



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111051573 B

(45) 授权公告日 2022.05.27

(21) 申请号 201880044556.7
 (22) 申请日 2018.07.02
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 111051573 A
 (43) 申请公布日 2020.04.21
 (30) 优先权数据
 201711090 2017.07.03 NO
 (85) PCT国际申请进入国家阶段日
 2019.12.31
 (86) PCT国际申请的申请数据
 PCT/NO2018/050174 2018.07.02
 (87) PCT国际申请的公布数据
 WO2019/009732 EN 2019.01.10
 (73) 专利权人 海斯达有限公司
 地址 挪威奥斯陆
 (72) 发明人 马格努斯·S·托马森
 亚历杭德罗·奥亚尔塞·巴尔内特
 (74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
 责任公司 11219
 专利代理师 陈海涛 王海川

(51) Int.Cl.
 G25B 1/04 (2021.01)
 G25B 9/23 (2021.01)
 G25B 9/77 (2021.01)
 G25B 15/023 (2021.01)
 G25B 15/08 (2006.01)
 (56) 对比文件
 US 2017101717 A1,2017.04.13
 CN 101163822 A,2008.04.16
 CN 103732799 A,2014.04.16
 US 2011198232 A1,2011.08.18
 S. Sawada et al. "Solid polymer electrolyte water electrolysis systems for hydrogen production based on our newly developed membranes, Part I: Analysis of voltagecurrent characteristics".《Progress in Nuclear Energy》.2007,第50卷(第2-6期),第443-448页.
 (续)

审查员 赵春霖

权利要求书2页 说明书6页 附图3页

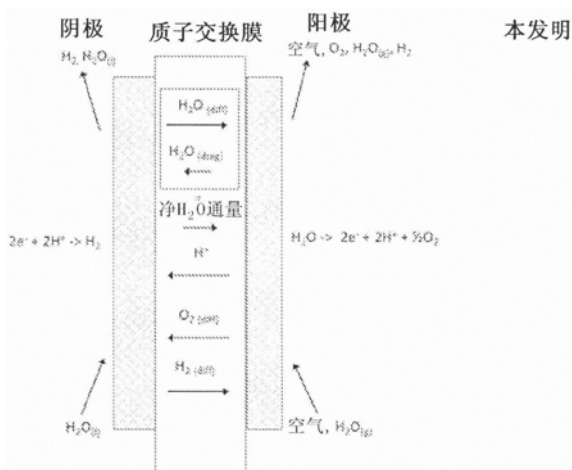
(54) 发明名称

在PEM水电解器系统中生产氢的方法,PEM水电解器单元、堆叠体和系统

(57) 摘要

本发明涉及一种用于在聚合物电解质膜(PEM)水电解器单元中生产氢的方法。将直流电施加到水电解器单元。使得水分子从阴极隔室扩散穿过聚合物电解质膜进入阳极隔室中,以在阳极催化剂层处将水分子氧化成质子、氧和电子。使得该质子迁移穿过聚合物电解质膜进入阴极隔室,并且该质子在阴极催化剂层处被还原以产生氢。在所述单元中,将水供应到阴极隔室,并且将加湿空气供应到阳极隔室。本发明还涉及一种聚合物电解质膜(PEM)水电解器单元,聚合物电解质膜(PEM)水电解器堆叠体和聚合物电解质膜

(PEM)水电解器系统。



CN 111051573 B

[接上页]

(56) 对比文件

Seung-Gon Kim et al. "A review on experimental evaluation of water management in a polymer electrolyte fuel

cell using X-ray imaging technique".
《Journal of Power Sources》.2013,第230卷第
101-108页.

1. 一种在聚合物电解质膜 (PEM) 水电解器单元中生产氢的方法, 所述方法包括:
将直流电施加到所述水电解器单元;
使得水分子从阴极隔室扩散穿过聚合物电解质膜进入阳极隔室中;
在阳极催化剂层处将水分子氧化成质子、氧和电子;
使得所述质子迁移穿过聚合物电解质膜进入阴极隔室, 所述聚合物电解质膜的厚度低于50微米;
将所述质子在阴极催化剂层处还原以产生氢;
将液体水供应到所述阴极隔室; 以及
将加湿空气供应到所述阳极隔室。
2. 根据权利要求1所述的方法, 其中在所述电解器的标称运行温度下, 所述加湿空气的相对湿度 (RH) 高于75%RH。
3. 根据权利要求1的方法, 其中所述加湿空气是过饱和空气。
4. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法, 其中所述阴极隔室在比所述阳极隔室的压力高0.5bar至35bar的压力下运行。
5. 根据权利要求1所述的方法, 其中所述加湿空气通过流动分配歧管并且经由阳极双极板上的流场图型供应。
6. 根据权利要求1所述的方法, 其中所述聚合物电解质膜的厚度在5微米至49微米的范围内。
7. 一种用于氢生产的聚合物电解质膜 (PEM) 水电解器单元, 其包含:
阳极隔室, 所述阳极隔室包含阳极双极板、阳极金属多孔传输层和阳极催化剂层,
阴极隔室, 所述阴极隔室包含阴极双极板、阴极金属多孔传输层和阴极催化剂层,
所述阳极催化剂层和所述阴极催化剂层被涂覆在聚合物交换膜的任一侧上,
其中所述聚合物电解质膜的厚度低于50微米, 所述阴极隔室被配置为通过第一组入口和出口流动分配歧管供应有离子交换液体水, 并且所述阴极双极板设计有第一流场图型, 以及
所述阳极隔室被配置为通过第二组入口和出口流动分配歧管供应有加湿空气, 并且所述阳极双极板设计有第二流场图型。
8. 根据权利要求7所述的PEM电解器单元, 其中所述聚合物电解质膜的厚度在5微米至49微米的范围内。
9. 根据权利要求7或8所述的PEM电解器单元, 其中所述聚合物电解质膜进一步包括复合催化剂。
10. 一种PEM水电解器堆叠体, 其包含串联的多个根据权利要求7至9的聚合物电解质膜水电解器单元。
11. 一种PEM水电解器系统, 其包含:
水和氧管理系统,
氢气管理系统,
水输入系统,
安装和包装室子系统,
通风系统,

电力电子设备和电源，
系统控制装置和仪器，
所述系统进一步包含：
根据权利要求10所述的聚合物电解质膜水电解器堆叠体，和
加湿空气供应和加湿系统。

在PEM水电解器系统中生产氢的方法,PEM水电解器单元、堆叠体和系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种使用PEM电解器系统生产氢的方法,并且涉及一种聚合物电解质膜(PEM)水电解器系统。更具体地,本发明涉及一种PEM水电解单元和单元堆叠体及其运行。

[0002] 背景技术/现有技术

[0003] 水电解单元是一种电化学装置,其解离水以产生氢气和氧气。电解单元包括阴极、阳极和电解质。电解质位于阴极和阳极之间,并且在所述电极之间传输离子,同时防止传输电子。一种电解质可替代物是聚合物电解质膜(PEM),也称作质子交换膜。在电解器单元运行过程中,水在阳极处被氧化成氧气、质子和电子。所述质子由于跨过聚合物电解质膜施加的电场而从阳极迁移到阴极。在阴极处,所述质子与通过外电路转移的电子合并以产生氢气。图2显示了根据现有技术的PEM水电解器单元(water electrolyser cell)的膜电极组件(MEA)的示意图,以及发生的主要传输现象和反应。

[0004] 所述电解单元在阳极侧消耗水,并且这个水必须连续供应到阳极。所述水可以直接供应到阳极(如图2所示)或者供应到阴极并且通过聚合物电解质膜传输到阳极。水的消耗速率和因此氢和氧的产生速率遵守法拉第法则,这表现在增加通过单元的电流将导致气体产生和水消耗的相应增加。

[0005] 除了水传输之外,氧($O_{2(\text{差值})}$,即 $O_{2(\text{diff})}$)和氢($H_{2(\text{差值})}$,即 $H_{2(\text{diff})}$)是通过扩散/对流机理穿过所述膜来传输的,这归因于横跨所述膜的气体分压梯度。这种气体跨过膜的流通和随之在阳极上氢气混入氧气中和在阴极上氧气混入氢气中是现有技术的PEM水电解器的主要设计和运行局限之一:因为在阳极的氧气中仅仅需要少量氢就形成易燃的和/或爆炸性气体混合物,因而如果阳极产生的氧过低(低电流密度)或者氢的传输过高(薄膜和/或高渗透率),则传输穿过所述膜的氢将超过这个水平。

[0006] 这种氢交叉问题在现有技术的PEM水电解器中是通过使用厚膜(高于 $125\mu\text{m}$),优选由全氟磺酸(PSFA)聚合物例如Nafion®或者Aquavion®制成的厚膜,以有效降低穿过所述膜的氢扩散来补救的。氢/氧复合催化剂(recombination catalyst)例如铂或者钯可以引入所述膜中,充当用于氧和氢局部合并成水的反应位置,阻止扩散气体到达另一电极隔室和进入气相。但是,为了具有用于发生所述合并反应的必需量的复合催化剂和时间,仍然需要具有明显厚度的膜。因此,现有技术的水电解器使用了厚度为125微米或者更高的聚合物电解质膜(Nafion® 115或者等价物)。使用这样的厚膜引入了明显的欧姆电阻和因此更低的电解器效率,特别是在电流密度高于 1Acm^{-2} 的情况下。

[0007] 目前,水电解器是以大约65%至70%的堆叠体效率来运行的(较高的加热值HHV),其导致 1kg H_2 需要大约55kWh电。在所述55kWh中,大约50kWh由电解方法使用,和5kWh由设备其余部分使用(循环和供应水泵,热交换器,离子交换器,气体/水分离器,阀门和传感器)。在大部分水电解器系统中,电力成本可以总计高达生产氢的成本的80%,并且水电解器堆叠体效率的增加将改进整体主电能消耗和氢总成本二者。

[0008] 目前的PEM电解器的效率主要受限于两个因素:

[0009] 1. 阳极上的超电势

[0010] 2. 聚合物膜中的欧姆电阻。

[0011] 本发明的一个目标是提供一种改进的方法和系统,用于通过水电解来产生氢。另一目标是降低能耗和因此降低生产氢的成本。本发明的另一目标是避免在电解器中形成氧和氢的易燃或者爆炸性混合物。

发明内容

[0012] 在本发明第一方面,提供一种在聚合物电解质膜 (PEM) 水电解器单元中生产氢的方法。该方法包括将直流电施加到水电解器单元,使得水分子从阴极隔室扩散穿过聚合物电解质膜进入阳极隔室中,在阳极催化剂层处将水分子氧化成质子、氧和电子;使得所述质子迁移穿过聚合物电解质膜进入阴极隔室,将所述质子在阴极催化剂层处还原以产生氢,将水供应到阴极隔室和将加湿空气供应到阳极隔室。

[0013] 在本发明的一种实施方案中,供应到阳极隔室的加湿空气的相对湿度 (RH) 高于 75%RH。该加湿空气也可以用水饱和。任选地,使用过饱和空气。

[0014] 所述加湿空气可以通过使用空气加湿器泵/吹风机来供应到阳极,并且通过流动分配歧管和经由阳极双极板上的流动图型 (flow pattern) 分配,所述流动图样用于沿着阳极活性区域的最佳气体和水分布。

[0015] 在运行期间,优选将电解器单元的阴极侧上的压力控制到高于阳极侧上的压力。优选该阴极侧上的压力比阳极隔室中的压力高 0.5bar 至 35bar。在运行期间,阳极隔室通常在稍高于环境压力的压力下运行。

[0016] 在本发明第二方面,提供一种用于氢生产的聚合物电解质膜 (PEM) 水电解器单元。该 PEM 水电解器单元包含:阳极隔室,所述阳极隔室包含阳极双极板,阳极金属多孔传输层和阳极催化剂层;阴极隔室,所述阴极隔室包含阴极双极板,阴极金属多孔传输层和阴极催化剂层,所述阳极催化剂层和阴极催化剂层被涂覆到聚合物交换膜的任一侧上,其中所述阴极隔室被配置为通过第一组入口和出口流动分配歧管供应有离子交换水,并且所述阴极双极板被设计为具有第一流场图型 (flow field pattern),以及所述阳极隔室被配置为通过第二组入口和出口流动分配歧管供应有加湿空气,并且所述阳极双极板设计有第二流场图型。

[0017] 所述阳极催化剂层和阴极催化剂层可以包含粉末形式的催化剂。

[0018] 供应的空气的温度和所述相对湿度值通常处于 50°C 至 90°C 的电解器标称运行温度。

[0019] 所述聚合物电解质膜的厚度可以低于 50 微米,优选是 5 微米至 49 微米,并且最优选是 10 至 35 微米。

[0020] 在本发明第三方面,提供了一种 PEM 水电解器堆叠体,其包含串联的多个根据本发明的聚合物电解质膜水电解器单元。

[0021] 在本发明第四方面,提供了一种 PEM 水电解器系统。该系统包含根据本发明的 PEM 电解器堆叠体,连同水和氧管理系统,氢气管理系统,水输入系统,安装和包装室 (mounting and packaging cabinetry) 子系统,通风系统,电力电子设备 (power electronics) 和电源,系统控制装置和仪器,以及加湿空气供应和加湿系统。

附图说明

[0022] 图1是一种电解器单元的示意图,所述电解器单元被构造为在阳极上供应加湿空气并在阴极上供应液体水而运行。

[0023] 图2是根据现有技术的一种膜电极组件MEA的示意图。

[0024] 图3是根据本发明的一种膜电极组件MEA的示意图。

[0025] 图4是根据本发明的一种PEM水电解器系统的示意图。

[0026] 图5是示出了在电解器测试期间的单元电压、电流密度和阳极侧气体组成的图。

[0027] 图6是示出了在不同运行条件下的单元电压(与能耗成比例)的图。

具体实施方式

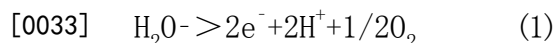
[0028] 本发明的目标和特征可以参考下述附图而更好地理解。

[0029] 图1是一种电解器单元的示意图,所述电解器单元被构造为在阳极上供应加湿空气和在阴极上供应液体水而运行。

[0030] 该电解器单元包含阳极隔室,所述阳极隔室具有阳极双极板(1a),阳极金属多孔传输层(2a),以及涂覆于薄聚合物电解质膜(4)之上的阳极催化剂层(3)。所述阴极隔室包含涂覆在聚合物电解质膜(4)之上的阴极催化剂层(5),阴极金属多孔传输层(2b)和阴极金属双极板(1b)。阳极双极板(1a)由具有高耐腐蚀性和高电导率的金属材料制成。另外,阳极双极板(1a)设计有流场图型(6)和相应的入口(7)和出口(8)流动分配歧管,用于沿着电解器活性区域的气体和水的最佳分布。优化阳极双极板(1a)和阳极金属多孔传输层(2a)二者,以使得电解器中的接触电阻最小化。阳极金属多孔传输层(2a)由高耐腐蚀性和高电子传导性多孔材料制成,其使得加湿空气能够扩散到阳极催化剂层(3)中。阳极催化剂层(3)包含催化剂和质子传导性聚合物,所述催化剂对于氧形成反应是高效的,所述质子传导性聚合物允许质子迁出和水迁入阳极催化剂层(3)。阴极金属双极板(1b)也是由具有高耐腐蚀性和高电导率的金属材料制成的。阴极双极板(1b)设计有流场图型(9),但是无需与阳极双极板(1a)的流场图型(6)相同,相应的入口(10)和出口(11)流动分配歧管用于沿着电解器装置的活性区域的水和气体的最佳分布,但是无需与阳极侧上的(7)和(8)相同。阴极金属多孔传输层(2b)是由具有高耐腐蚀性和高电子传导性多孔材料制成的,其使得水和氢能够从阴极催化剂层(5)输入和输出。阴极催化剂层(5)包含催化剂和质子传导性聚合物,所述催化剂对于氧形成反应是高效的,所述质子传导性聚合物允许质子迁入和水迁出阴极催化剂层(5)。

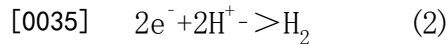
[0031] 图3显示了根据本发明的PEM水电解器单元的膜电极组件(MEA)的示意图,以及发生的主要传输现象和反应。

[0032] 在运行中,离子交换水(H_2O (1))通过堆叠体入口端口,内歧管和阴极双极板上的流场图型引入单元的阴极隔室中。加湿空气通过阳极入口端口,内歧管和阳极双极板上的流场图型供应到阳极隔室。阴极上的一部分水被聚合物电解质膜吸收,并且通过组合的扩散/对流机理(H_2O (差值),即 $H_2O_{(diff)}$)移动到阳极。水根据等式(1)在阳极上反应并转化成氧气、质子和电子:



[0034] 质子从阳极侧迁移穿过聚合物电解质膜到阴极侧,并且通过称作电渗拖曳的现

象,将大部分液体水(H_2O (拖曳),即 $H_2O_{(drag)}$)从膜的阳极侧带到阴极侧。在阴极处,质子根据等式(2)与通过外电路转移的电子合并,以产生氢气。



[0036] 阳极隔室中任何过量的水与空气一起离开所述单元,产生氧气,水蒸气($H_2O(g)$)和少量氢气。在阴极侧上产生的氢气与过量水和痕量氧气一起离开单元。

[0037] 电解单元中在阳极处的氧产生速率和在阴极处的氢产生速率遵守法拉第法则,这表现在施加的单元电流的增加将增加水在阳极处的消耗速率,以及因此在阳极和阴极二者上的气体产生速率。为了在给定的电极面积和堆叠体尺寸的情况下保持增加的氢产生,所述阳极必须供应有足够的水。

[0038] 电解单元的连续运行需要水从阴极传输到阳极,在阳极处它将消耗在氧形成反应中。除了这种消耗之外,其他机理也从阳极除去水。首先,称作电渗拖曳的效应消耗阳极水,因为移动穿过膜的质子将拖曳一定量的水分子跟随它们。在 Nafion®膜中,例如电渗拖曳可以高达大约3分子水/质子。

[0039] 单元中的阳极气相将用水蒸气欠饱和,这归因于在阳极处产生的另外的氧气。阳极中的液体水因此将蒸发并作为排出气体离开所述阳极,并且被来自于膜的水补充。

[0040] 水通过所述膜的扩散是与膜中的水活度梯度和膜中的水扩散系数成比例的,也称作菲克法则。

[0041] 膜中的活度梯度是与膜厚度成反比的,这体现在降低膜厚度将增加活度梯度。

[0042] 在本发明,PEM膜的厚度可以小于50微米,优选是5微米至49微米,甚至更优选是10微米至35微米。在电解单元中使用上述薄膜,增加了从阴极传输到阳极的水,这产生了更大限制电流密度,以及因此在给定单元和堆叠体尺寸时增加的氢气和氧气产生。

[0043] 阴极上的水活度是与阴极上的压力成比例的。在一种实施方案中,将电解器单元在运行中的阴极压力控制到高于阳极上的压力。这种压力差将水从阴极“推”到阳极,因此改进了水从阴极到阳极的传输,导致在相同电极尺寸下增加的气体产生速率。阳极上的压力通常稍高于环境压力以克服流过阳极隔室的加湿空气的压降。在一种实施方案中,阴极和阳极之间的压力差是0.5bar至35bar,在另一实施方案中所述压力差是1bar至20bar。

[0044] 使用明显薄于现有技术的电解单元中所用的膜的上述薄膜,将降低电解单元的欧姆电阻和由此将所述方法的能耗降低多达15%至20%,并因此降低了对于外部冷却所述电解单元的需要。较薄的膜还将增加从阴极到阳极的氢和从阳极到阴极的氧的通量。在仅仅向阳极上供应水的常规电解单元中,增加的氢通量将导致在电解单元的较宽的运行范围内在阳极隔室中形成爆炸性或者易燃性气体混合物的风险的增加。本发明通过将薄膜的使用与加湿空气向阳极的供应组合来减轻这种风险。将加湿空气供应到阳极将从阴极穿过所述膜传输的氢有效稀释到远低于大约4mol%的氢-空气混合物爆炸下限(LEL)的水平,并因此在电解单元的完整运行范围内消除了形成易燃或者爆炸性气体混合物的风险。

[0045] 电解器单元的运行可能引起聚合物电解质膜的降解,例如通过自由基攻击过程的降解。这种降解过程通常在接近于阴极的膜区域中是最高的,这归因于形成过氧化氢和自由基作为氧在阴极处的还原的副产物。自由基形成速率和因此它们在膜中的浓度直接与从阳极穿过所述膜到阴极的氧通量有关。这种通量是在膜的聚合物相中的扩散和在水相中的扩散/对流的组合。扩散速率通常直接与阳极中的氧分压(pO_2)成比例,并且对流速率与穿

过膜的水通量成比例。

[0046] 在一种实施方案中,因为在电解单元的阳极上供应有加湿空气,空气中氮气和水的组合提供了比常规PEM电解单元低得多的 pO_2 。另外,净水通量是从阴极到阳极的,其与常规的PEM电解单元相反,在常规的PEM电解单元中净 H_2O 通量是从阳极到阴极的(参见图2和3)。因此,与常规PEM电解器相比,以向阳极上供应加湿空气和向阴极上供应水而运行的电解器单元将具有明显更低的自由基形成和更低的膜降解速率。

[0047] 图4显示了根据本发明的一种PEM水电解器系统的示意图。在这种系统中,空气经由吹风机或者压缩机(12)供应到空气加湿器(13),所述空气加湿器被配置用于实现供应到PEM电解器堆叠体(14)的单元的阳极侧的空气中的受控的加湿水平。所述空气加湿器可以选自一定范围的可替选项,例如焓轮,膜加湿器,水雾化器,喷雾塔或者鼓泡加湿器。

[0048] 电解器堆叠体(14)被配置为将加湿空气供应到每个电解器单元,以使得加湿空气均匀分布到阳极电极表面上,从而将从阴极渗透的氢气稀释到低于1体积%的水平。另外,所述电解器堆叠体被配置为将液体水供应到每个电解器单元的阴极隔室。这种组合对于保证阳极上氧形成反应所需的必需的水和确保膜中高水含量以保持高的质子传导性是至关重要的。离子交换水是从水净化装置(19)供应的。所产生的氢与水一起离开PEM水电解器堆叠体(14)。氢和水是在氢/水分离器(15)中分离的。所述氢流过脱氧机/干燥机(16)。所分离的水再循环到水净化单元(19)并进入PEM水电解器堆叠体(14)中。循环泵(17)和热交换器(18)可以包括在循环管线中。

[0049] 实验

[0050] 使用MEA进行实验,所述MEA基于Nafion®212膜(50微米厚度)并安装在 $25cm^2$ 电解器测试单元中。将该测试单元连接到来自于Greenlight Technologies的PEM电解器测试站。

[0051] 在所述实验的前两个小时中,所述单元是在 $60^\circ C$ 以常规模式在 $1Acm^{-2}$ 运行的,并且水在阳极和阴极上循环。连续监控氧中的氢浓度,并且显示在阳极侧处大约2体积%的稳态值。图5显示了作为时间的函数的氧中的氢浓度。在2小时后,改变所述运行,并且将 $9lmin^{-1}$ 的加湿空气(100%RH,在 $60^\circ C$)供应到阳极,同时将液体水供应到阴极。从阳极出来的气体中的氢浓度立即下降到不可测出的水平(低于0.1%),而电解器的单元电压和电流是恒定的。

[0052] 在5小时后,研究了电流密度的效应。这些结果也显示在图5中。电流密度从 0.01 变化到 $2Acm^{-2}$,并且在从阳极出来的气体中没有检测出可检出量的氢。作为对比,将所述单元调回常规运行,在阳极和阴极二者上供应有水,所述氢浓度快速增加到大约2体积%或更高(在低电流密度)。

[0053] 在8小时运行后,关闭所述单元并结束实验。

[0054] 这个实验清楚证实了具有薄膜的PEM电解器可以仅仅以向阳极入口供应加湿空气来运行,具有与在阳极上供应有液体水的单元相同的性能,但是在阳极上产生的气体中具有明显更低的氢浓度。当水供应到阴极并且加湿空气供应到阳极时可能保持高的电流密度,并且氢浓度在阳极侧上是低的。本发明的方法能够确保与高效以及因此更低的运行和装置成本组合的运行。

[0055] 图6显示了在不同的运行条件下使用厚膜和薄膜之间的能耗差异。线A-D显示了不

同条件的效果:

[0056] A: 厚膜 (125微米), 市售水电解器等价物。水在阴极和阳极上。低效, 但是安全运行 (阳极处低 H_2 浓度)

[0057] B: 薄膜 (27.5微米)。水在阴极和阳极上: 非常有效, 但是不安全的运行 (由于薄膜, 在阳极处非常高3.5体积%的 H_2 浓度)

[0058] C: 薄膜 (30微米)。水在阴极上和加湿空气在阳极上: 有效且安全运行 (由于稀释, 在阳极处低 H_2 浓度 (不可测出)。由于更干燥的阳极, 在高电流时电压增加)

[0059] D: 薄膜 (30微米)。在阴极上的较高压力的水和在阳极上的加湿空气: 非常有效且安全运行 (由于稀释的低 H_2 浓度 (不可测出), 以及由于通过较高的阴极压力将更多的水从阴极推到阳极的改进效率)

[0060] 当在阳极和阴极二者上使用水 (现有技术) 和厚膜, 线A, 获得了安全运行, 但是所述方法不是非常有效。使用薄膜和在阴极和阳极侧二者上的水, 线B, 是非常有效的, 但是不安全, 因为在 O_2 中的氢浓度增加到大于3体积% H_2 。当使用薄膜时, 能耗降低了大约20%。

[0061] 通过运行根据本发明的单元 (线C和D), H_2 的浓度保持在低水平, 即低于0.5%, 并且所述单元可以以与现有技术相比更高的电流密度和更低的能耗运行。

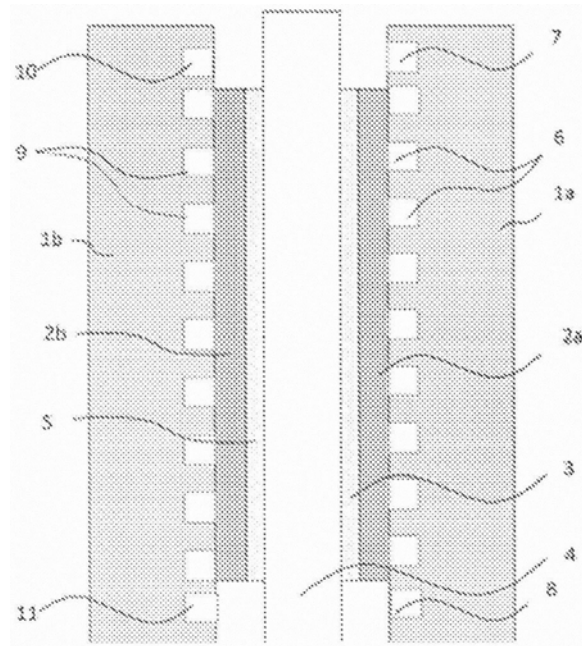


图1

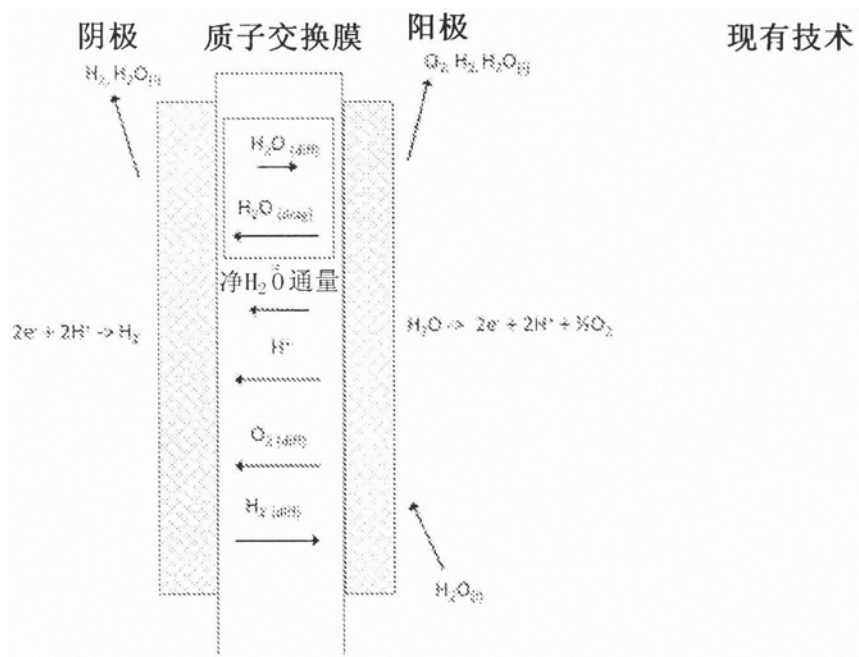


图2

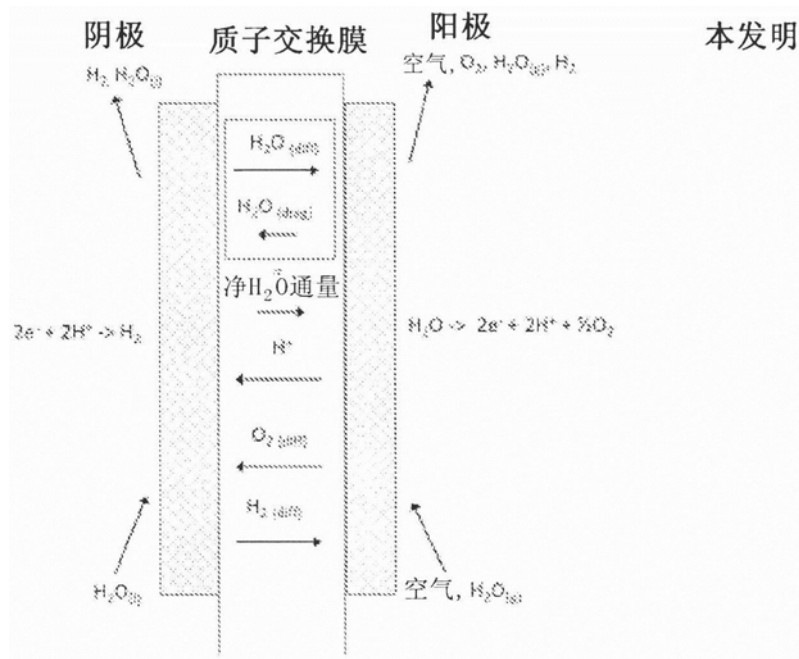
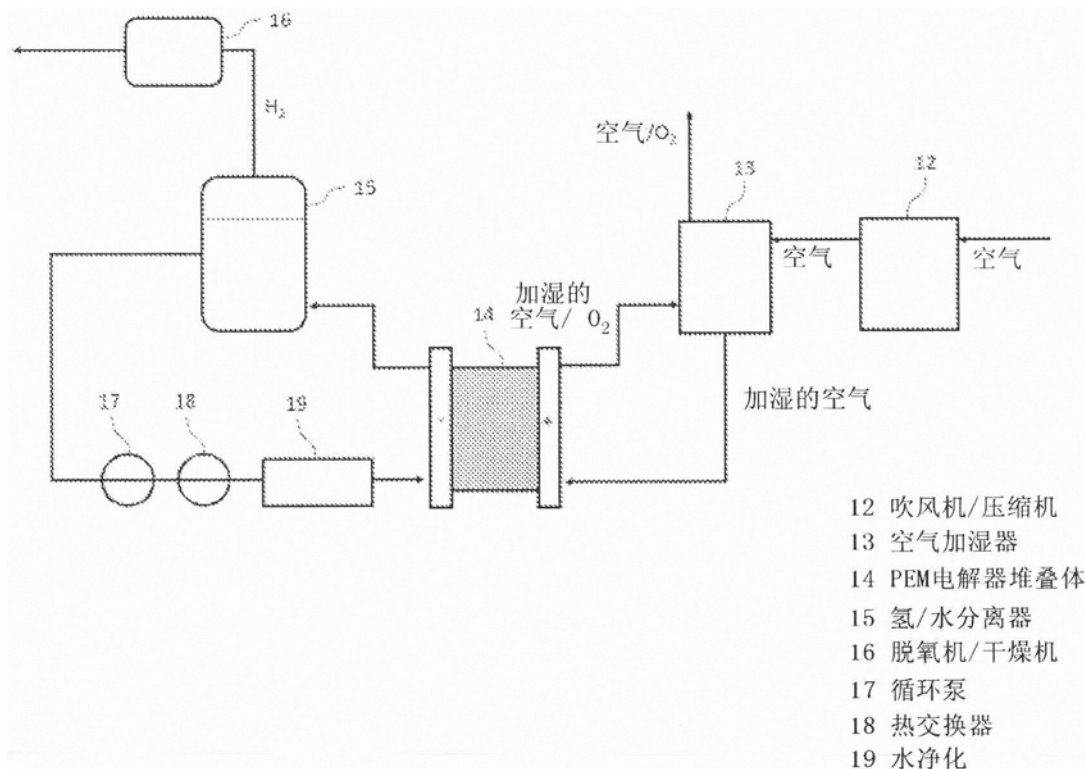


图3



- 12 吹风机/压缩机
- 13 空气加湿器
- 14 PEM电解器堆叠体
- 15 氢/水分离器
- 16 脱氧机/干燥机
- 17 循环泵
- 18 热交换器
- 19 水净化

图4

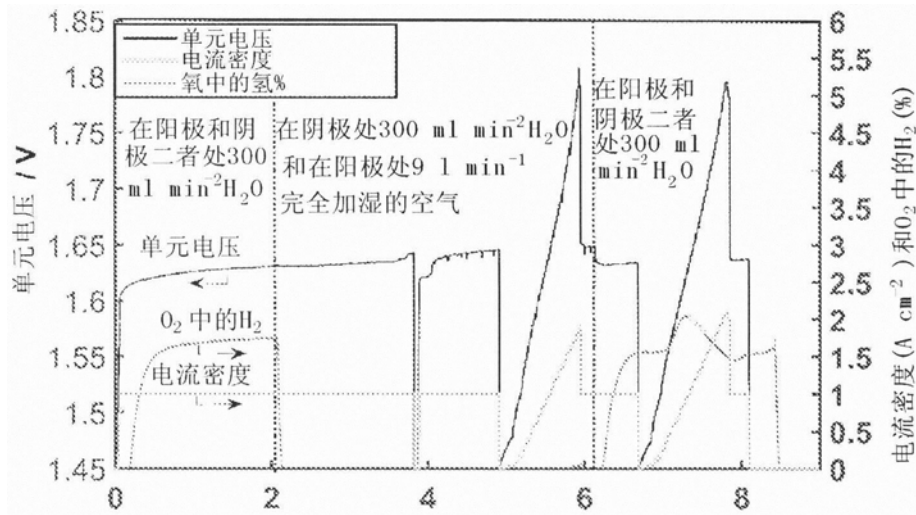


图5

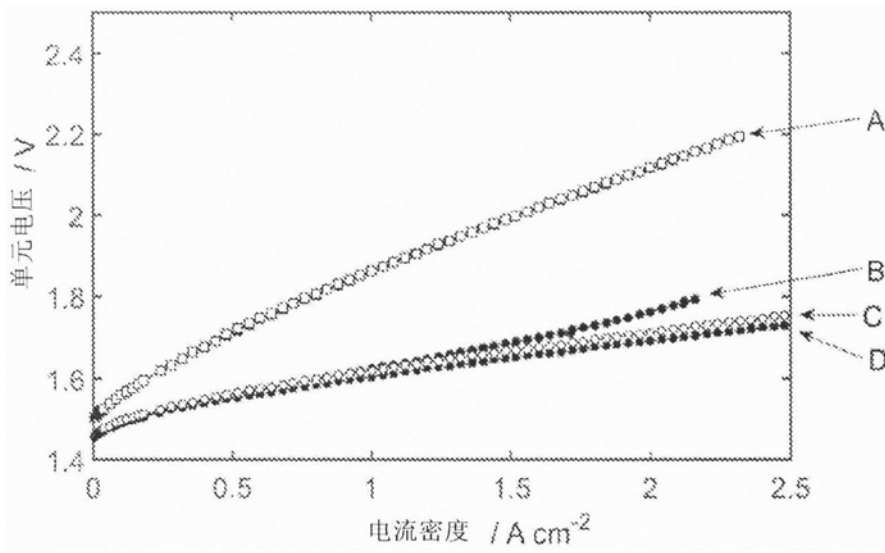


图6