

炭气凝胶在光热转换领域的研究进展

郎延亭^{1,†}, 何宇^{1,†}, 宋怀河¹, 易黎明², 邓海军², 陈晓红^{1,*}

(1. 北京化工大学 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国航天科工集团第六研究院 41 所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 光热转换是指将太阳能转换成热能, 能够实现利用太阳能这种清洁可再生资源缓解能源匮乏。炭气凝胶材料具有高度发达的孔隙结构、优异的光捕获能力和高光热转换效率等优点, 是当下光热转换领域研究热点。本文首先简单概述了不同光热材料的光热转换原理, 然后从炭气凝胶种类入手分别讨论了石墨烯气凝胶、碳纳米管气凝胶、生物质基炭气凝胶和聚合物基炭气凝胶等几种炭气凝胶作为光热材料的研究进展, 最后介绍了炭气凝胶作为光热材料在太阳能水蒸发、热能储存、光热催化、光热治疗和光热除冰等方面的应用。

关键词: 炭材料; 炭气凝胶; 太阳能; 光热转换; 光热转换应用

中图分类号: TQ127.1[†] **文献标识码:** A

1 前言

太阳通过发射紫外光 (Ultraviolet light, UV)、可见光和红外光 (Infrared light, IR) 来辐射能量, 这些光中往往携带着不同频率的光子。太阳光几乎提供了地球上生命活动所需的所有能量, 如图 1 所示, 除了植物利用太阳光进行光合作用以外, 人们还在光热转换、光电转换、光化学合成等方面对太阳能进行研究利用。其中光电转换是指通过光伏效应把太阳辐射能直接转换成电能, 即生活中所说的太阳能发电; 光化学合成是在光照射下发生化学反应来合成化合物, 例如利用太阳能将 CO₂ 转化成有机化合物, 从而解决碳排放的问题^[1]; 光热转换则是泛指物质在光照射作用下吸收光能转换成热能的现象, 材料的光热转换性能主要由材料的光捕获能力和光热转换效率两方面决定。具有高光热能力的材料可以被广泛应用于水蒸发、光热催化和生物医学等领域。

炭气凝胶是一种内部充满空气, 具有三维网络结构和 90% 以上高孔隙率的多孔炭材料^[2]。材料本身是以碳为主体, 具有良好的光吸收能力, 且由于其独特的高度发达的孔隙结构使其具有低反射率和低导热性, 在光热转换领域具有巨大潜力。

本文首先介绍了光热材料的不同光热原理,

其次从石墨烯气凝胶、碳纳米管气凝胶、生物质基炭气凝胶和聚合物基炭气凝胶 4 类炭气凝胶入手, 分别介绍了不同种类炭气凝胶作为光热材料的研究进展, 最后简要介绍了炭气凝胶光热材料通过光热效应在海水蒸发、热能储存、光热催化、光热治疗和光热除冰等领域的应用进展。

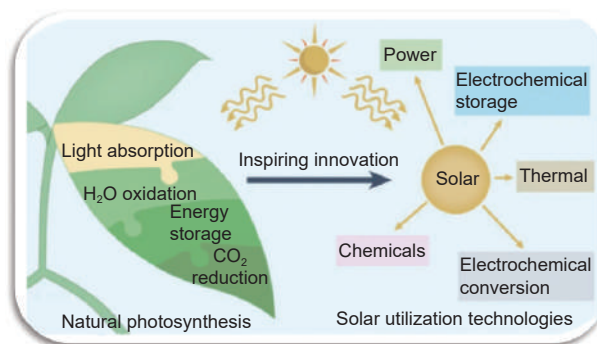


图 1 光合作用以外的太阳能利用^[3]

Fig. 1 Solar energy use other than photosynthesis^[3]

(Reprinted with permission)

2 光热转换原理

光热转换材料的光热转换原理可大致分为 3 类 (图 2): 等离子体共振效应 (Localised surface plasmon resonance, LSPR), 非辐射弛豫和分子热振动^[4]。在光热材料中这 3 种光热机制并非完全独立地存在, 也可以共同存在, 协同作用。

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-05-15

通讯作者: 陈晓红, 教授. E-mail: chenxh@mail.buct.edu.cn

作者简介: [†]郎延亭与[†]何宇为共同第一作者.

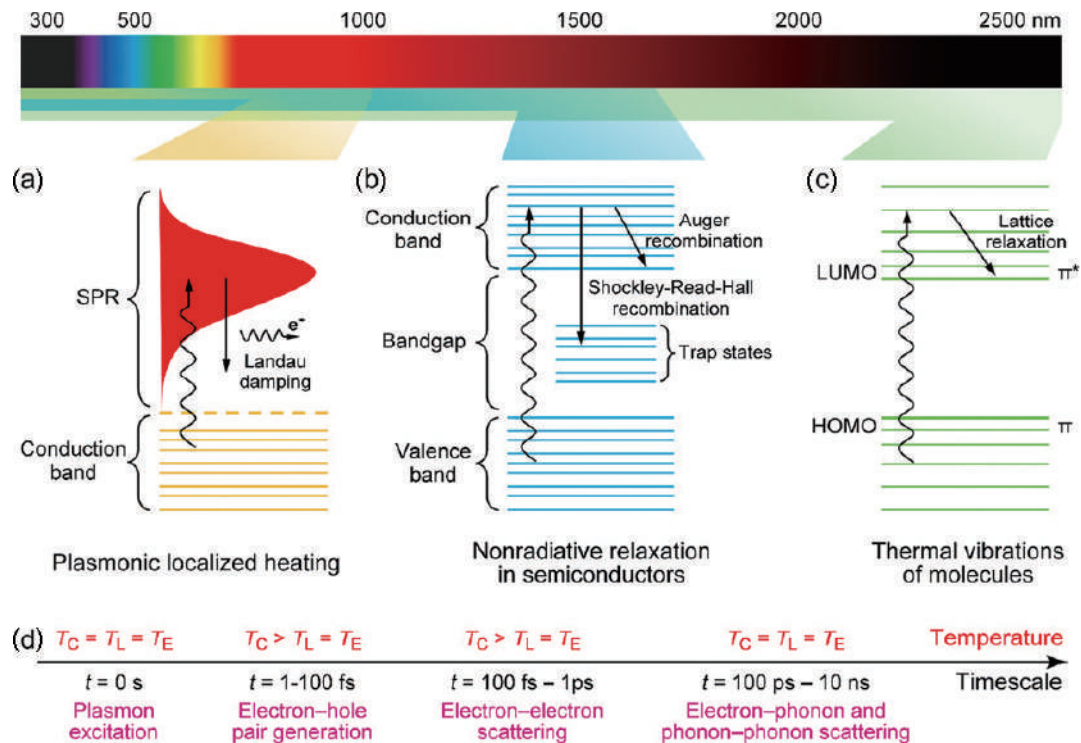


图 2 光热效应的 3 种机理: (a) 等离子体共振效应; (b) 非辐射弛豫; (c) 分子热振动^[4]

Fig. 2 Three mechanisms of the photothermal effect: (a) Plasmonic localized heating; (b) Nonradiative relaxation; (c) Thermal vibrations of molecules^[4] (Reprinted with permission)

2.1 等离子体共振效应

等离子体共振效应机理主要存在于具有大量自由电子的金属材料中,金属材料在光照射下可以通过电子跃迁吸收入射光子的能量。如图 2a 可见,当光子与电子的频率相匹配时,会发生光子诱导电子的相干振荡,即等离子体共振效应,使光吸收和局部场增强,引起电子的集体激发,获得大量高能热电子。这些处于较高能级的热电子通过光子的辐射再发射(辐射弛豫)和朗道阻尼(非辐射弛豫)产生电子-空穴对的方式回到基态,其中热能主要由非辐射弛豫产生^[5,6]。目前,金属纳米材料在光热转换中应用广泛,贵金属材料如 Au^[7-9]、Ag^[10,11]、Pd^[12,13]、Pt^[14] 等已大量应用于各个领域的光热研究中。虽然金属纳米颗粒的光热转换效率较高且生产工艺较为成熟,但金属材料的固有吸收带较窄,在 1 300 nm 以上的较长波长区域光吸收能力较弱,使其应用受到限制。

除金属材料以外,铜硫族^[15]和过渡金属氧化物(如氧化钨^[16]、氧化钼^[17]等)这类具有缺陷的半导体材料,由于本身具有缺陷使材料内部载流子发生偏移,在光照射下会形成类似金属材料的

LSPR 效应,其光热转换能力仅与材料表面载流子浓度有关。

2.2 非辐射弛豫

除了上述这类通过类似金属材料 LSPR 效应实现光热转换的半导体材料以外,非等离子体本征半导体通过直接带间/带内电子跃迁也能够进行光热转换。在半导体材料中有 3 种能带结构,分别是导带、价带和禁带。导带最低点和价带最高点之间的能量差称为带隙。半导体材料被光照射,当入射光所具有的能量大于半导体带隙时,价带中的电子被激发跨越禁带跃迁至导带。因此在电子之前所处的低能带价带区域出现一个空穴,在高能量导带上出现一个电子,从而形成电子-空穴对。激发态电子通过辐射跃迁和非辐射跃迁(图 2b)回到基态,其中非辐射跃迁往往以热能的形式释放材料所吸收的能量,从而导致晶格局部温度升高,赋予半导体材料光热性能^[18]。对于半导体材料而言,其光吸收能力与带隙有关,所以为了拓宽半导体的光吸收波段范围,可以通过调整半导体带隙来实现。带隙较窄的半导体材料,在具有较低能量的入射光照射下就能够使电子发生跃迁进入价带,具有良好的光

热转换性能。该类本征半导体主要是一些过渡金属及其氮化物、碳化物、硼化物和硫化物等,如氮化钛^[19]、二硫化钨^[20]等带隙半导体都具有良好的光热转换性能。

2.3 分子热振动

对于常见的一些具有丰富共轭 π 键的光热聚合物以及无定型炭、石墨烯、炭气凝胶等碳基材料主要通过分子热振动的方式实现光热转换。从图2c可看出,当入射光能量与材料中电子跃迁所需能量相匹配时,电子将吸收光子能量从基态跃迁至激发态。对于这类光热材料,其电子跃迁所需要的能量取决于从最高占据轨道(Highest occupied molecular orbital, HOMO)到最低未被占据轨道(Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO)之间的带隙^[21]。依据分子轨道理论和价键理论可知,在共价化合物中存在 σ 、 σ^* 、 π 和 π^* ,在这些轨道之间存在能量差异,例如在 σ 和 σ^* 之间的能隙较宽,只有当光子具有较高能量时才能激发电子发生跃迁,即只有当波长低于350 nm的紫外光才能激发电子从 σ 轨道跃迁到 σ^* 轨道。与 σ 键相比, π 键的结合强度较弱,电子云密度比较高,因此只需要光子具有很小能量就能激发电子从 π 轨道激发到 π^* 轨道^[22]。所以对于全光谱(250~2500 nm)范围内的太阳光都能够激发 π - π^* 跃迁,被激发的电子会通过电子-声子的耦合弛豫过程弛豫到基态,在耦合弛豫过程中,晶格通过发生热振动释放热能,从而提高材料局部温度。

碳基材料具有能级紧密相连的特点,相对松散的 π 电子结构使其能吸收全太阳能光谱的能量,碳原子的 sp^2 杂化轨道会产生连续能级,使未被结合的自由电子自发共轭形成离域 π 键,这些自由电子很容易被激发发生电子跃迁。此外,随着 π 键数量和共轭程度的增加会引起吸收光谱的红移,HOMO和LUMO之间的能隙会随之减小,使电子跃迁更易发生,分子的光吸收能力随之增强。

光热聚合物也具有高度共轭体系,其光热转换原理与碳基材料一致,主要取决于电子从LUMO中的激发态回归到HOMO中时所释放的能量。常见的已被应用于光热领域的聚合物有聚吡咯(Polypyrrole, PPy)^[23,24]、聚多巴胺(Polydopamine, PDA)^[25]等,不仅具有高吸光性,而且易于合成并具有良好的生物相容性。

3 炭气凝胶分类

如图3所示,根据炭气凝胶原料来源的不同,可将其分为石墨烯气凝胶、碳纳米管气凝胶、生物质基炭气凝胶和聚合物基炭气凝胶4类。炭气凝胶作为光热材料,在太阳能水蒸发、热能储存、光热催化、光热治疗和光热除冰等领域都有所应用。

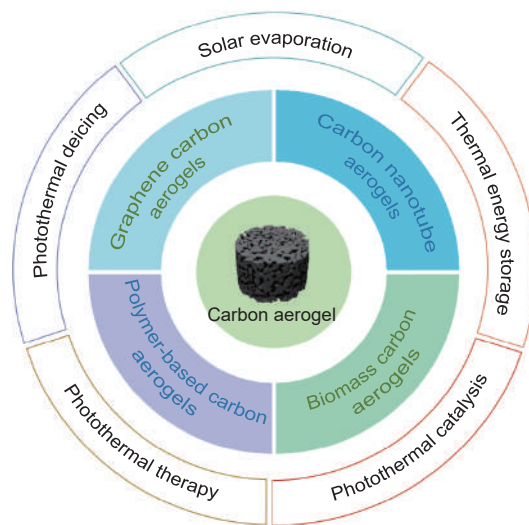


图3 炭气凝胶分类及其在光热领域的应用
Fig. 3 Classification of carbon aerogels and their application in photothermal conversion field

3.1 石墨烯气凝胶

石墨烯(Graphene)是一种由 sp^2 杂化C原子组成的单原子层二维碳纳米材料,在单层石墨烯片层内,由于 π 键的强共轭作用,几乎每个C原子都存在一个未成键电子在石墨烯层间自由移动,使得石墨烯材料具有强导电性。石墨烯层之间以 σ 键相互链接在一起,随着石墨烯层数的增加,材料透光度逐渐降低,对紫外光、可见光和红外光的吸收能量增强。石墨烯在太阳光谱范围(200~2500 nm)内的光吸收率达97%以上,例如,Cui等^[26]开发了一种高效且可扩展的石墨烯蒸发器,利用石墨烯的光热性能,在 1 kW m^{-2} 的太阳光照射下其水蒸发速率高达 $2.01\sim 2.61\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。Chen等^[27]采用氮掺杂的多孔石墨烯片作为光热转换材料,单片多孔石墨烯可以实现高光热转换,其太阳能水蒸发效率高达80%。

石墨烯气凝胶通常是由氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)气凝胶通过水热还原或者肼还原

等方法制备而成,或者直接采用还原氧化石墨烯(Reduced graphene oxide, RGO)水凝胶作为原料,经常压干燥或者冷冻干燥得到。石墨烯气凝胶同样具有宽光吸收能力和高光热转换效率,且与二维石墨烯片相比石墨烯气凝胶的三维网络结构具有更好的隔热性能,能够将光热转换生成的热能更好地保留在气凝胶内部减少热能损耗。Yang 等^[28]首先将氧化石墨烯经水热法制备还原氧化石墨烯水凝胶,再通过冷冻干燥得到三维还原氧化石墨烯气凝胶(3DG)。3DG 不仅能够在 1 个太阳光辐照强度下具有高太阳能水蒸发效率,在较弱太阳光(0.25 个太阳光辐照强度)下仍然能够实现 80% 以上的太阳能水蒸发效率。

三维石墨烯气凝胶的优点是低密度、高隔热性能和有效的光吸收。然而,由于其成本高、机械性能弱、输水能力差,使其在水蒸发领域的应用受阻。针对这个情况,一方面可以在石墨烯表面进行适当的官能团修饰,例如 Fu 及其团队^[29]通过一步水热法制备得到还原氧化石墨烯气凝胶,再经过氧等离子体处理后得到改性还原氧化石墨烯气凝胶(MGA),使其形成亲水性表面。将具有 3D 多孔网络结构的 MGA 直接作为太阳能界面水蒸发装置,不仅具有 RGO 所固有的优异

光吸收性能和低热导率,而且经过改性处理后所具有的亲水表面改善了供水能力,进而提升了水蒸发速率。另一方面则可以利用天然生物质材料所具有的大量多孔结构和发达的毛细管道来提供足够的水分运输。如图 4a 所示,Kong 等^[30]以微泡和冰晶作为模板,通过低温水热还原和常压干燥,制备了一种新型三维多孔结构的玉米秸秆/还原氧化石墨烯复合气凝胶,为提高材料亲水性还引入尿素制备掺氮玉米秸秆/还原氧化石墨烯复合气凝胶。该复合气凝胶既有玉米秸秆的强大输水通道,还具有石墨烯材料优异的光吸收性能。在一个太阳光辐照强度下原始材料的海水蒸发速率达 $2.71 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,掺氮后其海水蒸发速率提高到 $3.22 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。并且在多次水蒸发循环后,蒸发性能几乎不变,表面无明显盐沉积,表明该复合气凝胶除优异水蒸发性能外还具有耐盐性和稳定性。

3.2 碳纳米管气凝胶

碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)是由碳六元环构成的类石墨烯平面卷曲而成的一维纳米级中空管,根据石墨烯层数不同可分为单壁碳纳米管和多层碳纳米管。碳纳米管和石墨烯一样具有强光热转换性能,且根据石墨烯折叠方式的

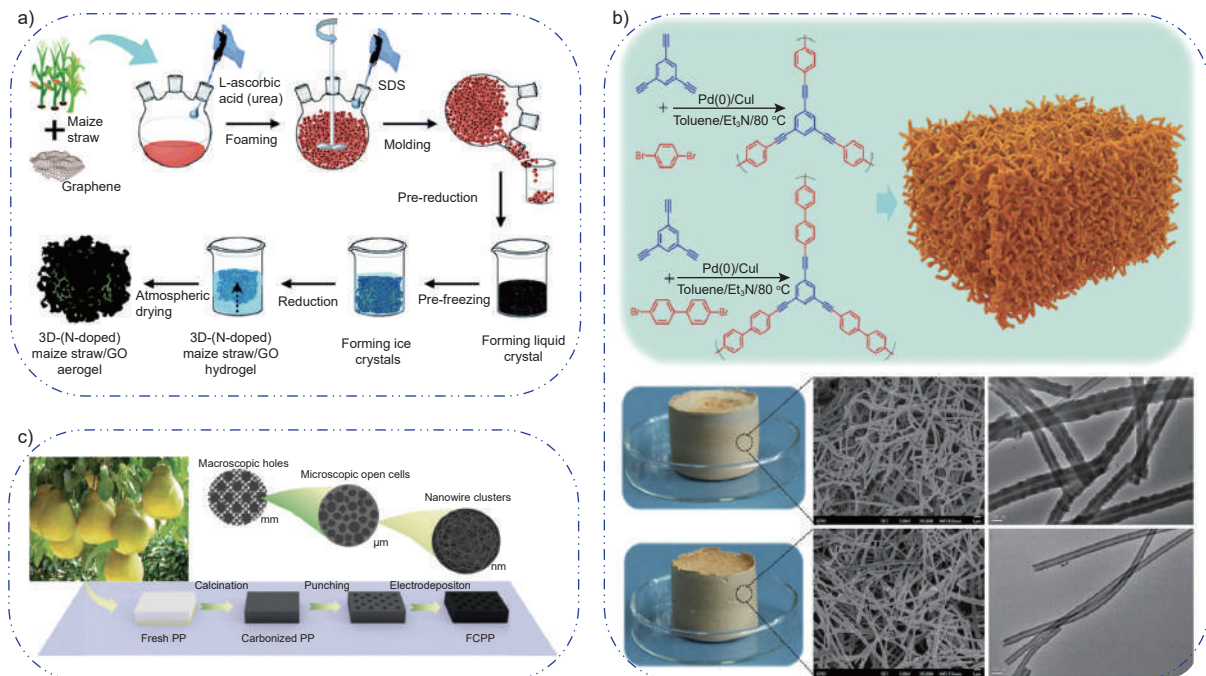


图 4 (a) 玉米秸秆/还原氧化石墨烯复合气凝胶制备流程^[30]; (b) 共轭微孔聚合物的制备及其碳纳米管气凝胶的微观结构^[31]; (c) 柚子皮基炭气凝胶的制备^[32]

Fig. 4 (a) Preparation process of maize straw /reduced graphene oxide composite aerogel^[30]; (b) Preparation of conjugated microporous polymers and their microstructure in carbon nanotube aerogels^[31]; (c) Preparation of teak peel-based carbon aerogels^[32] (Reprinted with permission)

不同碳纳米管的吸光能力有所不同,一般而言多壁碳纳米管的光吸收范围更加广泛。Yin等^[31]利用真空电子束蒸发法制备了垂直生长的碳纳米管(VACNT),该VACNT表现出类似黑体的光学性能,在200~2000 nm波长范围内对太阳能光的吸收率可达98%~99%,具有极低的反射率和优异的光热转换能力。在太阳光下,将VACNT薄层压在水面上层即可产生明显的水蒸气,VACNT薄层可有效吸收太阳光并使水面温度升高,VACNT存在下水蒸发速率是纯水水蒸发速率的10倍。

碳纳米管气凝胶一般可以通过将CNTs分散在有机溶剂中,经过适当的自组装和冷冻干燥等过程形成具有三维网络结构的碳纳米管气凝胶材料。除此之外还可以通过化学气相沉积和3D打印等方法使CNTs相互搭建来制备碳纳米管气凝胶。碳纳米管气凝胶不仅具有广泛的光吸收能力,而且相比于CNTs其具有更发达的孔隙结构和低热导率,使其在光热领域的应用更加具有潜力。Mu等^[33]将制备得到的共轭微孔聚合物(CMPs)进行简单炭化来合成单片碳纳米管气凝胶(图4b)。CMPs是一类具有刚性共轭结构、大比表面积、可调控孔结构和良好稳定性的多孔有机聚合物,经过炭化处理后,CMPs的微观结构和宏观结构保持不变。在 1 kW m^{-2} 太阳光照射下,实现了高达86.8%的太阳能水蒸发效率,显示了作为太阳能蒸发器光热材料的巨大潜力。除了纯碳纳米管气凝胶作为光热材料以外,还可通过炭材料-金属材料协同作用作为光热材料。Zhan等^[34]制备了一种负载金纳米颗粒的碳纳米管气凝胶,CNTs与金纳米颗粒协同作用,在250~2000 nm的波长范围内具有96%的光吸收,在 1 kW m^{-2} 太阳光照射下,太阳能水蒸发效率在82.8%。

3.3 生物质基炭气凝胶

生物质主要是由生物体及类生物体组成,包括植物、动物、真菌、细菌及各种废弃物。在各种生物质材料中,纤维素是制备炭气凝胶的最佳原料之一。纤维素在自然界中分布最广、含量最多,既可以从木材、竹材、农作物秸秆中获得木质纤维素,也可以从细菌中获得细菌纤维素,将获得的纤维素制备成纤维素气凝胶后经过炭化得到纤维素炭气凝胶。除纤维素以外,淀粉、蛋白质等天然有机高分子化合物也可以经过聚合、

炭化后得到具有三维网络结构的炭气凝胶。而冬瓜、柚子皮、玉米瓢等本身就具有三维网络结构的生物质材料,可以直接经过高温炭化后制备成生物质炭气凝胶。

生物质炭气凝胶不仅具有三维网络结构,而且还保留了生物质本身具有的丰富孔道结构,与其他光热材料相比制备成本更低,更具有优势。Duan等^[35]制备了一种表面沉积聚多巴胺并负载铜纳米粒子(Cu-NPs)的细菌纤维素炭气凝胶。在聚多巴胺、炭材料和金属材料的共同作用下,通过LSPR效应和电子-声子耦合作用进行光热转换,材料在太阳光照射下能够达到 $2.07\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 的水蒸发速率。Li等^[36]从棉花中提取出纤维素,使用乙烯基三甲氧基硅烷交联和聚吡咯包覆后制备了一种改性纤维素炭气凝胶(CVCAs-P)。CVCAs-P的三维网络结构、低热导率(0.32 W/mK),以及高吸光度(94%~97%)使它成为一种理想的太阳能光热材料。在一个太阳光的光强强度下,CVCAs-P的水蒸发速率达到 $1.54\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。Xu等^[37]将碳量子点(CDs)引入淀粉气凝胶中,经炭化后制成碳点改性淀粉炭气凝胶(C-CDSA)。C-CDSA表现出较强的光捕获能力,并且具有低制备成本和生态友好的优势,将其作为太阳能水蒸发器,在一个太阳光照射下表现出高达 $2.29\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 的水蒸发速率,太阳能水蒸发效率为93.5%,在酸性、碱性、高盐(质量分数10%)和有机污染物溶液中都表现出稳定的水蒸发性能。

生物质大分子所制备的炭气凝胶一般还需要经过聚合以后才能进行炭化得到,而直接利用生物质本身炭化则可以省去聚合过程。Geng等^[34]采用废弃柚子皮作为光热材料,由于柚子皮内部互连的泡沫状结构,经过干燥、炭化后可以获得柚子皮基炭气凝胶。利用柚子皮中固有的高孔隙率,并结合仿生分形设计在宏观、微观两个层面对柚子皮炭气凝胶进行造孔,增强了光吸收能力,太阳光吸收率达到98%以上,水蒸发速率为 $1.95\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,并实现了92.4%的太阳能水蒸发效率(图4c)。除了单独利用生物质炭气凝胶作为光热材料以外,还可以与金属、半导体等其他光热材料复合,多种材料协同作用,提高其光热转换效率。例如Zhu等^[38]采用自然界中资源丰富的茄子制作生物质炭气凝胶,并在多孔茄子表面负载 Fe^{3+} ,经冷冻干燥、炭化制备得到 $\text{Fe}/$ 茄子

基炭气凝胶协同作用的光热材料,在模拟太阳光照射下,120 s内材料能够快速升温至 48.2 °C,光吸收率达到 98.01%。Liu 等^[39]以冬瓜为原料,经过水热处理、高温炭化、浸渍等工艺,制备了 $Ti_3C_2T_x$ /炭气凝胶(CA)。负载 $Ti_3C_2T_x$ 的炭气凝胶具有多孔的微观结构、大的比表面积和高吸光度,固定在 CA 中的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片有助于光热转换性能的提升,在太阳光照射下, $Ti_3C_2T_x$ /CAs 的水蒸发速率为 $1.48 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,太阳能水蒸发效率为 92.3%。

3.4 聚合物基炭气凝胶

聚合物基炭气凝胶一般通过对有机气凝胶高温炭化制备得到,其有机前驱体大多以间苯二酚/甲醛、三聚氰胺/甲醛、苯酚/甲醛等作为原料经过溶胶-凝胶和干燥来合成。与生物质炭气凝胶相比,聚合物基炭气凝胶可以通过调节有机气凝胶前驱体参数来调整炭气凝胶微观结构和网络骨架,使其光热转换性能得以提升。如图 5 所示,Zhu 等^[40]以间苯二酚和甲醛为原料,通过溶胶-凝胶法、超临界干燥和高温炭化合成了炭气凝胶。实验发现低密度炭气凝胶内部具有的高度多孔结构以及碳纳米颗粒的光吸收能力,气凝胶的三维多孔结构可使入射光在气凝胶内部穿透更深,入射光被多次散射后最终被碳纳米颗粒吸收,从而导致极低的反射率和高吸光度。当炭气凝胶密度低于 70 mg cm^{-3} 时,炭气凝胶在 $400 \sim 2000 \text{ nm}$ 范围内的总光反射率低于 0.24%,这说明该炭气凝胶具有超黑材料特性。Wang 等^[41]

同样利用间苯二酚和甲醛制备出炭气凝胶(CAs),并提出 CAs 中的小尺寸导体效应可以增加表面电子浓度,从而使其光吸收能力增加,在宽频率($200 \sim 3000 \text{ nm}$)上具有很强的光吸收,并且 CAs 本身具有良好的隔热性能,能够避免过多的热损失。在一个太阳光照射下,干燥状态下的 CA-5 快速升温并恒定在 87.6 °C,在水体中的水蒸发速率达到 $1.29 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,对 CA-5 进行 CO_2 活化处理后,其水蒸发速率升高至 $1.37 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,最高能量转化效率达 87.51%。

除了直接使用酚类单体与甲醛聚合制备成酚醛炭气凝胶以外,还可以采用其他含有多环芳烃和酚类化合物煤焦油等物质通过聚合制备得到的炭气凝胶作为光热材料,不仅成本降低,而且将煤焦油这类废弃物二次利用。Yan 等^[42]以富含烷基酚类化合物的低温煤焦油(LTCT)为原料,通过聚合、冷冻干燥、炭化等工艺制备了煤焦油基酚醛炭气凝胶(CPCAs)。由于 LTCT 中存在多环芳烃,能够实现与 CNTs 相当的优异光吸收和光热转换,使得 CPCAs 具有较强的光热转换性能,在太阳光照射下实现了 $1.81 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的高蒸发速率和 93.4% 的太阳能水蒸发效率。此外,CPCAs 还具有良好的抗盐性能,在各种工业废水中能够保持稳定的水蒸发性能。Xie 等^[43]以褐煤乙醇可溶部分(ESP)为原料,三聚氰胺为骨架,通过聚合/凝胶化、真空干燥和炭化制备褐煤基酚醛炭气凝胶(LPCA)。LPCA 表现出高吸光度(97.3%)和高孔隙率(95.4%)以及分级多孔通道,

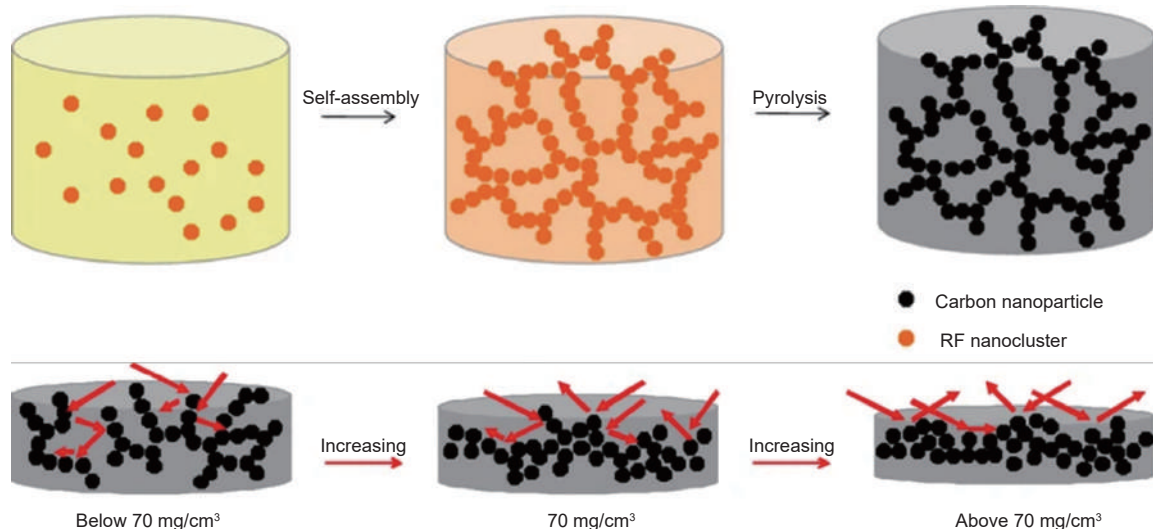


图 5 低密度炭气凝胶的制备及不同密度下炭气凝胶光反射示意图^[40]

Fig. 5 Preparation of low-density charcoal aerogel and schematic light reflection of carbon aerogels at different densities^[40] (Reprinted with permission)

褐煤中的多环芳烃赋予了 LPCA 超高的光吸收能力从而进一步提高其光热转换性能。在太阳光照射下, LPCA 的能源转换效率达到 93.5%, 在高浓度盐水和含有金属离子和染料的废水中仍然能够保持稳定的水蒸发速率, 具有良好的循环稳定性。

综上所述, 对于炭气凝胶光热性能而言, 会受到孔隙结构、表面粗糙程度和共轭结构等内部因素的影响。炭气凝胶大多具有高孔隙率, 但其孔径分布的不同会对光热性能有所影响, 其中微孔所导致的小尺寸导体效应能够增强材料的光热转换性能, 微结构的尺寸越小, 会对电子产生越强的限制作用, 使得反射波的强度大幅度降低, 材料的光吸收率增强^[41]; 炭气凝胶孔结构的存在使得其表面较为粗糙, 在光照射条件下, 更多光被折射进入炭气凝胶材料内部而不是被表面反射回去, 有利于其光热转换性能的提高^[40], 此外, 较为粗糙的表面有利于其他官能团复合, 实现材料进行改性^[29]; 炭气凝胶中的碳主要由 sp^2 和 sp^3 混合组成, 其中 sp^2 杂化碳原子的存在会使得电子云较为松散的 π 键增加, 光引发电子跃迁的能力被增强, 共轭作用也被增强, 石墨烯气凝胶和碳纳米管气凝胶中都具有大量 sp^2 杂化碳原子的存在, 使得二者在光热性能方面有着得天独厚的优势^[28,32]。

4 炭气凝胶光热材料的应用进展

4.1 太阳能水蒸发

水资源是维系生命健康的基本物质, 尽管地球表面约 2/3 被水覆盖, 但其中 97% 是咸水, 淡水

资源仅占 3% 左右, 其中还有 2% 以上部分以冰川、冰山等形式存在, 可用淡水资源不足 1%。据估计, 2025 年全球约 3/4 的人口都将面临水资源匮乏的问题^[44]。将海水进行脱盐处理是解决淡水资源短缺的有效方法之一, 传统的海水淡化方法如膜蒸馏法^[45,46]、电渗透法^[47] 等目前已经投入工业生产, 但在过程中存在耗能高、成本高等问题。相较而言利用光热水蒸发方法进行海水淡化, 结合了地球上最丰富的两种自然资源——太阳能和海水, 有望实现一种零能耗、低成本的海水淡化技术。

如图 6a 所示, 太阳能水蒸发 (Solar Steam Generation, SSG) 装置根据光热转换材料所处位置的不同又可以分为 3 类^[48]: (1) 底部加热装置; (2) 整体加热装置; (3) 界面加热装置。底部加热是将光热材料放置在容器底部, 即光被在底部被吸收后转换成热能来加热整个水体并生成水蒸气; 整体加热装置是指将光热材料均匀分散在水体中, 虽然增大了光吸收面积但转换得到的热能仍然需要加热整个水体后产生蒸汽。这两种方式都使大部分热能被损耗, 因此提出了仅发生在空气-水界面处的太阳能界面水蒸发装置。界面加热是将光热转换得到的热能集中在空气-水界面处, 仅将界面处的水加热并产生蒸汽, 不需要加热水体整体, 提升了太阳能-热能转换效率。

简易的太阳能界面水蒸发装置就是将光热材料直接放置在海水表面, 利用其密度小于海水的特点使其自浮于海水表面, 当太阳光照射在光热材料表面时, 少部分太阳光被透射或者反射, 大多数太阳光被吸收并被转换成热能。例如

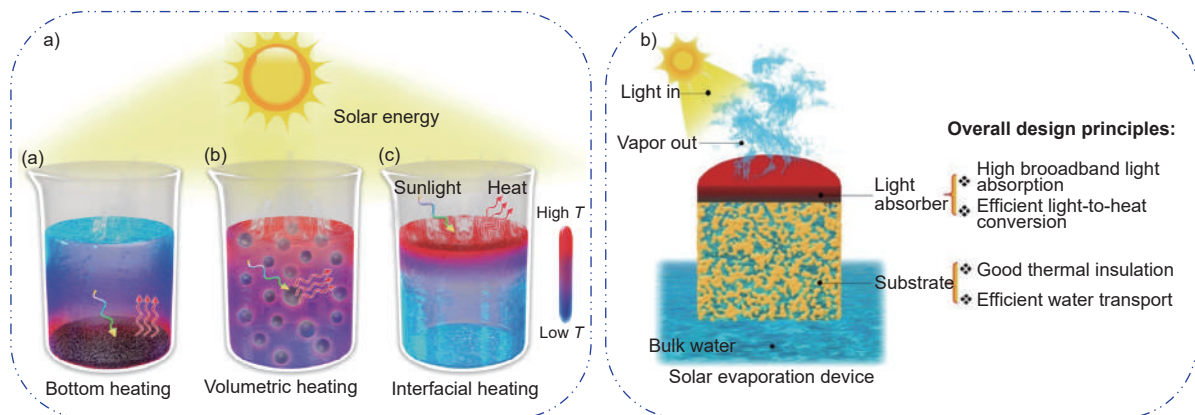


图 6 (a) 三种太阳能水蒸发装置^[48]; (b) 三维太阳能界面水蒸发装置^[49]

Fig. 6 (a) Three types of solar water evaporation devices^[48]; (b) Three-dimensional solar interface water evaporation device^[49] (Reprinted with permission)

Zhou 等^[50]采用刮刀涂布、溶剂交换、冷冻干燥和高温热解等方法制备了一系列密度为 54.4 mg cm^{-3} 的芳纶纳米纤维 (ANF) 炭气凝胶薄膜。ANF-1500 炭气凝胶膜的优异光吸收是由于其粗糙表面和炭材料固有光吸收, 显示出了优异的光热转换能力。在光照射下 (100 mW cm^{-2}), ANF-1500 气凝胶膜表面温度快速升温并稳定在 $70.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 随着光辐照强度升高至 300 mW cm^{-2} , 其表面温度升高至 $133.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 并且在长期 (4 500 s) 光照射下其光热性能保持稳定。

但光热转换得到的热能一大部分被用于水蒸发, 而另一部分则以热对流、热传导、热辐射等多种形式被损耗。由于水的导热系数比较高 (约 $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), 当光热材料与海水直接接触时热量会向海水传递, 造成热量损耗。为解决这一问题可以在光热材料与海水主体之间引入隔热层 (图 6b), 例如聚苯乙烯、气凝胶等具有低导热系数的材料, 将热能集中在界面处, 减少热能损耗。但水蒸发只发生在空气-水界面处, 只有水被输送到表面处才能顺利进行水蒸发过程, 故而在设计太阳能界面水蒸发装置时又需要考虑到良好的水分运输系统, 使水分能够连续运输到界面处。

炭气凝胶既可以作为光热层与其他材料复合形成太阳能界面水蒸发器, 也可以利用炭气凝胶的低热导率和大量微孔结构使其自身作为蒸发器, 既可以减少热量损耗也可以利用毛细管道进行水分运输, 从而实现高水蒸发速率和高太阳能水蒸发效率, 同时炭气凝胶的低密度使其能够自浮于海水表面。Xie 等^[43]以褐煤醇溶性部分 (ESP) 作为原料, 三聚氰胺作为骨架, 通过溶胶-凝胶法、真空干燥和炭化等工艺制备得到的整块式高强度褐煤基酚醛炭气凝胶 (LPCA), 并且 LPCA 本身可直接作为太阳能界面水蒸发装置进行海水淡化。如图 7 所示, 将 LPCA 置于海水表面, 在太阳光照射下, 其光吸收率可达 97.3%, 仅有少量光被反射。被吸收的光子能量转换成热能, LPCA 的低导热率, 使能量损耗减少, 热能被约束在炭气凝胶内部用于水蒸发。高孔隙结构的存在使海水通过毛细作用被运输至光热材料表面, 同时 LPCA 经过蒸发产生的水蒸气在材料表面快速逸出, 使海水蒸发能够持续进行。该蒸发器在 1 个太阳光照射下, 实现了 $2.40 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

的高海水蒸发速率和 93.5% 的太阳能水蒸发效率。Yan 等^[51]通过冷冻干燥含有聚丙烯腈 (PAN) 纳米纤维的海藻酸钠 (SA) 溶液后进行煅烧来制备炭纤维增强的炭气凝胶 (CNFA), 制备了一种全炭气凝胶太阳能蒸发器。CNFA 具有高达 97.2% 的光吸收率和出色的光热转换性能, 同时杂原子 (N 和 O) 掺杂和多孔结构赋予 CNFA 亲水性, 使蒸发器具有强大的水传输能力和抗盐能力。同时提出炭气凝胶蒸发器的 3D 结构可以利用其侧壁吸收环境热量来诱导自然蒸发的协同作用, 获得极高的水蒸发速率 ($3.82 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 和太阳能水蒸发效率 (95.5%)。CNFA 在高盐度、腐蚀性海水中也能正常工作, 具有长期稳定性和耐久性。

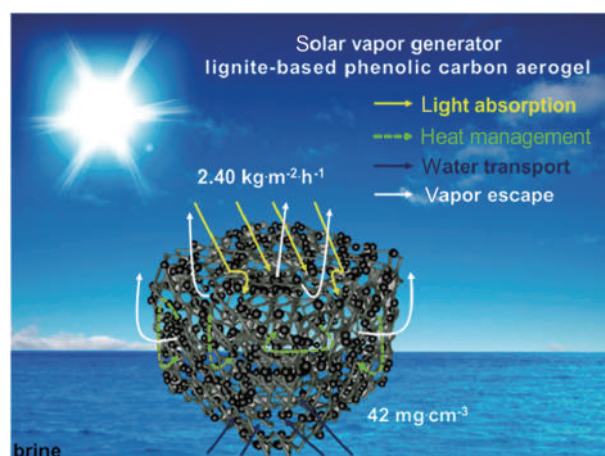


图 7 整体式酚醛基炭气凝胶太阳能界面水蒸发装置^[43]
Fig. 7 Integral phenolic-based carbon aerogel solar interface water evaporation device^[43] (Reprinted with permission)

除了对海水进行淡化以外, 还可以利用炭气凝胶的光热效应进行污水净化来获得水资源。炭气凝胶本身作为碳基材料具有亲油性和疏水性, 可以起到油水分离的作用, 在光照射下炭气凝胶进行光热转换引起局部温度升高, 使油类物质在高温下黏度降低并吸附泄漏的石油, 从而实现治理由石油泄漏引起的水体污染。Hu 等^[52]制备了一种具有高弹性、高光热转换能力和高吸附能力的三维石墨烯气凝胶 (MEGA), 用于除去污水中泄露的原油。MEGA 呈现出层状结构, 并在其表面均匀沉积了疏水性聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 这不仅提高了炭气凝胶的疏水性 (在空气中的水接触角为 152.7°), 而且赋予了其强大的吸油能力。在光照条件下, MEGA 在 100 s 内快

速升温至 80 °C, 高温使原油黏度迅速降低, 并在 40 s 内即可吸附原油。同时, MEGA 具有较强稳定性, 在 10 次循环后仍然能够保持 90% 以上的原油吸附容量, 这些优良特性都表明 MEGA 在污水净化领域具有良好的应用前景。

4.2 热能储存

在现有的储能方式中, 潜热储能是一种储能密度高、成本低且实用的方式之一。相变材料 (Phase Change Materials, PCMs) 是一种实现潜热储能的理想材料, 在升温 and 降温过程中 PCMs 会发生相态变化并伴随着热量的吸收和释放, 由此实现能量的储存和利用^[53]。

将光热材料与相变材料进行复合, 能够使太阳光转换生成的热能以合适的形式进行储存, 不仅能够减少能源浪费, 而且利用太阳能这种丰富的可再生资源还可以缓解化石燃料短缺问题。Ji 等^[54]以廉价的柚子皮作为原料, 经过炭化后制备成的三维多孔网状炭气凝胶 (CPCMs) 作为光热材料, 固体石蜡作为 PCMs 浸渍封装在 CPCMs 中。在太阳光照射下, CPCMs 复合材料通过光热转换产生热能, 再通过石蜡相变成功地储存热能, 该复合材料表现出 159.9 J g^{-1} 的潜热蓄热能力和 85.1% 的太阳能水蒸发效率。Wang 等^[55]使用柠檬酸作交联剂, 通过冷冻干燥和高温裂解制备了羧甲基纤维素钠炭气凝胶 (CCAs), 然后将聚乙二醇 (PEG) 有机相变材料渗入到 CCAs 中, 得到 PEG/CCAs 复合相变材料。该复合材料在 52.1 °C 下发生熔化, 具有 173.4 J g^{-1} 的潜热, 由于 PEG/CCAs 还具有较低的电阻率 (1.64Ω), 还可以通过电热转换 (在 1.4 V 电压下电热转换效率为 55.6%) 实现热能储存。

4.3 光热催化

1972 年 Fujishima 和 Honda 发表了光催化的奠基性论文后^[56], 近半个世纪无数科研人员投身于光催化领域, 并在该领域取得了丰富研究成果。但由于大多数半导体催化剂对太阳光的吸收范围有限、光能利用率低, 导致光催化效率始终不尽人意。为了解决这一问题, 提出将光化学与热化学相结合, 采用光热催化为化学反应的发生提供更多能量。

光热催化技术不仅可以提高太阳能利用率, 还能够减少能源损耗, 使反应在比较温和的条件下发生。在光热催化过程中, 光热材料不仅通过

光热效应将光能转换为热能, 而且还承担着催化反应进行的任务。一般而言, 光热催化体系存在两种模式: 第一种是光能辅助热催化, 与传统热催化相比, 光热材料吸收光子的能量, 并通过光热转换效应转化成热能, 热能的释放提高催化剂活性, 进一步促进催化反应; 另一种则是热能辅助光催化反应, 催化剂本身不具有热催化能力, 或者催化剂吸收光转换成热能并不足以达到热催化反应所需能量。这种情况主要是通过光热材料在光激发下的电子跃迁和载流子移动等过程实现对反应的促进。除此之外, 在一些反应中还存在光能和热能协同催化的情况, 协同催化并不是两种催化机制的简单相加, 而是一种复杂的协同作用, 使反应的催化活性远远高于单一的催化反应。

炭气凝胶作为一种高效的光热转换材料, 其在光热催化领域也有所应用。Yao 等^[57]提出了一种基于磺酸官能团化氧化石墨烯气凝胶 (SGA) 的光热催化系统, 来实现在不需要过量反应物和额外脱水剂情况下提高乙酸乙酯产率。如图 8a 所示, SGA 在光照射下通过光热效应 (吸光度达 90%), 为反应提供了所需热量, 并且该热量促进了乙酸乙酯的蒸发, 从而促进了乙酸和乙酯反应过程中产物的移除, 使得酯化反应平衡不断移动, 从而提高了乙酸乙酯的平衡产率。具体表现为, 乙酸转化率达 77%, 远高于 62.5% 的理论极限值。

4.4 光热治疗

近年来, 癌症的发病率和致死率在全球范围内都在不断升高。癌细胞的存在会导致细胞分裂和失控, 在早期多无症状难以被发现, 已成为人类社会最大的健康问题。传统的单一切除手术、化疗和放疗存在着不良反应、耐药性差、效果不佳和容易复发等问题, 目前人类在迫切寻找具有高疗效、副作用小的新型癌症治疗方法。传统药物化疗、放疗会对正常组织产生毒性, 由光热剂 (Photothermal Agents, PTAs) 在近红外光激发下产生热量来消融肿瘤局部组织的光热疗法 (Photothermal Therapy, PTT) 是一种对身体几乎无害的治疗方法^[59]。

PTAs 在近红外光的激发下, 吸收光能并转换成热能, 引起局部温度升高, 当温度升高超过细胞耐受阈值时, 光热效应就会使肿瘤细胞中的

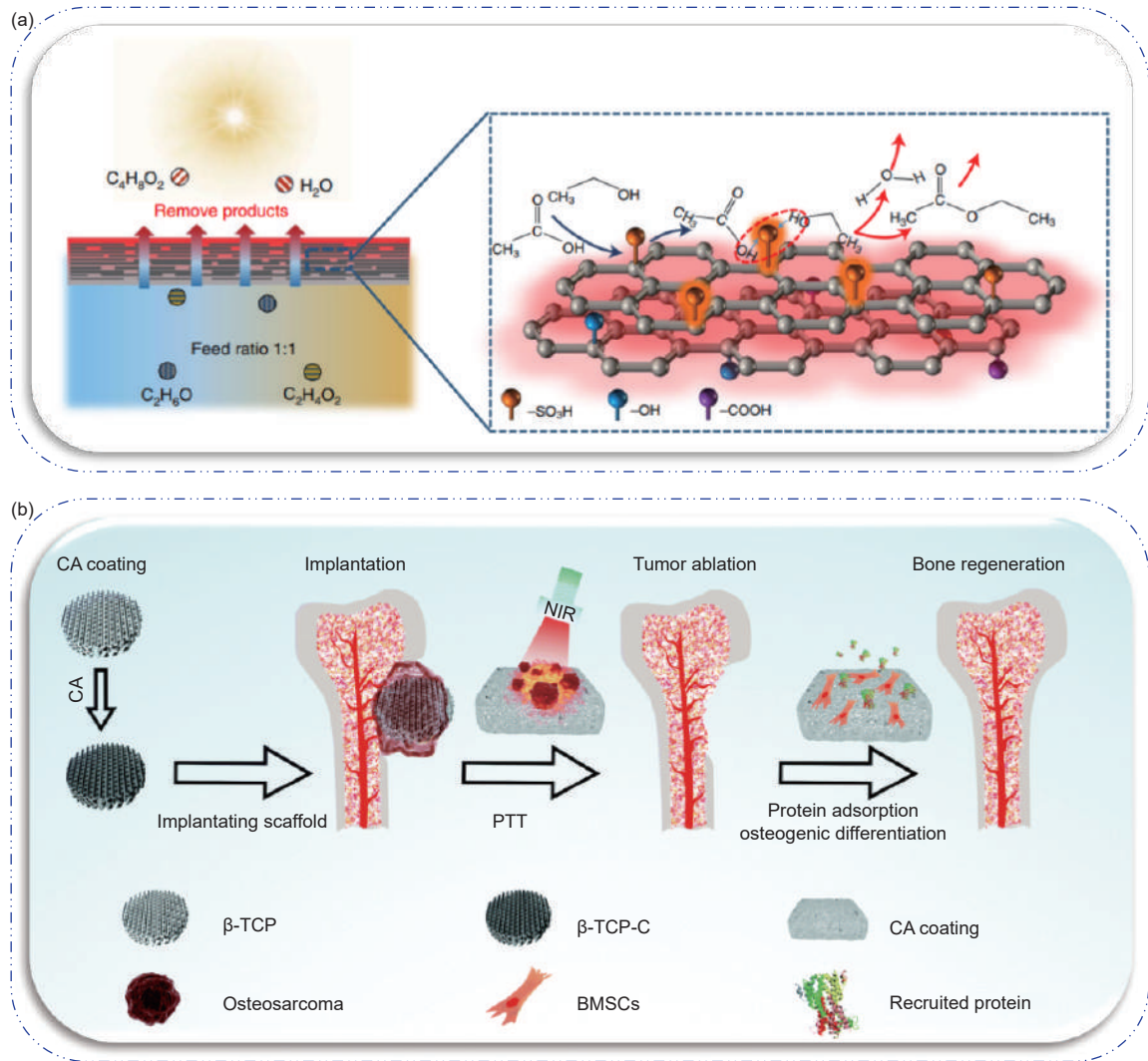


图 8 (a) SGA 光热催化机理示意图^[57]; (b) β -TCP-CA 平台治疗骨肉瘤和骨再生示意图^[58]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of SGA photothermal catalysis mechanism^[57]; (b) Schematic diagram of the β -TCP-CA platform for the treatment of osteosarcoma and bone regeneration^[58] (Reprinted with permission)

蛋白质失活和染色体紊乱, 最终导致癌细胞死亡。和传统治疗方式相比, 光热治疗具有治疗时间短、热转化快、效果显著的优点。炭气凝胶材料因其本身所具有的强光热转换能力、好的生物相容性、大的比表面积和低密度等优点使其在光热治疗领域具有广阔的应用前景。Dong 等^[58] 制备了一种新型的多功能 β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 生物陶瓷平台 (β -TCP)-炭气凝胶 (CA) 涂层。如图 8b 所示, 利用 CA 涂层的光热能力, 在 808 nm 激光照射下产生足够的热量进行热疗, 来实现骨肉瘤肿瘤细胞的彻底消融。骨肉瘤有效消融后, CA 涂层的蛋白吸附能力将加速 BMSCs 的粘附和成骨分化, 随后刺激新骨的形成并增强成骨。

4.5 光热除冰

结冰是自然界常见的现象, 但冬季积冰给工

业生产和日常生活带来了许多困扰, 例如风电场涡轮叶片上的积冰, 输电线路大范围覆冰等现象一方面会降低生产效率, 另一方面则可能造成安全事故。如何防止结冰和快速除冰是近年来的研究重点, 光热除冰技术只需要利用太阳能, 相比其他除冰方法更加环保且低能耗。在除冰过程中, 光热材料通过吸收太阳光转换成热能, 引起局部温度升高, 然后热量会传递给冰, 使冰吸热后融化, 实现光热除冰^[60]。作为具有优异光热性能的炭气凝胶材料, 同样可以被应用于光热除冰中, 例如 Yu 等^[61] 将多壁碳纳米管与气凝胶复合形成疏水大孔气凝胶 (PMX), PMX 既能够通过光热效应进行除冰, 还可以利用其低热导率最大限度减小热量损失, 保证了在微弱太阳光照射下也能够高效缓冰除冰。

5 结语

本文分析了不同种类炭气凝胶作为光热转换材料,并讨论了其在光热转换领域中的多种应用,总结出了炭气凝胶作为光热材料具有以下优点:(1)具有低热导率、优异的吸光率和光热转换效率。炭气凝胶本身具有较低的热导率,能够将经过光热转换后得到的热量约束在材料内部,减少能量损耗。并且炭气凝胶的高孔隙率(90%以上)使其对光的反射率低,具有优异的光吸收能力,使其在光热应用中能够实现超高的光热转换效率。(2)结构可设计性。在宏观方面,炭气凝胶作为蒸发器时,其本身就可以直接作为隔热层;通过调节三维炭气凝胶的高度还能够实现从环境中吸收能量用于水蒸发,使太阳能水蒸发效率接近100%。在微观方面,炭气凝胶中构建的丰富的多级互连孔道结构,能促进水的输送和盐的扩散,实现良好的抗盐性能,使炭气凝胶在实际海水蒸发应用中具有耐久性。

虽然在光热转换材料中炭气凝胶具有明显优势,但在实现大规模光热转换应用中仍存在诸多挑战:(1)炭气凝胶在制备过程中,需要经过干燥实现溶剂的去除,干燥后的气凝胶体积有所收缩,力学性能也会变差,在外力作用下容易发生损坏,使其在光热领域的实际应用受到限制。为了增强其力学性能,可以尝试采用碳纤维、三聚氰胺泡沫等增强体与炭气凝胶复合。(2)炭气凝胶的制备成本较高、制备周期较长,很难实现大面积或大体积地制备炭气凝胶光热材料,在后续研究中,找寻更加简单便捷的制备方法仍然是重中之重。(3)目前炭气凝胶在光热转换领域的应用大多数仍然停留在实验室研究方面,与实际应用还具有一定距离。如在海水淡化方面,海面上实际情况瞬息万变,气候、风浪等外在因素可能会导致诸多问题。而在光热治疗领域,炭气凝胶作为光热剂,在生物体体内的安全性、代谢、降解等问题还需要进一步实验验证。

上述问题若能得以解决,能够进一步拓展炭气凝胶在光热转换领域的应用,也有希望实现炭气凝胶光热材料市场化。

参考文献

[1] Lv J Q, Xie J F, Mohamed A G A, et al. Solar utilization beyond

- photosynthesis[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2023, 7(2): 91-105.
- [2] Rana A, Cid Gomes L, Rodrigues J S, et al. A combined photobiological-photochemical route to C_{10} cycloalkane jet fuels from carbon dioxide via isoprene[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(24): 9602-9619.
- [3] Pekala R W. Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde[J]. *Journal of Materials Science*, 1989, 24(9): 3221-3227.
- [4] Cui X M, Ruan Q F, Zhuo X L, et al. Photothermal nanomaterials: A powerful light-to-heat converter[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(11): 6891-6952.
- [5] Holm V R A, Greve M M, Holst B. A theoretical investigation of the optical properties of metal nanoparticles in water for photothermal conversion enhancement[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 536-542.
- [6] Ma X C, Sun H, Wang Y C, et al. Electronic and optical properties of strained noble metals: Implications for applications based on LSPR[J]. *Nano Energy*, 2018, 53: 932-939.
- [7] Cao Y, Li S Z, Chen C, et al. Rattle-type $Au@Cu_{2-x}S$ hollow mesoporous nanocrystals with enhanced photothermal efficiency for intracellular oncogenic microRNA detection and chemophotothermal therapy[J]. *Biomaterials*, 2018, 158: 23-33.
- [8] Liu X D, Chen B, Wang G G, et al. Controlled growth of hierarchical $Bi_2Se_3/CdSe-Au$ nanorods with optimized photothermal conversion and demonstrations in photothermal therapy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(43): 2104424-2104433.
- [9] Xu Y Q, Wang K, Zhao S L, et al. Rough surface $NiFe_2O_4@Au$ /Polydopamine with a magnetic field enhanced photothermal antibacterial effect[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437: 135282-135295.
- [10] Wen R L, Zhu S B, Wu M M, et al. Design and preparation of Ag modified expanded graphite based composite phase change materials with enhanced thermal conductivity and light-to-thermal properties[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102936-102943.
- [11] Zang P Y, Du Y Q, Yu C H, et al. Photothermal-actuated thermoelectric therapy by harnessing janus-structured $Ag-Ag_3S$ nanoparticles with enhanced antitumor efficacy[J]. *Chemistry of Materials*, 2023, 35(18): 7770-7780.
- [12] Geng X M, Zhang D D, Zheng Z M, et al. Integrated multifunctional device based on Bi_2S_3/Pd : Localized heat channeling for efficient photothermic vaporization and real-time health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2021, 82: 105700-105712.
- [13] Guo X Y, Liu J, Jiang L D, et al. Sulourea-coordinated Pd nanocubes for NIR-responsive photothermal/ H_2S therapy of cancer[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 321-334.
- [14] Zhu X M, Wan H Y, Jia H L, et al. Porous Pt nanoparticles with high near-infrared photothermal conversion efficiencies for photothermal therapy[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2016, 5(24): 3165-3172.
- [15] Zhu D X, Wang L J, Liu Z M, et al. Effects of surface ligands on localized surface plasmon resonance and stabilization of $Cu_{2-x}Se$

- nanocrystals[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509: 145327-145333.
- [16] Li J, Chen G Y, Yan J H, et al. Solar-driven plasmonic tungsten oxides as catalyst enhancing ethanol dehydration for highly selective ethylene production[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 264: 118517-118522.
- [17] Zhan Y, Liu Y L, Zu H R, et al. Phase-controlled synthesis of molybdenum oxide nanoparticles for surface enhanced Raman scattering and photothermal therapy[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(13): 5997-6004.
- [18] Gärtner W W. Photothermal effect in semiconductors[J]. *Physical Review*, 1961, 122(2): 419-424.
- [19] Nguyen N T, Yan T J, Wang L, et al. Plasmonic titanium nitride facilitates indium oxide CO₂ photocatalysis[J]. *Small*, 2020, 16(49): 2005754-2005761.
- [20] Liu H L, Wu F, Liu X Y, et al. Multiscale synergetic bandgap/structure engineering in semiconductor nanofibrous aerogels for enhanced solar evaporation[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(24): 11907-11915.
- [21] He W, Zhou L, Wang M, et al. Structure development of carbon-based solar-driven water evaporation systems[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(14): 1472-1483.
- [22] Arunkumar T, Lim H W, Lee S J. A review on efficiently integrated passive distillation systems for active solar steam evaporation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 155: 111894-111914.
- [23] Wang X J, Li H C, Liu X P, et al. Enhanced photothermal therapy of biomimetic polypyrrole nanoparticles through improving blood flow perfusion[J]. *Biomaterials*, 2017, 143: 130-141.
- [24] Zhao X T, Wang T Y, Jiang Y Y, et al. Robust and versatile polypyrrole supramolecular network packed photothermal aerogel for solar-powered desalination[J]. *Desalination*, 2023, 561: 116674-116684.
- [25] Sun Y Z, Davis E W. Facile fabrication of polydopamine nanotubes for combined chemo-photothermal therapy[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(43): 6828-6839.
- [26] Cui L F, Zhang P P, Xiao Y K, et al. High rate production of clean water based on the combined photo-electro-thermal effect of graphene architecture[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(22): 1706805-1706810.
- [27] Ito Y, Tanabe Y, Han J H, et al. Multifunctional porous graphene for high-efficiency steam generation by heat localization[J]. *Adv Mater*, 2015, 27(29): 4302-4307.
- [28] Yang Y, Zhao R Q, Zhang T F, et al. Graphene-based standalone solar energy converter for water desalination and purification[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 829-835.
- [29] Fu Y, Wang G, Ming X, et al. Oxygen plasma treated graphene aerogel as a solar absorber for rapid and efficient solar steam generation[J]. *Carbon*, 2018, 130: 250-256.
- [30] Kong Y, Dan H B, Kong W J, et al. Self-floating maize straw/graphene aerogel synthesis based on microbubble and ice crystal templates for efficient solar-driven interfacial water evaporation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(46): 24734-24742.
- [31] Yin Z, Wang H M, Jian M Q, et al. Extremely black vertically aligned carbon nanotube arrays for solar steam generation[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2017, 9(34): 28596-28603.
- [32] Mu P, Zhang Z, Bai W, et al. Superwetting monolithic hollow-carbon-nanotubes aerogels with hierarchically nanoporous structure for efficient solar steam generation[J]. *Adv Energy Mater*, 2019, 9(1): 1802158-1802166.
- [33] Zhan H J, Chen J F, Zhao H Y, et al. Biomimetic difunctional carbon-nanotube-based aerogels for efficient steam generation[J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2020, 3(5): 4690-4698.
- [34] Geng Y, Sun W, Ying P J, et al. Bioinspired fractal design of waste biomass-derived solar-thermal materials for highly efficient solar evaporation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(3): 2007648-2007658.
- [35] Duan H Y, Wang M X, Zhang Z W, et al. Biomass-derived photothermal carbon aerogel for efficient solar-driven seawater desalination[J]. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11(2): 109295-109304.
- [36] Li Z H, Wang M X, Chen L M, et al. Highly efficient carbonization of nanocellulose to biocarbon aerogels with ultrahigh light absorption efficiency and evaporation rate as bifunctional solar/electric driven steam generator for water purification[J]. *Sustain Mater Techno*, 2023, 36 e00649-00656.
- [37] Xu X S, Chang Q, Xue C R, et al. A carbonized carbon dot-modified starch aerogel for efficient solar-powered water evaporation[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(21): 11712-21170.
- [38] Zhu R F, Wang D, Zhang J C, et al. Biomass eggplant-derived photothermal aerogels with Janus wettability for cost-effective seawater desalination[J]. *Desalination*, 2022, 527: 115585-115596.
- [39] Liu Z X, Wu F, Lv T T, et al. Ti₃C₂TX/carbon aerogels derived from winter melon for high-efficiency photothermal conversion[J]. *Desalination*, 2024, 573: 117207-117217.
- [40] Zhu J Y, Yang X, Fu Z B, et al. Facile fabrication of ultra-low density, high-surface-area, broadband antireflective carbon aerogels as ultra-black materials[J]. *J Porous Mat*, 2016, 23(5): 1217-1225.
- [41] Wang H Q, Du A, Ji X J, et al. Enhanced photothermal conversion by hot-electron effect in ultrablack carbon aerogel for solar steam generation[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2019, 11(45): 42057-42065.
- [42] Yan H L, Cheng J Y, Li Z K, et al. Self-floating, monolithic, and aligned phenolic carbon aerogels from coal tar for solar-driven evaporation[J]. *Fuel*, 2024, 361: 130669-130678.
- [43] Xie X Y, Yan H L, Lei Z P, et al. Facile fabrication of ultralow density and ultrahigh solar absorption monolithic phenolic carbon aerogel from lignite for solar vapor generation[J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2024, 12(3): 1286-1296.
- [44] Oki T, Kanae S. Global Hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [45] Politano A, Argurio P, Di Profio G, et al. Photothermal membrane distillation for seawater desalination[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(2):

- 1603504-1603509.
- [46] González D, Amigo J, Suárez F. Membrane distillation: Perspectives for sustainable and improved desalination[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 238-259.
- [47] Long W, Koo J W, Yuan Z W, et al. Flow-through electrochemically assisted reverse-osmosis: a new process towards low-chemical desalination[J]. *Water Research*, 2024, 249: 120982-120990.
- [48] Luo X, Shi J C, Zhao C Y, et al. The energy efficiency of interfacial solar desalination[J]. *Applied Energy*, 2021, 302: 117581-117590.
- [49] Chen C J, Kuang Y D, Hu L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. *Joule*, 2019, 3(3): 683-718.
- [50] Zhou B, Han G J, Zhang Z, et al. Aramid nanofiber-derived carbon aerogel film with skin-core structure for high electromagnetic interference shielding and solar-thermal conversion[J]. *Carbon*, 2021, 184: 562-570.
- [51] Yan J, Wu Q F, Wang J J, et al. Carbon nanofiber reinforced carbon aerogels for steam generation: synergy of solar driven interface evaporation and side wall induced natural evaporation[J]. *J Colloid Interf Sci*, 2023, 641: 1033-1042.
- [52] Hu Y W, Jiang Y J, Ni L Y, et al. An elastic MOF/graphene aerogel with high photothermal efficiency for rapid removal of crude oil[J]. *J Hazard Mater*, 2023, 443: 130339-130350.
- [53] Liu C H, Xiao T J, Zhao J T, et al. Polymer engineering in phase change thermal storage materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188: 113814-113846.
- [54] Ji Z, Abdalkarim S Y H, Li H M, et al. Waste pomelo peels-derived ultralow density 3D-porous carbon aerogels: mechanisms of "soft-rigid" structural formation and solar-thermal energy storage conversion[J]. *Sol Energ Mat Sol C*, 2023, 259: 112453-112466.
- [55] Wang T J, Wang C M, Huang Z, et al. Electro- and photo-thermal energy conversion investigation of polyethylene glycol infiltrated porous carbon aerogels[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107724-107735.
- [56] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. *Nature*, 1972, 238(5358): 37-38.
- [57] Yao P C, Gong H, Wu Z Y, et al. Greener and higher conversion of esterification via interfacial photothermal catalysis[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(4): 348-356.
- [58] Ge R L, Yan P N, Liu Y, et al. Recent advances and clinical potential of near infrared photothermal conversion materials for photothermal hepatocellular carcinoma therapy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(29): 2301138-2302261.
- [59] Dong S J, Zhang Y N, Wang J Y, et al. A novel multifunctional carbon aerogel-coated platform for osteosarcoma therapy and enhanced bone regeneration[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2020, 8(3): 368-379.
- [60] Wu Y L, Dong L, Shu X, et al. Recent advancements in photothermal anti-icing/deicing materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143924-143943.
- [61] Yu B, Sun Z R, Liu Y B, et al. Improving anti-icing and de-icing performances via thermal-regulation with macroporous xerogel[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2021, 13(31): 37609-37616.