

# 纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶的制备及光热海水淡化性能

姜 杭, 谷昊辉, 梁 峰, 何冈骏, 田 宇

(武汉科技大学材料学部, 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081)

**摘要** 以三聚氰胺( $C_3H_6N_6$ )、硼酸( $H_3BO_3$ )、乙醇( $C_2H_5OH$ )、尿素[ $CO(NH_2)_2$ ]和四氯化钛( $TiCl_4$ )为原料, 通过真空浸渍法和原位反应制备了纳米氮化钛/六方氮化硼纤维复合气凝胶新型光热转换材料(TiN/h-BN), 并用于太阳能海水淡化. 研究了复合气凝胶的光热蒸发性能以及对海水中阳离子的去除效果. 结果表明, 纳米氮化钛颗粒原位生长在氮化硼纤维表面, 显著提高了气凝胶的光吸收性、水润湿性和光热转换性能. 在模拟1个太阳光( $1\text{ kW/m}^2$ )照射下, 复合气凝胶在100 s内表面温度上升至平衡温度 $66.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 对光辐射具有较高的吸收和转换能力, 其水蒸发速率为 $2.88\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 蒸发效率为93%, 并展现出优异的循环使用性能, 对人工海水中阳离子的去除率高达99.9%, 在海水淡化领域具有良好的应用前景.

**关键词** 氮化钛; 氮化硼气凝胶; 光热转换; 海水淡化

中图分类号 O644; O648

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20240403

## Nano TiN/h-BN Fiber Composite Photothermal Aerogels for Boosting Solar-driven Seawater Desalination

JIANG Hang, GU Haohui, LIANG Feng\*, HE Gangjun, TIAN Yu

(State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Department of Materials,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract** In this paper, a novel nano titanium nitride/hexagonal boron nitride (TiN/h-BN) fiber composite photothermal aerogel was synthesized using melamine ( $C_3H_6N_6$ ), boric acid ( $H_3BO_3$ ), ethanol ( $C_2H_5OH$ ), urea [ $CO(NH_2)_2$ ] and titanium tetrachloride ( $TiCl_4$ ) as raw materials, through vacuum impregnation and *in situ* reaction methods. The photothermal conversion and seawater desalination properties of the composite photothermal aerogel were evaluated. The results indicate that titanium nitride nanoparticles were *in situ* grown on the surface of boron nitride fibers, which significantly improved the light absorption, water wettability and photothermal conversion properties of the aerogel. Under artificial sunlight illumination ( $1\text{ kW/m}^2$ ), the surface temperature of the composite aerogel rose to  $66.8\text{ }^\circ\text{C}$  equilibrium temperature within 100 s, demonstrating high optical absorption and efficient solar-to-thermal conversion. As a result, the composite photothermal aerogel presented a water evaporation rate of  $2.88\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  with an evaporation efficiency of 93%. Additionally, the TiN/h-BN composite photothermal aerogel possessed excellent cycle stability with a removal rate of cation in artificial seawater as high as 99.9%, indicating great potential for application in seawater desalination.

**Keywords** Titanium nitride; Boron nitride aerogel; Photothermal conversion; Seawater desalination

收稿日期: 2024-08-26. 网络首发日期: 2024-10-14.

联系人简介: 梁 峰, 男, 博士, 副教授, 主要从事光催化与储能纳米功能材料及功能耐火材料方面的研究.

E-mail: liangfengref@wust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52272021, 52072274, 52232002, U23A20559)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 52272021, 52072274, 52232002, U23A20559).

地球表面约71%被海洋覆盖,因此,地球上的水资源绝大部分为海水,约占96.5%。随着全球淡水资源的日益紧张,海水淡化技术已成为解决淡水短缺问题的重要途径<sup>[1,2]</sup>,利用太阳能进行海水淡化是一种低能耗的淡水生产方法,为缺水问题提供了一种可持续的解决方案,对于经济发展和人类健康至关重要。太阳能淡化海水是利用太阳光辐射产生的热量加速水的蒸发,水蒸气被凝结成淡水,产生清洁的饮用水<sup>[3]</sup>。光热转换是实现太阳能高效利用的直接过程,制备具有良好光热转换性能的材料是实现高效太阳能海水淡化的关键<sup>[4-9]</sup>。

气凝胶是由纳米胶体颗粒连接而成的三维网状结构材料,具有高气孔率、低密度、低热导率和高比表面积等特性,可以有效捕获太阳光的辐射。高气孔率的气凝胶有利于水的输送,基于较强的毛细管效应,水可以通过多孔结构有效地输送到蒸发器表面<sup>[10-12]</sup>。六方氮化硼(h-BN)具备优异的导热性、热稳定性及机械强度。h-BN气凝胶因其低密度、高孔隙率和优异的高温稳定性的优点,在气体吸附、催化、污水净化和导热/隔热等领域极具应用前景<sup>[13-15]</sup>。Xue等<sup>[16]</sup>制备的氮化硼气凝胶对水中Cd<sup>2+</sup>的吸附能力达到561 mg/g。Li等<sup>[17]</sup>制备的rGO/BN气凝胶不仅具有卓越的机械性能,还具有优异的疏水吸水能力,吸油量达到自身重量的170倍。目前,将h-BN气凝胶应用于光热海水淡化鲜有报道。

纳米氮化钛(TiN)具有高熔点、良好的化学稳定性和优异的抗氧化性,同时具备独特的等离子体共振特性和卓越的光热转换性能,被视为一种极具应用前景的光热转换材料<sup>[18,19]</sup>。Kaur等<sup>[20]</sup>设计了一种负载TiN纳米颗粒的氧化铝海水蒸发装置,该装置的光热转换效率可达92%。Jiang等<sup>[21]</sup>通过NH<sub>3</sub>还原氮化法制备TiN纳米颗粒。在808 nm激光(800 mW/cm<sup>2</sup>)下照射10 min,200 μg/mL的TiN纳米流体温度从25 °C升至55 °C,具有较好的光热转换性能。将TiN纳米颗粒复合在h-BN气凝胶中,可增强材料的吸光性能并改善氮化硼对水的润湿性,从而提高光热海水淡化性能。

本文以三聚氰胺和硼酸为原料制备了h-BN纤维气凝胶,再将气凝胶浸渍在尿素和四氯化钛的乙醇溶液中,经1200 °C热处理,在h-BN表面原位生成TiN纳米颗粒,制备了纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶新型光热转换材料,研究了复合气凝胶的显微结构、光热转换性能及水蒸发性能。该材料实现了对太阳光辐射的高效捕获和转换,展现出良好的光热蒸发淡化海水的性能,并为光热转换材料在太阳能海水淡化领域的发展提供了新的思路和策略。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

三聚氰胺(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>)、硼酸(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)、乙醇(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)、尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]和四氯化钛(TiCl<sub>4</sub>),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;人工海水通过向去离子水中添加盐类自行配制,配得溶液中Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>离子的浓度分别为7483.30, 582.00, 869.20和223.30 mg/L;去离子水(电导率7.61 μS/cm)。

X'pert PRO型X射线衍射仪(XRD),荷兰PANalytical分析仪器公司;VG Multilab 2000型X射线光电能谱仪(XPS),美国Thermo Electron公司;Nova 400 Nano SEM型场发射扫描电子显微镜(FESEM),美国FEI公司;JEM-2100UHR TEM/EDS型高分辨率透射电子显微镜(HRTEM),日本JEOL公司;UV-3600型紫外-可见光谱仪(UV-Vis-NIR),日本Shimadzu公司;FLIR E4 Pro型红外热像仪,美国菲力尔公司;JC2000 DM型精密自动型接触角测量仪,上海中晨数字技术设备有限公司;EP Optimal 8000型电感耦合等离子体-光学发射光谱仪(ICP-OES),美国PerkinElmer公司;PLS-SXE300型氙灯光源,北京泊菲莱科技有限公司。

### 1.2 实验过程

h-BN纤维气凝胶的制备:将2.52 g C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>(氮源)与2.48 g H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(硼源)加入到95 mL去离子水中,在90 °C条件下持续搅拌,直至H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>和C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>完全溶解,得到澄清水溶液。随后将溶液转移到离心管中,利用液氮迅速冷却,再真空冷冻干燥48 h后,获得h-BN气凝胶前驱体。最后,将前驱体置于管式炉中,在N<sub>2</sub>气氛中加热至1200 °C保温3 h,然后,自然冷却至室温,制得h-BN气凝胶圆柱体,其直径为20 mm,厚度为10 mm,记为BN。

纳米 TiN/h-BN 纤维复合气凝胶的制备: 分别将 1.04 g  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (氮源) 和 0.45 mL  $\text{TiCl}_4$  (钛源) 缓慢加入到 80 mL 乙醇中, 持续搅拌直至溶液转变为淡黄色, 得到含 0.05 mmol/mL  $\text{Ti}^{4+}$  的 TiN 前驱体溶液. 将 h-BN 气凝胶浸渍于该前驱体溶液中, 进行真空浸渍处理, 取出后在 60 °C 下干燥, 随后在  $\text{N}_2$  气氛中于 1200 °C 下保温 3 h 进行热处理, 制得纳米 TiN/h-BN 纤维复合气凝胶. 通过调节 TiN 前驱体溶液中  $\text{Ti}^{4+}$  浓度 (0.05, 0.10, 0.20 和 0.30 mmol/mL), 制得的纳米 TiN/h-BN 纤维复合气凝胶分别记为 T1, T2, T3 和 T4.

此外, 以四氯化钛和尿素为原料, 将  $\text{TiCl}_4$  加入到乙醇中, 得到黄色溶液, 然后将尿素缓慢添加到溶液中, 形成均匀黄色凝胶, 再将该凝胶干燥后, 在  $\text{N}_2$  气氛中于 1200 °C 下保温 3 h, 制得金黄色 TiN 粉体.

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品的表征

由图 1 可见, 在 BN 气凝胶中, 位于  $2\theta=26.6^\circ$  和  $41.5^\circ$  处的衍射峰分别对应标准卡片 h-BN (ICDD No.85-1068) 的 (002) 和 (100) 晶面, 表明制备的 BN 为六方氮化硼气凝胶. 所制备的 TiN 为金黄色粉体, 其 XRD 谱图中位于  $2\theta=36.8^\circ$ ,  $42.8^\circ$ ,  $62.1^\circ$ ,  $74.4^\circ$  和  $78.3^\circ$  处的峰分别对应 TiN (ICDD No.87-0632) 的 (111), (200), (220), (311) 和 (222) 晶面, 衍射峰尖锐且无杂峰, 说明所制备的 TiN 具有高纯度和高结晶度. 复合气凝胶的 XRD 谱图中同时出现了 h-BN 和 TiN 的衍射特征峰, 表明通过真空浸渍方法在 h-BN 气凝胶中原位生成了 TiN. 随着浸渍溶液中  $\text{Ti}^{4+}$  浓度的增加, 位于  $2\theta=36.8^\circ$  和  $42.8^\circ$  处的 TiN 特征峰的相对强度逐渐增强, h-BN 特征峰的相对强度逐渐降低, 表明 TiN 物相在复合气凝胶中的相对含量逐渐增加. 从样品的数码照片 (图 S1, 见本文支持信息) 可以看出, 样品的颜色随着浸渍溶液中  $\text{Ti}^{4+}$  浓度的增加而逐渐加深, T4 样品表面出现了金黄色, 进一步表明了样品中 TiN 含量的增加, 该结果与 XRD 谱图相符.

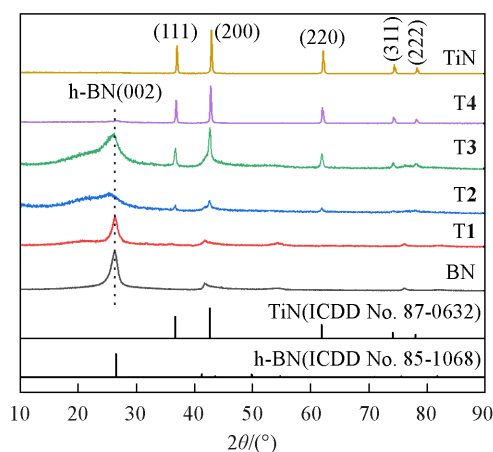


Fig. 1 XRD patterns of the as-synthesized samples

图 2 为样品的 XPS 谱图, 由样品的 XPS 全谱图可知, h-BN 中含有 N, B, C 和 O 元素 [图 2(A)], 其中, O 元素来源于样品表面吸附的水或未反应完全的氧化硼<sup>[22]</sup>; TiN 样品中含有 Ti, N, C 和 O 元素, 其中, O 元素是由于氮化钛表面氧化所致<sup>[23]</sup>; T3 样品的元素组成包括 Ti, N, B, C 和 O, 说明样品中含有氮化钛和氮化硼. 此外, 3 个样品中的 C 元素为加入的标定元素. 图 2(B) 为 h-BN 气凝胶与 T3 中  $\text{B}_{1s}$  的 XPS 精细谱图, 在 192.5 和 190.6 eV 处的两个特征峰分别对应 B—O 和 B—N 结合键, 其中 B—N 键是构成六方氮化硼的结构骨架. 与 h-BN 相比, T3 中 B—O 键含量显著降低, 表明尿素作为氮源在生成氮化钛的同时, 可消耗 h-BN 基体中未反应完全的氧化硼.  $\text{N}_{1s}$  的高分辨 XPS 谱图中位于 399.2, 398.2 和 397.1 eV 处的 3 个特征峰分别对应 N—O, B—N 和 Ti—N 结合键 [图 2(C)]. BN 的主强峰对应 B—N 键特征峰, T3 的主强峰同为 B—N 键. 此外, T3 中还存在与 TiN 主强峰相吻合的 Ti—N 结合键, 表明 T3 中 TiN 和 h-BN 两相的成功复合. 图 2(D) 为样品中 Ti 的  $2p_{1/2}$  和  $2p_{3/2}$  的 XPS 精细谱图, 其中, 强度较高的  $2p_{3/2}$  的特征峰分别对应 Ti—O 键 (458.5 eV), Ti—O—N 键 (456.2 eV) 和 Ti—N 键 (454.9 eV). 与 TiN 相比, T3 中 Ti 元素的特征峰向高结合能方向发生了偏移, 这可能是由于 T3 中 TiN 与基体 h-BN 之间发生了电子转移所致<sup>[24]</sup>.

由图 3(A) 可见, BN 是由直径约 2  $\mu\text{m}$  的纤维交错组成, 纤维均匀且连续, 表面光滑, 长径比大, 排列松散. 纤维之间相互搭接, 相互缠绕, 形成了高度网络化的三维多孔结构. 复合气凝胶同样由纤维

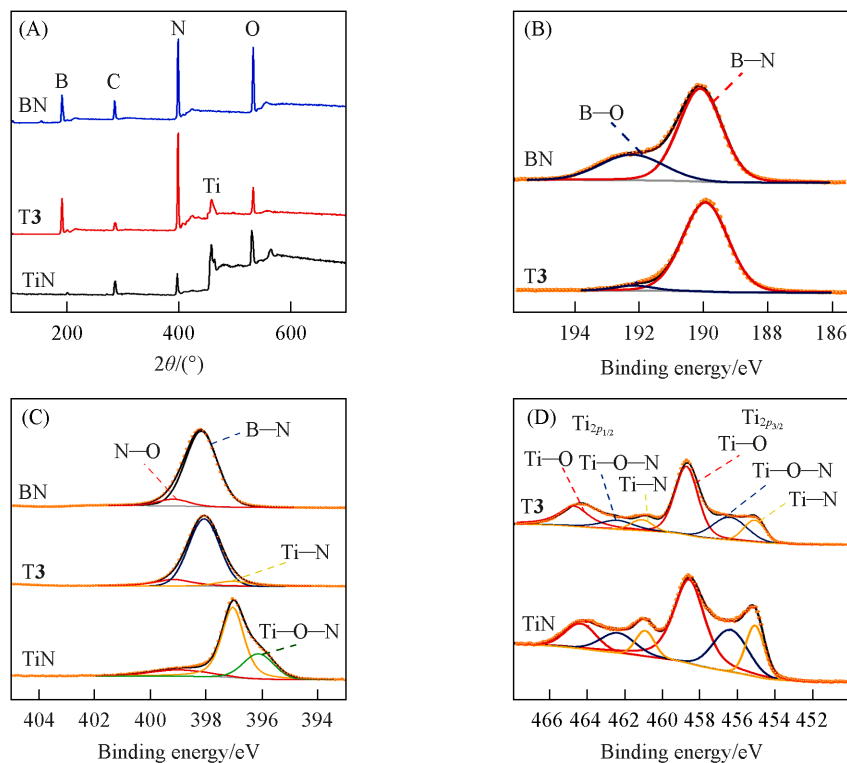


Fig. 2 Survey(A), B<sub>1s</sub>(B), N<sub>1s</sub>(C) and Ti<sub>2p</sub>(D) XPS spectra of BN, T3 and TiN samples

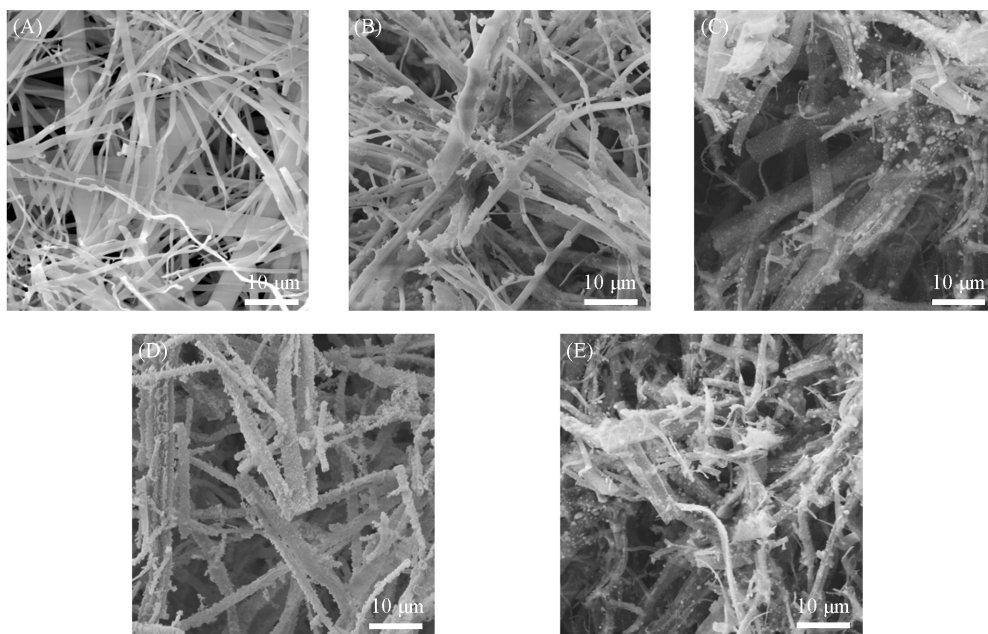


Fig. 3 SEM images of BN(A), T1(B), T2(C), T3(D) and T4(E) samples

网络构成,大量颗粒附着在纤维表面,结合XRD结果分析,颗粒为TiN.随着TiN含量的增加,纤维表面逐渐变得粗糙,当大量氮化钛颗粒存在纤维基体内部时,颗粒相互集聚使纤维之间连接紧密,导致孔隙减少,结构致密化[图3(B)~(E)].同时,测得BN, T1, T2, T3和T4的体积密度分别为0.020, 0.022, 0.025, 0.029和0.033 g/cm<sup>3</sup>,表明TiN含量的增加使气凝胶体积密度升高,孔隙率下降.高度网络化的三维多孔结构有利于材料对光的吸收与利用,由于孔隙的毛细管作用产生的虹吸效应可促进水的流动传输,从而提高了太阳能水蒸发的效率<sup>[25]</sup>.

图4为h-BN与T3的TEM照片,由图4(A)可见,h-BN呈现为一维纤维结构,表面光洁. HRTEM照片显示出明显的晶格条纹,晶面间距为0.33 nm[图4(A)左下插图],与h-BN的(002)晶面相对应<sup>[26]</sup>. 选区电子衍射(SAED)结果表明,纤维具有明显的多晶环,分别对应于h-BN的{002},{100}和{112}3个晶面族,表明BN具有较好的结晶度[图4(A)右上插图]. T3中h-BN纤维表面粗糙,附着了大量直径约30~100 nm的TiN颗粒,在HRTEM照片中,观察到两种不同的晶格条纹,晶格间距分别为0.33和0.21 nm[图4(B)左下插图],分别对应h-BN的(002)晶面和TiN的(200)晶面<sup>[27]</sup>. SAED结果中除了观察到BN的多晶环外,还明显观察到TiN的多晶环,分别对应于TiN的{220},{100}和{111}晶面族[图4(B)右上插图]. 此外,能量色散谱(EDS)结果表明,T3中含有Ti,N和B元素,且元素分布均匀(图5),进一步证实了T3中纤维表面均匀附着了TiN颗粒,与XRD,XPS和SEM的结果一致.

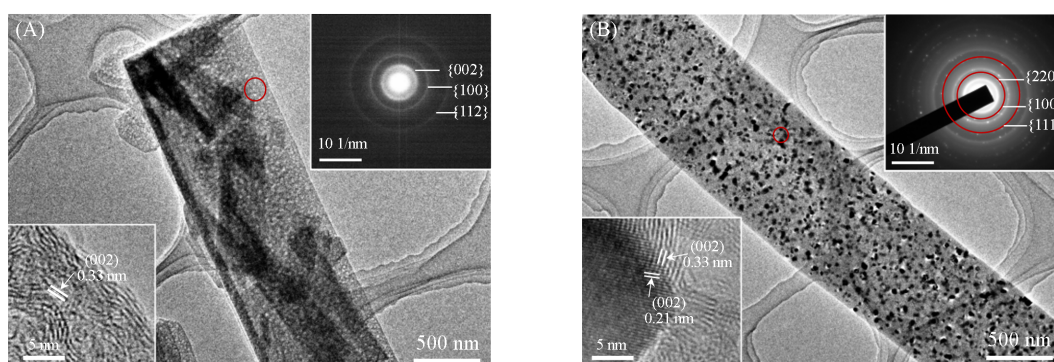


Fig. 4 TEM images of h-BN(A) and T3(B) samples

The lower left insets of (A, B) are the HRTEM images of the samples, the upper right insets of (A, B) are the SAED images of the samples.

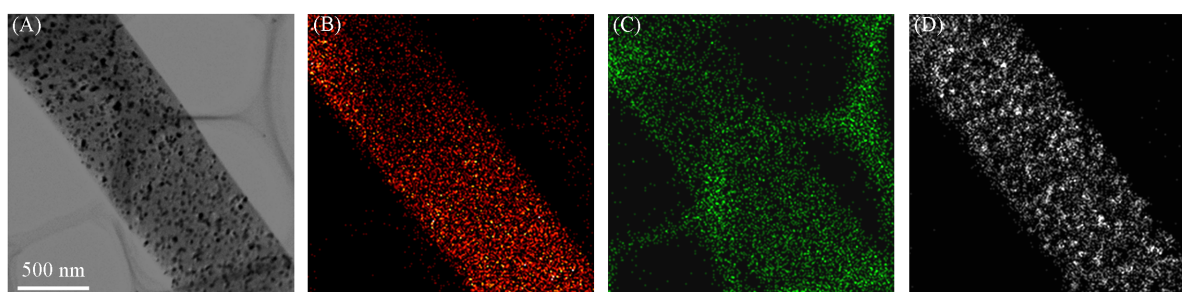


Fig. 5 TEM image(A), EDS elemental mappings of N(B), B(C), Ti(D) of T3 sample

## 2.2 样品的UV-Vis-NIR吸收光谱

由图6可见,单相h-BN气凝胶仅在紫外光区有吸收,其吸收边为210 nm,带隙宽度约为6 eV. 复合气凝胶具有广泛的太阳光吸收能力,吸收波段覆盖整个太阳光谱范围(200~2500 nm). 随着氮化钛含量的增加,复合气凝胶对光的吸收强度先增加后降低,其中,T3对可见光的吸收强度最强.T4对光的吸收强度降低,可能是由于氮化钛含量的增加导致样品中孔结构减少、体积密度增加、样品接触光照的面积减小、光线接触到光响应材料氮化钛的相对几率变小,从而降低了样品对光的利用率,导致T4的光吸收能力减弱. 复合气凝胶在约750 nm处有显著的吸

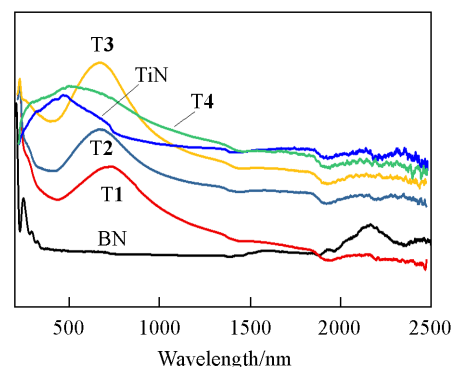


Fig. 6 UV-Vis-NIR absorption spectra of different samples

收峰, 纳米氮化钛颗粒表面电子与光子相互作用, 电子的振荡与光子达到共振, 光子能量有效地被电子的共振吸收, 产生了局部表面等离子共振吸收峰<sup>[28]</sup>. 该吸收峰随着氮化钛含量的增加逐渐蓝移, 单相TiN粉体吸收峰约在450 nm处, 可能由于样品中氮化钛含量和晶粒尺寸增加所致, 样品中含自由电子的Ti—N键增多, 使物体颗粒表面导电电子数增加, 导致等离子体共振吸收峰蓝移<sup>[29]</sup>.

### 2.3 样品对水的润湿性能

图S2(见本文支持信息)为水在不同气凝胶表面的接触角对比图, 水在h-BN气凝胶上表面的润湿角为145°, 表明单相h-BN气凝胶呈现较高的疏水特性, 这是由于h-BN中B和N原子间的 $sp^2$ 共价键部分为离子键, 使得B—N键更强, 更难断裂, 且h-BN特殊的原子平面堆积序列使其相邻平面间形成一种强相互作用, h-BN表面具有较高的化学惰性<sup>[30]</sup>. 随着纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶中TiN含量的增加, 水在气凝胶表面的润湿角逐渐下降, 在T3表面的润湿角降至0°, 实现超亲水, 水能够在T3表面完全润湿和迅速铺展, 这是由于TiN含量的上升提高了气凝胶表面的粗糙度, 且纳米TiN颗粒表面存在大量的—OH亲水基团所致<sup>[31]</sup>. 样品压实后的水接触角如图S3(见本文支持信息)所示, TiN含量的增加使样品的水润湿角降至0°, 进一步表明TiN的引入提高了气凝胶对水的润湿性. 复合气凝胶的超亲水特性可有效增加水与气凝胶表面的接触面积, 促进水在材料表面的均匀分布和快速蒸发, 提高水的蒸发速率.

### 2.4 样品的光热海水淡化性能

在1 kW/m<sup>2</sup>模拟太阳光照射下, 不同气凝胶的表面温度随时间变化的曲线如图7所示. 由图7(A)可知, h-BN气凝胶的表面温度上升缓慢, 在200 s内温度从18.4 °C增至33.4 °C, 而后达到平衡, 温度升高了15 °C. 纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶的平衡温度均高于单相h-BN气凝胶, 其中, T3的表面温度在100 s内增加到平衡温度66.8 °C, 升高了48.4 °C, 是单相h-BN气凝胶的3.2倍. 该结果表明, 纳米TiN粉体的等离子体共振特性显著提高了单相h-BN气凝胶的光热转换效率. 随着复合气凝胶中TiN含量的增加, 气凝胶表面的平衡温度先增加后下降, 在h-BN纤维表面原位生成纳米TiN粉体提高了样品对光的吸收, 从而使气凝胶表面的平衡温度升高. 然而, T4的表面温度低于T3, 可能是由于大量的TiN颗粒集聚堵塞了气凝胶的气孔. 光线照射到气孔中会发生反射与折射, 进而增加光线在样品中的传输路径, 孔结构的减少会导致样品接触光照的有效面积减小, 降低了样品的光吸收能力,

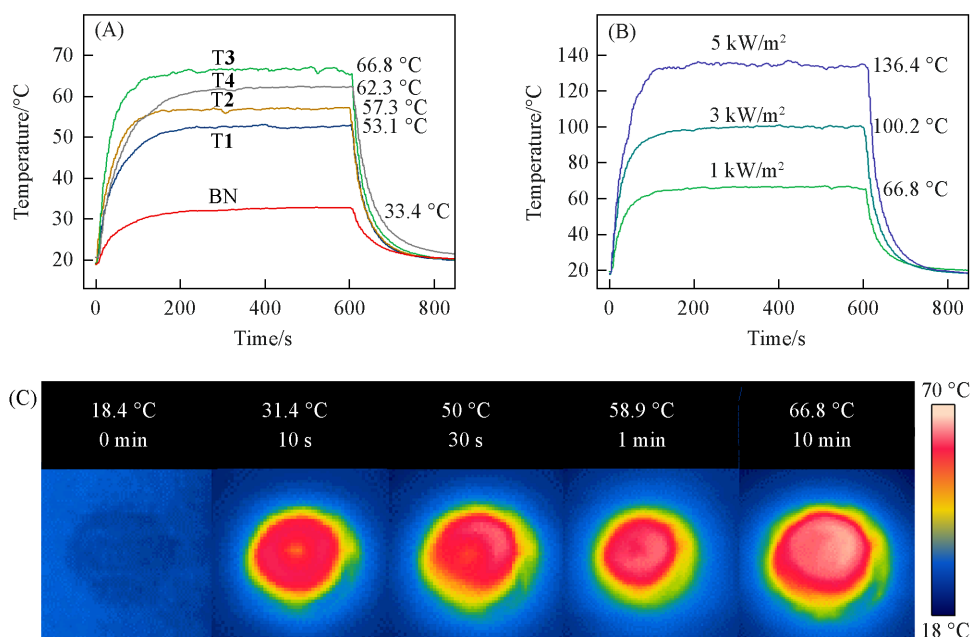


Fig. 7 Temperature change curves of different samples surfaces with time at 1 kW/m<sup>2</sup> simulated light irradiation(A), temperature change curves of T3 under different light irradiances(B), infrared images of T3 at 1 kW/m<sup>2</sup> simulated light irradiation(C)

结合 UV-Vis-NIR 的测试结果(图6)可佐证. 在降温阶段, 所制备的气凝胶材料均能在 200 s 内降低到室温, 表明 h-BN 纤维与纳米 TiN/h-BN 复合纤维具有良好的传热性能, 纳米 TiN 具有较高的热导率 ( $29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 将其与 h-BN 纤维复合可以改善样品的热导率<sup>[32]</sup>, 进而使热量在气凝胶骨架中快速传递, 实现整体样品的快速加热, 提高热量的利用率. 在不同的太阳光辐射强度下, T3 表面的温度随时间变化的曲线如图 7(B) 所示. T3 表面的升温速率随太阳光辐射强度的增加而提高, 太阳光辐射强度为  $5 \text{ kW/m}^2$  时, 升温速率为  $1.12 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , 是  $1 \text{ kW/m}^2$  时的 2.1 倍, 复合气凝胶表面温度上升速率随光辐射强度的增加而提高, 表明样品对光具有较高的灵敏度. 在  $1 \text{ kW/m}^2$  模拟太阳光下, 采用红外相机捕捉了 T3 表面温度的变化[图 7(C)], 表明复合气凝胶可有效捕获光辐射并转化为热能, 使气凝胶表面迅速升温, 具有优异的光热转换性能.

基于纳米 TiN/h-BN 纤维复合气凝胶的太阳能驱动水蒸发及其实际应用的结果示于图 8. 由图 8(A) 可见, 在 1 个太阳光 ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) 照射下, 在纯水和含有复合气凝胶样品的蒸发系统中, 光照 60 min 后纯水空白对照组的质量几乎无变化, 含有复合气凝胶的蒸发系统中水量减少, 水逐渐被蒸发, 且水量变化与时间呈线性关系, 蒸发速率稳定, 随时间的变化无明显变化. 纳米 TiN/h-BN 纤维复合气凝胶的水蒸发速率随样品中氮化钛含量的增加, 呈现先增加后减小的趋势, T3 具有较高的水蒸发速率 ( $2.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 该太阳能驱动装置的光热蒸发效率 ( $\eta$ ) 为 93%. 在不同模拟太阳光照辐射强度下, 测试了 T3 分别在纯水和 3.5% NaCl 盐溶液中的水蒸发量变化曲线[图 8(B)]. 由计算可知, 在纯水中, 太阳辐射强度 ( $I$ ) 为  $5 \text{ kW/m}^2$  时, T3 的水蒸发速率 ( $v$ ) 为  $5.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 分别比  $3 \text{ kW/m}^2$  ( $4.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 和  $1 \text{ kW/m}^2$  ( $2.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 光照辐射强度下提高了 21.6% 和 81.6%, 表明光照辐射强度的增大, 提高了水的蒸发速率. 此外, 与纯水系统相比, 在盐溶液中 T3 的水蒸发速率略有下降, 在太阳辐射强度为 5, 3 和  $1 \text{ kW/m}^2$  时, 水蒸发速率分别为 3.37, 3.14 和  $2.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 可能是由于水分的蒸发使与气凝胶表面接触的 NaCl 溶液过饱和, 进而析出 NaCl 晶体, 附着在气凝胶骨架材料表面, 阻碍了水与气凝胶的接触, 堵塞了水的运输通道, 抑制了水蒸发. 此外, 根据拉乌尔定律, 相同条件下盐水的

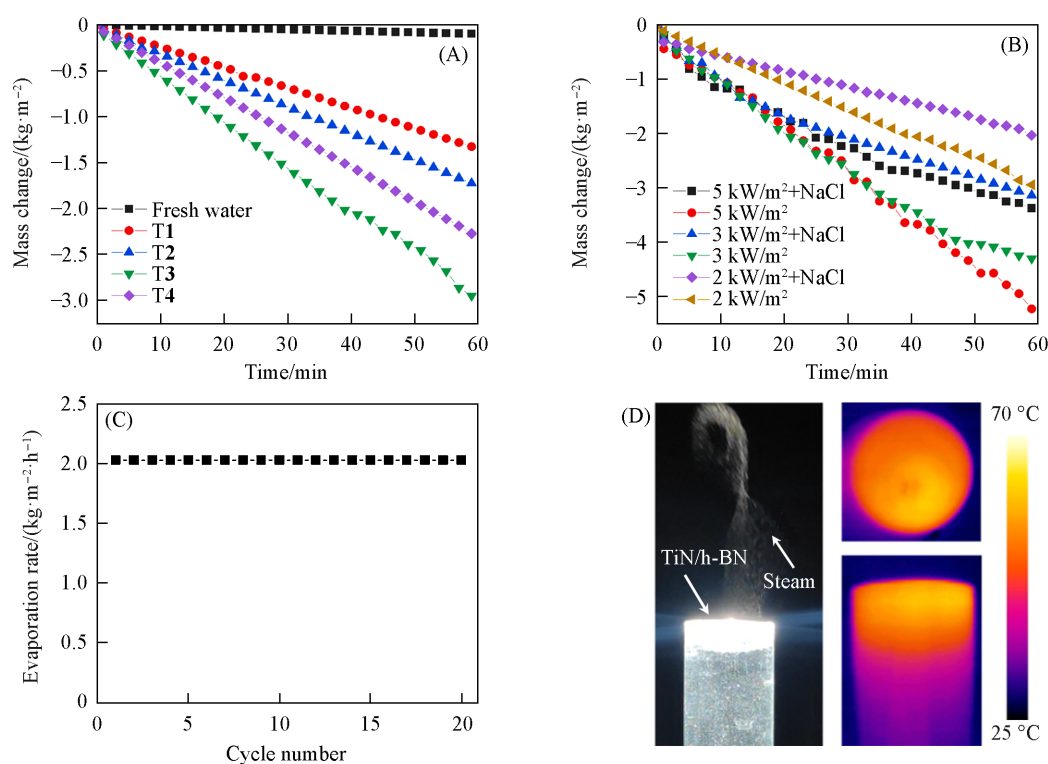


Fig. 8 Cumulative mass changes of pure water for different samples under  $1 \text{ kW/m}^2$  light irradiation(A) and pure water and 3.5% NaCl solution for T3 sample under different light irradiances(B), evaporation rate test in 20 cycles(C), the TiN/h-BN composite aerogel produces water vapor under light irradiation(D)

饱和蒸汽压小于纯水的蒸汽压, 为此盐水蒸发速率较纯水低。

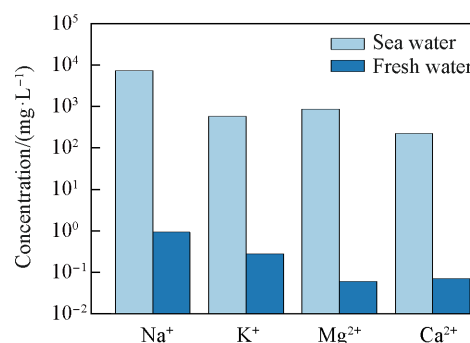
同时, 图8(C)给出了复合气凝胶T3在3.5% NaCl溶液中, 1 kW/m<sup>2</sup>太阳光照射下, 经过20次循环的水蒸发速率变化曲线, 结果表明, 多次循环后样品的水蒸发速率稳定无变化, 证明所制备的纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶对于太阳能驱动的水蒸发具有良好的循环使用性能。图8(D)为1 kW/m<sup>2</sup>光照下的实际应用照片及其红外图像, 可以观察到, 光辐射可有效提高系统的表面温度, 纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶实现了高效的光热转换, 液态水能够在复合气凝胶表面实现持续蒸发。

表1列出了所制备纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶与其它光热材料用于太阳能水蒸发的性能比较<sup>[33-38]</sup>, 通过对比发现纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶(T3)具有高效的光热转换性能。

**Table 1 Comparison of the performance of photothermal materials for solar water evaporation**

Photothermal material	$I/(kW \cdot m^{-2})$	$\nu/(kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	$\eta(\%)$	Ref.
TiN/h-BN(T3)	1	2.88	93	This work
C	1	1.37	87.5	[33]
SiO/PPy	1	2.17	94.17	[34]
Hydroxyapatite/CNT	1	1.34	89.4	[35]
Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> /CNT	1	2.10	93.4	[36]
Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	1.31	81.7	[37]
Co@C/NCNT	1	1.55	89.7	[38]

采用配制的人工海水进行光热海水淡化实验, 结果表明, 纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶具有高效的海水淡化性能(图9), 经过太阳能蒸发净化后, 水中的Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>碱金属和碱土金属离子的浓度从最初的7483.30, 582.00, 869.20和223.30 mg/L分别降至蒸发收集的清洁水中的0.93, 0.28, 0.06和0.07 mg/L, 离子浓度远低于饮用水标准<sup>[39]</sup>。4种离子在光热水蒸发后的去除率可达99.9%, 由此可见, 纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶有助于高效稳定的海水淡化和饮用水收集。



**Fig. 9 Cation elimination of artificial seawater**

### 3 结 论

通过真空浸渍和原位反应法制备了纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶, 其在1 kW/m<sup>2</sup>太阳光照下, 水蒸发速率为2.88 kg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, 蒸发效率为93%, 且20次循环后的水蒸发速率无明显变化, 循环稳定性良好。纳米TiN/h-BN纤维复合气凝胶的光热海水淡化实验结果表明, 阳离子的去除率高达99.9%, 达到了国家的饮用水标准。本文阐明了纤维复合气凝胶光热转换的机理, 为研究高效光热海水淡化材料提供了有益的借鉴, 并拓展了氮化硼气凝胶的应用范围。

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20240403>.

### 参 考 文 献

- [1] Ren H. L., Zheng F., Cao T. W., Wang Q., *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **2024**, doi: 10.1016/j.aosl.2024.100509
- [2] Zhi H., Huang Y., Lin P., Shi S., Dong M., *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **2022**, 15(4), 100190
- [3] Tao G., *Cleaning World*, **2024**, 40(5), 54–56(陶刚. 清洗世界, **2024**, 40(5), 54–56)
- [4] Chai Z., Fang M., Min X., *Nano Energy*, **2024**, 124, 109437
- [5] Yang C., Guo H., Sun H., Xiang N., Wang C., *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, **2024**, 179, 108473
- [6] Zhang S., Liu S., Xu Z., Chen H., Wang J., Li Y., Yar Khan S., Kumar M., *Renew. Energy*, **2024**, 225, 120284
- [7] Liu P., Zhou T., Teng Y. F., Fu L., Hu Y. H., Lin X. B., Kong X. Y., Jiang L., Wen L. P., *CCS Chem.*, **2020**, 2, 1325–1335
- [8] Yang L. S., Kong X. Y., Wen L. P., *Supramolecular Mater.*, **2023**, 2, 100043

- [9] Li T. Y., Lin X. B., Zhang Z. H., Yang L. S., Qian Y. C., Fu L., Zhou S. Y., Chen W. P., Wang Q. C., Li X., Kong X. Y., Xiao H. Y., Jiang L., Wen L. P., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*, 2212819
- [10] Wang Z. B., Guo P., Heng L. P., Jiang L., *Matter*, **2021**, *4*(4), 1274—1286
- [11] Guo P., Zhang S. Y., Jin R. Y., Teng Z. Y., Heng L. P., Wang B., Jiang L., *Colloid Surface A*, **2022**, *648*, 129405
- [12] Wang Z. B., Jin R. Y., Zhang S. Y., Han X., Guo P., Jiang L., Heng L. P., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*(47), 2306806
- [13] Ali S. A., Alshehri S. M., Ahmad T., *Int. J. Hydrogen Energy*, **2024**, *82*, 1182—1195
- [14] Chen L., Navya B. S., Dong C. D., *J. Phys. Chem. Solids*, **2024**, *193*, 112170
- [15] Chen X., Ye L. L., Chen Y., Yan X., Guo X. J., Lang W. Z., *J. Membr. Sci.*, **2024**, *709*, 123109
- [16] Xue Y., Dai P., Jiang X., Wang X., Zhang C., Tang D., Weng Q., Wang X., Pakdel A., Tang C., Bando D., Golberg D., *J. Mater. Chem. A*, **2016**, *4*(4), 1469—1478
- [17] Li H., Jing L., Tay R. Y., Tsang S. H., Teo E. H. T., *Chem. Engin. J.*, **2017**, *328*, 825—833
- [18] Sun Q., Li X. K., Liu F. G., Huang Y. W., *Liaoning Chemical Industry*, **2023**, *52*(10), 1452—1455 (孙骞, 李喜坤, 刘凤国, 黄轶文. 辽宁化工, **2023**, *52*(10), 1452—1455)
- [19] Cao Y. B., *Synthesis of Titanium Oxynitride Nanomaterials and Its Photothermal/photocatalytic Properties*, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, **2021** (曹云波. 氧氮化钛纳米材料的合成及其光热/光催化性能研究, 武汉: 武汉科技大学, **2021**)
- [20] Kaur M., Ishii S., Shinde S. L., Nagao T., *Adv. Sustainable Syst.*, **2019**, *3*(2), 1800112
- [21] Jiang W., Fu Q., Wei H., Yao A., *J. Mater. Sci.*, **2019**, *54*(7), 5743—5756
- [22] Weng Q., Wang X., Bando Y., Golberg D., *Adv. Energy Mater.*, **2014**, *4*(7), 1301525
- [23] Liu M. Y., You W. S., Lei Z. B., Zong X., Ying P. L., Li C., *Chem. J. Chinese Universities*, **2006**, *27*(8), 1488—1491 (刘美英, 由万胜, 雷志斌, 宗旭, 应品良, 李灿. 高等学校化学学报, **2006**, *27*(8), 1488—1491)
- [24] Li Z., He Q., Xu X., Zhao Y., Liu X., Zhou C., Ai D., Xia L., Mai L., *Adv. Mater.*, **2018**, *30*(45), 1804089
- [25] Xue W., Zhao Z., Zhao G., Bi H., Zhu H., Wang X., Qiu J., *J. Energy Chem.*, **2024**, *98*, 364—373
- [26] Tay R. Y., Li H., Wang H., Lin J., Ng Z. K., Shivakumar R., Bolker A., Shakerzadeh M., Tsang S. H., Teo E. H. T., *Nano Today*, **2023**, *53*, 102011
- [27] Li Y., Si W., Pan Y., Chen R., Tan H., Wang Y., Liang J., Hou F., *Appl. Surf. Sci.*, **2024**, *662*, 160111
- [28] Yick S., Yick S., Murdock A. T., Martin P. J., Kennedy D. F., Maschmeyer T., Bendavid A., *Nanoscale*, **2018**, *10*(16), 7566—7574
- [29] Dou J., *The Research of Coupling Between Plasmon Modes and Photothermal Properties Based on TiN Nanospheres*, Lanzhou University, Lanzhou, **2018** (窦杰. 基于氮化钛纳米球的等离子体模式与光热耦合性质的研究, 兰州: 兰州大学, **2018**)
- [30] Sun C. H., Sun W. Y., Dai X. N., Zhang W. X., Liang B. Y., Han D. H., Yi J., *J. Zhongyuan Univ. Technol.*, **2023**, *34*(2), 1—9 (孙长红, 孙为云, 代晓南, 张旺玺, 梁宝岩, 韩丹辉, 宜娟. 中原工学院学报, **2023**, *34*(2), 1—9)
- [31] Xiao P. P., *Preparation and Properties of Titanium Nitride Two-dimensional Materials*, Tianjin University of Technology, Tianjin, **2021** (肖盼盼. 氮化钛二维材料的制备及性能研究, 天津: 天津理工大学, **2021**)
- [32] Tamura M., Iida T., Setoura K., *Nanoscale*, **2022**, *14*(35), 12589—12594
- [33] Wang H., Du A., Ji X., Zhang C., Zhou B., Zhang Z., Shen J., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, *11*(45), 42057—42065
- [34] Wang J. W., Bao X., Yuan M., Zhu C., Zhu L., Chen S., *Sep. Purif. Technol.*, **2025**, *353*, 128324
- [35] Qin D. D., Zhu Y. J., Chen F. F., Yang R. L., Xiong Z. C., *Carbon*, **2019**, *150*, 233—243
- [36] Wu J., Liu D., Sun Y., Wei B., Dai K., Sun Y., Zhang F., Li C., Xue J., Zhu Z., Gao X., Zheng Q., *Carbon*, **2024**, *223*, 118976
- [37] Li W., Jian H., Wang W., Yu D., *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2022**, *634*, 128031
- [38] Jiang J., Jiang H., Xu Y., Chen M., Ai L., *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **2022**, *647*, 128960
- [39] State Administration for Market Regulation, *Drinking Water Sanitation Standards*, **2022**, GB 5749-2022 (国家市场监督管理总局. 生活饮用水卫生标准, **2022**, GB 5749-2022)

(Ed.: Y, K, S)