

试验研究

# 太阳能层叠式膜蒸馏组件实验研究

吕松力<sup>1</sup>,杨晓宏<sup>2</sup>,张欣宇<sup>2</sup>,魏文龙<sup>2</sup>,田瑞<sup>2</sup>

(1.内蒙古电力勘察设计院水工室,呼和浩特 010020;2.内蒙古工业大学能源与动力工程学院,呼和浩特 010051)

**摘要:**本文设计了一种适用于太阳能膜蒸馏技术的新型层叠式空气隙膜蒸馏组件,该组件结构紧凑,可由冷、热、冷等N层容腔并联运行,膜组件中的分水盘使热溶液调整为沿着膜面切向方向的旋转入流,削弱了膜面附近的温度和浓度极化,提高了膜通量。以自来水为热工质,实验研究了不同膜材料温度和流量对膜通量的影响,工质温度70℃,流量300L/h时其产水通量可达50kg/m<sup>2</sup>·h。如运行10个热容腔,每10h产水为142kg,可以解决一家人的正常用水。以太阳能作为组件的加热热源,分析了3m<sup>2</sup>集热系统在自然循环状态下,集热器出口温度、水箱温度和太阳辐射对膜通量的影响,为应用太阳能膜蒸馏解决西部地区苦咸水淡化奠定了实验基础。

**关键词:**太阳能;膜蒸馏;叠式膜组件;传质通量

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)05-0018-06

## RESEARCH ON SOLAR ENERGY CASCADING MEMBRANE DISTILLATION COMPONENT EXPERIMENT

LV Song-li<sup>1</sup>, YANG Xiao-hong<sup>2</sup>, ZHANg Xin-yu<sup>2</sup>, WEI Wen-long<sup>2</sup>, TIAN rui<sup>2</sup>

(1. Electric power survey and design institute of hydraulic chamber Hohhot in Inner Mongolia. 010020, China; 2. The energy and power engineering college of Inner Mongolia university of technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** This paper designs a kind of applicable to the solar membrane distillation technology is a new type of cascading air gap membrane distillation component, the component structure is compact, can be made of cold, heat, cold and other n-tier chamber should run in parallel, membrane module of the baffle plate heat solution is adjusted for the rotation of the tangential direction along the membrane surface inflow, weakened near the membrane surface temperature and the concentration polarization and increase the membrane flux. the experimental study on the heat with tap water as working medium, different membrane materials, the influence of temperature and flow rate on membrane flux, working medium temperature 70℃, flow 300 l/h when its production water flux can be up to 50 kg/m<sup>2</sup>·h. such as running 10 heat capacity cavity, every 10 h water production is 142 kg, can solve the family's normal water. In solar energy as heat source of heat of components, 3 m<sup>2</sup> heating system are analyzed in the condition of natural circulation, the outlet temperature of the collector, water tank temperature and solar radiation on the membrane flux and the effect of membrane distillation the application of solar energy to solve in the western region brackish

water desalination laid the foundation experiment.

**Key words:** Solar energy; Membrane distillation; Lap membrane component; The mass transfer flux

膜蒸馏是一种具有广泛应用前景的新型膜分离技术,空气隙膜蒸馏(Air Gap Membrane Distillation, AGMD)是膜蒸馏分类中的一种,是一种更为新兴的具有高效分离、提纯及浓缩的技术,它采用高分子微孔膜,挥发性组分在膜热侧汽化蒸发在膜两侧蒸气压差作用下透过膜,穿过空气隙在冷端冷凝下来<sup>[1,2,3]</sup>。膜蒸馏与传统的分离技术相比,可以在常压和稍高于常温的条件下进行,这使得该过程可以利用太阳能、地热等低品位热源<sup>[1]</sup>,目前利用该过程进行的净水研究已经扩展到海水及苦咸水淡化、废水回收、非挥发性水溶液的浓缩和结晶等方面。根据对空气隙膜蒸馏机理的分析,其传质和传热现象是互相耦合、相互影响的,AGMD的优点是避免了冷热工质的混合,冷凝发生在组件内,传热的效率较高<sup>[4,5]</sup>。由于膜蒸馏过程的浓度边界层使得局部区域流体阻力增大;温度边界层使得膜两侧温差小于膜两侧流体主体温差,蒸馏过程的推动力减少;膜蒸馏特殊的膜污染问题以及空气间隙的存在,使AGMD传质效率相对较低<sup>[6]</sup>。

目前大型膜组件在结构设计和制备以及工艺流程和操作条件的优化都是十分重要的研究课题。本文以太阳能膜蒸馏淡化西部地区苦咸水为工程应用背景,目前应用于苦咸水淡化工程的大膜面积膜蒸馏组件的开发设计研究比较少,尤其是设计大通量、适用于低温(50~60℃)太阳能膜蒸馏组件的设计研究更少<sup>[7]</sup>。一个优化设计的组件,应通过改变组件的流体力学状况及结构,以提高温度极化系数和浓度极化系数,以强化边界层的传热传质过程<sup>[8]</sup>。本文基于流体力学的旋流思想,设计制作了一种新型多层,带有分水盘的大膜面积并接式空气隔板框膜组件,新型多层膜组件结合适当的工艺条件及优化的膜组件结构参数,提高了膜面的剪切力和剪切速度,有效地破坏了温度浓度极化现象,提高了产水量,为实现中温的太阳能膜蒸馏过程奠定了基础。

## 1 太阳能膜蒸馏实验装置及工艺流程

如图1所示,为太阳能膜蒸馏实验装置流程

图。共包括以下几个部分:热工质循环系统、冷工质循环系统、膜组件以及测量系统。实验采用的新型膜组件为冷、热5层并联。在利用太阳能为膜蒸馏热端工质提供热量进行水处理时,如果被处理工质为自来水,可以直接利用集热器加热被处理工质,集热器吸收太阳辐射后加热被处理工质,该工质升温后进入膜组件进行蒸馏。如工质为苦咸水时,为了能够及时提供温度为60~80℃的膜蒸馏热端工质,且防止太阳能集热器结垢和腐蚀,集热器内集热工质进入换热器内,与被处理工质进行换热,温度升高,再进入膜组件进行蒸馏淡化。如辐射强度较低时,集热器吸收太阳辐射能后提供的全部热量都用来加热被处理工质,供给淡化装置运行。如果辐射强度较高时,则多余的能量可储存于储热水箱中,储热水箱在日落后可以延长膜组件的运行时间。实验室淡化装置中可采用制冷机冷却水进行冷凝。

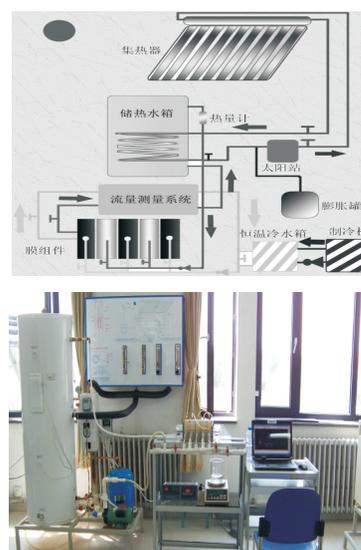


图1 太阳能层叠式空气隙膜蒸馏实验装置流程

## 2 新型层叠式膜组件设计

### 2.1 单元组件及冷、热容腔设计

削弱膜蒸馏过程中温度和浓度边界层,关键是改变边界层的流态<sup>[9,10]</sup>,基于流体力学的旋转思想设计了一种多层带有分水盘空气隙膜组件,如图2所示,五层并联运行组件,主要由冷水边腔、

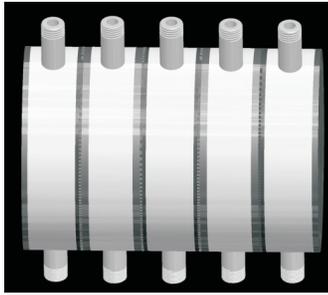


图2 多层并接式膜组件示意

热工质容腔、冷水腔、热工质容腔、冷水边腔,进口和出口与热工质循环系统组成回路,冷水质容腔两侧均安装有膜,两端的冷水边腔在最外端采用塑料挡板密封。膜的渗透侧与冷壁之间具有间隙,热工质容腔通过工质容腔通过进口和出口与冷工质循环系统组成回路。该组件结构紧凑、拆装容易、易清洗、耐腐蚀。

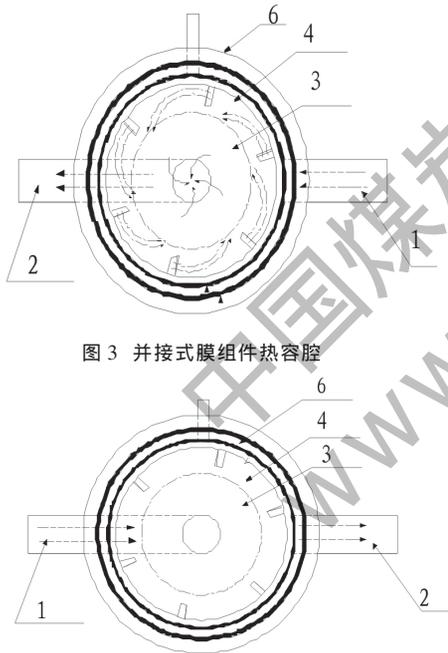


图3 并接式膜组件热容腔

图4 膜组件冷容腔

如图3、4所示,热容腔采用 $\phi 160\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的尼龙制作,主要由进水管1、出水管2、链接构件3、分水盘4、膜5、热腔体边框6等主要部件构成,分水盘4与膜5平行设置,其间距可调,在膜和分水盘之间形成一定的空间为膜热腔体;由热腔体边框、链接构件和两个对称的分水盘形成的空间为进水腔体;由链接构件、分水盘和出水管形成的通道为出水腔体。从恒温水浴器出来的热工质通过进水管1进入进水腔体后,再通过分水盘的开槽进入到膜热腔体,在膜热腔体中进行膜蒸馏,部

分热工质以蒸汽形式透过膜孔,其余的热工质由分水盘的中心开孔进入到出水腔体再流回到热端的恒温水浴器中,从而形成了热工质的循环流动。

冷腔分水盘不同于热容腔的分水盘之处在于分水盘上的开槽没有角度之分,是垂直分水盘平面开的;另外冷水腔设有闷盖,阻隔冷工质渗漏;冷水边腔用堵片取代了分水盘,堵片上无开槽,冷水腔的进水、出水同热容腔进水、出水相反。

### 2.2 旋向入流分水盘设计

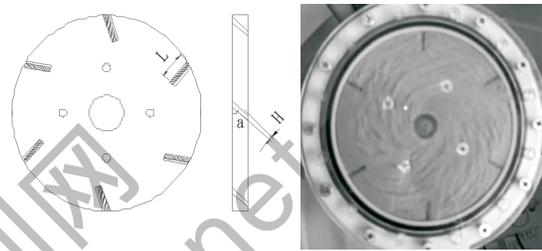


图5 热熔腔分水盘

如图5所示,组件的核心部件——分水盘,起到了改变热工质入流方向的作用,从恒温水浴器流出的热工质通过分水盘后,入流方向由垂直于膜面方向调整为沿着膜面切向方向的旋转入流,在贴近膜面处形成漩涡流动,从而破坏了膜面附近的温度和浓度极化现象,提高了膜通量。分水盘材料可为塑料,外径 $\phi 115\text{ mm}$ ,厚度可为3 mm至5 mm;圆周均布多个槽,槽的数量可为4、6、8、10、12个等,槽的进深L为8 mm、10 mm、12 mm等,槽的宽度H为2 mm、3 mm、4 mm等,槽与分水盘水平面成一定角度 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 等。通过调节开槽角度、长度及宽度改变入流的流场状态,从而产生不同程度的涡流强度。来自进水腔体的热工质通过分水盘的开槽后再通过分水盘的通孔进入到出水腔体,最终流出膜组件。

## 3 电加热层叠式膜组件实验

### 3.1 3层组件通量随温度、流量的变化关系

实验以自来水为热工质,选用美国 Millipore (密理博) 公司生产的 FALP 型平板膜,膜孔径  $0.45\ \mu\text{m}$ 、孔隙率 85%、膜厚度  $150\ \mu\text{m}$ 。分水盘开槽宽度为  $H=2\text{ mm}$ ,角度  $\alpha=30^\circ$ ,长度  $L=12\text{ mm}$ 。冷端温度控制在  $10\text{ }^\circ\text{C}$ ,流量为  $400\text{ L/h}$ ,空气隙厚度  $1\text{ mm}$ ,开启3层组件运行,即1个热容腔(2张膜,膜的有效直径  $115\text{ mm}$ ),两个冷容腔。

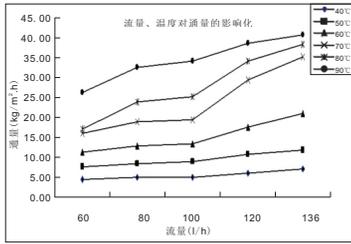


图6 流量对膜通量的影响关系曲线

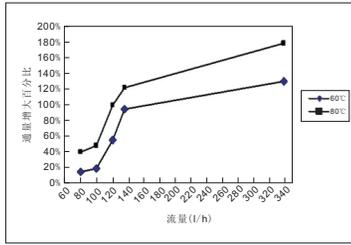


图7 流量对膜通量提高的百分比

如图6,7所示,恒温水浴电加热温度在40℃、50℃、60℃时,流量对通量的影响较小。由于新型组件结构紧凑、且多层并联运行、管路系统比较复杂,使得该组件阻力损失较大,要求热端提供的扬程较高,而且,新膜组件热容腔空间较小、每个热容腔两侧都装有膜,通过进水管进入到热容腔的热工质会均匀分配到两个膜热腔体中,流量相应减小,从而导致了流量对通量的影响较大。如果运行太阳能膜蒸馏系统,要求太阳能热水器提供的温度应该满足60℃以上,增大流量时膜通量才有可能增大。当热端温度80℃在流量为136 L/h时,其通量是流量60 L/h的1.21倍。

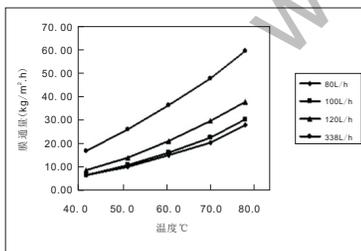


图8 温度对膜通量的影响关系曲线

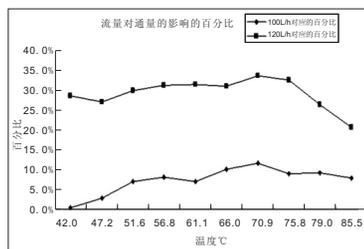


图9 温度对膜通量提高的百分比

为了进一步验证流量对通量的影响,减小系统中的沿程、局部阻力,在原实验系统不变的情况下,热工质直接从恒温水浴中进入到膜组件中,不经过流量测量系统,实验时采用质量测量方法来读取实验时所用流量,这种改动使热工质的流量达到338 L/h。如图8,9所示,对应的通量在热工质温度80℃时,338 L/h流量对应的通量比60 L/h流量时对应的通量将近提高了1.7倍。所以在太阳能膜蒸馏实验中,考虑换热器传热损失,膜组件的运行温度可选择70℃和流量300 L/h,其产水通量是较大的。电导率均小于10 μs/cm。

### 3.2 国产膜通量随温度、流量的变化关系

实验以自来水为热工质,采用四种不同的PTFE膜材料,如表1所示。冷腔温度控制在10℃,冷端流量控制在400 L/h;重点考察了改变热端的温度和流量对膜通量的影响。开启3层组件进行实验,膜与铜冷壁之间的空气隙名义厚度调节为1mm,分水盘开槽宽度为H=2 mm,角度α=45°,长度L=12 mm。

表1 膜结构参数

编号	名称	孔径/μm	膜涂层厚/μm	孔隙率/%
1#	PP长丝覆膜滤料	0.5	20	90
2#	PP网格覆膜滤料(薄膜)	1.0	5	90
3#	PP网格覆膜滤料(厚膜)	0.1	25	90
4#	PP长丝覆膜滤料	0.1	30	85

如图10所示,随着温差的增大四种膜的膜通量变化趋势相似,呈近似指数上升状态。当温差由30℃升高到70℃时,1#、2#、3#、4#四种膜的

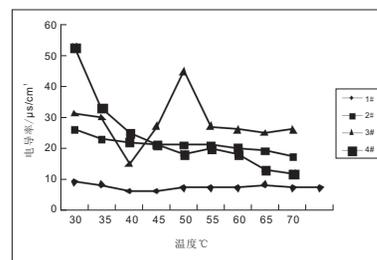
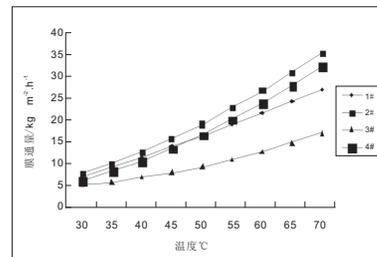


图10 流量为300L/h膜通量、电导率变化

膜通量比温差为 30 ℃时分别增加了 4 倍、3.7 倍、2.2 倍和 4.7 倍。由于膜参数不同,温差的增大对膜通量的影响也不同,4# 受温差的影响最大。电导率值随着温差的增加整体呈递减趋势,电导率值以 2 # 的最大,并连续递减,1 #、3 #、4 # 电导率值先递减后趋于平稳,稳定在 10 μs/cm 左右。

在实验中发现,由于新型组件结构紧凑、且多层并联运行、管路系统比较复杂、使得该组件阻力损失较大,要求热端提供的扬程较高,而且,新膜组件热容腔空间较小、每个热容腔两侧都装有膜,进水管进入到热容腔的热工质会均匀分配到两个膜热腔体中,流量相应减小,从而导致了流量对通量的影响较大。如果运行太阳能膜蒸馏系统,要求太阳能热水器提供的温度应该满足 60 ℃以上,增大流量时膜通量才有可能增大。

### 3.3 膜组件日产

为了获得该组件的日产水量,开启 5 层组件并联运行,其中 2 个热腔,共 4 张膜。如表 2 所示,经实验分析,同一个热腔两张 a、b 相同材质的膜在相同工况下,每张膜的膜通量基本相同,误差很小。在上述实验条件下,假设每天运行 10 h,使用一个热腔时,1 #、2 #、3 #、4 # 膜日产水量由分别为 4.88 kg、7.15 kg、3.75 kg、7.10 kg。如图 11 所示,如运行 10 个热容腔,共 20 张膜,即膜面积 2 增加到 0.208 m<sup>2</sup>,1 #、2 #、3 #、4 # 膜的日产水量分别为 98 kg、143 kg、75 kg、142 kg。2 # 和 4 # 膜针对于该多层并接式膜组件的产水量较理想,日产水量可以满足一家人的日用水量需求。

表 2 一个热容腔两张膜的膜通量对比

膜面直径	膜面积 A(m <sup>2</sup> )	质量 m <sub>1</sub> (g)	质量 m <sub>2</sub> (g)	时间 t(s)	通量 J(kg/m <sup>2</sup> .h)	膜面标号
115	0.010382	283.17	228.23	780	24.42	a
115	0.010382	307.06	228.23	1140	23.98	a
115	0.010382	276.13	228.23	660	25.17	b
115	0.010382	263.26	228.23	480	25.31	b

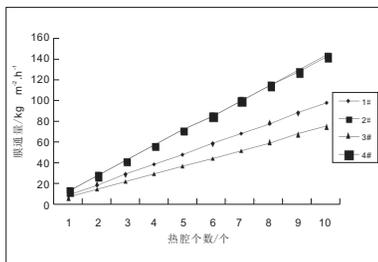


图 11 热腔个数对日产水量的影响

本文设计的膜组件经多次的拆卸,对膜的影响很小,说明组件的组装对膜几乎没有伤害,这将降低膜的成本,经长时间运行没有泄露,为本组件在工程上的应用提供了很好的例证,对实现新型膜蒸馏组件与太阳能结合奠定工程应用基础。

### 3.4 太阳能膜蒸馏实验

以自来水为工质,实验选用 U 型管式集热系统作为膜蒸馏系统的低位热源。主要部件有 CPC 集热器,承压储热水箱和太阳能站和辐射表。实验分析了 3 m<sup>2</sup> 集热系统在自然循环下,集热器出口温度、水箱温度与太阳辐射的关系,如图 12 所示。实验开始水箱为新注自来水与原有热水的混合水,初始温度为 23 ℃,上午集热器出口温度和水箱温度随太阳辐射的增大而增大,当下午时,辐射虽已降低,但由于水箱保温效果很好,水箱温度基本保持稳定,满足当天膜蒸馏温度的需要。水箱温度基本保持前一天晚上的温度,进口温度为 51 ℃,随时间延长,温度升高。膜通量随辐射强度的变化如图 13 所示。

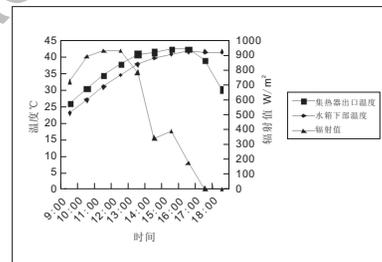


图 12 10月17日太阳瞬时辐射量、集热器出口温度、水箱温度随时间的变化

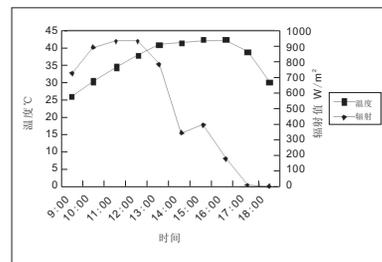


图 13 膜通量随时间的变化

## 4 结论

本文设计了一种新型多层并接式膜组件,该组件增大了膜面积,安装方便、便于清洗、结构紧凑、体积小,可以和太阳能耦合实现工程应用。组件采用分水盘改变了热工质的入流方向,使热工质在膜面附近产生涡流,破坏了温度和浓度极化。进口膜在低温时流量对膜通量影响较小,所选膜

材料在高温时流量对膜通量的影响很大。膜组件的运行温度应在 70 °C 和流量 300 l/h, 其产水通量较大。如果并联 10 个热容腔运行, 每昼夜 (10 h) 产水为可达 142 kg。本组件与太阳能热水系统相连, 实现太阳能膜蒸馏, 在自然循环状态下, 水箱温度保温效果良好, 能够满足膜蒸馏运行的温度条件。

## 参考文献

- [1] Koschikowski J, Wiegand M, Rommel M, et al. Experimental investigations on solar driven stand-alone membrane distillation systems for remote areas. 2009, 248
- [2] Lawson K W, Lloyd D R. Membrane distillation [J]. Membr Sci. 1997. 124: 1~25
- [3] Gostoli C and Sarti G C. Separation of liquid mixtures by membrane distillation. J. of Membrane Sci. 1989, 41: 211~224

- [4] 刘茉娥等. 膜分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 322~324
- [5] Kurokawa, H., Ebara, O. and Takahashi, S. Vapor permeate characteristics of membrane distillation, Separation Sci. and Tech., 1990, 25: 1349~1359.
- [6] 田瑞, 李嵩, 杨晓宏, 等. 高通量空气隙膜蒸馏系统的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(11): 2056 - 2059.
- [7] Kazuo Murase, Yusuke Yamagishi, Yusuke Iwashita, et al. Development of a tube-type solar still equipped with heat accumulation for irrigation [J]. Energy, 2008, 33: 1711~1718
- [8] 闫建民. 膜蒸馏传递机理及膜组件优化研究[D]. 北京化工大学. 2000: 1~20
- [9] 马淑娟, 杨晓宏, 田瑞, 膜材料影响并接式膜组件渗透性能试验研究 [J]. 水处理技术力工程院, 2011, 37(8): 81~85
- [10] 杨晓宏, 田瑞, 高虹等. 旋转入流膜蒸馏组件数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(2): 344~347

(上接第 40 页)

表 3 为海安县生活垃圾焚烧发电厂烟气净化系统技术性能参数, 以上排放标准均满足欧盟 2000 要求<sup>[4]</sup>。

表 3 生活垃圾焚烧发电厂烟气净化系统性能参数

项目	初始质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	GB18485-2014 (mg/m <sup>3</sup> )	欧盟 2000 (mg/m <sup>3</sup> )	出口质量浓度 (mg/m <sup>3</sup> )
烟尘	4000	20	10	8.5
HCl	1500	50	10	8
SO <sub>x</sub>	500	80	50	45
NO <sub>x</sub>	300	250	200	175
HF	10	-	1	0.85
Pb + Cr + Cu + Mn	50	-	0.5	0.42
Hg	≤0.5	0.05	0.05	0.035
Cd	≤0.5	0.1	0.05	0.035
二恶英	1ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.1ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	<0.1

## 4 结论

海安县生活垃圾焚烧发电厂结合烟气脱酸和烟气脱氮技术的优点设计出一套烟气深度处理工艺, 从最终的烟气净化系统性能参数可看出, 该烟气深度处理工艺的排放要求满足欧盟 2000 标准, 是一种高效的处理工艺。

## 参考文献

- [1] 白良成. 生活垃圾焚烧处理工程技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009;
- [2] 朱江涛, 王晓辉, 等. SNCR 脱硝技术在大型煤粉炉中应用探讨 [J]. 能源研究与信息, 2006;
- [3] 王天泽, 楚英豪, 等. 烟气脱硝技术应用现状与研究进展[J]. 四川环境, 2012
- [4] 何志刚. 江苏省南通市海安县垃圾焚烧发电厂运行记录;