern SNFs aerogel generators and their wet gas generators(B), moisture power generation devices based on protein/protein nanocomposites of whey protein nanofibers in whey protein matrix(C), schematic diagram of the synthesis of quaternary ammonium silk nanofibers with positive charge by mechanical exfoliation(D) and chemical reagent modification of silk protein extraction from mulberry silk(E)[26]

(A) Copyright 2020, Springer Nature; (B—E) Open Access.

劣条件时易于失活，因此，以生物材料为基础制备的MEG在高温环境中的应用效能较低.

2.2.3 *聚合物材料* 含有亲水性官能团的聚合物[图11(A)~(D)][31~33]呈现出一系列优异的性质，如良好的机械性能和稳定性、卓越的电气绝缘性、强大的耐磨和抗腐蚀能力、易于加工和成本低廉等. 此外，一些特定的聚合物还具有柔韧性和可拉伸性，并进行自我修复，这些卓越的性能使其也可作为MEG中的活性介质. 在构建水含量梯度的过程中，典型的离子扩散型MEG面临一个主要难题，即由于发电层内传质速率过快，导致材料迅速达到饱和状态，进而破坏了水含量梯度的稳定性. 相对而言，聚合物材料凭借其庞大的储水空间以及较低的氧气和水分扩散率，能够有效地缓解上述问题，从而在维持水含量梯度方面表现出较好的性能.

聚电解质，作为一种拥有电解质基团重复单元的聚合物，近年来已成为MEG研究领域的焦点. Xu等[34]首次提出了基于聚(4-苯乙烯磺酸)(PSSA)聚合物电解质膜的MEG，该装置能够提供高达0.6 V的开路电压和0.1 mA/cm^{2}的短路电流. 该优异性能得益于PSSA膜中丰富的磺酸基团在吸湿解离过程中释放大量的可移动离子，从而在显著提升MEG性能方面发挥了关键作用，这也为传统聚电解质膜的应用开辟了一个新的视角. 此后，一系列的单一组分聚合物[包括PVA、聚丙烯酸(PAA)、羟乙基纤维素(HEC)及瓜尔胶等]，经过实验证明都可以有效用于MEG，且由它们制备的MEG能够持续产生稳定的电压. 此外，聚合物/GO与聚合物/聚合物的复合材料也已被确认可用于MEG的制备，并且可以显著提升湿气发电性能.

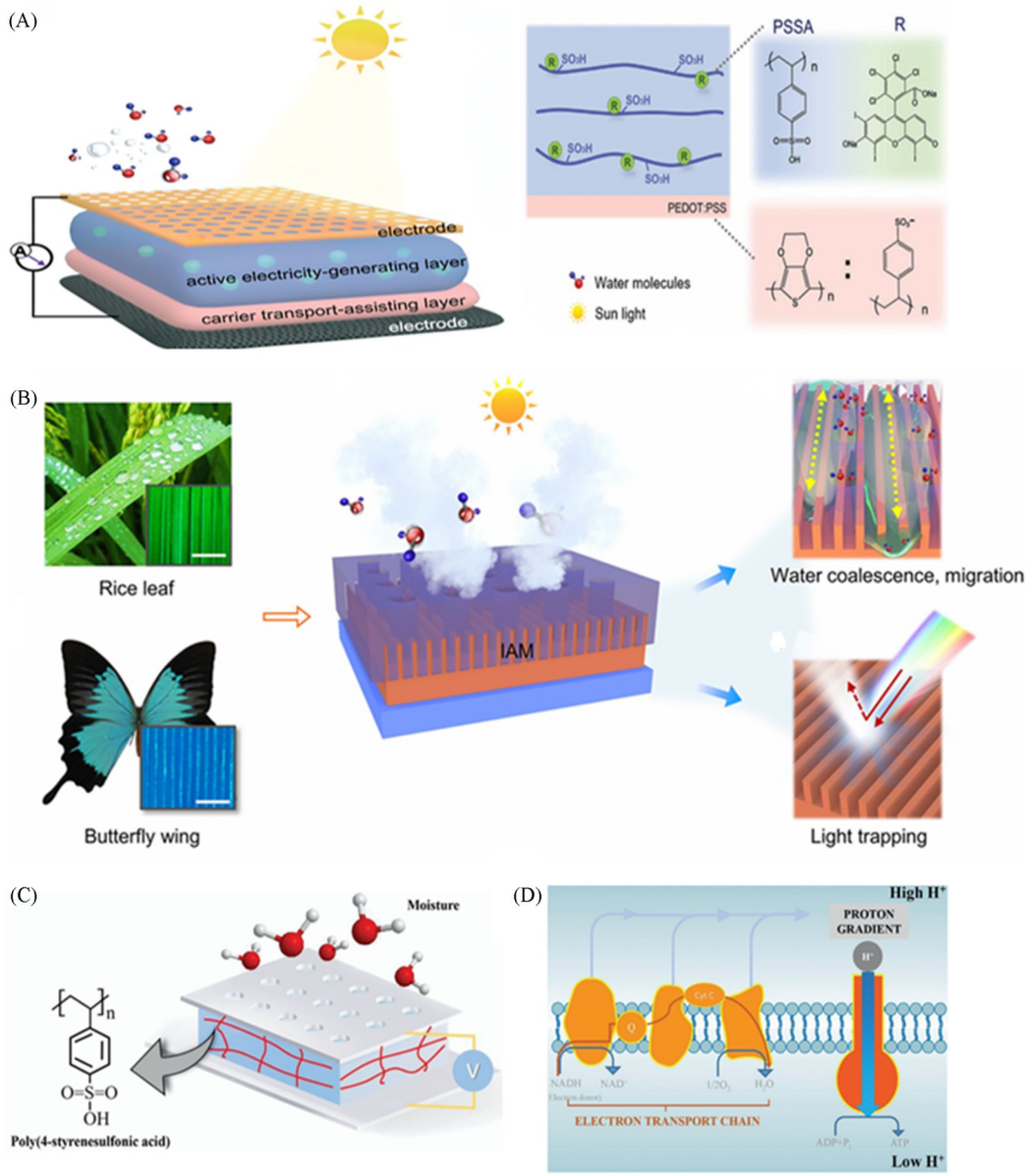


Fig. 11 Moisture power generation device prepared by PSSA/R membrane composed of PSSA matrix and R clusters(A)[31], the concept and working principle of biomimetic IAM(B)[32], experimental setup of PMEG and corresponding power output based on PSSA(C), simple and efficient WEG based on Geobacter sulfurreducens biofilm(D)[33]

PSSA/R: poly(4-styrensulfonic acid)/rose bengal; IAM: an interface architecture with microgrooves; PMEG: polymer moist-electric generator; WEG: wet electric generator. (A) Copyright 2022, John Wiley and Sons; (B) Copyright 2023, the Royal Society of Chemistry; (C, D) Open Access.

聚合物与石墨烯具有相似特性，聚合物纳米线与聚合物网络之间的传质效率较高，这一特点能够显著提升功率输出. Nie等[35]采用浓度控制电沉积法制备了聚吡咯(PPy)纳米线阵列MEG，其高孔隙率和高表面积赋予其较高的电子转移速度，在相对湿度为75%的环境中，开路电压达到72 mV，电流密度为1.43 A/cm^2，这是基于三维PPy框架MEG的10倍之多.

尽管大部分基于聚合物的MEG展现出较好的性能，但在聚合物的合成及其凝胶交联过程中存在内部化学物质残留可对最终性能产生不利影响，其具体的作用机制及优化策略仍需深入研究. 此外，聚合物材料吸湿溶胀会影响发电元件的结构稳定性，材料较大的内阻也可能会限制其发展.

2.2.4 无机半导体材料 无机半导体材料具有良好的电子迁移率，能在电场的影响下迅速移动载流

子．并且通常具备较高的热稳定性，可在较宽的温度范围内正常工作．由于其抗氧化性和耐腐蚀性强，因此在长期使用过程中表现出较好的可靠性和耐用性．使用无机半导体材料制造的湿气发电器件通常具有较高的性能和效率[图12(A)~(D)][36,37].

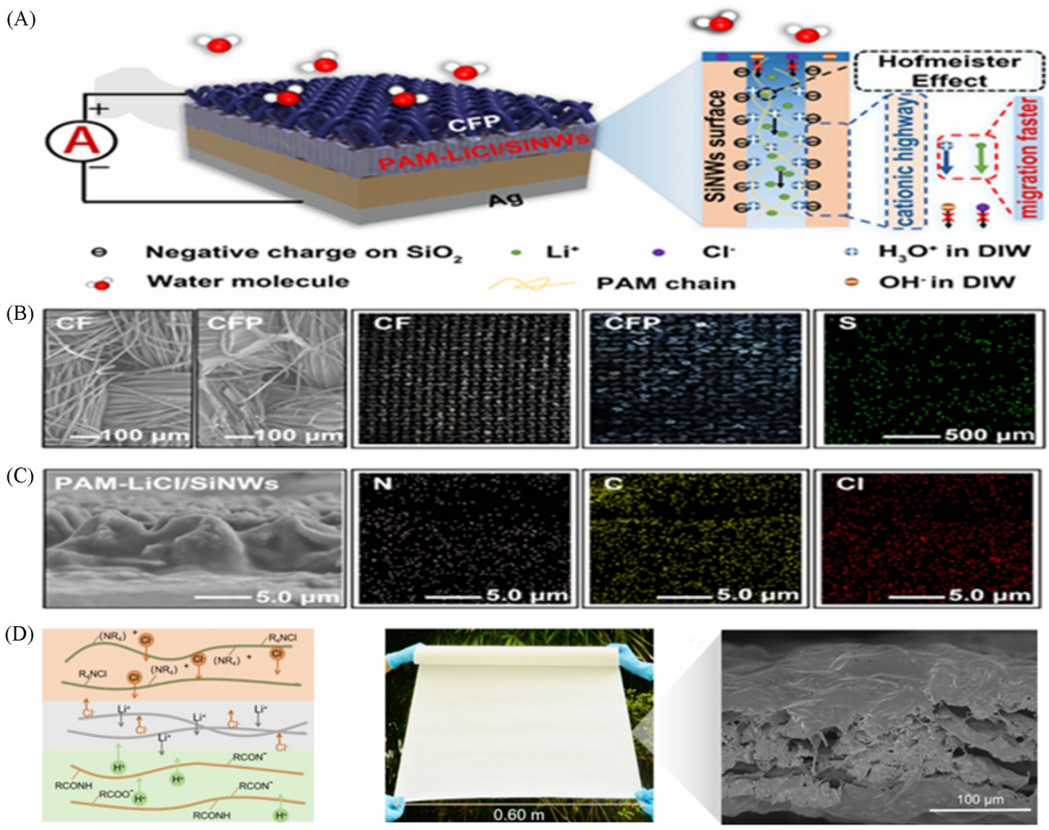


Fig. 12 Schematic diagram of an organic hybrid MEG composed of polyacrylamide(PAM-LiCl) ionic hydrogel and silicon nanowires(SiNW) incorporated with LiCl(A), top-down scanning electron microscopy(SEM) and energy dispersive spectroscopy(EDS) of carbon fabrics(CF) with and without poly(3,4-ethylene-dioxythiophene) polystyrene sulfonate(PEDOT: PSS) (CFP) images(B), top view of PAM-LiCl ionic hydrogel-coated SiNWs SEM and EDS images(C)[36], schematic diagram of polyelectrolyte ionic paper conductor for moisture-induced generator(D)[37]

(A—C) Copyright 2024, the Royal Society of Chemistry; (D) Open Access.

正如前文所述，电动力学理论表明，水与固体表面的相互作用能够产生流动电位．由于半导体通常带有负电荷，它们能够在纳米结构中吸引水中的正离子，因此能够实现类似流动电位电能转换．基于这一原理，Shen等[38]利用TiO_2纳米线网络开发了一种新型的半导体机械能发电装置．TiO_2纳米线网络中的三维纳米通道有效促进了环境水分的扩散，从而产生了高达0.5 V的开路电压．最近，Sun等[39]开发了一种基于硅纳米线阵列(SiNWs)的湿气发电装置．SiNWs具有较大的带电表面积和优异的载流子传输特性，从而能够通过水流蒸发引起的载流子浓度梯度持续产生电能．

近年来，相比于碳基材料、生物质材料和聚合物材料，无机半导体材料的研究较为有限[36,37]．可能源于无机半导体材料在水中扩散能力上的不足、较高的工艺成本和复杂的制备过程．在后续研究中，通过优化器件结构、调整材料形貌以及尝试多种材料复合等方式，有望克服这些挑战．

3 湿气发电机的应用

作为一种新型的能源转换方式，MEG技术不仅可以实现高效的电能转化，而且产生的电能也非常可观．近年来，研究者通过优化材料和结构设计，已将单个发电机器件单元电压由最初的几十微伏增

加至伏特级，电流密度由于几十纳安提升至几百微安并作为电源[24]，通过有效的集成，MEG能够为近距离传感、湿度检测、触觉感应、电子皮肤、呼吸监测、环境监测、汗液监测、信息存储以及电子显示等领域的设备供电[图13(A)~(F)][40~44]. 如Qu等[45]开发了一种异质膜MEG，通过集成器件成功输出上千伏电压. Tao等[46]开发了一种基于超高分子水凝胶的MEG，其不仅产生高达0.11 mW/cm^{2}的功率密度，而且通过集成获得了65 mA的电能输出. 我们团队[24]开发了一种基于CPDs的MEG，通过集成获得了210 V和40 mA的电能输出，并成功为商用微电子设备供电.

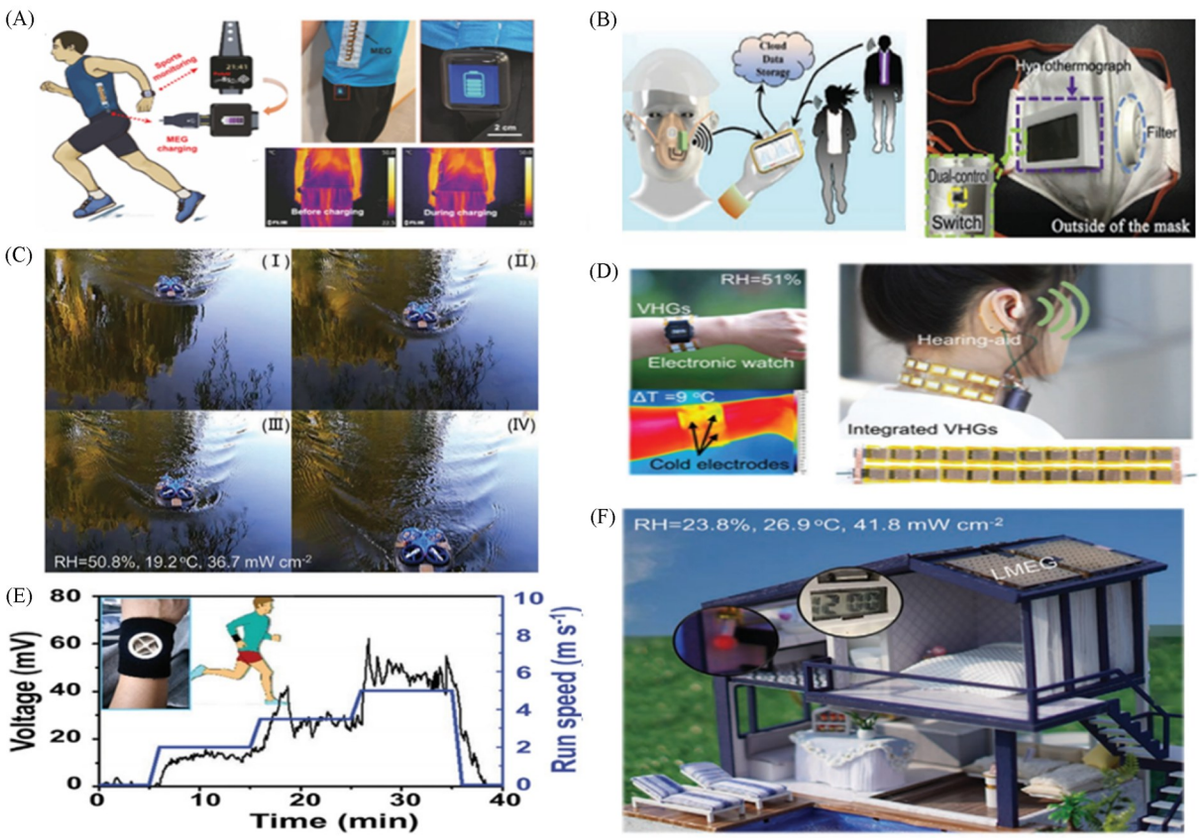


Fig. 13 Human body temperature sensing(A)[40], respiratory monitoring(B)[41], driving a small speedboat(C)[42], humidity detector and headphone charging(D)[43], motion sensing(E)[43] and use of smart home in the house(F)[42]

(A, B) Open Access; (C, F) Copyright 2022, John Wiley and Sons; (D, E) Copyright 2024, John Wiley and Sons.

除了作为电源以外，由于湿气发电器件本身对于外界湿气具有非常灵敏的反应，在传感领域也展现出巨大的应用潜力. 作为传感器[47]，发电器件本身可以充当传感单元. 如，它可用作呼吸传感器[48]、触摸传感器[10]或人体运动传感器[49]. 作为呼吸分析仪时，湿气引起的电流和电压变化可以帮助监测者区分正常呼吸与急促呼吸. 如Shen等[38]开发了一种基于二氧化钛(TiO_2)纳米线网络的水分驱动发电机. 该器件可以在距离人体鼻腔0.8 cm的位置产生振幅为20 mV的电压脉冲，以响应人类呼吸中的水分. MEG也可以集成到触摸传感器中，Qu等[50]开发了一种具有柔性双网络结构和可逆交联相互作用的可拉伸功能性离子凝胶，通过串联或并联MEG单元，开发了一种“湿气驱动腕带”的集成装置，佩戴在人的手腕上可以驱动一个用于跟踪手指运动的柔性传感器.

目前，这些应用大多仍处于实验室初期阶段，但已经展示了在多个前景广阔领域的潜力. 随着对MEG输出特性的持续改进，未来的创新将专注于优化先进材料，以扩展其在不同领域的应用.

4 总结与展望

作为一种环保且可持续的能源来源，MEG技术近年来迅速发展，成为一种高效的从雨水、河流、

海洋、生物源及其它自然湿润环境中收集能量的手段. 湿气发电器件不仅可以作为湿度传感器，还能作为自供电源，为传感器和电子设备提供电力. 这项新技术在医疗、信息、环境、安全和人工智能等领域展现了巨大的潜力. 然而，目前在湿气发电技术中还存在以下问题：(1) MEG用产电材料种类受限. 目前湿度发电器件产电材料大多数是石墨烯、蛋白纳米线、碳纳米管等，这些材料成本高，不利于器件大规模应用. (2) MEG器件产电功率较低. 目前大多数器件的产电功率较低，尤其是电流输出通常小于100 μA，无法满足一些关键电子设备的供电需求. (3) MEG器件稳定性和耐久性较差. 目前MEG在高温和高湿环境下表现不佳，容易失效，MEGs的稳定性和耐久性对其大规模应用至关重要. (4) MEG器件大规模集成化仍然极具挑战. 目前器件集成通常包括产电材料的合成和集成工艺两个步骤，器件制作与组装过程复杂、集成的器件一体性、柔韧性和一致性较差，难以大规模集成.

总之，湿气发电的研究尚处于早期阶段，未来的发展潜力巨大. 随着研究的不断深入，湿气发电器件的转换效率和输出功率密度有望显著提升，能够高效稳定地持续输出，并为解决能源短缺和二氧化碳排放过高的问题做出重要贡献.

参 考 文 献

[1] Wang X., Lin F., Wang X., Fang S., Tan J., Chu W., Rong R., Yin J., Zhang Z., Liu Y., Guo W., *Chem. Soc. Rev.*, **2022**, *51*, 4902—4927
[2] Zhao F., Cheng H., Zhang Z., Jiang L., Qu L., *Adv. Mater.*, **2015**, *27*, 4351—4357
[3] Lu W., Ong W. L., Ho G. W., *J. Mater. Chem. A*, **2023**, *11*, 12456—12481
[4] Zhang Z., Li X., Yin J., Xu Y., Fei W., Xue M., Wang Q., Zhou J., Guo W., *Nat. Nanotech.*, **2018**, *13*, 1109—1119
[5] Yang S., Tao X., Chen W., Mao J., Luo H., Lin S., Zhang L., Hao J., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*, 2200693
[6] Xue G., Xu Y., Ding T., Li J., Yin J., Fei W., Cao Y., Yu J., Yuan L., Gong L., Chen J., Deng S., Zhou J., Guo W., *Nat. Nanotech.*, **2017**, *12*, 317—321
[7] Sun Z., Feng L., Wen X., Wang L., Qin X., Yu J., *Mater. Horiz.*, **2021**, *8*, 2303—2309
[8] He T., Wang H., Lu B., Guang T., Yang C., Huang Y., Cheng H., Qu L., *Joule*, **2023**, *7*, 935—951
[9] Zhao F., Liang Y., Cheng H., Jiang L., Qu L., *Energ. Environ. Sci.*, **2016**, *9*, 912—916
[10] Huang Y., Cheng H., Yang C., Zhang P., Liao Q., Yao H., Shi G., Qu L., *Nat. Commun.*, **2018**, *9*, 4166
[11] Xiong C., Li B., Duan C., Dai L., Nie S., Qin C., Xu Y., Ni Y., *Chem. Eng. J.*, **2021**, *418*, 129518
[12] Zhu R., Zhu Y., Chen F., Patterson R., Zhou Y., Wan T., Hu L., Wu T., Joshi R., Li M., Cazorla C., Lu Y., Han Z., Chu D., *Nano Energy*, **2022**, *94*, 106942
[13] Zhao C. X., Liu J. N., Li B. Q., Ren D., Chen X., Yu J., Zhang Q., *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, *30*, 2003619
[14] Han Y., Zhang Z., Qu L., *FlatChem*, **2019**, *14*, 100090
[15] Huang Y., Cheng H., Shi G., Qu L., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2017**, *9*, 38170—38175
[16] Lee K. H., Park H., Eom W., Kang D. J., Noh S. H., Han T. H., *J. Mater. Chem. A*, **2019**, *7*, 23727—23732
[17] Badatya S., Kumar A., Sharma C., Srivastava A. K., Chaurasia J. P., Gupta M. K., *Mater. Lett.*, **2021**, *290*, 129493
[18] Ru Y., Ai L., Jia T., Liu X., Lu S., Tang Z., Yang B., *Nano Today*, **2020**, *34*, 100953
[19] Zhu S., Zhang J., Qiao C., Tang S., Li Y., Yuan W., Li B., Tian L., Liu F., Hu R., Gao H., Wei H., Zhang H., Sun H., Yang B., *Chem. Commun.*, **2011**, *47*, 6858—6860
[20] Xia C., Zhu S., Feng T., Yang M., Yang B., *Adv. Sci.*, **2019**, *6*, 1901316
[21] Li Q., Zhou M., Yang Q., Yang M., Wu Q., Zhang Z., Yu J., *J. Mater. Chem. A*, **2018**, *6*, 10639—10643
[22] Qin J., Yang X., Shen C., Chang Y., Deng Y., Zhang Z., Liu H., Lv C., Li Y., Zhang C., Dong L., Shan C., *Nano Energy*, **2022**, *101*, 107549
[23] Yan Z., Li N., Chang Q., Xue C., Yang J., Hu S., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *467*, 143443
[24] Li Q., Qin Y., Cheng D., Cheng M., Zhao H., Li L., Qu S., Tan J., Ding J., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*, 2211013
[25] Liu X., Gao H., Ward J. E., Liu X., Yin B., Fu T., Chen J., Lovley D. R., Yao J., *Nature*, **2020**, *578*, 550—554
[26] Yang W. Q., *Study on the Construction and Properties of Moisture Power Generation Materials Based on Biomass Nanofibers*, Qingdao University, Qingdao, **2020**(杨伟庆. 基于生物质纳米纤维的湿气发电材料构筑及其性能研究，青岛：青岛大学，**2020**)
[27] Bao R., Luo H., Liu L., Yi J., Tao J., Li C., *Compos. Commun.*, **2023**, *38*, 101491
[28] Sun Z., Feng L., Xiong C., He X., Wang L., Qin X., Yu J., *J. Mater. Chem. A*, **2021**, *9*, 7085—7093
[29] Tan J., Fang S., Zhang Z., Yin J., Li L., Wang X., Guo W., *Nat. Commun.*, **2022**, *13*, 3643
[30] Zhu R., Zhu Y., Hu L., Guan P., Su D., Zhang S., Liu C., Feng Z., Hu G., Chen F., Wan T., Guan X., Wu T., Joshi R., Li M., Cazorla C., Lu Y., Han Z., Xu H., Chu D., *Energ. Environ. Sci.*, **2023**, *16*, 2338—2345
[31] Bai J., Huang Y., Wang H., Guang T., Liao Q., Cheng H., Deng S., Li Q., Shuai Z., Qu L., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*, 2103897

[32] Bai J., Liao Q., Yao H., Guang T., He T., Cheng H., Qu L., *Energ. Environ. Sci.*, **2023**, *16*, 3088—3097
[33] Maity D., Fussenegger M., *Adv. Sci.*, **2023**, *10*, 2300750
[34] Xu T., Ding X., Huang Y., Shao C., Song L., Gao X., Zhang Z., Qu L., *Energ. Environ. Sci.*, **2019**, *12*, 972—978
[35] Nie X., Ji B., Chen N., Liang Y., Han Q., Qu L., *Nano Energy*, **2018**, *46*, 297—304
[36] Duan W., Shao B., Wang Z., Ni K., Liu S., Yuan X., Wang Y., Sun B., Zhang X., Liu R., *Energ. Environ. Sci.*, **2024**, *17*, 3788—3796
[37] Wu P., Chen Y., Luo Y., Ji W., Wang Y., Qian Z., Duan Y., Li X., Fu S., Gao W., Liu D., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, *16*, 32198—32208
[38] Shen D., Xiao M., Zou G., Liu L., Duley W. W., Zhou Y. N., *Adv. Mater.*, **2018**, *30*, 1705925
[39] Qin Y., Wang Y., Sun X., Li Y., Xu H., Tan Y., Li Y., Song T., Sun B., *Angew. Chem. Inter. Ed.*, **2020**, *59*, 10619—10625
[40] Yang S., Zhang L., Mao J., Guo J., Chai Y., Hao J., Chen W., Tao X., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*, 3329
[41] Huang Y., Cheng H., Qu L., *ACS Mater. Lett.*, **2021**, *3*, 193—209
[42] Bai J. X., Huang Y. X., Wang H. Y., Guang T. L., Liao Q. H., Cheng H. H., Deng S. H., Li Q. K., Shuai Z. G., Qu L. T., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*, 2103897
[43] Xu T., Ding X., Cheng H., Han G., Qu L., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*, 2209661
[44] Xu Y., Li Z., Shi C., Li Y., Lei Y., Peng G., Yu T., Ren H., Wang H., Fan H., Zhang Y., Ci Z., Wang Q., Jin Z., *Adv. Mater.*, **2024**, *36*, 2406128
[45] Wang H., Sun Y., He T., Huang Y., Cheng H., Li C., Xie D., Yang P., Zhang Y., Qu L., *Nat. Nanotech.*, **2021**, *16*, 811—819
[46] Yang S., Zhang L., Mao J., Guo J., Chai Y., Hao J., Chen W., Tao X., *Nat. Commun.*, **2024**, *15*, 3329
[47] Bai J., Huang Y., Cheng H., Qu L., *Nanoscale*, **2019**, *11*, 23083—23091
[48] Duan Z., Yuan Z., Jiang Y., Zhao Q., Huang Q., Zhang Y., Liu B., Tai H., *Chem. Eng. J.*, **2022**, *446*, 136910
[49] Gao K., Sun J., Lin X., Li Y., Sun X., Chen N., Qu L., *J. Mater. Chem. A*, **2021**, *9*, 24488—24494
[50] He W., Li P., Wang H., Hu Y., Lu B., Weng C., Cheng H., Qu L., *ACS Nano*, **2024**, *18*, 12096—12104

(Ed.: Y, K, S)