http://pmse.scu.edu.cn

MXene与MWCNTs复合改性高密度聚乙烯的结晶及界面蒸发性能

张 军，贾仕奎，朱 艳，张瑶瑶，王瑞泽，闫宗莹，吴 磊
（陕西理工大学 材料科学与工程学院 矿渣综合利用环保技术国家地方联合工程实验室，陕西 汉中 723000）

摘要：以高密度聚乙烯（HDPE）为基体，采用MXene和碳纳米管（CNT）为改性填料，通过调控偶氮二甲酰胺（AC）的分解温度，并利用熔融共混与梯度温度模压法制备了一系列MXene/HDPE，MXene/CNT/HDPE发泡材料。利用哈克流变仪、X射线衍射仪、差示扫描量热仪和偏光显微镜对改性HDPE发泡材料的熔体黏度、晶体形态、结晶性能进行了测试，以探究发泡材料的熔体黏度对结晶及泡孔生长的影响；再利用红外测温仪、接触角测试仪与氙灯蒸发仪对改性HDPE发泡材料的导热性能、亲水性能与淡水/盐水界面蒸发速率进行测试，以探究填料对HDPE基发泡材料光热特性的影响。结果表明，MXene降低了发泡材料的熔体黏度，而CNT增加了发泡材料的熔体黏度；MXene和CNT对HDPE的晶体形态未产生明显影响，但一定程度上降低了HDPE基发泡材料的结晶度；MXene和CNT均可以提升发泡材料的导热性能，并且MXene使发泡材料的亲水性变好；除此之外，在1.5 kW/m^{2}的太阳辐照强度下，当MXene的质量分数为2%时，MXene/HDPE发泡材料的淡水和盐水的平均蒸发速率分别为1.34 kg/(m^2·h)和1.21 kg/(m^2·h)，较纯HDPE泡孔材料提升了29.97%和29.04%；当MXene质量分数为2%，且CNT的质量分数为1%的时候，MXene/CNT/HDPE发泡材料的淡水和盐水平均蒸发速率分别为1.53 kg/(m^2·h)和1.38 kg/(m^2·h)，较纯HDPE泡孔材料提升了39.97%和35.60%。

关键词：MXene；碳纳米管；高密度聚乙烯；熔融共混；界面蒸发
中图分类号： **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）10-000

由于人口快速增长和气候变化，世界正遭受严重的水资源压力和日益不平衡的水资源分配，淡水只占全球水资源的2.5%，而且，可用的淡水资源占比不足1%[1,2]。淡水资源匮乏的问题已成为当代社会所面临的重要挑战，以海水为原料生产淡水，是缓解水资源匮乏的有效途径之一。近年来，界面式太阳能水蒸发系统因成本低、效率高而备受关注，至今，人们已经发现了多种光热材料并将其应用于海水淡化领域，如金属材料、半导体材料、碳基材料及聚合物材料等[3,4]。在界面蒸发装置中，光热转换能力的强弱是直接影响界面蒸发装置平均蒸发速率的关键因素。

MXene独特的结构和性能，使其具有优异的光热转换能力，并且MXene具有良好的亲水性，在海水淡化领域表现出了突出的优势[5,6]。Wang等[7]开发了一种聚酰亚胺/MXene混合气凝胶基复合材料，在5 kW/m^{2}的光照强度下，蒸发率达到50.6%。Que等[8]制备了一种疏水的MXene光热蒸发膜，在1 kW/m^{2}光照下，其平均蒸发速率为1.31 kg/(m^2·h)，太阳能利用率为71%。Yang等[9]制备了一种MXene涂层的纤维素膜，光吸收率高达94%，在1 kW/m^{2}光照下，水平均蒸发速率为1.44 kg/(m^2·h)。所以MXene可以使复合材料的平均蒸发速率有所提升，但是其光热转换效率还是没有达到很高（>90%）[10]。

碳基材料具有吸收范围宽、化学稳定性高、原料广、成本低、光热转换效率高等优点，在太阳能应用

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0165
收稿日期：2023-10-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52263004）；陕西理工大学校级科研重点项目（SLGKYXM2305）
通讯联系人：贾仕奎，主要从事聚合物基复合材料先进成型，微观结构与性能研究，E-mail: shikuijia@snut.edu.cn

领域受到了广泛关注[11]。其中，碳纳米管（CNT）具有光热转换能力强和吸收范围广等优点，在界面蒸发领域受到科研人员的追捧。Ghafurian等[12]制备的多壁碳纳米管达到了94%的最高蒸发效率，同时，Miao等[13]在CNT薄膜太阳能蒸发器的启发下，设计了一种简化的太阳能蒸发系统，在1 kW/m^{2}的光照强度下，水蒸发效率高达84.6%。

但是碳基材料的高能耗、生物质基材料的易降解和金属半导体材料的成本高、易氧化的特性使复合材料的使用寿命较短[14]。而聚合物具有良好的耐化学腐蚀性、较好的韧性和良好的可加工性，为应用于各种环境条件下的界面蒸发器件开发提供了可能[15]。

本文采用高密度聚乙烯（HDPE）为基体，在基体中加入一定量的偶氮二甲酰胺（AC）和不同质量分数的MXene和MWCNTs，采用熔融共混和梯度温度模压法制备了一系列的发泡材料，并对其结晶性能和界面蒸发性能进行了研究，为耐酸碱、耐盐性聚合物基界面蒸发器件的开发提供了理论和实验支撑。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

Ti_3ALC_2：丽木（宁波）新材料有限公司；HF溶液：上海麦克林生化科技有限公司；HDPE：独山子石化公司；多壁碳纳米管：苏州碳丰石墨烯科技有限公司；自制的AC/HDPE发泡母粒：AC质量分数为10%；自制盐水浓度3.3%。

1.2 试样制备

1.2.1 MXene的制备：取10 g Ti_3ALC_2和约100 mL的HF（40%）溶液混合，在35 ℃，以500 r/min的速度搅拌混合物8~10 h。用去离子水稀释，离心30 min，转速10000 r/min，将上清液倒出，重复4次。将上述溶液重新分散到大量去离子水中，使用聚四氟乙烯多孔膜（亲水性，200 nm）抽滤，直到pH接近7。在真空烘箱中以80 ℃的温度烘干12~15 h，干燥后，用研钵将结块的MXene磨成粉。若产物仍然潮湿可以多次烘干。

1.2.2 MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的制备：Fig. 1为MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的制备流程图。将HDPE、AC/HDPE发泡母粒和MWCNTs放入80 ℃烘箱，干燥4 h，等其降温至室温后，按照一定比例将AC/HDPE，HDPE和Mxene加入到容积为50 mL的哈克密炼机中，在130 ℃进行密炼，得到混合良好的MXene/AC/HDPE共混物。将共混物手动剪碎后称取5 g物料放入模具中，平板硫化机的上层和下层分别升温至210 ℃和190 ℃，然后在5 MPa压力下保压3 min对剪碎的共混物进行压实，再升温至220 ℃保持5 min且保压

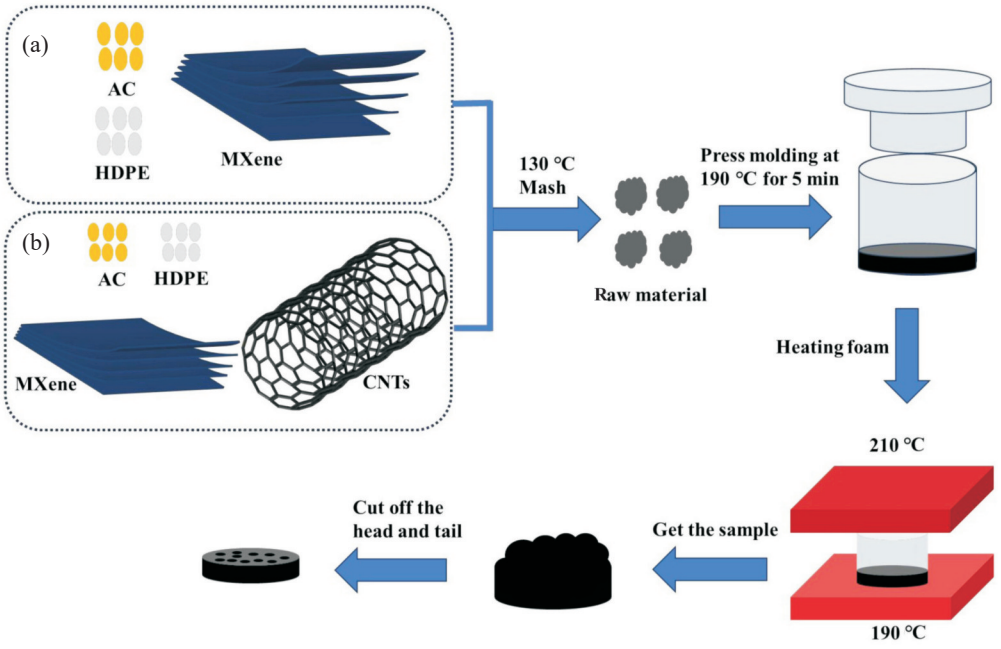


Fig. 1 Schematic diagram for the preparation procedure of (a) MXene/HDPE and (b) MXene/CNT/HDPE foam materials

压力10 MPa，得到具有孔洞结构的MXene/HDPE发泡材料。其中，MXene的质量分数占比分别为0%，1%，2%，3%和4%。

保持MXene质量分数不变的情况下，用CNT为改性材料，制备MXene/CNT/HDPE发泡材料。其制备方法与MXene/HDPE发泡材料基本一致。其中MXene质量分数为2%，CNT的质量分数分别为0%，0.5%，1%和2%。其MXene/HDPE，MXene/CNT/HDPE发泡材料制备流程和试样组分配比分别如Fig.1和Tab.1所示。

1.3 测试与表征

1.3.1 扭矩值测试：为了获取MXene/HDPE，MXene/CNT/HDPE复合材料的熔体黏度，使用哈克流变仪（HAAKE600，德国哈克有限公司）在130 ℃进行共混，此时MXene/HDPE，MXene/CNT/HDPE复合材料未发泡，通过收集随时间变化的扭矩数据来分析该复合体系的黏度变化以及不同填料对黏度的影响。

1.3.2 结晶性分析：取10 mg左右的MXene/HDPE或CNT/MXene/HDPE发泡材料样品进行差示扫描量热仪（DSC，TGA/DSC1，瑞士梅特勒-托利多公司）分析。从20 ℃开始，以50 mL/min的速率通入N_2，升温速率为10 ℃/min，升至160 ℃保温3 min，后以降温速率10 ℃/min降温至−50 ℃，再保温3 min，最后再以升温速率10 ℃/min升温至160 ℃，结束测试，收集数据。

1.3.3 结晶形态分析：取MXene/HDPE发泡材料5组样品和CNT/MXene/HDPE发泡材料4组样品，利用X射线衍射仪（XRD，D/Max-2400，日本电子株式会社）对试样进行晶体形态分析。扫描角度为5°～80°，扫描速率为8 (°)/min。

1.3.4 晶体形貌表征：将各类发泡试样进行取样，裁剪3 mg左右的试样放置于盖玻片上，然后在160 ℃熔融并压制成0.01 mm左右的膜，接着在95 ℃等温结晶，利用偏光显微镜（POM，Axio Scope.A1，德国蔡司有限公司）观察其晶体形貌。

1.3.5 亲水性能测试：利用接触角测量仪（XDES-A，江苏锡德恩斯仪器科技有限公司）测量MXene/HDPE复合材料5组样品和CNT/MXene/HDPE复合材料4组样品的蒸馏水的接触角度。

1.3.6 导热性能测试：将MXene/HDPE样品和CNT/MXene/HDPE发泡材料样品置于80 ℃的烘箱中，加热3 min，然后使用红外摄像机（FLIR-E4，美国菲力尔有限公司）在样品正上方进行拍摄，记录温度变化。

1.3.7 蒸发性能测试：将MXene/HDPE发泡薄片放置在被聚乙二醇（PEG）亲水改性过的聚氨酯（PU）面上，制作成界面蒸发装置，放置在直径为70 mm的表面皿中，分别向表面皿中加入30 mL水和盐水，保持温度恒定的条件下，使用氙灯光源系统（CEL-S500，北京中教金源科技有限公司）为光源模拟太阳光，将表面皿放置在天平上，每3 min记录1次天平示数，共记录20次。而后计算界面蒸发装置的蒸发效率。

2 结果与讨论

2.1 加工性能分析

Fig.2(a~b)为纯HDPE、不同组分比的MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE复合材料发泡前的扭矩图。从图中可以看出，在熔融共混过程中，MXene的

Tab. 1 Formula for the MXene / HDPE and MXene / CNT / HDPE foam materials

No.	HDPE/wt%	AC/wt%	Mxene/wt%	CNT/wt%
HDPE	94	6	0	0
M1C0	93	6	1	0
M2C0	92	6	2	0
M3C0	91	6	3	0
M4C0	90	6	4	0
M2C0.5	91.5	6	2	0.5
M2C1	91	6	2	1
M2C2	90	6	2	2

加入一定程度上降低了MXene/HDPE复合材料的熔体黏度，可能是因为MXene为片层状，在熔融共混时起到了润滑的作用；而CNT的加入使MXene/CNT/HDPE复合材料的熔体黏度稍有增加，这应该归因于CNT的卷曲结构在共混过程中阻碍了HDPE分子链的运动。

2.2 结晶性分析

Fig.3为纯HDPE、不同组分比的MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的熔融和结晶曲线图。从Fig. 3(a, b)可以得出，加入MXene后的发泡材料的熔点稍微降低，并且随着MXene质量分数的增加，发泡材料的熔点呈下降趋势，当MXene质量分数为4%时熔点达到最低。随着MXene质量分数的增加，发泡材料的结晶度越来越低，说明MXene的添

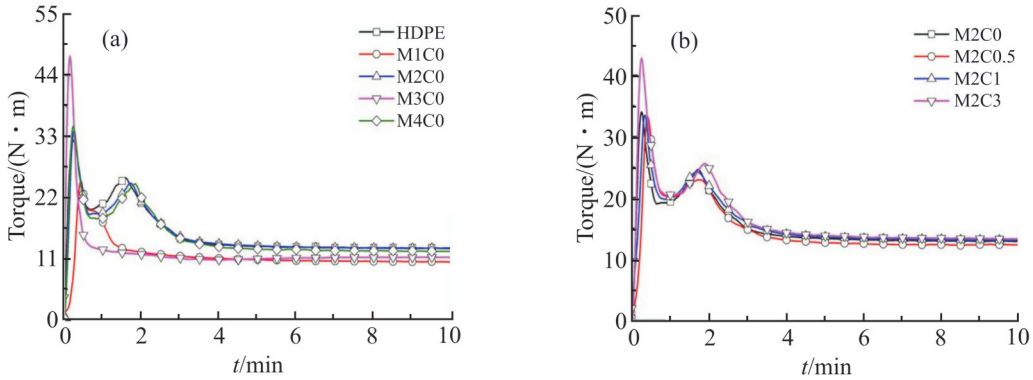


Fig. 2 Torque diagrams of different types of HDPE-based composite materials: (a) MXene/HDPE materials; (b) CNT/MXene/HDPE materials

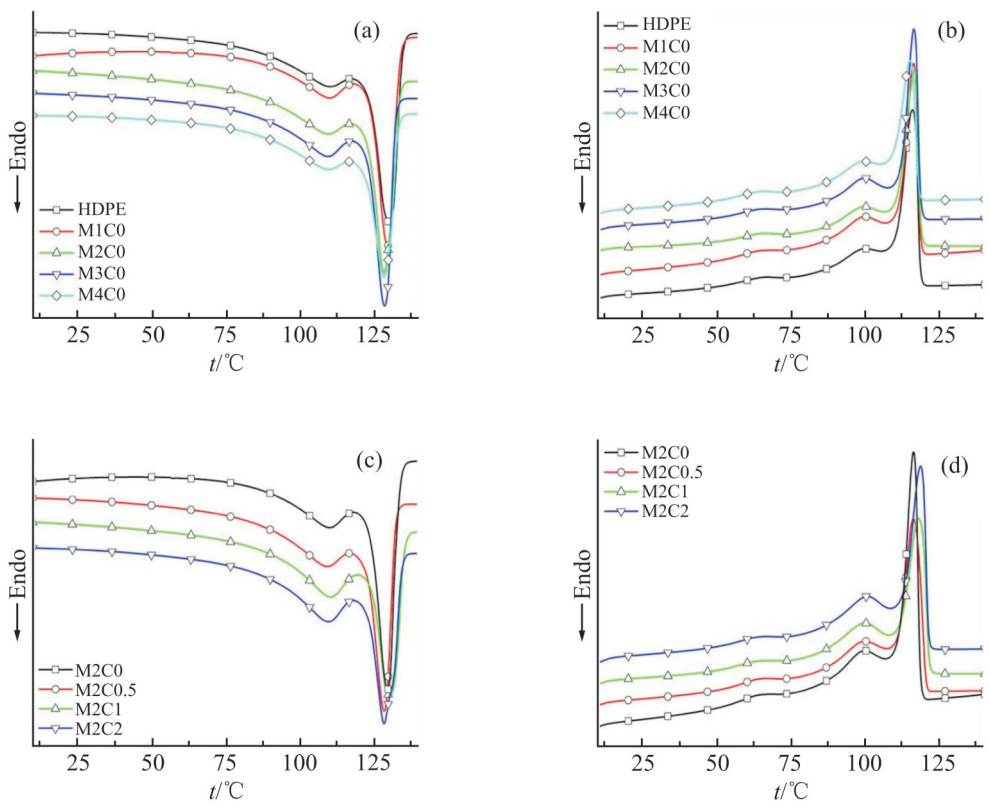


Fig. 3 (a) DSC second melting curves of MXene/HDPE composite, (b) DSC crystallization curves of MXene/HDPE composite, (c) DSC second melting curves of MXene/CNT/HDPE composite and (d) DSC crystallization curves of MXene/CNT/HDPE composite

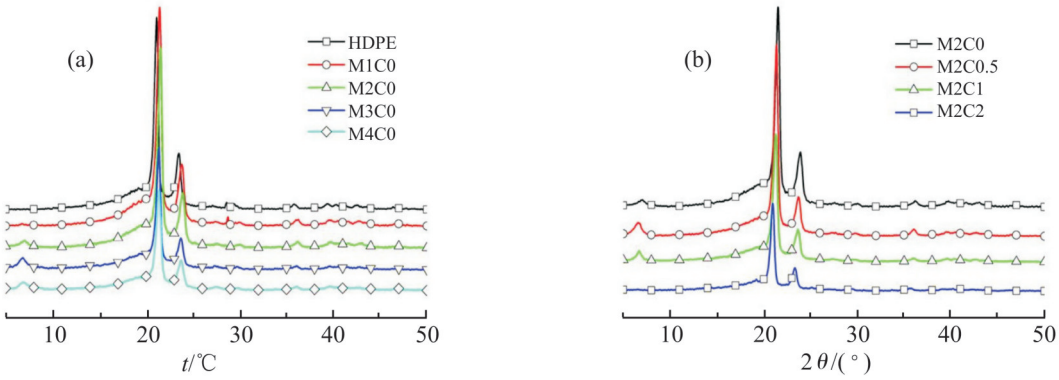


Fig. 4 XRD patterns of (a) MXene/HDPE foam materials and (b) MXene/CNT/HDPE foam materials

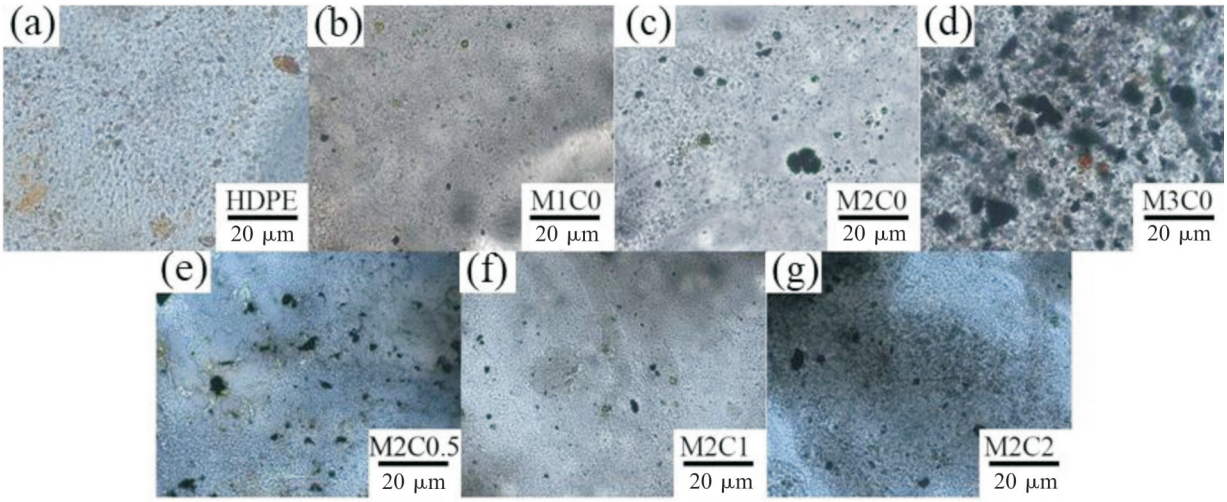


Fig. 5 POM photos of (a) HDPE, (b) M1C0, (c) M2C0, (d) M3C0, (e) M2C0.5, (f) M2C1 and (g) M2C2

加降低了发泡材料的熔点，也降低了发泡材料的结晶度，这是因为MXene在基体中容易发生团聚，阻碍了HDPE分子链的有效规整，导致结晶度和晶体完整度降低，从而降低了材料的熔点。从Fig. 3(c, d)可以得出，少量的CNT可以起到一定的异相成核作用从而细化晶粒，但随着CNT含量的增加，发泡材料的结晶度呈下降趋势，这是因为CNT的加入对HDPE的结晶行为有以下两方面的影响：一是起成核剂的作用提高HDPE的结晶能力；同时CNT的存在又会影响HDPE分子链的运动，阻碍其进入晶格，从而使HDPE的结晶能力降低。这是一对矛盾的影响因素，而结晶度的最终变化是二者竞争的结果[16]。总的来说，MXene和CNT的添加使发泡材料的熔点和结晶度整体均有轻微的下降。

2.3 晶型分析

Fig.4为纯HDPE、不同组分比的MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的XRD测试图。从图中可以看出，MXene/HDPE发泡材料的晶面特征峰出现在2θ=21.5°和2θ=23.8°，对应的是(110)和(200)晶面，证明MXene的加入没有改变HDPE的晶型[17]。在2θ=6.32°处为MXene的特征峰，并且随着MXene质量分数的增加特征峰越明显，也说明MXene很好的结合在基体当中。随着MXene的添加，其对应的特征峰先增强后减弱，当MXene的质量分数为2%的时候，MXene/HDPE发泡材料的晶面特征峰强度提升，但继续增加MXene的质量分数使MXene/HDPE发泡材料的峰强度有所下降。除此之外，随着CNT质量分数的增加，发泡材料的结晶能力在一直减弱，说明CNT的加入能降低发泡材料晶体的完善度。总体而言，MXene和CNT的加入，使得发泡材料的结晶度降低且晶体的完善度有所减弱，这与DSC结果一致。

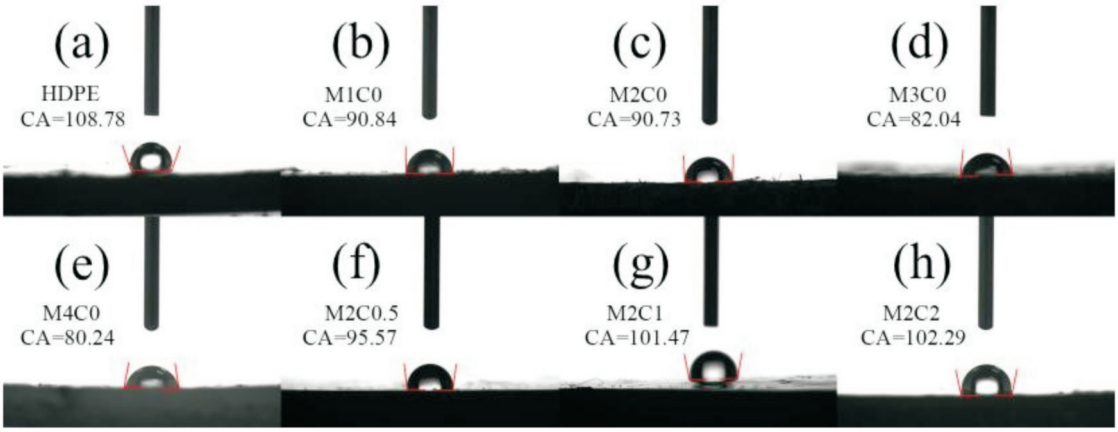


Fig. 6 Water contact angle of pure HDPE, MXene/HDPE and MXene/CNT/HDPE foam materials

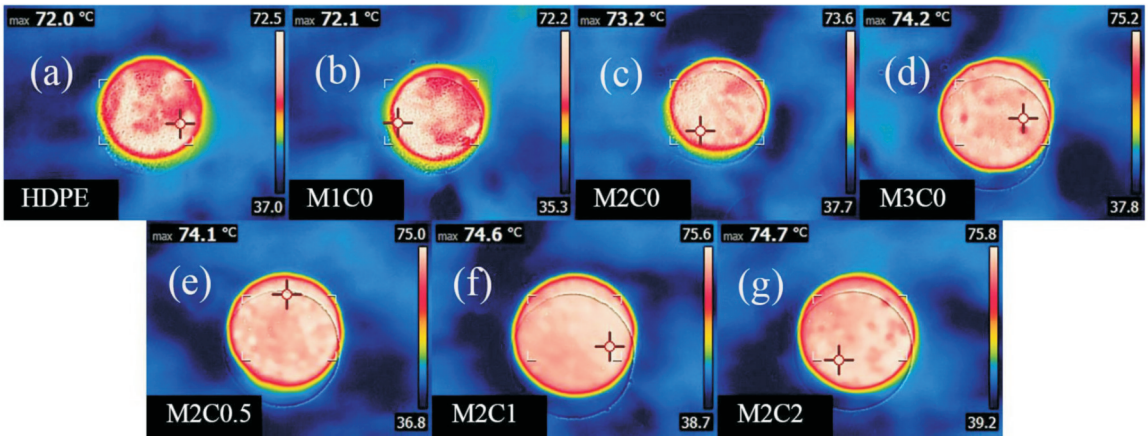


Fig. 7 Thermal conductivity of pure HDPE, MXene/HDPE and MXene/CNT/HDPE foam materials

2.4 晶体形貌分析

Fig.5 为纯 HDPE、不同组分比的 MXene/HDPE 和 MXene/CNT/HDPE 发泡材料的晶体形貌图。Fig. 5(a~d)为不同 MXene 质量分数的 MXene/HDPE 发泡材料的晶体形貌图，从图中可以看到，MXene 的加入没有影响基体材料，并且能够很好地分散到基体当中，但是当 MXene 的质量分数超过 2%时会在基体中发生团聚。Fig.5(e~g)为 MXene 的质量分数（2%）确定的条件下，不同 CNT 质量分数的 MXene/CNT/HDPE 发泡材料的晶体形貌图，从图中可以看到，当 CNT 质量分数在 1%以内时，在基本中呈现出较好的分散形态；当 CNT 的质量分数超过 1%时发生了明显的团聚。

2.5 亲水性分析

Fig.6 为纯 HDPE、不同组分比的 MXene/HDPE 和 MXene/CNT/HDPE 发泡材料的亲水性测试图。Fig. 6(a~e)为不同 MXene 质量分数的 MXene/HDPE 发泡材料的亲水性测试图，从图中可以看出，随着 MXene 质量分数的增加，蒸馏水接触角的度数越来越小，这是因为 MXene 为亲水材料，加入发泡材料中可使该发泡材料的亲水性能变好，也说明 MXene 在 HDPE 基体中有较好的分散[18]。Fig.6(f~h) 为在 MXene 的质量分数（2%）一定时，不同 CNT 质量分数的 MXene/CNT/HDPE 发泡材料的亲水性测试图，从图中可以看出，随着 CNT 质量分数的增加，发泡材料的亲水性越来越差，这是因为 CNT 为疏水性材料，可使发泡材料的亲水性变得越来越差[19]。总之，MXene 的加入使发泡材料的亲水性能越来越好，而 CNT 的加入会使发泡材料的亲水性能越来越差。

2.6 导热性能分析

Fig.7 为纯 HDPE、不同组分比的 MXene/HDPE 和 MXene/CNT/HDPE 发泡材料的导热图。Fig.7

(a~d)为不同MXene质量分数的MXene/HDPE发泡材料的导热性能测试，从图中可以得出，随着MXene质量分数的增加，该发泡材料的导热性能变得越来越好，这是因为MXene具有较好的导热性能，加入后可使发泡材料的导热性整体提升[20]。Fig.7(e~g)为在MXene的质量分数（2%）一定时，不同CNT质量分数的MXene/CNT/HDPE发泡材料的导热性能测试，从图中可以看出，随着CNT质量分数的增加，该发泡材料的导热性能变得更为突出，这是因为CNT具有良好的导热性能，使该发泡材料的导热性能整体增强[21]。总之，MXene和CNT的加入都可以优化HDPE基发泡材料的导热性能。

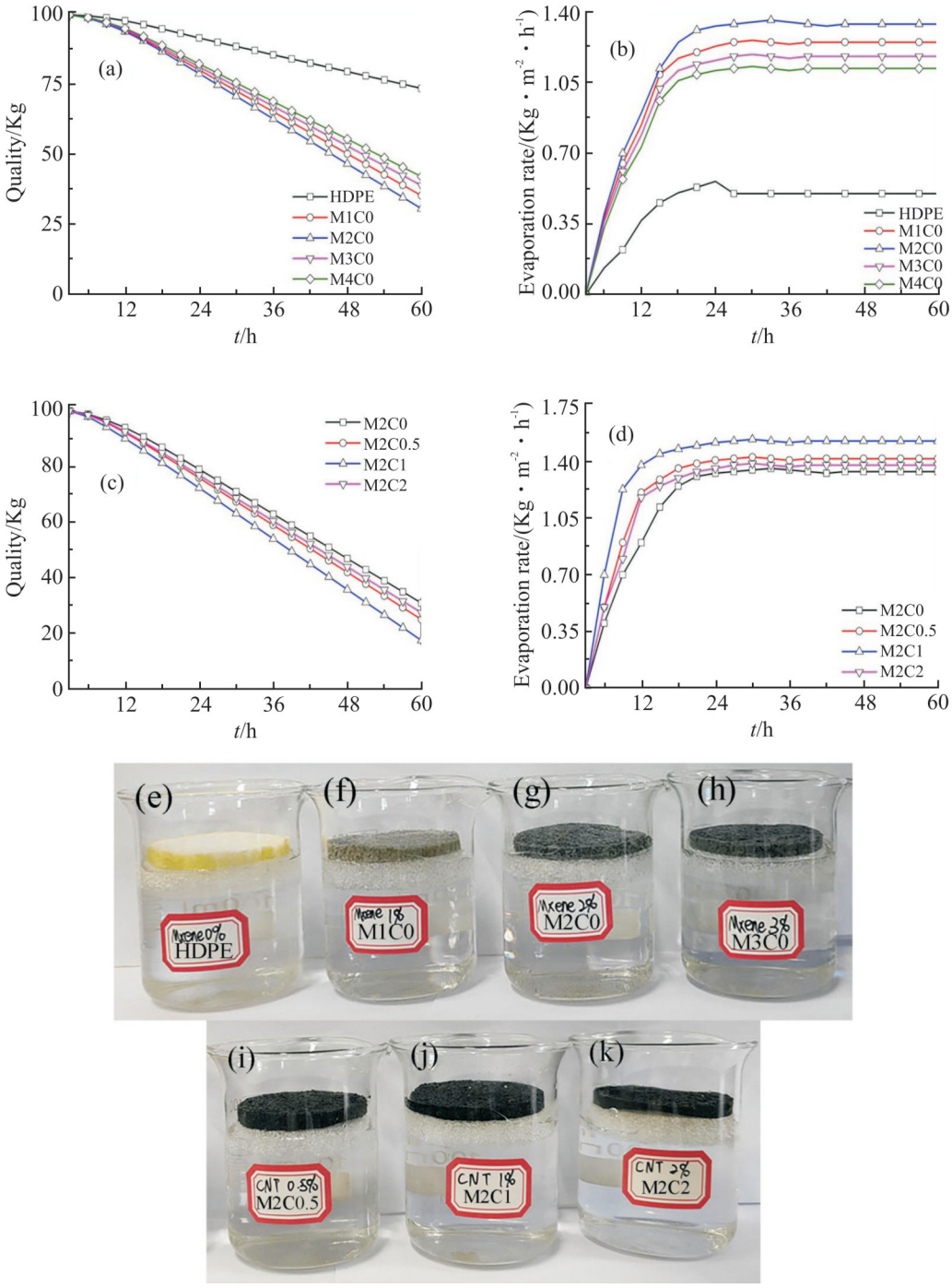


Fig. 8 (a) Quality variation and (b) evaporation rate curves of fresh water evaporation mass of MXene/HDPE foam materials; (c) Quality variation and (d) evaporation rate curves of fresh water evaporation mass of MXene/CNT/HDPE foam materials; (e~k) interfacial evaporators topographies of different component ratios of MXene/HDPE and MXene/CNT/HDPE composites

2.7 蒸发性能分析

Fig.8 为纯 HDPE、不同组分比的 MXene/HDPE 和 MXene/CNT/HDPE 发泡材料在 1.5 kw/m^2 的太阳辐照强度下得到的淡水平均蒸发速率曲线图，Fig.8 (e~k)为不同发泡材料的界面蒸发器件宏观形貌图。从图中可以看到，被 MXene 改性后的发泡材料的淡水蒸发量整体比纯 HDPE 的淡水蒸发量高，并且加入 CNT 后的发泡材料的淡水蒸发量比未加入 CNT 的发泡材料的淡水蒸发量进一步提高。当 MXene 质量分数为 2%时，MXene/HDPE 发泡材料的淡水平均蒸发速率和蒸发效率分别为 1.34 kg/(m^2 · h) 和 48.29%。同时，MXene 质量分数为 2%，CNT 质量分

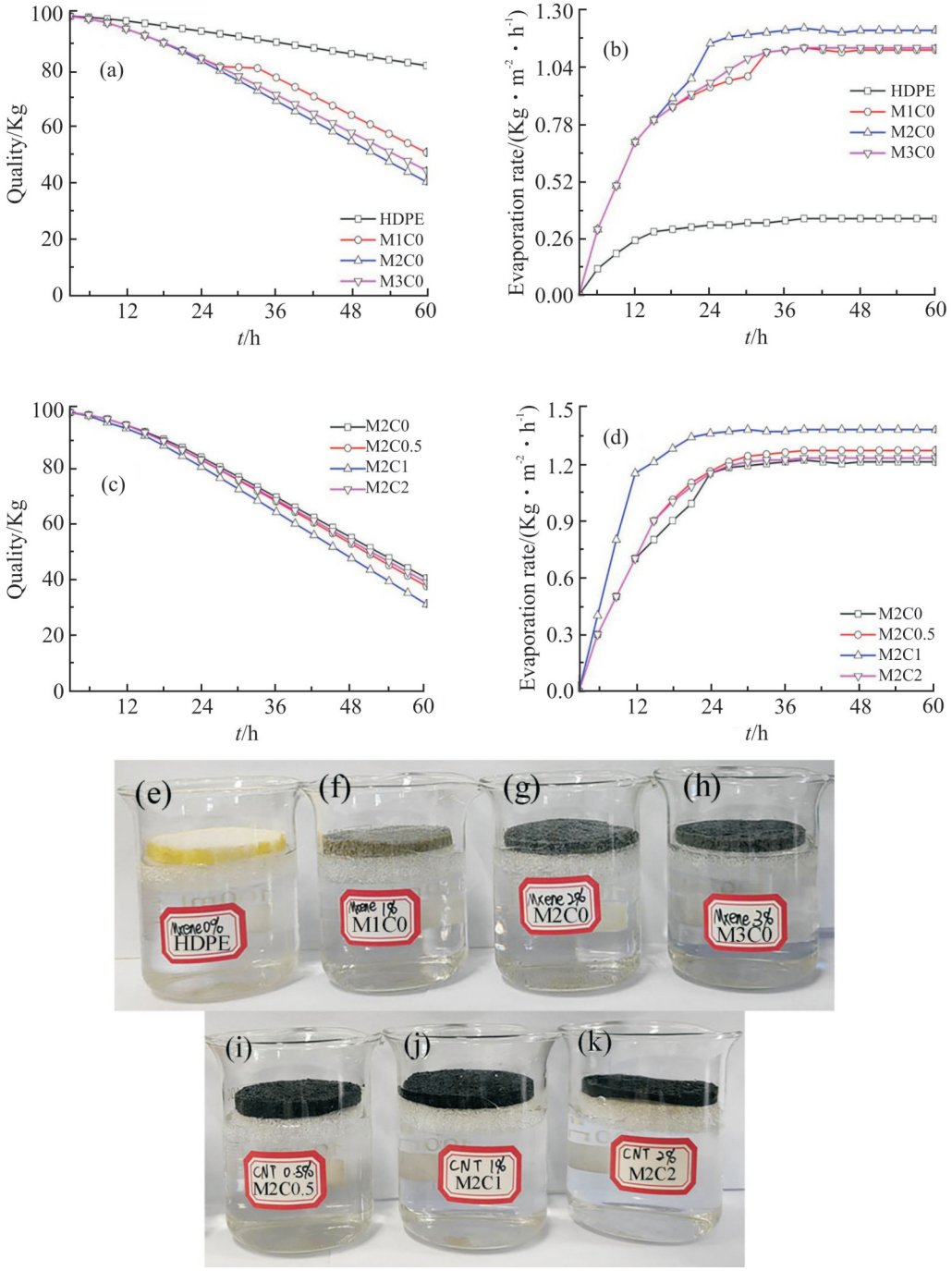


Fig. 9 (a) Quality variation and (b) evaporation rate curves of salt water evaporation mass of MXene/HDPE foam materials; (c) quality variation and (d) evaporation rate curves of salt water evaporation mass of MXene/CNT/HDPE foam materials; (e~k) interfacial evaporators topographies of different component ratios of MXene/HDPE and MXene/CNT/HDPE composites

数为1%的MXene/CNT/HDPE发泡材料的淡水平均蒸发速率和蒸发效率达到最高，分别达到1.53 kg/(m^2 · h)和57.69%。MXene(2%)/HDPE和MXene(2%)/CNT(1%)/HDPE发泡材料的淡水蒸发效率较纯HDPE泡孔材料分别提升了29.97%和39.97%。值得注意的是，由于MXene和CNT的质量分数过高会发生团聚现象，进而影响发泡材料通孔的形成，且CNT的增加会进一步降低发泡材料的亲水性，最终使该发泡材料的淡水平均蒸发速率下降。

Fig.9展示了在1.5 kW/m^{2}光照强度下，纯HDPE、不同组分比的MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的盐水平均蒸发速率曲线图，Fig.9(e~k)为不同发泡材料的界面蒸发器件宏观形貌图。从图中可以得出，不同发泡材料的盐水平均蒸发速率和蒸发量的变化趋势整体与在淡水中相同。当MXene质量分数为2%时，MXene/HDPE发泡材料的盐水平均蒸发速率和蒸发效率达到最高，分别为1.21 kg/(m^2 · h)和41.36%；同时，MXene质量分数为2%，CNT质量分数为1%的MXene/CNT/HDPE发泡材料的盐水平均蒸发速率和蒸发效率分别达到1.38 kg/(m^2 · h)和47.92%。MXene(2%)/HDPE和MXene(2%)/CNT(1%)/HDPE发泡材料的淡水蒸发效率较纯HDPE泡孔材料分别提升了29.04%和35.6%。与淡水蒸发相似，MXene和CNT的质量分数过多会发生团聚现象，阻碍了发泡材料通孔的形成，且CNT的增加会进一步降低发泡材料的亲水性，最终使该发泡材料的盐水蒸发效率下降。

为了分析MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料在淡水中的平均蒸发速率高于在盐水中的现象，Fig.10给出了HDPE基发泡材料的盐水蒸发示意图。由图可知，在太阳光照下，界面蒸发器迅速升温，形成了明显的上下界面的温度差，同时，亲水层不断吸收淡水或盐水，在温度差的驱动下，水分子不断蒸发。然而，随着水分子不断蒸发，盐水中的Na^+和Cl^-也不断的富集在亲水层和蒸发层的界面处，蒸发层进一步将水分蒸发掉后，而未能蒸发的Na^+和Cl^-会在亲水层和蒸发层的界面形成氯化钠晶体隔膜，该隔膜阻止了水分子的快速逃逸，故盐水的蒸发速率有所下降。

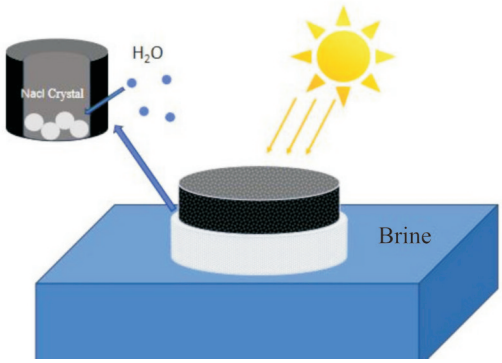


Fig. 10 Evaporation mechanism of evaporation rate of salt water of HDPE-based microporous composites

除此之外，发泡材料的结晶性能也会影响其在发泡时孔洞的形成，因为晶体形成的大小和均匀度会阻碍或者放任孔洞的生长，所以一定的结晶度和分布均一的晶体可使发泡材料的孔洞尺寸均一且更易形成通孔，进而满足蒸发要求。当MXene与CNT的质量分数分别超过2%和1%时，会在发泡材料基体当中团聚，团聚会带来两方面的问题，一是整体熔体黏度分布不均，二是降低复合材料的整体结晶度，在熔体黏度分布不均和结晶度下降的共同作用下导致泡孔生长过大并且不均匀，最终导致淡水和盐水的蒸发效率下降。

3 结论

本文利用熔融共混和温度梯度模压工艺制备了HDPE基发泡材料，为耐酸碱、耐盐性聚合物基界面蒸发器件的开发，特别是采用无溶剂法，借助温度梯度形成泡孔界面蒸发器件提供了理论和实验支撑。

（1）通过测试结晶性能可知，MXene和CNT均匀分散在HDPE基体当中，MXene和CNT加入均会使HDPE发泡材料的结晶度略有下降；当MXene和CNT的质量分数分别超过2%和1%时，填料在HDPE基体中发生团聚，从而影响通孔形成。

（2）通过接触角和导热分析得出，随着MXene质量分数的增加，其发泡材料的亲水性得到改善，这印证了MXene富含亲水基团；导热性能随着MXene和CNT含量的增加而提升，进一步说明MXene和CNT均具有较好的导热和光热转化能力。

（3）MXene/HDPE和MXene/CNT/HDPE发泡材料的蒸发速率测试得知，随着MXene和CNT含量的增加，淡水和盐水的蒸发速率都会上升。当MXene

和CNT质量分数分别为2%和1%时，MXene/CNT/HDPE发泡材料的淡水和盐水蒸发速率达到最高，分别为1.53 kg/(m^2·h)和1.38 kg/(m^2·h)，较纯HDPE泡孔材料的蒸发速率提升了39.97%和35.60%。

参考文献：

[1] 马赛男, 闫卿, 汪倩倩, 等. 生物基材料应用于界面光热水蒸发系统的研究进展[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 30-41.
Ma S N, Yan Q, Wang Q Q, *et al.* Research progress on bio-based materials applied to interfacial photo-thermal water evaporation systems[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(2): 30-41.

[2] Tramsek M, Zemva B, Synthesis, properties and chemistry of Xenon(II) fluoride[J]. Journal of Molecular Structure, 2007, 38: 105-116.

[3] Mu P, Zhang Z, Bai W, *et al.* Superwetting monolithic hollow-carbon- nanotubes aerogels with hierarchically nanoporous structure for efficient solar steam generation[J]. Energy Materials, 2019, 9: 1802158.

[4] Zhu L L, Gao M M, Peh C K N, *et al*. Self-contained monolithic carbon sponges for solar- driven interfacial water evaporation distillation and electricity generation[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8: 1702149.

[5] 牟晓彤. MXene复合材料的制备及光热转换性能研究[D]. 银川: 西北民族大学, 2023.
Mou X T. Preparation of MXene composites and study of photothermal conversion performance[D]. Yinchaun: Northwest University for Nationalities, 2023.

[6] Ghidiu M, Lukatskaya M R, Zhao M Q, *et al*. Conductive two-dimensional titanium carbide clay with high volumetric capacitance[J]. Nature, 2014, 516: 78-81.

[7] Zheng Z H, Liu H, Wu D Z. Polyimide/MXene hybrid aerogel-based phase- change composites for solar- driven seawater desalination[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 440: 135862.

[8] Zhao J Q, Yang Y W, Yang C H, *et al*. A hydrophobic surface enabled salt- blocking 2D Ti_3C_2 MXene membrane for efficient and stable solar desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6: 16196-16204.

[9] Zha X J, Zhao X, Pu J H, *et al.* Flexible anti-biofouling MXene/cellulose fibrous membrane for sustainable solar driven water purification[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 36589-36597.

[10] 张蕾, 杜红英, 冯文浩, 等. 基于二维光热材料的界面太阳能光热蒸发系统优化[J/OL]. 化工进展, 2023. https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1092.
Zhang L, Du H Y, Feng W H, *et al.* Optimisation of interfacial solar photovoltaic evaporation system based on two-dimensional photothermal materials[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023. https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1092.

[11] 杨地, 史潇凡, 张冀杰, 等. 光热材料在海水淡化领域的近期研究进展与展望[J]. 化学学报, 2023, 81(8): 1052-1063.
Yang D, Shi X F, Zhang Y J, *et al.* Recent research progress and prospects of photothermal materials in seawater desalination[J]. Acta Chimica Sinica, 2023, 81(8): 1052-1063.

[12] Ghafurian M M, Niazmand H, Dastjerd T F, *et al*. A study on the potential of carbon- based nanomaterials for enhancement of evaporation and water production[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 207: 79-90.

[13] Miao E, Ye M, Guo C, *et al*. Enhanced solar steam generation using carbon nanotube membrane distillation device with heat localization[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 149: 1255-1264.

[14] 李吉焱, 刘美辰, 罗雯雯, 等. 仿生太阳能驱动界面蒸发器的进展与挑战[J]. 精细化工, 2024, 41(4): 740-749.
Li J Y, Liu M C, Luo W W, *et al*. Advances and challenges in biomimetic solar driven interface evaporators[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(4): 740-749.

[15] Liu Y R, Xu Y F. Research progress of polymers with high thermal conductivity[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71: 023601.

[16] 谭妍妍, 谢锦辉, 薛禹, 等. 抗氧化剂对硫酸钙晶须/高密度聚乙烯复合材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(5): 68-76.
Tan Y Y, Xie J H, Xue Y, *et al.* Effect of antioxidants on the properties of calcium sulphate whisker/high density polyethylene composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(5): 68-76.

[17] 李姝姝, 程鹏飞, 刘小燕, 等. HDPE增韧改性PP及增韧机理研究[J]. 塑料工业, 2023, 51(1): 54-60.
Li S S, Cheng P F, Liu X Y, *et al*. HDPE toughened modified PP and toughening mechanism research[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(1): 54-60.

[18] Qiao J Y, Kong L Q, Xu S K, *et al.* Research progress of MXene-based catalysts for electrochemical water-splitting and metal-air batteries[J]. Energy Storage Materials, 2021, 43: 509-530.

[19] 王钰婷. 碳纳米管表面改性超疏水膜强化膜蒸馏性能的研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Wang Y T. Study and application of carbon nanotube surface-modified superhydrophobic membrane for enhanced membrane distillation performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[20] Wang L Y, Li X, Qian Y X, *et al*. MXene- layered double

hydroxide reinforced epoxy nanocomposite with enhanced electromagnetic wave absorption, thermal conductivity, and flame retardancy in electronic packaging[J]. Small, 2023, 9: e2304311.

[21] Bin C, Jiawei G, Wei H, *et al*. Design of a ternary synergistic network of HDPE/BN/CNT composites with an aligned shish-kebab structure for enhanced thermal conductivity and tensile strength[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 473: 145327.

Crystallization and Interface Evaporation Properties of HDPE Modified by MXene and MWCNTs

Jun Zhang, Shikui Jia, Yan Zhu, Yaoyao Zhang, Ruize Wang, Zongying Yan, Lei Wu

(*School of Materials Science and Engineering, National & Local Joint Engineering Laboratory for Slag Comprehensive Utilization and Environmental Technology, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China*)

ABSTRACT: A series of MXene/HDPE and MXene/CNT/HDPE foams were prepared using high- density polyethylene (HDPE) as matrix and MXene and carbon nanotube (CNT) as modified fillers by regulating the decomposition temperature of azodicarbonamide (AC) though melt blending and gradient temperature moulding method. The effects of melt viscosity on the crystallization and cell growth of modified HDPE foams were investigated by Haker rheometer, X- ray diffractometer (XRD), differential scanning calorimeter (DSC) and polarizing microscope (POM). The thermal conductivity, hydrophilic energy and the interface evaporation rate of fresh water and/or salt water of modified HDPE foam materials were tested by infrared thermometer, contact angle tester and xenon lamp evaporation meter to explore the effect of filler on the photothermal characteristics of HDPE foams. The results show that MXene decreases the melt viscosity of the HDPE-based foam materials, while CNT increases the melt viscosity of the materials; MXene and CNT do not have a significant effect on the crystal morphology of HDPE, but reduce the crystallinity of HDPE-based foam materials to a certain extent; however, both MXene and CNT could improve the thermal conductivity of the foams, and MXene improves the hydrophilicity of the foams. At the solar irradiation intensity of 1.5 kW/m^2, when the mass fraction of MXene is 2%, the average evaporation rate of fresh water and/or salt water for MXene/HDPE foam material is 1.34 kg/(m^2 · h) and 1.21 kg/(m^2 · h), respectively, and the increase of pure HDPE cell material is 29.97% and 29.04%. The average evaporation rate of fresh water and brine of the HDPE foam is 1.53 kg/(m^2 · h) and 1.38 kg/(m^2 · h), respectively, which are 39.97% and 35.60% higher than those of pure HDPE foam material.

Keywords: MXene; carbon nanotube; HDPE; melting blend; interfacial evaporation