

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

C02F 1/44 (2006.01)

C02F 1/46 (2006.01)

B01D 61/36 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480012804.8

[45] 授权公告日 2008 年 12 月 24 日

[11] 授权公告号 CN 100445215C

[22] 申请日 2004.4.24

[21] 申请号 200480012804.8

[30] 优先权

[32] 2003.5.12 [33] DE [31] 10321146.2

[86] 国际申请 PCT/DE2004/000855 2004.4.24

[87] 国际公布 WO2004/101444 德 2004.11.25

[85] 进入国家阶段日期 2005.11.11

[73] 专利权人 清洁水净化技术有限责任公司

地址 德国普芬茨塔尔

[72] 发明人 G·汉比策尔 H·比奥拉茨

M·博尔克 C·里普

[56] 参考文献

US3923426A 1975.12.2

US4419242A 1983.12.6

US20020166592A1 2002.11.14

WO03028862A1 2003.4.10

"Plasma Polymerization of Octafluorocyclobutane and Hydrophobic Microporous Composite Membranes for Membrane Distillation". YING KONG, XIAO LIN, YONGLIE WU, JIE CHEN, JIPING XU. JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE, Vol. vol. 46, No. no. 2, 15. . . 1999

审查员 曹赞华

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 廖凌玲 杨松龄

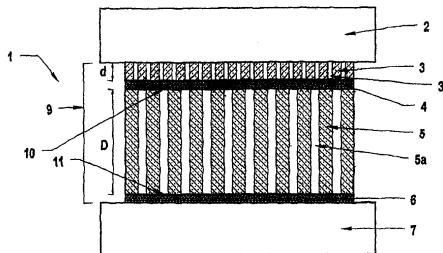
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 1 页

[54] 发明名称

用于水处理特别是用于水脱盐的方法和装置

[57] 摘要

水处理方法，特别是利用膜蒸馏由盐水生产淡水的方法。与之前已公知的方法相比，通过组合下列技术特征明显降低了投资成本和运行成本。所述技术特征为：待处理的水被保存在供应室中，供应室壁至少部分地由可透过水蒸气的疏水膜形成；具有比疏水膜厚度更大厚度的并且具有更低单位面积热导率的亲水膜与所述疏水膜平行设置；以及利用抽吸作用在待处理的水和淡水之间产生蒸气压差，使得膜蒸馏由抽吸作用产生的蒸气压差驱动，水冷凝在亲水膜的孔隙中。



1、利用膜蒸馏进行水处理的方法，其中待处理的水被保持在供应室中，所述供应室壁至少部分地由可透过水蒸气的疏水膜形成，

具有比疏水膜厚度更大厚度的并且具有更低的单位面积导热性的亲水膜与所述疏水膜平行设置，以及

利用抽吸作用在待处理的水和淡水之间产生蒸气压差，使得膜蒸馏由抽吸作用产生的蒸气压差驱动，水冷凝在亲水膜的孔隙中。

2、根据权利要求1所述的水处理方法，其特征在于，所述蒸馏基本上是等温的，冷凝淡水的温度高于待处理的蒸发水的温度，且该温度差小于30℃。

3、根据权利要求2所述的水处理方法，其特征在于，所述温度差小于10℃。

4、根据权利要求3所述的水处理方法，其特征在于，所述温度差小于1℃。

5、根据权利要求1所述的水处理方法，其中蒸气压差至少部分地由以下事实产生即：通过微型泵方法，包括将作用力作用在亲水膜孔隙中的水分子上，使淡水从亲水膜中抽出。

6、根据权利要求5所述的水处理方法，其中所述微型泵方法是电渗泵方法。

7、根据权利要求1所述的水处理方法，其中蒸气压差至少部分地由以下事实产生即：待处理的水在压力作用下被泵入供应室。

8、根据权利要求1所述的水处理方法，其中盐水经过处理用于生产淡水。

9、根据权利要求1所述的方法，其中疏水膜的蒸气渗透性在60巴的压力差下至少为100 L/(h·m²)。

10、根据权利要求1所述的方法，其中疏水膜的厚度至多100 μm。

11、根据权利要求10所述的方法，其中疏水膜的厚度至多10 μm。

12、根据权利要求11所述的方法，其中疏水膜的厚度至多1 μm。

13、根据权利要求1-9中任一项所述的方法，其中亲水膜的厚度为至少0.01mm。

14、根据权利要求13所述的方法，其中亲水膜的厚度为至少0.1mm。

15、根据权利要求14所述的方法，其中亲水膜的厚度为至少1mm。

16、根据权利要求1-9中任一项所述的方法，其中亲水膜的厚度是疏水膜厚度的至少10倍。

17、根据权利要求16所述的方法，其中亲水膜的厚度是疏水膜厚度的至少100倍。

18、根据权利要求1-9中任一项所述的方法，其中疏水膜上每单位面积的导热性是亲水膜上每单位面积导热性的至少3倍。

19、根据权利要求1-9中任一项所述的方法，其中疏水膜是多孔的，其孔隙大小至多为100 μm 。

20、根据权利要求19所述的方法，其中疏水膜是多孔的，其孔隙大小至多为5 μm 。

21、根据权利要求1-9中任一项所述的方法，其中亲水膜包括多个层，并且各层具有不同的性质。

22、用于利用膜蒸馏进行水处理的装置，包括：

供应室，所述供应室壁至少部分地由可透过水蒸气的疏水膜形成，与疏水膜平行设置的亲水膜，所述亲水膜的厚度比疏水膜的厚度大并具有更低的每单位面积的导热性，以使水冷凝在邻近疏水膜界面的疏水膜的孔隙中，和

泵装置，利用所述泵装置在待处理的水和淡水之间产生蒸气压差，使得膜蒸馏由抽吸作用产生的蒸气压差驱动，水冷凝在亲水膜的孔隙中。

23、根据权利要求22所述的装置，其中为了提供电渗泵作用，平行于亲水膜布置两个扁平电极，使得至少一层亲水膜位于两个电极之间，所述电极可选择性地为亲水膜的组成部分，且位于两电极之间的层具有表面电荷。

24、根据权利要求22所述的装置，其中所述供应室具有耐压性，并设置泵，利用该泵，水在压力作用下被泵入供应室。

25、根据权利要求22-24中任一项所述的装置，其中疏水膜的蒸气渗透性在60巴的压力差下至少为100 L/(h·m²)。

26、根据权利要求22-24中任一项所述的装置，其中疏水膜的厚度至多100 μm 。

27、根据权利要求26所述的装置，其中疏水膜的厚度至多10 μm 。

28、根据权利要求 27 所述的装置，其中疏水膜的厚度至多 $1\ \mu\text{m}$ 。

29、根据权利要求 22 - 24 中任一项所述的装置，其中亲水膜的厚度为至少 0.01mm 。

30、根据权利要求 29 所述的装置，其中亲水膜的厚度为至少 0.1mm 。

31、根据权利要求 30 所述的装置，其中亲水膜的厚度为至少 1mm 。

32、根据权利要求 22 - 24 中任一项所述的装置，其中亲水膜的厚度是疏水膜厚度的至少 10 倍。

33、根据权利要求 32 所述的装置，其中亲水膜的厚度是疏水膜厚度的至少 100 倍。

34、根据权利要求 22 - 24 中任一项所述的装置，其中疏水膜上每单位面积的导热性是亲水膜上每单位面积导热性的至少 3 倍。

35、根据权利要求 22 - 24 中任一项所述的装置，其中疏水膜是多孔的，其孔隙大小至多为 $100\ \mu\text{m}$ 。

36、根据权利要求 35 所述的装置，其中疏水膜是多孔的，其孔隙大小至多为 $5\ \mu\text{m}$ 。

37、根据权利要求 22 - 24 中任一项所述的装置，其中亲水膜包括多个层，并且各层具有不同的性质。

用于水处理特别是用于水脱盐的方法和装置

技术领域

本发明涉及一种水处理方法以及相应的装置。最重要的应用是用于由盐水（特别是海水或淡盐水）生产淡水（净水）。以下作为例子的参考文献针对该应用领域。然而，本发明还适用于其它目的在于从污染的水中通过蒸馏得到净化水的应用。本发明特别是包括被细菌或病毒污染的水（例如废水或河水）的净化。

背景技术

海水和其它水的脱盐处理方法对于向人类供应饮用水具有很重要的意义。在地球全部的地表水中，只有大约 2.5% 的淡水。其中，大约 80% 是土壤中的水分或者极地常积不消的冰，因此全部地表水中只有大约 0.5% 可以作为饮用水。而且，饮用水供应分布非常不均匀。因此，地球上的大部分人口受到缺水之苦。

为了克服这一问题，已经提出很多种用于海水脱盐的方法。需要满足的一些要求很难达到，因为海水的含盐量大约是 30g/L，而根据世界卫生组织（WHO）的规定，引用水的含盐量不能超过 0.5g/L。在传统的蒸馏方法中，盐水通过加热蒸发，然后再在冷却的表面上冷凝。为了降低高能量消耗，已作出了多种尝试来使用太阳能作为能量源。这样的系统（“太阳能蒸发器”）的一种特别的类型在 Bouchekima 等人在 *Desalination* 137 (2001) 31-38 页发表的文章 “The performance of the capillary film solar still installed in South Algeria” 中有所描述。

通过这种在冷凝表面的上部使用毛细管结构的太阳能蒸发器，改善了蒸发水的冷凝。

另外，对于各种膜方法已经进行了长期的讨论。其中包括反渗透方法，在该方法中盐水在压力作用下通过有薄膜，所述薄膜中的孔具有保持盐的尺寸。另一种方法是电渗析方法，其中两个电极浸到一种电解质溶液中。在直流电压的电场中，在盐水中发生离子迁移。通过在电解槽的电极间交替连接阳离子和阴离子交换膜，有可能引导离子流动以致于增加在外室中电解质的浓度，同时减少在中心室中的浓度，即达到脱盐的效果。

膜方法还包括膜蒸馏方法，其中出于简化的目的待处理的水在下文中称之为盐水，被保持在一个供应室中，所述供应室壁至少部分地由疏水的多孔膜构成。考虑到其疏水性质（即相对于水的表面张力），该膜的孔隙尺寸必须使得盐水不会充满膜的孔隙，因此疏水膜中的孔隙中包含空气。换句话说，也叫做气泡压力的最大流体静压低于该方法操作期间供应室中的压力，在该最大流体静压下水不再会流经疏水膜。

在膜蒸馏过程中，盐水蒸发通过疏水膜。气态水在蒸馏物侧（淡水侧）冷凝。冷凝处理（与传统的冷凝处理相似）是基于被加热的海水与被冷却的冷凝淡水之间的温度差。在下列文献中对各种膜蒸馏方法有所描述，例如

- 美国专利 3340186 (P. K. Weyl)
- 美国专利 4545862 (Gore 等)
- 美国专利 4265713, 4476024, 4419187 和 4473473 (Cheng 等)。

发明内容

在这些技术背景下，本发明所要解决的技术问题是提供一种用于水处理尤其是水脱盐的方法以及相应的装置，其特征在于可以降低操作和投资成本。

该技术问题是通过一种水处理方法解决的，其中盐水被保持在供应室中，所述供应室壁至少部分地由疏水的水蒸气可透过膜形成，其孔隙大小使得盐水不会充满孔隙，其中亲水膜与疏水膜平行布置，亲水膜与疏水膜相比具有更大的厚度，以及更低的每单位面积的导热性(thermal conduction)，其中通过抽吸效应，在盐水和淡水之间产生蒸气压差，使得膜蒸馏由抽吸作用产生的蒸气压差驱动，水冷凝在亲水膜的孔隙中。

本发明还涉及用于水处理的装置，尤其是用于通过膜蒸馏从盐水中抽取淡水的装置，该装置包括一个供应室，所述供应室壁至少部分地由疏水的水蒸气渗透膜形成，所述渗透膜的孔隙尺寸使得盐水不会充满这些孔隙，亲水膜与该疏水膜平行，与疏水膜相比，亲水膜的厚度更大并且具有更低的每单位面积的导热性，使得水冷凝在与疏水膜的界面附近的亲水膜的孔隙中，并且还包含一个泵机构，借助所述泵机构在盐水和淡水之间产生蒸气压差，使得膜蒸馏由抽吸作用产生的蒸气压差驱动，水冷凝在亲水膜的孔隙中。

术语“亲水”和“疏水”按照传统的认识进行理解：当水分子之间的相对吸引力小于水分子和固体表面之间的吸引力时，该表面为“亲水”

的。相反则为“疏水”表面。液体和亲水（可湿）表面之间的接触角小于 90° （不存在其它作用力时），但是对于疏水表面来说，该接触角则大于 90° 。

疏水膜应当尽可能薄。其厚度优选小于 $100\mu\text{m}$ ，但是至多 $10\mu\text{m}$ 甚至至多 $1\mu\text{m}$ 是特别优选的。水蒸气渗透性通常是由于疏水膜是具有至少几个纳米的孔隙的多孔膜而产生的。然而，在极薄的疏水膜的情况下，水蒸气渗透性也可以基于不能认为是多孔的膜的渗透性。孔隙尺寸的上限由上述关于气泡压力的条件决定。考虑到这个限制，孔隙尺寸应当尽可能的大。以下合成（聚合物）材料尤其适合用作疏水膜：聚四氟乙烯、聚氯乙烯。

亲水膜不需要是均匀的。特别地，亲水膜可以包含多个层。不同的多孔的，特别是合成的，成层材料是适用的。如果未处理的成层材料是疏水的，那么所需的亲水性可以通过对内表面（即材料内部与孔邻接的表面）进行适当处理得到。这样的方法是已公知的，例如，疏水的聚碳酸酯通过聚乙烯吡咯烷酮的薄表面涂层处理后变得亲水化。

用于亲水膜的特别适合的塑性材料包括：纤维素、醋酸纤维素、硝酸纤维素、聚砜和聚醚砜。

由于亲水膜比疏水膜厚（厚度比例优选至少为10，特别优选至少为100），以及亲水膜的每单位面积的导热性比疏水膜低得多，因此在操作期间疏水膜两侧的温度仅存在些微的差异，淡水侧的温度略高于盐水侧的温度。因此，淡水侧的与温度相关的蒸气压余量是很小的。由于在盐水侧或淡水侧的抽吸作用，这个蒸气压余量被过度补偿，导致在亲水膜方向通过疏水膜的传质，由此水冷凝在亲水膜的孔隙中。与已公知的膜蒸馏方法相比，在已公知膜蒸馏方法中，传质是基于冷却而使淡水的温度低于盐水的温度并且因此还具有更低的蒸气压而产生的，而在本发明的方法中压力差是通过抽吸作用产生的。

由于这里所述的结构特征和处理条件，在蒸馏开始时，亲水膜中充满淡水，然后进一步在面向疏水膜的亲水膜的极限外表面的邻近处进行冷凝。鉴于这里所述的热状态，优选近乎等温地进行蒸馏，冷凝淡水的温度和蒸发盐水的温度之间的差值小于 30°C ，优选小于 10°C ，特别优选小于 1°C （“准等温膜蒸馏”）。

这里所述的热状态的另一个结果是在淡水侧由冷凝产生的冷凝热几乎全部（最少60%）直接流过疏水膜进入蒸发的海水中，因为该热流遇到的热阻比由提供绝热的亲水膜所形成的热阻小得多。因此，蒸发海水所需的大部分蒸发热来自于通过疏水膜的冷凝热的直接循环。这大大

降低了处理过程中的能量损耗。

关于这些因素，本发明从根本上区别于上面所引用的 Cheng 的美国专利，例如美国专利 4419242，其中在文中不同部分建议使用薄亲水层，其可以设在疏水膜的海水侧和/或淡水侧上，并且可以是多孔的或无孔的。Cheng 描述了在传统的膜蒸馏中，通过疏水膜的盐的浓度如何随时间而增加，并由此膜的润湿性发生改变。由于该效应，盐水充满疏水膜的孔隙，并由此破坏所需的防汽层（水浸）。据说通过使用上述亲水膜可避免发生这种情况。Cheng 主要描述了一种传统的膜蒸馏，其由蒸发的盐水和冷凝的淡水之间的足够大的温度差驱动。

在本发明中，所需的蒸气压差可以采用不同的抽吸方法而得到。原则上可以通过使用传统泵将盐水置于足够高的压力下。然而，这需要供应室和膜具有足够的耐压性。

除此之外或代替的是，微型泵方法是在本发明范围内优选使用的。在这种情况下，抽吸作用是基于作用在亲水膜孔隙内部的水分子上的力（“孔内泵机制”）。下面将详细介绍的电渗泵方法尤其适用于这一目的。

附图说明

下面结合附图并基于典型实施例对本发明进行详细说明。其中所示出的细部可单独使用或以不同的组合形式使用从而产生本发明的优选实施例。

图 1 为适于本发明实施的装置的第一实施例的基本部分的截面示意图。

图 2 为适于本发明实施的装置的第二实施例的基本部分的截面示意图。

具体实施方式

图 1 所示的水脱盐装置 1 包括供应室 2、疏水膜 3、第一电极 4、亲水膜 5、第二电极 6 和淡水室 7。该图是高度示意性的。特别是，膜 3、5 和电极 4、6 的厚度被大大地放大了。实际上，这些部件形成一系列平行设置的层，并且它们的（相等的）外形尺寸相对较薄。这些层相互之间直接接触。

为了在如附图标记 9 所示的叠层内整体定位这些层，可以使用多种方法来确保所需的接触，并且不妨碍所需要的蒸气和/或液体的通过。特别是，整个叠层 9 可以通过适当的机械装置保持在一起。另一种可选

方式是，也可以使用适用的具有连通孔隙的层连接技术。特别是，电极4和6以及疏水膜可以通过层压或一些其它涂覆方法（例如气相沉积）施加于相对厚并作为载体的亲水膜上。

叠层9与供应室2相连接使其完全封闭该室的一个开口（附图中未示出）。由此形成一部分与供应室交界的壁。本领域中已公知的不同的形状当然都是可能的，例如棱柱形的、盘绕形、管状外形等。如上所述（并且如同膜蒸馏方法中的惯例），疏水膜3由不会被水润湿的材料制成，以使得水蒸气可以渗透通过其孔隙3a（如附图中象征性地示出），但是液态水则不会透过。水蒸气通过多孔的第一电极4，由此进入亲水膜5的孔隙5a中（如附图象征性地示出）。根据本发明，在亲水膜5的孔隙5a中液态水发生冷凝。这包括第一电极4为亲水膜的一部分的情况，并且设计成使得在与疏水膜的相边界处电极4的孔隙中进行冷凝。然后在抽吸作用的驱动下，水从亲水膜经过第二电极6（也是多孔的）并接着进入淡水室7中，水自淡水室流动，优选为连续地流动进入收集槽（未示出）。这一过程可得到通过抽吸产生的较低压力的支持。

本发明功能的第一个重要的先决条件是亲水膜5的每单位面积的导热性比疏水膜3的每单位面积的导热性低（优选低得很多）。扁平结构例如这里所用的膜的导热性与所使用的材料的热导率（thermal conductivity）成正比，且与其厚度成反比。为了实施这里提到的条件，疏水膜3的热导率应当尽可能地高，而亲水膜5的热导率应当尽可能地低。然而，这些材料的选择受到很多其它的限制，例如润湿性、孔隙大小、孔隙率和机械强度。因此在实际条件下，疏水膜3的热导率可能仅比亲水膜5的相应的热导率数值略高一些或者甚至更低。

在本发明的实践中，所用材料的厚度影响作用很大。优选地，疏水膜3的层厚度d应该非常小。在上文已经提到了其数值。亲水膜5的厚度优选是疏水膜3厚度的至少10倍，特别优选的是至少100倍。亲水膜5厚度的绝对值优选是至少0.1mm，特别优选至少1mm。整体上，疏水膜3上每单位面积的导热性应当是亲水膜5上每单位面积导热性的至少3倍。

为了成功实践本发明，疏水膜3具有足够高的蒸气渗透性也是很重要的。优选的是在60巴的压差下至少为 $100 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 。疏水膜3的孔隙大小应该优选至多 $100 \mu\text{m}$ ，特别优选至多 $5 \mu\text{m}$ 。

如前所述，本发明功能的另一个重要特征是通过抽吸作用保持膜蒸馏所需的盐水和淡水之间的蒸气压差。在附图所示的实施例中，这是通过实施作为电渗泵的微型泵法实现的。为此目的，使用了亲水膜，在其

内表面上具有正的或负的表面电荷。可通过适当选择材料以满足该条件。特别是，可以考虑使用内表面涂覆电子交换材料的膜。在膜5内由平行于亲水膜5的有限内表面10、11的两个电极4、6产生电场，在操作期间在这些电极上施加适当的电压。通常，直流电压是适用的。然而，也可以使用脉动电压或改进的交流电压。电渗抽吸作用是基于以下事实，即由于电荷载体存在于孔隙的壁上，在孔隙内部形成双扩散层，并且液体中的离子根据其极化状态和它们的电荷极性在电场中被加速。关于电渗泵方法的更多的信息可以从说明书下文引用的出版物中获得。在本发明的范围内，第一电极4可以具有正的或负的电荷（那么第二电极6相应地具有负的或正的电荷）。在某种情况下这些极性的选择取决于亲水膜内表面上的电荷极性。电极极性的选择至少必须使得离子在远离疏水膜的方向上加速，以从亲水膜的孔隙5a中向淡水室7泵出水。

在操作过程中，亲水膜5的孔隙5a几乎完全被充满以在紧邻面对疏水膜3的亲水膜5的界面10处发生孔隙5a内的冷凝。这是由于在如下所述的毛细管冷凝效应基础上加以解释的自调节效应造成的。蒸馏过程开始时，通过疏水膜3的水蒸气由于它们的亲水毛细特性而在孔隙5a中冷凝。由此孔隙5a逐渐被填充直到冷凝淡水的弯液面接近界面10。在这种状态下，蒸馏的效能依赖于冷凝表面（即孔隙5a中水的弯液面）的凹曲度，而所述凹曲度又取决于由泵抽吸作用产生的减小的压力。从而，凹曲度随着由泵抽吸作用减小的压力的增加而增加，以使毛细冷凝的效能提高。这导致产生更多的水蒸汽，弯液面的曲度趋于变得更小。

这种自调节行为对于本发明的功能来说很重要，这是因为之后的冷凝位置（前述弯液面）非常靠近疏水膜3（因为其厚度很小）并且非常靠近蒸发的位置。因此，实现上述的准等温过程，进一步带来非常低的能量消耗。

图2所示为另一个实施例，其中第一电极4位于亲水膜5内，所述亲水膜5包括两个层12和13。假若满足电极之间的电场作用在亲水膜的孔隙5a中的液体上（当施加了一个电压时）的条件，原则上，电极4和6可以位于装置内的不同位置。例如，第二电极6也可以设置在淡水室7朝向远离亲水膜5的一侧。电极4、6的位置会影响上述冷凝在孔隙5a中的淡水的弯液面的自调节行为。出于这种考虑图2中所示的布置是有利的。

通常，电极4、6中的至少一个与亲水膜5固定连接和/或在其中成为一体。这样的电极可以看作亲水膜5的组成部分。特别是，这意味着当一个电极与亲水膜5在界面10处结合为一体的时候，可在由该电极4

形成的部分膜 5 中发生冷凝。

如上所述，亲水膜可由通常具有大致球形孔隙的不同材料制成。然而，也可以使用具有如图 1 和 2 所示的在界面 10 和 11 之间基本上呈直线形的孔隙的膜材料。这些材料可有利地用于根据本发明的亲水膜。

在电渗泵方法的实施例中，如附图中所示，需要考虑电化学效应。特别是，如果电压高于大约 1.8V，那么在阴极上可能会产生氢气。这可以用来除了产生净化水以外还产生氢气。这种情况下，面对疏水膜的电极优选为阳极。然而，还有可能通过使用阻碍可能导致不希望的电化学反应的离子或气体（例如氧气）通过的适当的离子交换膜，从而减小或消除所不希望的电化学效应。

下面的实施例用来进一步说明本发明。

为了描述该方法，必须考虑各个方法步骤。样品的计算以质量流量为 $30 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2$ 和海水温度为 17°C 作为基础。

1、冷凝点的热平衡

水蒸发透过疏水膜，接着在疏水膜中充满水的孔隙的表面上进行冷凝。相关的传热可以用数学形式表达如下。在本实例中热损失假定为千分之一。温度增加值假定为 0.14K 。

$$\text{热损失: } \frac{QW2 + QM2}{QM1} = \frac{1}{1000}$$

$$\text{温度增加值: } T2 = T1 + 0.14\text{K}$$

$$\text{热平衡: } Q_{kon} = QW2 + QM2 + QM1 = M \cdot H \cdot v$$

其中:

$$Q_{kon} = M \cdot H \cdot v$$

$$QM1 = \frac{\lambda_{M1}}{L_1} (A_1 - A_{e1}) (T2 - T1)$$

$$QM2 = \frac{\lambda_{M2}}{L_2} (A_2 - A_{e2}) (T2 - T3)$$

$$QW2 = \frac{\lambda_w}{L_{e2}} A_{e2} (T2 - T3) + M_{cp} (T2 - T3)$$

Q_{kon} = 冷凝热

$QM1$ = 通过疏水膜的导热量

$QM2$ = 通过亲水膜的导热量

$QW1$ = 通过水的导热量和传热量

λ = 导热系数

- A = 横截面积
- L = 膜的厚度
- M = 质量流量
- Cp = 热容量
- Hv = 蒸发热
- T1 = 蒸发位置的温度
- T2 = 冷凝位置的温度
- T3 = 淡水主体温度

表 1 所示为给定 30 L/h·m² 质量流量时的计算结果。海水中的温度增加值为 1 K。其表明实现了所需的准等温过程。

表 1

| 进入的海水 | | | 输出的海水 | | | 输出的饮用水 | | |
|-----------|----------------------|-----------------|-----------|----------------------|-----------------|-----------|----------------------|-----------------|
| T [°C] | M [kg/s] | Conc. [g/kg] | T [°C] | M [kg/s] | Conc. [g/kg] | T [°C] | M [kg/s] | Conc. [g/kg] |
| 17 | 9.2×10 ⁻³ | 36 | 18 | 8.3×10 ⁻⁴ | 50 | 17 | 8.3×10 ⁻³ | - |

2、毛细冷凝

水蒸气在亲水膜的孔隙中冷凝，在毛细管中形成弯曲的表面。该表面上的蒸气压为 p_v 。与平面上的蒸气压 p_v^0 相比，该蒸气压 p_v 减小，并由此成为在毛细管中水蒸气冷凝的驱动力。减小的蒸气压 p_v 可以由 Kelvin 方程式 2. a、方程式 2. b 和方程式 2. c 计算得到。用于从毛细管中抽出水的必须施加的毛细管压力 p_k 由方程式 2. b 计算得到，并且至少与被需要用来减小蒸气压的由 Kelvin 方程式 2. a 计算得到的减小的压力一样大。

方程式 2. a:

$$p_k = \frac{RT}{V_L} \ln \frac{p_v^0}{p_v} \quad (\text{Kelvin 方程式})$$

方程式 2. b:

$$p_k = \frac{2\gamma_L \cos \delta}{r}$$

方程式 2. c:

$$\gamma_{H_2O} = 0.1179 \frac{N}{m} \left(1 - \frac{T}{T_{krit}} \right)^{\frac{4}{5}}$$

其中：

p_k = 毛细管压力

V_L = 液体的摩尔体积 (水: $18.05 \text{ cm}^3/\text{mol}$)

p_{v0} = p_k 为 0 时的蒸气压

p_v = 蒸气压

R = 一般气体常数 8.31441 J/molK

T = 温度

$T_{krit.}$ = 临界温度 (水: 647.3 K)

γ_L = 表面张力

δ = 润湿角

r = 毛细管半径

表 2 所示为举例的计算结果。与 2300 Pa 的蒸气压 p_{v0} 相比，蒸气压 p_v 被减小 170 Pa 。当孔隙半径为 12 nm 时，毛细管压力达到 120000 Pa 。至少该毛细管压力必须由电渗微型泵施加。

表 2: 毛细管冷凝

| 毛细管冷凝 | | |
|---------------|-------------------|---------------------|
| P_v [Pa] | P_k [Pa] | r [m] |
| 2130 | 120×10^5 | 12×10^{-9} |

3、疏水膜

疏水膜的性能可由给定的质量流量和由于毛细管冷凝产生的蒸气压减小带来的蒸气压差 ΔP 来确定 (方程式 3. a)。

方程式 3. a:

$$M = \frac{DM_w}{RT} \frac{A\psi}{L\tau} \Delta P$$

其中：

M = 质量流量

ΔP = 压力差

R = 一般气体常数 8.31441 J/molK

T = 温度

D = 扩散系数

M_w = 分子量

- $\psi =$ 孔隙率 ($\psi = U_e/U$, 其中 $U_e =$ 空部体积; $U =$ 多孔膜的总体积)
- $A =$ 横截面积 ($A_e = \psi A / \sqrt{\tau}$, $A_e =$ 有效横截面积)
- $\tau =$ 曲折系数
- $L =$ 多孔膜的厚度 ($\tau = (L_e/L)^2$, $L_e:$ 孔隙的有效长度)

表 3 所示为具有对应的压力差和预先选定的孔隙率和曲折度的膜的厚度。这产生了 $1 \mu m$ 的层厚度。

表 3: 疏水膜

| 疏水膜 | | | |
|----------------------|-------------------|-----------|------|
| M | A | L | P |
| [kg/s] | [m ²] | [m] | [Pa] |
| 8.3×10^{-3} | 1 | 10^{-6} | 170 |

4、电渗泵

为了维持冷凝的驱动力，即蒸气压差，已冷凝的水必须从毛细管中输送出去。为了这个目的，使用了电渗微型泵法。这种方法的数学说明可以在 C. L. Rice 和 R. Whitehead 的 (Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical Capillary (窄圆柱形毛细管中的电动力流); *J. Phys. Chem.* 69 (1965) 4017-4024) 和 S. Zeng, C. H. Chen, J. C. Mikkelsen Jr. 和 J. G. Santiago 的 (Fabrication and characterization of electro-osmotic micro-pumps (电渗微型泵的制造和特征), *Sensors and Actuators B* 79 (2001) 107-114) 中找到。由方程式 4. a 得到最大体积流量 (质量流量/密度)，由方程式 4. b 得到最大可得到的泵压力，由方程式 4. c 得到最大电压。

方程式 4. a:

$$\text{最大体积流量 (P = 0): } V_{\max} = \frac{\lambda^2 i_{EOF} BF1}{\epsilon \zeta BF2}$$

方程式 4. b:

$$\text{最大压力 (V = 0): } \Delta P_{\max} = -\frac{8 \mu L \tau \lambda^2 i_{EOF} BF1}{\epsilon \zeta A \psi r^2 BF2}$$

方程式 4. c

$$\text{最大电压 (V = 0): } U_{\max} = \frac{\mu L \tau \lambda^2 i_{EOF}}{\epsilon^2 \zeta^2 A \psi} \frac{1}{BF1}$$

体积流量 V 与压力差的关系如方程式 4. d 所示。
方程式 4. d:

$$V = V_{\max} \left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}\right)$$

作为压力和体积流量函数的最小功率，不考虑不可逆损失（表面电导率、体积电导率），可以根据方程式 4. e 计算得到。

方程式 4. e:

$$\text{功率} = U_{\max} i_{EOF} \left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}\right) = \frac{\mu L \tau}{\lambda^2 A \psi} \frac{BF2}{BF1^2} Q^2 + QP$$

下面的简略符号已经在上面的方程式中使用:

$$BF1 = \left[1 - \frac{2\mathcal{M}_1(r)}{rI_0(r/\lambda)}\right]$$

$$BF2 = \left[1 - \frac{2\mathcal{M}_1(r/\lambda)}{rI_0(r/\lambda)} - \frac{I_1^2(r/\lambda)}{I_0^2(r/\lambda)}\right]$$

其中 $I_n(x)$ = 第一种 n -th 次数的改进的 Bessel 函数:

$$I_n(x) = i^{-n} J_n(ix) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{I}{\nu! \Gamma(n+\nu+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2\nu+n}$$

其中:

V = 体积流量

ΔP = 压力差 (输出-输入)

ψ = 孔隙率 ($\psi = U_e/U$, 其中 U_e = 空部体积; U = 多孔介质的总体积)

A = 横截面积 ($A_e = \psi A / \sqrt{\tau}$, A_e = 有效横截面积)

r = 多孔介质的有效的孔隙半径

μ = 动态粘度

τ = 曲折系数

L = 多孔介质的厚度 ($\tau = (L_e/L)^2$, L_e : 孔隙的有效长度)

ϵ = 介电常数 ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R$, ϵ_0 = 电场常数, ϵ_R : 介电常数)

ζ = Z 电位

U = 电压

λ = 双扩散层的厚度 (Debye 长度)

I_1 = 一次的改进的 Bessel 函数

$I_0 =$ 零次的第一种改进的 Bessel 函数

$\kappa =$ 电导率

$i_{EOF} =$ 流过 EOF 的电流

这些方程式显示亲水膜的性质。该膜必须具有这些性质以保证实现具有合适的抽吸作用力的电渗流。孔隙半径的数值、厚度以及表面电荷都是通过这种方式得到的。

表 4 所示为前述计算实例的膜性质。另外，其也显示根据本发明的方法得到的积极的效果。此外，还给出了最大电压的数值（7 伏特）和得到的电流（13A）。能量消耗达到 92W，这意味着每升饮用水只需 3Wh。

表 4:

| 电渗流量 | | | | | | | | | | |
|------|-----------|--------------------|--------------------|--------|------------------|----------------------|-------------------|-----------|-----------|-----|
| 亲水膜 | | | | | | | | | | |
| A | L | r | δ | ϕ | U _{max} | M _{max} | P _{max} | i_{EOF} | i_{tot} | 功率 |
| [m] | [m] | [m] | [m] | [V] | [V] | [kg/s] | [Pa] | [A] | [A] | [W] |
| 1 | 10^{-4} | 6×10^{-9} | 6×10^{-9} | 10.1 | 7 | 2.3×10^{-1} | 125×10^5 | 365 | 13 | 92 |

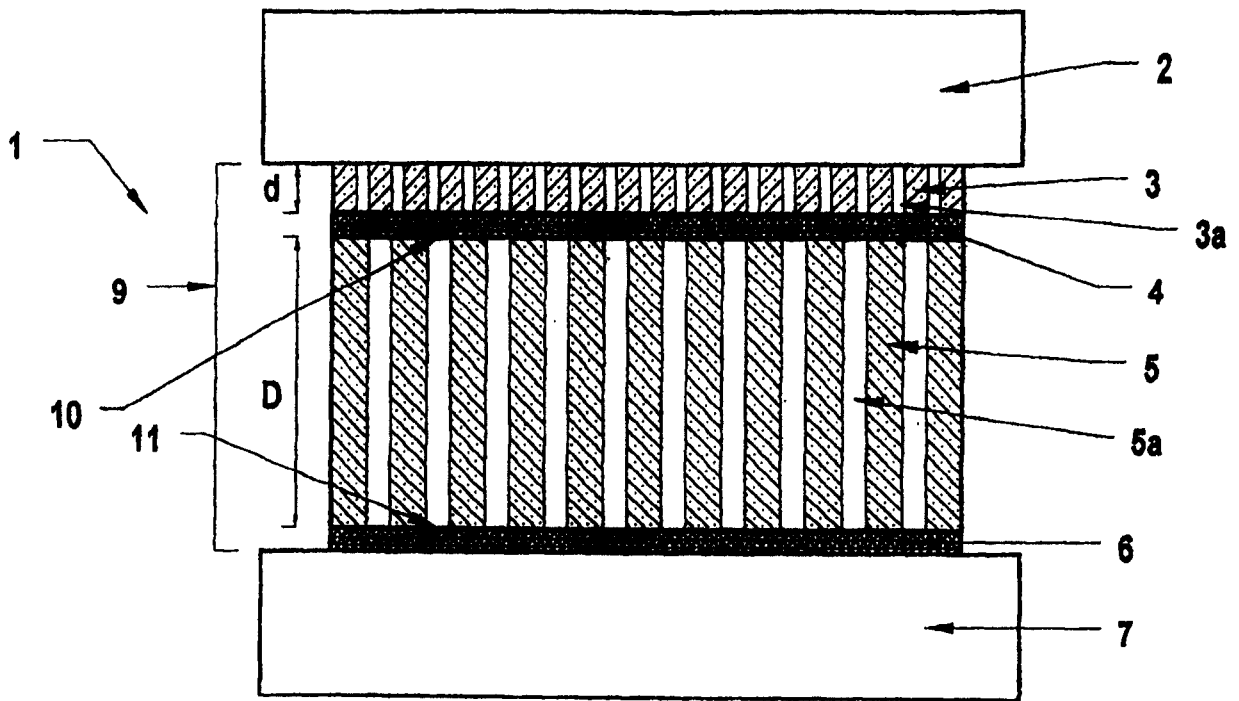


图 1

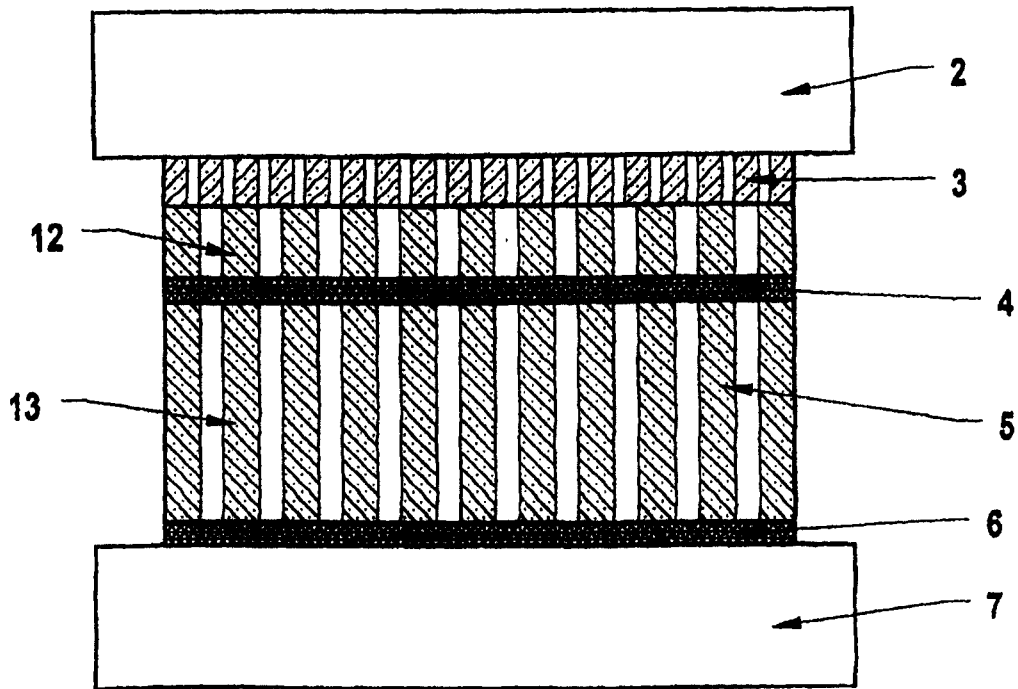


图 2