

技术进展

喷雾蒸发海水淡化技术研究进展

成怀刚,高从堦

(中国海洋大学化学化工学院,山东 青岛 266100)

摘要:喷雾蒸发淡化技术具有规模灵活,设备投资适中,可利用低位热能等优点。介绍了喷雾淡化技术的原理,比较了不同形式的喷雾淡化过程,总结了该工艺的技术特点,并指出了其应用现状及发展前景。

关键词:喷雾;蒸发;海水淡化;低位热能

中图分类号: P747

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)06-0019-04

Progress in spray evaporation desalination technology

CHENG Huai-gang, GAO Cong-jie

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The spray evaporation desalination technique has the advantages of flexibility in capacity, moderate installation costs, and possibility of low grade heat energy used. The principle of the spray evaporation desalination technique is introduced, and various spray evaporation desalination processes and their features are reviewed in detail. Furthermore, the application prospect of such a desalination technique is also analyzed.

Key words: spray; evaporation; desalination; low grade heat energy

工业规模的海水淡化包括热法和膜法 2 类技术,前者包括多级闪蒸和多效蒸馏,后者主要是指反渗透,这些海水淡化技术的应用已经成为缓解世界缺水难题的重要手段。然而,海水淡化属于能源密集型产业,大规模的海水淡化需要耗费巨量的自然资源和能源,因此海水淡化成本一直居高不下。从长远发展的角度考虑,要解决海水淡化的成本问题,必须进一步研究新的淡化技术和过程设备,寻找新的节材、节能途径,特别是开发能够采用可再生能源^[1]的淡化方法。

近年来,喷雾技术在海水淡化领域的应用研究日益得到重视,并逐渐发展成为一类独立的淡化技术。喷雾蒸发淡化技术是基于低温相转换过程的淡化方法,装置规模灵活、设备投资适中,可方便地利用低位热能(如太阳能、地热、工厂废热等),因此应用潜力很大。

1 技术原理

喷雾蒸发淡化设备一般由喷头(雾化器)、蒸发室、空气流通系统和物料(淡水、浓盐水或盐颗粒)回收系统等组成。核心设备部件是喷头,按照不同的雾化形式可分为气流式、压力式、离心式 3 类^[2]。

喷雾蒸发淡化的原理是将海水通过喷头呈雾状

喷入蒸发室内,同时蒸发室内有空气流通;悬浮在气流中的水滴体积很小,直径一般在 100 μm 以内,比表面积很大,便于与周围空气进行热量传递,海水中的水分迅速蒸发成为水蒸气,海水由此被浓缩;蒸发过程结束以后,水蒸气被空气流带出蒸发室,随后再被冷凝为淡水并予以回收。喷雾蒸发淡化过程中海水的浓缩倍率很高,盐分甚至可以结晶析出。

喷雾蒸发淡化过程与喷雾干燥^[2]过程很相似,不同之处在于喷雾干燥过程注重的一般是固相的回收,而喷雾蒸发淡化过程中对液相(淡水)的回收利用是最重要的工序。

2 应用研究

按照海水蒸发方法的不同,喷雾蒸发淡化工艺可以分为 2 种:一是使雾化的海水在常温、常压空气中自然气化,这种操作形式不依赖于外部热源,但是蒸发效率较低;二是利用外部的热源强化海水的蒸发,一般是利用低位热能预热海水或空气,将热能以显热形式存储于海水或空气中,然后在蒸发过程中为水分提供气化潜热。

2.1 常温喷雾蒸发淡化技术

为了节能降耗,早期喷雾蒸发淡化工艺倾向于常温脱盐,不使用外部热源。如 Secunda 等^[3]将质

量分数为 15 % 的盐水喷入常温、常压的蒸发室中, 由于盐水喷出速度接近音速, 因此立即分散为粒径 $6\ \mu\text{m}$ 左右的微小液滴, 并很快蒸发完毕。液滴脱水后形成粒径 $3\ \mu\text{m}$ 左右的盐结晶颗粒, 并沉积在蒸发室内, 再通过风扇将水蒸气吹出, 以达到固、液分离的目的。为了不使盐颗粒飘逸, 风扇的设计风速小于盐颗粒自由沉降速度。

Lerner^[4]将常温压缩空气和盐水的混合物以 $200\ \text{m/s}$ 左右的流速喷入蒸发室, 生成的盐水雾滴粒径为 $7\sim 30\ \mu\text{m}$, 部分盐水雾滴在喷头附近很快蒸发。由于喷雾过程的气水比很小, 压缩空气和盐水的质量流速比为 1:10, 因此蒸发室内处于过饱和状态, 喷头附近产生的水蒸气在蒸发室内又重新凝结成微小的淡水滴。相对于喷雾生成的盐水滴而言, 二次凝结的淡水滴直径更小, 可通过风扇将其吹出蒸发室而与盐水滴分离开来, 随后用淡水淋洗的方法将淡水滴回收。

常温喷雾蒸发淡化工艺的技术难题在于蒸发动力小, 由于不使用外加热源, 盐水蒸发得不彻底。同时, 蒸发室内淡水滴和盐水滴或盐颗粒重新混合的几率也很大, 风扇的设置也增加了设备的制造成本, 而空气压缩机的使用可使淡水能耗达到 $18\ \text{kWh/t}$, 因此应用并不广泛。

2.2 低位热能在喷雾蒸发淡化过程中的应用

由于蒸发温度不高(一般在 $90\ ^\circ\text{C}$ 之内), 因此喷雾蒸发淡化技术非常适合于使用低位热能作为热源, 目前研究中的低位热能主要包括工厂废热和太阳热能 2 种。最早利用废热强化盐水滴蒸发的文献见于 1971 年 Linde^[5]的喷雾蒸发淡化系统专利, 其特色在于将盐水和涡轮机废气一起喷入蒸发室, 利用废气的余热气化盐水。美国 Four Nines 公司等^[6]则将喷雾蒸发技术应用到油田钻采苦咸污水淡化之中, 利用油田气余热促进喷雾蒸发过程。

美国 Aquasonics 国际公司^[7]将海水喷入蒸发室雾化, 然后利用被工厂废热预热过的空气去气化海水滴直至盐类结晶析出。在蒸发室空气出口处通过 1 个玻璃纤维过滤器截留悬浮在气流中的盐类颗粒。离开蒸发室的湿空气经冷凝获取淡水, 而冷凝潜热则用于预热进料海水。黏附在过滤器上的盐类颗粒定期用进料海水洗脱。该公司对 1 套日产百吨级淡水的中试设备进行了成本核算, 在蒸发室温度 $51\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度 90 %、水滴直径小于 $40\ \mu\text{m}$ 的条件下, 可以实现 95 % 以上的水回收率, 造水能耗约为 $5.2\ \text{kWh/m}^3$, 比常规的蒸馏淡化法成本 ($10\sim 30$

kWh/m^3) 低。

在太阳能应用方面, 很多研究人员是将喷雾蒸发淡化方法与增湿-去湿^[8]淡化方法结合起来。Amara 等^[9-10]在空气多级增湿-去湿淡化研究中应用了喷雾蒸发增湿器, 利用太阳热能预热的空气气化盐水滴, 水蒸气通过淡水喷淋的方式回收。Amara 等使用了 $200\ \text{m}^2$ 左右的太阳能集热器组, 对一套设在突尼斯的五级增湿-去湿装置进行了测试, 在当地典型的年均太阳辐射强度 $590\ \text{W/m}^2$ 的日照条件下, 淡水产量可以达到 $355\ \text{kg/d}$ 。

Hawladar 等^[11]则将太阳热能用于预热进料海水, 然后将热海水喷入蒸发室雾化。蒸发室内利用真空泵维持一定的负压状态, 并且设有螺旋加热管以强化蒸发过程, 因此该装置还融合有闪蒸和降膜蒸发技术的特点。应用 1 套 $1.5\ \text{m}^2$ 的太阳能集热器, 在进料盐水流率为 $9.54\ \text{kg/h}$ 时, 该系统的淡水产量可达 $1.0\sim 2.3\ \text{kg/h}$ 。

田凤山^[12]在蒸发室内也使用了闪蒸的方法强化海水雾滴的蒸发, 蒸发室内通过一个外接的液位罐维持负压状态。魏仕英^[13]则在蒸发室内通入冷风吹扫雾化的热海水, 使热海水在冷空气流中强制蒸发。由于海水的比热容高于空气, 更适合作为热焓的载体, 因此上述研究均采用了利用太阳能预热海水的技术方案。

其他一些颇具特色的热能利用方式也值得注意, 例如 Muthunayagam 等^[14]设计的淡化工艺有效地利用了海洋表层和低层海水的温度差, 将 $26\sim 32\ ^\circ\text{C}$ 的表层海水在负压状态下雾化、闪蒸, 水蒸气则使用温度较低的低层海水冷凝。Miyatake 等^[15]使用定形相变物质存储太阳能和废热, 并将这种储能装置应用到喷雾闪蒸淡化系统中, 以保证淡化系统的稳定运行。刘红静^[16]通过热交换系统将水蒸气冷凝过程中释放的潜热用于预热进料海水, 把雾化蒸发过程和冷凝过程耦合在一起, 以提高整个淡化过程的热量利用效率。

2.3 喷雾蒸发与其他淡化技术的集成

喷雾淡化的优势在于海水浓缩倍数很高, 理论上可将海水浓缩 20 倍以上, 且尤其适合于高浓盐水的淡化; 但是喷雾技术的能耗较高^[2], 故其在淡化领域的应用一直进展缓慢。近年来的研究趋势是将喷雾技术与传统的蒸馏法和膜法淡化技术耦合起来, 典型的设计思路是将喷雾蒸发淡化技术用于蒸馏法或膜法淡化过程排放浓盐水的二次淡化, 从浓盐水中继续生产淡水, 剩余的盐浆还可用于提取化学元

素资源;这样既可缓解蒸馏法或膜法淡化过程中的浓盐水排放难题,又有利于降低海水化学资源的提取成本,提高整个过程的综合经济效益。

美国 Aquasonics 公司^[17]推出一项“快速喷雾蒸发”海水淡化方法,利用一组内径为 0.2~1.5 mm 的喷头将进料海水以 200~300 m/s 的流速喷入蒸发室,海水被分散为粒径 30~100 μm 的雾滴,并在热气流中迅速变成水蒸气,水蒸气被一组特殊的挡板截留,而盐分则成为固体颗粒沉积下来。Aquasonics 公司将该技术应用于浓缩反渗透排放浓盐水,成本核算表明,喷雾蒸发淡化技术的应用使 50% 以上的建设投资和运营费用得以节省,水回收率高达 80%,远高于其他淡化方法的水回收率(40%~50%);如果结合低成本热源,造水成本可望低于 0.51 美元/t;分离出的盐分可制成工业用盐,其经济价值比制取的淡水高数倍。

高从塔等^[18]将喷雾蒸发和多效蒸馏技术耦合起来,利用低位热能加热后的空气去气化蒸发室内雾化的海水,然后用蒸发室排出的水蒸气的冷凝潜热作为多效蒸馏过程的热源,并以多效蒸馏过程产生的浓海水作为喷雾蒸发过程的进料水,实现能源和资源的综合利用。基于一套规模 3 t/d 的实验装置的经济分析表明,喷雾蒸发-多效蒸馏耦合工艺比普通多效蒸馏工艺的淡水产量增加了约 30%。该装置产出的淡水含盐质量浓度为 5 mg/L 左右,与普通的蒸馏法产水质量相当。

此外,为了降低喷雾蒸发淡化过程的造水成本,曾有研究者设计了一个水电联产系统^[19],将喷雾蒸发过程产生的水蒸气用于驱动涡轮机,并用涡轮机带动发电机发电,水蒸气排出涡轮机之后再被冷凝为淡水。Kumar 等^[20]为了强化水蒸气的冷凝过程,将蒸气压缩制冷装置引入到喷雾蒸发淡化系统之中,从而使淡水产量得以提高。但是这两种工艺的能量转换环节过多,设备也比较复杂,因此制约了整个过程的经济性。

3 技术特点

与传统的多级闪蒸、多效蒸馏和反渗透等淡化方法相比,喷雾蒸发淡化技术具有以下一些特点:

装置规模灵活,便于分散使用;除喷头部件外,操作压力多为常压,操作温度一般在 50~90 $^{\circ}\text{C}$,容易使用低位热能作为能源,便于应用价廉易得的高分子材料制作设备;气化过程在气-液界面而非设备壁面进行,所以设备的结垢倾向小,进料海水预

处理要求低;理论上可以将 99% 以上的海水转化为淡水且达到零排放,对保护环境非常有利,产出的盐浆附加值高,可用于化工、建材等行业;可以方便地与传统淡化方法实现耦合,用于多级闪蒸、多效蒸馏和反渗透等过程排放浓盐水的再浓缩,提高整个淡化过程的经济效益。

4 喷雾蒸发淡化过程的科学问题

喷雾蒸发淡化技术与传统的海水淡化方法相比,在热量和质量传递上显现出一些新的特性。喷雾蒸发淡化技术的理论研究仍然落后于实践,有待于进一步深入探讨,这些基础理论问题不仅存在于海水淡化领域,在石油、化工等工业部门都有着广泛的工程应用背景。

4.1 雾化和分离

喷雾蒸发淡化过程最重要的步骤是海水的蒸发,而影响蒸发速率的首要因素就是海水的雾化效果。这涉及到流体运动理论、边界层理论、液滴对流传质等一系列基础化工传递问题,近年来很多研究者都给予了关注,特别是在喷雾方式和喷头设计方面,取得了许多研究成果。

Ikegami 等^[21]考察了喷雾角度对蒸发过程的影响,结果证明海水在蒸发室内向上喷雾比向下喷雾更利于加快蒸发进程,易于使设备更加紧凑高效。Sureshkumar 等^[22]研究了喷头直径和喷雾压力的影响,发现小口径喷头在高喷雾压力下的雾化效果较好,生成的液滴与环境空气之间的热量传递较快。Nuyttens 等^[23]研究了喷头形状对液滴特性的影响,证实喷头锥度对液滴直径分布的均匀性有着直接的影响。

值得一提的是,雾化效果也影响水蒸气和浓盐水滴(或盐颗粒)分离的效率。海水雾化蒸发之后,无论是浓缩生成盐粒还是浓盐水液滴,尺度都很微小。根据 Stokes 沉降理论^[24-25],颗粒愈小,自由沉降时间愈长,粒径 1 μm 的微小颗粒在空气中的悬浮停留时间近乎无限长。近年来的研究证明,只有粒径大于 30 μm 的海水滴产生的盐颗粒才能在重力作用下快速下落,因此要求海水雾化时液滴直径应保持在 30 μm 以上,这已经在一些淡化装置的设计上得以体现^[7,17]。

4.2 传热机理

喷雾蒸发淡化技术中的传热问题包括 2 个方面:一是指蒸发室内雾化盐水与空气之间的传热,二是水蒸气冷凝过程中的传热机理。

雾化后的水滴蒸发速率快,这得益于其比表面积很大,但水滴在蒸发过程中的传热机理尚有待于进一步研究,其中包括一些蒸发过程的动力学问题。许多研究者对水滴的蒸发传热机理进行了研究,这些研究成果对喷雾淡化过程有着重要的借鉴意义。Muthunayagam 等^[26]考察了在喷雾淡化低温蒸发过程中水滴温度的降低情况,发现水滴典型的蒸发时间是几百毫秒,远小于水滴在蒸发室内的理论停留时间;El - Fiqi^[27]、Aguilar^[28]和 Belarbi 等^[29]考察了水滴直径、温度及蒸发速率之间的关系,对水滴的完全蒸发时间进行了模拟研究;Yanniotis 等^[30]考察了喷雾蒸发器的气液夹带与蒸发效率等问题。

另外,喷雾蒸发淡化过程的特点决定了水蒸气冷凝时存在着高分率的不凝气(空气),而蒸汽中存在的不凝气将严重阻碍冷凝过程^[31 - 32]。研究发现,蒸汽中仅 0.5% 的空气就可使冷凝传热系数降低 50%^[33]。在化工、能源、动力等行业,含不凝气的蒸汽冷凝传热研究历来受到重视^[34 - 35],但过去的研究一般只涉及极少量或微量不凝气问题^[36 - 37],而喷雾蒸发淡化过程中不凝气的质量分率高达 50% ~ 90%。因此研究含高分率不凝气的蒸汽冷凝传热机理,探索强化传热、提高传热系数的途径,在喷雾蒸发淡化研究中显得极为重要和迫切。

5 结语

喷雾蒸发淡化技术尚处于研究阶段,短期内还不适合大规模的应用^[38]。但喷雾蒸发淡化技术具有分散灵活、维护简单的特点,且避开了现有海水淡化过程中原料水预处理难度大、投资和操作费用高等难题,特别是可以有效地解决传统海水淡化过程中的浓盐水排放问题,因而在特定的淡化环境中将大有用武之地,具有显著的发展趋势。

喷雾技术适应性强,海水浓缩倍率高,适于与其他淡化方法相耦合,以降低综合成本。在热源的应用方面,迄今已知的研究大多关注于工厂废热和太阳能的直接利用,对地热、风能、海洋能等其他一些可再生能源的应用研究较少,这些问题尚有待于进一步探索。

参考文献

- [1] 熊日华,王世昌. 海水淡化中的替代型能源[J]. 化工进展, 2003, 22(11): 1139 - 1142.
- [2] 黄立新,王宗濂,唐金鑫. 我国喷雾干燥技术研究及进展[J]. 化学工程, 2001, 29(2): 51 - 55, 73.
- [3] Secunda D J, Motz L. Liquid-solids separation process: US, 4323424 [P]. 1982 - 04 - 06.
- [4] Lerner E J. Method for desalination and fresh water recovery: US, 5207928 [P]. 1993 - 05 - 04.
- [5] Linde A G. Process and apparatus for obtaining fresh water from saline water: US, 3557863 [P]. 1971 - 01 - 26.
- [6] Four Nines Inc. Apparatus for concentrating brine waters or dewatering brines generated in well drilling operation: US, 4882009 [P]. 1989 - 11 - 21.
- [7] Aquasonics International. Apparatus and method for thermal desalination based on pressurized formation and evaporation of droplets: US, 6699369 [P]. 2004 - 03 - 02.
- [8] 成怀刚,王世昌. 增湿-去湿海水淡化技术研究进展[J]. 水处理技术, 2007, 33(10): 4 - 6.
- [9] Amara M B, Houcine I, Guizani A, et al. Experimental study of a multiple-effect humidification solar desalination technique [J]. Desalination, 2004, 170(3): 209 - 221.
- [10] Houcine I, Amara M B, Guizani A, et al. Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multiple-effect-humidification technique [J]. Desalination, 2006, 196(1/2/3): 105 - 124.
- [11] Hawlader M N A, Dey P K, Diab S, et al. Solar assisted heat pump desalination system [J]. Desalination, 2004, 168: 49 - 54.
- [12] 田凤山. 节能喷雾负压蒸馏式海水淡化方法及设备: 中国, 03132625. 0 [P]. 2005 - 03 - 30.
- [13] 魏仕英. 喷雾推进通风蒸发-冷凝式海水淡化器: 中国, 00109939. 6 [P]. 2004 - 03 - 07.
- [14] Muthunayagam A E, Ramamurthi K, Paden J R. Low temperature flash vaporization for desalination [J]. Desalination, 2005, 180(1/2/3): 25 - 32.
- [15] Miyatake O, Koito Y, Tagawa K, et al. Transient characteristics and performance of a novel desalination system based on heat storage and spray flashing [J]. Desalination, 2001, 137(1/2/3): 157 - 166.
- [16] 刘红静. 喷雾热交换式海水淡化机: 中国, 200310107194. 7 [P]. 2005 - 06 - 08.
- [17] US Aquasonics Corp. Method for solid-liquid separation in water-based solutions: US, 6299735 [P]. 2001 - 10 - 09.
- [18] 高从塔,高学理,王铎,等. 低位热能喷雾蒸发-多效蒸馏海水淡化方法及装置: 中国, 200710016189. 3 [P]. 2007 - 07 - 05.
- [19] Raymond Lee Organization Inc. Water desalination system: US, 3871180 [P]. 1975 - 03 - 18.
- [20] Kumar S S, Mani A. Desalination using spray tower and vapour compression refrigeration system [J]. International Journal of Nuclear Desalination, 2006, 2(1): 89 - 95.
- [21] Ikegami Y, Sasaki H, Gouda T, et al. Experimental study on a spray flash desalination (influence of the direction of injection) [J]. Desalination, 2006, 194(1/2/3): 81 - 89.
- [22] Sureshkumar R, Kale S R, Dhar P L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air: I. Experimental data [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 349 - 360.
- [23] Nuytens D, Baetens K, De Schampheleire M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 333 - 345.
- [24] Pai M G, Subramaniam S. Modeling droplet dispersion and interphase turbulent kinetic energy transfer using a new dual-timescale Langevin model [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(3): 252 - 281.

(下转第 24 页)

但是在该过程中需要较高的稀释倍数。浓度的增大会导致低聚物含量的增加,因此限制了放大实验的可行性。

上述 2 种方法只能用于实验室合成,每次合成数量限定在克量级,无法实现批量生产。

1998 年,Dolbier 研究小组^[10]采用廉价易得的 1,4-二(氯二氟甲基)苯为原料,Zn 作还原剂,在非高稀释的条件下合成了 AF₄,如图 3,收率可达 60%。美国 SCS 公司用此方法进行了放大实验,从此实现了 AF₄ 工业化生产。

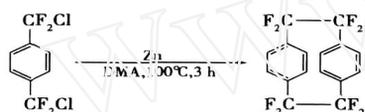


图 3 可放大的 Parylene AF₄ 单体合成方法

研究人员对 AF₄ 合成方法的研究一直未间断,还有很多其他合成方法^[11],如在高氟烷基卤化物或者 1,4-二取代高氟烷烃的霍夫曼降解反应中采用 PbBr₂/Al 氧化还原体系来制备 AF₄ 单体^[12]等。目前国内仅有少数公司从事该产品的研制与开发,国外 SCS 公司已经有小批量生产和销售。

2 薄膜性能及制备工艺

2.1 制备原理及沉积工艺

Parylene AF₄ 薄膜的制备同样采用化学气相沉

积法^[13],其化学反应方程式如图 4 所示。与 Parylene 系列的其他涂敷型材料所不同的是 Parylene AF₄ 所需的沉积温度较低^[14],要求基体温度低于 0℃,这是由亚甲基上 F 取代基所造成的。亚甲基上取代基团不同,由于空间位阻效应和电子效应的差异导致单体自由基的活性不同,进而使得沉积温度也略有不同^[15]。Parylene N 的沉积温度小于 30℃,Parylene C 的沉积温度小于 90℃,Parylene D 的沉积温度小于 50℃。

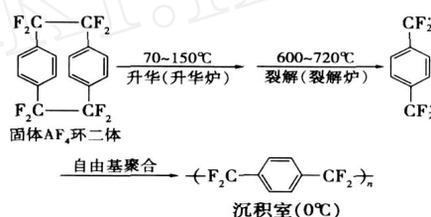


图 4 Parylene AF₄ 薄膜制备原理

Parylene 涂敷过程是在专用的沉积设备中完成的:固体环二体在升华炉内气化,进入裂解炉后在高温下裂解为单体自由基,接着进入沉积室进行自由基聚合生成 Parylene 薄膜。真空泵用来确保整个薄膜制备过程反应体系的真空度,冷阱收集未反应完全的残余气体。现有的沉积设备和已知的沉积参数对沉积 Parylene N、C、D 是很有效的^[16-17]。

但是由于 Parylene AF₄ 单体分子的特殊性,使得现有的设备不能够提供有效的沉积控制和较高的

(上接第 22 页)

- [25] Tang P, Raper J A. Modelling the settling behaviour of fractal aggregates—a review[J]. Powder Technology, 2002, 123(2/3): 114 - 125.
- [26] Muthunayagam A E, Ramamurthi K, Paden J R. Modelling and experiments on vaporization of saline water at low temperatures and reduced pressures[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6): 941 - 952.
- [27] El-Fiqi A K, Ali N H, El-Dessouky H T, et al. Flash evaporation in a superheated water liquid jet [J]. Desalination, 2007, 206(1/2/3): 311 - 321.
- [28] Aguilar G, Majaron B, Verkrusse W, et al. Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(17): 3201 - 3211.
- [29] Belarbi R, Ghiaus C, Allard F. Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings [J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1540 - 1552.
- [30] Yanniotis S, Xerodemas K. Air humidification for seawater desalination [J]. Desalination, 2003, 158(1/2/3): 313 - 319.
- [31] Heitzer M, Staat M, Reiners H, et al. Shakedown and ratchetting under tension/torsion loadings: Analysis and experiments [J]. Nuclear Engi-

neering and Design, 2003, 225(1): 11 - 26.

- [32] 周兴东, 马学虎, 张宇, 等. 含有不凝气体的蒸汽滴状冷凝传热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 1001 - 1003.
- [33] Sparrow E M, Lin S H. Condensation heat transfer in the presence of a noncondensable gas[J]. Journal of Heat Transfer, 1964, 76(8): 430 - 436.
- [34] Zhu A M, Wang S C, Sun J X, et al. Effect of high fractional noncondensable gas on condensation of dewaporation desalination process[J]. Desalination, 2007, 214(1/2/3): 128 - 137.
- [35] Cheng H G, Wang S C. Modelling and experimental investigation of humidification-dehumidification desalination using a carbon-filled-plastic shell-tube column[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(4): 478 - 485.
- [36] Canbolat S, Akin S, Kövscek A R. Noncondensable gas steam-assisted gravity drainage [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(1/2): 83 - 96.
- [37] Oh S, Revankar S T. Effect of noncondensable gas in a vertical tube condenser [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(16): 1699 - 1712.
- [38] Younos T, Tulou K E. Overview of desalination techniques [J]. Journal of Contemporary Water Research and Education, 2005, 132: 3 - 10.