

基于半导体制冷的吸附式空气集水装置设计

吴奇寒, 曾丽娜, 刘兆悦, 许珂, 李美莹, 李再金, 巩日光, 曲轶, 刘国军, 李林*
海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2021年8月12日; 录用日期: 2021年8月27日; 发布日期: 2021年9月28日

摘要

将太阳能吸附式空气取水与半导体制冷技术结合, 设计出更高效更节能的空气取水装置。在系统中加入温湿传感器, 通过控制传感器电流大小以及液冷系统, 利用集水箱中的水实现水循环热端降温。将激光杀菌及过滤应用于系统中, 利用太阳能电池板和风力发电机为全系统提供电能, 实现节能环保, 收集洁净卫生的可直接饮用水。

关键词

吸附式空气取水, 太阳能, 吸附解吸, 半导体制冷

Design of Adsorption Air Catchment Device Based on Semiconductor Refrigeration

Qihan Wu, Lina Zeng, Zhaoyue Liu, Ke Xu, Meiyang Li, Zaijin Li, Yueguang Gong, Yi Qu, Guojun Liu, Lin Li*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Aug. 12th, 2021; accepted: Aug. 27th, 2021; published: Sep. 28th, 2021

Abstract

Combine solar adsorption air water intake and semiconductor refrigeration technology to design a more efficient and energy-saving air catchment device. The temperature and humidity sensor is added to the system, and the water in the water collection tank is used to cool the hot end of the

*通讯作者。

water cycle by controlling the current of the sensor and the liquid cooling system. Laser sterilization and filtration are applied to the system; solar panels and wind generators are used to provide electrical energy for the entire system, to achieve energy-saving and environmental protection, and to collect clean, sanitary and direct drinking water.

Keywords

Extracting Water from Air by Adsorption, Solar Energy, Adsorption and Desorption, Semiconductor Refrigeration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国由于人口众多, 人均淡水资源占有量不足世界平均值的 1/3 [1]。此外, 由于复杂的地质和气候条件, 我国的水资源在时间和空间上的分布也极为不均匀, 其中, 南部和东部地区水资源较为丰富, 而西北部地区水资源则较为匮乏。对于缺乏天然水资源的地区来说, 稳定的供水来源至关重要。在地球的大气中蕴含着丰富的水资源(云、水蒸气和雾), 且不受地理位置的制约, 是一个天然的淡水水库, 据计算, 其中含有大约 $1.29 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 的淡水[2]。此外, 由于大气环流的作用, 大气中的水分会保持较稳定的值, 即使在干旱的沙漠地区, 大气湿度也可以超过 10 g/m^3 。根据质量守恒原理, 空气的温度升高时, 地表的水分会蒸发, 导致水量减少, 而空气的绝对含湿量则会增加。因此, 可将空气看作是巨大的、清洁且可再生的水资源。空气取水技术是一种非常有前景且灵活的供水方式, 可以满足沙漠及偏远地区人们的用水需求, 尤其是海岛地区, 那里的空气中蕴涵着大量的淡水资源[3]。

空气取水的水源是地球上无处不在的湿空气, 水源获取能得到充足保障, 有利于直接进行淡水处理, 相较而言空气取水没有其他复杂的辅助设备, 体型小巧无过多的运动部件, 从而在使用方面更便于随身携带, 可随人或者交通工具随时转移, 因此从空气中取水是分布式取水系统的首选方法。通过空气取水法制造的随身制水装置, 应用场景不同于大型海水淡化工程, 更实用于野外科考、营地哨所、野战部队, 解决位于干旱、半干旱或者海岛地区的用水需求[4]。

目前, 国内外空气取水技术可分为 3 大类: 吸附解吸式、膜分离式、制冷结露法。其中, 太阳能吸附式空气取水系统(atmospheric water generator, AWG)采用吸附解吸原理, 如图 1 所示, 先进行开放式吸附过程(见图 1(a)), 然后进行闭式解吸 - 冷凝过程(见图 1(b)) [5]。

系统的基本工作原理是: 如图 1 所示, 在夜间, 由于吸附剂表面和空气中的蒸气压存在一定的差值, 所以利用这个差值吸附剂会吸取空气中的水分, 保存在吸附剂中; 到了白天太阳升起, 温度升高, 导致吸附剂表面蒸气压提高, 从而使水蒸气脱附, 通过冷凝将水蒸气转化为液态水。

空气取水领域的膜分离技术是一种新型的技术。膜渗透法空气取水原理是利用冷凝器和真空泵提供高渗透压, 将水蒸气从空气中提纯。

制冷结露法原理是利用水蒸气和冷表面接触后温度降低发生的冷凝现象, 降低湿空气的温度可以通过自然制冷或人工制冷的方法实现。是一种常用的空气取水方式, 结构简单应用广泛, 包括压缩机制冷、热电制冷、电磁制冷、雾收集式等。

根据已有文献报道, Tan 等人[6]通过实验研究了各种影响产水量的参数, 在 3 小时内最多获得了 50

mL 水。V. P. Joshi 等人[7]研究了由 10 个制冷片模块组成的小流量制水装置。Bortolini 等人[8]制造了含有 20 个制冷片模块的取水装置, 并研究了空气流速从 $57 \text{ m}^3/\text{h}$ 到 $127 \text{ m}^3/\text{h}$ 时对产水量的影响。Zhai 等采用了一种玻璃 - 聚合物混合超材料的高效辐射冷却器, 冷凝器位于装置的中下部, 一部分被埋入地下以强化冷凝作用。该系统需要手动切换阀门, 操作不便; 由于其固定在地面, 也不利于移动或携带[9]。Farhad 等设计了一种嵌套式空气取水系统[10], 壳体四周侧壁充当冷凝器, 顶部安装有太阳能集热器。白天, 太阳能集热器加热 MOF-801G 使其再生, 释放出的水蒸气接触到低温壁面, 冷凝为液态水。该系统可以提高取水量, 但是单位体积取水量低。

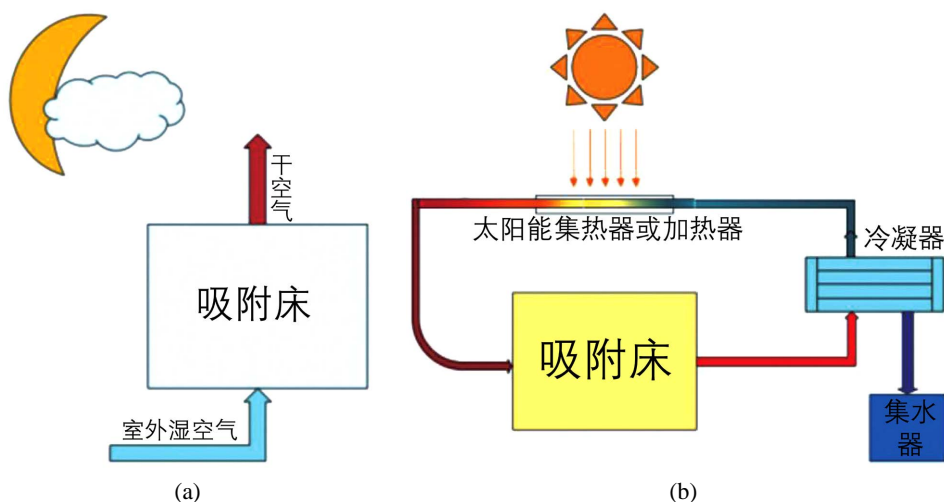


Figure 1. Schematic diagram of solar adsorption air water intake system. (a) Adsorption process; (b) Closed desorption-condensation process

图 1. 太阳能吸附式空气取水系统原理图。(a)吸附过程; (b) 闭式解吸 - 冷凝过程

目前研究的吸附式空气取水吸附材料的吸水能力高, 但取水效率制约着最终的取水量, 通过研究发现空气取水过程中大约 50% 的能源消耗在将水蒸气转化为液态水的冷凝过程中[11], 因此, 降低冷凝温度可以提高湿空气的捕捉率并降低单位取水能耗, 这就要求需要设计出强化的冷凝器使水蒸气可以高效地转化为液态水, 提高集水效率。

2. 关键技术

2.1. 半导体制冷系统

为了提高冷凝的效率, 本设计采用半导体制冷系统, 如图 2 为半导体帕尔贴效应。半导体制冷片由两种材料构成, 两种材料被分别称为 N 型半导体材料和 P 型半导体材料, 这两种材料相接触形成的 PN 结又称为电偶对, 在这个电路中接通直流电流后, 就能产生能量的转移, 电流由 N 型元件流向 P 型元件的接头吸收热量, 成为冷端; 由 P 型元件流向 N 型元件的接头释放热量, 成为热端。吸热和放热的大小是通过电流的大小以及半导体材料 N、P 的元件对数来决定[12]。由于半导体制冷技术不需制冷剂、重量轻、尺寸小、噪声低、温度控制精度高等优点, 科研、军事、航空、医疗等部门具有广阔的应用前景。

半导体的制冷温度与通过半导体的直流电大小有关, 随着电流的增大, 最低制冷温度随之降低。当制冷温度大于露点温度, 不结露, 当制冷温度小于露点温度时, 结露, 但如果工作电流过高, 制冷端温度过低, 达到 0°C 以下, 就会形成冰晶, 更有甚者就会结冰, 在这种工况下是制取不了冷凝水的, 而且还造成了能源浪费。所以需要找到半导体制冷片的最优工况。

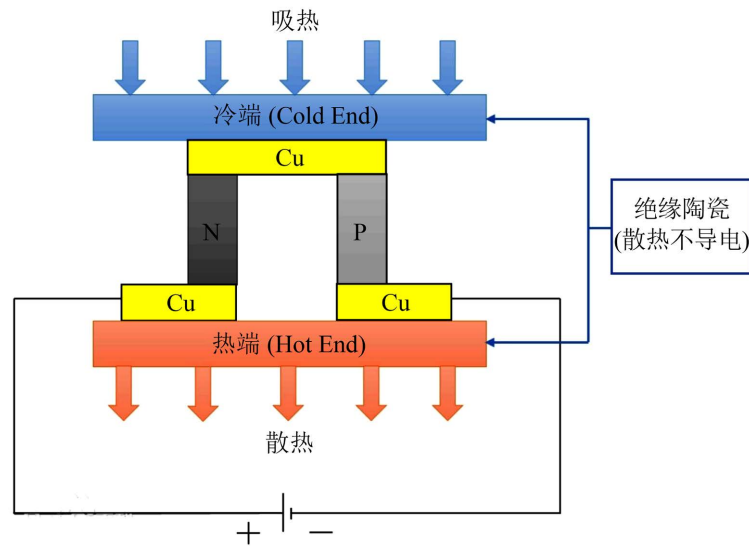


Figure 2. Peltier effect [12]
图 2. 帕尔贴效应[12]

半导体制冷片的制冷量 Q_c :

$$Q_c = (a_p - a_n)IT_c + k(T_c - T_b) - \frac{1}{2}I^2R \quad (1)$$

消耗功率 W :

$$W = I^2R + (\alpha_p + \alpha_n)(T_n - T_c) \quad (2)$$

半导体制冷片的制冷系数 ε :

$$\varepsilon = \frac{(a_p - a_n)IT_c + k(T_c - T_b) - \frac{1}{2}I^2R}{a_p + I^2R - a_n(T_n - T_c)I} \quad (3)$$

相关因子 $\theta_Q = \frac{Q}{Q_m}$ 和 $\theta_W = \frac{W}{W_m}$ 其中 θ_Q 等于实际制冷量和制冷片最大制冷量之比, θ_Q 越大表示实际制

冷量越接近制冷片最大制冷量; 同理, θ_W 表示实际功耗 W 和 W_m 接近程度。这时只需要使 $\frac{d\theta_Q}{dI} = 0$, 就能得到制冷片最优工况下的运行电流, 即最佳电流。

$$I = \frac{\alpha}{R} \frac{T_c^2 \left(T_k - \frac{1}{2} \Delta T \right) + \frac{\Delta T^2}{Z}}{T_c (T_k + T_c) - \frac{2\Delta T}{Z}} \quad (4)$$

式子中 α 代表塞贝克系数, 也叫温差电动势率, 单位 V/K , R 为半导体电阻, T_c , T_k 分别表示半导体冷端和热端温度, Z 为常数。由公式(4)可以看出最佳电流主要与半导体冷端和热端的温度有关, 为保证系统处于最佳电流状态, 在冷凝室入口加入温湿传感器, 控制电流大小, 实现最高效率, 最低能耗, 达到节能减排效果。

常见的 TEC1-12704、TEC1-12705、TEC1-12706 和 TEC1-12707 热电制冷片, 把半导体制冷片安装到实验平台上, 在其热端加上铝制散热翅片, 并通过完全相同的的风机对四组制冷片的热端翅片进行散

热，利用直流电压在热电片的两端加上工作电压 12 v，环境温度为 24℃。如图 3 为制冷片冷端温度随时间变化。

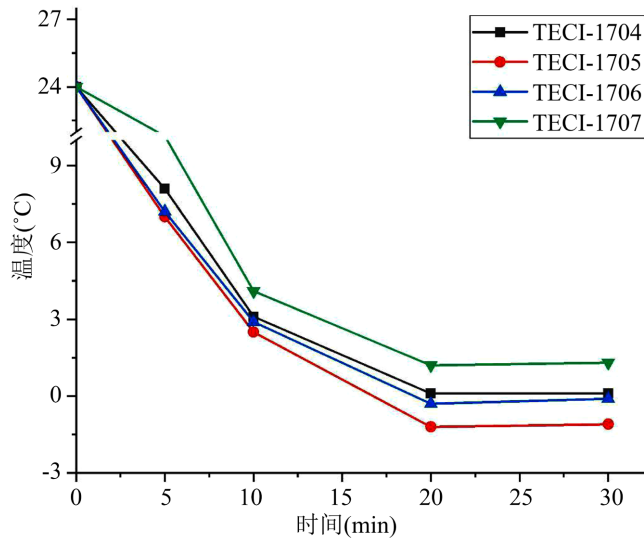


Figure 3. The temperature of the cold end of the cooling fin changes with time

图 3. 制冷片冷端温度随时间变化

假设室内温度 25℃，相对湿度 60%，有抽气泵风速为 1 m/s，则可查表得出露点温度为 16.7℃，25℃、100%相对湿度含水量 23.01 g/m³，25℃、60%相对湿度含水量 23.01 × 60% = 13.80g/m³，16.7 - 5 = 11.7℃、100%相对湿度含水量 10.45 g/m³，肋片表面规格是 40 mm × 22 mm，肋片共有 11 片，底座规格是 60 mm × 45 mm，接收肋片的空气按 10 mm 一层考虑，所以 $S = 0.06 \times 0.022 = 0.00132 \text{ m}^2$ ，则肋片每小时接触的空气质量 $1 \times 3600 \times 0.00132 = 4.8 \text{ m}^3$ ，所以结露量 $Q = (13.8 - 10.45) \times 4.8 = 16.1 \text{ g}$ 。若 10 个半导体制冷片连续工作 24h，则可以产水量 $Q = 16.1 \times 10 \times 24 = 3864 \text{ g}$ 。通过实验实际取水率为 45%，24 h 实际取水量大概为 1738 g。采用吸附解吸式取水量可达到 4~4.5 L/天，并且解吸速度更快。总取水量一天可达 6~6.5 L/天。

2.2. 半导体制冷片热端水循环降温系统

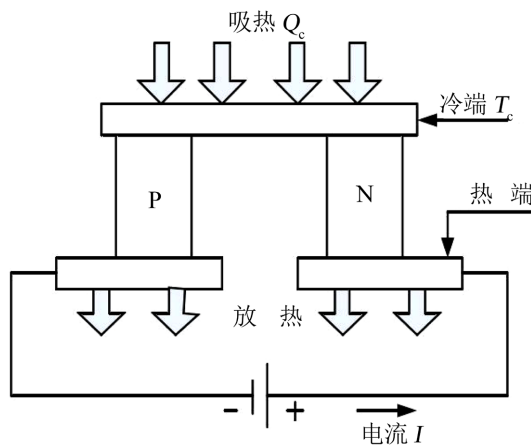


Figure 4. Peltier effect diagram

图 4. 帕尔贴效应示意图

如图 4 为帕尔贴效应工作时的冷端热端示意图，通常制冷片的工作目的是为了使冷端具有更低的制冷温度，对热端的温度并没有使用上的要求，但由于制冷片工作时，其冷端温度要远低于热端温度，所以通过材料的热传导会导致热端的热量传导至冷端，在一定程度上影响制冷片的性能，在长时间运行的条件下，为了持续保持冷端的低温状态，使半导体制冷片一直处于最佳工作状态，必须保证热端有一个良好的散热环境，源源不断地将冷端传递来的热量散发到环境中，所以制冷片的工作效果除了制冷片本身的材料优异还需要其热端处于良好的散热环境。故采取有效的半导体制冷片热端散热措施是保证其处于最佳运行状态的重要工作。

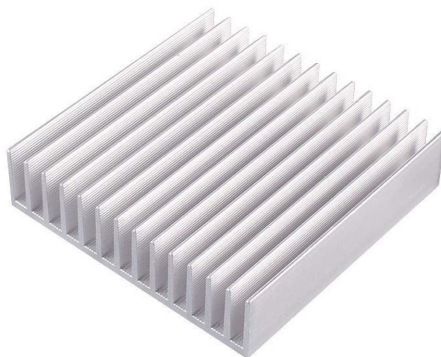


Figure 5. Fin
图 5. 翅片



Figure 6. Air-cooled radiator
图 6. 风冷散热器

目前对于半导体冷凝取水装置热端采取的散热措施主要是空气自然对流散热，如图 5 为自然对流散热常用翅片，通常情况下，散热效果较差，翅片需要更大面积才能达到效果从而影响体积。空气强迫对流散热：也称为风冷散热，如图 6 为常用风冷散热器，通常采用风机与翅片相结合的方式，基本能满足大部分设备散热需求，也是目前应用最普遍的散热方式。

液冷散热效果要远远大于空气自然对流换热效果，换热系数约是其 100 倍左右。对于液冷散热，可以有效减少附着在半导体制冷片热端的附件面积，其主要工作部件分开运行。目前半导体冷凝空气取水

热端散热还没有采取液冷散热方式，主要是由于本装置使用地区水资源匮乏，本文设计采用液冷散热方式，将冷凝水进行循环利用，通过集水箱系统与半导体制冷片的热端相连接，通过液体源源不断的循环带走半导体热端的热量。

综上，本文将在原有的太阳能吸附解吸的基础上，为了提高解吸效率，减少能量损耗，将原有的冷凝装置改为可控制冷温度，更加节能的半导体冷凝装置，利用半导体的帕尔贴效应为冷凝室降温析出水滴。由于半导体不止存在冷端还有热端，热端的温度会对冷端制冷效果产生影响，对此本文使用水循环液冷降温系统，实现冷凝水的循环应用，并提高了冷凝效率。由于太阳能吸附解吸过程分为夜晚吸附和白天解吸，效率较低，因此本文设计一种双系统工作模式，第一系统为太阳能吸附解吸系统，第二系统为半导体直接冷凝空气集水，双系统综合使用，提高冷凝集水效率。

3. 系统设计

由于太阳能吸附解吸过程需要吸附和解吸两个过程，在夜晚不能进行解吸过程，导致空气集水效率降低，所以本文设计两种系统进行工作，如图7为设计的基于半导体制冷的吸附式空气集水装置。

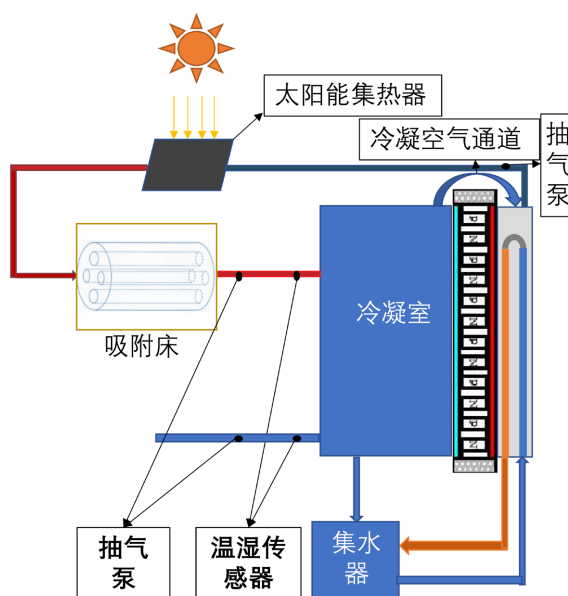


Figure 7. Adsorption air water collection device based on semiconductor refrigeration

图7. 基于半导体制冷的吸附式空气集水装置

为提高工作效率，此装置采用两种工作系统，第一个系统为半导体制冷空气取水，利用半导体的帕尔贴效应产生的冷端为冷凝室降温，使温度达到空气的露点温度。由于半导体的热端温度会影响冷端的制冷效果，本设计在原有的冷却方式上进行改进，采用空气对流与液冷散热相结合的方式对半导体的热端降温，将冷凝后的低温空气通入半导体热端，当空气对流方式满足不了降温时，将启动液冷散热方式，将集水器中的水循环通入半导体热端，实现降温。单纯的半导体制冷空气集水效率较低，为了提高效率将吸附解吸法与制冷结露法相结合，吸附解吸法晚上吸附剂吸附空气中的水蒸气，在吸附过程中无法取水，只有白天利用太阳能集热器加热空气，将高温空气通过吸附剂表面使水蒸气脱附，然后通过半导体制冷系统冷凝析出水滴。在解吸过程中取水效率高于半导体制冷空气集水十几倍。为了使系统可以在夜间白天持续运行，提高空气取水量，本设计将两种取水方式结合使用，配备有多个传感器控制，实现智能

化，更节能化，更高效的空气取水。

在夜间，吸附系统开始运行，吸附空气中的水蒸气，解吸过程停止，半导体制冷空气集水系统运行，通过温湿传感器调节流经半导体的电流大小使半导体制冷片处于最优工况，实现节能。当露点温度过低，电流过大会产生能源浪费，热端温度也会过高，影响冷端制冷，将会启动水冷装置。白天闭环解吸系统开始运行，冷凝温度不需太高，降低流过半导体电流，将冷凝空气通入半导体热端，会对空气实现加热以及对半导体热端的降温，实现温度的转移，提高取水效率。当温湿传感器探测流经吸附床的空气湿度低于 20%时，闭环解吸系统停止运行。

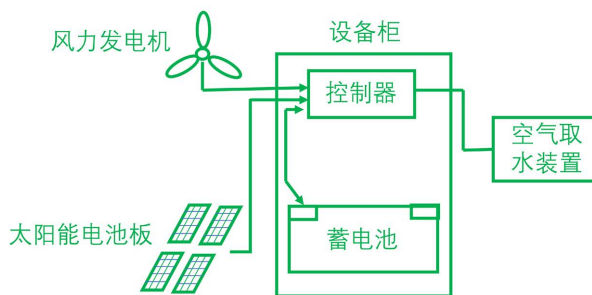


Figure 8. Wind-solar complementary power supply system
图 8. 风光互补供电系统

本设备为实现在极端环境下使用，采用风能和太阳能互补的供电系统，如图 8 所示，该装置设有太阳能电池板和垂直轴风力发电机，利用太阳能和风能发电，发出的电储存于蓄电池中，蓄电池连接控制器，控制器控制整个取水装置的运行。在海南，天气晴朗阳光充足或者在阴天风较大的情况下风光互补的供电系统可以提供一天工作所需电量。

3.1. 半导体制冷取水系统

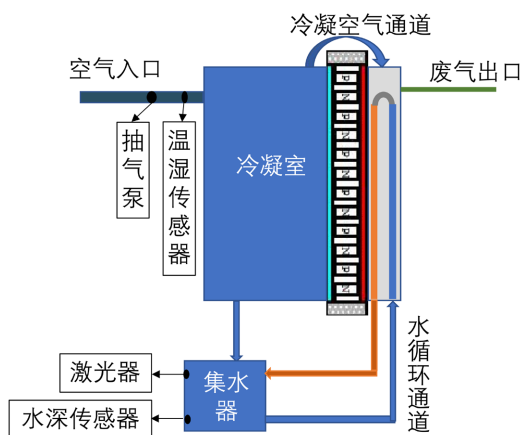


Figure 9. Structure diagram of semiconductor cooling air water intake
图 9. 半导体冷却空气取水结构图

如图 9 为半导体冷却空气取水装置，系统包括抽气泵、温湿传感器、冷凝室、集水器、水循环装置、集水器中包含激光器、水深传感器等。装置通过入口处的抽气泵将环境中空气导入冷凝室中，冷凝室与半导体制冷片相连，半导体制冷片持续为冷凝室提供冷量，降低冷凝室的温度。进入冷凝室的空气会和

冷凝室内部冷端翅片相接触,湿空气和冷端翅片之间发生热湿交换。相较半导体制冷片冷端翅片的低温,湿空气的温度较高,通过对流换热使热量从湿空气传递到翅片,湿空气被低温的翅片冷却温度不断降低,当湿空气温度降低到其相对湿度相应的露点温度时,湿空气中气态的水蒸气会逐渐转变成液态析出,附着在翅片表面形成小液滴,当小液滴逐渐长大,受到的重力大于翅片提供的附着力时,水滴就会从翅片表面低落,被放置在翅片下方的集水箱收集起来。

在空气的入口处安装有温湿传感器,是由于制冷温度与通过半导体的直流电大小有关,随着电流的增大,最低制冷温度随之降低。为了保持一个很好的制冷工况,需要对制冷温度进行控制,因为外界环境会发生变化,制冷温度与露点温度的关系密切,采用公式(4)计算的最佳工作电流,在保证工况的情况下,控制半导体制冷端制冷处于最优工况,且随着露点温度的变化同时发生变化,这样既能较好工况制冷取水,同时最大限度节省能源。

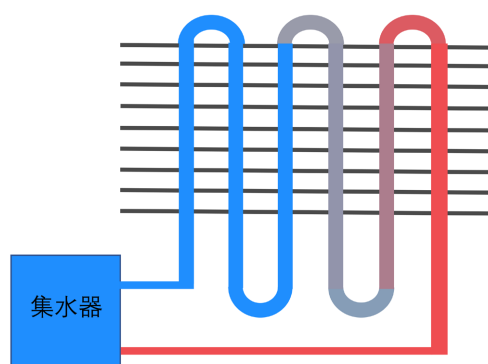


Figure 10. Liquid cooling structure diagram
图 10. 液冷结构图

如图 10 为液冷结构图。为了保证热端的散热提高半导体冷端的制冷效果,节约资源,本系统在原有的散热方式中进行改进,采用两种散热方式,系统会根据外界环境的变化,更高的节能以及制冷效率的需要选择空气对流散热、液冷散热或两者共同散热。空气对流散热是将冷凝后的空气经冷凝空气通道导入半导体的热端,将直接排放于空气中的低温废气,再循环回到半导体制冷片的热端,回收废气中的冷量,增强半导体热端散热,提高装置取水性能,之后通过废气出口排出。由于空气散热效果较差,在夜间环境温度较低的情况下,湿空气中露点温度也会相应降低,此时需要增加电流使冷凝室的温度达到露点温度以下,热端温度也会相应增加,影响冷端制冷效果,此时水循环液冷散热系统将会开启。由于此设备是在极度缺水的环境中使用的,本设计采用冷凝空气到集水器中的水作为液冷系统的液体,首先系统会通过水深传感器探测收集器中的水是否达到循环所需量,当收集器中的水达到所需量时抽水泵开始工作,将收集器中的水通入半导体热端实现降温,提高冷端制冷效果,降低半导体能耗,提高集水效率。冷凝水会循环进入集水器,实现水资源的循环利用。由于液冷换热表面容易发生污垢沉淀,从而造成换热下落降低,需要在水循环通道加入过滤装置。

通过对装置的搭建实验发现可以通过传感器单片机实现对半导体制冷片电流大小的控制,使制冷片处于最优工作状态,在外界温度处于室温情况下只使用风冷装置进行半导体降温,当调节外界温度低于 20°C 时,集水器中水量充足时,控制器控制液冷装置开始工作。在室温为 25°C ,相对湿度为 60% 的环境中含水量为 13.80 g/m^3 ,由于在此环境下的露点温度为 16.7°C ,在 16.7°C 时 100% 的含水量为 10.45 g/m^3 。实验中采用的半导体规格为 $60\text{ mm} \times 22\text{ mm}$,10 个半导体制冷片连续工作 24 h,24 h 实际取水量大概为 1738 g。

3.2. 吸附解吸取水系统

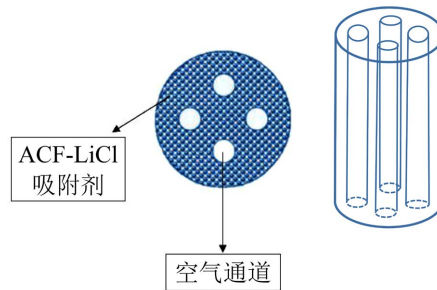


Figure 11. Adsorption bed structure [13]
图 11. 吸附床结构[13]

如图 11 为太阳能吸附式空气取水夜间吸附过程吸附床的结构[13]，包括固化复合吸附剂 ACF-LiCl 和四传质通道。以活性炭纤维毡为基质的复合吸湿性盐氯化钠的固化复合吸附剂 ACF-LiCl，其最大循环取水能力高达 0.65 g/g，且其取水能力随着相对湿度的增加而急剧提高。为了提高夜间的吸附效果，需要增加空气流通的速度以及空气与吸附剂的接触面积，为增加空气流通速度在吸附床一端增加抽气泵。增加空气与吸附剂接触面积能大大提升吸附量，但是考虑到再通过增加传质通道直径来增加接触面积的话，单根吸附床体装载吸附剂量过少，故此在本章考虑保持传质通道体积不变的情况下，设法增加空气与吸附剂接触面积，并缩短空气与吸附剂接触所需扩散距离。本设计将单根传质通道变为如图 11 所示的四传质通道，当风机功率，风压不变，造成空气流速减小，空气流量减小。当风速减小，空气在吸附床内停留时间更长，与吸附剂接触反应更久，因此空气中水蒸气被吸附的更充分。

通过对仪器的搭建实验，在晚上设置吸附环境平均温度为 12.9℃，相对湿度为 52%，查文献可知该环境下，空气含湿量 $d = 4.85 \text{ g/kg}$ ，空气密度为 1.2299 kg/m^3 。根据测试结果，风速为 12.2 m/s，空气流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ，吸附剂填充质量为 474.254 g。吸附了 12 h 后，吸附量为 183.4 g。增加吸附剂填充质量可以吸收更多水汽。

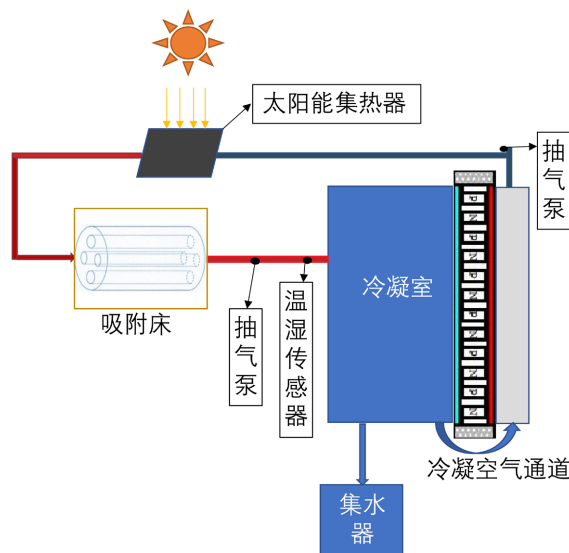


Figure 12. Closed-loop desorption structure diagram
图 12. 闭环解吸结构图

如图 12 为白天闭环解吸 - 冷凝过程, 系统包括吸附床、太阳能集热器、抽气泵、温湿传感器、冷凝室、半导体、集水器等装置。空气经太阳能集热器被加热为高温气体, 含湿量不变, 高温气体经过吸附床, 使吸附床再生, 并将吸附床中的水分带走, 变为高温高湿气体, 将解吸后的高温高湿气体通入冷凝室进行冷凝, 相较于以前设计, 本文利用半导体帕尔贴效应产生冷端和热端, 将冷凝室与半导体冷端相连, 半导体制冷片持续为冷凝室提供冷量, 降低冷凝室的温度, 进入冷凝室的湿空气温度降低到其相对湿度相应的露点温度时, 湿空气中气态的水蒸气会逐渐转变成液态析出。采用半导体制冷片使水蒸气可以高效地转化为液态水, 提高集水效率。为了节省资源, 将冷凝之后的空气继续通过冷凝空气通道导入半导体的热端, 一方面冷凝之后的空气温度较低, 可以对半导体的热端实现降温, 另一方面由于解吸过程需要的空气温度为 $70^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$, 冷凝后的空气经过半导体热端会进行加热, 再通过太阳能加热器时可以使温度更快的达到解吸温度, 提高解吸效率。本设计可以将半导体热端温度更好地利用, 实现能源的高效利用, 更加节能。系统中的温湿传感器会探测空气中的温度和湿度, 当湿度低于 20% 时, 即在 30°C , 1 立方米空气含水低于 6 克, 停止闭环解吸。

通过实验在吸附床吸附 12 h 后, 吸附量为 5333.3 g 的情况下解吸, 在光照充足的情况下, 解吸温度可以达到 $70^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$, 经过三到四个小时的解吸, 湿度低于 20%, 系统自动停止工作, 集水量可达 4 L 左右。在双系统工作状态下, 24 h 总的集水量可以达到 6~6.5 L/天, 可保证多人正常水摄入量, 对人的正常生理活动有着重要意义。

3.3. 水处理系统

水是生命之源, 水中含有生命所需的各种物质, 因而会有各种细菌、病毒在水里面生长、繁殖。本装置采用过滤系统和激光净化系统对收集后的水进行处理。在空气通道中安装有空气过滤器, 可以过滤掉空气中的各种微粒灰尘等。在冷凝水收集器中安装有多支滤芯, 可以过滤掉冷凝水中的杂质, 部分细菌和病毒等。但还有部分细菌病毒会进入收集器中, 采用激光净化系统进行处理。激光是一种受激辐射发射出的高能光子, 具有能量大、亮度高、单色性好等特点, 波长 250~800 nm 的激光具有较强的杀菌效果。尤以波长 265 nm 附近的激光, 杀菌效果最为理想。因为它与 DNA 分子的共振吸收波段相接近, 最容易引起生物大分子的吸收, 受激、振荡或电离, 致使某些化学键出现断裂或部分断裂, 甚至使染色体发生畸变, 因而性状发生变异。随着科技的发展激光杀菌技术已经取得了较为成熟的发展, 半导体激光器的发展使激光器更小型化, 能耗更小, 价格更便宜, 且对水滴的杀菌效果显著, 对水中的大肠杆菌, 肠道沙门氏菌, 金黄色葡萄球菌等细菌具有灭杀作用。本设计将半导体激光器安装在集水器外部, 通过光导光纤传输到集水器中, 通过照射集水器中的水滴, 实现有效地杀菌处理。彻底消灭水中的任何细菌和微生物, 同时, 还保留了自然界水中对人体有益的微量矿物质离子, 处理后的水无毒且健康。

4. 结论

本设计对原有吸附解吸法取水的冷凝系统进行改进, 将半导体制冷空气取水与吸附解吸法相结合, 将吸附解吸空气取水的冷凝方式设计为半导体制冷, 温度可控采用双系统集水模式, 在夜晚吸附过程, 半导体制冷空气取水系统依然可以运行, 实现二十四小时不间断取水, 相较于单纯一种空气取水方式效率更高, 能耗更低。同时, 为提高半导体冷端制冷效果并节约资源, 在半导体热端加入液冷装置, 利用集水箱中的水实现水循环热端降温, 通过在系统中加入各种温湿传感器, 通过传感器控制电流大小, 以及液冷系统的运行, 提高冷凝效率, 减少损耗。本设计将已经发展成熟的激光杀菌技术应用于空气取水装置, 保证水质洁净卫生, 可直接饮用, 可以用于野外科考、营地哨所、野战部队, 解决位于干旱、半干旱或者海岛地区的用水需求。

基金项目

海南省科技项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192, 120MS031), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省高等学校教学改革项目(Hnjg2021ZD-22), 国家自然科学基金项目(62064004, 61964007, 61864002), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07), 大学生创新训练项目(202111658013)和大学生创新创业开放基金(202111658021X, 202111658022X, 202111658023X)资助。

参考文献

- [1] 李强, 郝秀渊. 空气取水技术研究综述[J]. 山西建筑, 2016, 42(31): 124-126.
- [2] Alayli, Y., Hadji, N.E. and Leblond, J. (1987) A New Process for the Extraction of Water from Air. *Desalination*, **67**, 227-229. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(87\)90246-3](https://doi.org/10.1016/0011-9164(87)90246-3)
- [3] Abualhamayel, H.I. and Gandhidasan, P. (1997) A Method of Obtaining Fresh Water from the Humid Atmosphere. *Desalination*, **113**, 51-63. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00114-8)
- [4] 王佳韵. 基于复合活性炭纤维材料的吸附式空气取水原理与系统[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [5] 俞乔力, 纵建, 葛新石, 等. 太阳能吸附式和太阳能制冷结露法空气取水器取水效率的分析比较[J]. 太阳能学报, 1996, 17(4): 365-370.
- [6] Tan, F.L. and Fok, S.C. (2013) Experimental Testing and Evaluation of Parameters on the Extraction of Water from Air Using Thermoelectric Coolers. *Journal of Testing & Evaluation*, **41**, 96-103. <https://doi.org/10.1520/JTE20120105>
- [7] Joshi, V.P., Joshi, V.S., Kothari, H.A., Mahajan, M.D., Chaudhari, M.B. and Sant, K.D. (2017) Experimental Investigations on a Portable Fresh Water Generator Using a Thermoelectric Cooler. *Energy Procedia*, **109**, 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.085>
- [8] Bortolini, M., Gamberi, M., Graziani, A. and Pilati, F. (2015) Refrigeration System Optimization for Drinking Water Production through Atmospheric Air Dehumidification. In: Dincer, I., Colpan, C., Kizilkan, O. and Ezan, M., Eds., *Progress in Clean Energy*, Volume 1, Springer, Cham, 259-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16709-1_18
- [9] Zhai, Y., Ma, Y., David, S.N., et al. (2017) Scalable-Manufactured Randomized Glass-Polymer Hybrid Metamaterial for Daytime Radiative Cooling. *Science*, **355**, 1062-1066. <https://doi.org/10.1126/science.aai7899>
- [10] Farhad, F., Kalmutzki, M.J., Kapustin, E.A., et al. (2018) Practical Water Production from Desert Air. *Science Advances*, **4**, Article No. eaat3198. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3198>
- [11] Gido, B., Friedler, E. and Broday, D.M. (2016) Assessment of Atmospheric Moisture Harvesting by Direct Cooling. *Atmospheric Research*, **182**, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029>
- [12] 张浩, 张博博. 热冷凝除湿技术的应用研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(1): 12-15.
- [13] 杨凡. 吸附式空气取水装置研制及特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.