



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105188890 B

(45)授权公告日 2018.09.21

(21)申请号 201480022759.8

(22)申请日 2014.02.21

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105188890 A

(43)申请公布日 2015.12.23

(30)优先权数据
61/768,124 2013.02.22 US
14/185,706 2014.02.20 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.10.21

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/017609 2014.02.21

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/130779 EN 2014.08.28

(73)专利权人 巴特利纪念研究院
地址 美国华盛顿

(72)发明人 刘伟 N·L·坎菲尔德

(74)专利代理机构 北京北翔知识产权代理有限公司 11285
代理人 郑建晖 杨勇

(51)Int.Cl.
B01D 63/08(2006.01)
B01D 53/02(2006.01)
B01D 53/22(2006.01)
F24F 3/14(2006.01)

(56)对比文件
US 2010/0304953 A1,2010.12.02,
WO 2012/094764 A1,2012.07.19,
EP 1652663 B1,2010.01.13,
AU 50399/96 A,1997.08.21,
US 8500848 B2,2013.08.06,
CA 2187963 A1,1997.05.04,

审查员 胡钰琦

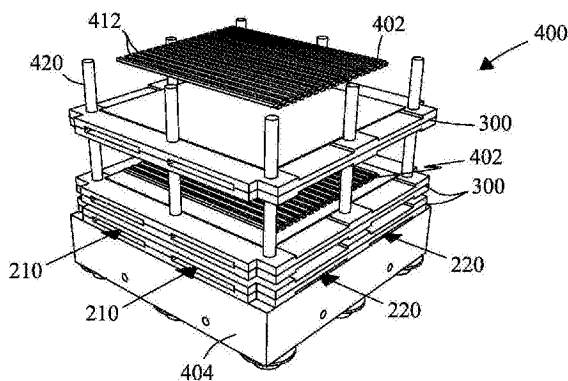
权利要求书2页 说明书21页 附图11页

(54)发明名称

用于质量交换、分离和过滤的膜设备和方法

(57)摘要

公开了一种膜设备以及用于制造和使用膜设备的方法。该膜设备可包括提供高的膜表面面积/单位体积的若干个多孔金属膜。该膜设备提供提高吞吐量和选择性的多种运行模式以用于供给流动流和渗透流动流之间的质量交换应用、质量转移应用、分离应用和/或过滤应用。



1. 一种膜设备,包括:

两个或多个膜盒,所述两个或多个膜盒被布置成一个膜盒堆,所述膜盒堆包括至少第一膜盒和第二膜盒,每个膜盒包括:

布置在一个支撑框架的相应面上的多个多孔金属膜,所述支撑框架限定一个开口空间,且所述支撑框架包括第一半框架和第二半框架,所述第一半框架包括第一多个凹陷,所述第二半框架包括第二多个凹陷,并且多个渗透或扫掠流动槽安置在所述支撑框架的一个边缘上或者两个相对边缘上,且所述多个渗透或扫掠流动槽与所述开口空间流体连通;

其中所述第一半框架上的所述第一多个凹陷能连接至所述第二半框架上的所述第二多个凹陷,以形成所述膜盒堆中的多个供给流动槽,所述多个供给流动槽和多个渗透或者扫掠流动槽安置在所述膜盒堆的相应侧上,在运行期间流动路径运输选定的流体横穿所述膜盒中的所述多孔金属膜的表面,所述多孔金属膜分离或过滤引入到所述膜设备内的流体中的选定尺寸的粒子或分子。

2. 根据权利要求1所述的膜设备,其中第一半框架还包括第三多个凹陷,且第二半框架还包括第四多个凹陷,所述第四多个凹陷能连接至所述第三多个凹陷,以形成所述支撑框架中的所述多个渗透或者扫掠流动槽。

3. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个供给流动槽和所述多个渗透或者扫掠流动槽被配置成在运行期间针对交叉流流动型态以90度的相对定向,或以逆流流动型态来运输选定的流体或分子通过所述膜设备。

4. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个多孔金属膜被布置成在所述支撑框架上间隔开选定距离。

5. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个多孔金属膜包括对称多孔金属膜。

6. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个多孔金属膜包括尺寸在 $0.010\mu\text{m}$ 到 $10\mu\text{m}$ 之间的孔隙,具有在 $20\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$ 之间选择的厚度。

7. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个多孔金属膜包括多孔基底材料,所述多孔基底材料包括具有从 0.01mm 到 5mm 的孔隙开口。

8. 根据权利要求7所述的膜设备,其中所述多孔基底材料包括具有 0.3mm 到 3.0mm 的液压直径的流动路径。

9. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述供给流动槽和/或渗透槽限定具有在 0.5mm 到 5.0mm 之间选择的高度尺度的开口。

10. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述膜盒中的所述多个多孔金属膜中的至少一个在其上包括安置在一个多孔金属支撑片上的沸石膜,所述沸石膜包括一层具有选定厚度的选定沸石,所述沸石膜被构造以在如下一个压力梯度下去除引入到所述膜设备内的供给流中的选定的分子,所述压力梯度产生不存在所述选定的分子的渗透流。

11. 根据权利要求10所述的膜设备,其中所述沸石膜是水选择性膜,所述水选择性膜具有对水分子的渗透有选择性的孔隙,所述孔隙提供大于或等于 $1\text{E}-06\text{mol}/\text{m}^2/\text{Pa}/\text{s}$ 的水渗透量,用于选择性地去除引入到所述膜设备内的供给流中的水。

12. 根据权利要求1所述的膜设备,其中所述多个多孔金属膜包括一个非对称多孔金属膜。

13. 根据权利要求1所述的膜设备,还包括与所述多个多孔金属膜接触的多孔基底材

料,所述多孔基底材料包括能连接至所述多个渗透或者扫掠流动槽的通道,以提供用于渗透流或者扫掠流的流动路径。

14.一种方法,包括:

递送包括待被从其中过滤或分离出的成分的供给流进入根据权利要求1所述的膜设备的多个供给流动槽,从而允许所述供给流流过多孔金属膜并且允许所述成分从所述供给流被运输至一个渗透流或者扫掠流,所述渗透流或者扫掠流随后从所述渗透或者扫掠流动槽排出。

15.根据权利要求14所述的方法,其中递送所述供给流包括使所述供给流在相对于所述渗透流或者扫掠流的逆流流动方向上或交叉流流动方向上流动通过所述膜设备。

16.根据权利要求14所述的方法,其中递送所述供给流包括将布置在所述膜设备的供给侧和所述膜设备的渗透侧之间的压力梯度设置成1巴或在1巴以上,以过滤和/或分离所述供给流中的所述成分。

17.根据权利要求14所述的方法,其中递送所述供给流包括在小于1巴的压力降的情况下递送所述供给流通过所述膜设备的所述多孔金属膜。

18.根据权利要求14所述的方法,其中所述膜盒的所述多孔金属膜包括支撑在一个多孔金属片上的沸石膜。

19.根据权利要求14所述的方法,其中递送所述供给流包括将包含藻类的供给流引入到所述膜设备内并且从所述膜设备释放包含较大浓度的藻类的供给流以及包含水的渗透流。

20.根据权利要求14所述的方法,其中递送所述供给流包括将包含在至少10%的相对湿度下的潮湿空气的供给流引入到所述膜设备内,使得所述供给流中的超过20%的水分在一个渗透流中被去除和排出。

21.一种用于制造权利要求1所述的膜设备的方法,包括:

将第一膜盒和第二膜盒组装在一起,以形成所述膜盒堆,其中组装包括将所述第一半框架上的所述第一多个凹陷与所述第二半框架上的所述第二多个凹陷对齐,以形成所述多个供给流动槽。

用于质量交换、分离和过滤的膜设备和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求享有2013年2月22日提交的标题为“Membrane Device and Process for Mass Exchange, separation, and Filtration”的第61/768,124号美国临时申请以及2014年2月20日提交的标题为“Membrane Device and Process for Mass Exchange, separation, and Filtration”的第14/185,706号美国申请的优先权。

[0003] 关于对在联邦政府资助的研究和开发下做出的发明的权利的申明

[0004] 本发明是在美国能源部授予的合同DE-AC05-76RL01830下由政府支持完成的。美国政府对本发明享有一定权利。

背景技术

[0005] 低成本、大表面面积的无机膜模块因为同时具有金属材料的独特性能属性和陶瓷材料的独特性能属性而受到长期工业研究。为了容易地展开膜模块，膜模块需要具有一个压缩形式。填充有聚合物膜的常规反渗透 (RO) 膜可提供每单位体积大的膜表面面积。然而，由于反渗透 (RO) 膜没有处理扫掠 (即，气体) 流动流 (flow stream) 的能力，因此其对于质量转移应用无效。具有圆柱形设计的RO型膜还受通道尺度限制，以至当该膜被放置在真空下时可导致大的压力下降。此外，采用金属管或陶瓷管的常规过滤器具有的膜填充密度通常比聚合物膜低将近一个数量级。此外，螺旋缠绕式RO膜过滤器和板式RO膜过滤器通常分别用于海水淡化和用于在生物反应器中处理废水，提供仅在单流动方向上对单个流动流的过滤。没有过滤器能够同时处理双流动流，这消除了两个流动流之间的质量转移和热量转移 (transfer)。并且，设计用于液相过滤的膜过滤器不适合在低压力下或在真空下的汽相分离，其中在低压力下或在真空下压力下降变成一个重要问题。因此，需要为液相分离和汽相分离以及过滤应用提供在最小压力降的情况下具有高质量转移率的新的膜设计。本发明解决了这些需求。

发明内容

[0006] 本发明包括一种在质量交换、质量转移、热量转移、分离、过滤中获得应用的膜设备 (membrane device)。该膜设备可包括堆叠在一起以形成一个膜模块的一个或多个膜盒。每个膜盒可包括一个由选定的材料 (例如，金属或塑料) 构造的支撑框架。多个多孔金属片膜 (porous metal sheet membrane) 可被安装到该支撑框架的相应侧。膜盒堆中的膜盒在具有流动通道的所述膜设备的相应侧上提供若干个供给流动槽 (feed flow slot) 和若干个渗透 (或扫掠) 流动槽 (permeate (or sweep) flow slot)，在运行期间流动通道运输供给流动流 (feed flow stream) 中的选定的流体或分子横穿膜盒中的所述多孔膜的表面。供给槽可以交叉流动型态或逆流流动型态运输选定的流体或分子通过该膜设备。在运行期间多孔金属膜为引入到该膜设备的供给流动流中的成分和从该膜设备去除的渗透流动流中的成分提供选定的质量交换。多孔金属膜可包括多种金属和金属合金或由多种金属和金属合金构造。金属和金属合金包括但不限于，例如，镍 (Ni) 金属、镍铁 (Ni-Fe) 合金、镍铜 (Ni-Cu)

合金、不锈钢合金、钛(Ti)金属、钛合金,包括这些多种金属和金属合金的组合。

[0007] 该膜模块分离或过滤引入到膜设备内的供给流动流中的选定尺寸的粒子或分子。该支撑框架可包括安置在该支撑框架的相应面上的凹陷(depression),所述凹陷形成该膜设备中的每个膜盒中的供给流动槽和渗透(或扫掠)流动槽。该膜设备的选定侧上的供给槽被定向在与该膜设备的另一侧上的渗透(或扫掠气体)槽成90度的方向上。

[0008] 多个多孔金属膜可在膜盒的支撑框架上间隔开一个选定距离。这些膜过滤或分离通过该膜设备中的金属膜盒的供给槽引入的供给流中的粒子。

[0009] 在一些应用中,多孔金属膜可以是对称膜。在一些应用中,多孔金属膜可以是非对称膜。多孔金属膜可包括尺寸在约0.01 μm 到约10 μm 之间的孔隙。

[0010] 多孔金属膜可具有选定厚度。膜的厚度可被选择以减小或最小化所选定的分子或材料横穿该膜设备的膜的运输阻力。多孔金属片膜可具有在约20 μm 到约200 μm 之间选择的厚度。

[0011] 该膜设备中的膜允许两个过程流动流保持与另一方分离同时允许选定的分子或选定的材料横穿所述膜。

[0012] 所述膜盒中的多孔金属片膜可包括由放置在所述膜的后侧或背侧以支撑膜盒中的膜的一层或多层多孔或流体可渗透材料或结构构造的基底(backing)材料。基底材料可包括但不限于,例如,聚合物、金属以及这些材料的组合。在一些应用中,基底材料可包括多孔聚酯片。在一些应用中,基底材料可包括与金属网共轭的多孔聚酯片。基底材料使得对扫掠流动流的流动阻力最小化以流经在两个膜片的背表面之间的膜盒。在质量转移期间的流动方向可平行于膜表面。

[0013] 基底材料可包括在约0.05mm到约5.0mm之间选择的厚度。基底材料可包括由开口面积与总面积的比率限定的孔隙度,该比率在约0.2到约0.95之间。基底材料可包括具有在约0.01mm到约5.0mm之间选择的尺寸的孔隙开口,该孔隙开口允许在由本文中列出的渗透量值表征的最小压力降的情况下渗透流出该膜设备的膜盒。

[0014] 用于液相过滤或分离的基底材料可包括大于约50升/ m^2 /小时/巴的渗透量。用于液相扫掠流动流经过所述基底材料的压力降优选地小于约1巴。用于气相过滤或分离的基底材料可包括大于约1.0E-5mol/ m^2 /s/Pa的渗透量。用于气相扫掠流动流经过所述基底材料的压力降优选地小于约0.1巴。

[0015] 基底材料可包括优选地在约0.3mm到约5.0mm之间的、用于扫掠流动流以流动经过基底材料经过膜盒的液压直径。

[0016] 基底材料还可使得多孔金属片膜能够经受位于所述膜设备的膜的供给侧和所述膜设备的膜的渗透侧之间的约1巴或更大的压力梯度。

[0017] 在一些应用中,膜盒可包括布置位于在所述多孔金属膜的后侧上的多个基底材料之间的一个间隔件材料。间隔件可由波纹金属或其它合适的波纹材料构造。间隔材料用来维持膜模块的膜盒中的多个多孔金属膜之间的选定的间隔距离。在多种应用中,膜表面之间的间隔距离在约0.5mm到约10.0mm之间。间隔件材料还可提供在膜盒内部的具有开口的直的供给流动通道,所述开口具有在约0.3mm到约3.0mm之间选择的直径尺度。

[0018] 间隔件可用来使得总体流动流和膜表面之间的质量转移阻力间隔,以至允许流动流在最小压力降的情况下流动。

[0019] 在一些应用中,间隔件材料可被安置在膜设备中的膜盒堆的个体盒之间。

[0020] 供给槽可包括具有在约0.3mm到约5.0mm之间选择的直径尺度的开口。渗透槽可包括具有在约0.3mm到约3.0mm之间选择的直径尺度的开口。

[0021] 该膜设备可包括附接到一个或多个膜盒的相应侧上的膜模块的供给槽和渗透槽的歧管。歧管可将至少一个供给流动流均匀地递送到膜设备的第一侧上的流动槽内,并且通过该膜设备的一侧或多侧上的渗透流动槽收集一个或多个流动流,所述渗透流动槽不同于该膜设备的第一侧上的渗透流动槽。该膜设备的供给槽可运输供给流中的选定的流体或分子横穿该膜设备内的一个或多个膜盒的多个多孔金属膜。

[0022] 在一些应用中,膜盒中的多个多孔金属膜中的至少一个可包括在多孔膜上、由选定的沸石构造的具有选定厚度的沸石层(膜)。该沸石膜可被配置以在如下压力梯度下从引入到该膜设备中的供给流中移除选定的原子或分子,所述压力梯度形成其中不存在所述选定的原子或分子的渗透流。该沸石膜可以是具有选定尺寸的孔隙的水选择性膜,该孔隙提供大于或等于约 $1E-06\text{Mol/m}^2/\text{Pa/s}$ 的水渗透量,用于从引入到该膜设备内的供给流中选择性地去除水。

[0023] 在一些应用中,水选择性沸石膜可被用来将水分子从除了包含水之外还包含其它分子的流体流(诸如,水/酒精混合物)中去除。与其他分子相比对水的选择率优选地在约10以上。在一些应用中,去除选定的分子可以是在恒定的压力和温度下进行的连续的过程。

[0024] 在一些应用中,引入到该膜设备内的供给流可以是在 10°C 以上的温度且至少约10%的相对湿度下引入的潮湿空气。如通过该膜设备的膜之间的水蒸汽的局部压力评定的,当潮湿的供给空气流动经过膜模块时,可在一次通过中去除供给空气流中超过20%的水分。

[0025] 在一些应用中,水选择性沸石膜可被用来从气体流(诸如,空气)中去除水分。与其他分子相比对水的选择率优选地在约100以上。该膜模块可被用于建筑物空气除湿或调节,并且还可用于多种空气干燥处理中,所述空气干燥处理包括例如工业级和建筑物级的除湿或调节过程。无意进行限制。

[0026] 在一些应用中,该膜设备可被用来将引入供给流中的一种分子从该膜设备的一侧运输到从该膜设备的另一侧释放的扫掠流中。实施例包括在该膜设备中潮湿空气和干燥空气之间的水分交换。在一些应用中,该过程可包括将潮湿空气的供给流引入到膜设备内并且从该膜设备的渗透侧释放含有干燥空气的扫掠流。

[0027] 在多种应用中,该膜设备可被用来通过以交叉流样式或逆流样式将过程流动递送通过该设备的膜来提供过滤或分离。

[0028] 在一些应用中,可与位于膜设备的供给侧和渗透侧之间的压力梯度合作使用该膜设备以用于多个应用,所述应用包括但不限于,例如,分子分离或粒子过滤。

[0029] 在一些应用中,该膜设备可被用来过滤过程流动流中的粒子,诸如,过滤含有藻类的流动流中的藻类以收获藻类。在一些应用中,该膜设备可被用来在位于该膜设备的供给侧和渗透侧之间压力梯度下过滤培养液中的藻类。在一些应用中,该供给流可包含藻类并且被引入到该膜设备内。从该膜设备释放的供给流可包含更大浓度的藻类。从该膜设备释放的渗透流动流可包括从该供给流收集的水。

[0030] 在一些应用中,该膜设备可通过逆转该膜设备的供给侧和渗透侧之间的压力梯度

来允许反冲 (back flushing)。在此运行模式中,可通过首先保持膜设备的供给侧上的压力高于渗透侧上的压力达一段时间来进行选定尺寸的粒子或分子的过滤和/或分离。然后,渗透侧上的压力可被升高到供给侧上的压力以上达一个选定的时间,以允许渗透流中的流体通过该膜设备中的膜流回到供给侧内,从而洗掉膜表面上的任何固体沉积物。

[0031] 在一些应用中,该过程可包括将歧管连接到该膜设备的相应侧上的供给槽和渗透槽,以积累或收集进入和离开该膜设备的相应流动流。

[0032] 本发明还包括一种方法,该方法包括递送包括待被过滤或分离的成分的供给流通过膜设备。该膜设备包括堆形式的一个或多个膜盒。所述膜盒可包括位于支撑框架的相应侧上的具有选定厚度、孔隙度和表面面积的多个多孔金属膜。膜盒提供被安置在该膜设备的至少一侧上的供给流动槽,所述供给流动槽运输该供给流横穿所述膜。安置在该膜设备的至少一个另一侧上的渗透流动槽可递送来自该膜设备的没有被过滤成分或被分离成分的至少一个渗透流。

[0033] 在一些应用中,可在相对于渗透流动流的逆流流动方向或交叉流流动方向上递送供给流经过该膜设备。大于或等于1巴的压力梯度可位于该膜设备的供给侧和该膜设备的渗透侧之间,以过滤和/或分离供给流中的成分。在一些应用中,可在小于1巴的压力降的情况下递送供给流经过该膜设备中的膜盒的一个或多个多孔金属膜。该供给流可运输供给流中选定的分子或成分通过一个或多个膜盒的多孔金属膜并且将供给流递送到从该膜设备的渗透侧递送的渗透流内。

[0034] 在一些应用中,供给流可以是可被引入到该膜设备内且具有高达80%的相对湿度的潮湿空气。渗透流可从该膜设备释放,该渗透流包括相对湿度在约50%以下的干燥空气。

[0035] 本发明还包括用于制造膜设备的方法。该方法可包括将一个或多个膜盒组装在一起成为一个膜盒堆 (a stack of membrane cassettes)。每个膜盒可包括一个支撑框架,所述框架具有布置在所述支撑框架的相应侧上的多个多孔金属膜。膜盒堆可在具有流动通道的膜设备的相应侧上提供供给流动槽和渗透(或扫掠)流动槽,所述流动通道允许运输选定的流体或分子横穿膜盒中的多孔膜的表面以分离或过滤引入到膜设备内的流体(例如,供给流动流)中的选定尺寸的粒子或分子。

[0036] 本文描述了本发明的多个优点和新颖特征并且从本文阐述的描述和说明本领域的技术人员将容易明了本发明的多个优点和新颖特征。应认识到,在不脱离本发明的精神和范围的前提下,能够在多个方面对本发明进行修改。因此,本发明的下面的附图和描述应被看作对本发明的示例并且不应被看作以任何方式进行限制。

附图说明

[0037] 图1呈现了用于制造本发明的膜设备的一种示例性方法。

[0038] 图2A示出了用于组装本发明的膜盒的支撑框架的顶部半部分和底部半部分。

[0039] 图2B是示出了本发明的膜盒的部件的分解视图。

[0040] 图3示出了用于测试单个组装好的膜盒的泄漏测试组件。

[0041] 图4A-图4B示出了本发明的膜设备的两个不同实施方案的组件。

[0042] 图5示出了本发明的膜设备的组装好的膜模块中的流动槽。

[0043] 图6示出了多个歧管,所述歧管附接到形成本发明的一个工作膜设备的组装好的

膜模块。

[0044] 图7A-图7B示出了本发明的膜设备的示范性运行模式。

[0045] 图8标绘了在过滤应用中膜设备的运行参数的变化作为时间的函数。

[0046] 图9标绘了测量到的经过膜设备的压力降作为供给空气线速度的函数。

[0047] 图10A-图10B示出了用于对处于选定的流动速度和温度下的供给空气进行除湿的膜设备的性能。

[0048] 图10C-图10D示出了供给空气的速度对用于对供给空气进行除湿的膜设备的性能的影响。

[0049] 图11标绘了针对膜设备的水渗透量和分离数据作为评定稳定性的流上时间的函数。

具体实施方式

[0050] 详述了膜设备、制造方法以及用途。膜设备可被配置用于逆流流动和交叉流流动以用于应用,应用包括但不限于,例如,质量转移、热量转移、质量交换、过滤、分离和除湿。

[0051] 下面的描述包括本发明的一个实施方案的优选的最佳模式。从描述中将清楚的是,本发明不限于这些例示的实施方案。虽然本发明容许多种改型和替代构造,但应理解,无意将本发明限定到所公开的特定形式,相反,本发明将覆盖落在如权利要求中限定的本发明的精神和范围内的所有改型、替代构造和等同物。因此,本描述应被看作是例示性的而非限制性的。

[0052] 图1呈现了用于本发明的膜设备的组装的一种示范性方法。{开始}。可通过将两个多孔金属(例如,镍(Ni))膜附接到一个支撑框架上组装一个单个膜盒。首先{102},一片基底材料(诸如,多孔聚酯)可被附接到安置在该膜盒的相应侧上的每个金属膜的后侧。波纹金属网可选地可被安置在两片基底材料之间以在膜盒内形成流动通道。膜和其它可选材料可通过胶粘剂附接到支撑框架并且在承重载荷下固化以形成膜盒。下一步{104},可对膜盒进行泄漏测试。如果组装好的膜盒未能通过泄漏测试,则可构造一个新的膜盒。如果组装好的膜盒通过泄漏测试,则可构造和测试其他膜盒。下一步{106},可以多个膜盒组成一个膜盒堆的方式将一个或多个膜盒组装且结合在一起以形成一个膜模块。本文中所描述的间隔件(spacer)可被安置在膜盒之间以分隔膜模块中的盒。膜模块可包括安置在膜模块的相应侧上的进入和离开膜设备的多个供给槽以及进入和离开膜设备的多个渗透(或扫掠气体)槽。下一步{108},歧管可被附接到组装好的膜模块的四个面中的每一个以形成工作膜设备。歧管向膜设备的入口侧上的供给槽(或扫掠气体槽)均匀地并且一致地分配流体,并且均匀地并且一致地积累来自膜设备的出口侧上的供给槽和渗透槽的流体。{结束}。膜盒的制造可被标准化并且易于商业生产的自动化。

[0053] 图2A示出了用来构造膜盒(图2B)的支撑(或安装)框架200的立体图,该膜盒是本发明的膜设备(图6)的基本单元。支撑框架200可由在结构上刚性的材料构造,所述在结构上刚性的材料包括抗腐蚀金属、金属合金(例如,不锈钢、铝合金或其它合金)、陶瓷(例如,氧化铝、碳化硅或其它陶瓷)以及聚合物(例如,聚碳酸酯、聚酯、聚四氟乙烯或其它聚合物)。在本实施方案中,支撑框架200可包括两个对称的半框架:顶部(第一)半框架202和底部(第二)半框架204。半框架202和半框架204可包括分别安置在半框架202和半框架204的

各自的前面的前凹陷206和后面的后凹陷208。半框架202和半框架204在被组装好时形成具有选定尺度的前渗透(或扫掠)槽210和后渗透(或扫掠)槽212,该前渗透(或扫掠)槽210和后渗透(或扫掠)槽212将渗透(或扫掠)流动流引入膜盒的内部和将渗透(或扫掠)流动流引出膜盒的内部。半框架202和半框架204还包括形成左侧供给流动槽218的左侧凹陷214和形成右侧供给流动槽220的右侧凹陷216,在运行期间左侧供给流动槽218从膜盒引入供给流动流,右侧供给流动槽220从膜盒恢复供给流动流。槽可包括不同的不受限的形状,包括但不限于例如,正方形、矩形或者椭圆形。

[0054] 在一些实施方案中,在膜盒300的任何一侧上的槽可以是具有较大的宽度尺度和高度尺度的单个开口的形式。在一些实施方案中,在膜盒300的任何一侧上的槽可包括多个开口,每个开口具有较小的宽度尺度和高度尺度。无意进行限制。槽可包括在约0.5mm和约5.0mm之间的典型高度,但尺度不意在被限制。

[0055] 支撑框架200可包括安装孔222,安装孔222允许将框架安装到在组装期间将膜盒对齐的安装柱上,参照图4A进一步描述。

[0056] 图2B是示出内部部件的单个膜盒300的分解视图。膜盒300包括附接到膜盒300的顶部半框架202的顶部多孔金属(例如,镍(Ni))膜302和附接到膜盒300的底部半框架204的底部多孔金属(例如,镍(Ni))膜304。多孔金属膜302和多孔金属膜304可按例如由Liu等人在美国专利公开第US20110155662号中详述的而进行制造。可用胶粘剂(例如,室温硫化(RTV)有机硅胶粘剂)将多孔金属片膜302结合到半框架202,将多孔金属片膜304结合到半框架204。每个膜盒中的两个膜表面之间的距离(被称为间隔高度)优选地小于2.0mm。

[0057] 半框架202和半框架204每个均可包括在半框架202和半框架204的单侧上经机器加工的具有选定深度的至少一个前凹陷206和至少一个后凹陷208。半框架202和半框架204还可包括在半框架202和半框架204的左边缘上经机器加工的具有选定深度的至少一个凹陷214以及在半框架202和半框架204的右边缘上经机器加工的具有选定深度的至少一个凹陷216。凹陷206和凹陷208被定向成与凹陷214和凹陷216成90度。当半框架202和半框架204被联接在一起时,凹陷206和凹陷208形成本文中进一步描述的渗透(或扫掠)流动槽。凹陷214和凹陷216形成本文中进一步描述的供给流动槽。

[0058] 金属膜302和金属膜304的厚度被选择以减小横穿膜302和膜304的质量运输阻力。横穿所述膜的运输率与膜厚度具有反比一阶相关性。厚度还可被选择以在制造期间使得材料使用和重量最小化。在多种实施方案中,多孔金属片膜302和多孔金属片膜304可具有在约20 μm 和约200 μm 之间选择的厚度。典型的厚度是约50 μm 。

[0059] 多孔金属膜是机械坚固的并且当被封装到工作膜设备中时提供足够的强度、刚度和/或延展性,以维持在压力梯度下时的完整性并且解决在运行期间对引入到工作膜设备的流动流的质量运输/交换的需要。

[0060] 在一些实施方案中,多孔金属膜可以是具有如下孔隙的对称膜,所述孔隙在膜的整个厚度上具有一致的尺度。

[0061] 在一些实施方案中,多孔金属膜可以是具有如下孔隙的非对称膜,所述孔隙在膜的整个厚度上具有不同的尺度或以其它方式变化的尺度。在一些实施方案中,非对称膜可包括在从约0.010 μm 到10 μm 的范围内选择的孔隙。在一些实施方案中,非对称膜可包括在多孔金属膜的顶部上形成或沉积的分子分离层301。该分子分离层可包括具有的尺寸小于约

1nm的孔隙。在一个示例性实施方案中,该分子分离层可由具有的厚度小于约5 μ m的沸石组成,该沸石被形成在50 μ m厚的非对称多孔Ni片膜上,例如,如由Liu等人在美国专利公开第US20100304953号中详述的。

[0062] 膜盒300中的金属膜302和金属膜304可分别被支撑在基底材料306和基底材料308上。基底材料可由如下材料构造,所述材料包括但不限于,例如聚合物、金属、陶瓷和这些多种材料的组合。基底材料可以是片、泡沫、网状网筛(screen)的形式或其它合适的形式。在一些实施方案中,基底材料可包括一个多层结构,每个层包括在运行期间允许机械属性被定制的一个或多个选定的材料,所述机械属性包括例如,机械强度、渗透性和稳定性。可通过施加选定的载荷以观察变形作为时间和载荷的函数来测试机械强度。多层结构还允许多种流动通道配置。

[0063] 在该图中,例示了一个三层结构。顶部金属膜302可包括基底材料306,底部金属膜304可包括基底材料308,该基底材料306和基底材料308以片的形式放置在位于膜盒300内部的支撑框架200的顶部和底部处的多个多孔金属(Ni)片膜中的每一个的后(背)表面上。基底材料的尺寸可被设置以配合到膜盒300的支撑框架200中。

[0064] 在本实施方案中,基底材料可由多孔聚酯构造,该多孔聚酯具有以90度定向、与一组线(strand)重叠的一组肋(例如,Hornwood风格1414聚酯片)。肋(rib)可被缝合到线以提供约0.5mm的总体厚度。肋可以是约0.565mm宽并且以约0.452mm的间隔隔开。线可具有约0.135mm的直径。

[0065] 基底材料306和基底材料308可包括在从约20%到约70%的范围内选择的孔隙度(空隙分数)。多孔基底材料中的孔隙开口可包括在约0.01mm和约1.0mm之间的尺寸,该尺寸允许在最小压力降的情况下渗透流出膜盒300。在一些实施方案中,多孔聚酯基底材料的总体孔隙度或正面开口面积分数可以是约0.23,具有约0.33mm的孔隙尺寸(即,液压直径)。

[0066] 在多个实施方案中,基底材料提供在约0.3mm和约5.0mm之间的液压直径,该液压直径允许扫掠流动流通过金属膜。

[0067] 基底材料可包括选定的厚度。厚度可在约0.020mm(20 μ m)和约5.0mm(500 μ m)之间。示例性厚度是约0.5mm(50 μ m)。在一些实施方案中,厚度可匹配膜盒300的厚度。

[0068] 膜盒300还可包括安置在膜盒的内部中在基底材料306和基底材料308之间的通道化间隔材料(或内部间隔件)310。通道化间隔材料310可包括铝、金属合金(例如,镍合金、钢)、耐用聚合物材料或其它类似材料,或由铝、金属合金(例如,镍合金、钢)、耐用聚合物材料或其它类似材料构造。间隔材料用来维持膜模块的膜盒中多个多孔金属膜之间的选定的间隔距离。在多个实施方案中,多个多孔金属膜之间的间隔距离在约0.5mm和约10.0mm之间。当膜盒内部的压力与膜盒外部的压力相当时和/或当从膜盒移动渗透所需要的距离因膜盒的尺寸较小而相对短时,较小的间隔距离是优选的。当膜盒内部的压力低或在真空下时和/或当从膜盒移动渗透所需要的距离因膜盒的尺寸较大而相对长时,较大的间隔距离是优选的。

[0069] 在多个实施方案中,通道化间隔材料310可以是波纹(波浪)铝板或波纹金属网的形式。波纹(波浪)铝板可以通过将平板按压成具有波浪状图案而制成的。间隔材料310可包括具有选定尺度的直的、开放流动通道312。铝板可包括倒圆边缘以防止刺穿顶部膜片302和底部膜片304。波纹铝板可包括厚度为0.108mm、峰谷距离为0.62mm的金属片。弯曲的

拐角可具有约0.2mm的半径。峰-峰高度可以是约1.04mm,这导致0.78的正面开口面积分数和1.0mm的液压直径。

[0070] 通道化基底材料310是机械坚固的。当被使用时,因为致密金属可以阻止质量运输横穿金属板,所以自总体流动流(bulk flow stream)的质量运输仅可在膜盒300的顶部金属膜302上发生。因此,在本实施方案中,自顶部膜的质量转移仅可发生在面向顶部膜302的通道312中。此外,自底部膜304的质量转移仅可发生在面向底部膜304的通道(未示出)中。此配置增加了从总体流动流到膜表面上的运输距离。

[0071] 在另一个实施方案中,通道化基底材料310可以是波纹(波浪)和共轭金属网形式的,诸如,扩张的镍(Ni)网(例如,型号为5Ni7-077C的金属网,Dexmet公司,Wallingford, CT,美国)。波纹金属网310的流动通道312允许从总体流动流到膜盒300中的膜302和膜304的质量转移。波纹金属网310可包括具有约0.4mm的宽度尺度和约1.23mm的高度尺度的菱形开口。金属线厚度可以是约0.23mm。波纹金属网可具有约0.99mm的峰峰高度、约1.36mm的峰谷距离以及约0.31mm的弯曲半径。通道化基底材料310可具有约78%的总体空隙分数和约1.0mm的液压直径。然而,无意进行限制。

[0072] 在一些实施方案中,基底材料306和基底材料308可包括单层结构,例如,以机械加工的板的形式,在该板的前表面和后表面上包括流动通道。在其它实施方案中,基底材料可包括3维结构,例如,以包括3维流动结构或网筛状支撑网格或类似结构的多孔板的形式。

[0073] 基底材料306和基底材料308当被附接到多孔金属膜302和多孔金属膜304时使得当位于膜的供给侧和膜的渗透侧之间的压力梯度为约1巴或更大时所述金属膜能够维持机械完整性。通过使得在与膜表面平行的方向上的流动阻力最小化,基底材料还提供快速运输扫掠流动流通过膜盒中的金属膜。流动阻力可由从等式(1)确定的渗透量值(P)表征:

$$P = \frac{F}{SA_M \cdot \Delta p} \quad (1)$$

[0075] 在此,(F)是渗透流动速度;(SA)_M是膜面积;以及Δp是压力差(即,压力降)。对于液相过滤或分离的应用,基底材料可包括优选地大于约50升/小时/m²/巴的渗透量值(P)。对于气相过滤或分离的应用,基底材料可包括优选地大于约1.0E-05mol/m²/s/Pa的渗透量值(P)。

[0076] 用于气相扫掠流动流的压力降优选地小于约0.1巴。对于低压操作,用于气相扫掠流动流的压力降优选地小于约0.01巴。用于液相扫掠流动流的压力降优选地小于约1巴。

[0077] 多孔基底片306和多孔基底片308可具有比膜盒300中间的通道化基底材料310更小的孔隙尺寸和更低的孔隙度,以提供支撑顶部膜片302和底部膜片304的平滑表面。

[0078] 膜盒300的部件可通过胶粘剂(诸如,室温硫化(RTV)有机硅胶粘剂)结合到支撑框架200。例如,多孔基底材料306和多孔基底材料308可被固定到通道化基底材料310。通道化基底材料310然后可被固定到支撑框架200以加固膜盒300。可在承重载荷下固化组装好的部件,以确保在通道化基底材料310、多孔基底材料306和多孔基底材料308、金属膜302和金属膜304以及组装好的部件之间实现到支撑框架200的坚固粘附,这形成集成的膜盒300。

[0079] 制造和组装是柔性的,允许选择配置用于多种具体应用的膜盒的多种膜材料、基底材料和间隔材料。例如,在一些实施方案中,多孔金属膜片可以由如下浆料制造的,该

浆料包括在约10wt%到约50wt%之间的溶剂以及在约20wt%到约80wt%之间的金属前体粉末。金属前体粉末的平均粒子尺寸优选地在约100nm到约5 μ m之间。金属前体可包括但不限于,例如,金属氧化物(包括Ni金属的氧化物);金属氢化物(诸如,Ti金属的氢化物);金属有机物;以及合金(包括,例如,Ni-Fe合金、Ni-Cu合金、Ti合金和不锈钢)。该浆料还可包括最多达约30wt%的孔隙形成剂(pore former),所述形成剂具有在约100nm到约10 μ m之间的平均粒子尺寸。孔隙形成剂包括但不限于:碳黑、石墨、焦炭、淀粉以及这些孔隙形成剂的组合。该浆料还可包括最多达15wt%的有机添加剂,所述有机添加剂包括但不限于例如,分散剂、粘结剂、增塑剂以及这些添加剂的组合。可通过共同球磨浆料的各种成分来制备浆料。可在浇铸生坯之前验证浆料的均匀性和稳定性,例如,通过当该浆料保持未扰动达至少30分钟时验证不存在沉淀物。浆料可以被浇铸成选定厚度的生坯。该生坯首先可被干燥以去除挥发性溶剂。然后,可以烧制该生坯以将金属前体转变成金属态。该烧制还去除溶剂和其它浆料成分(诸如,孔隙形成剂和有机添加剂),这形成了经烧制的坯体。经烧制的坯体可被烧结和退火以制备具有金属支柱和网络化孔隙的多孔金属片膜。烧制包括在还原环境中以在0.2 $^{\circ}$ C/分钟和10 $^{\circ}$ C/分钟之间的升温速率将生坯加热到在400 $^{\circ}$ C和1200 $^{\circ}$ C之间的烧制温度。该烧制温度被维持达在30分钟和24小时之间的一段时间。在烧制期间,金属前体被直接还原到金属态。替代地,烧制生坯可包括首先在氧化环境中将生坯加热到第一温度,然后在还原环境中以第二温度加热。该第一温度通常在约800 $^{\circ}$ C和约1400 $^{\circ}$ C之间。该第二温度通常在约400 $^{\circ}$ C和约1200 $^{\circ}$ C之间。到该第一温度的升温速率小于或等于10 $^{\circ}$ C/分钟。在不大于经烧制的坯体的熔点且大体上等于软化点的温度下,在惰性环境或还原环境中进行烧结、退火和/或扁平化。通常,温度在600 $^{\circ}$ C和1200 $^{\circ}$ C之间。使金属膜扁平化可包括抵靠一个固体光滑表面向多孔金属坯体上施加载荷(或压力)。生坯片可由单个浆料成分形成,以产出等同的片。或者,生坯片可由不同的浆料成分形成,以产出具有不同成分、厚度和/或结构的片。

[0080] 在一些实施方案中,膜盒可包括可被附接到膜盒的一个或多个多孔金属膜的沸石膜。在一些实施方案中,沸石膜可形成水选择性分子筛,当在压力梯度下向膜盒内引入供给流时所述水选择性分子筛可从供给流(诸如,潮湿空气或水/酒精混合物)中去除水分子。组合膜产出去除了水的渗透流。

[0081] 沸石膜可包括一个在薄的多孔金属支撑片上形成厚度小于3 μ m的沸石膜层。可通过向所述多孔金属支撑片的裸露的金属表面施加一个均匀的种子层(seed layer)来形成该沸石膜层。该种子层可包括平均直径小于或等于1 μ m的沸石晶体。该多孔金属支撑片可具有小于3 μ m的平均孔隙尺寸,在25%和75%之间的孔隙度,以及小于或等于约200 μ m的厚度。具有种子层的支撑片可被浸入在沸石生长溶液中,以热液方式形成完成了沸石膜层的晶间(inter-crystal)生长层。该晶间生长层包括该种子层,包括与沸石晶体相同的沸石,并且完成了均匀形成厚度小于或等于约3 μ m的沸石膜层。该沸石膜层优选地是薄的,以在膜处理期间实现良好的粘性。该沸石层可包括水选择性沸石、碳氢化合物选择性沸石、或酒精选择性沸石。示例性水选择性沸石包括但不限于3A型沸石构架、4A型沸石构架和5A型沸石构架。示例性碳氢化合物选择性沸石和酒精选择性沸石包括但不限于,纯硅质岩、钛硅酸盐以及ZSM-5型沸石构架和Y型沸石构架。可通过沉积沸石晶体的多个施加物以形成分等级的孔隙尺寸的结构来形成该种子层。例如,最接近多孔金属支撑片的初始沸石晶体可相对较大并且具有在约0.5 μ m到约3 μ m之间的平均直径。为了获得沸石膜和多孔金属膜之间的机械互

锁,种子晶体渗透到金属膜衬底(substrate)的孔隙中是优选的。较接近沸石膜层的暴露表面的随后的沸石晶体可以是较小的且具有在约50nm到约500nm之间的平均直径。无意进行限制。

[0082] 图3示出了对个体组装好的膜盒300进行泄漏测试的泄漏测试组件350。在该图中,歧管314(例如,左供给歧管)和歧管316(例如,右供给歧管)可被联接到膜盒300的相应侧。可通过歧管314、通过安置在膜盒300的一侧上的供给槽(未示出)引入气体。可通过第二歧管316从安置在膜盒300的相对侧上的供给通道(未示出)收集气体。如果在组装期间膜盒被适当地密封和固化,则引入到膜盒内的气体的体积可与从膜盒收集(即,离开)的气体的体积相当。

[0083] 图4A例示了本发明的膜模块400的组件。在该图中,该膜模块可包括以膜盒堆的方式组装好的一个或多个膜盒300。在一些实施方案中,该膜模块可包括4个到10个之间的膜盒。在一些实施方案中,该膜盒可包括10个或更多个膜盒。然而,膜盒的数目不受限制。在本实施方案中,在下文中所描述的间隔件(未示出)未被放置在各个膜盒之间。

[0084] 在本实施方案中,膜模块400可包括允许在组装期间将膜盒300对齐的安装柱(例如,螺栓)420。如果用外部对齐设备来对齐膜盒,则可省去安装柱。无意进行限制。

[0085] 膜模块400还可包括参照图5进一步描述的底部(基部)盖板404以及顶部盖板(未示出)。盖板可由致密材料构造,所述致密材料包括金属、金属合金或塑料。盖板可被放置在膜盒堆的基部或顶部,以支撑并且对齐膜盒。流动通道(未示出)可分别被机械加工到基部盖板的内部面上和顶部盖板的内部面上在底部膜盒和顶部膜盒之间,使得在该膜模块中不存在死体积(dead volume)。膜盒300堆在膜模块的相应侧上形成流动槽,所述槽包括例如前渗透供给槽和后渗透供给槽以及左侧供给槽和右侧供给槽。在该图中,示出前渗透槽210和右侧供给槽220。

[0086] 胶粘剂(例如,732RTV,Dow Corning公司,Midland,MI,美国)可被施加到在膜盒300的支撑框架(图2A)的前面和后面上的接触边缘(未示出),以将在盒堆中的膜盒结合在一起。在本实施方案中,膜盒300的左侧和右侧不包括接触边缘,以提供允许从该膜盒的左侧或右侧引入供给流动流的开口,反之亦然。可用RTV胶粘剂或通过焊接将底部盖板404和顶部盖板结合到膜盒堆。无意进行限制。组装好的膜盒堆可被放置在一个重量载荷下以保持所有膜盒、底部盖板和顶部盖板接触达足以固化RTV胶粘剂且将膜盒和盖板结合在一起的时间。得到了集成的膜模块。固化时间可从几小时到几天变化。固化温度可从室温到约300°C变化。

[0087] 图4B示出用于诸如过滤/分离应用的膜模块400的一个替代配置的组件。该膜模块中附加的支撑结构防止当施加压力梯度时膜片的弓弯(图2B)。膜模块400可包括形成组装好的膜盒堆的一个或多个膜盒300。膜盒的数目不受限制。在该图中,安装柱(例如,螺栓)420可被用来在组装期间对齐膜盒300。

[0088] 膜盒300堆在膜模块的相应侧上形成流动槽,所述流动槽包括例如前渗透供给槽和后渗透供给槽以及左侧供给槽和右侧供给槽。在该图中,示出前渗透槽210和右侧供给槽220。

[0089] 如先前参照图4A所描述的,膜模块400可包括底部或基部盖板404,以及顶部盖板(未示出)。盖板可被放置在膜盒堆的基部处和顶部处以支撑并且使得膜盒对齐。流动通道

(未示出)可被机械加工到基部盖板的内部面上以及顶部盖板的内部面上在底部膜盒和顶部膜盒之间,以消除该膜模块中的死体积。

[0090] 在本实施方案中,通道化间隔材料(间隔件)402可安置在盒堆中的相邻膜盒300之间。间隔件还可被放置在底部盖板404与安置在盒堆的底部处的膜盒300之间,并且被放置在顶部盖板(未示出)与安置在盒堆的顶部处的膜盒之间。通道化间隔材料402可由一个或多个结构化元件组成。在一些实施方案中,通道化间隔材料(间隔件)可包括单个结构化元件,例如,以波纹金属板或在该板的单侧上或在前表面和后表面二者上具有流动通道412的金属片、波纹网筛、波纹(波浪)共轭金属网、或其它合适的材料的形式。在一些实施方案中,通道化间隔材料可包括多个结构化元件。单独的结构化元件间隔件因它们简化的组装而是优选的。当施加反向压力梯度时,例如,当供给通道压力小于渗透通道压力时,通道化间隔材料防止膜模块中的膜片的弓弯或弯曲。通道化间隔材料还为供给流动流创建开放流动通道412,以在最小压力降的情况下穿过该膜盒的膜,同时允许从总体流动到膜表面上的快速质量转移。针对在大气压处或大气压附近的低压气体流的压力降优选地小于约0.01巴。针对在大气压以上的高压气体流动流或液体流动流的压力降优选地小于约0.1巴。通道化间隔材料可具有优选地在约0.3mm和约4.0mm之间的液压直径。

[0091] 图5例示了本发明的完全组装好的膜模块400,膜模块400是按照先前参照图4A或图4B所描述的组装的。膜模块400当被组装好时包括安置在该膜模块的相应侧上的流动槽,所述流动槽包括例如,前渗透槽和后渗透槽以及左侧供给槽和右侧供给槽。在该图中,示出了在该膜模块的一侧上的槽,该槽可代表渗透槽或供给槽。在该图中,如先前参照图4A或图4B所描述的,示出了底部(基部)盖板404和顶部盖板406。安装柱(例如,螺栓)420维持组装好的膜模块中的对齐。

[0092] 供给槽用来将供给流动流引入到膜模块中的流动通道内或从膜模块重新得到经处理的供给流动流。通过选择合适的间隔材料,供给通道可具有选定的形状、几何结构以及尺寸尺度(包括高度和宽度)。在多个实施方案中,供给通道可具有在从约0.3mm到约5mm的范围内选择的高度。在一些实施方案中,可使用具有较大宽度的单个供给通道。在一些实施方案中,可使用每个均具有较小宽度的若干供给通道。无意进行限制。供给通道可沿着面向供给流动流的膜片的宽度均匀地分布。

[0093] 渗透槽用来在分离或过滤之后从膜模块中的流动通道重新得到渗透流动流。膜模块内部的渗透(或扫掠)通道(未示出)被定向在相对于供给流动通道成90度的方向上。通过选择合适的基底材料,渗透通道可具有选定的形状、几何结构以及尺寸尺度(包括例如高度和宽度)。在多个实施方案中,渗透通道可具有在从约0.3mm到约5mm的范围内选择的高度。在一些实施方案中,可使用具有较大宽度的单个渗透通道。在一些实施方案中,可使用每个均具有较小宽度的若干供给通道。无意进行限制。渗透通道可沿着面向供给流动的膜盒的宽度均匀地分布。

[0094] 图6示出本发明的工作膜设备500。膜设备500包括由膜盒堆组成的组装好的膜模块400且其中底部盖板404和顶部盖板406就位,如先前参照图5所描述的。膜设备500包括附接到膜模块400的相应面(即,四个面)以形成工作膜设备500的歧管314、歧管316、歧管318和歧管320。本发明的歧管是被用来将流动流引入到位于膜设备500的各个侧上的流动槽或从位于膜设备500的相应侧上的流动槽收集流动流的腔室或容器。在该图中,渗透歧管318

和渗透歧管320被附接到组装好的膜模块400的相对侧上的渗透槽(未示出)。渗透歧管318可被配置以将单个扫掠流动流均匀地引入到膜模块400的一侧上的多个渗透(或扫掠)流动槽(未示出)内,或收集从该膜模块的一侧离开的渗透。渗透歧管320可被附接到膜模块的相对侧上的渗透流动槽以收集从渗透槽离开的扫掠流动流,或收集从膜模块的那侧上的渗透槽离开的渗透流动流。在该图中,示出了暴露在膜模块400的供给侧上的供给槽210。供给歧管314被配置以通过供给槽210将供给流动流均匀地引入到膜模块400内。示出了被附接到膜模块的用于收集处理后的供给流动流的供给歧管316。

[0095] 可使膜设备500运行在多种流动模式下,以为不同的应用提供运行灵活性。流动模式包括但不限于,例如,交叉流动、逆流流动、共流流动和混合流动。图7A示出用于分离应用和/或过滤应用的交叉流动运行模式。在此配置中,膜设备中的膜盒(未示出)之间的间隔件(图4B)是可选的,这是因为该膜设备的供给侧上的压力可大于膜设备的渗透侧上的压力。在此运行模式中,可通过第一供给歧管314将供给(入口)流引入到包含组装好的膜盒堆的膜模块400(参照图4A所描述的)内。该供给流在一个方向上均匀地通过该膜模块内部的膜表面(未示出),并且随后通过附接在膜模块400的相对侧上的第二(例如,后)歧管316排出,如所示出的。可通过被定向成与膜模块的相对侧上供给歧管成90度的第三歧管318和第四歧管320从膜模块收集渗透(出口)流。可从膜模块的两侧收集渗透以减小运输阻力。如果运输阻力不重要,则可从膜模块的单侧撤销渗透。

[0096] 在一些实施方案中,膜设备500可被配置用于分离应用和/或过滤应用。在此模式中,可通过保持膜设备的供给侧上压力比膜设备的渗透侧的压力更高来使得供给流中的流体渗透通过膜并且向离开膜设备的渗透流递送清澈的流体,同时可通过膜阻挡供给流中的粒子来过滤引入到膜设备500内的带有粒子的供给。在此应用中,可在膜盒堆(图4B)中的膜模块中使用间隔材料来使得能够反冲膜表面。

[0097] 在另一个应用(诸如,空气除湿)中,可以在选自大气压(例如,1巴)附近的压力下将潮湿空气作为供给流引入到膜设备内。通过在膜设备的渗透侧上抽真空在约1毫巴和约300毫巴之间,当供给流流过膜时可将水分子从潮湿空气中去除。在此实施方案中,未使用间隔材来以最小化供给流动阻力。

[0098] 图7B示出用于质量转移应用和/或质量交换应用的交叉流动)运行模式。在此运行模式中,膜设备的供给侧上的压力可与膜设备的渗透侧上的压力相当。因此,膜设备可包括安置在膜盒内部的膜盒(未示出)之间的间隔件(图4B)。供给(入口)流可通过第一供给歧管314被再次引入到包含有组装好的膜盒堆的膜模块400(先前参照图4B所描述的)内。如所示出的,该供给流在一个方向上均匀地通过膜模块内部的膜表面(未示出),并且随后通过安置在膜模块400的相对侧上的第二(例如,后)歧管316排出。在此运行模式中,可通过安置在膜模块400的另一侧上的第三歧管318引入扫掠(入口)流动流。该扫掠(入口)流动流在与供给流动流的方向垂直(即,成十字交叉状)的方向均匀地流过该膜模块内的膜片的背侧。该扫掠流动流行进到膜的相对侧。可通过第四歧管320收集该扫掠流动流。

[0099] 在被配置例如用于质量和热量转移操作的一些实施方案中,膜设备的供给侧上的压力和扫掠侧上的压力可以相似,但是所述两个流动流可具有不同的温度。例如,对于来自建筑物的废气在炎热潮湿气候中的能量回收,可从膜设备的供给侧引入周围的热潮湿环境空气,同时可从膜设备的扫掠侧排出建筑物中的干燥、冷却空气。可在接近大气压(例如,1

巴)下引入供给流动流和扫掠流动流,以使得潮湿空气中的水分子横穿膜扩散到受膜设备的供给侧和扫掠侧之间的水蒸汽的局部压力差驱动的干燥空气。热空气的温度可以是约25℃到约45℃并且相对湿度(RH)可以是约50%到约80%。扫掠空气的温度可以是约15℃到约25℃并且相对湿度(RH)可以是约50%到约80%。

[0100] 在被配置例如用于膜吸附的另一个实施方案中,可从膜设备的供给侧引入CO₂气体流同时可从膜设备的扫掠侧引入溶剂流。在此应用中,CO₂从供给气体扩散横穿膜并且吸收到溶剂流内,诸如,离子液体和基于胺的水溶液。该转移可受膜设备的供给侧和渗透侧之间的CO₂的化学势差所驱动。

[0101] [应用]

[0102] 具有薄片型多孔金属膜和直的开放流动通道的本发明的膜设备为如下应用提供了高的膜表面面积/单位体积,这些应用包括例如,质量转移、质量交换、热量交换、粒子过滤以及分子分离。本发明的膜模块的膜表面面积/单位体积的值(即,排除了入口体积和出口体积的总填充体积)在从约300m²/m³到约3500m²/m³的范围内。开放流动通道使得过程流能够以低压力降穿过膜模块。具有受控的通道几何结构(例如,间隔、高度和形状)的开放流动通道进一步最小化总体流动流到膜上的运输阻力。

[0103] 在一些实施方案中,沸石膜可被附接到膜设备的膜盒中的金属膜用于分子分离应用。可通过在多孔金属片膜上生长沸石晶体以形成选定厚度的沸石层来形成沸石膜。在一些实施方案中,该沸石层可包括厚度小于10μm的交互生长的(inter-grown)沸石晶体。可采用其他厚度。因此,无意限制厚度。

[0104] 具有高结晶度和晶体密度以产出不存在空隙和/或缩孔(pinhole)的沸石膜层的沸石层是优选的。沸石晶体具有良好限定的网格状孔隙结构,所述网格状孔隙结构基于尺寸、形状和/或重量的微小差别分离个体分子。通过扩散穿过为分子分离提供高通量和高选择率的沸石晶体,沸石膜递送分子横穿沸石膜。

[0105] 在一些实施方案中,膜模块可包括管形式的沸石膜,所述管包括从约6mm到约30mm的直径。较大的管直径增大了从总体流动流到膜表面上的质量运输距离。对于填充有尺度为10mm I.D×12mm O.D.的膜管且膜管/模块体积分数为0.4的沸石膜模块,膜面积填充密度是133m²/m³,并且从管中心到沸石膜表面的质量运输距离是5mm。通过比较,本发明的扁平片膜模块配置有高度尺度为1mm的供给通道、0.05mm的膜片厚度和2.0mm的渗透通道高度,膜面积填充密度为约660m²/m³。从供给通道的中心到膜表面的质量运输距离是约0.5mm。大大增大了膜面积填充密度并且大大减小了质量运输距离。

[0106] 在一些实施方案中,该膜设备可被配备用于:对建筑物中和车辆中炎热潮湿环境中的空气进行除湿;去除气体流中的水分;去除气体流中的水分从而从空气和燃烧废气气体流中产生可饮用的水;以及干燥水溶性溶液(诸如,乙醇/水或酒精/水)。在这样的应用中,水选择性薄片沸石膜可被用在可被组装在膜设备中的膜盒的构造中。本发明减少了能量消耗,并且提供增强的生产率。例如,可以在大气压下或在约1巴和约10巴之间的低压下将含水的供给流引入到膜设备,同时膜设备的渗透侧被维持在减小的压力下或在约1毫巴到约300毫巴之间的真空下。当供给流流动通过膜设备时,水分子可被选择性地吸附到沸石膜表面上,被吸附的水分子然后可扩散横穿该膜,并且可在每个膜盒的渗透侧上收集渗透的水蒸汽,并且可通过渗透槽从膜设备排出所收集的渗透流。因此,除湿或脱水可继续,而

无需改变供给流温度和/或压力。与常规蒸馏相比,本发明的用于分离乙醇和水的膜脱水可将能量消耗减少大于50%,这是因为由于沿着蒸馏柱的整个高度的温度梯度使得蒸馏需要恒定的蒸发和冷凝。

[0107] 类似地,与常规空气除湿相比,本发明的用于吸附/吸收的膜除湿可将能量消耗减少大于50%,这是因为常规吸附/吸收需要饱和干燥材料的周期性再生,这需要大量的热能来加热干燥材料。在两个实施例中,该膜设备的尺寸比用于蒸馏或吸附的常规设备小至少一个数量级。

[0108] 在多种实施方案中,膜设备可配置有水选择性分子筛膜(即,安置在金属片膜的顶上),该水选择性分子筛膜通过高H₂O选择率和可渗透的膜连续去除水蒸汽。不需要再生;没有环境排放物。

[0109] 在一些实施方案中,本发明的膜设备可被配置用于运行作为分离设备或过滤设备,例如,通过将供给流动流连接到膜模块的供给侧以及将渗透流动流连接到膜模块的渗透侧。

[0110] 在一些实施方案中,多孔金属膜允许从多种过程流中过滤粒子,包括,例如,过滤藻类培养液中的微藻以收获微藻。在多个实施方案中,当膜设备被配置有由本文中所描述的薄的多孔金属片组成的过滤膜时膜设备可具有尺寸在约0.1 μ m和约2.0 μ m之间的孔隙。对于过滤应用,多孔金属片可被修改以包括具有范围从约1nm到约100nm的孔隙尺寸的选定涂层。

[0111] 在一些实施方案中,该膜设备可被配置用于过滤空气中的气溶胶粒子。

[0112] 在一些实施方案中,该膜设备可被配置以与位于膜设备的供给侧和渗透侧之间的压力梯度合作提供分子分离或过滤。

[0113] 对于对压力降不敏感的应用(诸如,加压气体的脱水或加压液体的过滤),可采用尺寸在约0.3mm到约1.0mm之间的供给流动通道和/或渗透流动通道,以最大化膜的面积和填充密度,从而增强膜的强度使得它们在大压力梯度下维持整个膜的完整性。在一些实施方案中,流动通道可具有约1.0mm或更小的液压直径。液压直径(d)由在下文中的等式(2)给出:

$$[0114] \quad d=4 \cdot SL \quad [2]$$

[0115] 在此,(S)是通过的流的横截面面积,(L)是通道的暴露至流动流的周长。对于宽度为(w)的正方形通道, $S=w^2$, $L=4w$,并且液压直径 $d=w$ 。

[0116] 对于对压力降敏感的应用(诸如,在大气压下对空气进行除湿),可选择流动通道的尺寸以最小化压力降。在一些实施方案中,膜设备中的供给通道和渗透通道优选地是直的流动通道,以最小化死体积和压力降。

[0117] 实施例

[0118] 下面的实施例提供了对本发明的多个方面的进一步理解。

[0119] [实施例1]

[0120] [过滤应用]

[0121] 使用图7A的膜模块。交叉流动膜模块被构造并且被配置用于过滤和收获藻类。在表1中列出了用于膜模块的设计参数。

[0122] 表1列出了用于过滤应用的典型的交叉流动膜模块的尺度和部件。

[0123]

膜片尺度	
-------------	--

[0124]

宽度	13.1 cm
长度	13.1 cm
暴露于潮湿空气的膜片	
宽度	12.00 cm
长度	12.00 cm
膜片的数目	18
膜盒的数目	9
供给侧 (膜涂层)	
通道高度	0.10 cm
供给槽的数目	10
渗透侧	
聚酯基底 (0.5 mm) 厚度	0.10 cm
开放通道高度	0.10 cm
渗透槽的数目	9
计算结果	
总膜面积	2592 cm²
用于供给流动的横截面面积	12.0 cm²
供给通道的液压直径	0.10 cm
供给通道的体积	144 cm³
用于渗透流动的横截面面积	10.8 cm²
渗透流动的液压直径	0.10 cm
渗透通道的体积	259 cm³

[0125] 如参照图4B所描述的,膜盒被堆叠在一起。波纹(波浪)镍(Ni)网片被放置在该堆中的个体膜盒之间,并且在邻近顶部盖板和底部盖板安置的膜盒之间。该膜模块包括9个膜盒,具有10个供给槽和9个渗透槽。该波浪Ni网被用作间隔材料并且用于在反冲期间支撑膜盒中的膜。在正常过滤操作期间,该膜设备的供给侧上的压力大于渗透侧上的压力。滤液从供给侧流动到渗透侧。通过将清洁流体从该设备的渗透侧推动到该设备的供给侧内(即,反冲)可清洁膜表面。在反冲期间,该设备的供给侧上的压力小于渗透侧上的压力。图8标绘了

在用于收获藻类的一个示例性过滤应用中在膜设备的运行期间运行参数的变化作为时间的函数。无意限制应用。未处理的藻类培养物被存储在存储罐中。藻类培养物被泵送经过膜设备作为来自所述存储罐的代表性供给。从膜设备输出的供给流被返回到所述存储罐。在真空下从膜设备的渗透侧取出清洁溶液。从膜设备收集的渗透流具有与供给流通过膜设备的流动垂直的流动方向。对于典型的交叉流动过滤操作,供给通道内部的供给液体的速度以约0.27m/s的低供给速度行进。通过向膜模块的供给(入口)通道内引入空气脉冲来对膜模块的供给通道充气,从而防止在过滤期间膜表面上积累结块的层。如此,进入到膜模块内的供给流动流的入口压力在一个宽范围内波动,如由图8中的顶部(第一)绘图所示出的。膜模块外面的供给压力几乎恒定在一个稍微在大气压以上的压力下,如由第二绘图所示出的。在过滤期间渗透侧上的压力被维持在约0.9巴处,如在第三绘图中所例示的。作为膜模块的入口处供给流动流的压力波动的结果,由于整个膜压上的力梯度的波动造成渗透流动流的压力相应地波动,如底部绘图中示出的。通过如该图中示出的每0.5小时将膜模块的渗透侧上的压力提升到大气压以上的压力,渗透存储罐被周期性地排出到环境。该膜设备具有的通量是针对设计用于废水处理的商业聚乙烯醇(PVA)模板所测量的通量的2到3倍。为了此测试,通过向供给流动流内引入空气脉冲来将供给入口压力波动故意引入到执行的膜设备内。正常的入口供给压力是稳定的而不需要充气。膜盒和膜片在运转一周以后的后检查显示在膜表面上有少量或没有藻类的沉积或累积。膜盒也是完整的。膜孔隙内部的可溶培养物聚合物的吸附可随时间逐渐使得通量减小。因此,为了重复的收获运转建议周期性的清洁膜模块膜。可通过反冲物理地清洁膜模块,回冲被示出为与使用化学清洁剂一样有效。

[0126] [实施例2]

[0127] [用于除湿的膜模块]

[0128] 使用图7A的膜模块。交叉流动膜模块被构造并且被配置用于分子分离和除湿。在表2中列出了用于膜模块的设计参数。

[0129] 表2列出了用于空气除湿应用的典型的交叉流动膜模块的尺度和部件。

[0130]

使用的膜片的尺度	
宽度	5.25 cm
长度	11.25 cm
暴露于潮湿空气的膜片	
宽度	4 cm
长度	10 cm
膜片的数目	6
膜盒的数目	3
供给侧 (膜涂层)	
通道高度	0.1 cm
供给通道间隔	4 cm
供给槽的数目	4
渗透侧	
聚酯基底 (0.5 mm) 厚度	0.1 cm
开放通道高度	0.1 cm
渗透槽的数目	3
计算结果	
总膜面积	240 cm ²
供给通道的横截面面积	1.6 cm ²
供给通道的液压直径	0.2 cm
供给通道的体积	16 cm ³
用于渗透蒸汽的横截面面积	3 cm ²
渗透流动通道的液压直径	0.1 cm

[0131]

渗透通道的体积	24 cm ³
---------	--------------------

[0132] 通过在50μm厚的多孔Ni片膜(用于用作沸石支撑物)上生长沸石膜来制备水选择

性沸石膜片。沸石膜包括选定的沸石(例如,NaA/Ni)的交互生长的沸石晶体,该沸石晶体形成具有的厚度在约2 μm 到约6 μm 之间的沸石层。该沸石膜层足够薄以使得联接到多孔金属(即,Ni)膜的沸石膜类似于裸露的金属膜。

[0133] 三个膜盒如图4A中所例示的没有使用内部间隔材料而被组装好,以形成交叉流动膜模块。对于除湿应用,在供给通道中在膜盒之间未安置间隔件。每个膜盒均包括一个由聚碳酸酯制成的支撑框架。框架尺寸从13.1cm \times 13.1cm到5.25cm \times 11.25cm变化。

[0134] 该膜模块包括240cm²的有效膜分离面积。供给空气在膜表面之上具有约10cm的典型行进长度。渗透蒸汽在膜表面之下具有约4cm的典型行进长度。使用参数计算流体动力学的质量转移值和热量转移值。

[0135] 该模块被配置成在供给流动流和渗透流动流之间有正压力梯度。对于除湿和膜分离应用,膜模块的供给侧上的压力通常大于渗透侧上的压力。如此,供给通道不需要间隔材料。在没有间隔材料的情况下,供给空气可在较低压力降的情况下流动通过供给通道。对膜模块进行压力降测试。通过从总压力降减去经过歧管的压力降来确定经过膜堆的压力降。图9标绘了测量到的经过膜模块的压力降的变化作为供给空气线速度的函数。在该图中,压力降随着流动速度增大。在水的流动速度为200cm/s的情况下,压力降是约0.65厘米。

[0136] 使用对有色的水的真空过滤来测试膜设备的机械完整性和无泄漏操作。该膜设备没有缺陷。没有颜料分子(尺寸 \sim 1nm到2nm)渗透通过该膜。在过滤测量之后水的渗透是低的。

[0137] 该膜模块然后被放置在烤炉中并且用于对空气除湿进行测试。潮湿的室内空气通过入口歧管被引入到膜设备内并且通过出口歧管被排出到周围环境空气。用真空泵从膜设备的渗透侧抽水分。水蒸汽渗透在离开膜设备之后被收集在液氮冷阱中。用数字流量计测量通过真空泵排出的剩余空气流动的速率。表3列出了针对在近似大气压下在膜设备的供给侧上引入的空气所收集的机械完整性测试数据。图10A-图10D示出对于在两个不同温度下进来的供给空气的除湿结果。

[0138] 表3列出了从模块机械完整性测试所收集的数据。

[0139]

供给空气线速度, m/s	供给空气压力, kPa	渗透压力, kPa	空气泄漏速率, cc/min	泄漏的供给空气的百分比
52	105.9	4.8	125	2.49%
115	106.1	4.8	132	1.20%
156	106.4	4.8	132	0.88%
208	106.4	4.8	133	0.66%
260	106.9	4.8	134	0.53%
313	107.2	4.8	135	0.45%

[0140] 该表中的数据显示当在渗透侧抽真空时膜模块保持机械完整性。空气供给是在接近大气压下。少量的空气可能通过膜中的缺陷而泄漏。压力降测量显示经过该模块的压力

降在1.54m/s的 V_g 下是约0.63厘米水以及在2.1m/s的 V_g 下是约0.95厘米水。 V_g 是经过该模块的供给空气表面线速度。

[0141] 图10A示出用于对在25L/min的流动速率和21.0℃的温度下引入的进入供给空气进行除湿的膜设备的除湿性能结果。如该图中所示出的,在室温(21℃)和恒定供给空气流动的条件下,当空气的相对湿度(RH)从20%增加到80%时,水分渗透量保持稳定。 H_2O/N_2 分离因子呈现随着供给空气RH增大。 H_2O/N_2 选择率随着供给空气湿度的增大对于温暖空气(31℃)变得更显著。图10B示出用于对在20L/min的流动速率和31.1℃的温度下引入的供给空气进行除湿的膜设备的除湿性能结果。数据显示对于温暖空气分离因子随着供给空气湿度迅速增大。温暖空气的水分渗透量是室温空气的水分渗透量的约2到3倍,这可归因于水在沸石膜中的分子扩散性随温度增大。分离因子随着供给空气湿度的增大可归因于水分子到沸石膜的孔隙上的吸附增大以及堵塞了空气渗透。

[0142] 在室温下测试供给空气速度对除湿性能的影响。在目前的测试系统中,当供给空气速率变化时很难控制除室温之外的温度。图10C-图10D示出供给空气的速度对用于对供给空气进行除湿的膜设备的性能的影响。数据示出渗透量和分离因子随着空气速度急剧增大。所述增大源自在高空气速度下水通量的增强。除湿的程度随着空气速度降低,这是因为停留时间减少。对于一个给定的膜模块,当渗透压力、供给空气压力、湿度以及温度被保持恒定时,则水通量随着空气速度的变化可能是由于流体动力效应和质量转移效应造成的。通过增大供给空气流动速率(相当于增大空气速度),从与供给空气一起从a"管引入的水分可被更均匀地分配到膜通道(1mm×40mm)内。

[0143] 还通过在相同的条件下在一段时间内测量空气除湿性能来核查膜模块的稳定性。图11标绘了关于膜设备的水渗透量和分离因子数据作为评定膜模块的稳定性的用于对潮湿温暖空气(90%RH,32℃)进行除湿的流上时间(time-on-stream)的函数。如该图中所示出的,在开始处示出高达20000的分离因子并且逐渐稳定在大约7000-8000处。渗透量停留在近似恒定的水平。可通过在膜中存在一小部分非晶形材料来解释结果。微多孔非晶形材料(诸如,硅土)一般不是稳定相。在开始时,这样的非晶形材料可允许水分渗透同时阻挡空气。随着非晶形相逐渐变成多晶,可形成减小 H_2O /空气选择率的泄漏空气的大孔隙。

[0144] [实施例3]

[0145] [用于湿度交换和热量交换的膜模块]

[0146] 用配置有4cm×10cm有效面积的单个50μm厚的沸石/Ni膜片制造逆流膜模块并且对该逆流膜模块进行空气除湿和热焓交换(enthalpy exchange)测量。该模块具有对称设计。相同的基底材料被放置在该膜片的两侧上。一个0.5mm厚的织物聚酯片被放置在该膜片的后侧上。一个0.5mm厚的织物聚酯片被放置在该膜片和盖板之间。从该膜片的一侧引入供给气体流。从该膜片的另一侧引入扫掠气体流。通过三个入口端口供给气体流被分布在10cm宽的膜片上。供给气体流在与扫掠气体流动流相反的方向上流过该膜。流动路径的长度是4cm。在恒定的供给气体流动速率和恒定扫掠气体流动速率下、在室温下进行湿度交换。膜的两侧恰被维持在大气压以下。在表4中总结了结果。

[0147] 表4列出了对于在室温(20.9℃)下进行的与逆流模块的湿度交换的结果。

[0148]

供给侧(空气)			扫掠侧(空气)			全面性能		增益/损失
流动速率 L/s	H ₂ O 摩尔分数		流动速率 L/s	H ₂ O 摩尔分数		水渗透量 mol/m ² /s/Pa	H ₂ O/N ₂ 选择率	
	出口	出口		入口	出口			
0.103	0.0182	0.009	0.208	0	0.0053	1.1E-5	146.5	1.04
0.103	0.01	0.0061	0.102	0	0.0042	8.0E-6	148.3	1.14
0.103	0.0182	0.0076	0.102	0	0.0070	8.4E-6	156.8	0.94
0.103	0.06	0.0038	0.102	0	0.0026	8.3E-6	71.7	1.07

[0149] 使用全面水渗透量值和H₂O/N₂分离因子来表征该模块的性能。从湿度交换测量到的水渗透量和分离因子接近于针对空气除湿所测量到的值。表5比较了对于相同的模块所获得的湿度交换结果和热交换结果。

[0150] 表5. 针对湿度交换和热量交换的逆流模块的测试结果。

[0151]

供给侧(室内空气)			扫掠侧(室内空气)				全面性能			
入口		出口	入口		出口		P _{H2O} (mol/m ² /s/Pa)	K _h (w/m ² /k)		
T (°C)	F (1/s)	X _{H2O}	T (°C)	X _{H2O}	T (°C)	F (1/s)				
24.7	0.051	0.01	22.4	0.007	21.9	0.051	23.7	0.004	3.8E-06	39.3
28.1	0.051	0.01	22.9	0.0073	21.5	0.051	25.6	0.004	3.8E-06	34.5
31	0.103	0.01	25.5	0.0065	23.3	0.103	27.6	0.0054	1.2E-05	50.8
32.3	0.103	0.01	25.3	0.0043	22.5	0.103	28.8	0.0045	1.2E-05	66.2
29.6	0.154	0.01	24.9	0.0076	22.5	0.153	27	0.0043	1.2E-05	88.5
32.3	0.103	0.01	25.3	0.0043	22.5	0.103	28.8	0.0045	1.2E-05	66.2
32	0.103	0.014	25.2	0.0091	22.4	0.103	28.2	0.007	1.1E-05	58.2
31.6	0.103	0.018	25.2	0.0096	22.5	0.103	27.7	0.0087	1.1E-05	52.2

[0152] *供给空气线速度=5.13m/s;扫掠空气速度=6.12m/s

[0153] 膜片的流动路径是仅约4cm。在这样短的停留时间(~8ms)下供给气体流和扫掠气体流的入口和出口之间的温度和湿度的显著改变表明热量交换速率和湿度交换速率二者都是快速的。用全面水渗透量值来表征逆流模块的质量交换速率,用热量交换系数值来表征逆流模块的热量交换速率。水渗透量随着供给空气速度和扫掠空气速度而增大。该表中的水渗透量值与从空气除湿测试中测量到的水渗透量值一致。该表中列出的热量交换系数值与对于常规金属板热量交换器的气相热量交换值一致。因此,膜设备除了能用于空气除湿以外还能用于热焓回收。

[0154] 尽管示出了并描述了本发明的多个优选的实施方案,但是应清楚地理解,本发明

不限于此,而是可以多种不同方式被体现以在下面的权利要求的范围内实践。应明了,在不脱离由下面的权利要求限定的本发明的精神和范围情况下可做出多种改变。

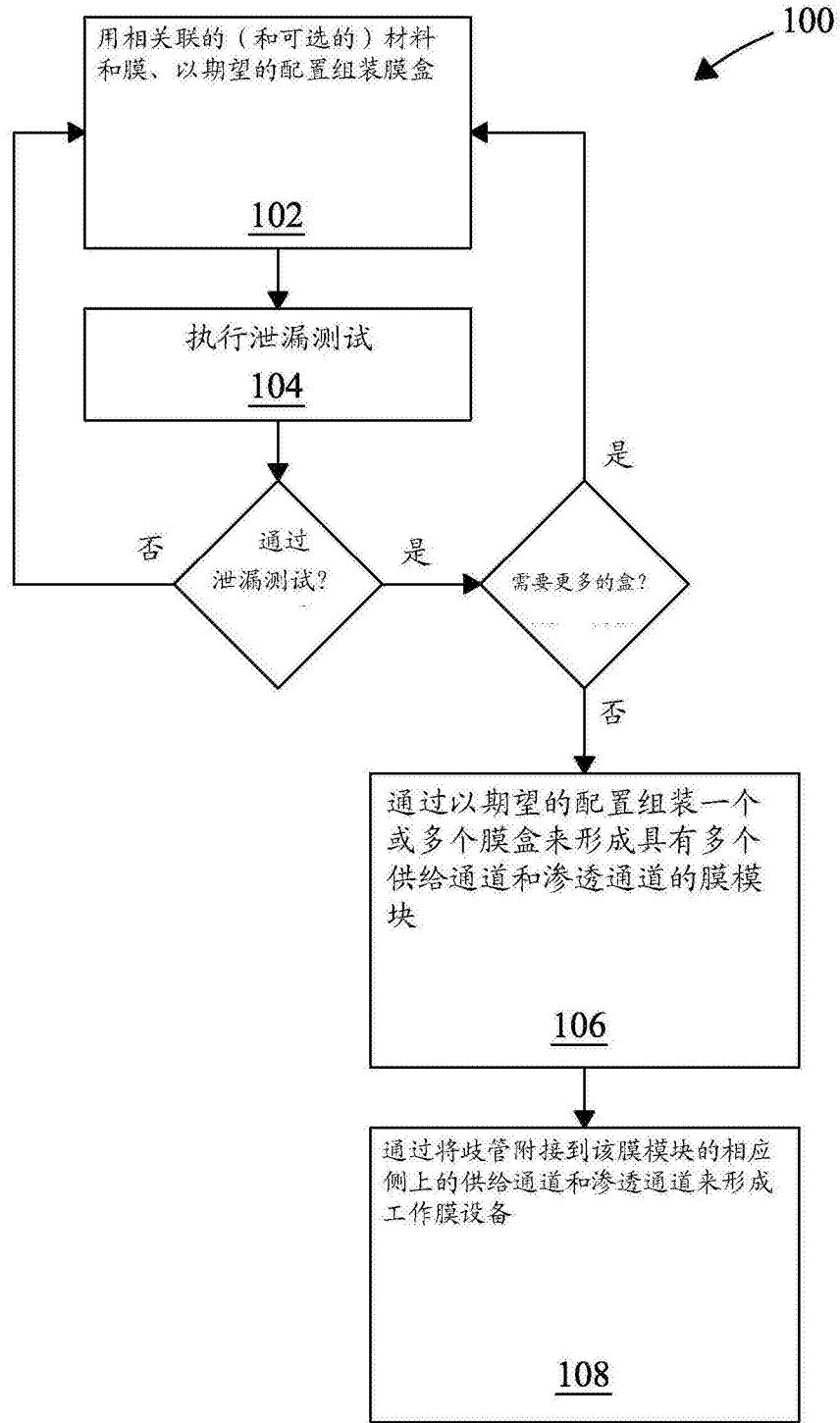


图1

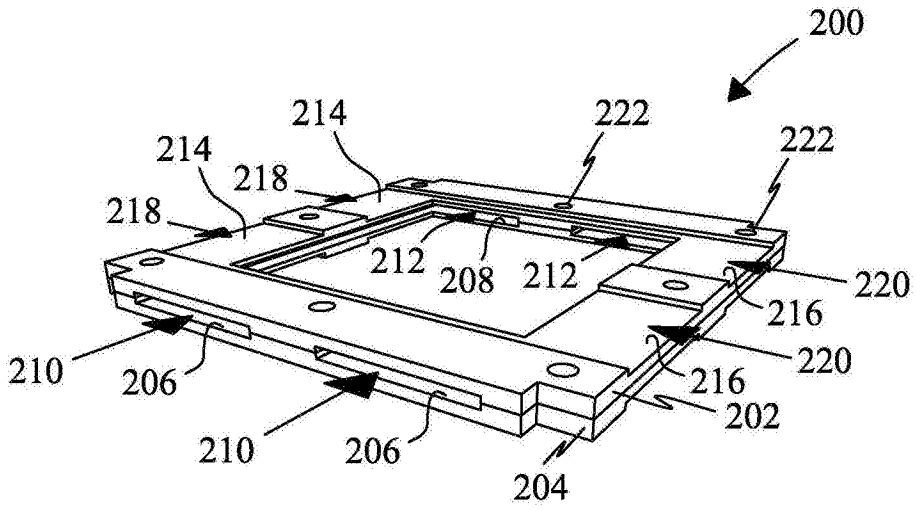


图2A

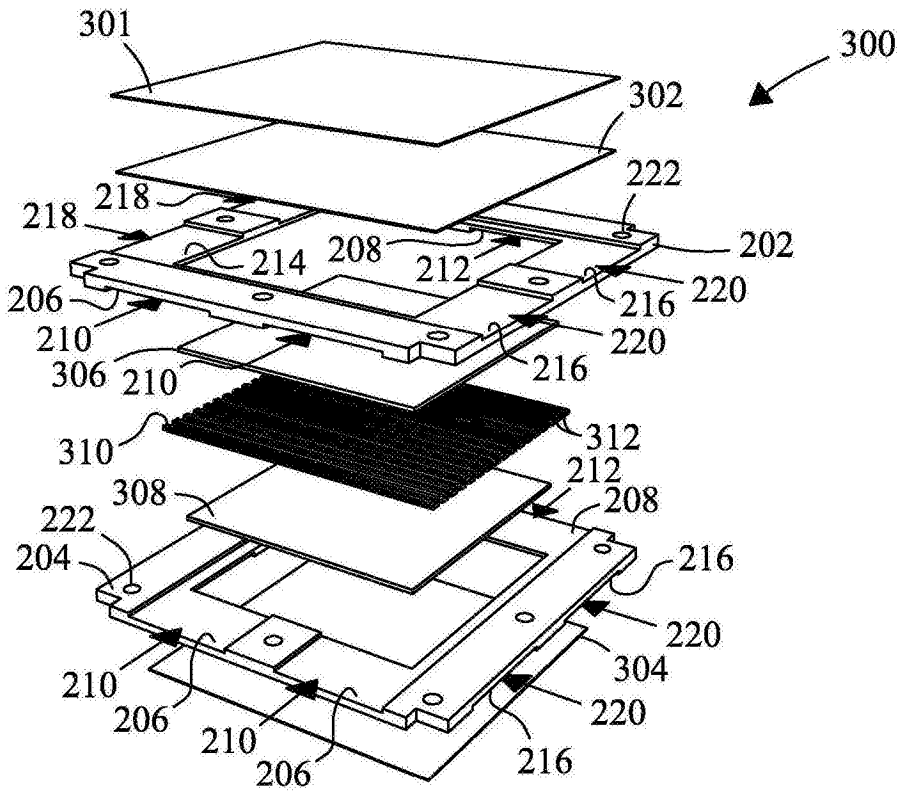


图2B

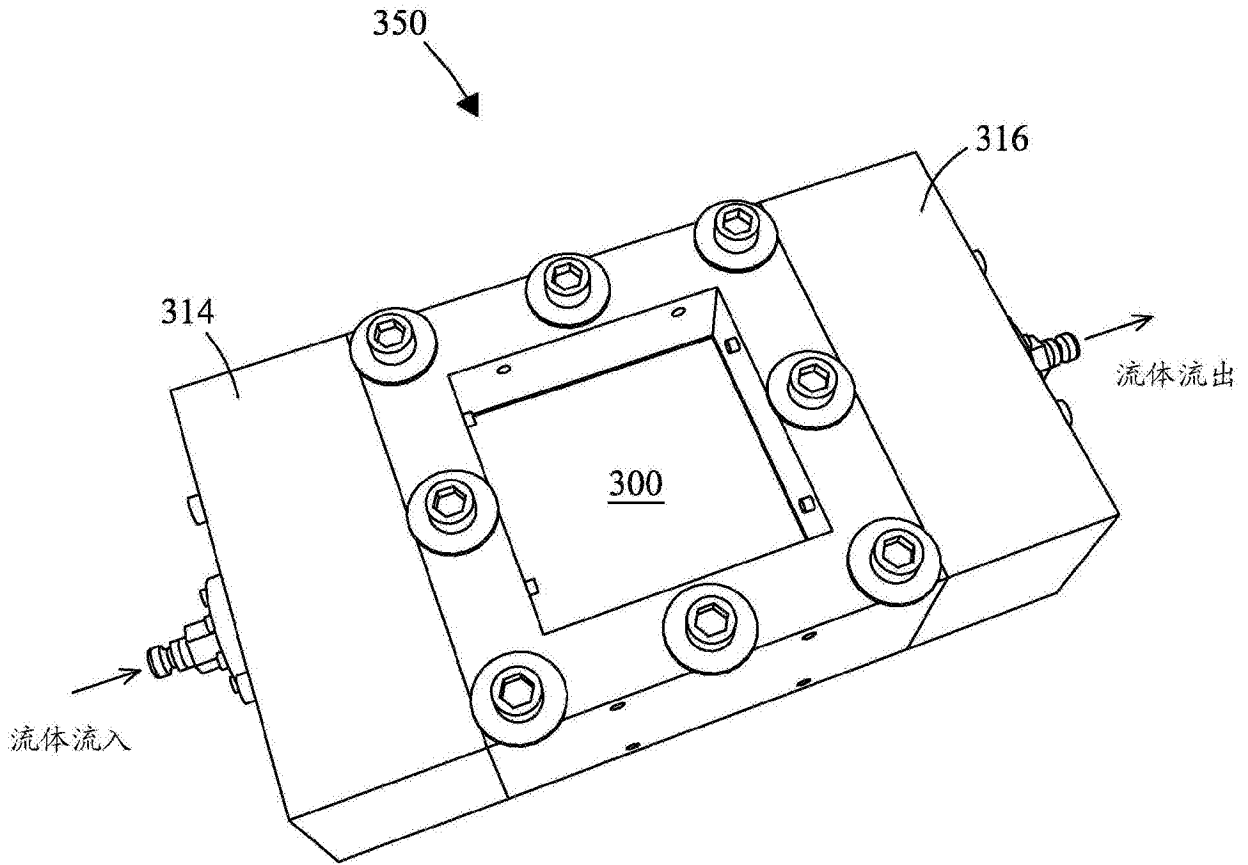


图3

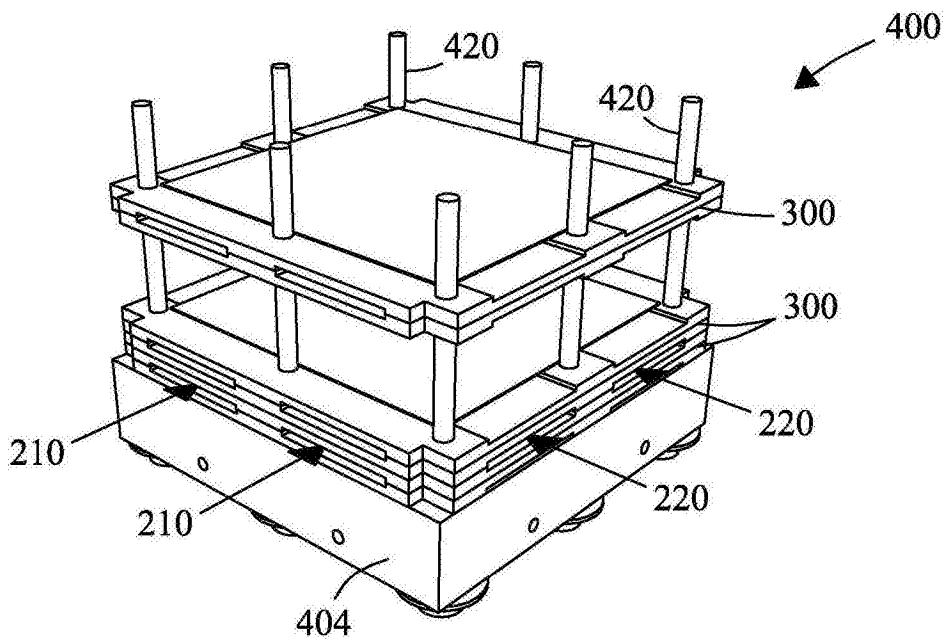


图4A

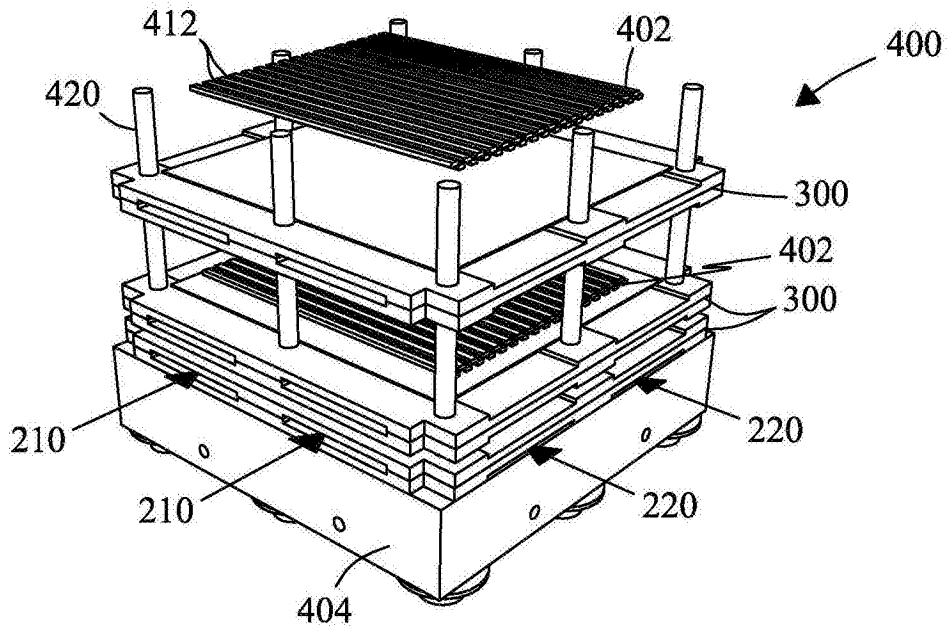


图4B

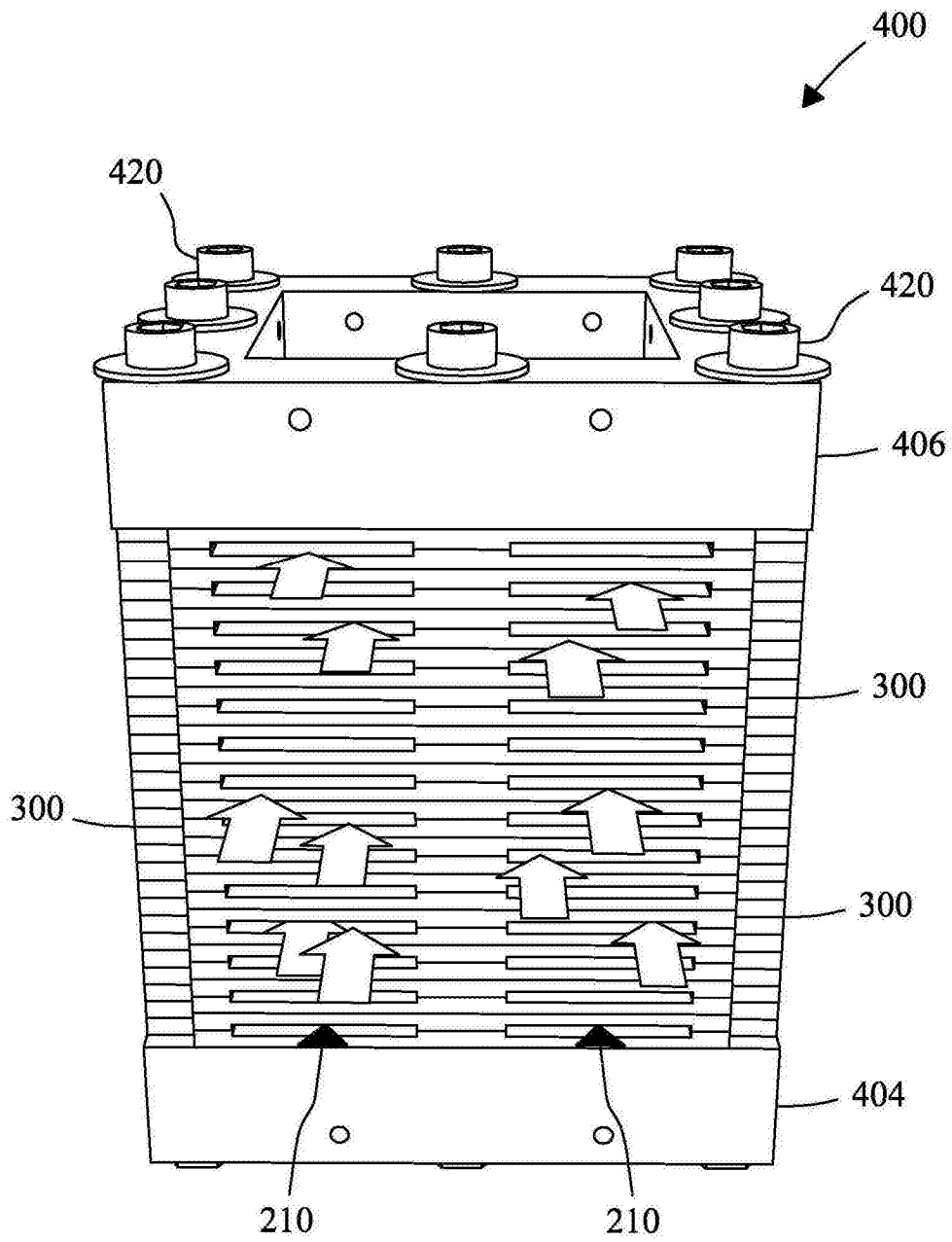


图5

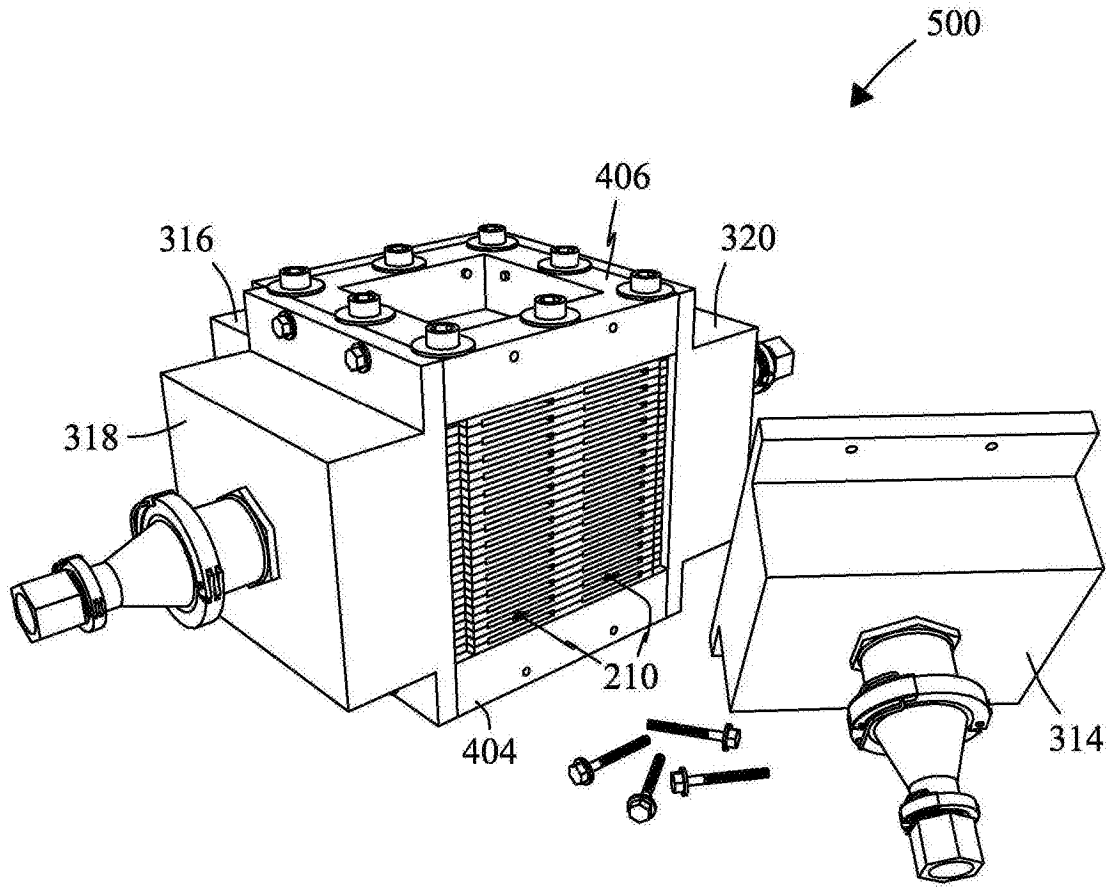


图6

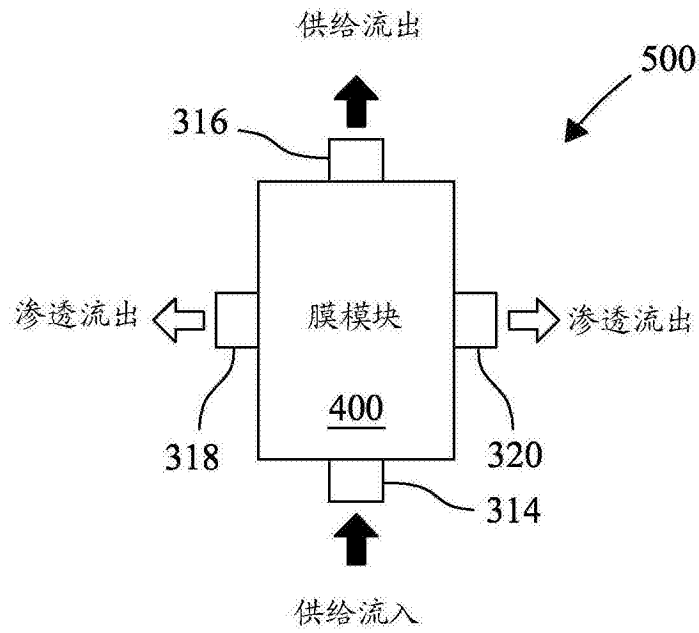


图7A

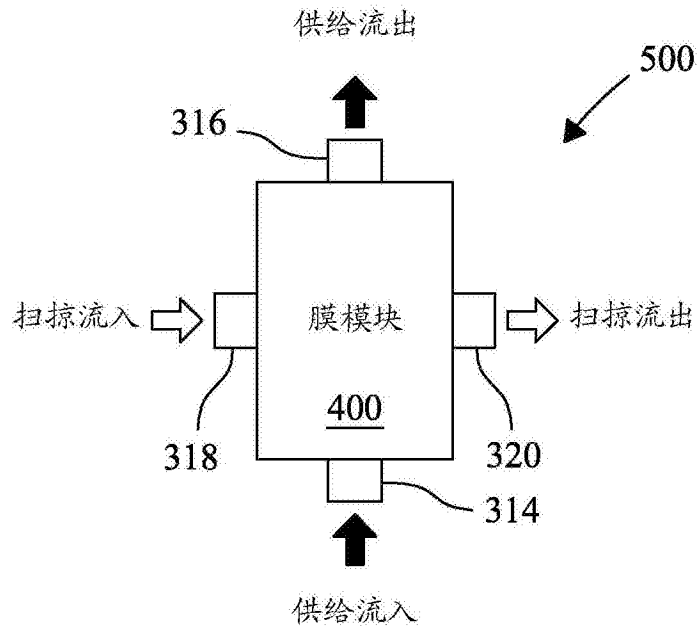


图7B

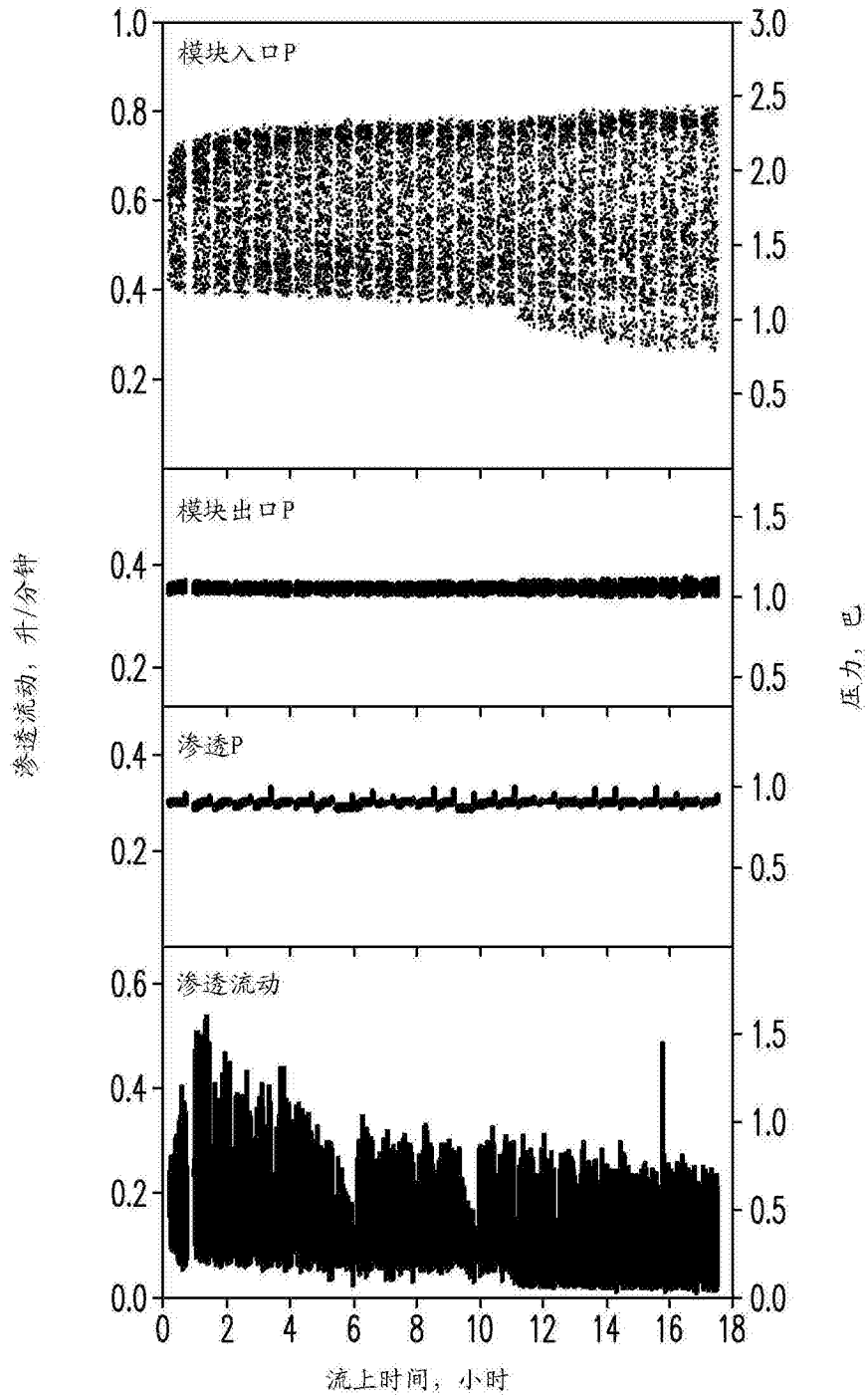


图8

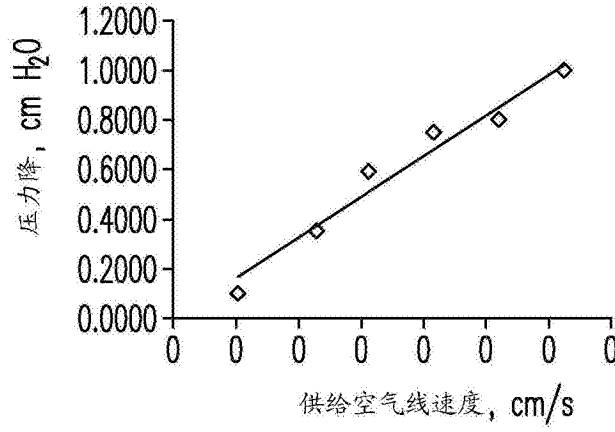


图9

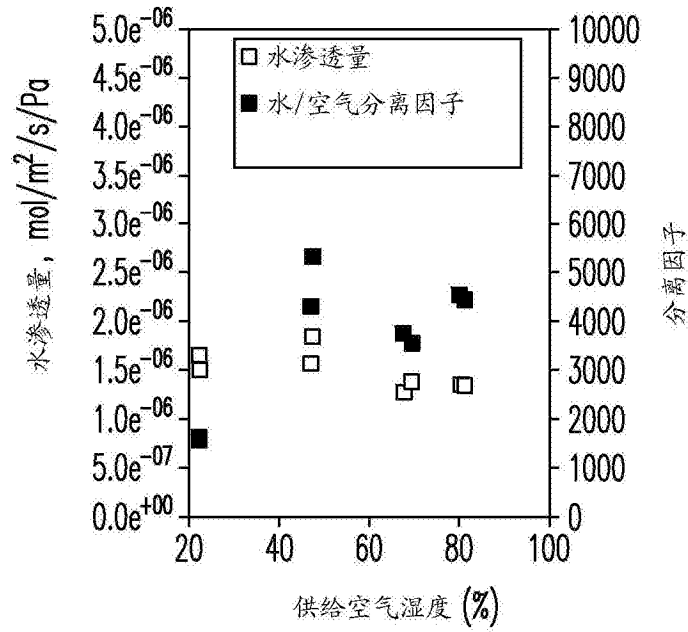


图10A

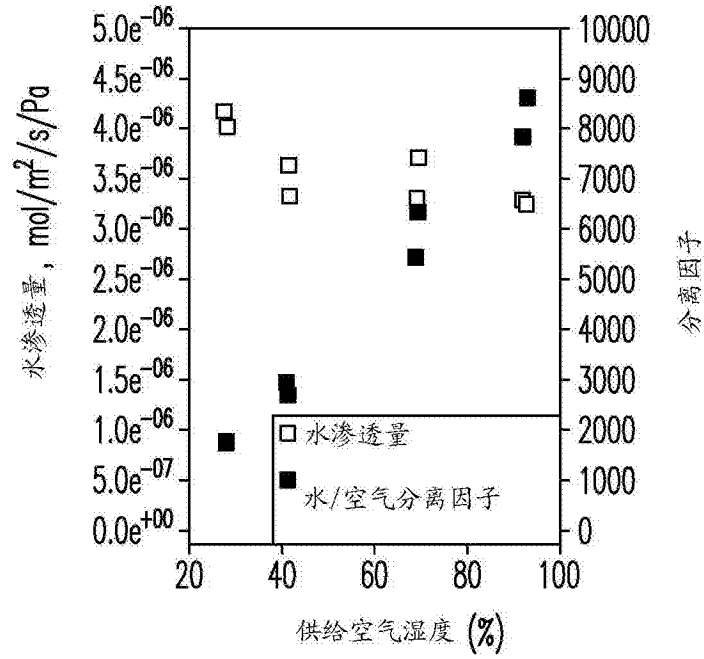


图10B

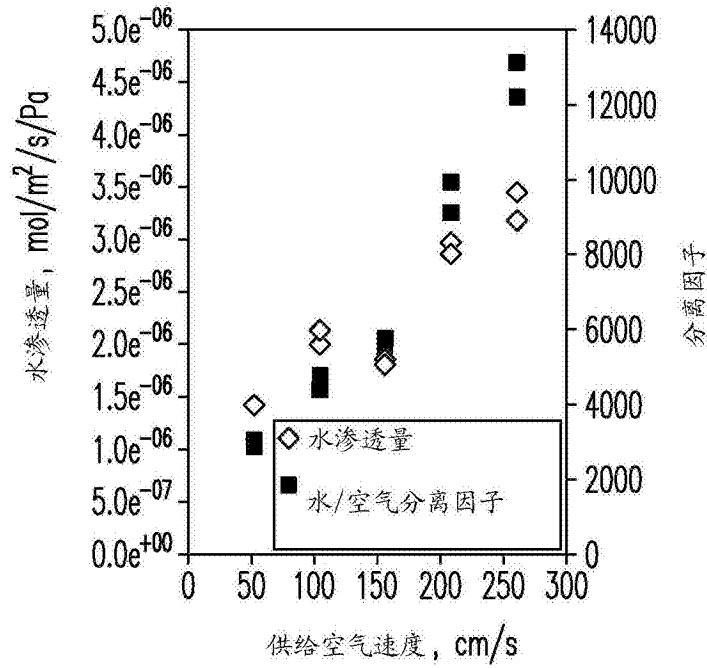


图10C

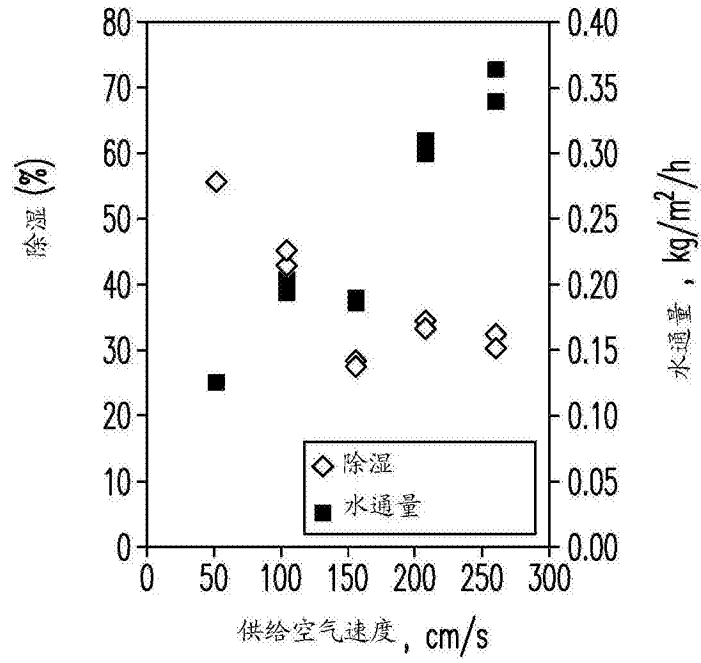


图10D

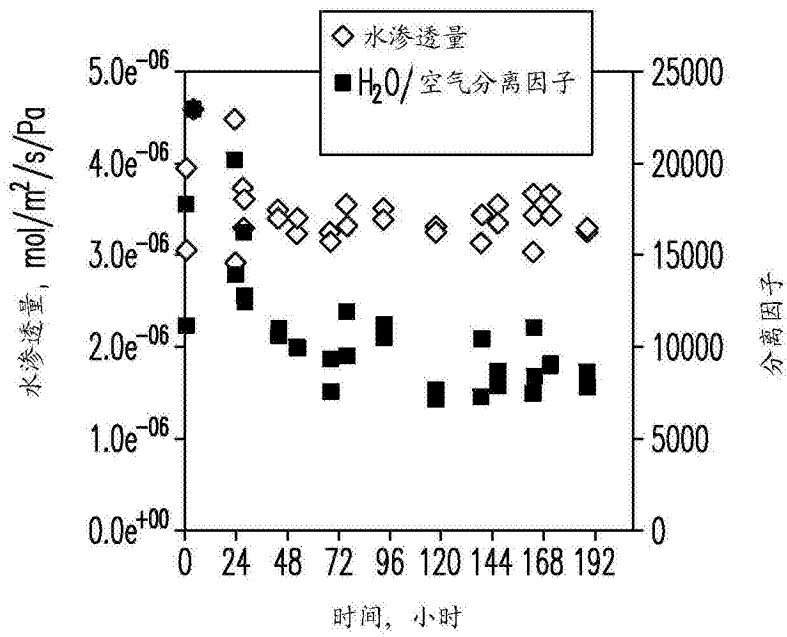


图11