



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103119294 B

(45)授权公告日 2017.04.12

(21)申请号 201180044911.9

(22)申请日 2011.07.19

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103119294 A

(43)申请公布日 2013.05.22

(30)优先权数据

61/365,390 2010.07.19 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2013.03.18

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/IL2011/000569 2011.07.19

(87)PCT国际申请的公布数据

W02012/011096 EN 2012.01.26

(73)专利权人 工业研究与发展基金会有限公司

地址 以色列海法

(72)发明人 耶胡达·阿戈诺恩 居伊·拉蒙

卡洛斯·多索莱茨

(74)专利代理机构 北京康信知识产权代理有限

责任公司 11240

代理人 张英 王玉桂

(51)Int.Cl.

F25B 9/00(2006.01)

F03G 7/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 85104889 A,1986.09.03,

CN 1055982 A,1991.11.06,

US 4489553 A,1984.12.25,

US 6804967 B2,2004.10.19,

US 2004/0231341 A1,2004.11.25,

JP 特開平10-115220 A,1998.05.06,

审查员 蔡勇

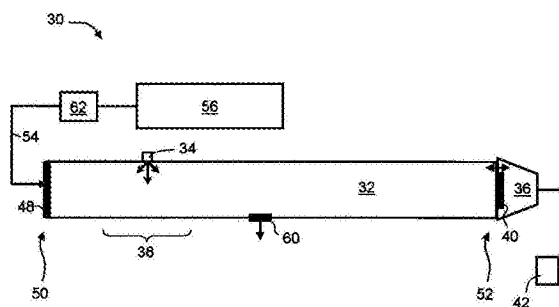
权利要求书2页 说明书28页 附图12页

(54)发明名称

用于能量转换的系统和方法

(57)摘要

用于转换能量的系统和方法;该系统包括:声学共振器(32);相交换装置(34),被构造为在所述共振器的一部分(38)上的由所述共振器容纳的气态介质中形成第一物质的浓度梯度,从而在所述共振器内产生压力波;以及转换装置(36),用于将由所述压力波构成的机械能转换成非机械能。



1. 一种转换能量的方法,包括:
使气态介质与非气态介质接触,以增加所述气态介质中的第一物质的浓度并释放能量;
将所述释放的能量的一部分直接转换成压力波;并且
将由所述压力波构成的机械能转换成非机械能。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述增加所述浓度和所述转换所述释放的能量的所述一部分包括,在包含所述气态介质的声学共振器的一部分上形成浓度梯度,并沿着所述浓度梯度维持所述第一物质的通量。
3. 根据权利要求2所述的方法,进一步包括,在所述声学共振器的一部分上还形成温度梯度。
4. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述非机械能包括电能。
5. 一种分配电力的方法,包括执行根据权利要求4所述的方法并分配所述电能。
6. 根据权利要求5所述的方法,其中,在输电线路连接的区域上分配所述电能。
7. 根据权利要求5所述的方法,其中,将所述电能分配至没有输电线路的位置。
8. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述非机械能包括热能。
9. 根据权利要求2-3中任一项所述的方法,其中,将对应于所述第一物质的流体重复地或连续地引入到所述声学共振器中,以产生所述压力波。
10. 根据权利要求9所述的方法,其中,将所述流体引入到所述压力波的压力节点与速度节点之间的所述声学共振器中。
11. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述声学共振器的一部分由吸附介质占据,其中,当所述气态介质流过所述吸附介质时,改变所述气态介质中的所述第一物质的所述浓度。
12. 根据权利要求11所述的方法,其中,将所述吸附介质容纳在多孔堆叠中。
13. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述流体处于非气态状态中。
14. 根据权利要求9所述的方法,其中,在所述压力波的压力节点处从所述声学共振器排出多余的流体。
15. 根据权利要求2和3中任一项所述的方法,其中,通过线性交流发电机来进行所述机械能的所述转换。
16. 根据权利要求2和3中任一项所述的方法,其中,所述机械能的所述转换缺乏移动部件。
17. 根据权利要求2和3中任一项所述的方法,其中,通过电容器来进行所述机械能的所述转换,其中,所述压力波动态地改变所述电容器的电容。
18. 根据权利要求2和3中任一项所述的方法,其中,通过热声热泵来进行所述机械能的所述转换。
19. 一种冷冻方法,包括,执行根据权利要求18所述的方法并使用所述热泵来冷冻。
20. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述第一物质是水蒸汽。
21. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述气态介质包括空气和水蒸汽。
22. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述第一物质包括氨和二氧化碳。
23. 一种用于转换能量的系统,包括:

声学共振器；

相交换装置，被构造为在所述声学共振器的一部分上在由所述声学共振器容纳的气态介质中形成第一物质的浓度梯度，从而在所述声学共振器内产生压力波；以及
转换装置，用于将由所述压力波构成的机械能转换成非机械能。

24. 根据权利要求23所述的系统，进一步包括第一热交换器和第二热交换器，其处于不同温度并与所述声学共振器的所述一部分的相对侧热连通，从而还在所述一部分上形成温度梯度。

25. 根据权利要求23所述的系统，其中，所述非机械能包括电能。

26. 一种用于产生电力的系统，包括根据权利要求25所述的用于转换能量的系统。

27. 根据权利要求26所述的系统，其中，在输电线路连接的区域上分配所述电能。

28. 根据权利要求26所述的系统，其中，将所述电能分配至没有输电线路的位置。

29. 根据权利要求23所述的系统，其中，所述非机械能包括热能。

30. 根据权利要求23-29中任一项所述的系统，其中，将对应于所述第一物质的流体重复地或连续地引入到所述声学共振器中，以产生所述压力波。

31. 根据权利要求30所述的系统，其中，将所述流体引入到所述压力波的压力节点与速度节点之间的所述声学共振器中。

32. 根据权利要求30所述的系统，其中，所述声学共振器的所述一部分由吸附介质占据，其中，当所述介质流过所述吸附介质时，改变所述介质中的所述第一物质的所述浓度。

33. 根据权利要求32所述的系统，其中，将所述吸附介质容纳在多孔堆叠中。

34. 根据权利要求30所述的系统，其中，所述流体处于非气态状态中。

35. 根据权利要求30所述的系统，其中，在所述压力波的压力节点处从所述声学共振器排出多余的流体。

36. 根据权利要求23-29中任一项所述的系统，其中，通过线性交流发电机来进行所述机械能的所述转换。

37. 根据权利要求23-29中任一项所述的系统，其中，所述机械能的所述转换缺乏移动部件。

38. 根据权利要求23-29中任一项所述的系统，其中，通过电容器来进行所述机械能的所述转换，其中，所述压力波动态地改变所述电容器的电容。

39. 根据权利要求23-29中任一项所述的系统，其中，通过热声热泵来进行所述机械能的所述转换。

40. 一种冷冻系统，包括根据权利要求39所述的用于转换能量的系统。

用于能量转换的系统和方法

[0001] 相关申请

[0002] 本申请要求2010年7月19日提交的美国临时专利申请号61/365,390的优先权,将其内容结合于此以供参考,好像完全在这里阐述的一样。

技术领域

[0003] 本发明在其一些实施方式中涉及可再生能源,更特别地,但是并非唯一地,涉及一种用于基于相交换过程进行能量转换的系统和方法。

背景技术

[0004] 根据热力学原理,气体中的声功率和其他形式的功一样有价值,例如,电功率,旋转轴功率,以及水力。例如,可使用声功率产生冷冻,例如在孔脉冲管冷冻机中;可利用其经由线性交流发电机产生电力,并且,可用其产生旋转轴功率,例如,通过韦尔斯涡轮机。此外,可在各种热力发电机中从热量产生声功率,例如,斯特林发动机和热声发动机。

[0005] 19世纪早期的斯特林热空气发动机是第一台在密封系统中使用气体的振荡压力和振荡体积流速的发动机,尽管其时间平均的乘积并不叫做声功率。然后认识到,如果对该系统提供机械能,那么可颠倒斯特林循环以产生有用的冷冻。

[0006] 迄今为止,已经开发了许多种与斯特林循环相关的发动机和冷冻机。这些包括斯特林冷冻机,爱立信发动机,孔脉冲管冷冻机,驻波热声发动机和冷冻机,自由活塞斯特林发动机和冷冻机,以及热声-斯特林混合发动机和冷冻机。其组合,例如Vuilleumier冷冻机和热声驱动的孔脉冲管冷冻机,已经提供了热驱动的冷冻。

[0007] 随着禁止生产含氯氟烃(CFC),对热声学的兴趣已经快速增加。例如,可这样构造热声冷冻机,使得其仅使用惰性气体,其是无毒的,并且不会导致臭氧耗竭,也不会导致全球变暖。在美国专利号4,398,398,4,489,553,4,722,201,5,303,555,5,647,216,5,953,921,6,032,464和6,314,740中公开了示例性的热声发动机和冷冻机,将这些专利的内容结合于此以供参考。

[0008] 在传统的斯特林发动机中,例如,在高温热交换器处对发动机增加高温热量,并在环境温度热交换器处从发动机去除环境温度废热。包含小孔(在其中具有气体)的固体基质(也称作回热器(再生器))平稳地横跨高温热交换器和环境温度热交换器之间的温差。回热器(再生器)上的温度梯度提供在孔内产生气体振荡的条件,从而将在高温热交换器处进入的热量转换成声功率。回热器的孔中的气体在压力较高时朝着高温热交换器移动,并在压力较低时朝着环境温度热交换器移动。因此,使气体的振荡的热膨胀和收缩相对于振荡压力而暂时变相,伴随其沿着孔中的温度梯度的振荡运动,使得,当压力较高时出现热膨胀,并当压力较低时出现热收缩。

发明内容

[0009] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于转换能量的方法。该方

法包括,从外部源接收能量,使用所接收的能量来导致质量交换过程,以释放热力能,并将热力能直接转换成足以与其一起做功的量的电能。

[0010] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种转换能量的方法。该方法包括,使气态介质与非气态介质接触,以增加气态介质中的第一物质的浓度并释放能量,将所释放的能量的部分直接转换成压力波,并将由压力波构成的机械能转换成非机械能。

[0011] 根据本发明的一些实施方式,增加浓度并转换所释放的能量的部分包括,在包含气态介质的声学共振器的部分上形成浓度梯度,并沿着该梯度维持第一物质的通量(流量, flux)。

[0012] 根据本发明的一些实施方式,该方法包括,在共振器的部分上还形成温度梯度。

[0013] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于转换能量的系统。该系统包括:声学共振器;相交换装置,被构造为在共振器的一部分上的由共振器限制的气态介质中形成浓度梯度,从而在共振器内产生压力波;以及转换装置,用于将由压力波构成的机械能转换成非机械能。

[0014] 根据本发明的一些实施方式,该系统包括第一热交换器和第二热交换器,其处于不同温度下,并与共振器的所述部分的相对侧热连通,从而还在该部分上形成温度梯度。

[0015] 根据本发明的一些实施方式,非机械能包括电能。

[0016] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于产生电力的系统,包括如上所述的能量转换系统。

[0017] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种分配电力的方法,包括,执行如上所述的方法并分配电能。

[0018] 根据本发明的一些实施方式,在输电线路(格栅, grid)连接的区域上分配电能。

[0019] 根据本发明的一些实施方式,将电能分配至没有输电线路的位置。

[0020] 根据本发明的一些实施方式,非机械能包括热能。

[0021] 根据本发明的一些实施方式,将相当于第一物质的流体重复地或连续地引导到共振器中,以产生压力波。

[0022] 根据本发明的一些实施方式,将流体引导到压力节点和压力波的速度节点之间的共振器中。

[0023] 根据本发明的一些实施方式,共振器的所述部分由吸附介质(吸附剂介质)占据,其中,当介质流过吸附介质时,改变该介质中的第一物质的浓度。

[0024] 根据本发明的一些实施方式,将吸附介质包含在多孔堆叠中。

[0025] 根据本发明的一些实施方式,该流体处于非气态状态中。

[0026] 根据本发明的一些实施方式,在压力波的压力节点处或其附近从共振器排出多余的流体。

[0027] 根据本发明的一些实施方式,通过线性交流发电机来转换机械能。

[0028] 根据本发明的一些实施方式,不用移动零件来转换机械能。

[0029] 根据本发明的一些实施方式,通过电容器转换机械能,其中,压力波动态地改变电容器的电容。

[0030] 根据本发明的一些实施方式,通过热声热泵转换机械能。

[0031] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种冷冻的方法。该方法包括,执

行如上所述的方法,并利用热泵来冷冻。

[0032] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种冷冻系统,其包括如上所述的能量转换系统。

[0033] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种产生电流的方法。该方法包括,在带电的电容器内的气态介质中形成第一物质的浓度梯度,以用振荡方式改变电容器的电容;并提取通过电容的变化产生的振荡电流。

[0034] 根据本发明的一些实施方式,电容器包括被选择为改变第一物质的浓度的吸附介质,其中,形成梯度包括,将第一物质的处于减小含量或零含量的状态中的气态介质引导至电容器中。

[0035] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于产生电流的系统。该系统包括:带电电容器,处于通常恒定的电压下和/或具有通常恒定的电荷;第一物质的来源,用于在电容器内的气态介质中形成第一物质的浓度梯度,以用振荡方式改变电容器的电容;以及电路,被构造为提取通过电容的变化产生的振荡电流。

[0036] 根据本发明的一些实施方式,蒸汽源是电容器内的吸附介质。

[0037] 根据本发明的一些实施方式,第一物质是水蒸汽。

[0038] 根据本发明的一些实施方式,气态介质包括空气和水蒸汽。

[0039] 根据本发明的一些实施方式,第一物质是除了水蒸汽以外的物质。

[0040] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种材料分离的方法。该方法包括,将具有至少第一物质和第二物质的流体介质引导到声学共振器中;在共振器中产生压力波,以在共振器内形成高浓度的第一物质的区域和低浓度的第一物质的区域;并形成高浓度的区域,从共振器中提取第一物质,从而至少将第一物质与流体介质分离。

[0041] 根据本发明的一些实施方式,该方法进一步包括,储存至少与流体介质分离的第一物质,从而储存相分离能量;并稍后用第一物质转换相分离能量。

[0042] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于材料分离的系统。该系统包括:声学共振器,被构造为接收至少第一物质和第二物质的流体介质;压力波驱动器,用于在共振器中产生压力波,以在共振器内形成高浓度的第一物质的区域和低浓度的第一物质的区域;以及流体提取件,被构造为从共振器的高浓度区域中提取第一物质。

[0043] 根据本发明的一些实施方式,压力波源包括热声发动机。

[0044] 根据本发明的一些实施方式,该系统包括:至少一个储存容器,用于储存至少从流体介质分离的第一物质,从而储存相分离能量;以及能量转换系统,用于转换相分离能量。

[0045] 根据本发明的一些实施方式,共振器部分地由吸附介质占据,其中,在吸附介质内形成高浓度和低浓度的第一物质的区域。

[0046] 根据本发明的一些实施方式,对第一物质选择吸附介质,并且,吸附介质与流体介质中的任何其他物质具有惰性关系。

[0047] 根据本发明的一些实施方式,第一物质是水蒸汽。

[0048] 根据本发明的一些实施方式,流体介质包括空气和水蒸汽。

[0049] 根据本发明的一些实施方式,第一物质是除了水蒸汽以外的物质。

[0050] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种材料分离的方法。该方法包括,将具有至少第一物质和第二物质的流体介质引导至电气系统中;并对电气系统施加电

压,以形成足以在电气系统内导致吸附至少第一物质的电场,从而至少从流体介质分离第一物质。

[0051] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种热声系统。该系统包括:共振器,在其中具有至少一个处于温度梯度下的热声单元;以及相交换装置,被构造为在热声单元上的由共振器包含的气态介质中形成第一物质的浓度梯度。

[0052] 根据本发明的一些实施方式,该至少一个热声单元选自由回热器发动机单元、堆叠发动机单元、回热器冷冻机单元,以及堆叠冷冻机单元组成的组。

[0053] 根据本发明的一些实施方式的一个方面,提供了一种用于转换能量的系统。该系统包括:共振器,在其中具有至少一个处于温度梯度下的湿式热声发动机,和带电电容器,处于通常恒定的电压下和/或具有通常恒定的电荷,其中,将该湿式热声发机构造为,在共振器内产生压力波,由此也以振荡方式改变电容器的电容;以及电路,被构造为提取通过电容的变化产生的振荡电流。

[0054] 除非另外定义,否则这里使用的所有技术和/或科学术语具有与本发明所属领域中的普通技术人员通常所理解的相同的含义。虽然在本发明的实施方式的实践或测试中可使用与这里描述的那些方法和材料相似或等价的方法和材料,但是以下描述了示例性的方法和/或材料。在冲突的情况中,将以专利说明书(包括定义)为准。另外,材料、方法和实例仅是说明性的,并非旨在是必须限制性的。

附图说明

[0055] 参考附图,这里仅通过实例描述了本发明的一些实施方式。现在特别详细地参考附图,应强调,为了说明性地讨论本发明的实施方式的目的,通过实例示出细节。在这点上,结合附图进行描述使得对于本领域的技术人员来说,如何实践本发明的实施方式是显而易见的。

[0056] 在图中:

[0057] 图1是描述了根据本发明的一些实施方式的适于转换能量的方法的流程图;

[0058] 图2是描述了根据本发明的一些实施方式的适于经由压力波转换能量的方法的流程图;

[0059] 图3A-B是以简化的方式举例说明了在本发明的一些实施方式中用于能量转换的热力学过程的示意图;

[0060] 图4A-C是根据本发明的各种典型实施方式的用于转换能量的系统的示意图;

[0061] 图5A-E是以简化的方式举例说明了在本发明的一些实施方式中用于材料分离的热力学过程的示意图;

[0062] 图6是描述了根据本发明的一些实施方式的适于用压力波分离材料的方法的流程图;

[0063] 图7是描述了根据本发明的一些实施方式的适于用电场分离材料的方法的流程图;

[0064] 图8是根据本发明的一些实施方式的适于分离材料的系统的示意图;

[0065] 图9是根据本发明的一些实施方式的热声系统的示意图;

[0066] 图10是在根据本发明的一些实施方式执行的计算中使用的模型几何形状的示意

图；

[0067] 图11示出了通过堆叠的成比例的功率流，其是所施加的浓度梯度的函数，如根据本发明的一些实施方式对反应物质的平均摩尔分数的各种值 C_i 计算的；

[0068] 图12A-B示出了通过堆叠的成比例的功率流上的振荡频率 f 和所施加的浓度梯度 $\Delta C/L_s$ 的结果，如根据本发明的一些实施方式计算的；

[0069] 图13A-B分别示出了热和漫射干扰次数 α_K 和 α_D 方面的稳定性曲线；

[0070] 图14是根据本发明的一些实施方式构造的原型系统的示意图；

[0071] 图15A-B示出了RMS声压幅值，其是频率的函数，如在根据本发明的一些实施方式利用图14的原型系统执行的实验中测量的。

具体实施方式

[0072] 本发明在其一些实施方式中涉及可再生能源，更特别地，但是并非唯一地，涉及一种基于相交换过程进行能量转换的系统和方法。

[0073] 在详细地说明本发明的至少一个实施方式之前，将理解，本发明并非必须将其应用限制于在以下描述中阐述和/或在附图和/或实例中示出的部件的结构与布置和/或方法的细节。本发明能够是其他实施方式，或以各种方式实践或执行。

[0074] 本发明的发明人已经发现了利用能量变化的能量转换技术，该能量变化是，当增加或减小介质内的一种或多种气体的相对浓度时，气态介质所经历的能量变化。例如，本发明的发明人发现，可通过外部负载转换并利用在增加气态介质的蒸汽含量时释放的能量。相反，本发明的发明人发现，可利用机械能或电能从气态介质中分离一种或多种气体。

[0075] 在本发明的一些实施方式中，该技术涉及在气态介质内形成压力波（例如，声波）。如果需要，该压力波通常可以是驻波或行波。在一些实施方式中，形成压力波所需的能量来自在增加气态介质中的特殊气体的浓度时释放的能量。在本发明的一些实施方式中，形成压力波所需的能量来自外部源。

[0076] 在本发明的一些实施方式中，在不产生压力波的情况下转换能量。例如，可利用辐射能和/或热能来导致介质内的物质的相对浓度的变化。根据本发明的一些实施方式，直接利用这些变化中的能量差来产生电能。

[0077] 现在参考附图，图1是描述了根据本发明的一些实施方式的适于转换能量的方法的流程图。

[0078] 该方法在1开始，并继续至2，在2处，从外部源接收能量。该方法继续至3，在3处，使用所接收的能量来引起质量交换过程。

[0079] 如这里使用的，“质量交换”是指存在从第一相到第二相的特定物质的质量流的过程，其中，第一相与第二相不同。第一和第二相可以是任何热力相，包括，但不限于，气相和非气相，液相和固相，等等。

[0080] 然后，该方法继续至4，在4处，将在质量交换过程中释放的热力能量转换成有用的能量，例如，适于做功的能量，例如电能或机械能。该方法在5结束。

[0081] 图2是描述了将气相和非气相之间的质量交换转换成机械能的实施方式中的方法的流程图。该方法在10开始，并继续至12，在12处，增加气态介质内的气相中的第一物质的浓度，以释放能量。可选地，11在12之前，在11处，加热气态介质。典型地，通过在气态介质和

非气态介质之间建立相互作用,更特别地,在气态介质内的其气相中的第一物质的分子和非气态介质内的非气相(冷凝的或吸附的)中的第一物质的分子之间建立相互作用,来增加浓度。因此,第一物质用作气体和非气体介质中的活性成分,从而在这里可互换地称作“活性物质(反应性物质)”。

[0082] 下面,将互换地使用术语“第一气体”和“活性气体”,以描述当其处于其气相中时的活性物质。

[0083] 虽然下面用单数形式“活性物质”描述实施方式,但是,应理解,其并非旨在将本发明的范围限制于仅在气态和非气态介质内使用一种活性物质。因此,本发明的一些实施方式预期使用两种或多种活性物质。

[0084] 该活性物质可以是任何当增加其气相中的其质量浓度或分压力时释放足够量的能量的类型。一个实例是水蒸汽。当对气态介质增加水蒸汽时,例如,但不限于,减小的湿度的空气,释放能量。通常,任何在一定范围的工作温度和压力内可共存于气相和非气相中的材料,可用作活性物质的源。代表性实例包括,但不限于,分子筛(例如,沸石等),活性碳,硅胶和碳纳米管,作为固体吸附材料。还预期使用吸湿盐溶液,例如,但不限于,作为吸附介质的LiBr,特别是对于水蒸汽的情况。其他适于本实施方式的液体-气体对,包括,但不限于,(NH₄)₂CO₃(碳酸铵)的水溶液及其气相(氨和二氧化碳)。

[0085] 除了活性物质以外,气态介质可选地并优选地还包括一种或多种其他类型的气体,其留在它们的气相中,并且,当接触非气态介质时,不会经历相变。这些气体在下面称作非活性气体。应理解,非活性气体并非必须是稀有气体(惰性气体)(虽然本发明的范围并不排除稀有气体),因为任何在接触非气态介质的同时不经历相变的气体可用作非活性气体。适于本实施方式的非活性气体的代表性实例包括,但不限于,空气、氮气、氦气、氟气、氩气、氪气和氙气。

[0086] 包括相同物质的气相和非气相的物理系统(其中,将气相与非气相分离)组成可转换的相分离能量。本实施方式的方法彼此分离地提供气态介质和非气态介质,并通过对这些介质之间的相互作用产生条件使得在气态介质和非气态介质之间存在活性物质的质量交换,来转换其相分离能量。

[0087] 在本发明的各种示例性实施方式中,质量交换是这样的过程,其中,一个相中的物质的质量浓度或分压(分压力)的增加,伴随着另一相中的物质的质量浓度或分压的减小(并且是其直接的结果)。质量交换可以是这样的过程,其中,气相物质的质量浓度或分压的增加,伴随着其非气相中的物质的质量浓度或分压的减小(并且是其直接的结果)。质量交换还可以是这样的过程,其中,其非气相中的物质的质量浓度或分压的增加,伴随着其气相中的物质的质量浓度或分压的减小(并且是其直接的结果)。认识到,当两个相的总质量不同时,该过程中的质量浓度或分压的变化量也不同,并认识到,在一些情况中,与相应相的总质量相比,一个相中的质量浓度或分压力的变化可以非常小。然而,将质量交换定义为从一个相到另一相的质量流,即使一个相中的质量浓度或分压的变化过小以至于检测不到。

[0088] 下面,使用术语“双向质量交换”来描述这样的过程,在该过程的一部分时间内,由于其非气相中的物质的质量浓度或分压的减小而导致气相物质的质量浓度或分压的增加,并且,在该过程的一部分时间内,由于其气相中的物质的质量浓度或分压的减小而导致相反方向上的质量交换,即,其非气相中的物质的质量浓度或分压的增加。

[0089] 当增加气相的质量浓度或分压时,活性物质经历从气相到非气相的相变。该相变可经由冷凝和/或吸附和/或沉积。当减小气相的质量浓度或分压时,活性物质经历从非气相到气相的相变。该相变可经由蒸发和/或解吸和/或升华。

[0090] 术语“冷凝”是指物质从气相到液相的物理状态的变化。

[0091] 术语“吸附”是指其吸收、吸附或其组合的过程,并且“解吸”是指相应的相反过程。

[0092] 预期任何类型的吸附,包括,但不限于,化学吸附、静电吸附和物理吸附。化学吸附是指,通过溶质与非气态介质的共价和氢键结合导致的吸附,静电吸附由带电分子通过离子-离子和离子-偶极子力对非气态介质的带电表面的吸引产生,并且,物理吸附是由伦敦分散力和疏水键合组成的范德华力的结果。通过使从电子在其轨道中的运动产生的偶极子和四极子快速地波动,来产生伦敦力,并且,疏水键合是由从气态介质向非气态介质排斥物质所导致的热力梯度的结果。

[0093] 因此,在本发明的各种示例性实施方式中,在气态介质和非气态介质之间存在相交换,其中,相交换可以是将气体分子吸附在非气态介质中,并且将所吸附的分子解吸到气态介质中。具体地,本实施方式预期将活性气体的分子吸收到液体中,将所吸收的分子从液体中解吸出来,在活性气体的分子吸附到固体上,将所吸附的分子从固体中解吸出来,将活性气体冷凝成纯液相,并蒸发纯液相以形成活性气体。

[0094] 在本发明的一些实施方式中,相交换经由吸附和解吸过程,除了将气体冷凝成纯液体以外,和除了将纯液体蒸发成蒸汽以外。

[0095] 非气态介质可以是任何的类型,只要其可经由任何上述质量交换过程与气态介质交换质量。优选地,该方法在活性物质的气相和非气相之间不存在平衡的情况中操作。这可这样实现:选择具有足够质量容量以产生从气态介质流出活性物质的非气态介质。

[0096] 在本发明的一些实施方式中,以选择性的方式在气态介质和非气态介质之间进行质量交换,使得气态介质中的其他物质留在其气相中。

[0097] 适于本实施方式的非气态介质的代表性实例包括,但不限于,液滴的射流、吸附固体、吸收液体(例如液膜,例如但不限于,自由流动的液膜)、饱和和多孔介质等。因此,非气态介质用作与气态介质交换质量的源/槽。

[0098] 在这里,用术语“吸附介质”来定义这样的材料或结构,其具有将一种物质或多种物质的分子冷凝、吸附或另外保持在其表面上的能力,和/或,例如,通过分子渗透入其内部结构或渗透入其孔中来捕获该物质或多种物质的分子的能力。使用术语“选择性吸附介质”来定义这样的吸附材料,其在没有冷凝、吸附或另外保持其他物质的分子的情况下,来冷凝、吸附或另外保持一下物质的分子。下面提供了适于本实施方式的吸附介质的代表性实例。

[0099] 根据本发明的一些实施方式来构造相交换的效果,以在气态介质上做功,并形成压力波。这可以以多于一种的方式来实现。在本发明的一些实施方式中,经由导致增加的体积的最大压缩的点处或其附近的质量增加,来做功。在本发明的一些实施方式中,经由导致减小的体积的最大稀释的点处或其附近的质量减小,来做功。在本发明的一些实施方式中,经由最大稀释的点处或其附近的潜热吸收,来做功,从而在低压下导致收缩并做功。在本发明的一些实施方式中,经由最大压缩的点处或其附近的潜热释放,来做功,从而在高压下导致膨胀并做功。因此,在本发明的各种示例性实施方式中,将活性物质(气态或液态)重复地

或连续地引导至共振器中,以产生压力波。

[0100] 可选地和优选地,该方法继续至13,在13处,在共振器的部分上还形成温度梯度,以释放额外的能量,例如,如在热声学领域中已知的。

[0101] 该方法继续至14,在14处,将所释放的能量的一部分直接转换成压力波。一种用于将所释放的能量转换成压力波的示例程序是,通过形成浓度梯度并沿着浓度梯度(从高浓度向低浓度)保持活性气体的非零时间平均通量。本发明的发明人发现,这样的梯度和通量可用作用于促使气态介质内的波动的能源,该波动确保不稳定性并导致形成压力波。在本发明的发明人进行的计算中,已经发现,包含气体混合物的气态介质中的每个单位体积的平均声功率流随着气态介质内的气体成分的相对压力(例如,蒸汽压力)而增加。在以下实例部分中提供了更多与所发现的现象相关的细节。

[0102] 参考图2A和图2B,可从以下非限制性实例中更好地了解热力学过程。虽然特别强调蒸汽地描述本实例,例如水蒸汽,但是应理解,并不能将对蒸汽的更详细的参考解释为以任何方式限制本发明的范围。

[0103] 在压力波的一个振荡周期期间,预期代表性的气体“包”。首先考虑压力驻波,其中,压力和位移是同相的。在这种情况下,当由压力波移动时,该包经历压力变化。这些压力变化伴随温度变化,其中,膨胀伴随着冷却,并且压缩伴随着加热。

[0104] 在本实例中,该包与蒸汽的源接触,实现从气相到非气相的相变,并且反之亦然。对压力波的驱动力是浓度差,其导致吸附或解吸。

[0105] 图3A示出了本实例的包所经历的一个热力循环,并且图3B示出了相应的P-V图。首先移动并压缩该包(参见图3A-3B中的过渡线1-2)。由于蒸汽压力梯度的原因,其蒸汽压力比局部蒸汽压力高,不管是否压缩。这引起解吸,其导致与高压相反地膨胀(过渡线2-3)。接下来,用压力波移动包并使其膨胀(过渡线3-4)。不管是否膨胀,其蒸汽压力仍比局部平衡蒸汽压力高,其在低压下导致吸附和收缩(过渡线4-1)。分别在高压段和低压段的过程中出现的膨胀和收缩重新增强并放大压力波,产生净功,与兰金循环类似。

[0106] 应理解,以上描述是为了说明目的,并应将其解释为,将本发明的范围限制于使用理想化压力驻波的方法和系统。当压力波不是纯驻波时,即,压力和位移之间的相差较小但不是零的驻波,根据本发明的一些实施方式的方法和系统起作用。

[0107] 如这里使用的,术语“通常是压力驻波”是指压力和位移之间的相差小于 0.1π 或小于 0.09π 或小于 0.08π 或小于 0.07π 或小于 0.06π 或小于 0.05π 或小于 0.04π 或小于 0.03π 或小于 0.02π 或小于 0.01π 的压力波。

[0108] 其次考虑压力和速度是同相的行波。在这种情况下,循环变得与斯特林循环类似,如现在将说明的。压力和位移现在是异相的,并且首先移动气体包,然后将其压缩/膨胀。在行波系统中,吸附介质和气体优选地是紧密接触的关系,使得孔上的特征长度规比振荡循环过程中的漫射长度规小得多。该紧密接触确保,在其移动过程中,该包保持其与吸附介质的局部平衡(这与斯特林发动机中的回热器类似)。假设首先将该包移动至低浓度的区域。由于其遵循局部平衡分压,所以其在其移动过程中已经膨胀。然后,用压力波将其压缩,在低压下做功。然后将包移动至高浓度的区域,在该过程中将其压缩。然后,用压力波使其膨胀,再次做功。该循环的一个优点是,在移动过程中实现的膨胀和压缩非常接近平衡,使得减小或避免由陡梯度导致的不可逆性和损失。

[0109] 因此,本实施方式通过改变气态介质中的气体成分的相对浓度,来成功地形成压力波。再次参考图2,该方法继续至15,在15处,将由压力波组成的机械能转换成非机械能。

[0110] 本发明的发明人预期许多类型的非机械能。在本发明的一些实施方式中,非机械能包括电能。可使用压力波以多于一种的方式产生电能。在本发明的一些实施方式中,压力波在交流发电机中产生运动,例如,线性交流发电机,其将机械运动转换成电流,例如,通过本领域中已知的感应。在本发明的一些实施方式中,通过以现在将说明的方式改变电容器系统的电容,将压力波的能量转换成电能。

[0111] 电容是物理可观察量,归因于导体或导体的系统,可能将该可观察量静电地定义为导体上的电荷的变化与从该变化产生的电位降之间的比例。电容器系统的电容C取决于其几何形状和介电材料,如果存在的话,其与电容器的导电元件相邻。例如,对于平行板电容器,电容与板的面积成正比,并与介电材料的介电系数成正比,并与其与板之间的距离成反比。因此,可以通过改变介电系数来实现电容的变化。

[0112] 因此,根据本发明的一些实施方式,使压力波进入电容器系统,其中,气态介质的气体成分的相对浓度的变化,经由上述相交换过程,导致电容器系统的介电系数的变化。接着,通过将电容器系统与电路连接并确保电容器系统上的电荷或电容器系统上的电压是恒定的,这导致根据本发明的一些实施方式转换成电流的电容变化。由于电荷 q 等于电压 V 乘以电容 C ,时变电容 dc/dt ,所以,当电压是恒定的时,产生电流 dq/dt ,或者反之亦然。

[0113] 因此,本发明的一些实施方式的一个方面涉及一种适于通过以下方式产生电流的方法:沿着纵向方向(通常垂直于电容器系统内的电场线的方向)在带电电容器系统内的气态介质中形成活性物质的浓度梯度,以用振荡方式改变电容器系统的电容,并提取通过电容变化产生的振荡电流。原则上,可颠倒该过程,其中,在电容器系统上施加电压(例如交流电压)可在电容器系统和电容器内的活性介质之间产生质量交换。下面更详细地描述了涉及本发明的该实施方式的过程(例如,参见图7和所附描述)。

[0114] 还预期经由压电效应将压力波的机械能转换成电能的实施方式。

[0115] 在本发明的一些实施方式中,非机械能包括热能。例如,可以使用产生的压力波作为热声热泵中的机械驱动力。例如,在美国专利号7,263,837,6,804,967和6,688,112中,以及在美国公开申请号20100172213和20090268556中找到了适于本实施方式的代表性热声热泵,将这些专利的内容结合于此以供参考。

[0116] 在本发明的各种典型实施方式中,不用移动零件来转换机械能。例如,这可通过利用电容器系统将能量直接转换成电能,或利用热声热泵直接转换成热能来实现,如上所述。本发明的范围并不排除其他技术。

[0117] 在本发明的各种示例性实施方式中,该方法继续至16,在16处,排出多余的流体。可在压力波的压力节点处或其附近排出流体。排出的流体可选地且优选地是气相,并且,与用该方法接收的气态介质相比,包括更高浓度的活性物质。因此,本实施方式的方法接收与非气态介质分离的气态介质,其中,活性物质的浓度在非气态介质中比在气态介质中高,并提供具有升高的浓度的通过端口的活性物质的混合物。用该方法将输入端的能量和输出端的能量之间的能量差的至少一部分转换成压力波,然后转换成非机械能。

[0118] 该方法可选地且优选地继续至17,在17处,分配非机械能。例如,可在输电线路连接的区域中的输电线路路上分配电能,以产生分配的电,或局部分配至一个或多个没有输电

线路的区域,例如,但不限于,乡村地区,发展中国家。没有输电线路的应用包括,但不限于,电通信,乡村水和灌溉泵送,以及专用电源,例如小型家用系统。

[0119] 在本发明的各种示例性实施方式中,该方法返回至11或12,以执行多个能量转换的循环。

[0120] 该方法在18结束。

[0121] 可在各种应用中使用本实施方式的方法。通常,当将压力波的机械能转换成电能时,可利用该方法对任何电驱动的器具供电,直接供电或经由在输电线路连接的区域或没有输电线路的区域上分配能量的电能分配系统。例如,可利用本实施方式的方法进行冷冻或气候控制,由此,将电能传递至执行冷冻或气候控制的冷冻或气候控制系统。

[0122] 还可利用基本上不使用电能的本实施方式的方法。具体地,当该方法提供的非机械能是除了电能以外的能量时,可直接用该能量对适当的器具系统供电。这种系统的一个代表性实例是热声热泵,例如,一个上述热声热泵。在这些实施方式中,例如,可利用压力波在热堆叠上从堆叠的冷侧向堆叠的热侧传送热能,从而实现冷冻。

[0123] 现在参考图4A和图4B,其是根据本发明的各种示例性实施方式的用于转换能量的系统30的示意图。例如,系统30可用于执行以上参考图2描述的方法的一个或多个操作。系统30包括:具有第一端50和第二端52的声学共振器32、相交换装置34和转换装置36。相交换装置34在共振器32的部分38上形成纵向浓度梯度,由共振器32包含的气态介质,从而在共振器32内产生压力波。相交换装置34的位置可能根据系统的特殊设计而变化,例如,工作流体、共振频率、压力幅度和其他参数的选择。在一些实施方式中,装置34位于通常驻波的压力和速度节点之间大约一半的地方。

[0124] 将共振器32的形状构造为管道,优选地具有通常圆形(例如圆形)的横截面。可选地和优选地,将共振器32的直径选择为足够小,使得,对于任何垂直于共振器32的纵向轴线的平面,时间平均的温度和密度在该平面上通常是均匀的(例如,在10%内)。共振器32可由任何材料制成。优选地,该材料具有足够高的热容量,使得共振器的壁部处的温度不振荡或以低幅度振荡(例如,小于10℃或小于5℃或小于2℃或小于1℃的幅度)。

[0125] 共振器32的典型尺寸是从几厘米以下到几米。

[0126] 相交换装置34可以许多种形式体现。一般来说,相交换装置34产生活性物质到共振器中的入流(influx)。根据需要,该入流可以是连续的或间歇的。

[0127] 在图4A的代表性示图中(并不将其认为是限制性的),相交换装置34是气溶胶装置或喷雾器,其供应一股液滴的形式的活性物质,示出为一束箭头。当气态介质流过液滴时,在部分38上形成活性气体的浓度梯度,从而,如在上文中和下面的实例部分中进一步详细描述,产生压力波。相交换装置34提供许多类型的液体的液滴,包括,但不限于,水、盐水、碳酸铵溶液和商业上可获得的有机制冷剂。

[0128] 在图4B的代表性示图中,相交换装置34对共振器32内的吸附介质46供应活性物质,使得将活性物质吸附在吸附介质46上。在该实施方式中,当气态介质流过吸附介质46时,改变气态介质中的活性气体的浓度。用供应元件44对吸附介质供应活性物质,供应元件44可以是,例如,注射器,灯芯,液滴龙头,等等。

[0129] 可在共振器32的壁部上沉积吸附介质46,或者,可将其提供为堆叠介质的形式。

[0130] 如这里使用的,术语“堆叠介质”是指,具有多个由间隙隔开的内表面的实心结构。

在本发明的各种示例性实施方式中,堆叠介质具有至少 $500\text{m}^2/\text{gr}$ 的比表面积,和在 100Hz 的频率下小于 $20\text{Pa}/(\text{m}/\text{s})$ 的声阻。

[0131] 适于本实施方式的堆叠介质的代表性实例包括,但不限于,蜂窝介质,通常平行板的布置,管道的布置,随机多孔介质,纳米结构介质,其包括多个沉积或生长的纳米结构,例如,碳纳米管,等等。可将吸附介质沉积在堆叠介质的表面上,或者,可使堆叠介质本身是吸附的。

[0132] 转换装置36用于将由压力波组成的机械能转换成非机械能,因此,可体现为多种形式。

[0133] 在本发明的一些实施方式中,转换装置36是交流发电机(例如,线性交流发电机),其具有移动构件40,例如隔膜等。装置36可位于共振器32的端部52。装置36接收压力波,并将其首先转换成构件40的运动,然后转换成电能,典型地,通过电磁或静电感应。例如,装置40可按照声学麦克风的原理操作,例如,但不限于,电动传声器,将移动构件40与与放在磁场中的线圈耦合;电容传声器,其中,将移动构件40与电容偏板耦合,以及带式传声器,其中,隔膜由放在磁场中的导电箔(例如金属箔)制成,如电声换能器的领域中的普通技术人员所知道的。还预期经由压电效应将压力波的机械能转换成电能的实施方式。在这些实施方式中,装置40包括压电晶体,其响应于压力振荡而产生交流电压。

[0134] 在本发明的一些实施方式中,转换装置36没有任何移动零件。例如,可将转换装置36体现为电容器系统,其接收产生电容器系统的介电系数的变化(由此也产生电容的变化)的压力波。如上面进一步详细描述,将电容变化转换成电流。可将电容器系统放在共振器32内的任何地方。优选地,将电容器系统放在部分38处。

[0135] 在图4B所示的示例性实施方式中,堆叠本身用作电容器系统。在该实施方式中,该堆叠优选地由导电材料制成,以便于其用作电容器系统。例如,该堆叠可由沉积的或生长的纳米结构制成,其实现对分气非常敏感的总电容。因此,压力振荡导致电容的相当大的变化,并且,能量转换更有效。作为一个代表性实例,对于由碳纳米管制成的电容器系统,每个单位面积的电容在约60%的相对湿度下是约 $75\text{nF}/\text{cm}^2$,在约70%的相对湿度下是约 $310\text{nF}/\text{cm}^2$,并且,在约85%的相对湿度下大于 $20\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。

[0136] 通过通常在42示出的负载或电路来利用由装置36产生的电能。

[0137] 因此,本发明的一些实施方式的一个方面涉及一种用于产生电流的系统,其包括:带电电容器系统,通常处于恒压下和/或具有通常恒定的电荷;活性物质的源,用于在电容器内形成活性物质的浓度梯度,以用振荡方式改变电容器的电容;以及电路,提取通过电容的变化产生的振荡电流。

[0138] 将系统30构造为,接收彼此分离的气态介质和非气态介质,并经由上述双向质量交换过程转换其相分离能量。如上面进一步详细描述,用装置34提供非气态介质。优选地,通过入口端口48对共振器32中提供气态介质,例如,入口端口48可位于共振器32的端部50。入口端口48可以是任何形状的孔,或多孔板,等等。可选地且优选地,通过管道54将气态介质引导至入口端口48中。

[0139] 可选地且优选地,系统30包括出口端口60,用于从共振器32排出多余的流体。用60附近的箭头表示排出的流体。排出的流体可选地且优选地处于气相中,并且,与通过入口端口48进入共振器的气态介质相比,包括更高浓度的活性物质。因此,共振器32在输入端上接

收减小的浓度的气态介质,或者没有通过端口48的活性物质,并从装置34接收活性物质的升高的浓度的非气态介质;并且,在输出端上提供通过端口60的具有升高的浓度的活性物质的混合物。用系统30将输入端的能量和输出端的能量之间的能量差的至少一部分转换成压力波,然后转换成非机械能。端口60优选地位于压力波的压力节点和速度节点之间的共振器32的壁部处。

[0140] 在本发明的一些实施方式中,系统30包括加热机构56,被构造为在气态介质进入共振器32之前将其加热。这些实施方式的优点是,当升高的温度增加质量交换的效率时,由此也增加能量转换的效率。加热机构56可以是任何的类型,包括,但不限于,太阳能收集器、欧姆加热器、放射性加热器、射频加热器、微波加热器。加热机构56也可以是储热器。

[0141] 可选地且优选地,系统30可包括分离机构62,用于在气态介质进入共振器32之前从气态介质去除活性物质。在系统30包括加热机构56和分离机构62的实施方式中,可将其相对于彼此以任何关系定位。具体地,可在气态介质通过分离机构62之前或之后将其加热。分离机构62可以是按照漫射原理操作的无源机构。代表性实例是盐水,当活性物质是水时,其是有用的。还考虑这样的实施方式:分离机构62是从气态介质主动地减小活性物质的浓度的能量驱动机构。这种机构的一个实例是除湿器。另一适于本实施方式的实例是,使用压力波来分离材料,如下所述。

[0142] 图4C是本发明的实施方式中的系统30的示意图,其中,将所释放的能量直接转换成电能。当系统30用作太阳能电池或用作其元件时,这些实施方式特别有用。

[0143] 系统30接收能量110,例如,太阳辐射或来自外部源(未示出)的热量。电容器系统36包括响应于减小的能量经历相变的材料。例如,电容器系统36可包括液相的物质,其由从外部源接收的热量蒸发。该相变伴随着两个相之间(例如,液相和气相之间)的质量交换,导致电容器系统36内的电容变化。如上面进一步详细描述,将电容变化转换成电流。系统30优选地包括反相介质112,其可能是板或热沉的形式。介质112用于完成热力循环。例如,当质量交换包括液体的蒸发时,介质112可使蒸汽冷凝回成液相。负载或电路42利用由电容器系统36产生的电能。

[0144] 以下是对根据本发明的一些实施方式的材料分离利用压力波的技术的描述。一般来说,本技术基于热力循环,其与方法10所使用的热力循环相比是相反的。虽然方法10接收分离的介质并使用这些介质的相分离能量产生压力波(例如,通过形成浓度梯度),但是本实施方式的材料分离接收流体混合物,并利用能量的外部源对混合物施加压力波。流体混合物优选地是气态的,并与非气态介质接触,例如吸附介质,将其选择为允许介质之间的质量交换。

[0145] 参考图5A-E,从以下非限制性实例中可更好地理解热力过程,其在压力波的振荡过程中遵循气体“包”。该描述用于一般驻波的情况。本领域的普通技术人员通过具有这里描述的细节的该情况的描述,将知道对于行波的情况如何调节描述。

[0146] 以简化的方式,该包在一个振荡循环的过程中经历四个阶段。这些阶段包括:膨胀(图5A)、对气态介质的质量传递(图5B)、压缩(图5C)和从气态介质的质量传递(图5D)。

[0147] 在图5A-D中,将气体包(每个阶段)的位移表示为 Δz ,将气态介质中的活性物质的局部瞬时分压表示为 P_v ,将非气态介质中的活性物质的局部平衡分压表示为 P_s ,将增加的或减去的质量表示为 δm ,将活性物质的平均分压表示为 P_v^m ,并将来自 P_v^m 的波动表示为 P'_v 。填

充的矩形代表在其上具有分压梯度,其中在左侧具有活性物质的高分压(表示为 P_s^+),并在右侧具有活性物质的低分压(表示为 P_s^-)的非气态介质。

[0148] 在图5A中,该包是这样的区域,其中,活性物质的分压等于其平均值,然后朝着低浓度的区域在距离 Δz 上向前移动。用压力波使该包膨胀,并以 δm 的量得到质量。将活性物质的分压减小 P'_v ,使得 $P_v = P_v^m - P'_v$ 。在图5B中,减小的分压 P_v (其比非气态介质的局部平衡分压 P_s 低)导致从非气态介质向气态介质蒸发或沉积活性物质。在图5C中,向后移动包并用压力波将其压缩。将活性物质的分压增加 $2P'_v$,使得 $P_v = P_v^m + P'_v$ 。在图5D中,活性物质的分压(其比局部平衡分压高)导致在相反方向上的从气态介质向非气态介质的质量传递。

[0149] 如图5E所示,当在振荡循环上平均时,当相邻的包通过重复循环往复时,净效应是活性物质的非零时间平均通量,在浓度梯度上向上(从低浓度到高浓度)。该过程在这里称作压力导致的质量交换,并需要消耗由外部能源供应的功。

[0150] 在行波定相的情况中,如上所述,压力和位移是异相的,并且,首先移动气体包,然后将其压缩/膨胀。优选地,在吸附介质和气体之间存在紧密的接触,如上面进一步详细描述。假设首先将该包移动至低浓度的区域。然后,使其膨胀,使得活性成分的分压低于局部平衡分压。将质量解吸成气体。然后,将该包移动至压缩其的高浓度的区域。在此阶段,活性成分的分压高于局部平衡值,并将质量传递至吸附介质。整个循环上的净效应是将质量从低浓度区域传递至高浓度区域。

[0151] 图6是描述了根据本发明的一些实施方式的适于材料分离的方法的流程图。

[0152] 该方法在70开始,并继续至71,在71处,将流体介质(其是具有至少第一物质和第二物质的混合物)引导至声学共振器中。在本发明的一些实施方式中,流体介质是气态介质。该混合物中的至少一种物质是如上所述的活性物质。

[0153] 该方法继续至72,在72处,在共振器中产生压力波。可用声能转换器产生压力波,声能转换器从外部源接收非机械能并将其转换成压力波。在下文中提供了根据本发明的一些实施方式的适于产生压力波的装置的典型实例。因此,方法70接收混合物并用外部能源对该混合物施加压力波。

[0154] 压力波在共振器内形成至少一个高浓度的活性物质的区域和至少一个低浓度的活性物质的区域。这可通过使气态介质与吸附介质接触来实现,如以上参考图5A-E描述的。吸附介质优选地以选择性的方式吸附活性物质,使得气态混合物中的其他物质保持在其气相中。在下文中提供了适于本实施方式的吸附介质的典型实例。

[0155] 该方法继续至73,在73处,从高浓度的区域提取活性物质。因此,将活性物质与气态介质分离。通过吸附介质本身完成至少一部分提取,吸附介质在压力波的影响下吸附活性物质,如上文进一步详细描述。还可通过从吸附介质产生流出物(例如,通过灯芯,液滴龙头,等等),而进一步从共振器提取出活性物质。从73开始,该方法可选地且优选地返回至71,以执行多个材料分离的循环。

[0156] 该方法还可继续至74,在74处,储存活性物质和/或气态介质,并将其彼此分离。该操作本质上储存由不同相组成的相分离能量。当使用74时,该方法可在74之后返回至71。该方法可继续至75,在75处,将所储存的相分离能量转换成不同形式的能量,例如,机械能、电能或热能。例如,这可用上述能量转换技术来实现(参见方法10和系统30)。当使用75时,该

方法可在75之后返回至71。

[0157] 可在不同条件下执行方法70的几个操作。例如,认识到,能量转换75的效率随着温度而增加。因此,在本发明的一些实施方式中,当环境温度较低时(例如,在夜晚或接近日落或接近日出),执行材料分离操作(例如,71-74),其中,当环境温度较高时(例如,在白天),执行能量转换75。

[0158] 该方法在76结束。

[0159] 图7是描述了根据本发明的一些实施方式的适于材料分离的方法的流程图。

[0160] 该方法在200开始,并继续至201,在201处,将流体介质(其是具有至少第一物质和第二物质的混合物)引导至电气系统中,该电气系统能够产生电场,例如,电容器系统。在本发明的一些实施方式中,流体介质是气态介质。该混合物中的至少一种物质是如上所述的活性物质。

[0161] 该方法继续至202,在202处,例如,通过对电容器系统施加电压来产生电场。所产生的电场在混合物和电容器系统之间产生质量交换。例如,该电场可导致将混合物中的活性物质吸附在电容器板或堆叠上。因此,将活性物质与气态介质分离。还可通过从吸附介质产生流出物(例如,通过灯芯,液滴龙头,等等),而进一步从电气系统提取出活性物质203。从203开始,该方法可选地且优选地返回至201,以执行多个材料分离的循环。

[0162] 该方法可储存彼此分离的活性物质和/或气态介质,例如,如相对于操作73-75在上面进一步详细描述地用于另外的用途。

[0163] 该方法在204结束。

[0164] 本实施方式的材料分离可在许多应用场合中使用。由气体或可溶混液体组成的混合物的分离可以是有用的,例如,在化学工业中。传统的分离技术包括分馏、吸收/吸附塔、扩散塔,等等。

[0165] 蒸馏通常需要大能量输入,用于获得分离的最佳温度。传统地,这通过加热或冷却来实现,取决于分离的混合物。吸附塔需要回热(再生),从而在批量模式在操作,在吸附和回热模式之间交替地具有两个或多个吸附床。操作取决于外部控制的阀,其在自由模式和回热(加热/真空/吹扫气,等等)之间转换床,产生相对复杂的设计。

[0166] 本实施方式的分离技术允许在一个具有连续吸附/回热循环的塔中使用吸收/吸附介质,不需要除了声源以外的移动件。与传统的吸附技术相比,本实施方式的技术提供更简单的、可靠的设计。可能不用加热、冷却、真空和吹洗中的至少一个来实践本实施方式的技术,因此,比例如回热吸附介质和在分馏系统中的传统技术有利。

[0167] 本实施方式的技术可用于分离各种气体混合物。代表性实例包括,但不限于,从空气中分离氧气,从沼气中分离甲烷,从水蒸汽,CO₂和/或H₂S中分离氢气和甲烷,天然气提纯。

[0168] 另外,可能分离可通过蒸馏分离的任何液体混合物(例如乙醇-水)。还预期这样的实施方式,其中,用材料分离技术来进行脱盐,例如,通过从海水中分离淡水,或从湿空气中分离水蒸汽。

[0169] 现在参考图8,其是根据本发明的一些实施方式的适于材料分离的系统80的示意图。系统80包括声学共振器32、第一端50和第二端52。将共振器构造为接收流体介质,其是具有至少第一物质和第二物质的混合物。在本发明的一些实施方式中,流体介质是气态介质。该混合物中的至少一种物质是如上所述的活性物质。优选地,将流体介质通过入口端口

84提供至共振器32中,入口端口84可位于,例如,共振器32的一端50。入口端口84可以是任何形状的孔,或多孔板,等等。

[0170] 系统80进一步包括压力波驱动器82,其用于在共振器32中产生压力波。压力波驱动器82可位于与入口端口84相对的共振器32的一端52。驱动器82可以是,例如,声能转换器,其从外部源接收非机械能并将其转换成压力波。声能转换器可以是任何的类型,包括,但不限于,电声转换器,例如,扩音器等等。声能转换器还可以是热声系统,例如上述系统30,其中,压力波的能源是除了通过端口84的介质以外的介质的相分离能量。还预期使用热声系统,例如,在美国专利号4,398,398;4,489,553;4,722,201;5,303,555;5,647,216;5,953,921;6,032,464;6,314,740;7,263,837;6,804,967和6,688,112中,以及在美国公开申请号20100172213和20090268556中描述的一种系统,将这些专利的内容结合于此以供参考。

[0171] 因此,系统30接收混合物,并用外部能源对该混合物施加压力波。

[0172] 在本发明的各种示例性实施方式中,系统80包括吸附介质86,其与流体介质交换质量,如上面进一步详细描述。

[0173] 在本发明的各种示例性实施方式中,对活性物质选择吸附介质86,并且,吸附介质86与气态介质中的任何其他物质具有惰性关系。

[0174] 因此,基于感兴趣的物质选择吸附介质。例如,当活性物质是水时,吸附介质可以是Lind类型(例如4A)的沸石,硅胶或碳纳米管;例如,沸石或活性碳;用于氧气/氮气分离以及用于水/乙醇分离,沸石类型4A。

[0175] 经由上述压力导致的质量交换原理,压力波在共振器32内形成至少一个高浓度的活性物质的区域和至少一个低浓度的活性物质的区域。在本发明的各种示例性实施方式中,系统80包括流体提取构件88,被构造为从共振器32的高浓度区域中提取活性物质。构件88优选地位于压力节点处,以允许以减少的或最小的(例如零)声辐射损失地来提取。构件88可以是,例如,灯芯,液滴龙头,等等。

[0176] 还预期这样的实施方式,其中,介质86是电容器系统。在这些实施方式中,系统80并非必须产生压力波,因为可对电容器系统施加电压,以产生电场并导致材料分离,如上面进一步详细描述的。因此,根据需要,系统80可能包括或可能不包括共振器32和驱动器82。另外预期这样的实施方式,其中,系统80包括作为介质86的电容器系统和共振器32的组合。在这些实施方式中,对电容器系统施加交流电压,从而导致产生压力波所需的吸附/解吸和质量增加/提取。

[0177] 系统80可选地且优选地还包括一个或多个储存容器90,用于储存活性物质和/或保持彼此分离的流体介质。在本发明的一些实施方式中,系统80还包括能量转换系统92,其将由分离的相组成的相分离能量转换成另一种形式的能量,例如,机械能、电能或热能。系统92的原理和操作优选地与系统30的原理和操作类似。

[0178] 在其他系统中也可使用本实施方式的质量交换原理。在图9中示出了这种系统的一个代表性实例。在图9中示出了包括共振器32的热声系统100,共振器32在其中具有至少一个处于温度梯度下的热声单元102。例如,单元102可包括高温热交换器104和低温热交换器106,或可位于其之间。热声单元102可以是任何的类型,包括,但不限于,回热器发动机单元、堆叠发动机单元、回热器冷冻机单元,以及堆叠冷冻机单元。系统100进一步包括相交换

装置34,被构造为在热声单元102上在共振器所包含的气态介质中形成活性物质的浓度梯度。相交换装置34可以是,例如,吸附介质,如上面进一步详细描述。系统100的原理和操作通常与传统热声系统的原理和操作类似,除了相交换进一步有助于提高能量转换或材料分离的效率以外。

[0179] 可以预期,在本申请中充分考虑的专利寿命的过程中,将开发许多相关的热声系统,并且,可以推理,术语热声单元的范围旨在包括所有这样的新技术。

[0180] 如这里使用的,术语“约”是指 $\pm 10\%$ 。

[0181] 在这里,用词语“示例性的”表示“用作一个实例,例子或例证”。并非必须将任何被描述为“示例性的”的实施方式解释为是优选的或比其他实施方式有利,和/或从其他实施方式中排除包含特征。

[0182] 在这里,用词语“可选地”表示“在一些实施方式中提供,在其他实施方式中不提供”。本发明的任何特殊实施方式可能包括多个“可选的”特征,除非这种特征冲突。

[0183] 术语“包括”、“包含”、“含有”、“含”、“具有”及其变化表示“包括但不限于”。

[0184] 术语“由...组成”表示“包括并限于”。

[0185] 术语“基本上由...组成”表示,该组成、方法或结构可能包括额外的成分、步骤和/或零件,但是,只有当该额外的成分、步骤和/或零件并不在本质上改变所要求的成分、方法或结构的基本和新颖特性时才是这样。

[0186] 如这里使用的,单数形式“一个”、“一种”和“该”包括复数参考值,除非上下文明确表示不是这样。例如,术语“化合物”或“至少一种化合物”可能包括多种化合物,包括其混合物。

[0187] 在本申请中,可能以范围形式提供本发明的各种实施方式。应理解,范围形式的描述仅是为了方便和简洁,不应将其解释为固定地限制本发明的范围。因此,应将范围的描述认为是,具有特别公开的所有可能的子范围,以及该范围内的各个数值。例如,应将例如从1到6的范围的描述认为是,具有特别公开的子范围,例如从1到3,从1到4,从1到5,从2到4,从2到6,从3到6,等等,以及该范围内的各个值,例如,1,2,3,4,5和6。不管该范围的宽度如何,这都适用。

[0188] 只要这里表示数值范围,便意味着,包括任何在所示范围内引用的数字(分数或整数)。这里可互换地使用术语“范围在第一指示数字和第二指示数字之间”以及“范围在从第一指示数字到第二指示数字”,并且,其意味着,包括第一和第二所示数字以及其之间的所有分数和整数。

[0189] 应理解,还可能与一个实施方式结合地提供本发明的某些特征(为了清楚,将其在分开的实施方式的上下文中描述)。相反,还可能分开地或以任何适当的子组合地提供本发明的各种特征(为了简洁,将其在一个实施方式的上下文中描述),或者,其在本发明的任何其他所述实施方式中是适当的。并不将在各种实施方式的上下文中描述的某些特征认为是那些实施方式的本质特征,除非那些实施方式没有那些元件就不起作用。

[0190] 如上面已经描述的并在以下权利要求部分中要求的本发明的各种实施方式和方面可在以下实例中找到支撑。

[0191] 实施例

[0192] 现在参考以下实施例,其与以上描述一起以非限制性的方式说明了本发明的一些

实施方式。

[0193] 实施例1

[0194] 在本实例中,提出了说明本实施方式的相交换效果的模型。

[0195] 模型组成

[0196] 考虑通过充满两种气体的混合物的圆柱形管的声波。管壁涂有吸附材料的薄层。由于存在吸附剂,所以混合物的成分可能经历可逆的吸附过程,在该过程中,在混合物和实心壁部之间交换质量。该成分称作“活性成分”。在图10中示意性地示出了该系统的基本的几何形状。

[0197] 以下是决定二元混合物中的质量、动量和能量的传送的流体力学方程。

[0198] 混合物的连续性,

$$[0199] \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

[0200] 其中, ρ 是密度,并且 $\mathbf{v}$ 是混合物的密度加权的流体动力速度,被定义为

$$[0201] \quad \mathbf{v} = \frac{\rho_1 \mathbf{v}_1 + \rho_2 \mathbf{v}_2}{\rho}, \quad (2)$$

[0202] 其中, $\mathbf{v}_1$ 和 $\mathbf{v}_2$ 是两种成分的速度,并且 ρ_1 和 ρ_2 是其相应的密度。

[0203] 活性成分(表示为成分1)的连续性,在其浓度方面,被表示为摩尔分数 $C_1 = n_1/n$,

$$[0204] \quad n \left(\frac{\partial C_1}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C_1 \right) = -\nabla \cdot \mathbf{j}. \quad (3)$$

[0205] 这里,用 n 表示混合物摩尔密度,并且 $\mathbf{j}$ 是扩散通量密度,对于二元混合物,将其定义为:

$$[0206] \quad \mathbf{j} = \frac{n_1 n_2}{n} (\bar{\mathbf{v}}_1 - \bar{\mathbf{v}}_2) = -n D_{12} \left(\nabla C_1 + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right), \quad (4)$$

[0207] D_{12} , k_T 和 k_P 分别表示二元分子扩散系数、热扩散比和气压扩散比。扩散速度 $\mathbf{V}_1$ 和 $\mathbf{V}_2$ 相当于每种成分的速度和质量平均速度之间的差,即, $\mathbf{V}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}$ 。在二元混合物中,其遵循 $\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2 = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2$ 。

[0208] 混合物的运动方程通过以下给出:

$$[0209] \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}), \quad (5)$$

[0210] 其中, ζ 是体积粘度。

[0211] 来源于能量转换的熵方程是:

$$[0212] \quad \rho T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \sum_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \nabla \cdot (q - \mu_c \mathbf{j}) - \mathbf{j} \cdot \nabla \mu_c, \quad (6)$$

[0213] 其中, s 是熵, Σ_{ij} 是粘性应力张量, μ_c 是混合物的化学势并且热通量 q 用以下方程给出:

$$[0214] \quad q = \left(k_T \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial C_1} \right)_{p,T} - T \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial T} \right)_{p,C_1} + \mu_c \right) \mathbf{j} - \kappa \nabla T. \quad (7)$$

[0215] 方程(6)的右侧的项是源项,用流体中的内摩擦并用热传导与质量扩散的不可逆过程代表耗散(或熵“产生”)。

[0216] 根据本发明的一些实施方式,可简化以上方程。对于各个成分和混合物(其是理想气体),使用以下定义。

[0217] 状态方程

$$[0218] \quad p=nR_gT. \quad (8)$$

[0219] 混合物和每种成分的温度是相等的,即, $T=T_1=T_2$ 。

[0220] 总压力是分压的和, $p=p_1+p_2$,同样地,对于摩尔密度, $n,n=n_1+n_2$ 。

[0221] 还可通过对每个变量替换时间平均的环境值和小振荡成分,使方程线性化,如下所述:

$$[0222] \quad \bar{v}(r,z,t)=\bar{v}'(r,z)e^{i\omega t}$$

$$[0223] \quad p(r,z,t)=p_m+p'(r,z)e^{i\omega t}$$

$$[0224] \quad \rho(r,z,t)=\rho_m(z)+\rho'(r,z)e^{i\omega t}$$

$$[0225] \quad T(r,z,t)=T_m(z)+T'(r,z)e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$[0226] \quad C(r,z,t)=C_m(z)+C'(r,z)e^{i\omega t}$$

$$[0227] \quad s(r,z,t)=s_m(z)+s'(r,z)e^{i\omega t}$$

[0228] 在以上定义中,质数的量表示小的波动成分,并且下标m表示平均值或环境值。为了表达清楚且不丧失一般性,在下文中将用下标1或2来表示每种成分,其中,应理解,非质数的量代表环境值。还将用下标m表示与混合物相关的环境变量。这些变量的平均成分是实数,而质数的量代表平均值的小扰动的复幅值。

[0229] 在定义这些展开式时,已经假设,管径足够小,使得与方位角无关,并且,诸如温度和密度的变量的平均成分在任何设定横截面处是局部平衡和恒定的;因此,其可能仅作为轴向位置的函数。进一步假设,平均压力是恒定的,并假设,没有一阶的速度的平均成分。另外,引用所谓的“低还原的频率近似值”[Raspet等人,“惰性气体冷凝蒸汽热声学理论:传播方程”,美国声学协会学报,112~(4),2002,1414;H.Tijdeman,“圆柱形管中的声波的传播”,声音和振动学报162,1975,1(“Theory of inert gas-condensing vapor thermoacoustics:Propagation equation,”Journal of the Acoustical Society of America,112~(4),2002,1414;H.Tijdeman,“On the propagation of sound waves in cylindrical tubes,”Journal of Sound and Vibration162,1975,1)],根据这些文章,可能忽略轴向扩散,径向速度分量和压缩摩擦,假设:

$$[0230] \quad \Omega_r \equiv \frac{\omega R}{c_s} = \frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1,$$

[0231] 其中, λ 是减小的声学波长。对于宽范围的频率和管径,容易满足此条件。

[0232] 接下来,将扩展变量替代到方程((1)至(6))的系统中,在振荡变量及其乘积中将项保持至一阶。通过以上近似值,获得以下简化方程。

[0233] 该混合物的连续性方程是:

$$[0234] \quad i\omega\rho'+u'\frac{\partial\rho_m}{\partial z}+\rho_m\frac{\partial u'}{\partial z}+\frac{\rho_m}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv')=0. \quad (10)$$

[0235] 动量方程的轴向分量是:

$$[0236] \quad i\omega\rho_m u' = -\frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u'}{\partial r} \right) \quad (11)$$

[0237] 动量方程的径向分量是：

$$[0238] \quad \frac{\partial p'}{\partial r} = 0. \quad (12)$$

[0239] 径向扩散质量分量是：

$$[0240] \quad j_r = -nD_{12} \frac{\partial C}{\partial r}, \quad (13)$$

[0241] 其中,已经省略热扩散和气压扩散项。这是合理的,因为热扩散比典型地非常小(例如,在30℃的温度下的空气-水蒸汽混合物中, k_T 是约0.001),气压扩散是可忽略的,因为特征压力梯度不高。

[0242] 用方程(13)消除 $-\nabla \cdot j$ 项,活性成分的连续性方程变成：

$$[0243] \quad i\omega C_Y + u' \frac{\partial C_Y}{\partial z} = \frac{D_{12}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_Y}{\partial r} \right) \quad (14)$$

[0244] 可将线性化的熵方程写成：

$$[0245] \quad \rho_m T_m \left(i\omega s' + u' \frac{\partial s}{\partial z} \right) = \frac{\kappa}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T'}{\partial r} \right) + T_m \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial T} \right)_{P,C} \frac{\partial j}{\partial r}, \quad (15)$$

[0246] 其中,由于扩散通量密度 j 具有与化学势中的梯度相同阶的大小,所以将其乘积认为是第二阶的量。因此,例如,去除项 $j \cdot \nabla \mu_c$ 。粘性耗散项(其速度是二次的)也具有第二阶,并且可将其忽略,和热通量中的热扩散项 Q (参见方程(7))一样。接下来,通过使用热力关系,用压力、温度和浓度的项来表示熵：

$$[0247] \quad s' = \frac{c_p}{T_m} T' - \left(\frac{\partial \mu_c}{\partial T} \right)_{P,C_1} C_Y + \frac{\beta_T}{\rho_m} p',$$

[0248] 在用理想气体关系 $\beta_T = 1/T_m$ 对该熵代替表达式时,所获得的方程是：

$$[0249] \quad i\omega \rho_m c_p T' - \frac{\kappa}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T'}{\partial r} \right) = i\omega p' - \rho_m c_p u' \frac{\partial T'}{\partial z}, \quad (16)$$

[0250] 其调节混合物中的温度波动。

[0251] 以上方程的边界条件通常包括速度、温度和浓度的调节,以及固体边界处的热量和质量通量。

[0252] 对于轴向速度, u' ,使用以下条件：

$$[0253] \quad u' = 0, r=R \text{ 和 } \frac{\partial u'}{\partial r} = 0, r=0 \quad (17)$$

[0254] 相当于固体边界处的通常的非滑动条件和管轴处的有限速度。

[0255] 假设固体-流体界面处的温度和热通量是连续的：

$$[0256] \quad \kappa_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - \kappa \frac{\partial T'}{\partial r} = j_r \Delta H \text{ 和 } T' = T_s, r=R, \quad (18)$$

[0257] T_s' 和 κ_s 分别表示固体壁处的温度和固体导热率, ΔH 是吸附的热量。

[0258] 边界条件与气体温度的方程((16))耦合,具有固体内的导热方程,其解法提供了边界处的振荡温度和热通量。

[0259] 对于具有足够大的热容量以执行恒温的固体,壁部处的温度不振荡:

$$[0260] \quad T'=0, r=R \quad (19)$$

[0261] 在热声学文献中已经广泛使用此条件,并且,其是许多用于构造堆叠的材料的良好近似值(例如,见G.W.Swift,“热声发动机”,美国声学协会学报84(6),1988,1145;以及“热声学:用于一些发动机和冷冻机的统一观点”,美国声学协会,梅尔维尔,NY,2002(“Thermoacoustic engines,”Journal of the Acoustical Society of America84(6),1988,1145;and “Thermoacoustics:A unifying perspective for some engines and refrigerators,”Acoustical Society of America,Melville,NY,2002))。

[0262] 通常,用与对于稳定和热通量的类似的方程,来给出固态时的浓度和质量通量。对于足够薄的吸附层和/或固相中的适当定义的平均浓度,可认为该层内的所吸附的相的浓度沿着径向方向是均匀的。此近似值在文献中叫做“线性驱动力模型”[D.Duong,“吸附分析:平衡和动力学”,皇家学院出版社,1998] (“Adsorption Analysis:Equilibria and Kinetics,”Imperial College Press,1998)。

[0263] 在快动力学情况中,施加于该浓度上的边界条件相当于以下平衡关系:

$$[0264] \quad C'_1 = \frac{C_m}{K_H p_m} p', \quad (20)$$

[0265] 其中,

$$[0266] \quad K_H = K_0 e^{\frac{\Delta H}{R_g T}},$$

[0267] 是一种类型的亨利系数, K_0 是表示气相和固相中的浓度之间的分界的系数。应指出,该条件也代表液膜,其中, K_0 可能是溶液中的溶质浓度的函数。该条件基于这样的假设:在亨利定律范围内,所吸附的相相对于其“蒸汽压力”(其在文献中有时称作“分布压力”,与前面的Duong相比)表现出理想气体行为。

[0268] 接下来,用公式表示横向速度分量上的边界条件 v_1 。该速度分量通过以下方程与扩散通量和质量平均速度相关:

$$[0269] \quad v_1 - v_2 = -\frac{n^2}{n_1 n_2} D_{12} \frac{\partial C'_1}{\partial r}, \quad r=R, \quad (21)$$

[0270] 以及

$$[0271] \quad v = \frac{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}{\rho} \quad (22)$$

[0272] 因为,在并不认为是限制性的本实例中,仅有一个分量是虚数的(分量1),非虚数分量的速度, v_2 ,在壁部几乎变为零。因此,将质量平均速度的径向分量简化为:

$$[0273] \quad v' = -\frac{\rho_1}{\rho} \frac{n^2}{n_1 n_2} D_{12} \frac{\partial C'_1}{\partial r} = -\frac{m_1}{M} \frac{n}{n_2} D_{12} \frac{\partial C'_1}{\partial r}, \quad r=R, \quad (23)$$

[0274] m_1 和 M 表示径向分量的分子质量和混合物的摩尔平均分子质量, $M=m_1 C_1+m_2 C_2$ 。

[0275] 现在将给出速度、温度和浓度的方程的解法。

[0276] 在低还原的频率近似值下,其中,假设压力仅在轴向方向上变化,解得的轴向动量方程(11)服从边界条件((17)):

$$[0277] \quad u' = \frac{i}{\rho_m \omega} \frac{dp'}{dz} F_\mu. \quad (24)$$

[0278] 这里,引入以下记号:

$$[0279] \quad F_i = 1 - \frac{J_0(\hat{\alpha}_i \eta)}{J_0(\hat{\alpha}_i)}, \quad i = \mu, \kappa, D, \quad (25)$$

[0280] 其中, $\eta=r/R$ 是成比例的极坐标,并且

$$[0281] \quad \hat{\alpha}_\mu = i^{3/2} \alpha_\mu, \quad \alpha_\mu = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}. \quad (26)$$

[0282] 函数 F_i 描述了横向变化,以及根据系统几何形状的形状变化;下标 $i=\mu, \kappa, D$ 分别相当于粘性过程、热过程和扩散过程。 α_μ^2 是粘性时标 $\tau_\mu=R^2\rho_m/\mu$ 和振荡时标 $\tau_\omega=1/\omega$ 的比例。另一相关的量是粘性穿透深度(或斯托克斯边界层厚度), $\delta_\mu=\sqrt{2\nu/\omega}=\alpha_\mu/\sqrt{2}R$,其是动量在半个振荡循环的过程上扩散的距离的测量值。穿透深度表示工作流体与固体边界相互作用的程度。

[0283] 通过用边界条件(19)和温度在管轴处是有限的要求解答方程(16),来获得温度分布:

$$[0284] \quad T' = \frac{F_\kappa}{\rho_m c_p} p' - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp'}{dz} \left(\frac{F_\kappa - \text{Pr} F_\mu}{1 - \text{Pr}} \right) \frac{dT_m}{dz}, \quad (27)$$

[0285] 其中,函数 F_κ 是与以上定义的粘性函数相同的形式,用其热相似值代替参数 $\hat{\alpha}_\mu$,通过以下方程给出:

$$[0286] \quad \hat{\alpha}_\kappa = i^{3/2} \alpha_\kappa, \quad \alpha_\kappa = R \sqrt{\frac{\omega \rho_m c_p}{\kappa}} = \sqrt{2} R / \delta_\kappa. \quad (28)$$

[0287] 这里, δ_κ 是热穿透深度,并将普朗特数定义为:

$$[0288] \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\kappa} = \frac{\alpha_\kappa^2}{\alpha_\mu^2}. \quad (29)$$

[0289] 参数 α_κ^2 代表导热的特征时间 $\tau_\kappa=R^2\rho_m c_p/\kappa$ 与振荡时标 $\tau_\omega=1/\omega$ 的比例。

[0290] 浓度波动是:

$$[0291] \quad C_1' = \frac{C_m}{K_H p_m} (1 - F_D) p' - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dp'}{dz} \left(\frac{F_D - \text{Sc} F_\mu}{1 - \text{Sc}} \right) \frac{dC_1}{dz}, \quad (30)$$

[0292] 其中,引入扩散函数 F_D ,其中参数 $\hat{\alpha}_D$ 通过以下给出:

$$[0293] \quad \hat{\alpha}_D = i^{3/2} \alpha_D, \quad \alpha_D = R \sqrt{\frac{\omega}{D_{12}}} = \sqrt{2} R / \delta_D. \quad (31)$$

[0294] 与导热情况类似, δ_D 是扩散穿透深度,并将施密特数定义为:

$$[0295] \quad Sc = \frac{\mu}{\rho_m D_{12}} = \frac{\alpha_D^2}{\alpha_\mu^2} \quad (32)$$

[0296] 参数 α_D^2 代表分子扩散的特征时间 $\tau_D=R^2/D_{12}$ 与振荡时标 τ_ω 的比例。

[0297] 现在将得出压力波动的波动方程。在不损失一般性的情况下,波动方程来自于一个非虚数分量和一个虚数分量的情况,但是,技术人员将容易知道,对于更一般的情况(其中,混合物包括任何正数的活性成分和任何非负数的非活性成分),如何调节公式推导。

[0298] 活性成分经历与壁部的可逆的相交换。将交换的速度假设为足够高,使得在气体和固体边界处的所吸附的相之间存在平衡。在以下推导中,由于温度和浓度波动、粘性和热扩散过程,以及轴向浓度和温度梯度的存在的原因,考虑对声波的改进。

[0299] 混合物密度方面的状态方程是:

$$[0300] \quad \rho = \frac{p}{R_g T} \frac{\rho}{n} \quad (33)$$

[0301] 使用关系 $\rho=n_1 m_1 + n_2 m_2$, $C_1=n_1/n$ 以及 $\sum C_i=1$, ρ 变成:

$$[0302] \quad \rho = \frac{p}{R_g T} \frac{n_1 m_1 + n_2 m_2}{n} = \frac{p}{R_g T} [(m_1 - m_2) C_1 + m_2] \quad (34)$$

[0303] 由于 $\rho=\rho(p, T, C_1)$, 所以一阶的级数展开产生:

$$[0304] \quad d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_m dT + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_m dp + \left(\frac{\partial \rho}{\partial C_1} \right)_m dC_1 \quad (35)$$

[0305] 其中,下标 m 表示相对于环境值产生的区别。使用改进的状态方程((34))来评估相对于压力、温度和浓度的导数,可对密度波动产生以下关系:

$$[0306] \quad \frac{\rho'}{\rho_m} = \frac{p'}{p_m} - \frac{T'}{T_m} + \frac{(m_1 - m_2)}{M} C_1' \quad (36)$$

[0307] 为了方便,重写用于该混合物的一阶连续性方程:

$$[0308] \quad i\omega \rho' + u' \frac{\partial \rho_m}{\partial z} + \rho_m \frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\rho_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv') = 0 \quad (37)$$

[0309] 利用方程((36))消除 ρ' 并得到横截面平均值可产生:

$$[0310] \quad \frac{i\omega}{p_m} p' - \frac{i\omega}{T_m} \langle T' \rangle + \frac{i\omega(m_1 - m_2)}{M} \langle C' \rangle + \langle u' \rangle \frac{d\rho_m}{dz} + \frac{d\langle u' \rangle}{dz} + \frac{2}{R} v'_{r=R} = 0 \quad (38)$$

[0311] 其中,已经使用 $v'(0)=0$ 的条件,并可将环境密度梯度评估为:

$$[0312] \quad \frac{d\rho_m}{dz} = \rho_m \frac{m_1 - m_2}{M} \frac{dC_1}{dz} - \frac{\rho_m}{T_m} \frac{dT_m}{dz} \quad (39)$$

[0313] 其中,已经假设,在平均压力中没有轴向梯度,即, $dp_m/dz=0$ 。

[0314] 横截面平均速度是:

$$[0315] \quad \langle u' \rangle = \frac{iG_\mu}{\rho_m \omega} \frac{dp'}{dz} \quad (40)$$

[0316] 其中,已经引入记号 $G_i=\langle F_i \rangle$ 来表示横截面平均耗散函数。具体地,

$$[0317] \quad G_i = 2 \int_0^1 \left(1 - \frac{J_0(\hat{\alpha}_i \eta)}{J_0(\hat{\alpha}_i)} \right) \eta d\eta = 1 - \frac{2J_1(\hat{\alpha}_i)}{\hat{\alpha}_i J_0(\hat{\alpha}_i)} \quad i = \mu, \kappa, D \quad (41)$$

[0318] 接下来,以类似的方式获得横截面平均温度,产生:

$$[0319] \quad \langle T' \rangle = \frac{G_\kappa}{2\rho_m c_p} p' - \frac{1}{2\rho_m \omega^2} \frac{dp'}{dz} \frac{dT_m}{dz} \left(\frac{G_\kappa - \text{Pr} G_\mu}{1 - \text{Pr}} \right) \quad (42)$$

[0320] 同样地,横截面平均浓度是:

$$[0321] \quad \langle C_1' \rangle = \frac{C_1}{K_H p_m} (1 - G_D) p' - \frac{1}{\rho_m \omega^2} \frac{dC_1}{dz} \frac{dp'}{dz} \left(\frac{G_D - \text{Sc} G_\mu}{1 - \text{Sc}} \right) \quad (43)$$

[0322] 将由方程(21)给出的壁部处的径向速度的剩余条件重写为:

$$[0323] \quad v'_{r=R} = -i \frac{m_1}{M} \frac{n}{n_2} \frac{\omega R}{2} \left(\frac{C_1}{K_H p_m} (1 - G_D) p' + \frac{1}{\rho_m \omega^2} \left(\frac{G_D - G_\mu}{1 - \text{Sc}} \right) \frac{dp'}{dz} \frac{dC_1}{dz} \right) \quad (44)$$

[0324] 接下来,将对平均轴向速度、温度和浓度所获得的关系,与对径向速度的表达一起,代入到平均连续性方程(38)中。使用热力关系 $p_0 = \rho_m c_s^2 / \gamma$ 和 $T_m c_p = c_s^2 / (\gamma - 1)$, 获得以下方程,

$$[0325] \quad \rho_m \frac{d}{dz} \left(\frac{G_\mu}{\rho_m} \frac{dp'}{dz} \right) + \left(\frac{1}{T_m} \left(\frac{G_\kappa - G_\mu}{1 - \text{Pr}} \right) \frac{dT_m}{dz} + \frac{1}{C_2} \left(\frac{G_D - G_\mu}{1 - \text{Sc}} \right) \frac{dC_1}{dz} \right) \frac{dp'}{dz} \quad (45)$$

$$[0326] \quad + \gamma \frac{\omega^2}{c_s^2} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{\gamma} G_\kappa - \frac{1}{K_H} \frac{C_1}{C_2} (1 - G_D) \right) p' = 0$$

[0327] 该方程描述了声波的压力扰动或传播的轴向相关性。最后一项乘以 p' , 代表复波的平方数, 具有由于粘性摩擦而导致的耗散, 以及源于与固体壁部的热交换和质量交换的松弛效应。该项乘以压力梯度描述了声场的增益/衰减。该项说明, 在根据本发明的一些实施方式的活性成分的摩尔分数中形成梯度可产生压力波。

[0328] 浓度梯度

[0329] 根据本实施方式, 可能以许多种方式形成摩尔分数梯度。在本实例中, 考虑了这样一种系统, 不主动从该系统增加/去除质量。

[0330] 可将摩尔分数梯度写成:

$$[0331] \quad \frac{dC_1}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\frac{n_1}{n} \right) = n_1 \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{n} \right) + \frac{1}{n} \frac{dn_1}{dz} \quad (46)$$

[0332] 使用理想气体定律, 满足以下关系:

$$[0333] \quad \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{n} \right) = \frac{1}{n T_m} \frac{dT_m}{dz} \quad (47)$$

[0334] $n_1 = f(T_m, K_0)$, 因此

$$[0335] \quad \frac{dn_1}{dz} = \frac{dn_1}{dT_m} \frac{dT_m}{dz} + \frac{dn_1}{dK_0} \frac{dK_0}{dz} \quad (48)$$

[0336] 将气体-固体平衡关系写成:

$$[0337] \quad n_1 = \frac{p_m}{K_0 R_g T} e^{-\frac{\Delta H}{R_g} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (49)$$

[0338] 其中, T_0 是参考温度, 在该温度下给出 K_0 的值。相对于 T 求该表达式的微分, 并再次使用理想气体定律, 获得以下关系:

$$[0339] \quad \frac{dn_1}{dz} = \frac{n_1}{T_m} \left(\frac{\Delta H}{R_g T_m} - 1 \right) \quad (50)$$

[0340] 另外,

$$[0341] \quad \frac{dn_1}{dK_0} = -\frac{n_1}{K_0} \quad (51)$$

[0342] 与以上表达式结合, 获得以下结果:

$$[0343] \quad \frac{dn_1}{dz} = \frac{n_1}{T_m} \left(\frac{\Delta H}{R_g T_m} - 1 \right) \frac{dT_m}{dz} - \frac{n_1}{K_0} \frac{dK_0}{dz}, \quad (52)$$

[0344] 可将方程 ((46)) 表达为:

$$[0345] \quad \frac{dC_1}{dz} = \frac{C_1 \Delta H}{RT_m^2} \frac{dT_m}{dz} - \frac{C_1}{K_0} \frac{dK_0}{dz}, \quad (53)$$

[0346] 其说明, 在不主动增加或去除质量的系统中, 可用温度梯度 dT_m/dz 和/或固体-气体平衡 (用 K_0 表示) 的特性的轴向变化产生活性成分的摩尔分数中的梯度。注意, 浓度梯度取决于比例 C_1/K_0 , 该比例取决于环境平衡。

[0347] 注意, 当存在蒸汽-液体平衡时, 用温度变化改变摩尔分数。然而, 如果液体对蒸汽具有一些吸收容量, 例如, 与干燥剂溶液与水蒸气的情况一样, 那么, 该特性的轴向梯度会导致与液体的平衡中的蒸汽摩尔分数的相应变化。在本发明的一些实施方式中, 这通过改变干燥剂流体的浓度来实现。可将方程 ((49)) 看作为与 Clausius-Klapeyron 方程类似的形式,

[0348] 描述了蒸汽-液体平衡。

[0349] 参数 K_0 改变该关系, 使得与纯液相的相应情况相比, 减小与所吸附的相平衡的蒸汽的量。例如, 水蒸汽可能在充分高于将不会出现简单冷凝的点 (即, 高于沸点) 吸附到沸石的孔中。另一实例是气体的吸附, 例如, N_2, O_2, CO_2 , 等等。

[0350] 二元混合物中的浓度驱动振荡的开始

[0351] 为了将要进行分析的目的, 将方程 (45) 重写为两个耦合的对于压力和横截面平均速度的一阶方程是方便的, 如下所述:

[0352] 首先, 将方程 ((40)) 重写为:

$$[0353] \quad \frac{dp'}{dz} = -\frac{i\omega\rho_m}{G_\mu} \langle u' \rangle, \quad (54)$$

[0354] 接下来, 计算方程 ((40)) 的 z 导数, 以获得:

$$[0355] \quad \rho_m \frac{d}{dz} \left(\frac{G_\mu}{\rho_m} \frac{dp'}{dz} \right) = -i\omega\rho_m \frac{d\langle u' \rangle}{dz}, \quad (55)$$

[0356] 其在用方程((40))代入方程((45))时导致:

$$[0357] \quad \frac{d\langle u' \rangle}{dz} = -\frac{i}{\omega \rho_m} k^2 p' - \Lambda \langle u' \rangle, \quad (56)$$

[0358] 其中,

$$[0359] \quad k^2 = \gamma \frac{\omega^2}{c_s^2} \left(1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} G_\kappa - \frac{C_1}{K_H C_2} (1 - G_D) \right) \quad (57)$$

[0360] 是复波的平方数,并且

$$[0361] \quad \Lambda = \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dz} \left(\frac{G_\kappa/G_\mu - 1}{1 - \text{Pr}} \right) + \frac{1}{C_2} \frac{dC_1}{dz} \left(\frac{G_D/G_\mu - 1}{1 - \text{Sc}} \right) \quad (58)$$

[0362] 是增益/衰减系数。

[0363] 典型地,对以上系统的解答需要两个边界条件,每个变量一个。然而,例如,在封闭端管道(半波长共振器)中,仅知道速度的条件(即,在封闭端, $u=0$),而稳定极限将物理地需要压力不为零,按推理仍是未知的。

[0364] 可以以多于一种的方式找到稳定极限。可用打靶法解答耦合方程,其中,猜测压力的初始值,并将角频率 ω 的值作为实数值。因此,该方程是综合的,直到,在第二边界,找到速度和压力的复值。使用寻根方法,调节所猜测的初始值,直到速度的计算值在确定公差内与边界条件($u=0$)一致。由此计算相应的复频率,满足在共振器中形成一般驻波的要求。可替换地,人们可以规定一个边界处的压力输入,然后用数字计算当其通过堆叠传播时其是衰减还是放大。以下是近似法的描述,其允许推导分析表达式,通过该分析表达式,可找到自维持振荡的条件。

[0365] 通过不考虑压力扰动,而是考虑堆叠内的功率流,可采用获得稳定极限的分析方法。将沿着不同堆叠元件产生的功率认为是堆叠元件的任一侧上的横截面和时间平均声强之间的差。在以下点开始出现自振荡:在堆叠内产生的功率与堆叠以及声网络的剩余段内的所有损耗匹配。

[0366] 在数学上,可如下所述地表达该方法:

$$[0367] \quad d\dot{W} = A(\langle \overline{pu} \rangle_{z+dz} - \langle \overline{pu} \rangle_z), \quad (59)$$

[0368] 其在一阶上相当于:

$$[0369] \quad d\dot{W} = A \frac{d}{dz} \langle \overline{p'u'} \rangle dz. \quad (60)$$

[0370] 回想到两个复量 p' 和 u' 的时间平均乘积,是:

$$[0371] \quad \overline{p'u'} = \frac{1}{2} \text{Re}(p'u'^*), \quad (61)$$

[0372] 其中,星号表示共轭复数,可将方程(60)重写为:

$$[0373] \quad d\dot{W} = \frac{1}{2} A \Re \left(u^* \frac{dp'}{dz} + p' \frac{du^*}{dz} \right) dz \quad (62)$$

[0374] 从波方程和速度分布中已经获得 dp'/dz 和 $d\langle u' \rangle/dz$ 的表达式。与用数字解答压力和速度相反,假设其遵循一般驻波的定相:

[0375] $p' = P_0 \cos(\phi), \quad (63)$

[0376] 其中, P_0 是共振器的封闭端处的压力幅值, 并且

[0377] $u' = -i \frac{P_0}{\rho_m c_s} \sin(\phi). \quad (64)$

[0378] 相角 ϕ 通常由以下给出

[0379] $\phi(z) = \int_0^z k(\zeta) d\zeta, \quad (65)$

[0380] 解决波数的可能的轴向变化。这主要是由于各种物理特性取决于混合物组成和温度的原因。

[0381] 将声压和速度的表达式代入方程 (62) 可产生沿着轴向方向的功率通量的方程:

[0382]
$$\frac{d\dot{W}}{dz} = \frac{A}{2} \frac{P_0^2 \omega}{\rho_m c_s^2} \Re \left[i\gamma \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{\gamma} G_\kappa^* - \frac{C_1}{K_H C_2} (1 - G_D^*) \right) \cos^2(\phi) \right.$$

[0383]
$$\left. - \frac{i}{k_0} \left(\frac{\nabla T_m}{T_m} \left(\frac{G_\kappa/G_\mu - 1}{1 - \text{Pr}} \right) + \frac{\nabla C_1}{C_2} \left(\frac{G_D^*/G_\mu^* - 1}{1 - \text{Sc}} \right) \right) \cos(\phi) \sin(\phi) \right] \quad (66)$$

[0384]
$$- \frac{i}{G_\mu} \sin^2(\phi)]$$

[0385] 其中, 为了注释方便, $\nabla T_m, \nabla C_1$ 分别代替 $dT_m/dz, dC_1/dz$ 。

[0386] 该表达式可能沿着堆叠的长度在数字上综合, 从而解决混合物的组成和温度的物理特性的轴向变化。然而, 可通过使用“短堆叠”近似值来实现明显的简化, 由此, 假设该堆叠明显比波长短, 并可能将物理特性认为是常数, 例如, 估计为其中间堆叠的值。在本实例中使用该近似值。将该堆叠放在压力和速度反节点之间的中间位置, 其中, $\phi = \pi/4$ 。在边界层极限中 ($\delta_i \ll R, i = \kappa, D$), 将耗散函数简化成以下形式:

[0387] $G_i = 1 - (1-i) \frac{\delta_i}{R},$

[0388] 并且, 其假设该流体是非粘性的, 或者, $G_\mu = 1, \text{Pr} = 0, \text{Sc} = 0$ 。

[0389] 通过这些假设, 现在可将方程 (66) 写成:

[0390]
$$\frac{\dot{W}}{L_s A} = \frac{1}{4} \frac{P_0^2}{\rho_m c_s} \left(\frac{\delta_\kappa}{R} \frac{\nabla T_m}{T_m} + \frac{\delta_D}{R} \frac{\nabla C_1}{C_2} \right) - \frac{1}{4} \frac{\omega P_0^2 (\gamma-1)}{\rho_m c_s^2} \left(\frac{\delta_\kappa}{R} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{C_1}{K_H C_2} \frac{\delta_D}{R} \right), \quad (67)$$

[0391] L_s 表示堆叠长度。

[0392] 第一项是声放大的原因, 并且第二项描述了由于通过质量扩散和热传导的松弛过程而产生的耗散。可进一步通过回想起温度和分压力的临界梯度的定义, 来操作该表达式,

[0393] $\nabla T_c = \frac{\omega P'}{\rho_m c_p u'} = \frac{\omega c_s}{c_p}$

[0394] 并且

[0395] $\nabla P_c = \frac{P_1 \omega}{u'} = \frac{C_1 P_0 \omega}{P_0 / \rho_m c_s} = C_1 \omega \rho_m c_s.$

[0396] 另外, 使用关系 $\nabla P_1 = P_0 \nabla C_1, (\gamma-1)/\rho_m c_s^2 = 1/T_m c_p$ 和 $P_0 = \rho_m c_s^2 / \gamma$, 并获得以下关系:

$$[0397] \quad \frac{\tilde{W}}{L_s A} = \frac{1}{4} \frac{P_0^2 \omega}{\rho_m T_m c_p} \frac{\delta_\kappa}{R} (\Gamma_T - 1) + \frac{1}{4} \frac{P_0^2 \omega C_1}{P_2} \frac{\delta_D}{R} (\Gamma_p - 1) \quad (68)$$

[0398] 注意,第二项的分母中的 P_2 的表现,非活性气体分压力,代表由于相交换过程而产生的功率流。可将这解释为,是由于相对压力/体积变化取决于活性成分与非活性成分的比例的事实的原因。当混合物主要由非活性成分组成时,通过相交换导致的压力变化具有较小的整体效果,因此做较少的功。

[0399] 结果和讨论

[0400] 当 $\tilde{W} \geq 0$ 时,出现自维持振荡。例如,技术人员使用将浓度和温度梯度设置为零的方程((66)),容易计算额外的耗散,例如,由于共振器的剩余段中的损耗的原因。

[0401] 本实例中考虑的混合物由大气压下的空气和水蒸汽组成。基于理想混合物的特性来计算各种物理常数的值,并用气体的分子运动论来计算传递系数。在所有进行的计算中,已对 K_H 赋予统一的值。

[0402] 考虑等温的情况, $dT_m/dz=0$,其中,沿着轴向方向施加浓度梯度,可将短堆叠近似值写成:

$$[0403] \quad -\tilde{W} = \frac{\gamma-1}{4} \Im[G_\kappa] + \frac{\gamma}{4} \frac{C_1}{C_2} \Im[G_D] + \frac{\Im[G_\mu]}{4|G_\mu|^2} + \frac{1}{4k_0 C_2} \frac{\Im[G_D^*/G_\mu^*] \Delta C}{1-\text{Sc}} \frac{\Delta C}{L_s}, \quad (69)$$

[0404] 其中 $\Im[\cdot]$ 表示复量的虚部,并且为了便于表达,已将成比例的功流定义为:

$$[0405] \quad \tilde{W} = \frac{\tilde{W} \rho_m c_s^2}{L_s A \omega P_0^2} \quad (70)$$

[0406] 在图11中对以下 C_1 示出了 $\tilde{W}$ 的典型计算,其是所施加的浓度梯度的函数, $C_1=0.2$ (红线), 0.5 (蓝线)和 0.8 (黑线)。标线与水平轴线的交点代表堆叠从功吸收到产生的转变。如所示出的,改变平均摩尔分数可导致开始所需的更高梯度。此效果是可解释的,因为驱动相交换的振荡分压力取决于成分的局部摩尔分数。

[0407] 在图12A-B中示出了工作频率 f 和所施加的浓度梯度 $\Delta C/L_s$ 的效果,其中,图12A将 $\tilde{W}$ 示出为对于 C_1 和以下 f 的 $\Delta C/L_s$ 的函数, $C_1=0.8$ 且 $f=100\text{Hz}$ (黑线), 200Hz (蓝线)和 300Hz (红线);并且,对于以下 C_1 ,图12A将 $\tilde{W}$ 示出为 f 的函数, $C_1=0.2$ (黑线), 0.5 (蓝线)和 0.8 (红线)。如所示出的,低频导致更低的开始所需的梯度。这是由于粘性损耗取决于频率的原因。

[0408] 可用定义 $\tilde{\Delta C} = \Delta C/k_0 L_s$ 和关系 $\alpha_D = \alpha_\mu \sqrt{\text{Sc}}$ 计算开始浓度梯度曲线 $\tilde{\Delta C}$ 的稳定曲线。假设热和粘性穿透深度是可比较的,可通过将方程(69)设置为等于零并解答 $\tilde{\Delta C}$,来计算稳定极限:

$$[0409] \quad \tilde{\Delta C} = \frac{C_2(1-\text{Sc})}{\Im[G_D^*/G_\mu^*]} \left((\gamma-1) \Im[G_\kappa] + \gamma \frac{C_1}{C_2} \Im[G_D] + \frac{\Im[G_\mu]}{|G_\mu|^2} \right) \quad (71)$$

[0410] 图13A示出了成比例的温度差 $\tau = \Delta T/T_m k_0 L_s$ 的稳定曲线,其是热扰动次数 α_κ 的函数。对氦气-空气混合物,并对温度驱动的情况,计算该曲线。

[0411] 图13B示出了 $\tilde{\Delta C}$ 的稳定曲线,其是扩散扰动次数 α_D 的函数,对空气-水蒸汽混合物,并对浓度驱动的情况,计算该曲线。

[0412] 虽然两种情况之间的直接比较并不是直接了当的,但是两张图都示出了相似的特征曲线,在扰动次数的某些值处可获得不同的最小量。在浓度驱动的情况中(图13B),环境摩尔分数中的变化导致稳定曲线的移动;更小的摩尔分数导致稍微更高的浓度梯度以及对更高的最佳值 α_D 的移动。

[0413] 在本实例中给出的计算说明了本实施方式仅由于所施加的浓度梯度而导致自发振荡的能力。

[0414] 实施例2

[0415] 以下是根据本发明的一些实施方式执行的实验的描述,以说明在存在蒸发的情况中的压力波动的放大。

[0416] 为了本实验的目的,构造原型系统。在图14中示出了原型系统。该原型系统包括1m长且约78mm内径的普列克斯玻璃管,在两端打开,其用作声学共振器120。经由热绝缘柔性套筒124与具有加热元件的风扇122连接。将一件10cm长的陶瓷蜂窝(600cps)用作堆叠126。将该陶瓷蜂窝浸在自来水中,以进行湿法实验。

[0417] 利用大约放在管道中间的传声器128进行压力测量。通过堆叠端部处的两个K型热电偶130、132监测温度。通常比由热电偶132测量的温度低的由热电偶130测量的温度表明,蒸发在堆叠内具有冷却效果。

[0418] 典型的实验从将湿堆叠放在共振器管内开始,与热电偶和传声器一起,其与数据记录器和示波器/频率分析器连接,在个人计算机上显示。一打开风扇,就开始监测压力和温度。记录压力幅值谱的RMS值。所有实验示出了在与共振器的基本模式相应的频率(大约170Hz)时的不同峰值以及风扇第一和第二谐波(分别在50和100Hz)。堆叠126的热端132和冷端130处的典型温度分别是65-75°C和31-37°C。

[0419] 一旦蒸发了所有的水,便可立即观察到出口温度的急剧增加,伴随着所测量的压力幅值的减小,表明从堆叠内的蒸发产生的放大。

[0420] 在图15A-B中示出了典型的实验结果,每张图示出了一组在相同条件下进行的实验。图中示出了任意单元中的RMS压力幅值,其是频率(单位是Hz)的函数。如所示出的,在高风扇设置下观察到最大放大,在存在蒸发时测量到接近两倍高的幅值。

[0421] 本实例证明了本实施方式通过在堆叠上形成浓度梯度来转换能量的能力。

[0422] 虽然已经结合其特定实施方式描述了本发明,但是,显而易见的是,对于本领域的技术人员来说,许多替代、改进和变化将是显而易见的。因此,目的是包含所有这种落在所附权利要求的实质和宽泛范围内的替代、改进和变化。

[0423] 将在本说明书中提到的所有公开、专利和专利申请整体结合于该说明书中以供参考,结合至好像将每篇单独的公开、专利或专利申请特别并分别表示为结合于此以供参考一样的程度。另外,不应将对本申请中的引证或标识的任何参考解释为,允许可将这种参考文献作为本发明的现有技术。在使用段落标题的范围内,不应将其解释为是必须限制性的。

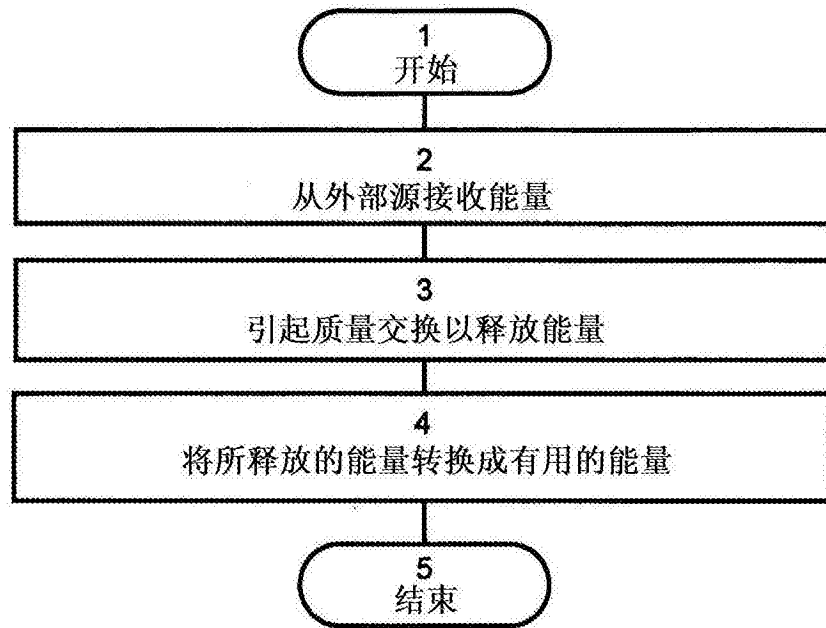


图1

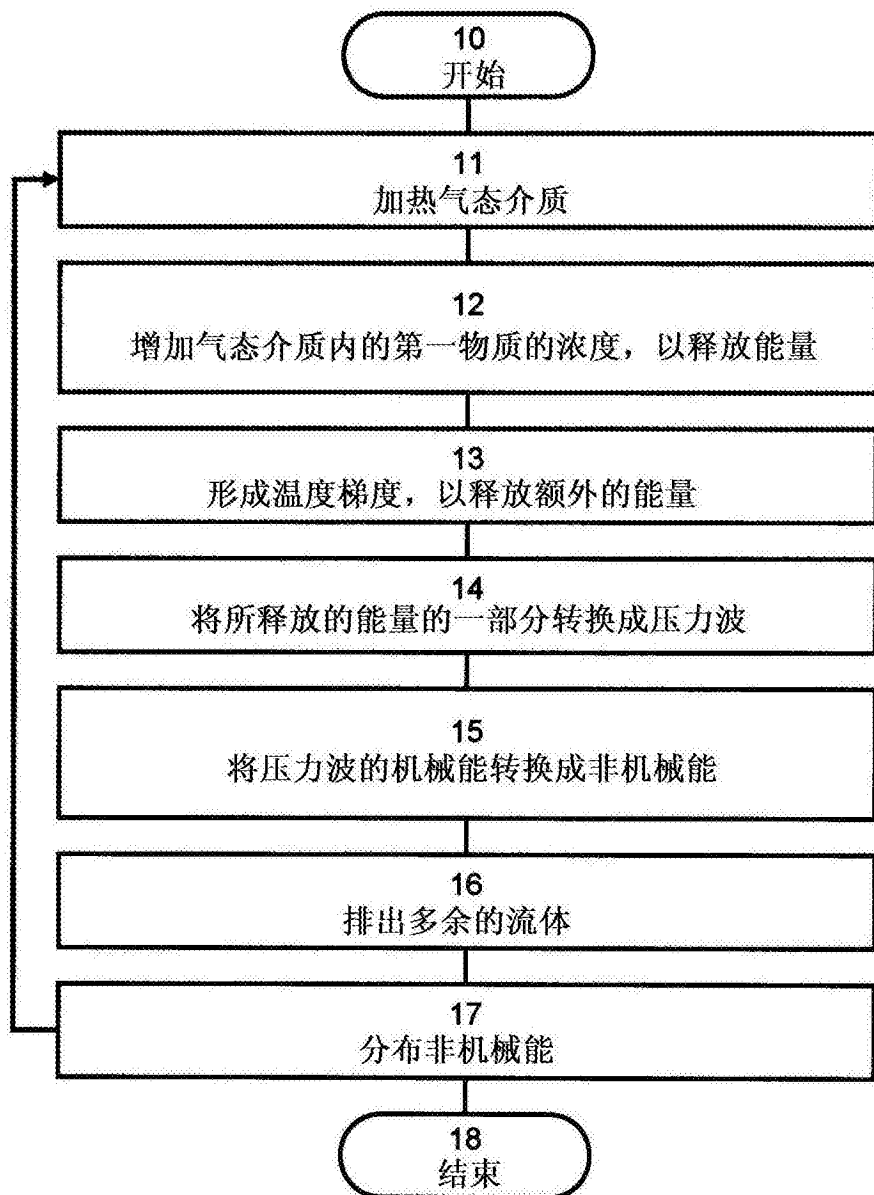


图2

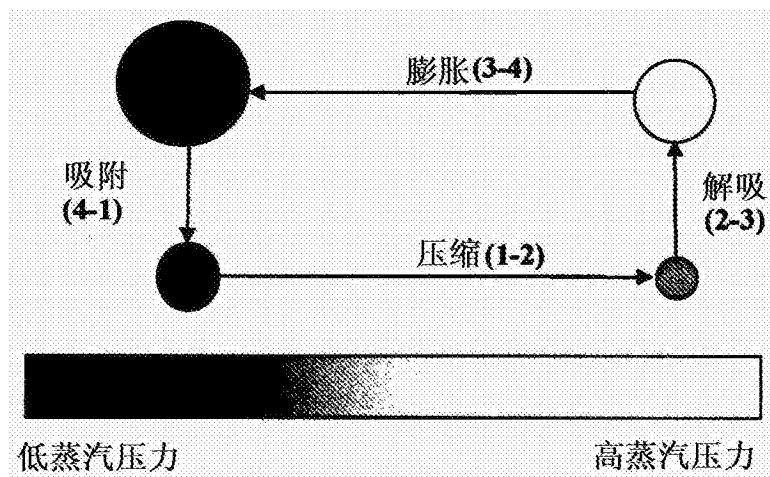


图3A

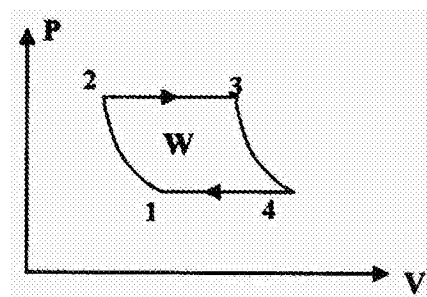


图3B

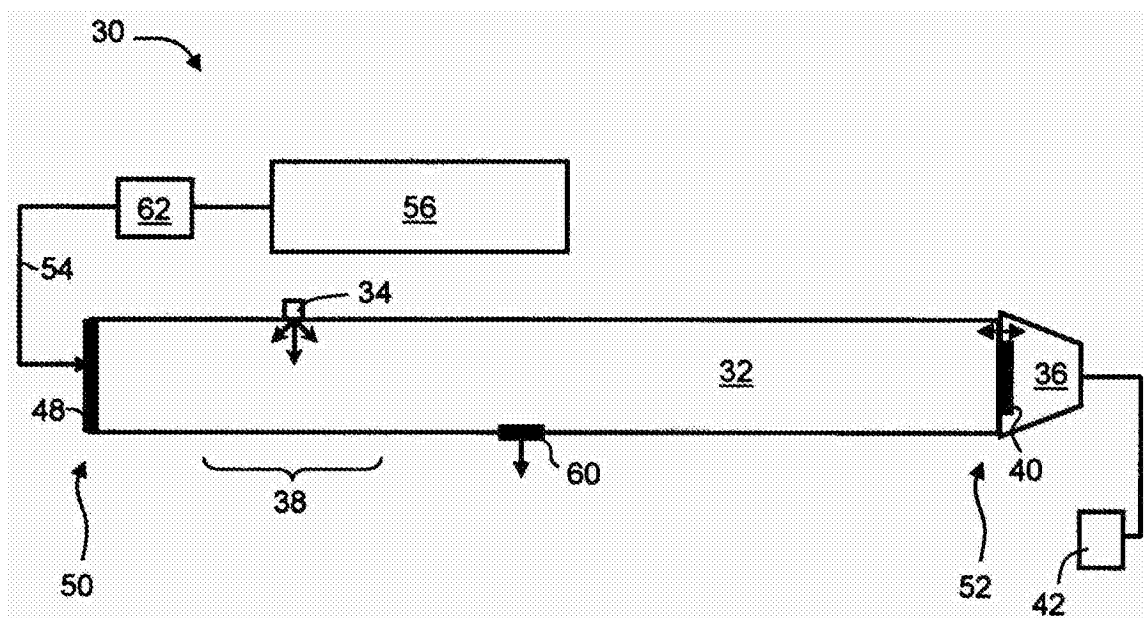


图4A

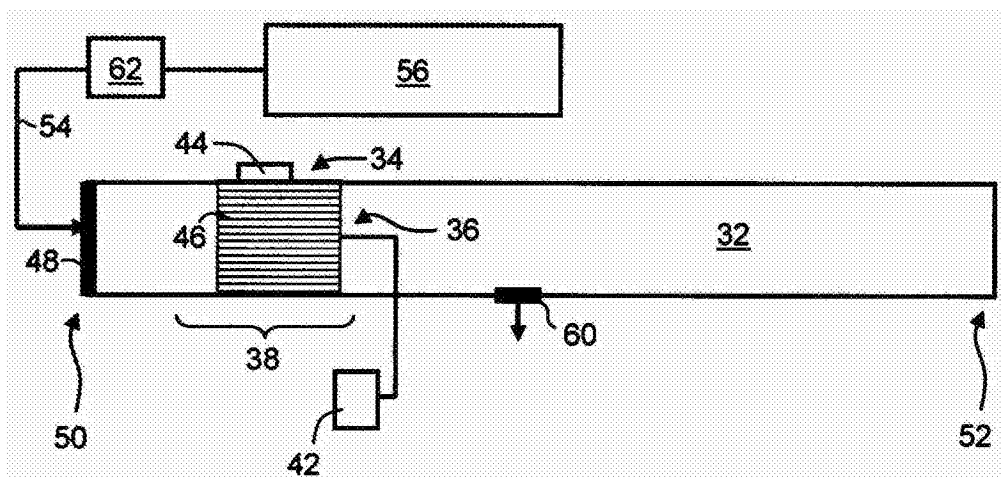


图4B

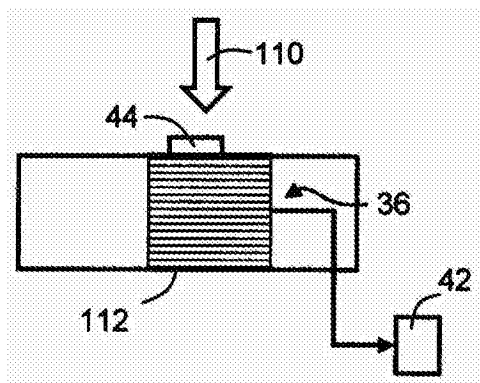


图4C

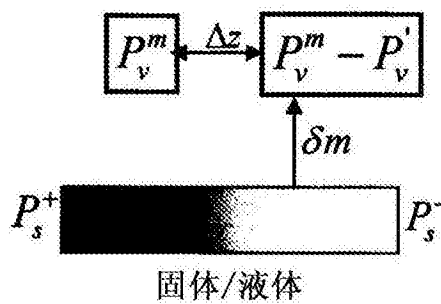


图5A

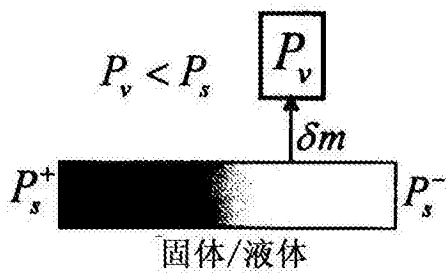


图5B

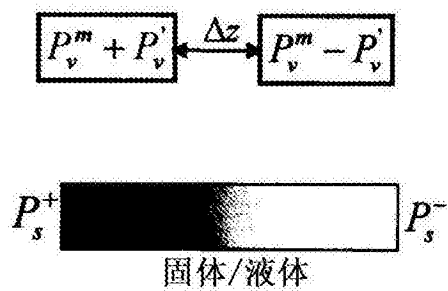


图5C

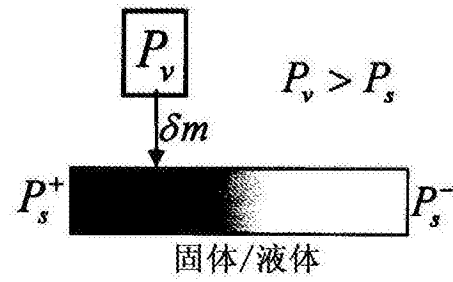


图5D

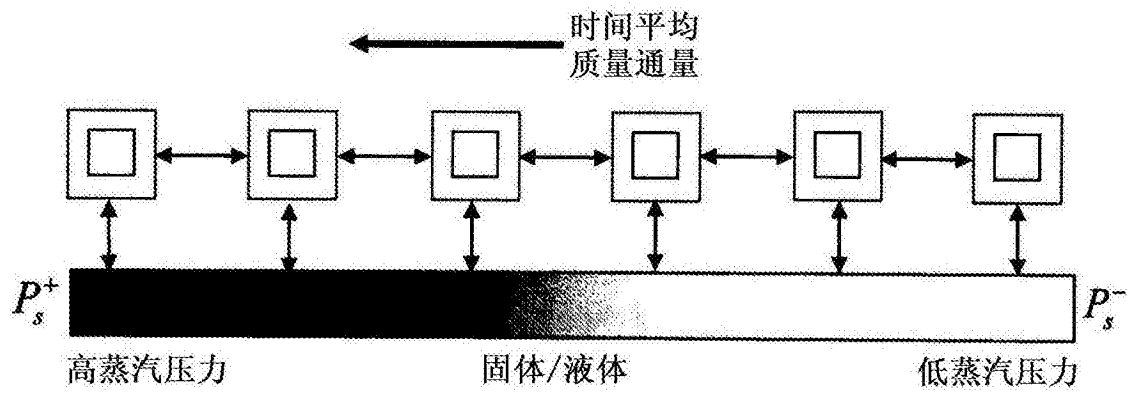


图5E

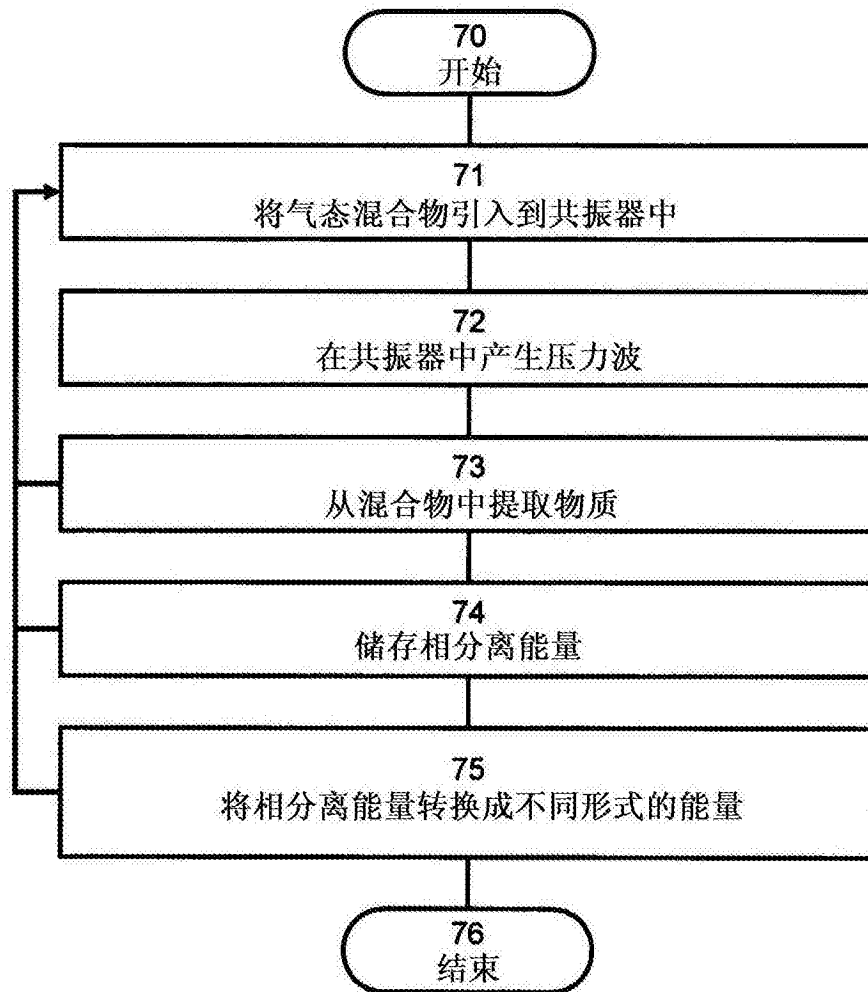


图6

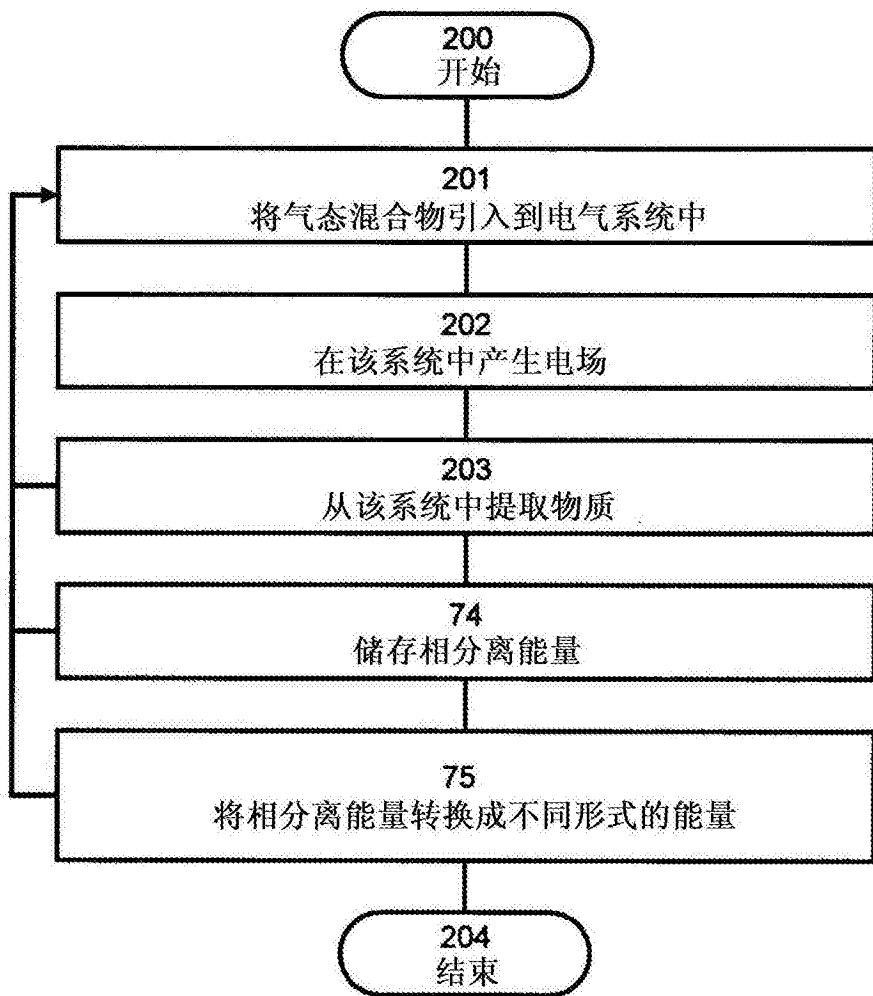


图7

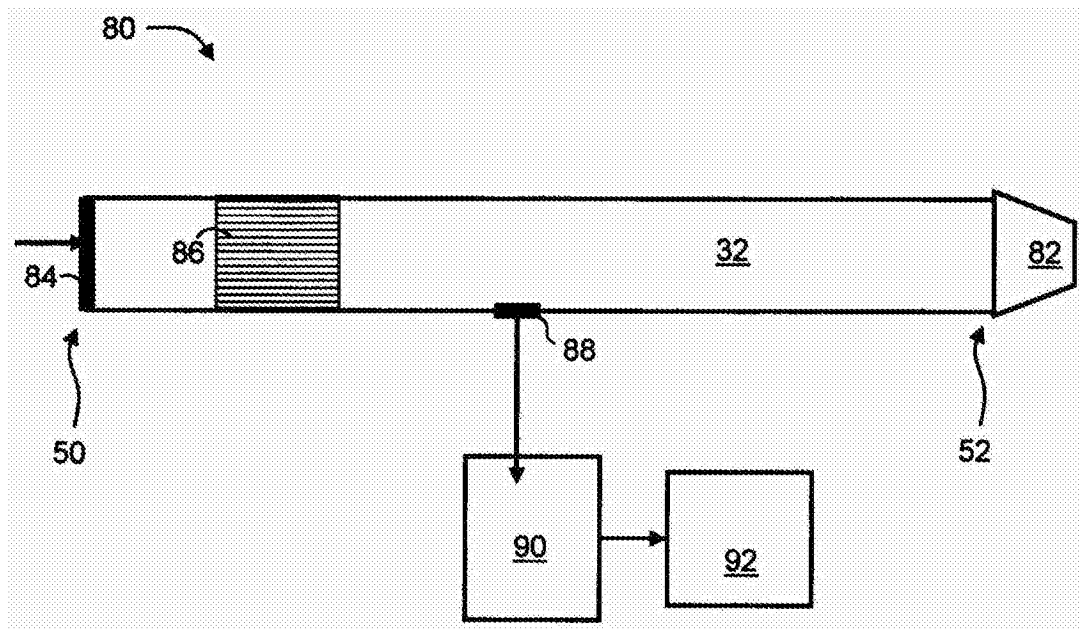


图8

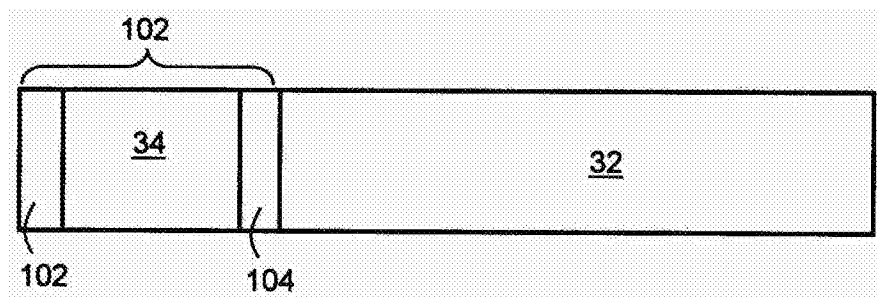


图9

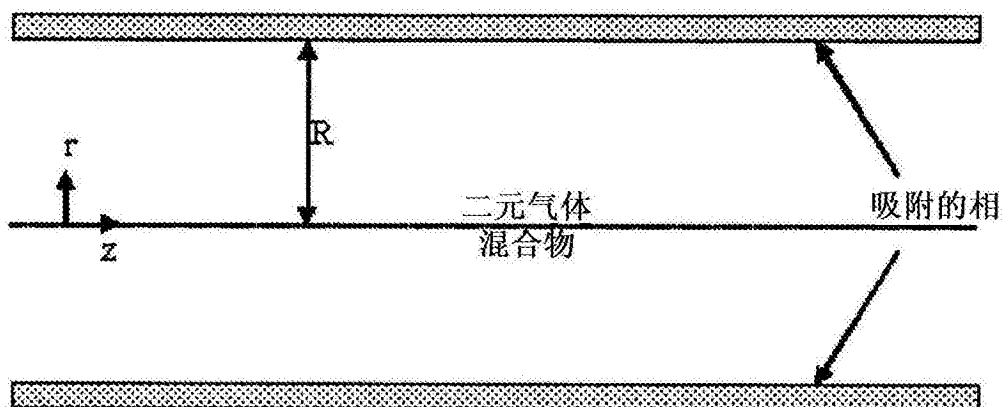


图10

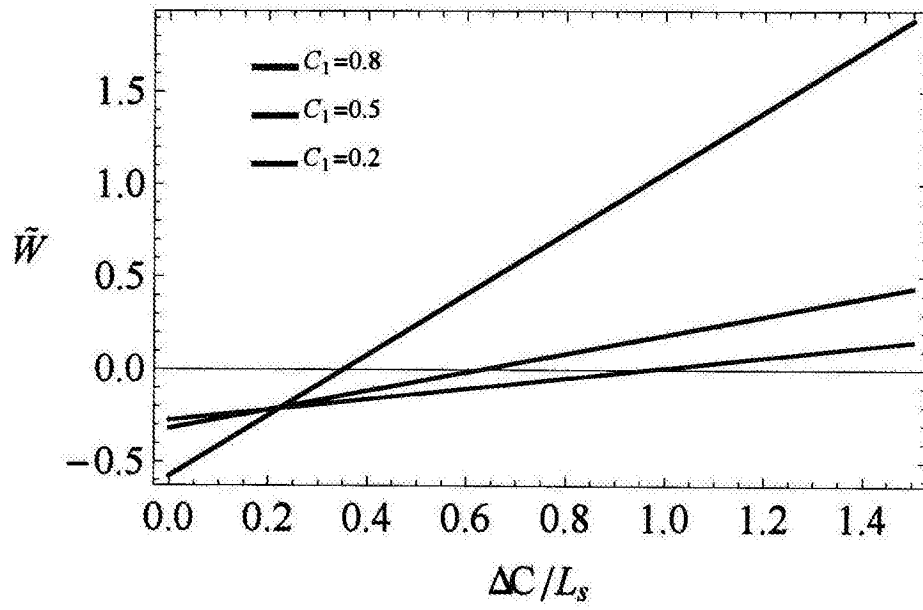


图11

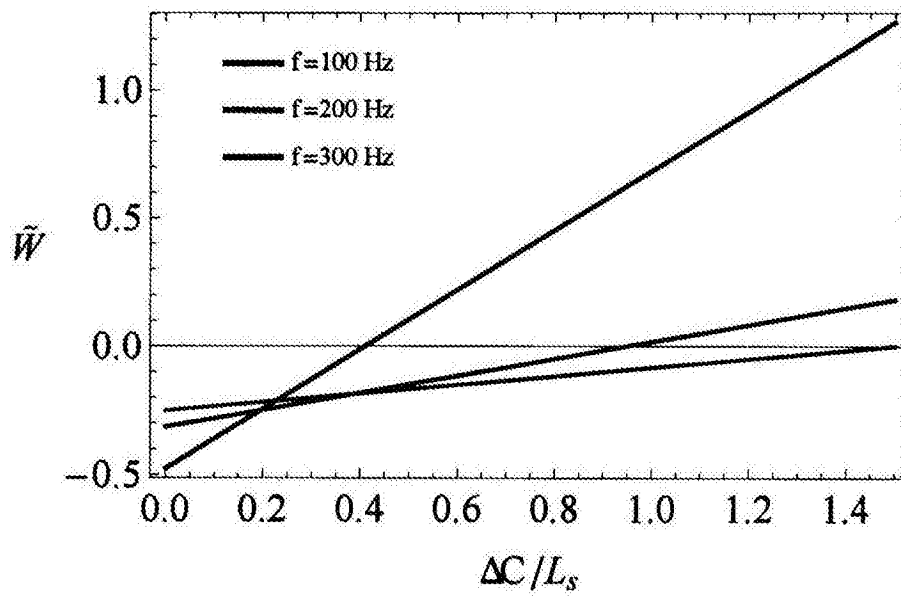


图12A

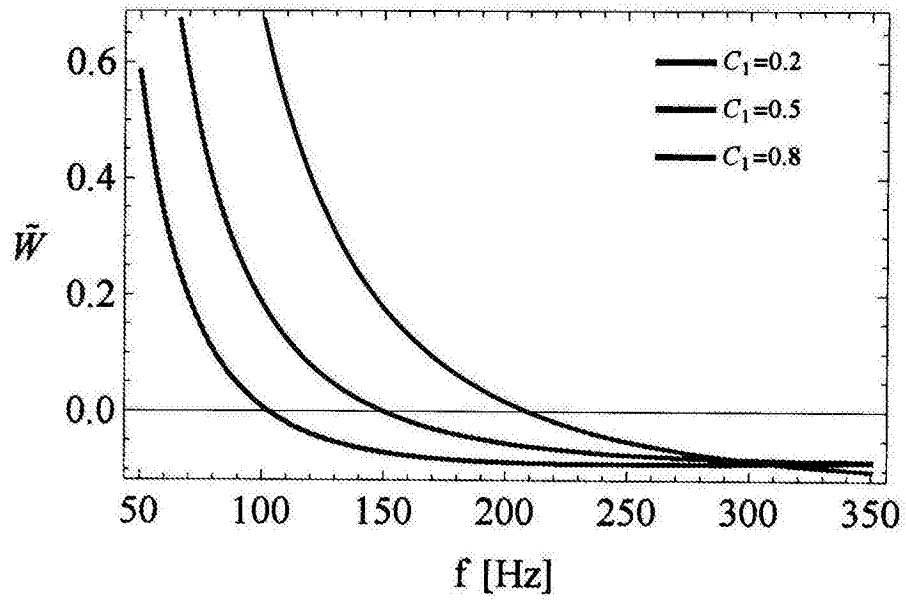


图12B

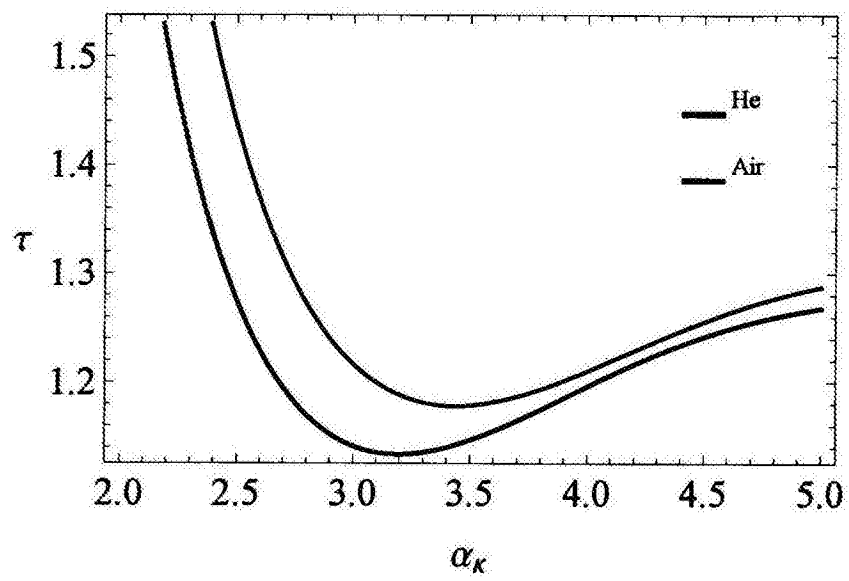


图13A

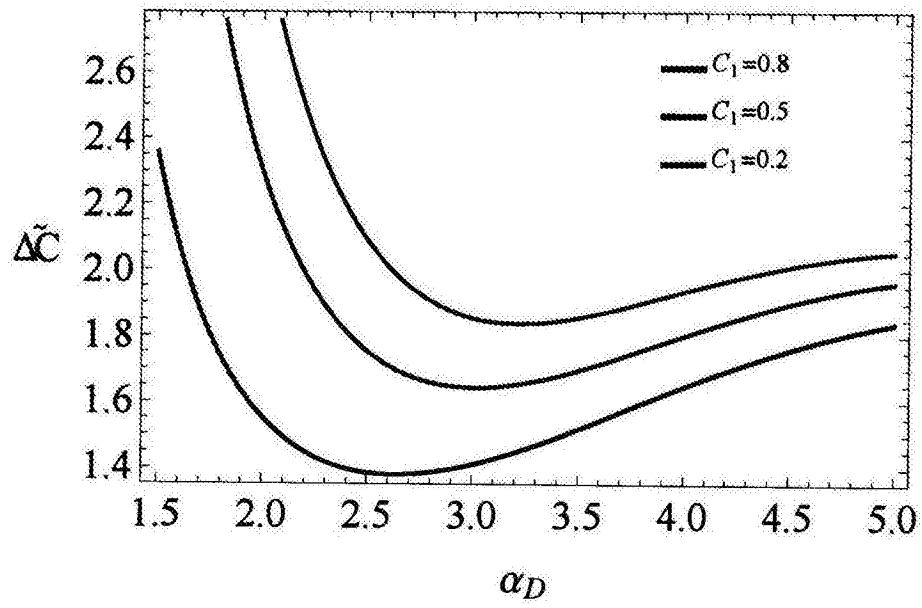


图13B

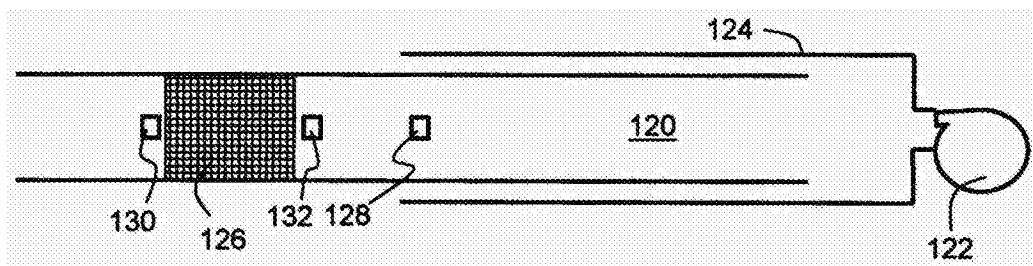


图14

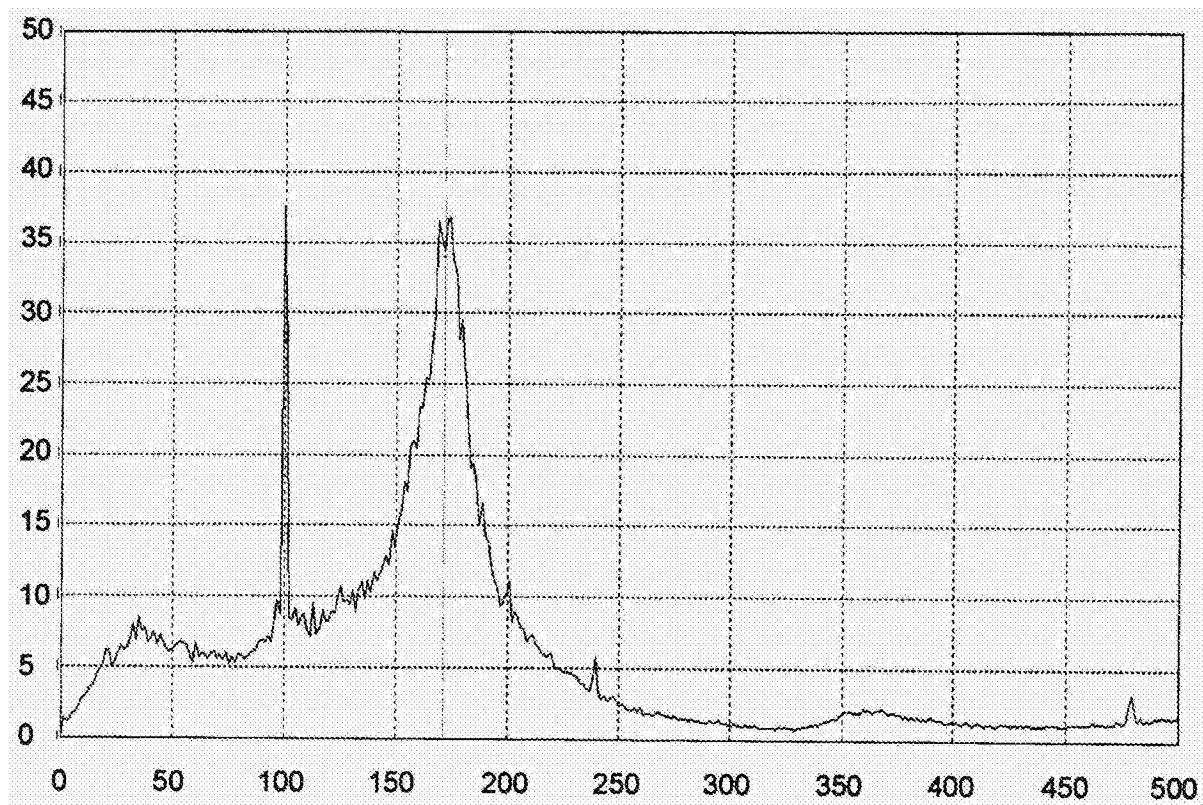


图15A

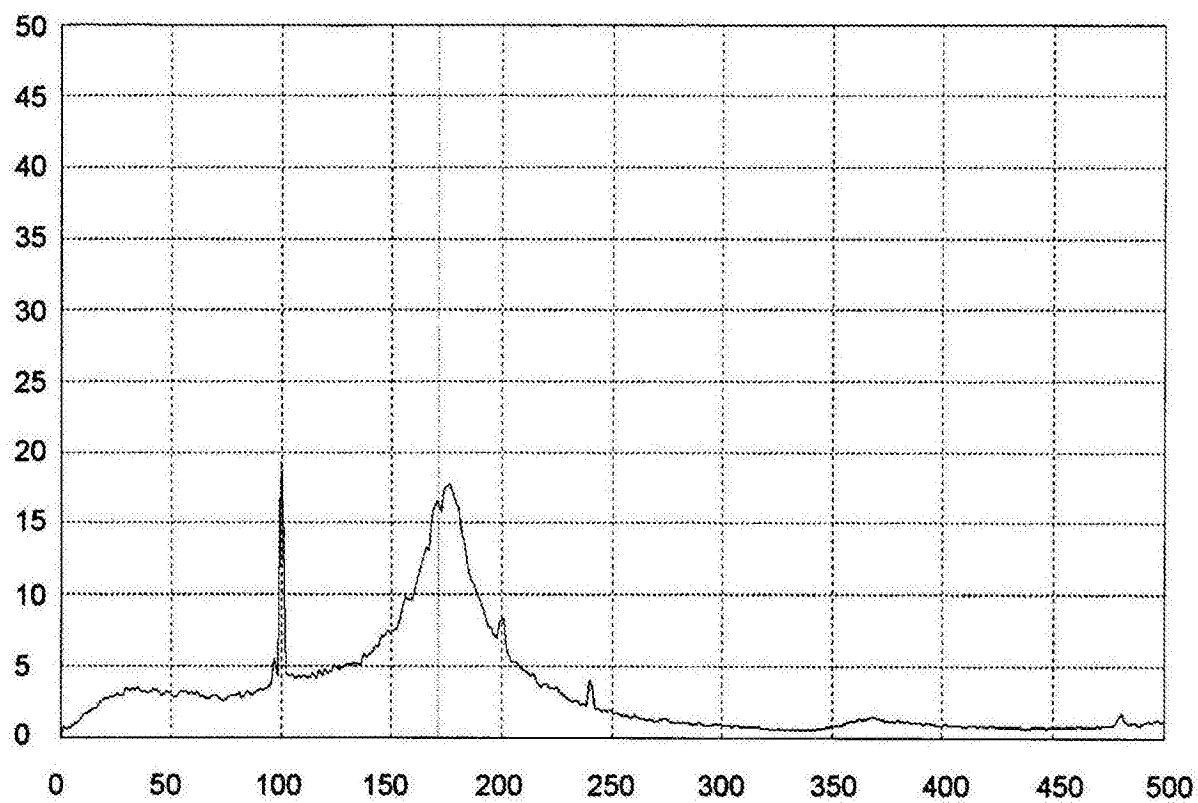


图15B