http://pmse.scu.edu.cn

二维碳基Janus薄膜的研究进展

李汭文，徐祖顺，杨婷婷，姚 丽
（湖北大学 材料科学与工程学院，湖北省高分子材料重点实验室，湖北 武汉 430062）

摘要：以碳纳米管（CNTs）及石墨烯为代表的碳纳米材料具有卓越的物理、化学、电学和光学性质。其可控组装的二维碳基薄膜具有高比表面积、高透过率和良好柔性，广泛应用于柔性薄膜、微电子器件及储能领域。在此基础上引入高分子组分结合形成二维碳基Janus薄膜，不仅维持了其导电导热性，还结合了高分子的刺激响应和调控特性，通过非对称特征，实现了物理和化学性质的协同，大幅拓宽了其应用领域。文中综述了二维碳基Janus薄膜的研究近况。首先从物理法和化学法两方面介绍了二维碳基Janus薄膜的制备方法及其优缺点，物理法包括界面成膜法、真空抽滤法和层层组装法等；化学法包含界面聚合及化学接枝等方法。然后总结了二维碳基Janus薄膜在传感、驱动、海水淡化、油水分离等多个领域的应用现状。最后讨论了二维碳基Janus膜的发展前景及面临的挑战。

关键词：Janus膜；二维碳基薄膜；传感器；驱动器；海水淡化；油水分离
中图分类号：TB383 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）05-0181-10

Janus膜得名于古罗马神话中的双面神，其膜层两侧具有明显不同的特性，如不对称润湿性、极性/非极性差异及表面电荷不对称性等[1]。这种非对称的化学组成或结构，可同时满足某一应用中对2种不同性质的需求，尤其在涉及界面反应的领域展现出独特的功能，如定向渗透、降低膜过程能耗、提升产能器件效率等方面。新型碳材料包括碳纳米管、石墨烯和富勒烯等，其中碳纳米管具有一维中空管状结构，长径比高、比表面积大，表现出高强度、高模量、低密度的特点，具有良好的传热性，内部结构中碳原子产生的共轭效应也使碳纳米管在导电方面有着优异的表现，可用于柔性屏幕、微电子器件等领域[2,3]。石墨烯呈现出独特的平面二维结构，具有超大的比表面积，表现出优异的力学、电学、光学性能及化学活性，可应用在能源、微纳加工、电磁阻隔等方面[4]。正是因为以上特性，许多研究都致力于将碳纳米管、石墨烯等碳材料与高分子材料复合起来，以充分发挥两者的优异性能[5~9]。

将碳基材料与高分子基材结合，能有效改善其分散性、相容性，也赋予了碳基材料以智能性，在柔性传感、储能及仿生驱动领域有巨大的应用潜力[10~12]。但均相接枝的高分子层却降低了碳基材料本身的 优异性能，使得二者性能的协同效应减弱。将碳基材料与高分子材料复合制得Janus薄膜，可以在保留材料原有性能的基础上引入碳纳米管和石墨烯的性能，实现碳基材料与基底的协同作用，还可以通过对碳基薄膜的修饰或高分子改性使碳基Janus薄膜的应用更加功能化[13~17]。本文介绍了近年来二维碳基Janus薄膜的研究进展，包括其制备方法、应用领域，最后对其发展方向做了简单的展望。

1 二维碳基Janus薄膜的制备

二维碳基Janus薄膜的制备一般分为2步。首先，制备二维碳基薄膜；然后，在此基础上，通过物理或化学方法沉积或生长另一层基材，从而得到Janus结构的二维碳基复合薄膜。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0087
收稿日期：2023-05-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51503059）
通讯联系人：姚丽，主要从事自修复材料、超疏涂层研究，E-mail：yaoli_2015@163.com

1.1 二维碳基薄膜的制备

二维碳基薄膜的制备方法有界面成膜法、真空抽滤法、化学气相沉积法、Langmuir-Blodgett（L-B）成膜法[18,19]、旋涂法、滴涂法和刮涂法等[20]。界面成膜法和真空抽滤法设备要求低、操作简单，但难以用来制备大面积薄膜；化学气相沉积法和L-B成膜法可以大面积制备薄膜，但是设备昂贵、制备条件苛刻；旋涂法、滴涂法和刮涂法可以通过改变溶液浓度、用量等因素来调控薄膜的厚度和面积，但对溶液的分散性、黏度及与基板间的润湿性有所要求。制备方法各有优劣，应当根据现有的条件和对薄膜的要求来选择合适的制备方法。

尤其值得一提的是，Xiao等[21]开发了一种操作便利、可制备大面积二维碳基膜的方法。他们采用高度简化的L-B法与界面自组装技术，借助毛细力诱导压缩在水/空气界面上制备二维碳纳米管薄膜，该薄膜能够进一步转移至其他基底上。首先配制碳纳米管/乙醇分散液，并将其喷洒在去离子水的表面，稳定分散后将海绵从一侧缓慢插入水中，使得空气/水界面处的碳纳米管在表面张力的作用下朝远离海绵的方向富集，形成紧密堆砌的碳纳米管薄膜。该方法操作简单、成本低、过程绿色环保，能够在水面上高效地形成厚度可控的独立CNT薄膜，形成的薄膜能够进一步转移至其他基底上。这种方法有望作为一种通用策略在水面上制备各种纳米材料的薄膜。

1.2 二维碳基Janus薄膜的构建

根据碳基材料与Janus膜基材之间的相互作用，可将二维碳基Janus薄膜的制备方法分为物理法和化学法2类。

1.2.1 *物理方法*：物理方法主要是通过层层自组装或者物理共混的方式，将碳纳米管或石墨烯形成的碳基膜与基材复合得到二维碳基Janus薄膜。碳基膜和高分子基材之间只存在非共价键作用。

Wang等[22]将L-B法、界面成膜法和层层组装法相结合，制备得到了石墨烯与聚乙烯（PE）复合的二维碳基Janus薄膜。首先以L-B法和界面成膜法制备紧密堆砌的石墨烯层（SGA）。继而将玻片支撑的PE膜插入水面以下，将石墨烯层转移到PE层上；室温、氮气气氛中干燥后即获得石墨烯/PE复合Janus膜。该方法可以根据实际需求，增加重复转移和干燥的次数，从而调整碳基膜的层数；所得Janus膜具有不对称弹塑性，在光照及热诱导的条件下可产生卷曲形变。Zhou等[23]以同样的方法制备得到了紧密堆积的石墨烯/单壁碳纳米管薄膜，在薄膜表面均匀喷涂聚二甲基硅氧烷（PDMS）溶液后，制备得到石墨烯/单壁碳纳米管与PDMS的复合Janus薄膜，具有优异的气流传感性能，能够达到超低的气流速度检测极限（0.0176 m/s）。

与前述研究不同的是，Yang等[24]利用化学气相沉积法制备得到单壁碳纳米管碳基膜（SWNT），通过氧等离子体处理使之呈现出亲水性，并通过真空抽滤的方式将其转移至微孔滤膜上；以此膜进行不同浓度金纳米棒（AuNR）溶液的过滤操作，使AuNR直接沉积于SWNT，从而得到SWNT/AuNR的Janus复合膜（Fig.1）。该碳基Janus膜具有高光谱吸收能力和优异的光热转换效率，水蒸发率高达6.7 kg/(m^2·h)。

总的来说，通过物理法制备碳基Janus薄膜，工艺流程简单，收率高且应用基材广泛。主要的缺点就在于碳基膜与基底之间的结合力较弱，长期应用过程中可能发生相分离，使得Janus薄膜的性能下降。

1.2.2 *化学方法*：与物理法相比，化学法制备二维碳基Janus复合膜从根源上解决了碳基膜与基底膜之间结合力弱的问题，两者之间建立了稳定的共价键连接。Zhang等[25]将通过L-B技术制备的紧密堆积的碳纳米管膜转移至多巴胺（DA）水溶液表面，继而引发多巴胺在碳纳米管/水界面聚合，得到碳纳米管/聚多巴胺（PDA）复合膜；通过还原碳纳米管/PDA复合薄膜的PDA层中的邻苯二酚基团来合成AuNPs，最终形成碳纳米管/AuPNs复合Janus薄膜，具有良好的力学强度和电化学性能。

Gu等[26]通过自引发光接枝和光聚合（SIPGP）的方法，将疏水性聚合物聚苯乙烯（PS）和亲水性聚合物聚N, N-二甲氨基乙基甲基丙烯酸酯（PDMAEMA）分别复合到CNTs薄膜的不同侧面，制备得到具有非对称结构的PS-CNT-PDMAEMA Janus杂化膜（Fig.2），可以选择性地从水中去除多种有机溶剂，具有高吸收能力和良好的可回收性。Xiao等[27]使用CNT/氧化石墨烯（GO）薄膜作为光活

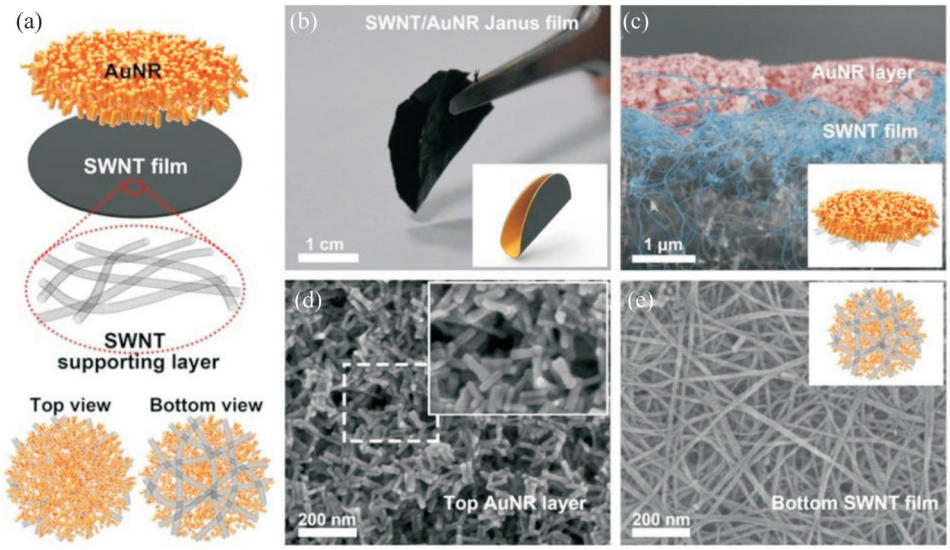


Fig. 1 Structure of the bilayer SWNT/AuNR film. (a) Schematic structure of the bilayer SWNT/AuNR Janus film viewed from different angles; (b) photograph of the bilayer SWNT/AuNR Janus film in the cross section direction; (c) SEM image of the cross section of the bilayer SWNT/AuNR Janus film; (d) SEM image of the top surface of the bilayer SWNT/AuNR film; (e) SEM image of the bottom surface of the bilayer SWNT/AuNR film[24]

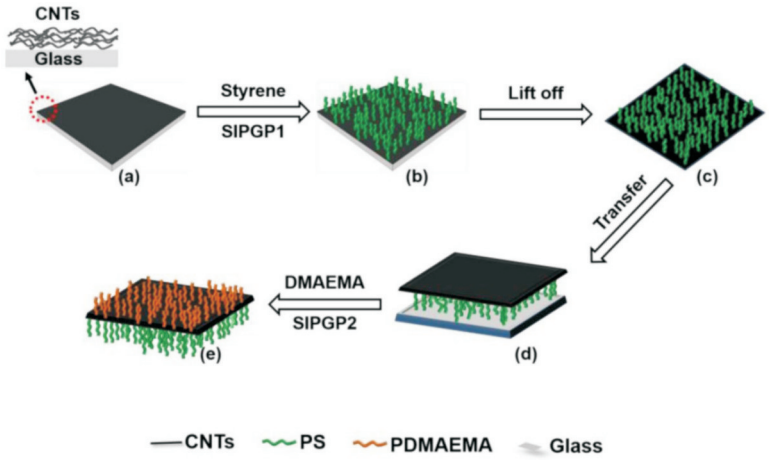


Fig. 2 Schematic illustration of the preparation of Janus PS−CNT−PDMAEMA hybrid membrane[26]

性表面，通过与上述研究同样的方法在CNT/GO薄膜的一侧生长聚合物刷，制备了聚合物接枝CNT/GO薄膜的二维Janus薄膜。

从上述制备实例可以看出，化学法主要是通过在二维碳基膜表面引发接枝聚合，或者利用界面聚合的方式接枝上高分子链，从而制备得到二维碳基Janus薄膜。该方法在膜结构的可调控性、膜组成的可设计性方面具有更显著的优势，但同时也可能影响碳材料的共轭结构、继而对其性能造成负面影响。

2　碳基复合Janus薄膜的应用

2.1　传感器

在自然界中，人类和动物等生物具有复杂多样的感官系统，能够对机械、温度、湿度和其他难以察觉的外部刺激做出反应，从而有效地感知环境信息。其中，气流感知功能是生物体感觉系统的重要组成部分之一，使生物在不确定的环境中能对非接触性刺激做出有效响应，以应对难以察觉的危险。受蝙蝠翼膜优异的气流感知能力启发，Zhou等[23]开发了一种基于微弹簧效应的高效气流传感系统，采用L-B法和界面自组装手段在水/空气界面实现了石墨烯/单壁碳纳米管（SWNTs）-Ecoflex复合薄膜

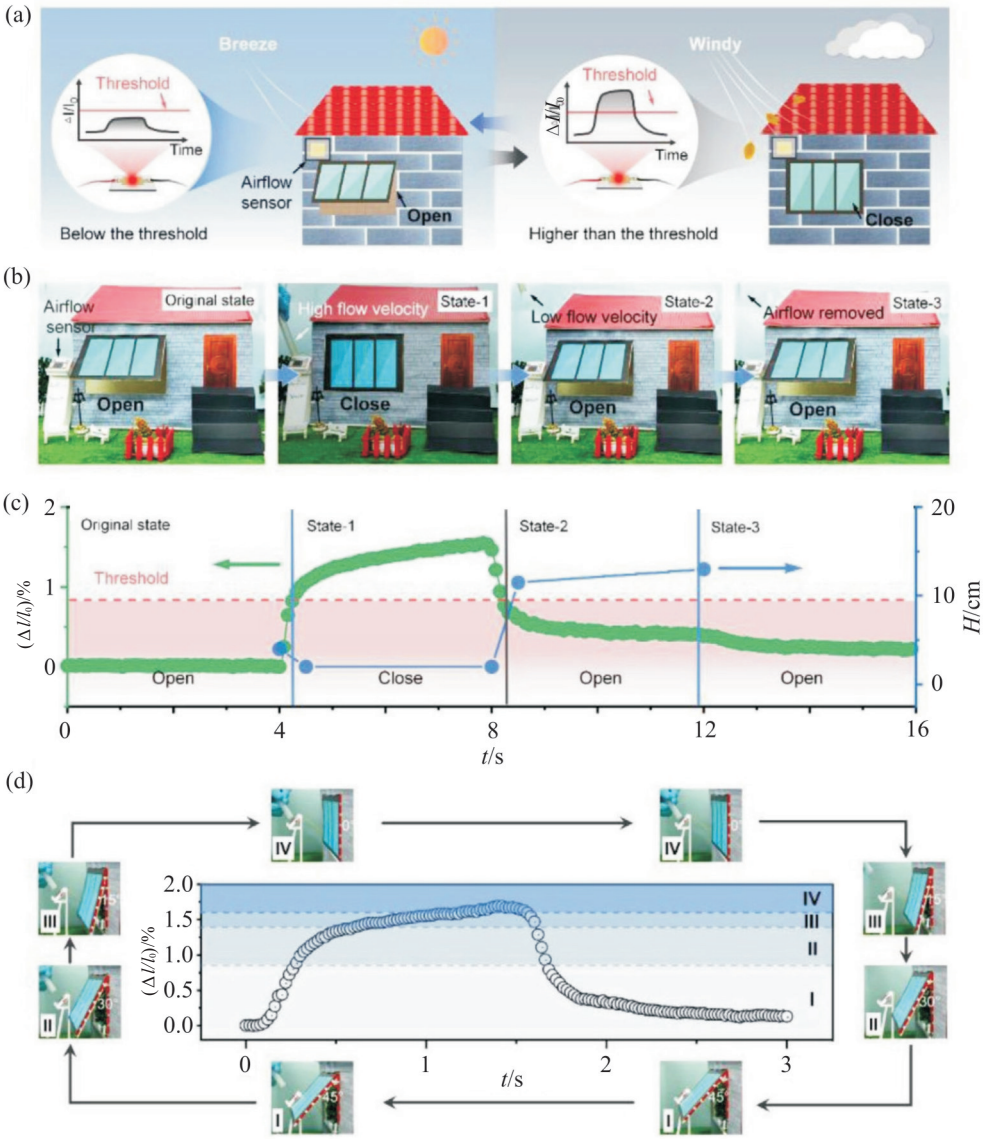


Fig. 3 (a) Schematic of the smart window open on a breeze day and close on a windy day when the relative current variation of the airflow sensor is below and higher than the threshold, respectively; (b) pictures of the window's state (open or close) at original state, state-1, state-2, and state-3 as the silicon tube slowly approached and moved away from the sensor; (c) relative variation of current and the tube's distance during one process of opening and closing the window automatically; (d) window was controlled to open and close at different angles by multiple thresholds control[23]

(GSEM)的构筑,在该碳基Janus薄膜结构中,石墨烯和碳纳米管杂化形成特殊的微弹簧结构,微簧结构在气流作用下被压缩,使得其接触电阻显著减小,表现出优异的气流感知功能:气流速度检测限低至0.0176 m/s、高达3.5 m/s,能在约1.04 s内做出迅速响应。此外,这种二维碳基复合Janus薄膜具有优异的自适应性,可应用于不同基底表面,均表现出稳定的气流传感性能,可应用于智能窗户系统,实现流速阈值控制的窗户智能开关行为(Fig.3)。在可穿戴电子设备和非接触式智能操纵领域也有广泛的应用前景。

Wang等[28]模拟鱼类感应系统的结构和传感机理,通过L-B法和界面自组装方法制备了由石墨烯和Ecoflex预聚体复合形成的Janus膜,并将其运用于水深监测和震动感知。直径为10 mm的样品可以对3 cm的深度变化做出响应,最大检测深度为50 cm;即使将该Janus膜置于水中,也能够感知铁球从10 cm,20 cm,30 cm和40 cm的高度落下时对桌子的撞击和反弹过程。

Xiao等[29]利用L-B法与界面自组装的方法制备

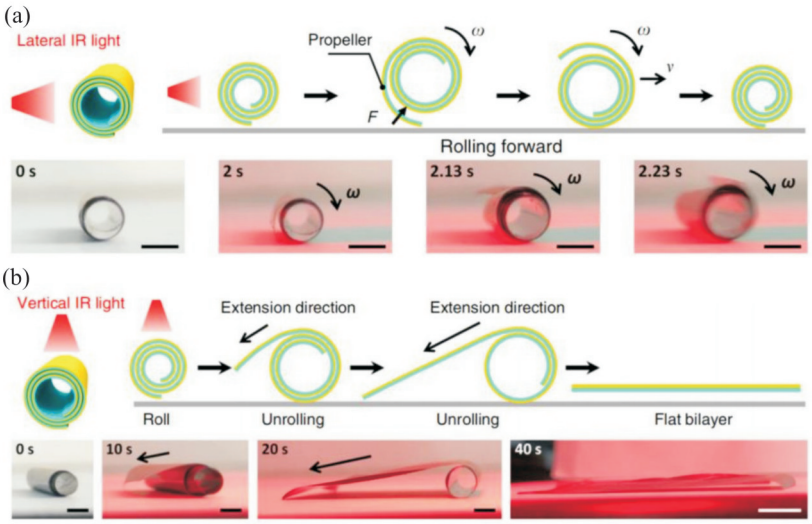


Fig. 4 (a) Lateral IR light illumination could cause rolling locomotion of an SGA/PE roll; (b) vertical illumination could make the SGA/PE roll unfold[22]

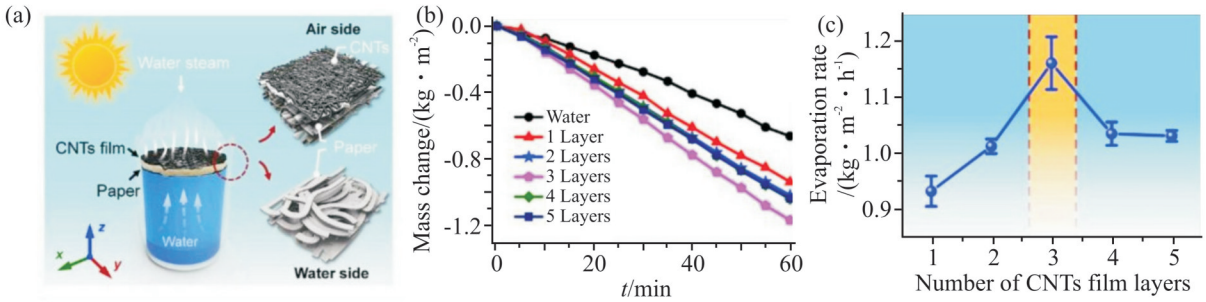


Fig. 5 (a) Sketch of the water evaporation of bilayer CNTs/paper at air/water interface under solar irradiation; (b) mass change versus time curves of bulk water and CNTs/paper with different CNTs layers under 1 sun irradiation; (c) evaporation rate versus CNTs film layers curve[34]

得到具有超薄、可拉伸、自粘和自适应特性的CNT/PDMS Janus薄膜。该薄膜可转移到皮肤、树叶等具有自粘性的基底上，而不影响Janus薄膜自身的性质；也可以作为自支撑膜，实现非接触传感。据此，科学家们仿制出青蛙发声囊类似的结构，并用该CNT/PDMS Janus薄膜加以密封。该Janus薄膜受到压力时，其电流信号会发生改变，据此可作为压力传感检测器，压力从95 Pa升高至1583 Pa时，电流大小从46 μA降低至44.5 μA。

2.2　仿生驱动

由于二维碳基Janus薄膜具有结构不对称性，在温度、压力等外界刺激下易于产生非对称形变，在仿生驱动领域极具应用潜力。Wang等[22]将以L-B法制得的石墨烯薄膜转移至PE膜表面，制备得到石墨烯/PE复合Janus薄膜。由于石墨烯与PE层之间热应变的不匹配性，使得该Janus薄膜在温度变化时会产生弯曲和卷绕行为，且形变完全可逆。基于这种现象，他们研制出了SGA/PE复合Janus薄膜的光、热双重响应驱动器，在侧面红外光照射下，SGA/PE卷2 s后能够开始滚动；在红外光垂直照射下，40 s后能够完全铺展开（Fig.4）。可用于无约束软体机器人和人工肌肉等方面。

除了光热响应的驱动器，张贵[30]在L-B法制备的多壁碳纳米管（MWCNTs）薄膜基础上，与聚偏氟乙烯（PVDF）复合得到MWCNTs/PVDF Janus薄膜，能够在红外光和丙酮气体的刺激下实现响应驱动，在红外光的照射下，薄膜产生形变，光照消失后恢复；MWCNTs/PVDF Janus薄膜制作的仿生手在丙酮蒸汽的刺激下能够在0.19 s内弯曲，停止刺激后1.2 s左右能够恢复原状。

2.3 海水清洁淡化

随着人类社会的发展，人们对淡水和能源的消耗也越来越大，太阳能具有绿色和可再生的特性，可以缓解能源和清洁水源的短缺[31,32]。收集丰富的太阳能，然后将其转化为热能用于水蒸发，是海水淡化最经济高效的技术之一[33]。与一般的光热转换材料（如金属纳米材料、半导体材料等）相比，碳纳米材料对太阳光的反射率低、吸收率高，将其引入具有不对称结构特性的Janus材料中，可大幅提高光热转换性能，从而应用于海水淡化等相关领域。

Xiao等[34]制备了一个由CNT、纤维素纸组成的Janus膜蒸发器，以此来实现太阳能光热转换。他们将二维CNTs薄膜转移至纸张表面，研究发现，经过多次转移，有3层碳纳米管薄膜的蒸发器蒸发速率最快（Fig.5），蒸发效率能够达到1.15 kg/(m^2·h)。

Yang等[24]以单壁碳纳米管（SWCNT）膜和AuNR组装构建了双层二维Janus膜。上层的AuNR作为等离子体吸收层，将吸收的太阳光转化为热能，层内纳米棒之间的孔隙结构便于水蒸汽的快速传输；下层的SWCNT作为机械支撑层，有利于保持AuNR层的结构完整性。作为碳基材料，SWCNT层增强了太阳光谱吸收能力，提高了光热转换效率，其多孔结构还能充当热障层，可减轻大量水的热散失，大大提高了蒸发效率，在5 kW/m^2的太阳辐射强度下蒸发效率接近94%。

Li等[35]通过在超弹性硅海绵上涂覆石墨烯，然后用氧等离子体对其改性，开发出具有光热和电热效应的高耐盐全天候硅蒸发器。该蒸发器具有超亲水表面和超疏水内核的Janus结构，3.5% NaCl溶液在100%太阳光照下的蒸发率高达6.53 kg/(m^2·h)，在黑暗环境下的蒸发率也可达1.51 kg/(m^2·h)。

Jiang等[36]通过将包覆钴纳米颗粒的高疏水性氮掺杂碳纳米管（Co@C/NCNT）与亲水性尼龙膜相结合，具有不对称表面润湿性和高的太阳能吸收效率。预制Janus Co@C/NCNT蒸发器可实现1.55 kg/(m^2·h)的高太阳能水蒸发率，蒸发效率为89.7%，10次水分蒸发循环后保持良好。

2.4 油水分离

随着工业排放的含油废水和溢油事故的日益增加，为了更好地实现绿色发展的新理念，实现高效油水分离是一个非常迫切的现实问题[37,38]。膜分离技术作为传统分离手段，在油水分离中具有广泛的应用基础[39]。其中，Janus膜具有两面不对称的特性，其对水、油表现出亲和性的差异，有利于快速、高效地完成油水分离过程[40,41]。

Gu等[26]将疏水性聚合物PS和亲水性PDMAEMA通过自引发光接枝和光聚合分别复合到碳纳米管膜的不同侧面，碳纳米管以其低密度、高孔隙率、高通量作为油水分离材料，使所得碳基Janus膜的两面对水、油表现出截然相反的润湿性，可用于分离乳化油/水混合物，不仅可以实现简单的油水分离，对于油包水和水包油乳液的油水分离也同样有效。以己烷/水乳液为例，其通量高达0.085 L/(m^2·h·Pa)。分离甲苯乳液中的水时，生成的甲苯纯度在99.98%以上。

Huang等[42]采用静电纺丝的方法将CNT修饰的超亲水纳米纤维复合层和疏水纳米纤维复合层组成Janus膜。不对称润湿性可以通过改变静电纺丝时间、调节疏水层的厚度来控制。该膜可以按需分离不同种类的含油废水，且具有较高的分离通量和分离效率。比如该碳基Janus薄膜对水包庚烷乳液、水包四氯化碳乳液和水包甲苯乳液都具有大于0.03 L/(m^2·h·Pa)的高透水通量，分离效率高达99%。该文并对水包庚烷乳状液的分离循环性能也进行了研究，在10次循环试验中，可以保持较高的通量和分离效率。另一方面，还对3种不同油包水乳状液的渗油通量和分离效率进行了测试，结果表明，对于庚烷乳液中水、四氯化碳乳液中水和甲苯乳液中水的分离，油的渗透通量分别为0.0552 L/(m^2·h·Pa)，0.08911 L/(m^2·h·Pa)和0.06652 L/(m^2·h·Pa)，3种乳状液的分离效率均可达99%。在10次庚烷乳液中水的分离循环性能测试中可以保持通量和分离效率不变。

除了上述具有不对称湿润性的Janus薄膜以外，具有电荷不对称性的Janus薄膜也能用于油水分离。An等[43]通过真空抽滤的方法，在聚丙烯微滤膜两侧分别沉积带有相反电荷的碳纳米管，从而制备出适用于油水分离的Janus薄膜。带电荷的碳纳米管涂层可以吸引带相反电荷的油滴，促进脱乳，提高油水分离效率。该Janus膜可以在40 min内对液滴尺寸为19 μm的1,2-二氯乙烷/水乳液进行油水分

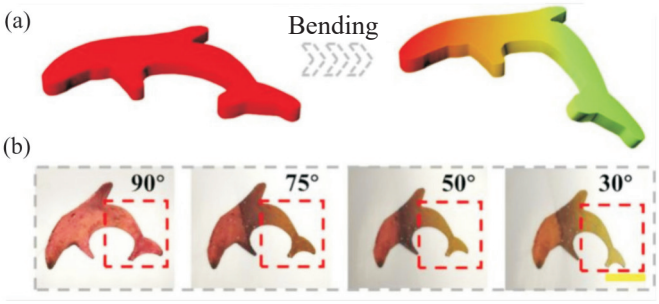


Fig. 6 (a) Schematic illustration of Janus structural color films with dolphin shape bending; (b) optical images of the structural color variation process of the composite film during dolphin tail bending[44]

离，回收效率可达89%。另外，控制沉积时碳纳米管分散液的浓度，可以改变碳纳米管层的厚度，进而调节Janus膜的表面润湿性，使Janus膜兼具疏水和水下疏油的特性，以实现高效油水分离。

2.5　其他应用

碳基Janus薄膜还能用作可视化柔性电子器件。Xu等[44]采用层层组装法制备了由导电CNT层、PDMS层和由二维胶体晶体（2D-CCs）形成的结构色层组成的3层结构Janus复合膜。其中，PDMS层为具有柔韧性的支撑层；CNT碳基层经自组装富集在PDMS层单侧，提供稳定的导电性；2D-CCs层经PDA黏附在PDMS层另一侧，其阵列的结构颜色层为Janus复合膜提供视觉传感（Fig.6）。研究发现，碳纳米管薄膜在宽带频率场中的光吸收特性，可以增加2D-CC阵列的结构颜色对比度。

此外，碳基薄膜能以最小厚度屏蔽电磁干扰，以此制备得到的二维碳基Janus薄膜具有轻质、柔性、高导电性的特点，可用于减轻电磁污染问题。Huo等[45]采用真空过滤法制备了多功能、机械柔性石墨烯纳米片（GNs）/细菌纤维素（BSs）双层Janus膜，并将其用作电磁干扰屏蔽和焦耳加热材料。所获得的双层膜电导率随GNs负载的增加而线性增加，当GNs/BCs Janus膜中GNs的质量负载为44 mg时最大电导率可达1261 S/cm。GNs/BCs-1 Janus薄膜在X波段的平均EMI SE约为45 dB，可屏蔽99.99%的电磁波，随着GNs/BCs Janus薄膜中GNs含量的增加，EMI SE增加，GNs/BCs-4的值可以达到70 dB以上。

3　结语与展望

（1）在制备方面，已有的报道大多是在二维碳基薄膜的基础上再采用物理或化学方法构建碳基Janus薄膜。物理方法操作简单快捷，应用基材广泛，其不足之处在于碳基薄膜与基材间的结合力较弱，薄膜的耐久性会受到影响。化学方法解决了二者结合力弱的问题，增强了膜结构的可调控性和可设计性，但也存在可能影响碳基材料性能的缺点。另外，碳基Janus薄膜的规模化制备也是目前面临的问题，现在的方法制备出来的碳基Janus薄膜的尺寸都不大，对碳基Janus薄膜的大面积、工业化应用有所限制。提高碳基材料与基材间的结合力、更好地发挥材料的协同作用以及规模化制备碳基Janus薄膜可以作为今后的研究方向。

（2）在应用方面，目前的报道多数集中在柔性传感、仿生驱动、海水净化和油水分离等领域，而在传感领域，碳基Janus薄膜的信息表现形式太过单一，几乎都是通过电信号的改变来体现；在油水分离领域，对薄膜的厚度有精确的要求，对薄膜的防污染性，稳定性也有很高的要求。今后可以对扩展碳基Janus薄膜传感的表现形式，实现精确控制薄膜厚度，提高膜防污染、稳定性这几个方面进行深入研究。

（3）在二维碳基Janus薄膜的前景方面，优化改善二维碳基Janus薄膜的制备流程，探寻大面积、稳定、绿色的制备工艺，在市场化方面有很大的前景；二维碳基Janus薄膜在电磁屏蔽等领域有很大的潜力，在这一方面有望进行更深入的研究；研发不同基

底、不同构成的多功能性二维碳基Janus薄膜，提升并改善其性能，可以扩大其应用领域。

参考文献:

[1] 任宝娜, 皮浩弘, 谷英姝, 等. Janus膜的制备及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(7): 72-80.
Ren B N, Pi H H, Gu Y S, *et al.* Research progress in preparation and application of Janus membranes [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(7): 72-80.

[2] Tasis D, Tagmatarchis N, Bianco A, *et al.* Chemistry of carbon nanotubes[J]. Chemical Reviews, 2006, 106: 1105-1136.

[3] Baughman R H, Zakhidov A A, De H W A, Carbon nanotubes-the route toward applications[J]. Science, 2002, 297: 787-792.

[4] Guo S J, Dong S J. Graphene nanosheet: synthesis, molecular engineering, thin film, hybrids, and energy and analytical applications[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40: 2644-2672.

[5] Spitalsky Z, Tasis D, Papagelis K, *et al.* Carbon nanotube-polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35: 357-401.

[6] 李强, 殷新意, 于妍妍, 等. 取向碳纳米管/环氧树脂复合薄膜制备及结构与性能表征[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2767-2775.
Li Q, Yin X Y, Yu Y Y, et al. Preparation and characterization of aligned carbon nanotubes/epoxy composite films [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2767-2775.

[7] 张明艳, 王登辉, 吴子剑, 等. 改性碳纳米管/环氧树脂复合材料的介电性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(6): 1285-1294.
Zhang M Y, Wang D H, Wu Z J, *et al.* Dielectric properties of modified carbon nanotube/epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(6): 1285-1294.

[8] 朱世东, 赵乾臻, 王星海, 等. 石墨烯/高分子功能复合材料制备与应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(2): 489-501.
Zhu S D, Zhao Q Z, Wang X H, *et al.* Research progress in preparation and application of graphene/polymer functional composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 489-501.

[9] Zhou W, Xiao P, Chen T. Carbon-based janus films toward flexible sensors, soft actuators, and beyond[J]. Accounts of Materials Research, 2023, 4: 334-347.

[10] Li S, Xiao P, Zhou W, *et al.* Bioinspired nanostructured superwetting thin- films in a self- supported form enabled “miniature umbrella” for weather monitoring and water rescue [J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14: 32.

[11] Wang S, Xiao P, Liang Y, et al. Network cracks-based wearable strain sensors for subtle and large strain detection of human motions[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6: 5140-5147.

[12] Liang Y, Xiao P, Ni F, *et al.* Biomimetic underwater self-perceptive actuating soft system based on highly compliant, morphable and conductive sandwiched thin films[J]. Nano Energy, 2021, 81: 105617.

[13] Xiao P, Gu J C, He J, *et al.* Integration of a patterned conductive carbon nanotube thin film with an insulating hydrophobic polymer carpet into robust 2D Janus hybrid flexible electronics [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4: 9750-9755.

[14] Camilli L, Passacantando M. Advances on sensors based on carbon nanotubes[J]. Chemosensors, 2018, 6: 62.

[15] Zhang W Z, Wang L F, Sun K, *et al.* Graphene-based Janus film with improved sensitive response capacity for smart actuators[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2018, 268: 421-429.

[16] Zhou Q X, Li H, Li D D, *et al.* A graphene assembled porous fiber- based Janus membrane for highly effective solar steam generation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 592: 77-86.

[17] Li Y Z, Zhang G F, Gao A L, *et al*. Robust graphene/poly(vinyl alcohol) janus aerogels with a hierarchical architecture for highly efficient switchable separation of oil/water emulsions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 36638-36648.

[18] Acharya S, Hill J P, Ariga K. Soft langmuir- blodgett technique for hard nanomaterials[J]. Advanced Materials, 2009, 21: 2959-2981.

[19] Li X, Zhang L, Wang X, *et al.* Langmuir blodgett assembly of densely aligned single walled carbon nanotubes from bulk materials[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129: 4890-4891.

[20] 肖鹏. 二维碳基薄膜及其高分子杂化材料的织构与性能研究

[D]. 宁波：中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 2017.
Xiao P. Fabrication and properties of two-dimensional carbon-based ultrathin films and their polymer hybrids[D]. Ningbo: Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering Chinese Academy of Sciences, 2017.

[21] Xiao P, Gu J C, Wan C J, *et al.* Ultrafast formation of free-standing 2D carbon nanotube thin films through capillary force driving compression on an air/water interface[J]. Chemistry of Materials, 2016, 28: 7125-7133.

[22] Wang S, Gao Y, Wei A R, *et al.* Asymmetric elastoplasticity of stacked graphene assembly actualizes programmable untethered soft robotics[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4359.

[23] Zhou W, Xiao P, Liang Y, *et al.* Bionic adaptive thin-membranes sensory system based on microspring effect for high-sensitive airflow perception and noncontact manipulation[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2105323.

[24] Yang Y B, Yang X D, Fu L N, *et al*. Two-dimensional flexible bilayer janus membrane for advanced photothermal water desalination[J]. ACS Energy Letters, 2018, 3: 1165-1171

[25] Zhang L, Xiao P, Lu W, *et al*. Macroscopic ultrathin film as bio-inspired interfacial reactor for fabricating 2D freestanding Janus CNTs/AuNPs hybrid nanosheets with enhanced electrical performance[J]. Advanced Materials Interfaces, 2016, 3: 1600170.

[26] Gu J C, Xiao P, Chen J, *et al.* Janus polymer/carbon nanotube hybrid membranes for oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6: 16204-16209.

[27] Xiao P, Wan C J, Gu J C, *et al*. 2D Janus hybrid materials of polymer-grafted carbon nanotube/graphene oxide thin film as flexible, miniature electric carpet[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25: 2428-2435.

[28] Wang Q L, Xiao P, Zhou W, *et al.* Bioinspired adaptive, elastic, and conductive graphene structured thin-films achieving high-efficiency underwater detection and vibration perception[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14: 62.

[29] Xiao P, Liang Y, He J, *et al.* Hydrophilic/hydrophobic interphase-mediated bubble-like stretchable janus ultrathin films toward self-adaptive and pneumatic multifunctional electronics[J]. ACS Nano, 2019, 13: 4368-4378.

[30] 张贵. 二维Janus碳基复合薄膜的构建及其分离性能与智能驱动研究[D]. 西安：长安大学, 2019.
Zhang G. Construction of two-dimensional Janus carbon-based composite films and research on its separation performance and intelligent drive[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

[31] 曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳, 等. 太阳能电池综述：材料、政策驱动机制及应用前景[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 1847-58.
Cao S W, Zhou G Q, Cai Q L, *et al*. A review of solar cells: materials, policy-driven mechanisms and application prospects [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 1847-1858.

[32] Chen Y Y, Zhao X, Ye Z D, *et al*. Robust seawater desalination and sewage purification enabled by the solar-thermal conversion of the Janus-type graphene oxide evaporator[J]. Desalination, 2022, 522: 115406.

[33] Zhang H X, Xie H L, Han W, *et al*. Graphene oxide-reduced graphene oxide Janus membrane for efficient solar generation of water vapor[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4: 1916-1923.

[34] Xiao P, He J, Ni F, *et al.* Exploring interface confined water flow and evaporation enables solar-thermal-electro integration towards clean water and electricity harvest via asymmetric functionalization strategy[J]. Nano Energy, 2020, 68: 104385.

[35] Li L, Zhang J. Highly salt-resistant and all-weather solar-driven interfacial evaporators with photothermal and electrothermal effects based on Janus graphene@silicone sponges[J]. Nano Energy, 2021, 81: 105682.

[36] Jiang J, Jiang H L, Xu Y, *et al*. Janus Co@C/NCNT photothermal membrane with multiple optical absorption for highly efficient solar water evaporation and wastewater purification[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 647: 128960.

[37] Jiang Y, Hou J, Xu J, *et al.* Switchable oil/water separation with efficient and robust Janus nanofiber membranes[J]. Carbon, 2017, 115: 477-485.

[38] Yun J, Khan F A, Baik S. Janus graphene oxide sponges for high-purity fast separation of both water-in-oil and oil-in-water emulsions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9: 16694-16703.

[39] Zhang N, Yang X W, Wang Y L, *et al.* A review on oil/water emulsion separation membrane material[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10: 107257.

[40] 谷金翠, 张磊, 张佳玮, 等. 二维碳基薄膜及其高分子复合材料的构筑和油水分离性能研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(22): 2316-2331.
Gu J C, Zhang L, Zhang J W, *et al.* Recent advance of two-dimensional carbon-based films and their polymer functionalized membranes for oil/water separation[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(22): 2316-2331.

[41] Liang H, Gao S, Zhu Y, *et al.* An ultrathin bilayer membrane with asymmetric wettability for pressure responsive oil/water emulsion separation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3: 23477-23482.

[42] Huang X W, Wu Z F, Zhang S, *et al.* Mechanically robust Janus nanofibrous membrane with asymmetric wettability for high efficiency emulsion separation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 429: 128250.

[43] An Y P, Yang J, Yang H C, *et al.* Janus membranes with charged carbon nanotube coatings for deemulsification and separation of oil-in-water emulsions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10: 9832-9840.

[44] Xu D, Sun L, Zhang Z, *et al.* Bio-inspired Janus structural color films as visually flexible electronics[J]. Applied Materials Today, 2021, 24: 101124.

[45] Huo Y J, Guo D, Yang J L, *et al.* Flexible graphene/bacterial celluloses Janus structure film with excellent electromagnetic interference shielding and Joule heating performance[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 287: 126318.

Progress in Two-Dimensional Carbon-Based Janus Films

Ruiwen Li, Zushun Xu, Tingting Yang, Li Yao
(*Habei Key Laboratory of Polymer Materials*, *School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China*)

ABSTRACT: Carbon nanomaterials, represented by carbon nanotubes and graphene, have excellent physical, chemical, electrical and optical properties. Their controllably assembled 2D carbon-based films have high specific surface area, high transmittance and good flexibility, and are widely used in flexible films, microelectronic devices and energy storage. On this basis, the polymer components were introduced to be combined to form 2D carbon-based Janus films, which not only maintain the electrical and thermal conductivity, but also combine the stimulus-responsive and modulation properties of polymers, and achieve synergistic physical and chemical properties through asymmetric features, which greatly expand their application areas. This paper reviewed the recent research on 2D carbon-based Janus films. First, the preparation methods of 2D carbon-based Janus films, their advantages and disadvantages were introduced from both physical methods, including interfacial film formation, vacuum filtration, and layer-by-layer assembly, and chemical methods, including interfacial polymerization and chemical grafting. Then, the current status of 2D carbon-based Janus films was summarized for their applications in various fields such as sensing, actuation, seawater desalination, and oil-water separation. Finally, the development prospects and challenges of 2D carbon-based Janus films were discussed.

Keywords: Janus film; 2D carbon-based films; sensor; actuator; desalination; oil-water separation