

设计案例与工程实例

夏亚浩, 陈志莉, 冯裕钊, 等. 一种自制管式蒸馏海水淡化器性能试验[J]. 净水技术, 2017, 36(11): 76-81.

Xia Yahao, Chen Zhili, Feng Yuzhao, et al. Experiment of performance of a self-made tubular distilled desalinator for seawater[J]. Water Purification Technology, 2017, 36(11): 76-81.

一种自制管式蒸馏海水淡化器性能试验

夏亚浩¹, 陈志莉¹, 冯裕钊², 杨毅², 孙荣基³, 郑涛杰¹

(1. 后勤工程学院国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311; 2. 后勤工程学院军事工程管理学系, 重庆 401311; 3. 后勤工程学院军事油料应用与管理工程系, 重庆 401311)

摘要 设计制作了一种简易、可拆卸的管式蒸馏海水淡化器, 理论分析了热质传递过程, 并利用模拟热源对淡化器进行试验研究。试验探讨了影响淡化器性能的客观因素, 如进水速度、环境温度、环境风速和输入能量等。试验结果表明: 动态试验条件下, 最佳进水速度为 460 mL/h; 环境温度降低或风速变大, 淡化器的产水率增大, 当风速为 3.1 m/s 时, 产水率较无风时提高了 50%; 在静/动态条件下, 产水率最大值均出现在 85 ℃ 时, 分别为 228 mL/h 和 243.6 mL/h; 定功率 (200 W) 加热, 累计产水量为 2 607.9 mL, 性能系数为 0.68。

关键词 海水淡化 管式蒸馏 性能系数

中图分类号: TQ085 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2017)11-0076-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2017.11.014

Experiment of Performance of a Self-Made Tubular Distilled Desalinator for Seawater

Xia Yahao¹, Chen Zhili¹, Feng Yuzhao², Yang Yi², Sun Rongji³, Zheng Taojie¹

(1. Dept. of National Defense Architecture Planning & Environmental Engineering, LEU, Chongqing 401311, China;

2. Dept. of Military Project Management, LEU, Chongqing 401311, China;

3. Dept. of Oil Application & Management Engineering, LEU, Chongqing 401311, China)

Abstract A simple and dismountable tubular distilled desalinator was designed and manufactured. The heat transfer process was analyzed theoretically and the simulated heat source was used to carry out the experiment. The objective factors, such as inflow velocity of seawater, ambient temperature, ambient wind speed and input energy, were investigated experimentally. Results showed that optimum inflow velocity of seawater was 460 mL/h under dynamic experimental conditions. When the ambient temperature decreased or the wind speed became larger, the water production rate of the desalinator increased; when the wind speed was 3.1 m/s, the water yield rate increased by 50% compared with that without wind. In either static or dynamic conditions, the maximum value of water yield rate occurred at 85 ℃, respectively, 228 mL/h and 243.6 mL/h. With constant power (200 W) heating, cumulative water yield was 2 607.9 mL, and the PR was 0.68.

Keywords seawater desalination tubular distillation performance ration (PR)

[收稿日期] 2017-07-31

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目(51106177); 重庆市重点自然科学基金项目(cstc2015jcyjBX0059)

[作者简介] 夏亚浩(1993—), 男, 硕士, 研究方向为水处理理论与技术研究, E-mail: calituxia@foxmail.com。

[通信作者] 陈志莉, 教授, E-mail: 1012262034@qq.com。

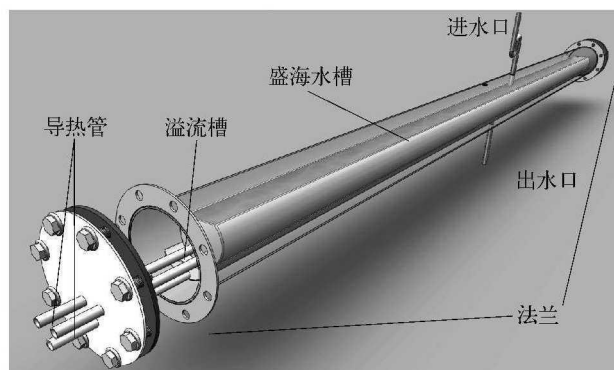
[本文编辑] 李佳佳

人口、资源和环境是人类社会发展所面临的三大问题,其中生命之源水资源的短缺是一个全球性问题。为有效缓解这一现象,国内外海水淡化技术近年来得到不断开发应用。海水淡化是指将矿物质和淡水从海水中分离开来的技术和过程^[1]。诸多海水淡化方法中,管式蒸馏海水淡化系统具有结构紧凑、便于运输和综合成本低等优点,具有广阔的发展空间。

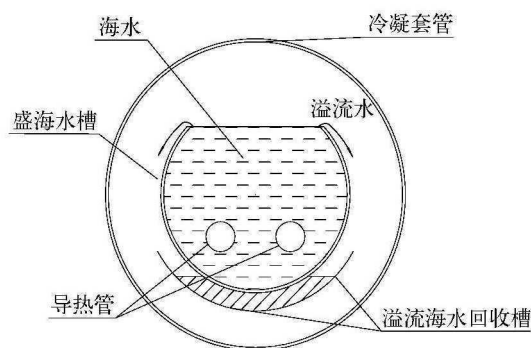
Tiwari 教授率先于 1988 年提出管式蒸馏海水淡化的思想。由于其高效性,近年来被国内外学者广泛关注,并分别通过理论和试验研究得到不断发展。Ahsan 等^[2-3]建立了理论模型预测管式淡化器产水量,并通过试验验证能较好与理论模型吻合。此外,Ahsan 等^[4]采用聚乙烯薄膜对管式蒸馏器盛海水槽进行改性,并测定了蒸馏器内传热系数和传质系数之间的线性关系。Rahbar 等^[5]用计算流体力学分析了管式淡化器的对流换热系数和产水能力,并推断得出玻璃温度和水温对淡化器性能的影响是相反的。Chen 等^[6-8]自主设计了一种三效管式淡化器,重复利用了淡化过程中的冷凝潜热,提高了能量利用率;并改变最外层冷凝套管管型——增设肋片以强化冷凝散热,提高了淡化器性能。但是该淡化器不方便拆卸,这也就为后期的维护和清洗除垢工作带来很大不便。本文自主设计了一种管式淡化器,通过在两端增设法兰的方式,很好地解决了这一难题,此外理论分析了淡化器的热质传递过程,并通过试验研究了淡化器的产水性能。

1 淡化器结构及运行原理

一种简易、可拆卸的管式蒸馏海水淡化器,其基本结构及运行原理如图 1 所示。淡化器的基本结构包括导热管、盛海水槽、海水溢流回收槽(下文简称“溢流槽”)、冷凝套管及法兰,主体材料采用 304 不锈钢。如图 1(a)所示,海水通过进水口流入盛海水槽中,太阳能或其他热工质通过导热管对盛海水槽中海水进行加热,海水受热汽化至冷凝套管内壁,水蒸汽冷凝为淡水沿冷凝套管内壁滑落至底部进行汇集,最后并通过出水口流出并收集,此即整个淡化过程。另外,盛海水槽中溢流而出的海水会沿着盛海水槽外壁面流入溢流槽回收。两端法兰、螺丝方便装置的拆卸,能够减轻装置后期的维护、清洗工作,并配备硅胶垫进一步强化法兰的密封性,减少蒸汽和热量损失。



(a) 淡化器整体结构示意图



(b) 淡化器截面图

图 1 淡化器结构示意图

Fig.1 Schematic Diagram of the Tubular Distilled Desalinator

装置截面如图 1(b)所示:主体由 2 根不锈钢管(盛海水槽和冷凝套管)由内向外嵌套构成,2 根不锈钢管的直径分别为 63 mm 和 101 mm,长度分别为 1.9 m 和 2 m。此外,中心部分两根导热管的直径均为 10 mm 和长 2.2 m,同时能够起到淡化器内部结构(盛海水槽和海水溢流槽)的支架作用,由穿过两端的法兰而固定其位置。内部盛海水槽圆心角为 96.5°,盛海水槽蒸发水面面积为 0.089 3 m²,储海水量为 4.97×10⁻³ m³。

该淡化器具有如下特点:① 装置内冷凝面积(冷凝套管内壁面积)要大于蒸发面积,有利于促进水蒸汽的冷凝;② 装置的结构设计简单,易于加工,操作简单;③ 易于拆卸,为后期的清洗及维护节省成本和时间;④ 空间、热源等条件允许时,可以将多个淡化器组合使用,集成为一个大的海水淡化系统。

2 淡化器热质传递分析

淡化器运行时,能量变化主要有海水受热蒸发、

湿空气运动和冷凝。导热工质通过导热管将能量输入盛海水槽中海水, 由于海水受热不均, 盛海水槽中海水发生对流现象, 其中能量主要以对流和热传导形式传输, 盛海水槽中以及溢流槽中海水吸收能量而温度升高。海水受热发生相变, 蒸发汽化进入淡化器空腔内, 水蒸汽与管内空气组成湿空气。蒸发水面与湿空气以辐射、蒸发等形式进行热量交换。由于冷凝套管内壁附近的湿空气温度低, 且密度小, 此时湿空气会在密度差、温度差的作用下, 由蒸发面上升至冷凝套管内壁面。热量也通过辐射、自然对流等形式随着湿空气的移动方向而传递至冷凝套管内壁面。在冷凝套管内壁处, 湿空气发生冷凝相变形成淡化水。冷凝套管内壁面通过导热将能量传递到冷凝管外壁面, 并以自然对流和辐射的形式将能量释放到环境中。此外, 还有少量能量随着溢流水和淡化水流出。淡化器中溢流槽的设计, 增加了冷凝淡水与盛海水槽之间的传递热阻, 从而可以在一定程度上减少冷凝水因再受热而挥发的现象, 提高了产水效率。淡化器热质传递如图 2 所示。

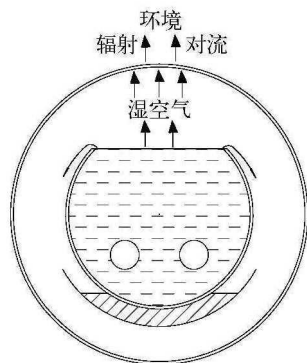


图2 淡化器热质传递示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Heat and Mass Transfer in the Tubular Distilled Desalinator

3 淡化器性能试验研究

3.1 试验内容与方案

由于本装置为蒸馏法海水淡化, 其产水性能主要受传热因素影响。通过控制变量法分别探讨进水速度、环境温度、环境风速、运行温度和运行功率等对淡化器的影响, 并进行性能系数分析。

3.1.1 进水速度

进水速度是影响淡化器产水性能的主要因素之一。当进水速度偏小, 盛海水槽内海水蒸发后得不到及时补充, 时间久了, 盛海水槽中的水也会越来越

少, 直至干涸; 当进水速度太大, 淡化器内海水的补充速率大于淡化器内海水蒸发速率, 则会有部分海水没有来得及淡化便被溢流回收, 带走了淡化器内部分热量, 降低能源利用率。

进水速度的确定依据: 首先进行淡化器静态(进水速度为 0 mL/h)试验研究, 得到静态条件下产水率。为保证盛海水槽内海水得到持续补充, 动态试验中, 进水速度要大于淡化器静态条件下平衡蒸发速率, 即产水率。当进水速度达到一定值时, 盛海水槽内水温会发生波动降低, 此即视为进水速度的最大临界值。本文采用蠕动泵 BT100—2J 控制注水, 恒温水浴运行温度为 85 ℃, 风速为 0 m/s, 室温为 20 ℃。

3.1.2 变室温试验

环境温度也是影响淡化器性能的重要因素。通过调节室温探讨环境温度对产水性能的影响, 室温改变范围拟定在 15~23 ℃。其他条件不变, 如恒温水浴运行温度为 85 ℃, 风速为 0 m/s, 进水速度由 3.1.1 确定。

3.1.3 变风速试验

采用落地扇作为风源, 通过调节风扇档位及与淡化器的距离以达到改变环境风速的目的, 并用风速测量仪测定。风速依次设定为 0、1.7、2.4、3.1 m/s, 恒温水浴运行温度为 85 ℃, 室温为 20 ℃, 进水速度由 3.1.1 确定。

3.1.4 定温加热试验

采用电加热恒温循环水浴锅控制循环热水水温作为模拟热源, 模拟热源温度分别恒定在 60、65、70、75、80、85 ℃。其他试验条件不变, 如风速为 0 m/s, 室温为 25 ℃, 进水速度由 3.1.1 确定, 即可得淡化器在相应运行温度下的稳态产水率。

3.1.5 定功率加热试验

采用调压器和电加热棒(规格 50 Ω)结合的供热方式作为模拟热源, 通过调节调压器的输出电压, 对淡化器分别进行 100、150、200、250 W 功率下的加热试验, 从试验开始到停止加热共计 12 h。试验过程中, 每隔 1 h 对淡化器的产水量进行称量。其他试验条件不变, 如风速为 0 m/s, 室温为 25 ℃, 进水速度由 3.1.1 确定。

3.1.6 数据记录与处理

(1) 温度记录: 采用 RC—4HC 温度记录仪, 在冷凝套管外壁上端布置测温点, 记录外壁温度; 在盛

海水槽内距入水口附近布置测温点,记录盛海水槽内水温;实验室温度恒定在 20 ℃。

(2) 产水量计量: 由于是蒸馏淡水,1 g 蒸馏水的体积约为 1 mL,故每次称量所得同样以 mL 计。

(3) 稳定状态的确定: 定温加热试验中,淡化器运行后每隔 20 min 测产水量,连续 6 次所得产水量变化不大时,即认定为稳态,并求取平均值,作为相应运行条件下稳态产水率,均以 mL/h 计。

3.2 结果与讨论

3.2.1 进水速度

对淡化器进行静态试验,各运行温度(60、65、70、75、80 ℃和 85 ℃)条件下的小时产水率依次为 68.4、105、126、154.2、187.2、228 mL/h。为判断进水速度最大临界值,在运行温度为 65 ℃和 85 ℃时,不断增加进水速度,监测盛海水槽内平衡水温,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,无论运行温度高低,进水速度在 120~720 mL/h 时,盛海水槽内水温基本不受进水速度影响,即使有轻微变动,这也只是在测温点附近的水温变化。而测温点在入水口附近,更易受进水的影响,因此相对于整个盛海水槽(长为 1.9 m)而言,水温变化可忽略不计。故在试验研究中,为避免盛海水槽内出现干涸,且防止由于不同进水速度导致盛海水槽内水流扰动差异,本文中所述动态试验进水速度均恒定在 460 mL/h。

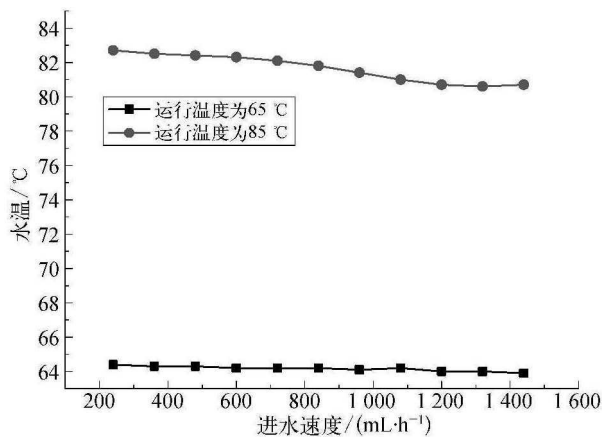


图3 水温与进水速度之间的变化曲线

Fig.3 Relation Curve of Temperature and Inflow Velocity of Seawater

3.2.2 变室温试验

图 4 为淡化器的产水率与室温(由 15 ℃升到 22 ℃)的关系图。由图 4 可知,170~270 min 内,随

着室温的增加,淡化器的产水率发生了明显的下降。由此可以说明,室温对淡化器淡化性能的影响同样不能忽视,室温越低越有利于淡化器淡水的产生。分析可得,相同试验条件下,室温越低,则环境温度与冷凝套管表面温差越大,冷凝套管更易于散热,越有利于淡化器冷凝,从而提高了产水率。

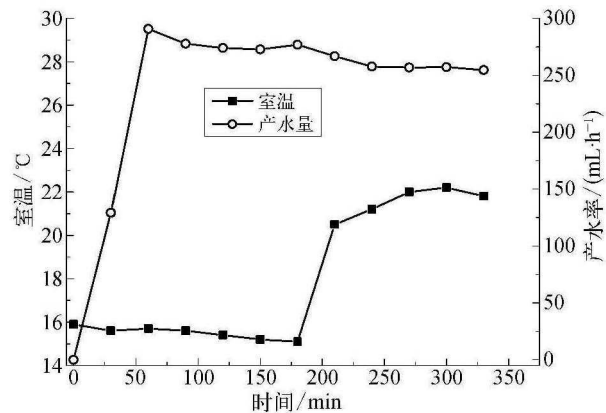


图4 产水率与室温变化关系

Fig.4 Relation between Water Yield Rate and Indoor Temperature Change

3.2.3 变风速试验

表 1 为淡化器在不同风速下的产水性能,随着环境风速的提高,产水率也显著的增加。当风速为 3.1 m/s 时,产水率较无风时(即风速为 0 m/s)提高了 50%。随着风速的提高,水温、水蒸汽温、外壁温均逐渐降低,且外壁温的降低幅度最为明显,其次为水蒸汽温、水温。分析可得,随着淡化器表面的风速增加,淡化器冷凝套管表面的散热形式也由自然对流转化为强制对流,后者换热效果要明显强于前者^[9]。风速的增大加快了表面热量的扩散,增大了冷凝套管处的热通量,有利于水蒸汽在冷凝套管内冷凝。

表 1 不同风速下淡化器性能

Tab.1 Performance of the Tubular Distilled Desalinator under Different Wind Speeds

风速 /(m·s ⁻¹)	产水率 /(mL·h ⁻¹)	水温 /℃	水蒸汽温 /℃	外壁温 /℃
0	258.6	81.3	75.1	65.2
1.7	334.8	79.7	69.2	54.2
2.4	361.2	79.4	66.9	51.7
3.1	388.8	78.9	64.8	48.8

3.2.4 定温加热试验

图5为淡化器在静/动态条件下稳态产水率对比图。由图5可知,无论是在静态还是动态条件下,淡化器的产水率均随着温度升高而增加,呈正线性关系。静/动态产水率最大值均出现在85℃时,分别为228 mL/h和243.6 mL/h。在相同运行条件下,动态条件下的产水率均要大于相应静态的产水率。这是因为在动态条件下,会有部分溢流海水悬挂于盛海水槽外表面和溢流槽中,相当于增加了部分蒸发面积。并且随着海水的注入,强化了盛海水槽内的蒸发海水对流,对蒸发也会有一定影响。

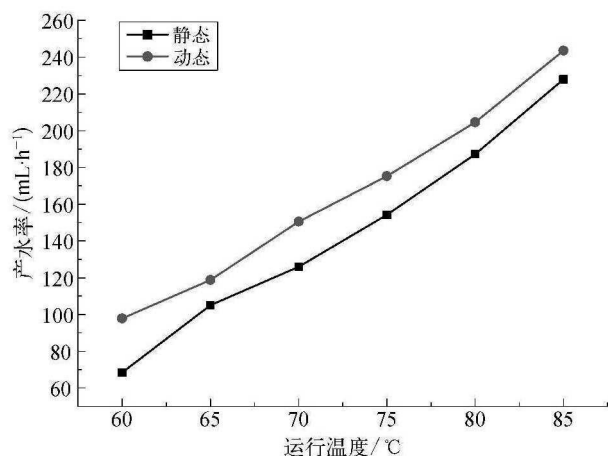


图5 淡化器静态/动态条件下产水率对比图

Fig.5 Comparison of Water Yield Rate of the Tubular Distilled Desalinator under Static/Dynamic Conditions

3.2.5 性能分析试验

图6为淡化器在不同加热功率下(100、150、200、250 W),小时产水量的变化情况。由图6可知,不同功率加热时,淡化器每小时的产水量不断升高,且在某一时刻达到稳态。随着加热功率增加,稳态小时产水量也增高。当功率为250 W时,小时产水量稳定在274 g左右。

性能系数量化表示了淡化器对能量的利用率。性能系数越高,淡化器的能量利用率越高。性能系数可以通过式(1)计算。

$$\eta_{PR} = \frac{m \times h_{fg}}{Q} = \frac{m \times h_{fg}}{Pt} \quad (1)$$

其中: m —累计12 h的产水量, L;

h_{fg} —标准大气压下蒸发潜热, 2 257.6 kJ/kg;

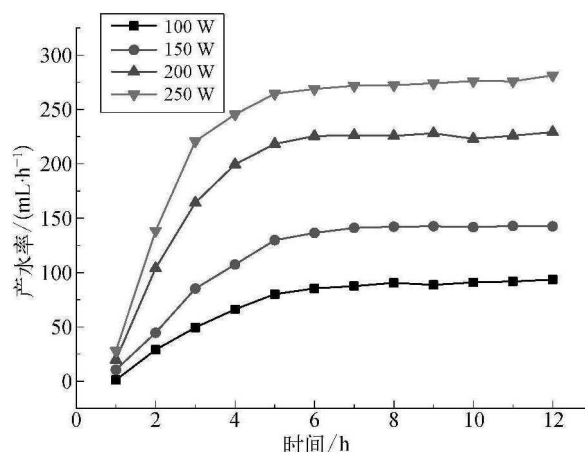


图6 不同功率加热条件下产水率变化图

Fig.6 Variation of Water Yield Rate under Different Heating Power

P —加热功率, kW;

t —加热时间, 12 h。

定功率加热时,淡化器12 h累计产水量及性能系数如表2所示。由表2可知,随着加热功率的增大,淡化器小时产水量均获得提升,但当加热功率大于200 W时,性能系数并不一定随着加热功率增大而提升。淡化器的最佳能量输入,在考虑提高产水率的同时,还应使能量的利用最大。所以本装置的最佳运行条件为200 W加热,此时的累计产水量为2 607.9 mL,性能系数为0.68。

表2 不同加热功率下的累积产水量及性能系数

Tab.2 Accumulated Water Yield and the PR under Different Heating Power

加热功率/W	累计产水量/mL	性能系数
100	1 026.6	0.54
150	1 587.5	0.55
200	2 607.9	0.68
250	3 179.2	0.66

4 结论与展望

管式蒸馏海水淡化系统具有结构紧凑、便于运输和综合成本低等特点,本文自主设计并制作了一种简易、可拆卸的管式蒸馏海水淡化器,并通过试验探讨其产水性能。

(1) 试验确定了淡化器的最佳进水速度为460 mL/h,且当进水速度为120~720 mL/h时,盛海水槽内水温均不受影响。

(2) 环境温度和风速均对淡化器的产水性能产生影响。室温降低或风速变大,越有利于提高产水率,当风速为 3.1 m/s 时,产水率较无风时提高了 50%。因此,利用风能进行能量输入在管式蒸馏海水淡化方面具有很大应用潜力。

(3) 恒温水浴加热试验中,淡化器的产水率随着温度升高而增加,呈正线性关系。在静/动态条件下,产水率最大值均出现在 85 ℃ 时,分别为 228 mL/h 和 243.6 mL/h。

(4) 定功率加热试验中,随着加热功率增加,淡化器稳态的小时产水量也增高。当功率为 250 W 时,小时产水量稳定在 274 g 左右。但是加热功率增加,性能系数不一定增大。综合考虑产水率和能量利用率,本装置的最佳运行条件为 200 W 加热,此时的累计产水量为 2 607.9 mL,性能系数为 0.68。

参考文献

- [1] Voutchkov N S. Desalination engineering-operation and maintenance[M]. New York: Mc Graw-Hill, 2014.
- [2] Ahsan A, Islam K M S, Fukuhara T, *et al.* Experimental study on evaporation, condensation and production of a new tubular solar still[J]. Desalination, 2010, 260(1): 172 - 179.
- [3] Ahsan A, Fukuhara T. Mass and heat transfer model of tubular solar still[J]. Solar Energy, 2010, 84(7): 1147 - 1156.
- [4] Ahsan A, Imteaz M, Rahman A, *et al.* Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still[J]. Desalination, 2012, 292(2): 105 - 112.
- [5] Rahbar N, Esfahani J A, Fotouhi-Bafghi E. Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still - CFD simulation and theoretical analysis [J]. Solar Energy, 2015, 113(12): 313 - 323.
- [6] Chen Zhili, Yao Yang, Zheng Zihang, *et al.* Analysis of the characteristics of heat and mass transfer of a three-effect tubular solar still and experimental research[J]. Desalination, 2013, 330(12): 42 - 48.
- [7] Zheng Hongfei, Chang Zehui, Chen Zhili, *et al.* Experimental investigation and performance analysis on a group of multi-effect tubular solar desalination devices [J]. Desalination, 2013, 311(2): 62 - 68.
- [8] 姚洋,陈志莉,郑宏飞,等.带肋片多效管式海水淡化装置的实验研究[J].太阳能学报,2016,37(2): 511 - 515.
- [9] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [9] 高成耀,常明.Ta/BDD 薄膜电极电化学催化氧化硝基酚[J].物理化学学报,2008,24(11): 1988 - 1994.
- [10] 李兆欣,甄丽敏,李新洋,等.BDD 电极阳极氧化垃圾渗滤液纳滤浓缩液[J].环境工程学报,2014,8(11): 4662 - 4668.
- [11] 赵国华,李明利,祁源,等.苯酚在金刚石膜电极上的电化学氧化降解过程[J].中国环境科学,2005,25(3): 370 - 374.
- [12] 王帅,檀柏梅,高宝红,等.掺硼金刚石薄膜电极的制备及电化学特性[J].半导体技术,2015,40(5): 378 - 381.
- [13] 曹江林,吴祖成,李红霞,等.PbO₂ 阳极在硫酸溶液中的析氧失活行为[J].物理化学学报,2007,23(10): 1515 - 1520.
- [14] 吕江维,曲有鹏,王立,等.BDD 电极电催化生成羟基自由基的检测[J].分析试验室,2015,34(4): 379 - 382.
- [15] Comninellis C. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment [J]. Electrochimica Acta, 1994, 39(11 - 12): 1857 - 1862.
- [16] Beck F, Kaiser W, Krohn H. Boron doped diamond (BDD) - layers on titanium substrates as electrodes in applied electrochemistry [J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(28): 4691 - 4695.
- [17] Pérez G, Fernández-Alba A R, Urtiaga A M, *et al.* Electro-oxidation of reverse osmosis concentrates generated in tertiary water treatment[J]. Water Research, 2010, 44(9): 2763 - 2772.
- [18] Bagastyo A Y, Batstone D J, Rabaey K, *et al.* Electrochemical oxidation of electrodialysed reverse osmosis concentrate on Ti/Pt - IrO₂, Ti/SnO₂ - Sb and boron-doped diamond electrodes [J]. Water Research, 2013, 47(1): 242 - 250.

(上接第 70 页)