

评论

Commentary

## 被动界面冷却技术促进太阳能驱动水-电联产性能的飞跃

## Passive interfacial cooling sparks a major leap in solar-driven water and power cogeneration

李胜优<sup>1</sup>, 赵凯莹<sup>1</sup>, Eun Ae Shin<sup>1</sup>, Gwanho Kim<sup>1</sup>, 咎广涛<sup>1,2,\*</sup>Shengyou Li<sup>1</sup>, Kaiying Zhao<sup>1</sup>, Eun Ae Shin<sup>1</sup>, Gwanho Kim<sup>1</sup>, Guangtao Zan<sup>1,2,\*</sup><sup>1</sup>材料科学与工程学院, 延世大学, 首尔市 03722, 韩国<sup>1</sup> Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea<sup>2</sup>化学科学与工程学院, 同济大学, 上海市 200092, 中国<sup>2</sup> School of Chemical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, PR China\* 通讯作者: 咎广涛, [gtzan@yonsei.ac.kr](mailto:gtzan@yonsei.ac.kr)\* Corresponding authors: Guangtao Zan, [gtzan@yonsei.ac.kr](mailto:gtzan@yonsei.ac.kr)

## 引用格式

李胜优, 赵凯莹, Shin EA, 等. 被动界面冷却技术促进太阳能驱动水-电联产性能的飞跃. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(1): 156.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.156>

Li S, Zhao K, Shin EA, et al. Passive interfacial cooling sparks a major leap in solar-driven water and power cogeneration (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(1): 156.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.156>

## 文章信息

收稿日期: 2024-03-01

录用日期: 2024-03-25

发表日期: 2024-03-30

## 版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/140>

0

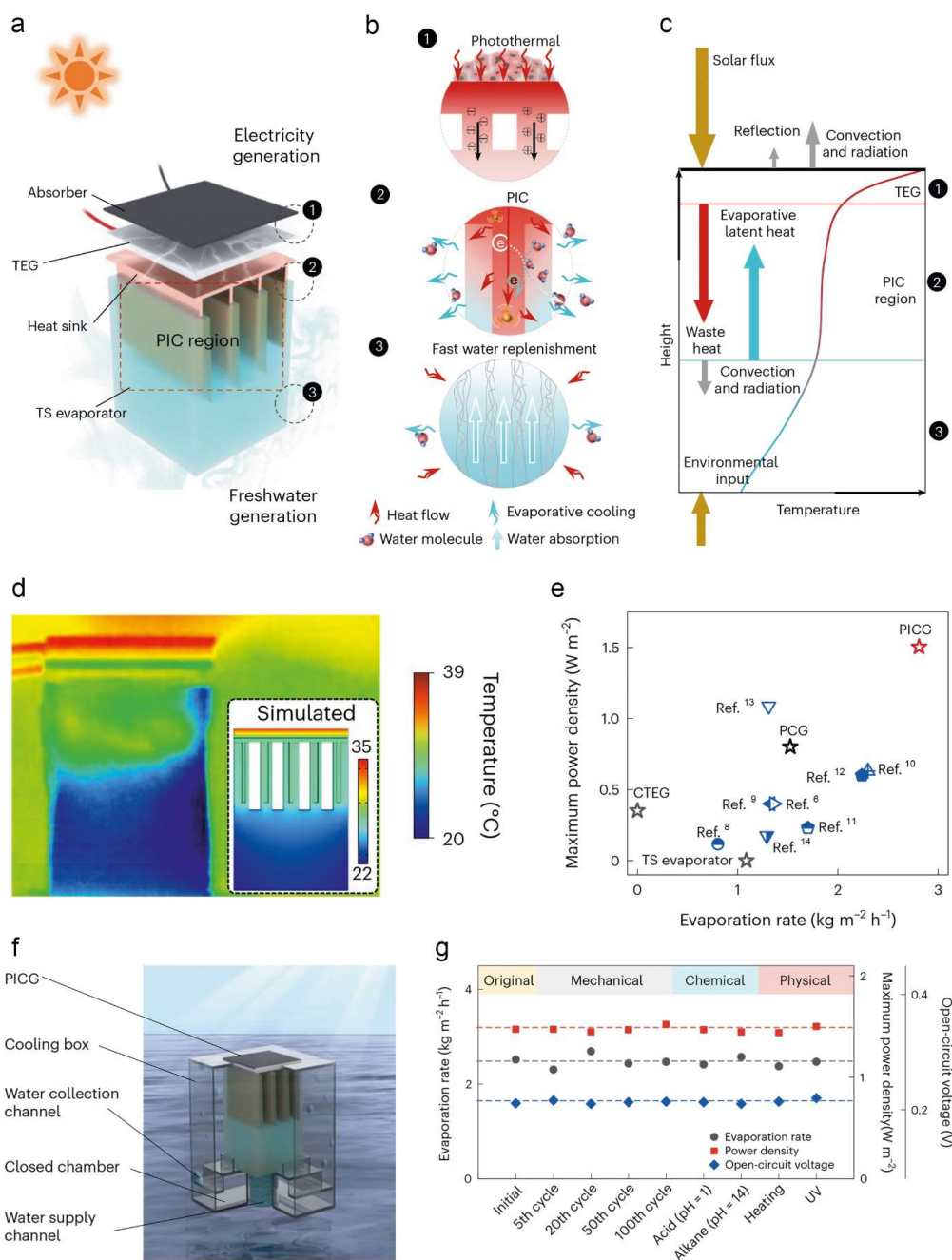
淡水与电力构成了人类社会运转的两大基石, 然而随着人类现代化的加速, 这两种关键资源的匮乏问题日益凸显。近年来, 利用可持续和环保性的太阳能进行淡水和电力的联合生产引起了全球研究者的广泛关注 [1,2]。尽管如此, 现有研究在同时提高淡水和电力产量方面存在着效率较低的难题, 这个问题严重制约了其实际应用。最近, 吕坚与其研究团队通过引入创新的被动界面冷却 (passive interfacial cooling, PIC) 策略, 在倒置结构的太阳能水-电联产装置中, 显著提高了清洁淡水和绿色电力的联产效率 [3]。这一突破发表在《自然-水》(Nature Water) 杂志上, 为解决全球水电资源短缺问题开辟了新的道路 [3]。

利用太阳能进行自然水面蒸发是一种古老的产生清洁淡水的技术, 但是其效率较低, 通常低于  $0.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。近年来, 随着材料科学和纳米技术的发展, 各种界面太阳能水蒸发器被开发出来。由于它们出色的光热效应, 淡水生产的效率得到了显著提升。最近的研究发现, 这些太阳能水蒸发器不仅可以生产淡水, 还可以与其他机制耦合来发电。其发电过程主要基于两种原理: 一种是水光伏发电, 它是利用水流经过太阳能水蒸发器中活性材料的狭窄孔道时诱发电荷分离从而在材料两端产生流动电势来发电 [4,5]; 另一种是温差发电, 它是利用水蒸发过程中引起的局部温度差异通过热电材料转换为电能 [6]。前者的水蒸发和发电使用的通常是同一模块, 其性能强烈依赖于蒸发器材料和液体的类型, 往往导致联产性能不稳定, 限制了其实用化进程。相比之下, 后者通常是通过水蒸发模块和热电发电机模块的耦合实现, 这两个模块既可独立设计又能协同作用, 可以实现  $1 + 1 > 2$  的效果, 有望大幅提升联产效果, 展现出广阔的应用前景。因此, 在当前评述的工作中, 作者们正是采用了后一种方法进行联产。

在以往的太阳能驱动热电-水联产工作中，研究通常集中在单个模块的材料或者结构的设计上，而对于发电模块和产水模块之间的能量交互作用研究甚少，更不用说优化二者之间的能量交换策略了。此外，之前大多数的联产器件采用的都是太阳能水蒸发器连接到热电发电机的上表面的结构。这种结构设计容易导致盐垢在蒸发器的顶部沉积，大大降低太阳光吸收效率并阻碍水的蒸发；同时，随着水体温度升高，热电模块两侧的温差逐渐减小，直至模块停止工作。上述问题极大地阻碍了联产装置高性能的实现，拖慢了其实用化进程 [7]。

在这项研究中，作者们提出了一种具有被动界面冷却区域的倒置结构的联产装置，从而实现了突破性的联产性能 [3]。该装置由四个功能组件组成：顶层是混合碳黑的聚二甲基硅氧烷薄膜作为太阳光吸收器，以实现显著的光热转换；其次是商用热电发电机；热电发电机的底部（冷侧）装有氧化铝散热器，以实现高效热传导；底层为聚氨酯定向冷冻制成的三叉戟形蒸发器（图 1a）。PIC 区域则是将氧化铝散热器插入三叉戟形蒸发器中构成，该区域提供了大面积的散热器-蒸发器和蒸发器-空气界面。PIC 区域的创新设计大幅提升了热电发电机、水蒸发器与环境之间的能量交换，有效降低热量损失，从而提高联产性能（图 1b）。具体来说，散热器的高导热率有利于废热从产电模块快速传递到产水模块。随后，PIC 区域巨大的散热器-蒸发器界面促进了蒸发器的有效加热，而蒸发器-空气界面使蒸汽能够逃逸入空气中，提高蒸发速率。同时，快速蒸发会产生大量的蒸发潜热，快速冷却热电发电机的冷侧，从而增大发电模块两侧温差提高发电性能并减少对流和辐射损失。蒸发潜热还有助于吸收环境中的能量，进一步促进产水（图 1c,d）。得益于以上巧妙的结构设计，PIC 联产系统在 1 个太阳光的光照条件下表现出  $1.5 \text{ W m}^{-2}$  的超高功率密度和  $2.81 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  的优异水蒸发率，分别比没有 PIC 效应的设备高出 328% 和 158%（图 1e） [8–14]。

此外，该联产装置展现出了优异的适用性和通用性。在各种恶劣条件下，该联产装置都能够稳定运行，并适用于各种液体，包括盐水溶液、有机污水和重金属溶液等（图 1f,g）。PIC 策略应用于光伏产电系统时，通过对光伏板的有效降温实现了产电功率从  $55.7 \text{ W m}^{-2}$  到  $75 \text{ W m}^{-2}$  的显著提升，从而可为智能手表和手机等电子设备充电，展现出该策略出色的通用性。



**图 1.** 被动界面冷却联产器件 (PICG) 的设计与性能。(a) PICG 的结构。(b) 在运行期间, 通过 TEG、PIC 区域以及蒸发器的底部 (分别标记为 1、2 和 3) 的热量流动。(c) PIC 区域增强的发电与水蒸发模块之间的能量交换示意图。金色箭头: 能量输入; 红色箭头: 废热; 蓝色箭头: 潜热; 灰色箭头: 对流和辐射热损失。(d) 在 1 个太阳光照射下 PICG 的红外图像。插图: 模拟的温度分布。(e) 与一些基于 TEG 的水电联产装置的性能比较。(f) 3D 打印的倒置结构 PICG 原型的示意图。(g) 在不同条件下 PICG 的耐久性。

**Figure 1.** Design and properties of the passive interfacial cooling cogenerator (PICG). (a) The structure of the PICG. (b) Heat flows through the TEG, PIC region and bottom part of the evaporator (labeled as 1, 2 and 3, respectively) during the operation. (c) Enhanced energy exchange between the power generation and water evaporation modules enabled by the PIC region. Gold arrow: energy input; red arrow: waste heat; blue arrow: latent heat; gray arrow: convection and radiation heat loss. (d) Infrared images of the PICG under 1 Sun illumination. Insets: simulated temperature profiles. (e) Comparison of this work with some TEG-based power–water cogenerators. (f) Schematic of the 3D-printed inverted-structure PICG prototype. (g) Durability of the PICG under different conditions.

综上所述，这项工作在可持续能源解决方案领域标志着重大进展 [3]。本工作通过在一个倒置结构的太阳能驱动的水电联产装置中引入新的被动界面冷却策略，成功克服了联产技术中的传统障碍。这种新颖的方法不仅在同时生成清洁淡水和绿色电力方面实现了前所未有的效率，而且还展现了在不同环境条件和液体类型中的显著适应性。该联产装置的超高功率密度和异常的水蒸发率，显著超过现有模型，凸显了其巨大潜力。此外，该系统与光伏板的兼容性，提高了实际应用如充电电子设备的功率输出，展示了其实际应用性和潜在革新可再生能源格局的能力。

展望未来，这项研究为未来可持续能源系统的创新奠定了基础，有望通过可扩展和高效的解决方案来解决全球淡水和电力稀缺的挑战。随着我们逐渐进入越来越依赖可再生资源的时代，这类联产系统的适应性和效率将至关重要。这项工作不仅为下一代可持续技术铺平了道路，而且还激发了一波提升水电联产效率研究的新浪潮。它是实现更可持续、资源效率更高未来的希望之光，人类进步与环境管理的和谐共存将不仅仅是一个愿景，而是一个现实。

**基金项目：**感谢国家自然科学基金（No.22205165）的资助。

**利益冲突：**作者声明没有竞争利益。

## 参考文献

1. Dang C, Cao Y, Nie H, et al. Structure integration and architecture of solar-driven interfacial desalination from miniaturization designs to industrial applications. *Nature Water*. 2024; 2(2): 115-126. doi: 10.1038/s44221-024-00200-1
2. Xu N, Zhu P, Sheng Y, et al. Synergistic Tandem Solar Electricity-Water Generators. *Joule*. 2020; 4(2): 347-358. doi: 10.1016/j.joule.2019.12.010
3. Mao Z, Yao Y, Shen J, et al. Passive interfacial cooling-induced sustainable electricity-water cogeneration. *Nature Water*. 2024; 2(1): 93-100. doi: 10.1038/s44221-023-00190-6
4. Xue G, Xu Y, Ding T, et al. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials. *Nature Nanotechnology*. 2017; 12(4): 317-321. doi: 10.1038/nnano.2016.300
5. Li T, Wu M, Xu J, et al. Simultaneous atmospheric water production and 24-hour power generation enabled by moisture-induced energy harvesting. *Nature Communications*. 2022; 13(1). doi: 10.1038/s41467-022-34385-4
6. Zhu L, Ding T, Gao M, et al. Shape Conformal and Thermal Insulative Organic Solar Absorber Sponge for Photothermal Water Evaporation and Thermoelectric Power Generation. *Advanced Energy Materials*. 2019; 9(22). doi: 10.1002/aenm.201900250
7. Yu S, Gu Y, Chao X, et al. Recent advances in interfacial solar vapor generation: clean water production and beyond. *Journal of Materials Chemistry A*. 2023; 11(12): 5978-6015. doi: 10.1039/d2ta10083e
8. Xu Y, Guo Z, Wang J, et al. Harvesting Solar Energy by Flowerlike Carbon Cloth Nanocomposites for Simultaneous Generation of Clean Water and Electricity. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021; 13(23): 27129-27139. doi: 10.1021/acsami.1c07091
9. Zhang Y, Ravi SK, Tan SC. Food-derived carbonaceous materials for solar desalination and thermo-electric power generation. *Nano Energy*. 2019; 65: 104006. doi: 10.1016/j.nanoen.2019.104006
10. Chen L, Ren J, Gong J, et al. Cost-effective, scalable fabrication of self-floating xerogel foam for simultaneous photothermal water evaporation and thermoelectric power generation. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 454: 140383. doi: 10.1016/j.cej.2022.140383
11. Lin Z, Wu T, Feng YF, et al. Poly(*N*-phenylglycine)/MoS<sub>2</sub> Nanohybrid with Synergistic Solar-Thermal Conversion for Efficient Water Purification and Thermoelectric Power Generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021; 14(1): 1034-1044. doi: 10.1021/acsami.1c20393

12. Ren J, Ding Y, Gong J, et al. Simultaneous Solar-driven Steam and Electricity Generation by Cost-effective, Easy Scale-up MnO<sub>2</sub>-based Flexible Membranes. *Energy & Environmental Materials*. 2022; 6(3). doi: 10.1002/eem2.12376
13. Li X, Li M, Shi Q, et al. Exhausted Cr(VI) Sensing/Removal Aerogels Are Recycled for Water Purification and Solar-Thermal Energy Generation. *Small*. 2022; 18(35). doi: 10.1002/sml.202201949
14. Jiang H, Ai L, Chen M, et al. Broadband Nickel Sulfide/Nickel Foam-Based Solar Evaporator for Highly Efficient Water Purification and Electricity Generation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020, 8(29): 10833-10841. doi:10.1021/acssuschemeng.0c02829