

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.06.003

太阳能加湿除湿浓盐水淡化技术研究进展

沈煜^{1,2}, 陈四川³, 费学宁^{1,4,5,6}, 赵洪宾⁴, 池勇志⁷, 李梅彤⁶

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 101408; 4. 天津城建大学 理学院, 天津 300392; 5. 天津市化工废水源头减排与资源化工程技术中心, 天津 300392; 6. 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300382; 7. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300392)

摘要: 加湿除湿淡化工艺是一种利用低位热能实现浓盐水淡化的水处理技术。该技术提高了设备热回收利用率, 通过将加湿箱与除湿箱分离, 使浓盐水和淡水部分严格分开, 浓盐水可以限制在很小的区域, 其他区域可以用非昂贵材料制造, 降低了设备成本。介绍了浓盐水加湿除湿淡化技术原理、结构组成及开发研究历程进展, 分析了影响浓盐水淡化效率的主要因素及相关改进研究, 阐明了该工艺的技术特点, 探讨了加湿除湿淡化技术亟待解决的技术问题。研究认为, 以太阳能为热源的加湿除湿技术适用于浓盐水储量较大且太阳能丰沛的干旱半干旱地区, 是解决民生饮水增量问题的有效措施。

关键词: 太阳能; 加湿除湿; 浓盐水淡化; 淡化效率

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)06-0018-07

Research Progress of Solar Humidification and Dehumidification of Brackish Water Desalination Technology

SHEN Yu^{1,2}, CHEN Si-chuan³, FEI Xue-ning^{1,4,5,6}, ZHAO Hong-bin⁴,
CHI Yong-zhi⁷, LI Mei-tong⁶

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 4. School of Science, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300392, China; 5. Tianjin Municipal Engineering and Technology Center for Source Emission Reduction and Recycling of Chemical Wastewater, Tianjin 300392, China; 6. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300382, China; 7. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300392, China)

Abstract: Humidification and dehumidification desalination process is a kind of water treatment technology which uses low-level heat energy to realize brackish water desalination. This technology

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578360、51778398)

通信作者: 费学宁 E-mail: xueningfei@126.com; 陈四川 E-mail: chensichuan@ucas.ac.cn

improves the heat recovery and utilization rate of the equipment. The equipment can separate the humidification box from the dehumidification box, so that the seawater and fresh water can be strictly separated. The brackish water can be limited in a small area, and other structure can be made of economic materials, thus reducing the equipment cost. In this paper, the principle, structure and research progress of brackish water humidification and dehumidification desalination technology are introduced. The main factors affecting the efficiency of brackish water desalination and related improvement were analyzed. The technical characteristics of the process were summarized in details, and the technical problems to be solved in humidification and dehumidification desalination technology were discussed. It is considered that the humidification and dehumidification technology with solar energy as the heat source is suitable for the arid and semi-arid areas with large reserves of brackish water and abundant solar energy, which is an effective measure to solve the problem of increasing drinking water for people's livelihood.

Key words: solar energy; humidification and dehumidification; brackish water desalination; desalination efficiency

浓盐水是干旱半干旱地区规模化存在含盐量较高的水体,一般将含盐量、氯化物或硫酸盐含量分别大于 1 000、800 和 400 mg/L 的水体称作浓盐水。浓盐水体分布广且含盐量高,如海水、咸水湖等都是典型的浓盐水。在我国西部以及中东部等干旱半干旱地区,由于地貌、水文地质和气候环境等综合因素的影响,全年降水量少,太阳能丰沛,蒸发量高于降雨量几倍甚至几十倍,导致地表雨水和融水淡水增量中含盐量迅速增加,加大浓盐水占比,形成淡水越来越少、浓盐水越来越多的恶性循环,成为制约干旱半干旱地区民众生产生活及经济发展的瓶颈问题。对于偏远干旱地区,居民居住分散,电力供给不足,一些常规淡化方法如反渗透、多效蒸发、电渗析等方法成本高、耗电量大,不能有效解决这些地区的生活饮水补给困难。利用当地丰富的太阳能和简易、无能耗的小型装置对浓盐水进行淡化是解决贫困、分散地区饮用水问题的有效途径之一。

近年来利用太阳能加湿除湿进行浓盐水淡化受到广泛关注。太阳能作为可再生清洁能源,可成为解决干旱半干旱地区饮水增量的重要途径。太阳能加湿除湿浓盐水淡化系统能高效利用太阳能生产淡水,具有广阔的应用前景。加湿除湿淡化方法由传统的太阳能蒸馏淡化发展而来,与传统的太阳能蒸馏相比,其热效率和产水量都得到了很大的提高。

1 太阳能加湿除湿技术的发展脉络

1.1 太阳能淡化蒸馏

人类很早就想到可以通过太阳的能量来产生淡水,最早有文献记载的太阳能蒸馏是由 15 世纪一位阿拉伯炼金术师完成的,他利用抛光的大马士革镜对太阳光进行聚焦,将聚焦光线投射到盛满海水的玻璃瓶中,通过聚光传递热能,使海水相变蒸发,冷凝回收后得到淡水。

1872 年,智利 Las Saunas 地区为满足当地采矿业的淡水需求,以冶炼矿物产生的浓盐水为原料,建设了一个大型的太阳能盘式蒸馏器,日产淡水量达 2.3 m^3 ,产水率 $2\sim 4 \text{ L/m}^2$,热效率达 $35\%\sim 45\%$ 。早期的太阳能淡化装置由于冷凝过程的潜热通过玻璃盖板散失到环境,存在冷凝热利用率低、产水量少等缺点。太阳能蒸馏器在传统的水平盘式之后又出现了倾斜式等多种型式。1973 年,Frick 对水平盘式蒸馏器热吸收效率进行了研究,提出倾斜放置并具有黑色水槽的蒸发器,其热吸收效率更高。在这些基本型式的基础上,太阳能淡化装置逐渐由单级结构发展到多级结构,进一步提高了热利用效率。1978 年,Malik 等针对单级盘式太阳能蒸馏器热效率低的问题,研制出利用冷凝潜热的双盘式蒸发器,产水率达到了 $3\sim 5 \text{ L/m}^2$ 。

20 世纪中叶,太阳能蒸馏器和太阳能蒸馏淡水生产装置受到广泛关注,到 1974 年,世界上建造的日产淡水 1 m^3 以上的大型太阳能蒸馏装置已有 20 余座,而传统的太阳能海水淡化装置最近报道较

少,且多用在偏远和干旱地区^[1]。

1.2 加湿除湿原理及技术进展

太阳能利用分为直接法和间接法两种。直接法是通过太阳能集热器内部加热海水,并形成蒸汽进行淡化,而间接法海水淡化系统分为集热系统与冷凝系统,集热系统只用于加热海水和空气,冷凝系统则是将送入冷凝器的蒸汽凝结成淡水^[2]。

加湿除湿淡化方法由传统的太阳能蒸馏淡化发展而来。由于原始的太阳能淡化装置蒸发和冷凝发生在同一空间,它们不能同时提高蒸发温度和降低冷凝温度。1978年Malik等详细分析了太阳能蒸发器结构与效率的关系,发现系统中水溶液表面产生的气态水分子达到一定浓度后,系统内压强增加,抑制了水溶液气体分子进一步的挥发,降低了水体分子加湿的进程。当系统温度升高时,液面上方过饱和的水汽及时转移至冷凝室液化为淡水,促进了加湿过程的进行。在此基础上还认识到水体的加湿除湿存在相关性,加湿除湿的平衡关系是决定水体淡化效率的关键因素(能量转化平衡关系和水体相变平衡关系)。首次明确提出了加湿除湿作用原理,为进一步研究指出了方向,使后续的研究重点集中到提高加湿除湿淡化浓盐水效率方面。加湿除湿与传统蒸馏淡化效率对比见表1。

表1 加湿除湿与传统太阳能蒸馏设备淡化效率对比

Tab.1 Comparison of desalination efficiency between humidification and dehumidification and traditional solar distillation equipment $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$

加湿除湿设备		传统太阳能设备	
方法	产水率	方法	产水率
间接法	8~12	单级盘式	2~3
直接法	5~10	多级倾斜	3~5

喷淋式加湿-除湿淡化装置(见图1)是间接法的典型代表。该装置由两个垂直的矩形管道组成,从顶部和底部连接,形成一个用于空气循环的闭环,顶部有风机连通,底部则分别安装盐水槽和淡水槽且相连。加湿器内有以45°倾斜角固定的木质条板,将盐水加到冷凝器中,以部分冷凝空气中的水蒸气。冷凝产生的潜热用于预热给水,然后在平板太阳能收集器中对给水进一步加热,并将其喷洒到加湿器的木质包装上。空气被连续加热和加湿,然后在冷凝器中部分除湿。从冷凝器底部收集淡水,而从加湿器底部排出温盐水。在约旦地区,辐

照良好的状况下,该装置产水量是传统太阳能蒸馏器的2.5倍左右,淡水产量达到 $12 L/(m^2 \cdot d)$ 。

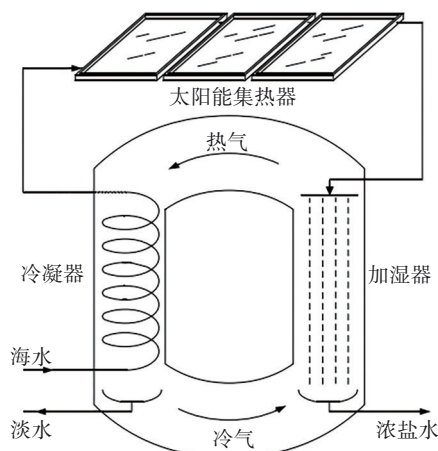


图1 分离式蒸馏器模型

Fig.1 Separate still model

近年来,随着高效太阳能集热技术的发展,特别是集热保温材料的研发极大提高了太阳能集热器的供热温度,使太阳能的应用范围更加广泛。已取得阶段性成果的有太阳能多效回热蒸馏系统和太阳能压缩蒸馏系统等,精密自动跟踪技术和聚光集热技术的突破也使得太阳能海水淡化技术日趋成熟,众多的新技术将拓宽太阳能海水淡化系统的发展空间和应用领域。

2 加湿除湿影响因素及淡化装置研究进展

2.1 产水效率的影响因素

系统产水效率主要与加湿、除湿效率,以及潜热回收等因素有关。与传统的蒸馏器相比,加湿除湿设备的加湿与除湿过程可以分别控制,并对潜热加以回收,提高系统的热效率。

强制空气对流的蒸馏器如图2所示。

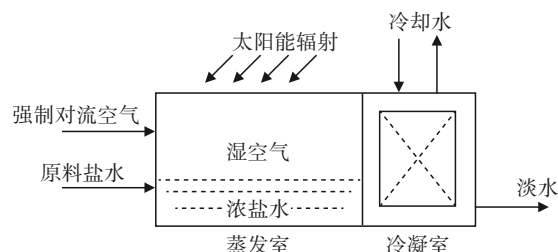


图2 强制空气对流的蒸馏器

Fig.2 Forced air convection still

该装置中,根据传统太阳能蒸馏方法使咸水蒸发后,引入流动的空气,将蒸发室内的高温湿空气带入冷凝室冷却并获得淡水,同时冷凝潜热通过传

热介质进行回收,从而提高热效率。与传统太阳能蒸馏器不同的是,蒸发室内的湿空气被空气泵送走,降低了盐水表面压强,促进了气液相变效率。此外,由于冷凝室和蒸发室分离,冷凝效果显著提高且潜热得到回收,热效率更高。

常泽辉等^[3]和伍纲等^[4-5]研究了在不同运行环境下多种参数对多级叠置式太阳能加湿除湿浓盐水淡化装置产水效率的影响,并通过增加喷淋、加湿填料等方法提高加湿效率,理论分析了多级装置对系统潜热回收提高产水量的影响,装置的单位产水量可达单级的2倍。

陈子乾等^[6]采用降膜蒸发、凝结技术设计建造了一台三级叠置回热式小型海水淡化装置,研究表明,该装置具有运行温度低、快速产水且产水率高等优点,当供热水温度升高时,系统的产水率迅速增加,冷却水温度和水流速率对产水量有一定影响,但关系较弱。

2.2 影响加湿效率的因素

空气的加湿过程是加湿除湿淡化系统中的重要环节,加湿效率是淡化系统性能提升的关键因素,喷雾加湿、鼓泡加湿及降膜蒸发等多种形式用于提高加湿器的加湿效率。

① 喷雾加湿技术

喷雾加湿技术是将液体雾化成小水滴,增加液体与气体的接触面积,从而增大空气湿度。喷雾加湿技术在工业上应用广泛,较为成熟。2010年,埃及El-Agouz^[7]设计了一个由蒸发塔、冷凝塔和太阳集热器为一体的淡化系统,海水预热后进入压力喷头来产生喷雾,系统的整体热效率比普通加湿除湿提高了30%。试验结果表明,淡水产率与进水温度、空气流量有着明显的相关性。侯经纬等^[8]将喷雾蒸发和低温蒸馏技术进行耦合实验,利用喷雾装置余热加热原水进行多次蒸馏,装置的热效率得以提高。张凌云^[9]利用超声波的特性,将超声波雾化技术运用到盐水淡化领域,增大了盐水的蒸发量。

② 鼓泡加湿技术

鼓泡加湿是增大空气湿度的一种有效方法,该方法利用空气泵对水体进行鼓泡,有效增加了气液界面的比表面积,实现了海水与空气的快速热湿交换。郭丽玮^[10]设计了一种均匀曝气式太阳能盐水淡化装置,在加湿舱内放置曝气管,热空气通过曝气管上的小孔喷出进入盐水中进行加湿,实验表

明,载气流量在一定范围内增大时,曝气后较曝气前的盐水蒸发量提高了20%左右,产水量增加。刘忠等^[11-12]设计建立了一个多效鼓泡蒸发式太阳能淡化装置,研究表明,在一定时间内海水的蒸发量和鼓气量存在正相关性,但存在一个鼓气量最佳值;据此构建了传热-传质数学模型,提出了总传热系数的计算方法。

③ 降膜蒸发技术

降膜蒸发是将海水喷淋在降膜蒸发器上,形成的均匀水膜与热空气进行有效的热湿交换,从而使空气中淡水蒸汽比例增高。李正良等^[13]设计建造了一个多效回热的小型太阳能海水淡化系统,并对装置瞬态和稳态产水性能进行了实验研究。结果表明,用电加热水箱模拟太阳集热系统在80~90℃供热时,稳态产水量达到30 kg/h以上。Chen等^[14]基于降膜蒸发冷凝机理,设计建造了三效再生四级的中型太阳能海水淡化装置,在海水淡化过程中利用了蒸汽的凝结潜热,提高了产水效率。该装置由全玻璃真空管太阳能收集系统驱动,采用自然循环和强制循环相结合方式,在晴好天气下运行时,产水效率可达到10 kg/(m²·d)。

2.3 加湿除湿型浓盐水装置的研究进展

为了提高传统加湿除湿装置的产水量,开发了不同类型的淡化装置。

Yuan等^[15]基于加湿除湿原理,设计安装了一套全天闭式循环太阳能海水淡化系统(见图3),利用太阳能空气集热器对海水和空气预热,并使用喷雾加湿技术提高加湿效率,预热空气后产水效率较常温下提高了10%~20%。测试中,加湿器出口温度控制在40~55℃之间,相对湿度在80%~90%之间,系统产水量可达1 200 L/d。

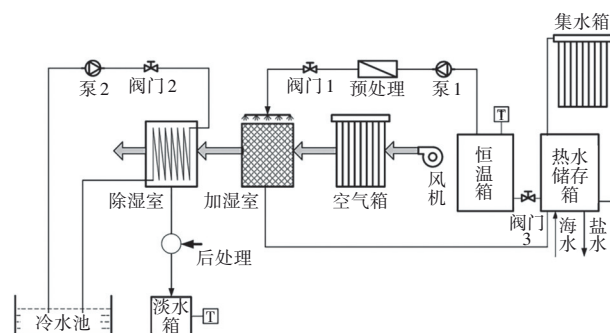


图3 太阳能海水淡化喷淋装置

Fig.3 Solar seawater desalination spraying device

2013年Nematollahi等^[16]研究了集热器和加湿器的结构尺寸对加湿除湿淡化系统能量消耗和产水效率的影响,结果表明,降低加湿器的高度、增加加湿器的直径并减小进口空气温度,系统的能耗将会降低,产水效率得以提升。2014年Sharqawy等^[17]对加湿除湿淡化体系中的热水和热空气两个封闭的循环系统进行改进设计和试验研究。结果表明,加湿器和除湿器尺寸较大时,系统的产水率较高,加湿除湿性能更好;提高加湿器中的原水初始温度后,热空气循环系统中的产水率得以提高,热水循环系统中的产水效率降低。Chen等^[18]提出一种新型的太阳能海水淡化装置,装置包括太阳能集热器、风力发电机、喷雾加湿器和多级回热式海水淡化系统,运行过程中成功回收的大量冷凝潜热和显热用来预热海水和空气,并且采用降膜蒸发和蒸汽压缩技术,通过堆叠塔板,使装置的性能和产水量提升了10%~15%;研究还给出了系统的瞬态性能及装置运行温度、循环风量、海水流量和产水量的关系。

2.4 浓盐水淡化模型

蒸馏器内部的热质传递通过对流、蒸发、冷凝及辐射的方式进行,因此了解热质传递系数对预测太阳能蒸馏器产水性能具有十分重要的作用。在积累了大量的太阳能实验数据之后,1961年Dunkle首次提出了关于热法太阳能海水淡化的理论模型,并针对传统盘式蒸馏器提出了一组传热传质关系式:

$$h_c = 0.884 \left[T_w - T_c + \frac{(P_w - P_c)(T_w + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: h_c 为吸热面与冷凝面间的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_w 为液膜温度, K ; T_c 为冷凝面的温度, K ; P_c 为冷凝面附近水蒸气的饱和分压力, Pa ; P_w 为吸热面附近水蒸气的饱和分压力, Pa 。

之后国内外学者根据大量试验数据得到的经验构建了许多数学模型,以研究加湿淡化过程中关键参数的影响。由于不同的实验条件,各个模型的适用范围也不相同,获得最佳操作参数的方法也有不同。Zheng等^[19]对Dunkle关系式中对流传热系数的无关参数进行删减改进,建立了新型盘式蒸馏器中传热传质关系式,适用范围更广。Ahsan等^[20]发

现管式加湿除湿装置产水量小于蒸发量,装置内部循环的水蒸气未饱和,因此提出了一个新的计算产水量的方法,并根据量纲分析理论推导出了蒸发传热系数^[21]和冷凝传热系数^[22]。该模型模拟不仅可以得到蒸发量、海水温度、冷凝温度、水槽温度,还可以获得内部温度变化值、水蒸气密度、相对湿度等新参数,并可预测设备产水量。

Soufari等^[23]利用数学模型对加湿除湿淡化系统进行了优化设计,研究表明,当提高进口空气温度时,比热能的消耗将降低,且进口空气温度存在最优值。

解利昕等^[24]将低温多效蒸发过程中涉及的各种平衡关系进行整合,运用牛顿迭代法,对海水淡化系统的各段工艺参数进行优化,为进一步优化系统性能提供了依据。该模型精度能很好地运用到实际操作中,对比发现实验与仿真具有较好的拟合关系。Mehrgoo等^[25]提出了一种直接接触式增湿除湿海水淡化系统,对比分析了自然循环和强制循环的淡化过程,并利用拉格朗日因子和遗传算法对系统的产水率进行优化,结果表明加湿器进口水温对系统的热能利用效率产生了重要影响。

3 太阳能加湿除湿处理浓盐水技术应用

近年来,国内外学者将太阳能海水淡化技术与其他领域耦合,提出了许多新的利用太阳能进行海水淡化的系统。袁合涛^[26]将太阳能光热和光伏技术相耦合,将蒸发室与冷凝室集成为一体,设计了一种微型浓盐水淡化装置,研究了能量传输模型、影响产水量的主要因素及其之间的关系。研究结果表明,同时利用太阳能光热和光伏共同驱动浓盐水淡化装置比只利用光热驱动效率高51.2%。天津大学海水淡化与膜技术研究中心设计了具有露点蒸发特点的管壳式淡化柱,该装置以管程、壳程为蒸发室和冷凝室,空气从底部进入,热海水从顶端流下,并通过管内降膜蒸发,给加湿后的饱和空气升温,最后送进壳程冷凝以制取淡水,同时冷凝潜热持续传递到管程盐水液膜进行回收。

在干旱地区如中东国家,严重缺水,农业种植面临着滴灌用水困难,因此太阳能加湿除湿淡化法是解决农业灌溉用水问题的重要方法。该方法的优点在于不仅能获得淡水,还能解决农业设施湿度过高的问题,可更好地控制设施农业的环境温度。

Goosen 等^[27]设计了一种利用太阳能加湿除湿海水淡化技术的温室设备,研究了温室长宽度对产水能力的影响。试验结果表明,在空气流动的方向上,温室的产水率与宽度有着重要联系。

4 结语

世界上许多干旱地区拥有丰富的太阳能资源和充足的浓盐水,特别是偏远干旱地区可用的淡水供给困难,因此利用太阳能进行浓盐水淡化补充饮水增量是一条有效途径。随着现代工业技术进步与太阳能技术的逐渐成熟,通过多项技术的集成,进一步提高了浓盐水淡化效率。对于偏远干旱半干旱地区,低能耗、低成本的简易加湿除湿淡化装置展示出较好的应用前景。

加湿除湿是一种有效的浓盐水淡化技术,其理论的提出揭示了浓盐水相变淡化过程规律的本质,明确了关键控制因素。在大量实践基础上,加湿除湿作用关系模型的提出以及新型加湿材料的不断涌现,使浓盐水淡化效率得到了进一步提高。目前,多级加湿除湿设备的产水量比单级加湿除湿高40%,未来在浓盐水淡化系统优化中,改善材料的透光性、保温性及冷凝速率以及开发增强相变效率的载体材料,仍将是提高浓盐水淡化效率技术研发中的重点。

参考文献:

- [1] 常泽辉. 聚光式太阳能海水淡化系统热物理问题研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
CHANG Zehui. Thermophysical Problem Research on the Concentrating Light Solar Desalination System [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [2] VARUN K A. Solar stills: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 446-453.
- [3] 常泽辉,邱梓洋,杨英俊,等. 多效增湿除湿太阳能海水淡化装置的性能试验[J]. 可再生能源, 2014, 32(2): 139-143.
CHANG Zehui, QIU Ziyang, YANG Yingjun, et al. Study on a multi-effect solar desalination system based on humidification-dehumidification process[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(2): 139-143(in Chinese).
- [4] 伍纲,郑宏飞,康慧芳,等. 串列加热式增湿除湿海水淡化系统的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(10): 2057-2063.
WU Gang, ZHENG Hongfei, KANG Huifang, et al.

Experimental investigation of a heating with tandem desalination system based on humidification-dehumidification process [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(10): 2057-2063(in Chinese).

- [5] 伍纲,郑宏飞,杨军伟,等. 聚光直热加湿除湿太阳能淡化系统的性能研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 38-43.
WU Gang, ZHENG Hongfei, YANG Junwei, et al. Study on performance of concentrated direct heating humidification-dehumidification solar desalination system [J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 2018, 39(1): 38-43(in Chinese).
- [6] 陈子乾,郑宏飞,何开岩,等. 激淋降膜蒸发多效紧凑式海水淡化装置的研究[J]. 工程热物理学报, 2006(增刊): 69-72.
CHEN Ziqian, ZHENG Hongfei, HE Kaiyan, et al. Study on a multi-effect compact desalination unit with pouring and falling film evaporation [J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 2006, 27(Z1): 69-72(in Chinese).
- [7] EL-AGOUZ S A. Desalination based on humidification-dehumidification by air bubbles passing through brackish water [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165(2): 413-419.
- [8] 侯经纬,成怀刚,伍联营,等. 基于低温蒸馏-喷雾蒸发集成工艺的海水淡化[J]. 化学工程, 2010, 38(8): 94-97.
HOU Jingwei, CHENG Huaigang, WU Lianying, et al. Seawater desalination based on low temperature distillation and spray evaporation [J]. Chemical Engineering(China), 2010, 38(8): 94-97(in Chinese).
- [9] 张凌云. 超声波露点法海水淡化关键技术研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.
ZHANG Lingyun. Research on the Key Technologies of Ultrasonic Seawater Desalination with Dewvaporation [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011 (in Chinese).
- [10] 郭丽玮. 鼓泡增湿—去湿太阳能海水淡化技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
GUO Liwei. Study on Bubbling Humidification-Dehumidification Solar Desalination Technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009(in Chinese).
- [11] 刘忠,曾胜,沈海平,等. 鼓泡蒸发式太阳能海水淡化装置的试验研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(8): 75-79.
LIU Zhong, ZENG Sheng, SHEN Haiping, et al.

- Experimental study on a solar desalination plant characterized with bubbling evaporator[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(8): 75-79(in Chinese).
- [12] 刘忠. 多效鼓泡蒸发式太阳能海水淡化技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- LIU Zhong. A Study on Solar Desalinization Technology by Multi-effect Bubbling Process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010(in Chinese).
- [13] 李正良, 伍纲, 陈名贤, 等. 叠置式太阳能加湿除湿海水淡化系统的稳态性能研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(6): 1481-1488.
- LI Zhengliang, WU Gang, CHEN Mingxian, *et al.* Steady state performance research of superposition solar humidification and dehumidification desalination system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(6): 1481-1488(in Chinese).
- [14] CHEN Z L, XIE G, CHEN Z Q, *et al.* Field test of a solar seawater desalination unit with triple-effect falling film regeneration in northern China [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(1): 31-39.
- [15] YUAN G F, WANG Z F, LI H Y, *et al.* Experimental study of a solar desalination system based on humidification-dehumidification process [J]. *Desalination*, 2011, 277(1/3): 92-98.
- [16] NEMATOLLAHI F, RAHIMI A, GHEINANI T T. Experimental and theoretical energy and exergy analysis for a solar desalination system[J]. *Desalination*, 2013, 317: 23-31.
- [17] SHARQAWY M H, ANTAR M A, ZUBAIR S M, *et al.* Optimum thermal design of humidification dehumidification desalination systems[J]. *Desalination*, 2014, 349: 10-21.
- [18] CHEN Z Q, ZHENG H F, HE K Y, *et al.* Steady-state experimental studies on a multi-effect thermal regeneration solar desalination unit with horizontal tube falling film evaporation[J]. *Desalination*, 2007, 207(1/3): 59-70.
- [19] ZHENG H F, ZHANG X Y, ZHANG J, *et al.* A group of improved heat and mass transfer correlations in solar stills[J]. *Energy Conversion & Management*, 2002, 43(18): 2469-2478.
- [20] AHSAN A, FUKUHARA T. Mass and heat transfer model of tubular solar still[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(7): 1147-1156.
- [21] AHSAN A, FUKUHARA T. Evaporative mass transfer in tubular solar still [J]. *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 2008, 26(2): 15-25.
- [22] AHSAN A, FUKUHARA T. Condensation mass transfer in unsaturated humid air inside tubular solar still [J]. *Journal of Hydrosience & Hydraulic Engineering*, 2010, 28(1): 31-42.
- [23] SOUFARI S M, ZAMEN M, AMIDPOUR M. Performance optimization of the humidification-dehumidification desalination process using mathematical programming [J]. *Desalination*, 2008, 237(1/3): 305-317.
- [24] 解利昕, 王红菊, 王世昌. 低温多效海水淡化系统的模拟计算[J]. *水处理技术*, 2012, 38(10): 56-59.
- XIE Lixin, WANG Hongju, WANG Shichang. Programming and calculation of LT-MED desalination process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012(10): 56-59(in Chinese).
- [25] MEHRGOO M, AMIDPOUR M. Constructal design and optimization of a direct contact humidification-dehumidification desalination unit [J]. *Desalination*, 2012, 293: 69-77.
- [26] 袁合涛. 基于西北贫困区的热伏耦合型苦咸水淡化装置研究[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(10): 2721-2727.
- YUAN Hetao. Study on brackish water desalination device of solar thermal and photovoltaic coupling of based on poverty area in northwest China [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(10): 2721-2727(in Chinese).
- [27] GOOSEN M F A, SABLANI S S, PATON C, *et al.* Solar energy desalination for arid coastal regions: development of a humidification-dehumidification seawater greenhouse[J]. *Solar Energy*, 2003, 75(5): 413-419.
-
- 作者简介:** 沈煜(1973-),男,天津人,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为市政工程水处理净化技术应用和污水处理资源化利用技术。
- E-mail:** pro_07@126.com
- 收稿日期:** 2020-08-06
- 修回日期:** 2020-10-15

(编辑:丁彩娟)