

分类号：
学号：20222107064

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



天然高分子复合材料的制备及其在太阳能界面 蒸发中的应用

学位申请人	李豪
指导教师	孟桂花（教授）
申请学位类别	材料与化工硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	太阳能界面蒸发材料
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

分类号：
学号：20222107064

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



天然高分子复合材料的制备及其在太阳能界面 蒸发中的应用

学位申请人	李豪
指导教师	孟桂花（教授）
申请学位类别	工学硕士
专业名称	材料与化工
研究领域	太阳能界面蒸发材料
所在学院	化学化工学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

**Preparation of Natural Polymer Composites and their application in
solar interfacial evaporation**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Hao Li

(Polymer Chemistry)


Dissertation Supervisor: A.P. Meng Gui-hua

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明


本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 


时间： 2025年5月16日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 

时间： 2025年5月16日

导师签名： 

时间： 2025年5月16日

摘要

淡水资源短缺已成为二十一世纪日益严重的全球性问题，同时伴随工业及农业的发展，水体污染与安全用水问题愈加明显。太阳能驱动的界面蒸发技术作为新兴淡水资源获取的技术，虽然拥有环境友好、可持续等优势，但其实际应用仍然受限于制备成本高、工艺复杂等技术问题，同时在含高盐、微生物或污染物的水质环境中存在稳定性不足等缺点。天然高分子材料具有易得、价格低廉、绿色环保等优点，同时其功能性可通过不同材料的复合及相应改性实现。基于此，本工作通过研究拥有高效能光热效率、抗菌性及污水处理抗菌的天然高分子材料，同时探究相关材料性能，意在解决上述问题，核心工作如下。

(1) 以海藻酸钠 (SA) 为基体，通过两步溶剂热法及功能化修饰化修饰，与十二烷基硫酸钠 (SDS) 发泡及冷冻交联技术，构建了具有孔道疏松结构的 SA/GO-Ni_xP_y 复合气凝胶。同时复合气凝胶的亲水性良好，有利于蒸发水的运输。优化后的复合气凝胶全光谱吸收率达 85.7%，光热转换效率达 86.7%，在模拟太阳光下蒸发速率达 2.62 kg·m⁻²·h⁻¹，较纯水提升 5.9 倍。在 10 wt% 高盐溶液、酸性、碱性及染料污染中均保持稳定蒸发性能，脱盐后水质盐度降低 3 个数量级，离子浓度符合饮用水标准，同时拥有极为优异的抗菌能力。

(2) 以细菌纤维素 (BC) 纳米纤维网络为刚性骨架，通过聚乙烯醇 (PVA) 与戊二醛 (GA) 共价交联形成双相增强结构，结合类海胆状 Ni_xP_y 与氧化石墨烯 (GO) 的协同作用，通过定向冷冻与 GA 交联得到 BC/PVA/GO-Ni_xP_y 复合气凝胶。定向冷冻技术构建的垂直层状孔道与 BC 刚性骨架、PVA 柔性网络形成多级结构，显著提升光热转化效率 (97.1%) 和蒸发速率 (3.36 kg·m⁻²·h⁻¹)。Ni_xP_y 的近红外宽谱吸收特性与 GO 的全光谱吸收能力结合，使复合气凝胶在 1 kW·m⁻² 光照下表面温度达 47.4 °C，较纯水提升 26.5 °C，具备 99% 的抗菌实现效果。而且复合气凝胶可在各种条件下的水蒸发环境中保持 15 次的稳定循环能力同时降解相应的染料废水。

(3) 选用新疆本地棉花秸秆，通过温和的碱-酸-漂白分级处理工艺制备高纯度纤维素 (CS-CEL)，通过磷酸浸渍与熔融盐模板法的协同作用，合成生物炭负载镍磷化合物 (C@Ni_xP_y)，并通过定向冷冻组装技术及冻融循环将 CS-CEL 纤维素骨架与 C@Ni_xP_y 光热材料复合，构建出具有垂直通道的 CS-CEL/C@Ni_xP_y 双网络气凝胶。负载的 C@Ni_xP_y 在 900 °C 煅烧下光吸收率提升至 90%，表面温度升高至 93.4 °C，光热转化效率达 92.9%，蒸发速率达到 3.22 kg·m⁻²·h⁻¹。去除棉秆粉木质素后的 CS-CEL/C@Ni_xP_y 复合气凝胶具备优良的亲水性，在 1 kW·m⁻² 光照下展现出卓越的脱盐能力，在不同盐浓度的溶液以及不同酸碱度的溶液与废水溶液中皆呈现出良好的水蒸发及处理效果，同时保证了相对不变的水蒸发速率。

关键词：天然高分子材料；界面蒸发；光热转化；污水处理；抗菌

Abstract

The shortage of fresh water resources has become an increasingly serious global problem in the 21st century. With the development of industry and agriculture, the problem of water pollution and safe water use has become more and more obvious. As a new technology for acquiring fresh water resources, solar driven interface evaporation technology has the advantages of environmental friendliness and sustainability, but its practical application is still limited by technical problems such as high preparation cost and complex process, and there are shortcomings such as insufficient stability in the water quality environment containing high salt, microorganisms or pollutants. Natural polymer materials have the advantages of easy availability, low price, green environmental protection, etc. At the same time, its function can be realized through the composite and corresponding modification of different materials. Based on this, this work aims to solve the above problems by studying natural polymer materials with high photothermal efficiency, antibacterial property and antibacterial property for sewage treatment, and exploring the properties of related materials. The thesis is as follows.

(1) SA/GO-Ni_xP_y composite aerogels with porous structure was constructed with sodium alginate (SA) as matrix by two-step solvothermal method and functional modification, and by foaming and freezing crosslinking techniques with sodium dodecyl sulfate (SDS). At the same time, the hydrophilicity of the composite aerogels is good, which is conducive to the transport of evaporative water. The full-spectrum absorption rate of the optimized composite aerogels is 85.7%, the photothermal conversion efficiency is 86.7%, and the evaporation rate under simulated sunlight is 2.62 kg·m⁻²·h⁻¹, which is 5.9 times higher than that of pure water. Stable evaporation performance is maintained in 10 wt% high-salt solution, acid, alkaline and dye pollution, and the salinity of the water after desalting is reduced by 3 orders of magnitude, the ion concentration meets the drinking water standard, and it has excellent antibacterial ability.

(2) Using bacterial cellulose (BC) nanofiber network as rigid skeleton, biphasic reinforced structure was formed through covalent cross-linking of polyvinyl alcohol (PVA) and glutaraldehyde (GA), combined with the synergistic effect of sea urchin-like Ni_xP_y and graphene oxide (GO). BC/PVA/GO-Ni_xP_y composite aerogels was prepared by directional freezing crosslinking with GA. The vertical layered channels constructed by directional freezing technology formed a multistage structure with BC rigid skeleton and PVA flexible network, which significantly improved the photothermal conversion efficiency (97.1%) and evaporation rate (3.36 kg·m⁻²·h⁻¹). The near infrared wide spectrum absorption characteristics of Ni_xP_y combined with the full spectrum absorption capacity of GO make the surface temperature of the composite aerogels reach 47.4 °C under 1 kW·m⁻² light, which is 26.5 °C higher than that of pure water, and has 99% antibacterial effect. Moreover, the composite aerogels can maintain a stable cycle capacity of 15 times in the water evaporation environment under various conditions and degrade the corresponding dye wastewater.

(3) High purity cellulose (CS-CEL) was prepared from local cotton straw in Xinjiang by mild alkali-acid-bleaching fractionation process. Biochar supported nickel-phosphorus compounds (C@Ni_xP_y) were synthesized by the synergistic effect of phosphoric acid impregnation and fused salt template method. CS-CEL/C@Ni_xP_y double network aerogels with vertical channels were constructed by the composite of CS-CEL cellulose skeleton with C@Ni_xP_y photothermal material through directional freezing assembly technology and freeze-thaw cycle. The light absorption rate and surface temperature of the loaded C@Ni_xP_y calcined at 900 °C increased to 90%, the surface temperature increased to 93.4 °C, the photothermal

conversion efficiency reached 92.9%, and the evaporation rate reached $3.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. The CS-CEL/C@Ni_xP_y composite aerogels after removing lignin from cotton stalk powder has excellent hydrophilicity, showing excellent desalting ability under $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ light, and showing good water evaporation and treatment effect in solutions with different salt concentrations, solutions with different pH and wastewater solutions. At the same time, a relatively constant rate of water evaporation is ensured.

Key words: Natural polymer materials; Interfacial evaporation; Light and heat conversion; Sewage treatment; Antibiosis

目录

摘要	I
Abstract	III
第 1 章 文献综述	1
1.1 引言	1
1.2 太阳能界面蒸发技术的发展	2
1.3 界面光热蒸汽转换性能提升途径研究	4
1.3.1 不同光热效应机理的材料	4
1.3.2 光热蒸发材料的结构优化	6
1.3.3 蒸发过程优化	7
1.4 天然高分子材料材料在界面蒸发中的应用研究	8
1.4.1 天然高分子材料的结构优化研究进展	8
1.4.2 天然高分子材料的光热性能优化研究进展	10
1.5 本文的研究意义及主要研究内容	11
第 2 章 实验材料及仪器	13
2.1 实验材料	13
2.2 实验设备及仪器	14
2.3 材料的表征手段	15
2.3.1 扫描电子显微镜 (SEM)	15
2.3.2 红外光谱测试 (FTIR)	15
2.3.3 X 射线光电子能谱 (XPS)	15
2.3.4 X 射线衍射测试 (XRD)	16
2.3.5 材料表面润湿性测试	16
2.3.6 材料光吸收性能测试	16
2.3.7 紫外可见光谱 (UV-Vis)	16
2.3.8 电导率测试	16
2.3.9 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)	16
第 3 章 SA/GO-Ni _x P _y 复合气凝胶的制备及其在界面蒸发中的应用	17
3.1 引言	17
3.2 实验部分	18
3.2.1 类海胆状磷化镍制备	18
3.2.2 类海胆状磷化镍氨基化修饰	18

3.2.3 SA/GO-Ni _x P _y 复合气凝胶的制备	19
3.2.4 材料的水蒸发实验	20
3.2.5 材料的净化水收集装置	21
3.2.6 抗菌实验	22
3.3 结果与讨论	23
3.3.1 材料的形貌分析	23
3.3.2 材料的 FTIR 分析	25
3.3.3 材料的 XRD 分析	25
3.3.4 材料的亲水性	26
3.3.5 材料的光吸收性能分析	27
3.3.6 材料的自漂浮性能分析	27
3.3.7 复合气凝胶蒸发性能研究	28
3.3.8 复合气凝胶脱盐性能的研究	31
3.3.9 复合气凝胶在不同水质中的应用	33
3.3.10 复合气凝胶的抗菌性能	34
3.4 本章小结	35
第 4 章 BC/PVA/GO-Ni _x P _y 复合气凝胶的制备及其在水处理和界面蒸发中的应用	36
4.1 引言	36
4.2 实验部分	37
4.2.1 类海胆状磷化镍制备	37
4.2.2 类海胆状磷化镍氨基化修饰	37
4.2.3 BC/PVA/GO-Ni _x P _y 复合气凝胶的制备	37
4.2.4 材料的水蒸发实验	38
4.2.5 材料的净化水收集实验	39
4.2.6 抗菌实验	39
4.2.7 材料的催化降解实验	39
4.3 结果与讨论	40
4.3.1 材料的形貌分析	40
4.3.2 材料的 FTIR 分析	42
4.3.3 材料的 XRD 分析	42
4.3.4 材料的亲水性	43
4.3.5 材料的光吸收性能分析	44
4.3.6 Ni _x P _y 催化降解性能分析	45
4.3.7 BC/PVA/GO-Ni _x P _y 复合气凝胶蒸发性能研究	46

4.3.8 复合气凝胶脱盐性能的研究	49
4.3.9 复合气凝胶在不同水质中的应用	52
4.3.10 复合气凝胶的抗菌性能	53
4.4 本章小结	54
第 5 章 CS-CEL/C@Ni _x P _y 复合气凝胶的制备及其在水处理及其在界面蒸发中的应用	55
5.1 引言	55
5.2 实验部分	56
5.2.1 CS-CEL 的制备	56
5.2.2 C@Ni _x P _y 的制备	56
5.2.3 CS-CEL/C@Ni _x P _y 复合气凝胶的制备	57
5.2.4 材料的水蒸发实验	57
5.2.5 材料的净化水收集实验	57
5.2.6 抗菌实验	57
5.3 结果与讨论	58
5.3.1 材料的形貌分析	58
5.3.2 材料的 FTIR 分析	59
5.3.3 材料 XPS 分析	60
5.3.4 材料的 XRD 分析	60
5.3.5 材料的亲水性分析	61
5.3.6 材料的光吸收性能分析	62
5.3.7 CS-CEL/C@Ni _x P _y 复合气凝胶蒸发性能探究	63
5.3.8 CS-CEL/C@Ni _x P _y 复合气凝胶脱盐性能的研究	65
5.3.9 CS-CEL/C@Ni _x P _y 复合气凝胶在不同水质中的应用	67
5.3.10 复合气凝胶的抗菌性能	69
5.4 本章小结	70
第 6 章 结论与展望	71
6.1 结论	71
6.2 展望	72
参考文献	73
致谢	81
作者简介	82

第1章 文献综述

1.1 引言

清洁水资源在人类社会的持续发展中承担重要的使命，同时也是地球生态发展及平衡的核心物质。维系社会的生产生活是离不开清洁水资源供给系统的支撑的，其全球性的战略价值尤为重要。虽然地球表面绝大部分的区域都拥有丰富的水资源，但是淡水仅仅占据总含量的2.5%左右。同时，工业革命以来日趋严重的工业污染及气候的变化复合效应影响下，全球约40%地表水系已呈现不同程度的功能退化^[1]。自从二十世纪提出地球面临水资源的短缺问题以来，水资源短缺问题越来越受到人们的关注^[2]。工业上较为常规的水处理技术体系核心是通过一下两种基础原理进行实现的：相变分离机制与机械截留效应。对于工业上常见的水净化工艺，较为多见的技术包括加压蒸汽蒸馏装置、多效蒸发序列以及多级闪蒸系统等不同的方案。同时根据不同的分离和驱动机制，其中基于相变原理的热力学循环系统（如多级闪蒸、低温多效蒸馏）与膜分离技术（包括压力驱动型膜技术如反渗透、纳滤，以及电驱动型技术如电渗析）构成了现有工业体系的核心技术框架^[3]。尽管以反渗透膜组件和多级闪蒸装置为代表的成熟工艺已在海水淡化实际生产中实现了大规模的工业化应用，但是仍存在系统复杂、能耗效率高以及成本高等问题，与当前社会发展中的碳中和战略目标存在冲突^[4]。在此背景下，基于可再生的清洁能源的水净化技术逐渐成为研究热点，引起了诸多学界及社会的广泛关注^[5]。而太阳能是一种绿色、清洁、可再生的能源，同时因其自身的辐射特性以及易得性受到了广泛的利用，它的应用可以追溯到几百年之前。太阳能海水淡化体系主要通过光伏材料将太阳能能转化为电能并驱动传统净水设备，以及直接利用太阳能产生光热效应驱动液态水相变蒸发两种方式实现^[6]。与光电转换相比，通过太阳能产生光热效应驱动液态水相变蒸发进而收集水的方式更简单。然而，通过太阳能促进水蒸发的过程中，往往因为太阳光的扩散及光的损失而导致水蒸发的效率低下，其实际产水速率仍难以满足规模化应用需求^[7]。随着二十一世纪以来科研领域中光热材料技术的不断创新发展，研究人员可以通过在太阳能-蒸汽转换系统中引入具有高光热转换效率的黑色光热材料加快液体中水分的蒸发过程。这项技术已从最开始的在水体中分散复合材料发展到在水与空气的界面处集中蒸发，显著提高了水的蒸发速率，进一步推进了其实际应用^[8]。界面蒸发的过程涉及到光吸收、热利用、水输送以及水蒸发等一系列步骤，同时材料的结构及亲水性能对提高水蒸发的速率拥有重要作用^[9]。天然高分子材料身为自然界中易取得的一种材料，同时拥有再生性，良好的生物相容性

以及可控的物化性质，在界面蒸发领域表现出巨大的潜力，同时拥有卓越的应用前景。

1.2 太阳能界面蒸发技术的发展

太阳光包含了紫外波段（200-400 nm）、可见光谱区（400-700 nm）及近红外辐射波段（700-2500 nm），是其向地球表面传递能量的重要形式^[10]。而在地球的生态环境中，液态水向气态相变的动态过程属于自发性的自然现象，同时该过程受温度梯度、空气动力学参数及外部作用力的共同调控，其本质表现为分子热运动与相界面迁移的作用机制^[11]。早在古代以来，人类便已经发现了利用太阳光转化出来的的能量去促进海水的蒸发，从而得到清洁水。近些年，基于纳米材料体系的光热转换效率突破性进展，材料科学、环境工程等交叉学科的研究团队正深入开展界面工程与能量传递机制的协同创新研究，并深入研究这项技术在更多领域的潜在应用价值。依托于不同光热材料的改性以及复合，现代的学术研究者构建了以光吸收增强、热管理优化及水传输为核心的新型界面光热转化系统，这些成果不仅将太阳能蒸汽转化效率提升至传统工艺的 3-5 倍，更在医疗消毒、农业灌溉及工业脱盐等不同的场景展现出卓越的应用能力。

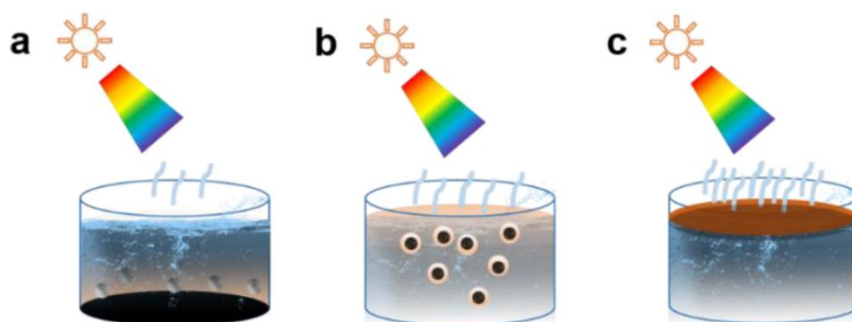


图 1-1 太阳能光热转换的三种方式^[10]: (a)底部加热, (b)分散加热, (c)界面加热

Fig 1-1 Three ways of solar thermal conversion^[10]: (a) bottom heating, (b) dispersed heating, (c) interfacial heating

光热材料能够有效地将所吸收的太阳光转化为热能，同时加热材料周围的水分进而加速水蒸气的产生，随后在特定的收集装置中对产生的水蒸汽进行冷凝处理，以此获得洁净的水资源^[12]。该过程无聚光设备的帮助，就可以大大提升太阳能的利用效率，从而达成水资源净化的目标，因此具备在常见的太阳光照射环境中应用的可能^[13]。而在实现太阳能高效利用的同时对蒸发的液体进行行之有效的加热，是提升界面蒸发系统的效率的重点因素，基于此，太阳能驱动的水蒸发技术历经技术迭代与优化^[14-18]。依据材料通过不同部位分布于蒸发液体中，太阳能蒸发系统整体可划分为三类：水底加热型、水体分散加热型以及界面加热水蒸发系统，具体如图 1-1 所示。在底部加热

型的系统中，太阳光穿透大部分的水体，同时对底部的黑色材料进行一定程度上的加热，热量随后从上到下逐渐传导至整个水体，导致系统从底部至上表面呈现出温度逐渐降低的趋势（图 1-1a）。然而，传统蒸发模式中水蒸气的逸散过程仅发生在水体表层界面，这种能量输入与蒸发位置的空间分离导致效率损失—约 65% 的热能因无法有效参与相变过程被耗散^[19]。研究者基于此开发了光热纳米粒子分散技术，通过在水中构建选择性加热区域，实现了从整体加热向界面定向供能的模式转变，如图（1-1b）^[20]。基于前期太阳能驱动水蒸发技术的研究，领域中涌现出一种创新性的能量转化方式即通过在水-气界面处实施光热材料的布局（如图 1-1c 所示），构建具有界面传热特性的蒸汽产生系统。该技术体系创新性利用液态水相变过程仅在水-气界面发生的本质特性，通过将吸光材料纳米结构垂直阵列于液膜表面，实现太阳能能量转化路径的改变。在 2014 年，Wang 等人^[21]对两种不同的蒸发工艺进行了对比研究，一种是通过在蒸发系统的水相体系中分散金的纳米颗粒，而另外一种是通过制备出的薄膜，将光热材料自组装于水面（图 1-2a）。同时 Ghasemi 等人^[22]在 2014 年组合了一种界面光热蒸汽转换系统（光热蒸发器），该系统由光热吸收材料与光热隔绝材料以双层形式构成。在高强度的太阳光条件下，组成的系统拥有 85% 的光热转换效率，且拥有高效的吸收以及较低的热能损耗（图 1-2b）。

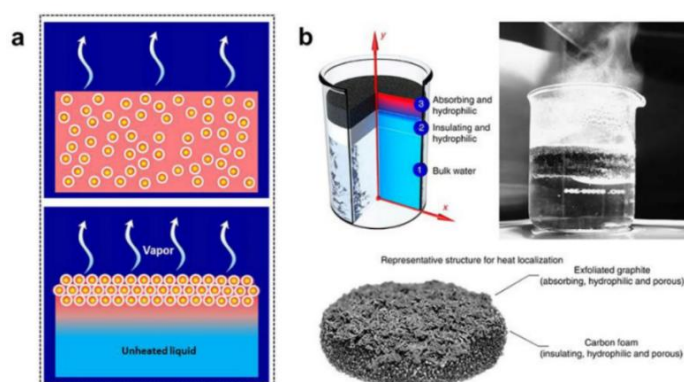


图 1-2 (a) 水体中分散相金纳米粒子体系(上图)及气液交界区定向排布的金纳米薄膜架构(下图)^[21], (b) 异质复合架构界面光热装置的层级设计^[22]

Fig 1-2 (a) Dispersed phase gold nanoparticle system in water (top) and oriented arrangement of gold nanofilm structures at the gas-liquid interface (bottom)^[21], Hierarchical design of photothermal device with interface of heterogeneous composite architecture^[22]

太阳能光热界面转换系统虽然表观操作呈现简易性，但其内在作用机制涵盖光生载流子的瞬态能量传递、相变界面处质量迁移与热力学传递的过程^[23-25]。高性能光热转换装置的设计需要满足多方面的要求如下：（1）具备宽光谱响应域与高效率的光吸收系统，实现光热转化效率的突破性提升。（2）采用热量集中的体系，以实现降低周围环境及水体导致的热能损耗。（3）光热驱动水蒸发过程需要连续不间断的进行，因

此光热转换材料的持久且稳定性能尤为重要。(4) 光热转换材料结构疏松多孔, 加大水蒸气逃逸的效率。多个方面相互协同作用^[26, 27], 也为太阳能界面蒸发的效率提升提出了明确的方向。

1.3 界面光热蒸汽转换性能提升途径研究

在水的蒸发焓恒定的条件下, 当材料对于光的利用效率达到 100%, 界面蒸发系统的理论水蒸发速率会达到最高 ($1.47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)^[28]。针对这一情况, 研究人员已经开展了大量的研究工作, 当前研究已经得到了较为系统的成果, 特别是研究人员在仿生多孔的结构设计与热管理领域取得一定程度上的进展。基于此, 将提升界面光热水蒸发速率的方法归纳为: 对拥有不同光热效应机理的材料优化、界面蒸发光热转换系统的结构的改良以及降低水蒸发的过程的改善^[29]。

1.3.1 不同光热效应机理的材料

太阳能能量转化体系各种各样, 其可系统通过光伏效应、光化学路径及光热传导三种机制, 实现电能、化学能及热力学能的转化。其中, 光热转导当前的可实现转换效率为最高^[30]。基于电磁波与物质相互作用的作用机制分类体系, 光热转换机制可系统划分为三类: 贵金属纳米结构的局域表面等离子体共振效应引发的载流子输运过程、半导体材料的带隙调控诱导的非辐射能量耗散通道、以及碳基杂化体系与有机共轭分子的振动能级跃迁机制。

(1) 等离子体共振光热转换机理: 在金属基材料体系中, 自由电子在导带内的量子跃迁过程主导了能量吸收机制^[31]。该体系的光学特性表现为亚波长尺度的强局域化特征, 其电磁波穿透深度与表面等离子体激元振荡频率的乘积决定了热扩散场的空间约束范围, 使得由局域场增强效应产生的非平衡热力学响应严格限定于界面附近的纳观区域^[32]。而当贵金属纳米粒子受到其相应的共振波长的照射时, 产生了光热效应 (图 1-3a)。光激发电子在经历电子-电子非弹性散射后发生能量耗散, 引发金属界面局域热力学响应, 其能量弛豫过程表现为瞬时的热积累现象^[33-36]。在热力学平衡态建立过程中, 电子能量通过声子-声子相互作用向晶格振动模式定向转移, 触发介观尺度热扩散过程, 从而明显提升了体系的局部温度^[37]。等离子体共振频率特性主导着光热转换效率, 而纳米结构形貌参数 (包括几何尺寸形状、介电环境及库仑相互作用势) 共同决定表面等离激元共振峰位及线宽^[38], 基于此通过这些方面的优化可实现材料的光热转换效率的巨大提升。

(2) 非辐射弛豫光热转换机理: 半导体材料的能带特性对光吸收效率具有决定性影响^[39]。当入射光子能量与材料禁带宽度达到量子匹配条件时, 价带电子跃迁至导带

形成激发态载流子复合体^[40-42]。这些高能电子-空穴对通过两种竞争性弛豫路径实现能量耗散：其一为以光子发射形式进行的辐射复合过程，其二为伴随晶格振动能级变化的声子介导非辐射衰减机制^[43]。实验研究表明，激发态载流子的扩散迁移与复合过程直接决定了材料表面的温度梯度分布特征（图 1-3b）。半导体材料的能带工程调控成为优化光热器件性能的关键点，其热化过程产生的热累积效应显著提升了能量转化效率。然而，由于带隙宽度限制导致的光子吸收缺失，使得传统半导体体系的光热转换效率普遍较低^[44]。在自然太阳光中，太阳光谱中近红外波段的辐射能量约占太阳总辐射能量的 50%^[45]。相应的，半导体材料需在红外区域存在光吸收光谱从而提升光热转换效率。

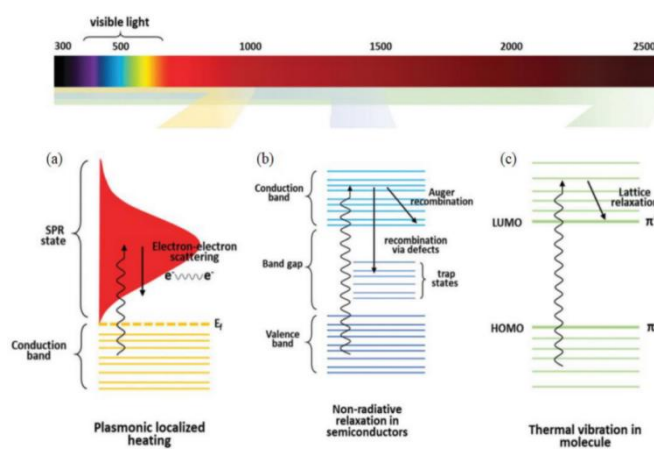


图 1-3 基于金属纳米结构的等离子体局域转换机制、半导体材料的非辐射弛豫以及分子振动能级跃迁效应的光热转换机理图^[28]

Figure 1-3 Local plasma conversion mechanism based on metal nanostructures, non-radiative relaxation of semiconductor materials, and photothermal conversion mechanism diagram of molecular vibrational energy level transition effect^[28]

(3) 而分子热振动，不仅涉及了分子中的电子运动而且可由分子转动与振动产生。分子体系在入射光子能量与分子电子能级差达到量子共振条件时，价带电子有效捕获光子能量形成激发态电子-空穴对^[46]。激发态载流子通过电子-声子相互作用发生非辐射能量耗散，将能量定向传递至晶格振动模式，引发分子振动能级分布改变与转动自由度激活，导致介观尺度热力学响应。这种能量传递机制通过声子-声子耦合建立热传导通道，实现光能到热能的跨尺度能量转化，最终完成从局域热蓄积到宏观热力学输出的能质转换过程^[47]。分子中最高占据分子轨道（HOMO）与最低未占据分子轨道（LUMO）间的能量间隙和 π 键数量有关，随着 π 键增多，其能带宽度呈现量子限域效应主导的衰减趋势，导致激子跃迁所需波长发生红移^[48]。在类石墨烯物质里，密集分布的 π 键网络可形成宽谱带吸收特性，其电子跃迁覆盖紫外至近红外波段，这种广谱吸光特性与材料本征的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 电子跃迁路径密切相关，因此类石墨烯物质呈现出黑色^[49-52]。

如图 1-3 (c) 所示, 当某种材料被相应电子激发匹配的光能照射时, 其内部电子从基态跃迁到了更高的能量轨道。受激电子发生弛豫导致吸收的光能转移到原子晶格的振动上, 从而实现物质温度的上升^[53]。

1.3.2 光热蒸发材料的结构优化

在界面蒸发领域, 拥有输送多孔结构、亲水性良好及低密度基底的新型光热材料已实现了广泛的应用。Go 等人构建了具有三维自相似特征的聚吡咯树枝状多孔膜。他们通过研究多孔膜的不同孔径的蒸发性能, 同时在 100-500 微米的范围内对其孔径进行调控^[54], 得到了拥有 72% 蒸发效率的光热转换薄膜。Liu 等人研发出了一种吸收率超过 97% 的二维光学吸收膜, 如图 1-4 所示, 该二维薄膜的水蒸发效率达到了 90%。而且, 用于合成这种材料的基础材料回收率可达 98%, 具备长时间循环使用的优点^[55]。

Sun 等人开发了一种具有良好有序微/纳米孔的新型 Janus 界面结构, 制造的 Janus 结构材料可以在减弱水分子间作用力的同时将水泵送到亲水-疏水的界面处。在其制造出的有序的纳米通道内, 不仅增加了材料内部薄水层的比例, 而且增强了受热表面的微观传热效率。优化的 Janus 结构材料表现出高达 $2.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的水蒸发速率, 并且其理论蒸发焓为仅为直接进行水蒸发的 30%^[56]。Wu 等人提出了一种灵活的单层脱盐整体多孔蒸发器 (SRMPE), 它漂浮在海水的表面进行水分的蒸发, 同时没有任何支撑的结构。这种网络聚合物的通过调节其亲水性及材料中水分的结合水比例, 实现了 $3.47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高蒸发速率和 94.3% 的效率^[57]。Zhou 等人通过在静电相互作用和氢键作用下将磁性多壁碳纳米管/壳聚糖气凝胶和 MXene/羧化丁苯橡胶薄膜堆叠在一起, 制备了双层气凝胶/薄膜复合材料。所制备的材料具有高太阳光吸收能力, 同时在 1 次太阳照射下表现出高达 $2.44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的太阳能驱动水蒸发速率和 92.2% 的光热效率^[58]。

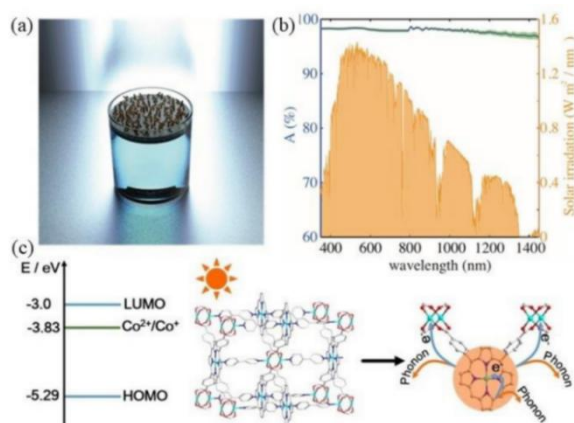


图 1-4 平面光学吸收膜及光热转换机制

Figure 1-4 Planar optical absorption film and photo-thermal conversion mechanism