http://pmse.scu.edu.cn

# 多重交联网络 MXene/纳米纤维素气凝胶与双驱动加热应用

宋秀萍[1], 闫彪彪[2], 翟志腾[1], 许 波[1], 王 平[1]

(1. 江南大学 纺织科学与工程学院,江苏 无锡 214122; 2. 绍兴文理学院 纺织科学与工程学院,浙江 绍兴 312000)

**摘要:**二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)基气凝胶材料具有密度小和质量轻的特性,但由于 MXene 纳米片存在层状堆叠结构,导致单组分 MXene 气凝胶抗压能力差。文中提出了一种基于乙二醇二缩水甘油醚(EGDE)多重交联制备 MXene 基复合气凝胶的方法,通过氢键和共价键实现了纳米纤维素(CNF)与 MXene 层间互穿交联,构建了具有良好抗压能力和形变恢复能力的双组分气凝胶;探究了不同 MXene/CNF 质量比(7∶3,5∶5 和 3∶7)对气凝胶性能的影响,并结合甲基三氯硅烷原位气相沉积进行疏水化处理。结果表明,当 MXene 与 CNF 质量比为 7∶3 时,气凝胶力学性能最好,弹性损耗系数为 0.73,电阻为 74 Ω/cm,气凝胶具备优良的结构稳定性和较好的疏水性能;MXene 优异的导电性和光热转换特性赋予复合气凝胶较好的抗菌性、光热和电热双驱动加热功能,在服装填料等功能性材料领域有潜在应用前景。

**关键词:**MXene;纳米纤维素;气凝胶;互穿交联;抗菌;双驱动加热

**中图分类号:**TQ427.2$^{+}$6 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7555(2025)10-0048-10

气凝胶作为一种低密度、多孔隙和高比表面积的新型材料,在保温隔热、环境净化、生物医药等多领域具有广泛的应用[1~3]。迄今为止,已有多种类型的气凝胶被广泛研究,包括纳米纤维素基[4]、聚酰亚胺等有机气凝胶[5]、二氧化硅等无机气凝胶[6]和石墨烯等碳基气凝胶[7]。新型二维材料二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)因其出色的性能发展迅速,其独特的层状结构使其具有比表面积大、亲水性和导电性优异等特点[8],在储能和协同催化等领域得到了广泛的应用[9~11]。另一方面,由于 MXene 片层结构纳米化和强范德华力相互作用,在使用过程中易团聚和重新堆叠,限制了纯 MXene 气凝胶的形成[12, 13]。王宁宁等[14]利用聚酰亚胺(PI)链和 MXene 纳米片间的强相互作用,制备了多孔和高疏水性一体化的 PI/MXene 复合气凝胶,具有较好的应用性能。基于此,将 MXene 与生物基聚合物复合构建气凝胶,拓展其应用性能及服役领域具有积极意义。

纳米纤维素具有高结晶度、大长径比和优异的力学性能,兼备良好的生物降解性[15]。目前已有将纤维素与 MXene 复合的相关研究,Cheng 等[16]通过将 MXene 与羧甲基纤维素(CMC)混合进行冷冻干燥,制备了 MXene/CMC 气凝胶,MXene 纳米片充当导电途径,CMC 用作交联,构建了多孔 3D 网络结构。然而 MXene 与纤维素之间仅靠氢键和范德华力连接,使得气凝胶的稳定性较低,孔隙易坍陷,不利于实际应用。为解决此问题,本文考虑以纳米纤维素作为“水泥”,以 MXene 作为“砖块”,加入乙二醇二缩水甘油醚(EGDE)进行共价交联,构建稳定轻便的复合气凝胶材料,旨在形成稳定相连的结构,提升复合材料的强度和应用性能。为实现上述设想,拟通过纳米纤维素穿插入到 MXene 片层间,解决 MXene 纳米片间易相互堆叠的问题,通过 EGDE 开环进行共价偶联,从而获得具有多重交联网络架

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0196
收稿日期: 2025-01-19
基金项目: 江苏省六大人才高峰高层次人才(XCL-133); 国家自然科学基金资助项目(22508256)
通讯联系人: 王平, 主要从事纺织品生态加工技术研究, E-mail: pwang@jiangnan.edu.cn

构和良好强度的气凝胶(Fig.1(b));在此基础上,结合甲基三氯硅烷(MTS)气相沉积,赋予气凝胶疏水性。通过上述操作,赋予复合气凝胶优异的力学性能、光热和电热双驱动加热特性,同时兼备抗菌效果,可用作服装填料 MXene 基气凝胶,满足寒冷场景下的温度管理需求。

## 1　实验部分

### 1.1　试剂与仪器

纳米纤维素:直径(60±20)nm,长度(40±10)μm,天津木精灵生物科技有限公司;$Ti_3AlC_2$ MAX:98%,400 目,吉林一一科技有限公司;氟化锂、盐酸、无水碳酸钠:国药集团化学试剂有限公司;乙二醇二缩水甘油醚:≥97%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;甲基三氯硅烷(MTS):97%,上海泰坦科技股份有限公司。

X 射线衍射仪(XRD):D2 PHASER,Bruker;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR):Nicolet IS10,美国 Thermo Scientific 公司;扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS):SU1510,Hitachi Co;小型拉力试验机:PT-1198GTD-C,广东宝大宣力科技有限公司;数字万用表:DMM4040,美国 TEKTRONIX 公司;模拟日光氙灯:CEL-S500,北京中交金源科技有限公司;热电偶温度计:AS887,深圳喜马有限公司;红外热成像仪:Tis55,Fluke;紫外-可见-近红外光谱仪:Lambda 950,美国 Perkin Elmer 公司。

### 1.2　制备过程

**1.2.1**　MXene 纳米片的制备:将 9 g LiF 加入 180 mL(9 mol/L)盐酸的聚四氟乙烯烧杯中,搅拌 30 min 后缓慢加入 9 g $Ti_3AlC_2$ MAX,在 35 ℃反应 36 h,刻蚀 MAX 相中的 Al 层。反应结束后,将产物转移至离心管中,用去离子水反复离心清洗,直至 pH 达到 6,在离心管中重新加水分散,在低温(4 ℃)条件下进行超声处理得到深绿色的 MXene 悬浮分散液,冻干可得 MXene 纳米片。

**1.2.2**　M-g-C-PMTS 气凝胶的制备:制备路线如 Fig. 1(a)所示。在持续搅拌条件下,将质量分数 2.5% 的 MXene 悬浮液按不同质量比($m$(MXene):$m$(CNF)=7∶3,5∶5,3∶7)加入到质量分数 1.5% 的 CNF 悬浮液中,分别标记为 M-g-C30%,M-g-C50% 和 M-g-C70%。随后,按每 100 g 混合溶液对应 5 mmol 的比例加入交联剂 EGDE,在 pH 10,60 ℃条件下反应 3 h。反应完成后,通过-36 ℃冷冻干燥 48 h 获得 M-g-C 气凝胶(M 和 C 分别代表 MXene 和 CNF)。如 Fig.1(c)所示,采用气相沉积法利用聚甲基三氯硅烷(PMTS)的高挥发性使质量分数 30% 的 PMTS 沉积到 M-g-C 气凝胶表面,在 60 ℃固化 30 min 后获得疏水性 M-g-C-PMTS 气凝胶[16]。

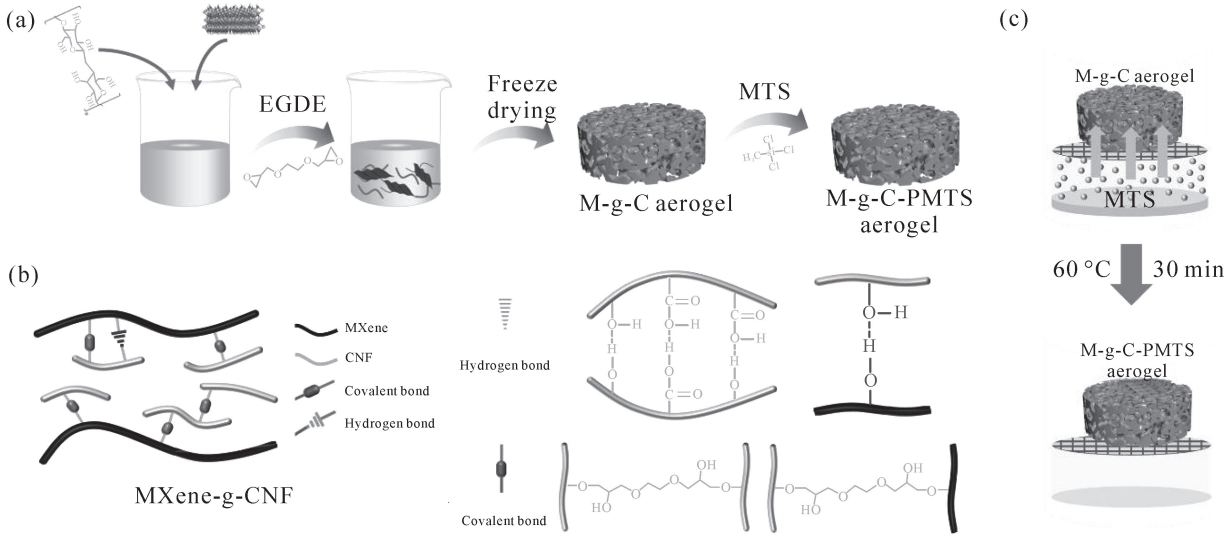



**Fig. 1　(a) Schematic diagram of the preparation of composite aerogel; (b) reaction mechanism of EGDE-bridged cross-linking between MXene and nanocellulose; (c) chemical vapor deposition of PMTS**

### 1.3 测试与表征

**1.3.1** FT-IR 分析:采用傅里叶变换红外光谱仪对气凝胶样品进行全反射光谱扫描。分辨率为 0.5 $cm^{-1}$,扫描次数 32 次,扫描范围 500~4000 $cm^{-1}$。

**1.3.2** SEM 及 EDS 表征:将气凝胶样品固定在导电胶上进行 1 min 喷金处理,使用扫描电子显微镜观察样品形貌,以配套的能量色散光谱仪获得样品的表面元素含量和分布图像。

**1.3.3** XRD 表征:将气凝胶样品放在样品池中心处,以 5(°)/min 的扫描速度,在 4°~70°范围内进行扫描。

**1.3.4** 力学性能测试:采用小型拉压力试验机对气凝胶压缩性能进行测试。将样品裁成 20 mm×20 mm 的圆柱体,压缩速度为 10 mm/min,释放速度为 10 mm/min,测试过程中绘制应力-应变曲线,应力-应变曲线中形变在前 5% 之间的曲线斜率为压缩模量。定义上行曲线和坐标轴 ($X=0, Y=0$) 围成的面积为总压缩能,上行和下行曲线所围成的面积为损耗能,损耗能与总压缩能的比值为损耗系数。

**1.3.5** 电阻测试:将样品裁成 30 mm×30 mm 的正方形,选取宽度 10 mm 的位置接入数字万用表的正负极,测试电阻值,每个样品测试 5 个位置,取平均值。

**1.3.6** 密度测定:气凝胶密度($\rho$)用式(1)计算

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1}$$

式中:$m$——气凝胶质量,g;$V$——气凝胶体积,mL。

**1.3.7** 光热及焦耳加热性能测试:使用紫外-可见光-近红外光谱仪测试气凝胶样品在 200~2500 nm 波段的反射率和透射率,计算平均光谱吸收率;使用模拟日光氙灯对样品进行照射,控制光源到样品间距离来调节辐照强度,评价样品光热效果;在外接电场下,采用热电偶温度计测定气凝胶的实时温度,并借助红外热成像仪捕获样品温度信息。

**1.3.8** 抗菌性能试验:采用改进的 AATCC 100-2004 标准评价气凝胶样品在光照和暗处对大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抗菌效果[17]。抑菌率($R$)按式(2)计算

$$R=(A_0-A)/A_0 \tag{2}$$

式中:$A_0$ 和 $A$——分别表示空白样品和试验样本上的细菌菌落数。

**1.3.9** 抗细菌黏附性能试验:采用细菌生物黏附实验表征疏水性气凝胶样品对细菌生物黏附的抑制效果。将气凝胶分别在高浓度的 *E. coli* 和 *S. aureus* 菌液中浸泡 10 min,30 min,60 min 和 120 min,随后取出样品置于 PBS 溶液中超声漂洗 5 min,使黏附在样品表面的细菌脱落,用 PBS 连续稀释 1000 倍后取 25 μL 滴在琼脂板上,37 ℃孵育 24 h。抗黏附率($X$)按式(3)计算

$$X=(A_0-\mathrm{A})/A_0 \tag{3}$$

式中:$A_0$ 和 $A$——分别表示空白样品和试验样本上的细菌菌落数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气凝胶结构与形貌分析

纳米纤维素和 MXene 表面含较多反应位点,测定 EGDE 交联后样品的化学结构组成。Fig.2(a)中,EGDE 和简单共混的 CNF/EGDE 在 904 $cm^{-1}$ 和 842 $cm^{-1}$ 处出现了环氧基团的特征峰;经 60 ℃交联的 CNF-g-CNF 和 MXene-g-CNF 的谱图中该特征峰消失,表明 EGDE 与 MXene 和 CNF 发生了共价偶联。为赋予气凝胶疏水性,采用气相沉积法将 PMTS 沉积在气凝胶表面。一方面 MTS 与气凝胶表面—OH 反应形成 Si—O—C;同时 MTS 发生水解生成硅醇,再与气凝胶反应形成 Si—O—C[18]。Fig.2(b)中 MTS 在 1277 $cm^{-1}$ 和 788 $cm^{-1}$ 处的特征峰分别来源于 Si—$CH_3$ 和 Si—O—Si;样品沉积 MTS 后在 1078 $cm^{-1}$ 处出现了 Si—O—C 的特征峰,说明 MTS 中的 Si—$CH_3$ 已成功与气凝胶样品中的—OH 发生共价键合。

XRD 谱图(Fig.2(c))中 MXene 对应(002)晶面特征峰向小角度移动,随着纳米纤维素比例的增加,其偏移量变大。根据布拉格方程可得出,几种样品对应晶面的间距($d$)分别为 1.335 nm,1.360 nm 和 1.364 nm,均大于原始 MXene 的 1.209 nm,表明 MXene 纳米片的晶面间距变大,可有效缓解 MXene 的自堆积。考察 EGDE 交联和 MTS 沉积对气凝胶

微观结构的影响,结果如 Fig.3 所示,EGDE 交联后的样品 M-g-C 具有更均匀的孔隙结构,且样品 EDS 谱图中出现 Si 特征峰,表明 PMTS 成功沉积到气凝胶的孔隙中。

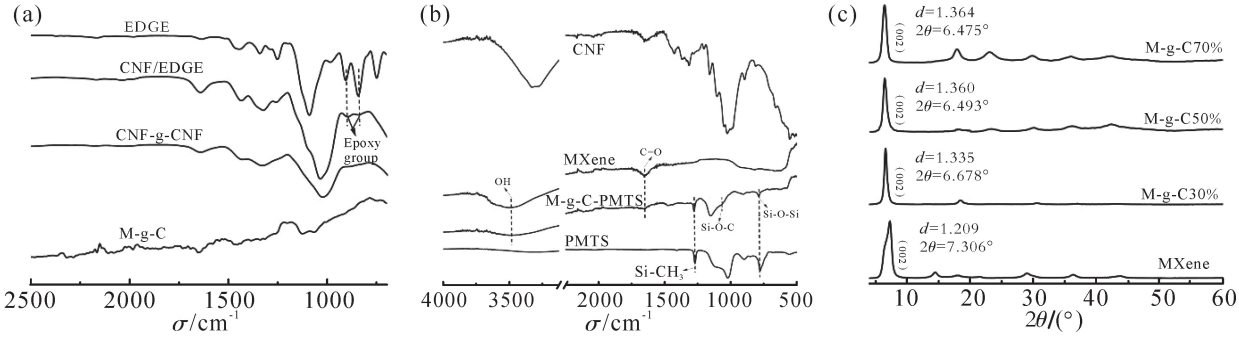



**Fig. 2　(a, b) FT-IR spectra of different samples; (c) XRD patterns of aerogels with different cellulose contents**

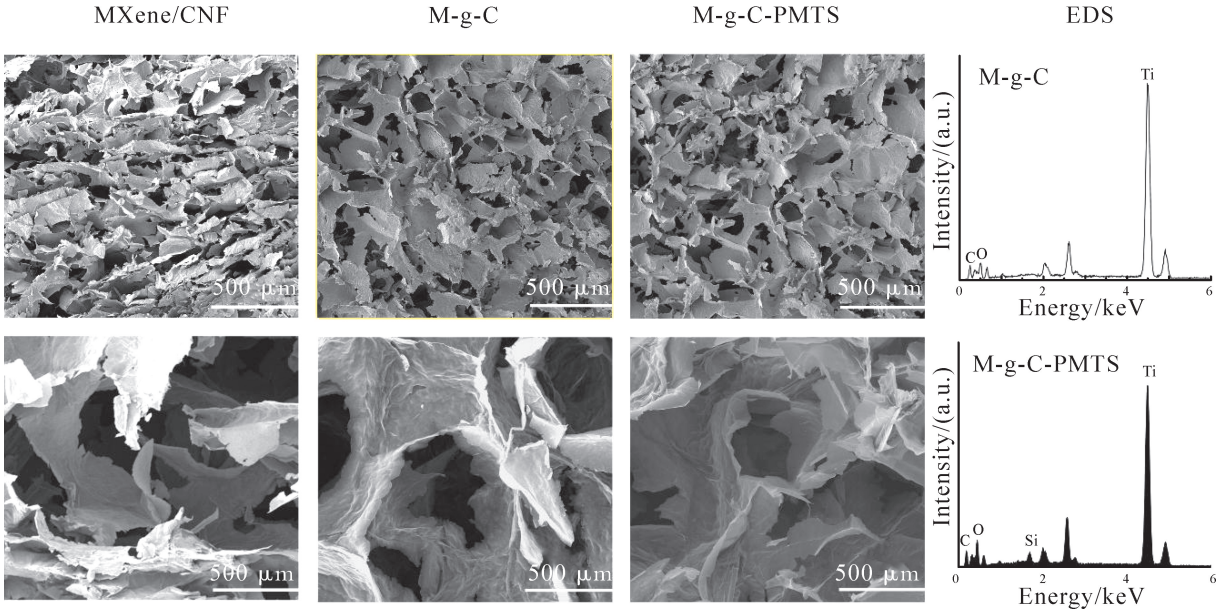



**Fig. 3　SEM images of MXene/CNF, M-g-C, M-g-C-PMTS aerogels and the corresponding EDS**

## 2.2　气凝胶力学性能和电阻性能分析

Fig.4(a~c) 中显示了不同样品的力学性能。样品应力-应变曲线可分 3 阶段[19],第一阶段,应力线性增加,气凝胶发生了弹性形变;第二阶段中,应力增加速度变缓,气凝胶孔隙发生塌陷和变形;第三阶段,气凝胶形变过大导致孔隙变紧密,使应力急剧增加。复合气凝胶最大应力、压缩模量与纳米纤维素含量成正比,而损耗能成反比,其原因与纳米纤维素插入 MXene 层间使复合气凝胶强度提升相关,当纳米纤维素含量为 30% 时,气凝胶拥有最小的损耗系数 0.73,模量和最大应力分别为 9.83 kPa 和 7.38 kPa。Fig.4(d) 显示,经 PMTS 沉积的样品压缩性能有所提升,最大应力提升至 9.17 kPa,气凝胶结构稳定性改善,进行 20 次循环压缩后,弹性回复率仍能保持 56.7% (Fig.4(e))。复合气凝胶电阻是决定其焦耳加热性能的一项重要指标,Fig.4(f) 中可以看出,MXene 含量与样品电阻成反比,且 PMTS 沉积后样品电阻几乎不变。

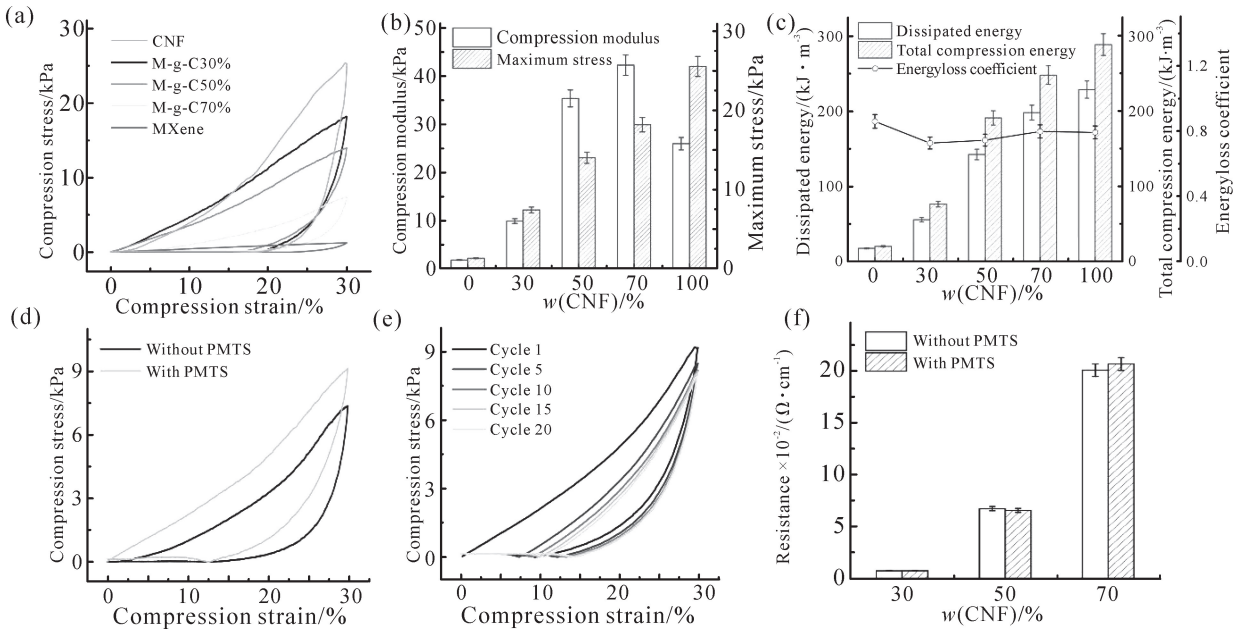



**Fig. 4 （a）Compressive stress-strain curves of different aerogels at the strain of 30%；（b）compressive modulus and maximum stress；（c）dissipated energy，total compression energy and energy loss coefficient；（d）stress-strain curves，（e）compressive stress-strain curves of M-g-C30%-PMTS at the strain of 30%；（f）resistance aerogel samples based on different contents of CNF**

## 2.3 气凝胶材料光热性能分析

借助紫外-可见光-近红外光谱仪（UV-VIS-NIR）测试样品反射率与透射率，计算可见光波段的吸收率。由 Fig.5 可知，所有复合气凝胶样品在 UV-NIR 波段范围内均表现出低透过率与高吸收率，但在 NIR 波段并未表现出良好的吸收率，主要归因于较厚重的气凝胶材料对光线产生镜面反射，使样品在该波段的反射率升高。样品在可见光波段（400～780 nm）具有较高的吸收率，证明 MXene/纳米纤维素复合气凝胶在光热转换方面具备出色潜力。

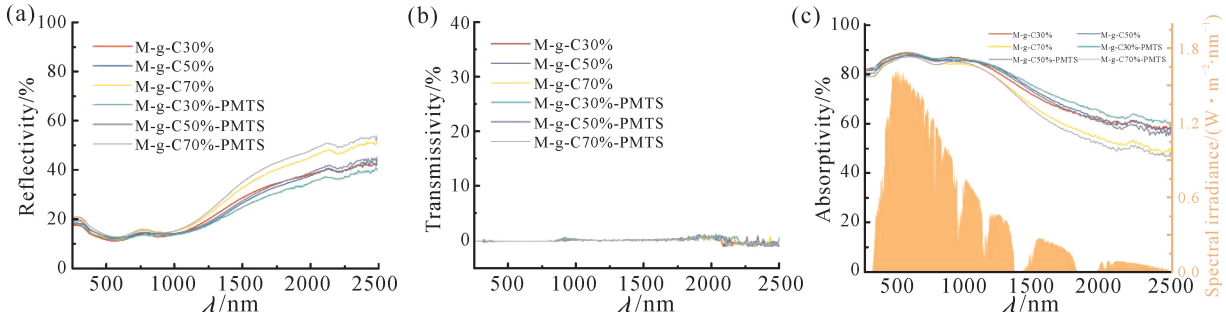



**Fig. 5 （a）Reflectance，（b）transmittance and（c）absorbance curves of the sample in the UV-Vis-NIR bands**

Fig.6(a)显示了 MXene 光热机理。MXene 独特层状结构对太阳光具备良好的吸收能力，太阳光入射后，小部分被反射，绝大部分进入层间被吸收，将太阳能转化为热能，完成光热转换[20]。Fig.6（b）展示了不同 MXene 含量的气凝胶样品在氙灯照射下的时间-温度曲线，在 2×Sun 光照条件下，气凝胶能在 4 min 内达到饱和温度并维持稳定，随着气凝胶中 MXene 含量的增加，样品的饱和温度逐渐升高，后续光热测试均选用 M-g-C30%-PMTS 样品。Fig.6（c，d）则显示了气凝胶表面和中部的升温曲线和温度变化率。在模拟太阳光的照射下，样品表面温度在 3 min 内急剧升高到 57 ℃，随着时间延长，温度缓慢升高到 59 ℃左右，最后归于平衡，内部温度相比表面温度急剧升温阶段缩短，缓慢升温时间延长，饱和温

度低于表面 15 ℃左右,关闭光源后,气凝胶内部降温速率较慢,证明气凝胶具有一定的保温能力。

作为光驱动加热材料,样品的辐射加热循环稳定性至关重要,Fig.6(e) 中样品在 7 次光源“闭合-断开”加热-冷却测试中,呈现基本一致的温度升降曲线,具有良好的加热可重复性。对 M-g-C30%-PMTS 样品在不同辐照强度下的光热性能进行测试(Fig.6(f)),其在 2×Sun,1.5×Sun,1×Sun 下的饱和温度值分别为 83.4 ℃,68.8 ℃及 59.4 ℃,表现出随辐照强度降低饱和温度值逐渐减小的趋势,根据这些数据得到 Fig.6(g)中的拟合曲线及方程 $T = 0.27002L + 34.53333$,说明加热饱和温度具有灵活的可调节性,可适应不同需求。Fig.6(h)表明,在 2×Sun 的辐照强度下,样品表面饱和温度值在 2500 s 内基本保持在 80 ℃左右,证明气凝胶样品具有长时间加热稳定性。

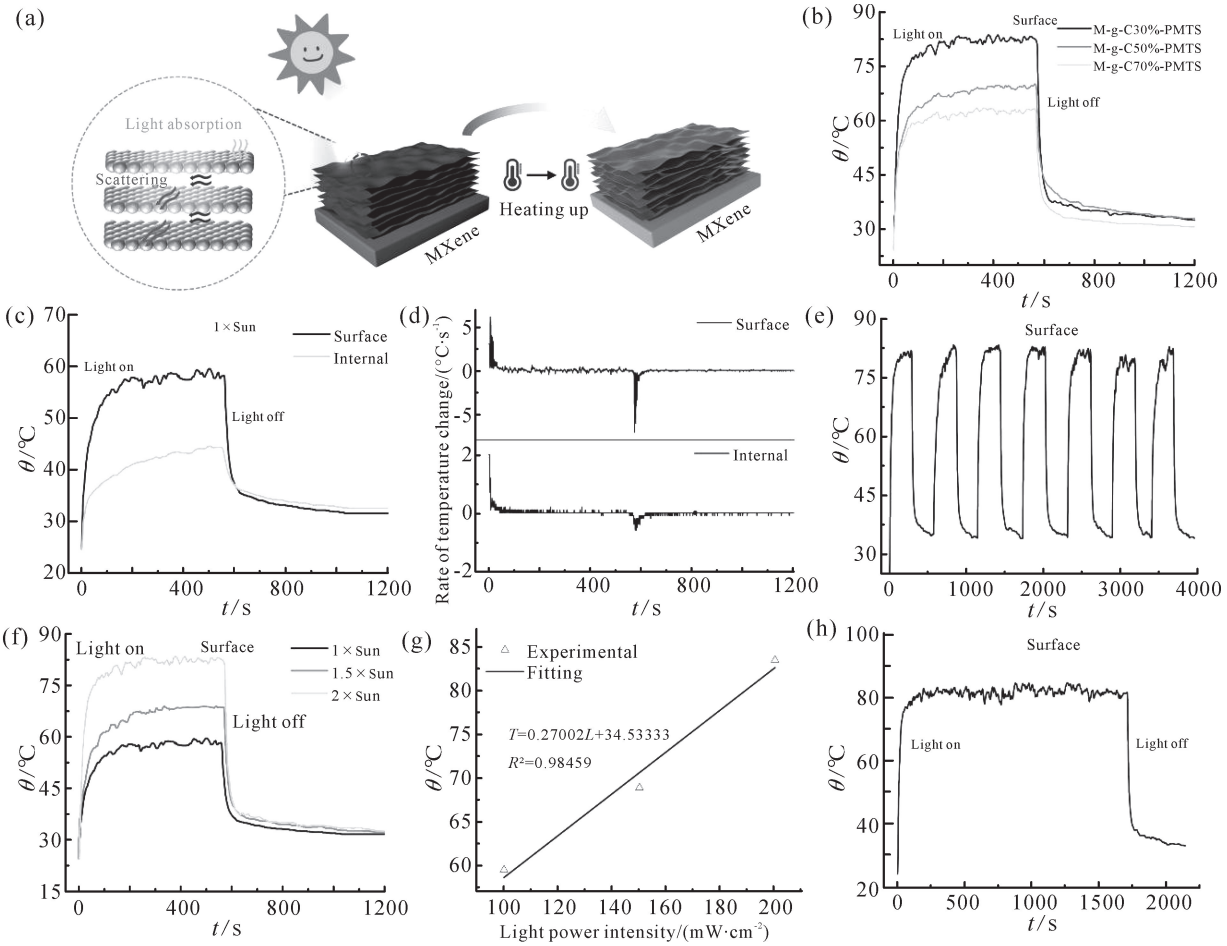



**Fig. 6　Photothermal performance of aerogel samples: (a) MXene photothermal mechanism; (b) saturation temperature curves; (c) saturation temperature at the surface and center; (d) temperature change rate; (e) cyclic irradiation test; (f) saturation temperature with different light intensities and (g) fitted curves; (h) long-time irradiation temperature stability**

## 2.4　气凝胶电热性能分析

MXene 具有焦耳加热性能,在低温、恶劣气候等极端环境中可实现快速保暖功能,进一步研究了 CNF 含量为 30%气凝胶的电热性能。Fig.7(a) 中,在样品两端施加 0.5~4.5 V 的低负载安全电压,气凝胶表面饱和温度变化范围为 26~95 ℃,表明温度可在较宽的范围内灵活调控。将不同负载电压下对应的饱和温度进行二次拟合(Fig.7(b)),得到拟合方程 $T = 3.33U^2 + 0.96U + 24.91$ ($R^2 = 0.99673$),表明气凝胶样品在实际应用中具备灵活的电热温度可调控性。评估气凝胶样品焦耳加热性能的稳定性,结果见 Fig.7(c),在样品两端交替施加 2 V 和 3.5 V 的电

压,表面饱和温度和负载电压呈现正相关性。Fig.7(d) 展示了样品多次“闭合-断开”电路过程中的温度变化曲线,样品经历 8 次循环闭合-断开电源操作后,表面饱和温度始终维持在 70 ℃左右,具备较好的重现性。Fig.7(e)表明,室温持续 1 h 通电中,表面饱和温度保持在 70 ℃左右,具有良好的稳定性。

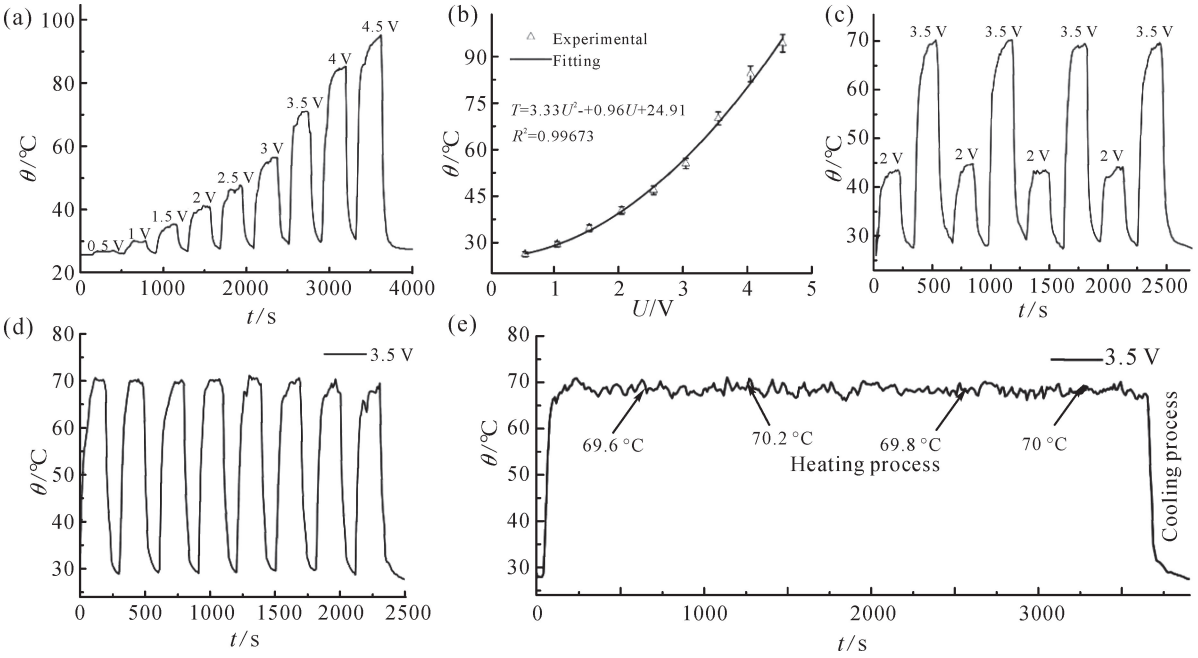



**Fig. 7 Joule heating performance of M-*g*-C30%-PMTS: (a) surface temperature of aerogel with different driving voltages; (b) fitting curve of driving voltage and corresponding saturation temperature; (c) surface temperature of the sample at alternating voltage; (d) curve of the surface temperature during cyclic heating; (e) Joule heating performance of the sample at long-term loading voltage**

### 2.5 气凝胶疏水性和抗菌性能分析

测定不同气凝胶样品对大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑制能力,结果如 Fig.8 所示。与 CNF 气凝胶相比,MXene/CNF,M-g-C30%,M-g-C30%-PMTS 气凝胶在光照 20 min 和暗处理 18 h 内均对金黄色葡萄球菌表现出良好的抗菌活性,纯 MXene 气凝胶由于易分解变形,暂不分析其抗菌效果。光照条件下,气凝胶表面温度在短时间内急剧升高,CNF,MXene/CNF,M-g-C30% 和 M-g-C30%-PMTS 气凝胶的抗菌效率分别达到了 22.4%,9.99%,99.99% 和 99.99%。常规接触 18 h 后,CNF,MXene/CNF,M-g-C30% 和 M-g-C30%-PMTS 气凝胶的抗菌效率分别为 9.6%,99.27%,99.52% 和 97.8%,这是由于细菌在样品上时,被 MXene 片层划破细胞膜,导致其因内溶物流失而死亡(Fig.8(a))。同样的,Fig.8(b) 显示了不同样品对于大肠杆菌的抗菌效率,由结果可以看出,无论是光热快速还是长时间接触培养,MXene/CNF 和 M-g-C30% 气凝胶的抗菌率都近 100%,经疏水处理后的样品,由于其表面产生拒水性,导致部分菌液无法与气凝胶表面接触,影响了接触抗菌的实验结果。

MXene 和纳米纤维素表面含大量的 —OH,制得的气凝胶具备超亲水性(Fig.9(b))。MTS 沉积到样品表面及孔隙中,能改变气凝胶材料的粗糙度,赋予气凝胶疏水性能(Fig.9(a))。Fig.9(c)显示,气凝胶样品沉积 MTS 后接触角升至 144°,具有超疏水性。对 MTS 沉积构建的疏水性样品而言,可采用细菌黏附实验来评价样品对细菌的抗黏附性能。如 Fig.9(d) 所示,以未进行疏水处理的样品作对照,M-g-C30%-PMTS 气凝胶对细菌的抗黏附率均在 80% 以上,以上结果与相应琼脂板上细菌的生长情况完全对应。综上所述,M-g-C30%-PMTS 气凝胶兼具接触灭菌和抗细菌黏附 2 种抑菌方式,具备高效、持久的抗菌性能。

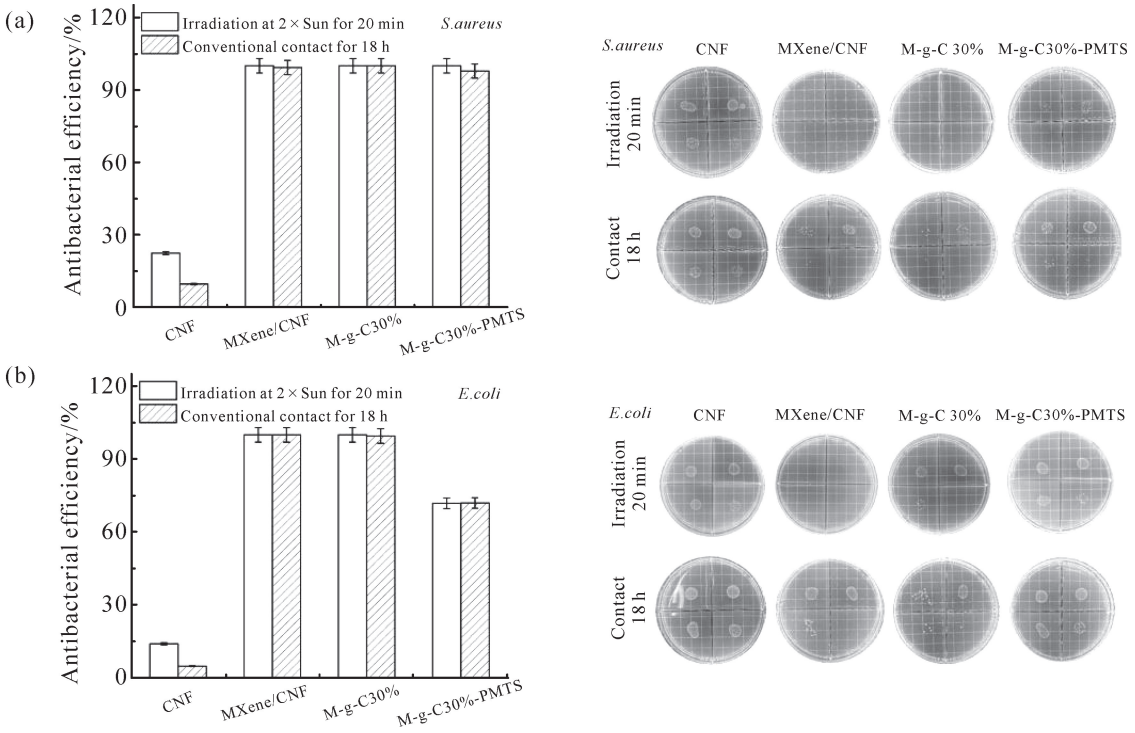



**Fig. 8　Antimicrobial efficiency of different samples against (a) *S. aureus* and (b) *E. coli***

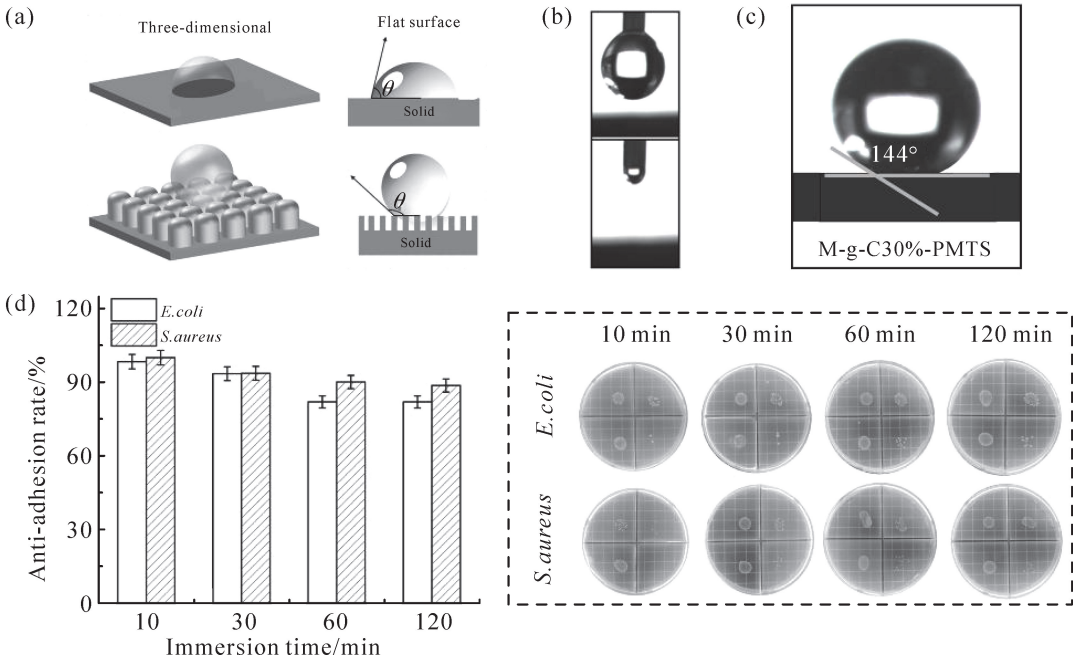



**Fig. 9　(a) Hydrophobic mechanism; (b, c) super-hydrophobicity of M-g-C and M-g-C-PMTS aerogels; (d) anti-adhesion efficiency of M-g-C-PMTS aerogel and corresponding photographs of colony enhancement**

## 3　结论

综上所述,本文展示了一种用于可加热纺织品填料的 MXene/纳米纤维素复合气凝胶的简单制备方法,以 EGDE 作为交联剂在气凝胶内部构建多重交联网络。借助 MXene 优异的太阳光吸收性能,在 1×Sun 的光照强度下,气凝胶表面温度可短时间内接近 60 ℃,同时,低电阻特性使其在人体安全电压下可在宽域温度范围内进行灵活调节。得益于优异

的双驱动加热性能和疏水性能,气凝胶在光热条件下对金黄色葡萄球菌的抑菌率达到 97.8%,在与大肠杆菌和金黄色葡萄球菌菌液接触 120 min 后,抗黏附率分别为 81.97% 和 88.65%,该气凝胶材料在热管理方向具有潜在的应用前景。

**参考文献:**


[1] Tang J W, Feng Y, Feng W. Photothermal storage and controllable release of a phase-change azobenzene/aluminum nitride aerogel composite[J]. Composites Communications, 2021, 23: 100575.

[2] Yao Q F, Xiong Y, Wang H W, *et al*. $MnO_2$ nanoflakes/cellulose nanofibre aerogel fabricated via ultrasonication for high-performance water desalination[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5: 9580-9590.

[3] Wei S, Yern C, Chen H C. Preparation of aerogel beads and microspheres based on chitosan and cellulose for drug delivery: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 170: 751-767.

[4] Wu Y Q, Wang X, Yao L H, *et al*. Thermal insulation mechanism, preparation, and modification of nanocellulose aerogels: a review[J]. Molecules, 2023, 28: 5836.

[5] 张志鹏. 聚酰亚胺基气凝胶的制备及其隔热性能的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
Zhang Z P. Preparation of polyimide based aerogelsnd their thermal insulation properties[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2024.

[6] Yang M, Yang L X, Chen Z F, *et al*. Flexible electrospun strawberry-like structure $SiO_2$ aerogel nanofibers for thermal insulation[J]. Ceramics International, 2023, 49: 9165-9172.

[7] Luo W X, Zou M, Luo L X, *et al*. Lipophilic modified hierarchical multiporous rGO aerogel-based organic phase change materials for effective thermal energy storage[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14: 55098-55108.

[8] Yan B, Zhou M, Liao X T, *et al*. Developing a multifunctional silk fabric with dual-driven heating and rapid photothermal antibacterial abilities using high-yield MXene dispersions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13: 43414-43425.

[9] Yang W Q, Xiao P, Li S, *et al*. Engineering structural Janus MXene-nanofibrils aerogels for season-adaptive radiative thermal regulation[J]. Small, 2023, 19: 2302509.

[10] Fu Y J, Cheng Y, Wei Q F, *et al*. Multifunctional biomass composite aerogel co-modified by MXene and Ag nanowires for health monitoring and synergistic antibacterial applications[J]. Applied Surface Science, 2022, 598: 153783.

[11] Chen X H, Yi Y, Duan R X, *et al*. Dual cross-linked and vertically oriented MXene/polyvinyl alcohol aerogel for ultrabroadband electromagnetic interference shielding and thermal camouflage[J]. Polymer, 2024, 291: 126604.

[12] Wei C, Zhang Q, Wang Z, *et al*. Recent advances in MXene-based aerogels: fabrication, performance and application[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2211889.

[13] Ahmed B, Hossain M J, Al P A, *et al*. Recent advancements of MXene/nanocellulose-based hydrogel and aerogel: a review[J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2024, 5: 2300231.

[14] Wang N, Wang H, Wang Y, *et al*. Robust, lightweight, hydrophobic, and fire-retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 40512-40523.

[15] Wu Y Q, Wang X, Yao L H, *et al*. Thermal insulation mechanism, preparation, and modification of nanocellulose aerogels: a review[J]. Molecules, 2023, 28: 5836.

[16] Cheng Y, Zhu W, Lu X, *et al*. Lightweight and flexible MXene/carboxymethyl cellulose aerogel for electromagnetic shielding, energy harvest and self-powered sensing[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107229.

[17] 范冰杰. 纳米纤维素基气凝胶的构建及其油水分离性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
Fan B J. Construction of cellulose nanofiber-based aerogel and its oil-water separation performance[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.

[18] Fan B J, Pan S, Bao X M, *et al*. Highly elastic photothermal nanofibrillated cellulose aerogels for solar-assisted efficient cleanup of viscous oil spill[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128327.

[19] Li Z R, Yuan Y, Wu LL, *et al*. Hierarchically engineered silk fibroin nanotextiles with spectral selectivity and asymmetric nanostructure for sustainable personal thermal-wet regulation, Advanced Fiber Materials, 2025, 7: 1475-1494.

[20] Xu D X, Li Z D, Li L S, *et al*. Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: synthesis, mechanism, and applications[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30: 2000712.

# MXene/Nanocellulose Aerogel with Multiple Crosslinked Networks and Dual-Drive Heating Applications

Xiuping Song[1], Biaobiao Yan[2], Zhiteng Zhai[1], Bo Xu[1], Ping Wang[1]

(*1. School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

*2. School of Textile Science and Engineering, Shaoxin University, Shaoxing 312000, China*)

**ABSTRACT:** Two-dimensional transition metal carbide/nitride (MXene)-based aerogel materials have the characteristics of low density and light mass. However, the presence of a laminated stacked structure of MXene nanosheets easily results in poor compressive resistance of single MXene aerogels. Here, a method to prepare MXene/nanocellulose composite aerogels via EDGE-mediated cross-linking was proposed, which realized the formation of cross-links between nanocellulose and MXene layers through H-bond and covalent bonds. And a two-component aerogel with good compression resistance and deformation recovery ability was constructed. The effects of different mass ratios of MXene/CNF (7∶3, 5∶5 and 3∶7) on the properties of aerogel were investigated. In-situ vapor deposition of MTS was carried out to obtain hydrophobicity. When the mass ratio of MXene to CNF is 7∶3, the obtained aerogel has encouraging mechanical properties, with an elastic loss coefficient of 0.73 and a resistance of 74 Ω/cm, accompanying with excellent structural stability and good hydrophobic properties. With the excellent electrical conductivity and photo-thermal conversion of MXene, the composite aerogel exhibits encouraging antimicrobial activity, photo-thermal and electro-thermal dual-drive heating performance, which has potential application prospects in the field of functional materials including clothing fillers.

**Keywords:** MXene; nanocellulose; aerogel; multiple cross-links; antimicrobial; dual-drive heating