



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102792022 B

(45) 授权公告日 2016. 02. 24

(21) 申请号 201080049955. 6

F24J 2/30(2006. 01)

(22) 申请日 2010. 09. 20

F24J 2/04(2006. 01)

(30) 优先权数据

61/243, 763 2009. 09. 18 US

F03G 6/06(2006. 01)

61/243, 769 2009. 09. 18 US

CN 101105342 A, 2008. 01. 16,

61/356, 882 2010. 06. 21 US

US 4401103 A, 1983. 08. 30,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 05. 04

US 2008/0011290 A1, 2008. 01. 17,

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2010/049474 2010. 09. 20

US 4523629 A, 1985. 06. 18,

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/035232 EN 2011. 03. 24

DE 4331784 A1, 1995. 03. 23,

US 2007/0221208 A1, 2007. 09. 27,

审查员 龚洋

(73) 专利权人 麻省理工学院

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 A · H · 斯洛克姆 J · 布昂吉诺

C · W · 福斯博格 D · S · 科德

A · T · 帕克森

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 蒋世迅

(51) Int. Cl.

F24J 2/38(2014. 01)

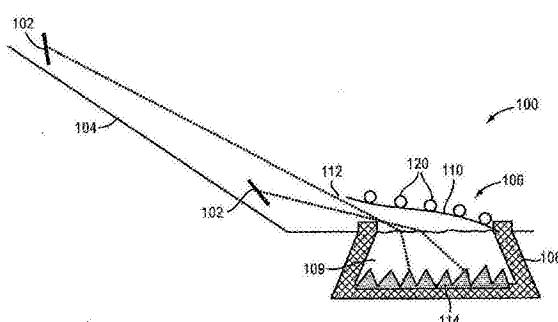
权利要求书1页 说明书18页 附图12页

(54) 发明名称

会聚的太阳能电力系统

(57) 摘要

会聚的太阳能电力系统。用于会聚和储存太阳能的系统和方法被提供。供该系统和方法使用的太阳能接收器，可以包含用于保持诸如相变材料的太阳能吸收材料的容器，以及被放置在该容器之上的冷却的盖，用于使沿该盖的下侧被收集的汽化的相变材料凝结和收集。



1. 一种会聚的太阳能电力系统,包括:

基于地面的太阳能接收器,适合以池的形式容纳把太阳能转换为热量的至少半透明的太阳能吸收材料;和

多个定日镜,被配置成使照射的太阳辐射直接地、没有更多反射地反射进接收器的孔中,以照射在所述池中的太阳能吸收材料的暴露的水平表面上并穿入所述池中的太阳能吸收材料中。

2. 根据权利要求 1 所述的系统,还包括太阳能吸收材料,且其中该太阳能吸收材料包括相变材料。

3. 根据权利要求 2 所述的系统,其中该相变材料是半透明的。

4. 根据权利要求 2 所述的系统,其中处于液体形式的相变材料包括熔化盐。

5. 根据权利要求 4 所述的系统,其中该熔化盐选自氯化物盐、氟化物盐、碳酸盐、亚硝酸盐、以及它们的混合物组成的组。

6. 根据权利要求 5 所述的系统,其中该熔化盐是氯化物盐,且该相变材料还包括氢氧化物,以便当该熔化盐与潮湿空气发生接触时,降低 HCl 的生成。

7. 根据权利要求 1 所述的系统,其中该太阳能吸收材料包括纳米粒子混合物,以改善其太阳辐射吸收特征。

8. 根据权利要求 1 所述的系统,其中该定日镜被定位在接收器的孔上方的标高处并被定向,以便通过该孔的太阳辐射主要地被引导到太阳能吸收材料的表面。

9. 根据权利要求 8 所述的系统,其中该定日镜被安装在山坡上。

10. 根据权利要求 1 所述的系统,其中该接收器被埋入地中。

11. 根据权利要求 1 所述的系统,其中该接收器包括容器和被放置于其上的盖。

12. 根据权利要求 11 所述的系统,其中额外的定日镜被放置在接收器下面的标高处并被定向,以便通过该孔的太阳辐射被引向该盖的下侧并且适于被反射进所述池中的所述至少半透明的太阳能吸收材料中。

13. 根据权利要求 1 所述的系统,其中该基于地面的接收器和定日镜一起,被配置成有利于加热太阳能吸收材料到至少 600°C 的温度。

14. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述接收器被设置在地面上。

15. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述太阳能吸收材料的至少一部分体积吸收太阳辐射,并将所吸收的太阳辐射储存为热能。

## 会聚的太阳能电力系统

[0001] 交叉参考相关申请

[0002] 本申请要求于 2009 年 9 月 18 日提交的美国临时申请序列 No. 61/243,763 和 61/243,769, 以及于 2010 年 6 月 21 日提交的美国临时申请序列 No. 61/356,882 的优先权和利益。所有三个申请被通过对它们的全文引用合并在本文中。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及太阳能电力系统和方法, 用于以高温把太阳能会聚并储存在充满流体的接收器中。该储存的能量可以用于发电。

### 背景技术

[0004] 当前流行使用的大规模太阳能会聚器和储存系统, 通常包含太阳能反射器场地, 使光聚焦到塔式安装的接收器结构上。该接收器结构可以是直接吸收型(如, 向下流过竖直表面的熔化盐)或管型(如, 用流过管的水)。该热储存媒体吸收热能, 并在水的情形下转变成蒸气, 或者可以用于产生蒸气, 供常用的蒸气涡轮机系统用于发电。被加热的媒体可以被转移到保温的储存箱, 以便当太阳不再照射时, 来自储存箱的热的媒体, 可用于为动力循环(power cycle)提供热量。

[0005] 太阳能电力塔有诸多不足之处, 从负面影响它们的经济性。例如, 由于接收器中锅炉管是不保温的并暴露于周围环境, 这样的系统因空气对流和从热的表面的辐射, 招致高的热损耗。此外, 储存媒体必须被向上抽运到锅炉的标高, 这要求相当大的抽运电力。结果是, 太阳能塔式系统的整个效率, 是相对低的 - 约 20%。再有, 建造支撑该笨重接收器的太阳能电力塔的投资费用是高的。

[0006] 塔式安装的接收器的一些缺点, 在另外的系统中已被克服, 这些系统的塔支承二次反射镜, 把太阳能再引进地面上的接收器, 或者最好是部分地被埋入地面的接收器。在消极方面, 二次反射镜的使用还降低太阳能转换为热能的效率。为了使二次反射镜不致因过热而损坏, 该系统的效率进一步受二次反射镜能够承受的最大太阳能密度的约束。

[0007] 对太阳能电力系统储存高能量密度能力的附加的约束, 是由储存媒体处于化学稳定的温度范围造成的。目前使用的熔化盐合成物, 诸如硝酸盐混合物, 当温度接近 600° C 时分解, 因此限制最大温度, 从而限制该系统的能量储存密度和接收器下游的动力循环的效率。

[0008] 因此, 需要的太阳能电力系统是: 有利于高效太阳能转换、高密度能量储存和耐用又连续的电力供应, 最好是低投资费用的。

### 发明内容

[0009] 本发明提供会聚的太阳能电力系统和方法, 这些系统和方法同时解决上述太阳能电力系统的许多问题和限制。在不同的实施例中, 这些系统和方法, 利用含有(通常是高温的)太阳能吸收材料, 诸如相变材料的太阳能接收器, 与太阳能会聚器系统结合起来, 该太

阳能吸收材料起热储存媒体的作用。该太阳能会聚器系统可以由定日镜的阵列形成，该定日镜阵列反射并会聚太阳光进入接收器。在该接收器中，太阳辐射全被该吸收材料的至少一部分体积吸收，并由此转换为能够立即被储存的热能，而且被应用于，例如，作为过程热量的源，产生供常用的蒸气循环系统发电的蒸气，或使工作流体在脱盐循环中预热。

[0010] 在某些实施例中，接收器被(至少部分地)埋入地面，地面提供绝热，从而使基于地面的接收器成为比塔式安装的接收器更为经济的热库。定日镜可以被置于接收器之上的标高上(例如，在山坡上)，有效地作为有小面的向下射束光学装置(faceted beam-down optic)起作用。该配置消除与向下射束系统关联的费用和复杂性，该向下射束系统通常包含大的二次塔式基础的双曲形反射镜和在塔的基座上许多初级的会聚功率收集器(power collector)。

[0011] 该接收器可以包含开口容器，用于保持相变材料“槽”或“池”，以及置于该容器之上的盖，以限制相变材料由于汽化带来的损耗和帮助把被捕获的太阳能保留在接收器中。把热储存媒体包含在箱型容器中而不是锅炉管中，允许使用能够承受更高温度的容器材料和构造，且此外通常还相对便宜。该盖可以包含冷却系统，以利于汽化的相变材料(通常是熔化盐合成物)凝结和保存，由此使材料损耗最小。凝结的相变材料可以在盖的下侧形成反射层。由容器和/或盖形成的结构，可以包含单个入口孔，太阳辐射被引导通过该孔进入。任选的跨越该入口孔的空气帘，可以进一步降低或防止能量和相变材料从该接收器损耗，以及防止相变材料被含尘和污物的空气污染。换种方式，该接收器可以包含门，用于例如，随太阳辐射的强度而打开和关闭该入口孔。

[0012] 在某些实施例中，该热储存媒体是熔化盐合成物，它在超过700°C的温度，而最好高达至少1000°C的温度上是化学稳定的。要把熔化盐中储存的热量转移到工作流体，该合成物的一部分可以与较冷的熔化盐混合，用于把混合物的温度降低到足够低的值，以便能引导它通过常用的产生水蒸汽的热交换器。在通过热交换器之后，该盐被回收，进入接收器和/或较冷的熔化盐的储存循环。换种方式，为达到更高的热力学效率，回热式热交换器可以被使用，在该回热式热交换器中，来自该箱的热的盐，把热量转移到从蒸气发生器热交换循环中返回的较冷的盐。在一些实施例中，该盐混合物在接近或超过700°C的温度上进入热交换器，有利于合理地高效的直接空气布雷顿(Brayton)动力循环的使用，该布雷顿动力循环不要求水冷。

[0013] 在一些实施例中，接收器中熔化盐按需要从容器的顶部被抽运，向蒸气发生器或其他动力循环提供大体上恒定的动力输入(power input)。来自蒸气发生器的冷的盐被抽运到容器的底部。该容器可以包含保温的分隔板，该分隔板在该容器内的被热致分层的热的和冷的层之间提供物理的和热的屏障。该分隔板可以沿轴向上、下移动，允许熔化盐通过该板和容器壁之间的环形间隙空间(clearance space)，越过该板移动，使热的和冷的盐的体积保持在需要的温度范围内(例如，在大体上恒定的温度上)，以便连续操作。结果是，即使太阳不再照射时，容器中盐的平均温度下降，也能够提供高温的蒸气。此外有利的是，因为容器中盐的总体积不变化，盐的顶表面仍然在太阳场(solar field)的焦点上。

[0014] 按照不同的实施例的太阳能电力系统，提供能量储存，对有云遮挡或夜间缺乏太阳光进行补偿。因此，它们有助于昼夜不停地满足基本负荷动力需求(power needs)，无需大量燃烧矿物燃料的支持或高成本的(且尚未可用)试验性电池储存器。结果是，本文公开

的不同的太阳能电力系统不但提供能量节省,而且为公用电力公司提供显著的免安装的容量。

[0015] 一方面,本发明提供会聚的太阳能电力系统,包含基于地面的太阳能接收器,以及多个定日镜,这些定日镜被配置成使它们把射入的太阳辐射直接反射(即,没有进一步的反射),通过接收器孔进入接收器的内部。该接收器适合容纳太阳能吸收材料(该太阳能吸收材料本身可以是该系统的部件),用于使太阳能转换为热量。该太阳能吸收材料可以包含或实质上由相变材料组成,该相变材料可以是半透明的,并可以按液体形式包含熔化盐(诸如,举例说,氯化物盐、氟化物盐、碳酸盐、亚硝酸盐、或它们的混合物)。在某些实施例中,该熔化盐是氯化物盐,而该相变材料还包括氢氧化物,以便当该熔化盐与潮湿空气接触时,降低HCl的生成。此外,在一些实施例中,该太阳能吸收材料包含纳米粒子混合物,以改善该吸收材料的太阳辐射吸收特征。

[0016] 定日镜可以被定位在接收器的孔上方的一定标高上(例如在山坡上),并被定向,以便通过该孔穿过的或被聚焦的太阳辐射,主要地被引导到太阳能吸收材料的表面上。该接收器可以至少部分地被埋入地面。在一些实施例中,该接收器包含容器和被置于该容器之上的盖。定日镜于是可以被置于接收器以下的一定标高上并被定向,以便穿过该孔的太阳辐射被引向该盖的下侧。该基于地面的接收器和定日镜一起,可以被配置成有利于加热太阳能吸收材料到在约600°C到至少约1000°C范围内的温度。

[0017] 另一方面,本发明针对一种太阳能转换系统,它包含太阳能接收器、热交换器和混合腔,该太阳能接收器适合容纳用于把太阳能转换为热能的太阳能吸收材料;该热交换器适合把来自液化的太阳能吸收材料的热能转移到工作流体,用于产生机械能和/或电能;而该混合腔适合把液化的太阳能吸收材料与来自热交换器出口的较冷的太阳能吸收材料混合,以便在传送该液化的太阳能吸收材料至热交换器之前,降低该液化的太阳能吸收材料的温度。

[0018] 该系统还可以包含与接收器流体连通的热能储存库,和/或处在热交换器和混合腔中间的(并与热交换器和混合腔流体连通的)一个或多个热能储存库。该太阳能接收器可以适合容纳温度在约600°C到至少约1000°C范围内的相变材料。在一些实施例中,该系统包含用于把工作流体的热能转换为机械能的涡轮机,和/或由该涡轮机驱动的发电机,以便把机械能转换为电能。

[0019] 本发明另一方面还提供一种使用会聚的太阳能电力系统产生能量的方法。该方法包含的步骤有:在单次反射中引导太阳辐射通过接收器孔进入太阳能接收器,以便把太阳能会聚在该接收器中,从而加热被包含在该接收器中的太阳能吸收材料到在约600°C到至少约1000°C范围内的温度,把来自被加热的太阳能吸收材料的热能转移到工作流体,并用该工作流体产生至少机械能和电能之一。

[0020] 在一些实施例中,该热能在超过约700°C的温度上被转移到工作流体。该工作流体可以是或包含空气,而该能量产生步骤可以利用直接空气布雷顿动力循环(它在某些实施例中不要求水冷)。在一些实施例中,该热能从被加热的太阳能吸收材料被转移到热交换器中的工作流体。该方法此外可以包含使来自接收器的液化的太阳能吸收材料,与来自热交换器出口的较冷太阳能吸收材料混合的步骤,以便在传送该液化的太阳能吸收材料到热交换器之前,降低该液化的太阳能吸收材料的温度。

[0021] 本发明的再另一个方面,涉及一种太阳能接收器。该接收器包含有适合容纳太阳能吸收材料的内部的容器,以及被置于该容器之上的盖。该容器定义沿上部的开孔,以允许太阳辐射照射在太阳能吸收材料上,并在一些实施例中,与该盖一道形成入口孔,以便允许太阳辐射通过该孔穿过。该系统还包含冷却系统,以利于沿盖的下侧被收集的至少一部分汽化的太阳能吸收材料的凝结。该盖的下侧可以适合把照射的太阳辐射向该容器内部反射,并可以形成非成像的会聚器。在一些实施例中,该会聚器包含与在盖上收集的凝结的太阳能吸收材料组合的盖的下侧。该盖可以适合把至少一部分凝结的太阳能吸收材料返还给该容器的内部。

[0022] 在一些实施例中,该接收器包含至少一个对流引发单元,被放置在或接近该容器内部的底部。该对流引发单元可以是,或包含大体上锥形的元件。该系统还可以包含门,任选地是保温的,用于关闭该入口孔以降低从该接收器的热能损耗,并阻止通过该孔的质量转移,或者包含跨越入口孔的空气帘,以降低热能损耗和降低通过该孔的质量转移(mass transfer)。

[0023] 在又一方面中,是提供一种用于发电的捕获太阳能的方法,该方法包含:引导太阳辐射通过接收器的入口孔(该孔由容器和/或被置于该容器之上的盖形成,而该容器有暴露的其中有太阳能吸收材料的内部);冷却该盖使液化的太阳能吸收材料产生的蒸汽凝结;以及把至少一部分被凝结蒸汽返还给该容器的内部。淀积在该盖下侧的被固化太阳能吸收材料可以被熔化,例如,作为直接照射在该被固化材料上的太阳辐射的结果,和/或作为反射离开接收器中材料的上表面的太阳辐射的结果。在一些实施例中,该方法还包含:形成跨越入口孔的空气帘,以降低热能损耗和/或质量转移;和/或诱发该容器中相变材料的对流(如,使用被放置在或靠近容器内部的底部的一个或多个对流引发单元)。

[0024] 在又一方面中,各个不同的实施例是针对一种太阳能接收器,它包含适合容纳和大体上封闭熔化盐的容器结构,以及水平地放置在该容器结构中可沿竖直方向移动的分隔板,以便把该容器结构分隔成上部和下部。该容器结构定义允许太阳辐射通过而进入该接收器的入口孔,该入口孔可以被门关闭,该门在一些实施例中是该接收器的一部分。该分隔板形成环形间隔空间,允许熔化盐在该容器的上部和下部之间流动。该环形间隔空间的径向尺寸可以被选择,以便大体上防止分隔板与容器之间的机械结合,和/或使容器内分隔板的相对运动,促进盐卷流排出(plume expulsion)和在分隔板运动的相反方向上(如在热的一侧)的混合。

[0025] 该接收器还可以包含竖直运动致动系统,以控制分隔板的竖直位置。用于驱动该致动系统以使分隔板移动的控制器,也能够被包含。该控制器可以移动分隔板,以便当太阳能被添加和借助从分隔板热的一侧抽运盐,通过热交换器,并回到冷的一侧(即容器的下部)而抽出热能时,使该分隔板热的一侧(即,一般是容器的上部)上的盐大体上保持恒定温度。换句话说,该控制器可以移动分隔板,以便使接收器的净热增量,大体上与从下部位移至上部的熔化盐的显热(sensible heat)增量平衡,并使从接收器的净热抽出,大体上与从上部位移至下部的熔化盐的显热损失平衡。该控制器还可以移动该分隔板,以便使该分隔板的位置,大体上与该容器结构中热致分层的热的和冷的熔化盐层之间的边界重合。

[0026] 该分隔板可以由抗腐蚀与蠕变的合金或带肋的钢板构成,或者包含抗腐蚀与蠕变的合金或带肋的钢板。此外,它可以包含保温耐熔陶瓷层。当该接收器被熔化盐充满时,分

隔板可以基本上是随遇地漂浮的。在一些实施例中，该分隔板包含中空管状结构。该分隔板的上表面可以是有纹理的、被涂覆的和 / 或被氧化的，以增强太阳能吸收率和降低镜面反射率。

[0027] 再一方面，是针对在保持熔化盐的被覆盖容器中储存太阳能的一种方法，该容器被水平的分隔板分成上部和下部，其中该分隔板留出环形间隔空间，供盐从中流过。该方法包含：在该容器中接收太阳能，从而加热容器的上部中熔化盐；竖直地移动分隔板，以便不断地 分别地在该上部和该下部的熔化盐的平均温度之间，保持至少最小的温度差；以及从容器的上部中的熔化盐抽出热量。

[0028] 该方法还可以包含，根据通过由被覆盖的容器定义的入口孔的太阳能强度，打开和关闭该入口孔的门。抽出热量可以包含，从该容器的上部抽运热的迷人熔化盐送至热交换器，并从该热交换器把较冷的盐返还给该容器的下部。在该容器上部和下部中熔化盐的总体积，可以基本上被保持恒定。该方法还可以包含有效地冷却该容器的盖，而从有效地被冷却的盖抽出的热量，可以被用于预热动力循环和 / 或脱盐循环中的流体。在一些实施例中，汽化的盐在有效地被冷却的盖的下侧被凝结。

## 附图说明

[0029] 前面所述将从下面结合附图的详细描述更容易理解，附图中：

[0030] 图 1 是按照本发明一些实施例的太阳能电力系统的示意侧视图，该系统包含安装在山坡的定日镜和在该山底的接收器；

[0031] 图 2 是按照一些实施例的定日镜阵列的示意透视图；

[0032] 图 3 是按照一些实施例的包含倾斜的接收器的小规模太阳能电力系统示意侧视图；

[0033] 图 4 是按照一些实施例的有单个入口孔的太阳能接收器的透视图；

[0034] 图 5A 和 5B 是按照一些实施例的有两个入口孔的太阳能接收器的不同透视图；

[0035] 图 6A 和 6B 按照一些实施例，分别是倾斜的太阳能接收器和它与热交换器交接的剖面透视图；

[0036] 图 7 按照一些实施例，示出空气帘的速度分布示意图；

[0037] 图 8 按照一些实施例，示出对流引发单元的效果的一组计算机模拟图像；

[0038] 图 9A 和 9B 按照一些实施例，分别是分隔板在下位置和在上位置的被分隔太阳能接收器的剖面透视图；

[0039] 图 10 是曲线，按照一些实施例，示出输入到被分隔的太阳能接收器的太阳功率的两昼夜循环，以及对应的分隔板位置；

[0040] 图 11 是流程图，示出按照一些实施例的方法，用于确定在被分隔太阳能接收器中的分隔板位置；

[0041] 图 12 是被分隔的充满盐的太阳能接收器容器的侧视图，对容器中分隔板和壁之间不同径向间隙，示出熔化盐卷流的对比；

[0042] 图 13 是流程图，示出按照一些实施例的方法，用于设计用于被分隔的太阳能接收器的分隔板；和

[0043] 图 14 是方框图，示出按照一些实施例的热能储存、转移和发电系统。

## 具体实施方式

[0044] 1. 太阳能会聚器系统配置

[0045] 按照本发明各个不同的实施例的会聚太阳能电力系统，一般把太阳能反射器场地与热接收器结合起来，该接收器例如包含被覆盖的容器。图1示出这种系统的示例性配置100，其中的定日镜102，即能跟踪太阳运动的太阳能反射器，被安装在山坡或其他斜坡104上。定日镜的反射表面可以有抛物面形状。操作中，定日镜102通常被取向，以便再引导射入的太阳光直接进入在或接近斜坡底或山底的接收器106，如图所示；不需要二次反射器。在非常高的太阳能注入的条件下，一些定日镜102可以不对准或取向错误，以免接收器106过热；然而，如在下面所讨论，接收器106被设计成容许并操作在远超过常用系统的温度上。

[0046] 接收器106包含保持热储存流体109，诸如熔化盐的合成物或其他相变材料的容器108。容器壁可以是保温的。在一些实施例中，保温是通过把接收器106大部分埋入地中，只留出接收器盖110和入口孔112实现的，太阳辐射能够通过地面上的该入口孔112进入，如图所示。被反射离开定日镜102并通过入口孔112的太阳辐射，可以或者直接入射在热储存流体的表面上，或者入射在盖110的下侧，取决于它进入接收器所沿的角度。穿透储存流体的太阳辐射，按容积沿它的路径被吸收。被捕获的太阳能通过对流可以被分布到整个池，该对流可以用定位在容器108的底部和/或壁上的任选的对流单元114而变得更为有效。

[0047] 在一些优选实施例中，该热储存流体是高温盐合成物。即，在约700°C到约1000°C或更高的范围中的温度下不分解的一种或多种盐的合成物。使用高温储存媒体，允许定日镜阵列把非常大量的太阳能会聚到接收器中，并可以导致该系统更高的能量效率。在熔化盐的池表面，温度通常达到使一些熔化盐汽化的程度。汽化的盐蒸汽上升，并沉积在盖110的下侧，该盖110可以有效地被冷却以促进凝结和/或固化。照射在固化的盐上的被反射的太阳光，可以有利地使它再熔化。作为凝结和熔化过程的结果，形成在盖上的盐层被不断地再填满。

[0048] 图2画出系统的等角视图，该系统有数十个定日镜102被安装在山坡104上并引导太阳辐射进入位于地面水平116上的接收器106。然而，典型的系统可以包含数千个定日镜，这些定日镜可以按阵列或另一种方式排列，取决于局部地形。如果，如图所示，该接收器106被置于(或埋入)平坦地面120上，离该山有一些距离，那么能够获得比接收器也位于该山上的配置更高的效率。在某些优选实施例中，接收器106离山底的距离约为定日镜场地半径的一半。在山底和接收器之间的空间，可以安装常用的光电板以利用该可用的空间发电，从而增加土地投资的回报。

[0049] 图3画出本发明的小规模实施例300，该实施例的包含两个行302、304的定日镜阵列，把太阳光射进倾斜的圆柱形接收器310中。在被示出的例子中，平面反射镜定日镜306与太阳能能源收集器308组合使用。该太阳能能源收集器308避免需要大量的入口孔，要不然这些入口孔可能引起显著的热损耗。在另外的实施例中，有良好聚焦性能的抛物形反射器定日镜，可以用在小规模系统中。

[0050] 在一种另外的配置中，接收器容器被安装在太阳能塔的顶部。盖被置于容器之上。

太阳光被反射离开位于接收器以下标高的定日镜，并被引向该盖的下侧，在那里，太阳光被再引导到熔化盐池或容器中其他太阳能吸收材料上。类似于上面对图 1 描述的盖，该盖可以主动地或被动地被冷却，以便允许汽化的盐凝结并形成自行再填满的反射镜表面。环形边缘或滴水檐可以被提供在盖的下侧，以引导下滴的熔化盐回到池中。此外，均匀和光滑的盐层是高度反射的，并自身能够被用作反射镜，消除从反射镜表面下面清除盐沉积物的必要。基于盐的反射表面还有超过正规反射镜的优点，即使被非常高强度辐照，也不会被损坏或破坏。该系统可以包含地下储存箱，它通过管道从接收器容器接收被加热的盐。泵浦可以从该储存箱提升冷的盐到接收器箱，热的盐则流过拦坝到下降管并回到该储存箱。

[0051] 2. 太阳能接收器

[0052] 按照本发明某些实施例的太阳能接收器，可以包含用于保持热储存流体(如，熔化盐)的容器和置于该容器之上的盖，如图 1 示意所示。典型的容器可以有数十米的直径和数米的高度；这样的容器能够保持数千吨熔化盐，并适合供基于地面的接收器使用(例如，如图 1 和 3 所示)。该容器的形状，例如可以是圆柱形、弓弧形、或立方形。该容器底部和侧壁可以由金属，如铁、铬、镍、钼和锰制成。液体盐容器的普通类型有由不锈钢或铬镍铁合金做成的外皮，以及耐火砖的内部衬里。要从熔化盐抽出热量，与容器表面接触的热交换器可以被使用。换种方式，盐可以被抽运到接收器外部的热交换器，在那里它能够被用于产生蒸气。从其中抽出热量的熔化盐的储存系统和方法，用于其他商业的和工业的过程应用，本领域熟练技术人员是周知的。

[0053] 被置于容器之上的盖，同样可以用耐火砖做衬里，并可以沿至少一个容器壁的上边缘与该容器连接。在一些优选实施例中，该盖基本上封闭容器之上的空间，只在一侧上留出单个入口孔。在某些实施例中，该孔有约两平方米的面积。为避免汽化的盐和随同它的能量通过该孔的损耗，该接收器可以包含门或类似的装置，以临时关闭该孔(特别是在黑暗或低太阳能强度期间)，或者生成跨越该孔的空气帘，如在下面更详细的讨论。

[0054] 图 4 画出示例性弧形接收器 400 的正面三维视图，该接收器包含充满盐的容器 402、盖 404、孔 406 和若干个热交换器窗 408。这样的弧形接收器例如能够被用于面对覆盖 90° 角的定日镜阵列。在典型的山坡上，两个这样的接收器和定日镜阵列可以被使用。

[0055] 由于熔化盐升高的温度，尤其是在池的表面，盐通常经受一些汽化，而该蒸汽将凝结在其温度在熔化温度以下的表面上。在各个不同的实施例中，该盖被空气或水在背面冷却(例如使用冷却管 120，如图 1 所示)，而盖的下侧因而呈现这样的凝结表面。(如果容器盖的下侧为金属且保持在高于熔点的温度上，它将迅速氧化并褪色，导致对接收器中散射的太阳光的反射率降低)。因为凝结的盐的传导系数比液体盐的低得多，所以它可以被用作保护性涂层。从热的盐转移到冷却的流体的热能，可以被用于预热流向蒸气发生器的水，要不被回收并送进动力循环以增加效率。

[0056] 盐凝结层可以积累到稳态厚度，也可以经历多次相变，在盖的下侧形成光滑的固体-液体-气体层，该层是高反射的，从而构成耐久的反射镜。它与水体的表面相比，可以增强掠入射反射，因而再引导来自定日镜的没有直接照射盐池的太阳光。此外，在盖下侧的盐层，可以再引导离开池表面散射的辐射返回该池中。为增强该效应，该盖可以被弯曲，最好形成非成像的会聚器。该盖的弯曲的或倾斜的形状，还允许熔化盐向后流动，进入该容器和被该容器再捕获。

[0057] 图 5A 和 5B 分别画出另一个示例性接收器实施例的三维侧视图和三维部分剖面正面视图。在此,接收器 500 包含大的圆柱形容器 502,该容器 502 建立盐(未画出)的腔 504。太阳光可以从两个定日镜阵列通过两个孔 506、507 被会聚。通常,由于太阳光光线扩展的 0.01 弧度发散度,以及通过不能总与来自每一定日镜的每个光束垂直的孔的被聚焦光束的交叉,所以每个定日镜阵列形成 90° 度弧,以控制光束的大小。为防止通过一个孔(如,506)射进接收器的太阳光立刻射出其它孔(如,507),该接收器包含反射结构 508,该反射结构 508 例如可以是从容器盖悬挂下来的圆锥状结构。在某些实施例中,该反射结构 508 有构建在其内的热交换器,使盐蒸汽凝结在它的表面,从而形成保护和反射涂层,类似于上述的该盖下侧的盐涂层。在一些实施例中,盖 510(图 5B 中只画出该盖的一半,以显露接收器的内侧),或盖的一部分,是可拆卸的,以利于装填盐和 / 或维护。

[0058] 图 6A 画出倾斜的圆柱形接收器 600 的剖面视图,例如可供图 2 所示太阳能电力系统使用,而图 6B 画出该倾斜的圆柱形接收器 600 的热交换器接口的剖面视图。在该实施例中,太阳光可以用会聚的能源收集器 208 会聚,并通过入口孔 602 射到该容器内熔化盐池 604 的表面。太阳光的一部分被折射进盐中并通过盐体积被吸收,而该光的另一部分被反射离开该池表面,其后离开盖 606 的下侧,该盖可以被冷却以利于盐的凝结,以便提供保护和反射涂层。在一些实施例中,该盖是平面形的,如图所示。一般说来,盖的形状可以按本领域熟练技术人员周知的方式,根据漫反射光学的定律被优化。

[0059] 该盐池 604 可以被耐熔衬里 608 包围,该耐熔衬里又被金属容器 610 包住。在一些实施例中,耐熔衬里中的窗 612 能使热量流向热交换器 614,该热交换器有入口 / 出口 616,用于加热二次盐热量转移环路,如常常在热处理工业中所使用,或用于直接蒸气产生。为使热交换器 614 按低应力方式与容器 610 耦连,以防高温蠕变,液态金属 618,诸如,举例说,锑、锡、镁、铝、或它们的共晶可以被使用。此外,为降低传导和对流损耗,该容器 610 可以被保温层 620(如,类似于蒸气涡轮机系统中用于覆盖高温蒸气管的保温材料)覆盖。容器 610 的底部 622 最好也是保温的,且此外在结构上适合支承该系统的重量。满足这些要求的材料和结构,已经被广泛研究,以便在其他商业和工业应用中使用,这是本领域熟练技术人员周知的。

[0060] 在各个不同的实施例中,高温融化的盐的高蒸汽压力,在没有任何缓解手段的情形下,可以导致通过该入口孔的盐蒸汽的显著损耗。该损耗率依赖于盐的温度和组成,并且依赖于接收器和孔的细节。对 850° C 的 NaCl/KCl 盐混合物和入口孔上 5m/s 的风速,该损耗率经过计算,大约为 0.2kg/m<sup>2</sup>/h。盐的这样损耗不仅使再装满费用高昂,而且降低系统的能量效率,因为跨越入口孔的质量转移伴随相应的热量转移损耗。为防止汽化的盐蒸汽逸出接收器,本发明的各个不同的实施例可以包含跨越该孔的空气帘。该空气帘可以由建在该盖内,或放在远处的带导管的一个或多个电力鼓风机产生。

[0061] 图 7 示出沿空气喷流的宽度和长度的速度分布,该空气喷流在鼓风机出口有宽度 e。跨越该空气喷流的质量流率,是它的宽度、长度、厚度和出口速度的函数。鼓风机的功率要求同样依赖于这些参数,因此,这些参数可以被选择,以便使空气帘的效率,即,由于该帘而节省的功率与鼓风机要求的功率之比最大化。在一些实施例中,该出口速度可以是可调节的。一种合适的空气帘类型,尤其是空气喷流参数、环境参数和帘的功率平衡之间关系的更多细节,能够在 Adam Taylor Paxson 的“Design and Validation of an Air Window for

a Molten Salt Solar Thermal Receiver”(2009 年 6 月)(Bachelor of Science thesis, Massachusetts Institute of Technology) 中找到,通过全文引用合并该文于本文。

[0062] 在一些实施例中,该接收器包含锐利地修边的,或“有尖端”(如做成圆锥状)的对流引发单元,被放置在容器的底部或壁上,如图 1 所示。这些对流引发单元可以由模制的或碎裂的硅碳化物块,或能承受熔化盐池中条件的其他稳定材料制成。它们作为热成核地点起作用,并防止它热致分层,该热成核地点启动和 / 或增强容器中熔化盐的对流混合。因此,它们有助于使盐中热点最少并防止盐池的上表面过热和沸腾。图 8 出示有对流引发单元在底部的容器中温度场的计算机模拟结果。

[0063] 在一些实施例中,该接收器容器被分隔板(通常被水平放置)分成上部和下部。图 9A 和 9B 按三维剖面视图画出示例性被分隔的接收器 900。操作中,当需要发动热力学循环时,从上部 902 抽运加热的熔化盐。例如,热的熔化盐可以被导向交换器的入口,而退出热交换器的较冷的盐可以被抽运返回进入接收器容器的下部 904。结果是,该熔化盐热致分层,即,在容器顶部和底部之间形成有(常常是非线性的)温度梯度的盐层。

[0064] 物理上把容器的上部和下部 902、904 分开的分隔板 906,可以是绝热的,从而也在热致分层的热的和冷的层之间提供热屏障。在一些实施例中,该板由抗腐蚀与蠕变的合金,或带肋的钢板构成,并由耐火砖或耐熔陶瓷层保温。虽然这样的板是重的,但保温耐火砖适度的厚度足以使它在熔化盐中随遇地漂浮。换种方式,中空管形结构能够被用于使分隔板结构接近随遇地漂浮。该结构的中空管或腔,可以被设计成在操作温度上有少许内部压力,以使腔壁中的应力最小。例如,该分隔板可以由一系列加盖管或其他合适的腔构成。

[0065] 进入接收器的光可以深入地穿透熔化盐,以致它的至少一小部分射到分隔板 906,引起对流流,从而把上部 904 中热的盐加热到均匀的高温度。该分隔板可以通过致动索 908、连杆、或其他力传输元件、通过汽缸、或通过任何其他能在包围接收器 900 的环境中操作的合适的致动系统部件,沿轴向向上或向下运动。分隔板 906 和容器壁之间的环形间隔空间(或“径向间隙”),在该板 906 被移动的同时,允许盐越过上部和下部 902、904 之间的分隔板 906 运动。例如,当该分隔板 906 被向上移动时,熔化盐从该上部 902 通过环形间隔空间流到该下部 904。该接收器可以包含控制器 910,它驱动竖直致动系统,以便使分隔板按与瞬间操作状态和条件(例如,该接收器的使用,此时是作为太阳能接收器或作为热能的源;入射太阳辐射的强度;通过该接收器被抽运的盐的速率,等等)有关的适合的速度并沿正确方向移动。该控制器 910 可以按硬件、软件、或它们的组合,实施用于确定该适当的分隔板移动的方法(例如,如下面参照图 11 所述)。例如,该控制器 910 可以是或包含专用电子电路,或用合适软件编程的通用计算机。

[0066] 图 9A 和 9B 概念地示出,分隔板 906 位置如何与太阳能注入接收器和热能从接收器抽出有关。如图 9A 所示,在阳光充足的白天末尾,分隔板 906 已经向下移动,而接收器热的一侧被完全填充,即,上容器部分 902 占据该容器的全部内部体积。图 9B 画出在没有任何 太阳能输入而经历热量抽出一段拉长的时段之后的系统 900:该孔被保温门 912 密封,以降低向环境的损耗,而在多云的白天和晚间之后,分隔板已经向上移动,冷的一侧 914 是满的。图 10 描绘出在两个白天 / 夜晚循环上分隔板的位置:一个“理想白天”和一个几乎是多云的“瞬变的白天”。作为一般规则,当对接收器 900 的瞬时太阳能输入小于热量抽出速率时,分隔板在箱中向上移动,以保持热的和冷的体积之间需要的温度分布;当该太阳能

输入大于热量抽出速率时,分隔板在接收器中向下移动。

[0067] 分隔板 906 通常被升起和下降,这样使分隔板 906 以上和以下的熔化盐的相应温度(每一温度在容器相应部分上被平均)大体上保持恒定,或在(常常是窄的)指定极限之内。使上部中热的熔化盐的温度稳定(尽管在该部分中盐的体积是变化的),能实现连续的热量抽出,而无需改变动力循环的热力学过程参数。如果接收器的任何净热量增益(由太阳能输入和从熔化盐抽出的热量引起),与从下部到上部位移的熔化盐部分的热量增益平衡(即,大体上相等),以及相反地,如果接收器的任何净热量损耗大体上等于从该容器的上部到下部位移的熔化盐部分的热量损耗,则一般避免上部和 / 或下部中的温度变化。

[0068] 图 11 示出分隔板的竖直位置的控制策略,它实现流进或流出系统的净热量与转移到位移的盐体积的热量之间需要的平衡。假设该板在给定时间区间  $\Delta t$  期间以恒定速度  $v_{plate}$  移动,它的位置改变了距离  $\Delta z = v_{plate} \Delta t$ 。引起的盐位移的体积,是  $\Delta z$  和分隔板面积  $A_{plate}$  的乘积。使位移的体积的温度从下面容器部分的温度变成上面容器部分的温度,或反过来,所要求的热量依赖于盐的密度  $\rho_{salt}$  和比热容  $c_{salt}$ ,以及热的盐和冷的盐之间的温度差  $\Delta T$ : $Q = \rho_{salt} v_{plate} \Delta t A_{plate} c_{salt} \Delta T$ 。在时间  $\Delta t$  期间添加到接收器的净热量记以  $\Sigma Q_{sys}$ ,则在上述区间期间需要的板的速度因此是:

$$[0069] v_{plate} = \Sigma Q_{sys} / (\rho_{salt} \Delta t A_{plate} c_{salt} \Delta T)$$

[0070] 如果净热量通量是正的,则分隔板向下移动;如果净热量通量是 负的,则分隔板向上移动。

[0071] 按照本发明各个不同的实施例的被分隔的容器接收器,通常在分隔板与容器壁之间定义宽松的径向间隙,以利于制造和支持操作的灵活性。间隔越小,盐流过的速度一般越大,因此作用在分隔板的流动阻力和牵引力也越大。对恒定的分隔板速度,漏出盐的速度反比于环形间隔面积。对径向间隙  $\delta_{gap}$  远小于箱直径  $D_{tank}$  的圆柱形箱,该环形间隔面积能够近似为:

$$[0072] A_{gap} = \pi D_{tank} \delta_{gap}$$

[0073] 间隔漏出盐的总容积流量是通过热交换器的容积流量  $Q_{HX}$  和通过移动分隔板被位移的盐的体积之和,该分隔板作为活塞起作用:

$$[0074] Q_{gap} = Q_{HX} + \pi D_{tank}^2 \cdot v_{plate}$$

[0075] 环形盐流的平均速度因此是:

$$[0076] v_{gap} = Q_{gap} / A_{gap}$$

[0077] 作用在分隔板的牵引力的估算,能够按照下式得到:

$$[0078] F = 1/2 \rho_{salt} v_{gap}^2 C_d A_{plate} = 1/2 \rho_{salt} Q_{gap}^2 C_d A_{plate} / A_{gap}^2$$

[0079] 这里  $C_d$  是与几何形状有关的牵引系数。对垂直于液体流的圆形平板,牵引系数  $C_d$  是 1.12。从这个最后的方程式能够看到,牵引力与间隔面积的平方成反比地增加,即,间隔面积越小,牵引力越大。在分隔板上更大的牵引力,又要求更大的位置控制致动器,这样会增加系统的成本。此外,非常小的间隔可以使接收器易于盐的冻结,或在分隔板和容器壁之间另一种使该系统不能动的机械结合形式。另一方面,分隔板和容器壁之间宽松的径向间隙导致非常低的流速。该低粘度熔化盐的蠕变流动通过缓慢移动的板,通常施予板的牵引力可以忽略。

[0080] 环形间隔除它对接收器成本和操作的牢靠性的冲击外,它对系统性能一般也有显

著影响。如图 12 所示,不同的间隔间隙,导致不同的流动和混合模式。图 12 的插图(i)示出宽的间隙,它导致慢的越过分隔板的流动速度和未混合的冷盐的弱层状卷流。另一方面,图 12 的插图(ii)画出相比更小的间隙,它通过确保冷的盐的良好混合的卷流,在容器的上部中获得均匀的温度;冷的盐有足够的动量穿透很远进入热的盐区,而层状紊流过渡或卷流的全紊流本性,促进与热的盐体积良好混合。各种不同间隔间隙的冷的盐向上“注入”较低密度的热的盐而引起的紊流度和混合、分隔板速度和盐的性质(如成分和温度),可以容易地用本领域熟练技术人员周知的方法模拟和表征。此外,可能的卷流几何形状、液体卷吸混合和卷流扩展角,能够从以前出版的关于浮力驱动层状热卷流和紊流热和喷射卷流的著作中被推导出。例如见 Moses 等人的“An experimental study of laminar plume”, J. Fluid Mech., vol., 251, pp. 581-601(1993), 和 Pera 等人的“Laminar plume interactions”, J. Fluid Mech., vol., 68, part 2, pp. 259-271(1975), 这些文献本文在此引用,供参考。

[0081] 图 13 以流程图示出热接收器分隔板的设计过程。该过程包含:确定导致需要的混合程度的间隔大小,然后对选定的间隔计算该系统的操作温度范围上的牵引力和热间隙。如果牵引力高得不可接受,则缩小该径向间隙。这一过程被重复迭代,直到在高的混合和低的牵引力之间的可接受的折中已经找到为止。任选地,板的设计然后用表面涂层或流量改善的面形结构,诸如穿孔、沟槽、或其他形状改进。接着这些调整,是径向间隙被细调,以再次获得充分混合和容许的牵引力二者。

[0082] 分隔板可以按各种不同方式改善。例如,平的同心盘分隔板几何形状的热和物理的分离,可以用例如旁通孔或适当大小的穿孔改变。同样,旁通凹槽或规则地隔开的沟槽可以被做成扇形置于分隔板的一侧,以建立引起卷流不稳定性和促进混合的不同流动的区域。此外,该板的底表面能够被做成非平面的;例如有凹槽和沟槽的凸或凹的轮廓能够被用于引导流动到需要的区。还有,在一些实施例中,分隔板的上表面有纹理、被涂覆和/或被氧化,以增强太阳能吸收率和降低镜面反射率。这些配置的各种不同组合和置换,可以被采用,以获得特殊的效果。

### [0083] 3. 熔化盐合成物

[0084] 预计在各个不同的实施例中使用的盐的合成物包含三类盐的一元、二元和三元合成物:氯化物盐、碳酸盐和氟化物盐。合适的二元氯化物盐例子,是 50mol% 的 NaCl 和 50mol% 的 KCl 的低熔混合物,它的熔点是 657° C 而操作范围高达 1100° C。合适的三元碳酸盐例如是,32wt.% 的 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、33wt.% 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 35wt.% 的 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的混合物,它的熔点是 432° C 而操作范围高达 950° C。传统的硝酸/亚硝酸盐,诸如 53wt.% 的 KNO<sub>3</sub>、40wt.% 的 NaNO<sub>2</sub> 和 7wt.% 的 NaNO<sub>3</sub> 的混合物,通常不适合入选,因为它们在温度接近 600° C 时分解。

[0085] 优选的盐的种类满足若干关键要求:它们全都有宽范围的操作温度、在太阳光谱相关波长范围上是半透明的,以及化学上与周围材料(即,容器壁和盖)和与高达至少 1000° C 的温度的空气是相容的。此外,它们相对地便宜并有低的毒性。按照某些实施例的示例性盐的各种热物理学的和光学的性质,以及与传统的硝酸/亚硝酸盐比较,开列在表 1 中。

### [0086]

	<b>NaCl</b>	<b>Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	<b>KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub></b>
<b>密度*</b>	<b>1520 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1900 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1850 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>粘度*</b>	<b>1.2 mPa·s</b>	<b>4.3 mPa·s</b>	<b>2.4 mPa·s</b>
<b>热导率*</b>	<b>0,45 W/m·K</b>	<b>0,82 W/m·K</b>	<b>0,61 W/m·K</b>
<b>比热*</b>	<b>1090 J/kg·K</b>	<b>1560 J/kg·K</b>	<b>1560 J/kg·K</b>
<b>光衰减系数 (可见光范 围平均)</b>	<b>0.035 cm<sup>-1</sup></b>		<b>&lt; 0.01 cm<sup>-1</sup></b>

[0087] 表 1(\*NaCl 和 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>是在 800° C ;\*KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub>是在 350° C)

[0088] 氯化物盐在高温时能够与湿气反应,产生少量 HCl。向该熔化盐添加少量氢氧化物,诸如 NaOH,可以使这种效应降至最小。

[0089] 在各个不同的实施例中,接收器中使用的盐的选择,是根据太阳能电力系统的操作参数。最好是,熔化盐有低的熔化温度和高的降解温度,该降解温度在将被产生的最大蒸气温度以上。在热的盐被抽运到蒸气发生器然后变成“冷”的地方,能够被储存的总能量是“热”和“冷”盐温度和盐的质量及比热的函数。如果蒸气是从与熔化盐的容器接触的蛇管中产生,则该被储存的能量将是盐在箱中使冷的盐沉到底部的分层能力的函数,水在该底部进入蛇管,而热的盐停留在蒸气离开蛇管的顶部。

[0090] 一般地说,高温盐,诸如氯化物盐,有接近蒸气温度的熔化温度,所以被储存的能量依赖于把盐加热到比蒸气温度更热数百度的温度。经过许多小时甚至数天的储存,在一天结束时的温度和太阳开始再加热盐时的温度之间的“热”盐温度差,是理想地非常高的,在 300° C 到 400° C 的量级,这样要求的盐的体积是最小的。此外,当该盐处于敞开空气环境中被使用时,该盐有希望不降解,因为使用固体窗把盐与空气分开将随时间降解并增加系统成本。

[0091] 在一个实施例中,盐混合物包含按 1:1 比值(质量比)的氯化钠和氯化钾。这种便宜的混合物有约 670° C 的共晶熔点和大约 1400° C 的沸点;因此,它对产生过热蒸气是理想的。此外,它极其耐用:不像硝酸盐,如果过热它能够分解;也不像能够烧穿、破裂或疲劳的锅炉管,它实质上不能被破坏。此外,因为 NaCl/KCl 盐混合物相对透明,它在太阳能通量增加时将建立对流混合,从而引起系统的自稳定,即,达到良好的均匀温度分布并避免局部过热。

[0092] 在某些实施例中,该盐合成物还包含纳米粒子,该纳米粒子改进该合成物的热容量和热导率,以及增加太阳光衰减系数,从而利于太阳能在该池的整个全部体积的吸收。例如,希望调整池中纳米粒子的浓度,以便太阳能主要在池的表面以下被吸收,而不是在接收器壁或底部。通过调整粒子的浓度,最佳的大块吸收分布可以容易获得。通过采用上面讨

论的空气帘,池被含尘或污物的空气污染,以及伴随的能量吸收分布的变化,能够被推迟或缩减。

[0093] 该纳米粒子能够由氧化物材料(诸如,举例说,氧化铝、硅石、氧化锆、二氧化钛和它们的复合物),金属(诸如,举例说,金、银、铂、铜、铝和它们的合金),和 / 或其他耐熔材料(诸如,举例说,石墨或金刚石)制成。它们可以是细长纳米棒、纳米盘和纳米管,或者可以是球形、扁圆形、或扁长形形状。最好是,粒子的至少一个特征尺寸在 1 到 1000 纳米范围。纳米粒子的添加可以增加粘度和降低合成物的热膨胀系数,该热膨胀系数可以妨碍池内的自然循环和混合。此外,它们可以增加密度,这样会对系统部件,诸如泵,造成更重的支承要求。为限制这些效应,粒子浓度可以被限制在,如 5% 体积以下,或 3% 体积以下,或 1% 体积以下。

[0094] 在盐合成物中使用的粒子的选择,一般依赖于特定系统要求,且可以构成各种不同考虑之间的折中。基于氧化物和碳的粒子,与基于金属的粒子相比,可以具有化学上更为惰性的优点,因而更能与熔化盐相容。另一方面,金属和金刚石粒子对热导率的更大提高是理想的。在金属粒子类型内,贵金属通常比铝和铜有更高的化学稳定性,但也伴随更高的成本。有高的长宽比的粒子能够提供更高的热导率提高,但也可以呈现更高的粘度。较小的粒子的好处能够在,它们的分散与较大粒子的分散相比,更容易被稳定。

#### [0095] 4. 热能储存和转换为机械能或电能

[0096] 在各个不同的实施例中,接收器利用能耐受超过 700° C,最好是超过 1000° C 的温度而不分解的熔化盐合成物(包含,例如碳酸盐和 / 或氯化物盐)。这样一种高温合成物有利于高密度太阳能到热能的转换。此外,它能实现高密度热能储存:熔化盐在峰值接收器温度和动力循环温度(该温度例如可以是 600° C)之间的热容量,被用于储存能量,供太阳不照射时的动力循环使用。由于这些理由,高温熔化盐合成物能够增加整个系统的效率。

[0097] 然而,在 700° C 以上的热储存媒体的温度上,通常被用于产生蒸 气的许多材料和系统,将被损坏或破坏,因而不能被使用。常用的热量转移系统的这种限制,可以通过如图 14 所示的改进而被克服。在该出示的实施例中,来自太阳能接收器的热的熔化盐,在短距离上被引导,通过由陶瓷、碳合成物、碳化硅、或其他高温材料制成的导管,进入没有运动零部件的混合器,在那里它与相同合成物的较冷媒体混合。结果是,混合物的温度被降低。例如,有第一温度 1000° C 的热的盐,可以与有第二温度 600° C 的较冷的盐按 1:3 的比值混合,得到有第三温度 700° C 的熔化盐。然后,该混合物可以通过热交换器,在那里,混合物在第二级热循环,例如蒸气循环中,把它的一些热能向水转移,该蒸气循环把热量转换成蒸汽涡轮机的转动能量,并最终成为电能。混合物温度在热交换器中进一步降低。在离开热交换器之后,该熔化盐可以被分解为第一液流和第二液流,第一液流用于再装满太阳能接收器,而第二液流被回收,进入保持第二温度的较冷的熔化盐的储存箱。

[0098] 在一些实施例中,该动力循环是直接空气布雷顿循环,它可以用商业上可购买的技术,例如从各种不同涡轮机卖主购买的技术实施。与常用的水冷循环相反,直接空气循环把暖的用过的空气直接排放进大气。这样的干燥冷却为太阳能电力系统提供明显的好处,这样的太阳能电力系统常常被设在酷热和干燥的地区(诸如沙漠),那里的水源非常有限。

[0099] 对高温盐(如,有利于约或超过 700° C 的操作温度的盐),直接空气布雷顿循环可以被使用,消除必需用冷却水为该动力循环提供低温热源。用动力循环的约 704° C 的盐

入口温度和约 600° C 的出口温度,该循环效率大致为 40%—一种花费得起的操作在较低的温度范围内的比常用的干燥冷却动力循环显著更高的效率。然而,该循环效率强烈地依赖于热量在其上被传送至动力循环的温度范围,且在传统太阳能电力塔的较低温度上十分低效。例如,在 500° C 峰值熔化盐温度,该效率只有 32%。另一方面,如果有冷却水可供使用,闭合的布雷顿动力循环(如,超临界二氧化碳循环)可以被使用,导致具有 550° C 的峰值二氧化碳温度的约 43–44% 的效率,以及具有 650° C 的峰值二氧化碳温度的 47–48% 的效率。对应的熔化盐的温度将高出 10–20° C。以上所述表明,使用高温熔化盐的太阳能电力系统可以用相对小的效率牺牲,消除对水冷却的依赖。

[0100] 5. 举例

[0101] 例 1 :太阳能会聚器和热能储存系统

[0102] 表 2-5 给出按照本发明的太阳能电力系统一个实施例的系统设计参数,该系统包含山坡安装的定日镜和基于地面的使用 50wt.% 的 NaCl/50wt.% 的 KCl 混合物的接收器。该系统能够获得连续的(“24/7”)MW 电功率输出。它要求用于定日镜场地和接收器的总的 土地面积约 72 英亩。若干个这样的系统可以一个挨一个设置,而它们的热输出可以经由高 温、高压蒸气管路组合,输送到中央蒸气涡轮机和发电机机组。从不同接收器收集热能,并 把热能带到中央蒸气厂的方法,是本领域熟知的。

[0103] 表 2 列出太阳能电力系统的空间和光学设计参数及各种不同性能特征。在此,根据设计参数的性能参数的计算,要计及:避免荫蔽和遮挡的定日镜的间距;以及太阳相对于山上定日镜的余弦效应和要求的定日镜倾斜度,以引导太阳光进入接收器孔。这些类型的几何和光学计算,是本领域熟练技术人员周知的。

[0104]

定日镜离山底的最短距离( m )	20
定日镜离山底的最长距离( m )	400
定日镜离接收器孔的最长距离( m )	575
每片总投射的定日镜面积( m <sup>2</sup> )	55,728
光学效率	90%
太阳在地平线以上的角度( ° )	80
接收器离山底的距离( m )	200
山的角度( ° )	35
定日镜弧横跨的角度( ° )	90

[0105]

定日镜弧片的数量	2
方位角定日镜组装密度	0.7
定日镜行的数量	89
有效土地覆盖因子	21.1%
山坡定日镜弧的土地面积(公顷)	29
24/7/365 平均日照( W/m <sup>2</sup> )	200
24/7/365 平均可用热功率( kW )	11,146
净全部太阳能对电功率效率	29%
24/7 操作要求的盐的质量(公吨)	5,457
产生的净平均 24/7 电功率( MW )	4.95
每 kWh 要求的盐的质量(公吨)	45.9

[0106] 表 2

[0107] 表 3 概括该系统的土地(尤其是山坡土地)要求。能够看到,要求产生西南美国各

州必需的重要的百分比功率的山坡面积,是相对适度的,给出可用的联邦土地的广阔地域,其中大多是丘陵地带,

[0108]

净 24/7 电功率( $We/m^2$ )	20
总需要功率(GW)	500
总面积要求( $km^2$ )	25,000
山坡上的向上距离	500
山的斜率(°)	35
定日镜弧片的数量	2
总标高(m)	574
要求的山坡直线距离(km)	25,000
一个系统的土地条带宽度(km)	100
土地条带的数量	250

[0109] 表 3

[0110] 表 4 列出该系统的典型热操作参数。盐深度被保持在小于 4m,因为太阳光不可能穿透比在诸如 50% 的 NaCl/KCl 的盐中深度更深的深度。如果别的与同样高温和入射功率水平相容的更清澈的盐可供使用,则有较小直径的更深盐池可以被使用,很可能导致更高的热效率。因为作为储存方法,只有显热被使用,而低成本大块材料的密度和比热的乘积则在相对窄的范围内,所以热储存系统的大小是有特殊意义的,因此,高的差别温度(即,热储存媒体的最大和最小温度之间的差)是必需的。

[0111]

系统温度	
热储存媒体的最大温度(° C)	900
热储存媒体的最小温度(° C)	650
周围温度(° C)	20
圆柱形储存容器	
需要的储存周期(h)	24
容器高度(m)	3.2
要求的总体积( $m^3$ )	3,583
容器直径(m)	38
50%NaCl/KCl 的储存潜力	
热储存媒体密度( $kg/m^3$ )	1,523
热储存媒体的比热(J/kg K)	1,089
热储存媒体总质量(公吨)	5,457
被储存的能量(J)	$1.49 \cdot 10^{12}$
可用的 24/7 平均储存热功率(W)	17,195,776

[0112] 表 4

[0113] 表 5 出示热交换器板的设计参数,该板在一些实施例中,可以被附着于容纳盐的圆柱形箱的壁。该表出示在池上的“窗” – 在钢容器上内部防火砖衬里比较薄或甚至不用,以便该热交换器能够被附着以降低热路径长度的区域 – 是与所需功率的池的大小相称的数量。换句话说,该系统比例是良好的且设计是可行的。

[0114]

蒸气系统要求的热功率(MWt)	17
宽度(m)	2.5
高度(m)	4

HX 壁厚度( m )	0.04
HX 板有效热传导率 k ( W/m·K )	17
跨越 HX 板的温度降( K )	100
每窗抽出的功率( W )	425,000
必要的窗数量	40
内容器直径( m )	40
HX 节距间距 /HX 宽度	1.3
能够安置的热交换器单元数量	40

[0115] 表 5

[0116] 例 2 : 分隔的热接收器

[0117] 表 6 给出有被分隔的箱的太阳能电力系统(例如,如在图 9A 和 9B 中所示)一个实施例的系统设计参数。该系统达到 4MW 电功率输出和 40 小时热储存,该分隔板被加上用于结构增强的“肋条”。借助向一侧或两侧添加保温耐熔材料,或借助加盖金属管构造,它容易被制成近似随遇地漂浮。

[0118]

盐类型	60-40 Na,KNO <sub>3</sub>	50-50 Na,KCl
热储存媒体的密度 ( kg/m <sup>3</sup> )	1796	1523

[0119]

热储存媒体的比热 (J/kg·K)	<b>1607</b>	<b>1089</b>
<b>系统温度</b>		
热储存媒体的最大温度 (°C)	<b>550</b>	<b>950</b>
热储存媒体的最小温度 (°C)	<b>250</b>	<b>650</b>
<b>圆柱形容器</b>		
要求的总体积 (m <sup>3</sup> )	<b>3071</b>	<b>5345</b>
容器高度 (m)	<b>5.0</b>	<b>4.0</b>
容器直径 (m)	<b>28.0</b>	<b>41.2</b>
<b>分隔板系统</b>		
分隔板与容器壁之间的径向间隙 (mm)	<b>200</b>	<b>200</b>
分隔板有效厚度 (mm)	<b>12.7</b>	<b>12.7</b>
计及加肋的质量乘数	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>
分隔板钢的密度 (kg/m <sup>3</sup> )	<b>7800</b>	<b>7800</b>
分隔板保温材料密度: Zircal-45 硅酸钙 (kg/m <sup>3</sup> )	<b>760</b>	<b>760</b>
分隔板保温材料厚度 (mm)	<b>110</b>	<b>156</b>
功率抽出的盐的质量流率 (kg/s)	<b>37.4</b>	<b>55.2</b>
黑暗期间分隔板的向上速度 (mm/s)	<b>0.034</b>	<b>0.027</b>
正常夜间分隔板向上行程距离 (m)	<b>2.07</b>	<b>1.66</b>
最大多云天分隔板向上行程距离 (m)	<b>5.00</b>	<b>4.00</b>
正常白天分隔板向下速度 (mm/s)	<b>0.082</b>	<b>0.066</b>
白天盐速度 (漏过): 板-容器环	<b>4.09</b>	<b>4.81</b>
在分隔板白天移动期间作用于分隔板的牵 引力 (C <sub>d</sub> = 1.12) (N)	<b>10.0</b>	<b>25.9</b>
分隔板表观质量 (kg)	<b>248.4</b>	<b>719.2</b>

[0120] 表 6

[0121] 本发明的某些实施例已经被描述, 本领域一般技术人员应当明白, 引用本文公开

的概念的其他实施例，可以被使用而不偏离本发明的精神和范围。因此，应当在所有方面认为，已描述的实施例只是说明性的而非限制。

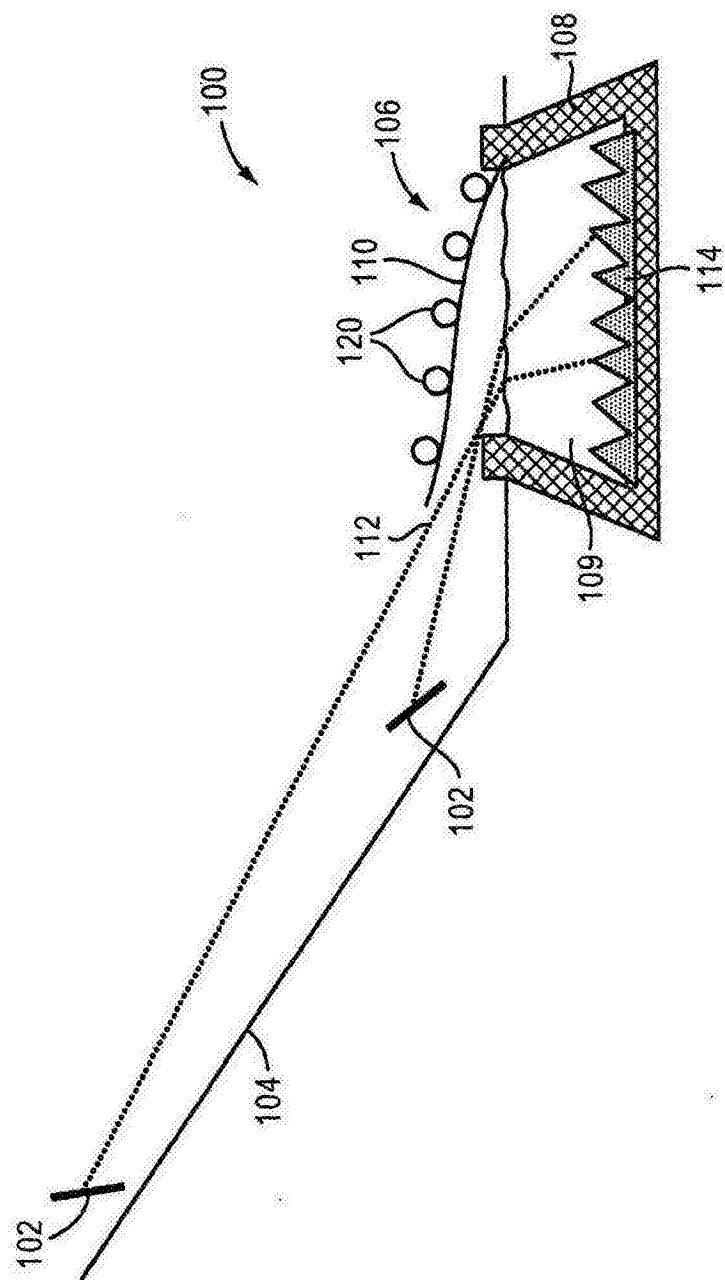


图 1

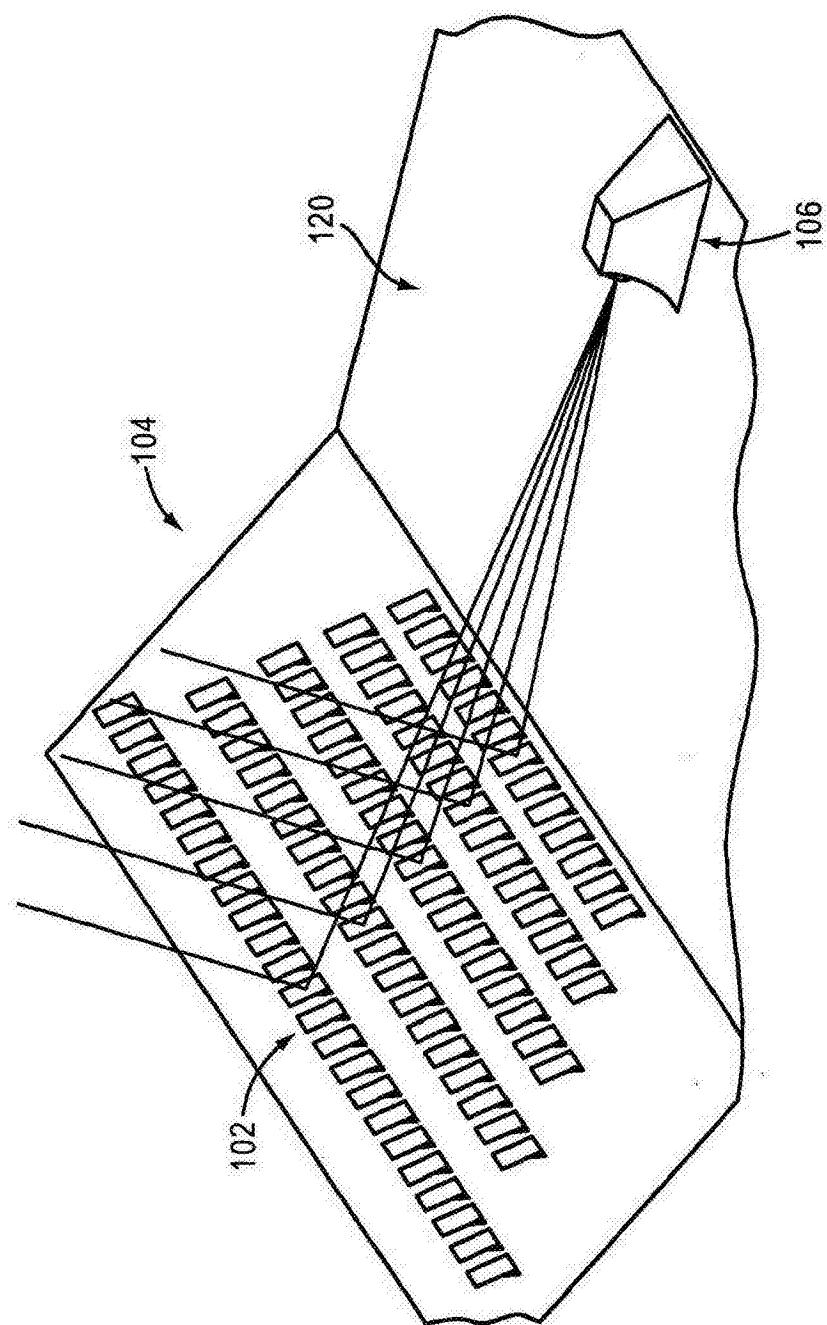


图 2

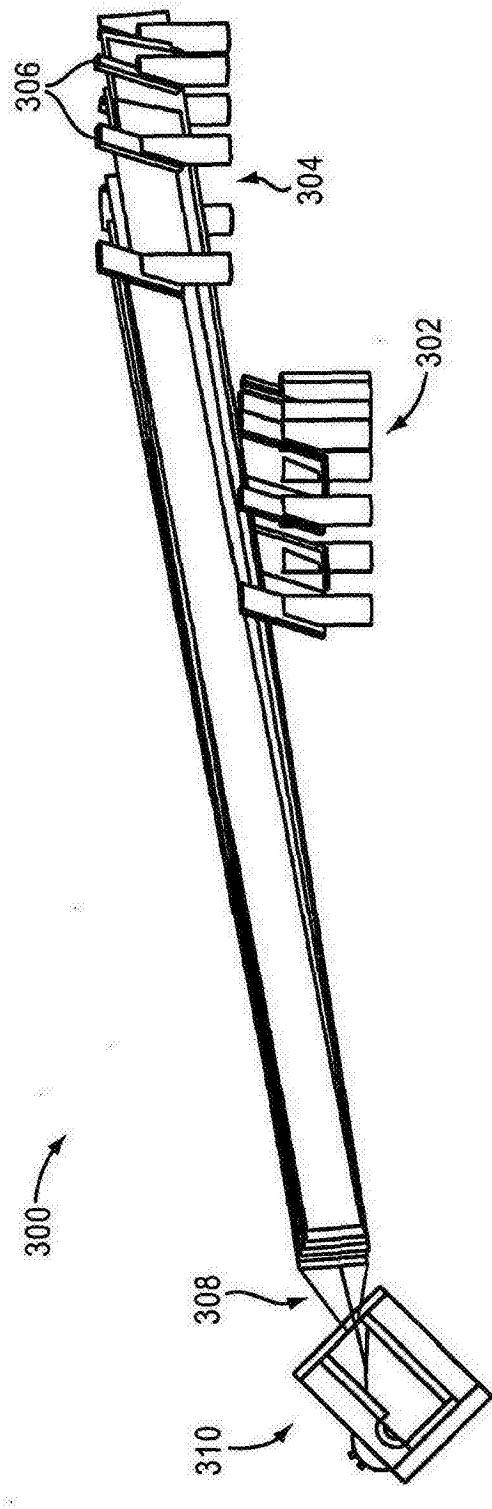


图 3

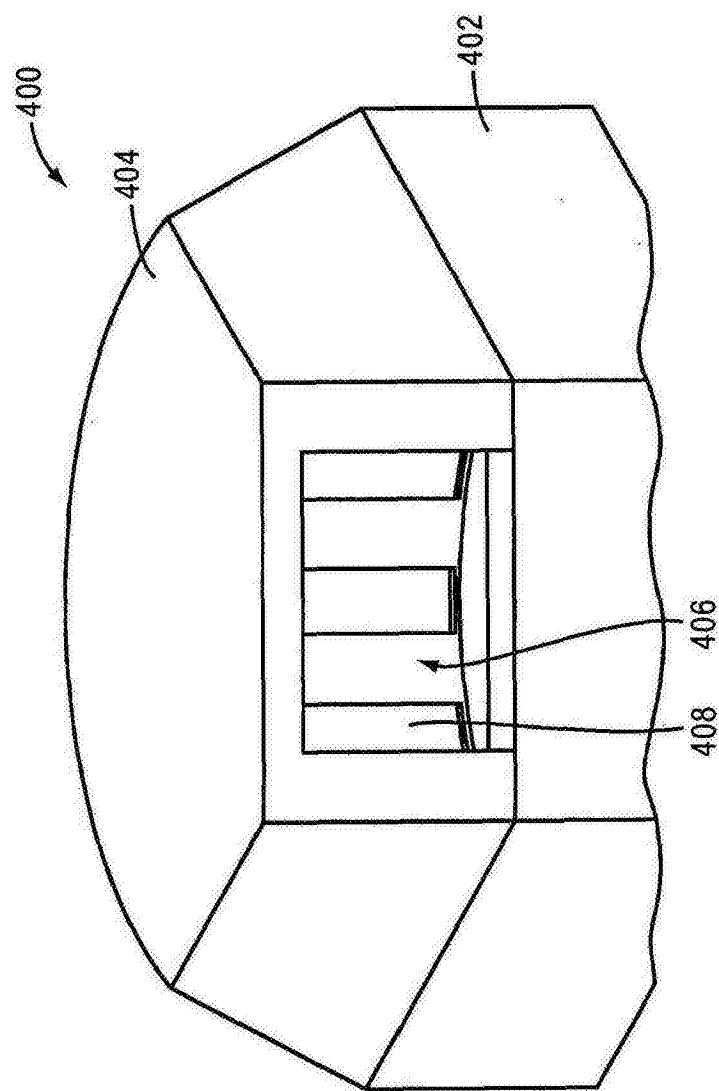


图 4

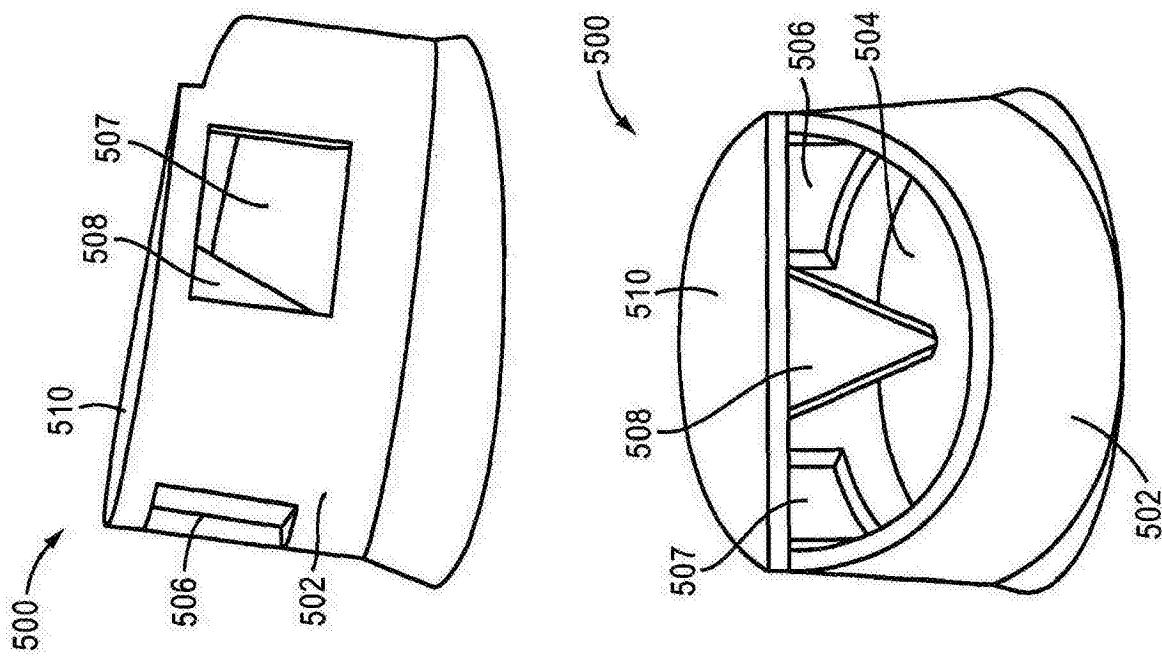


图 5B

图 5A

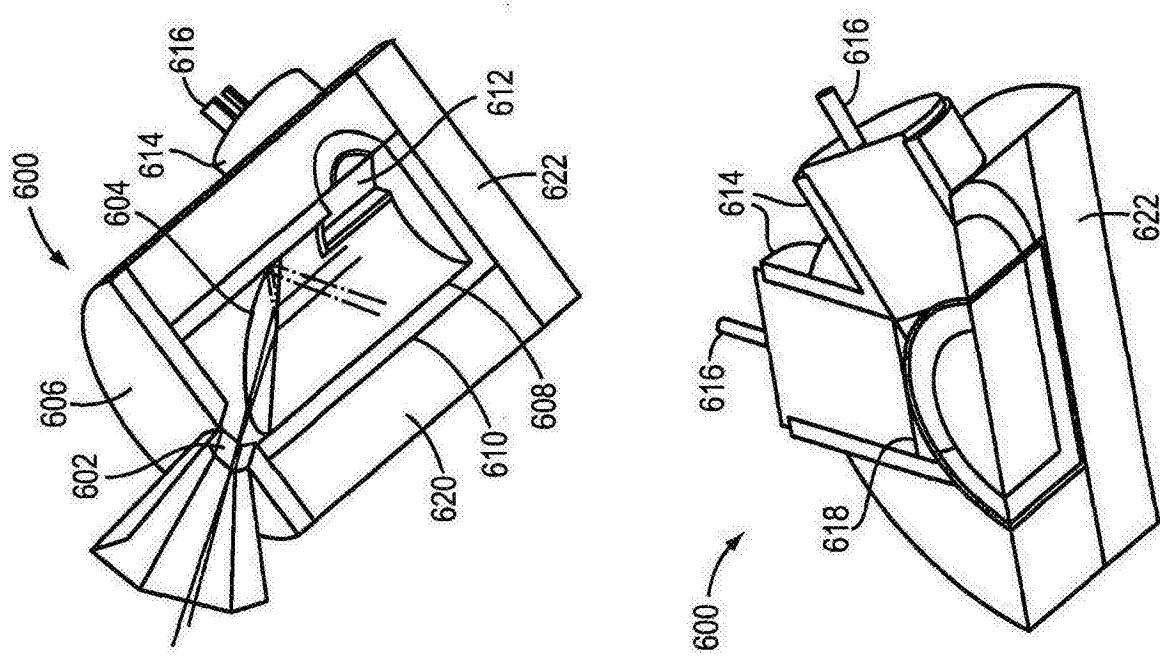


图 6B

图 6A

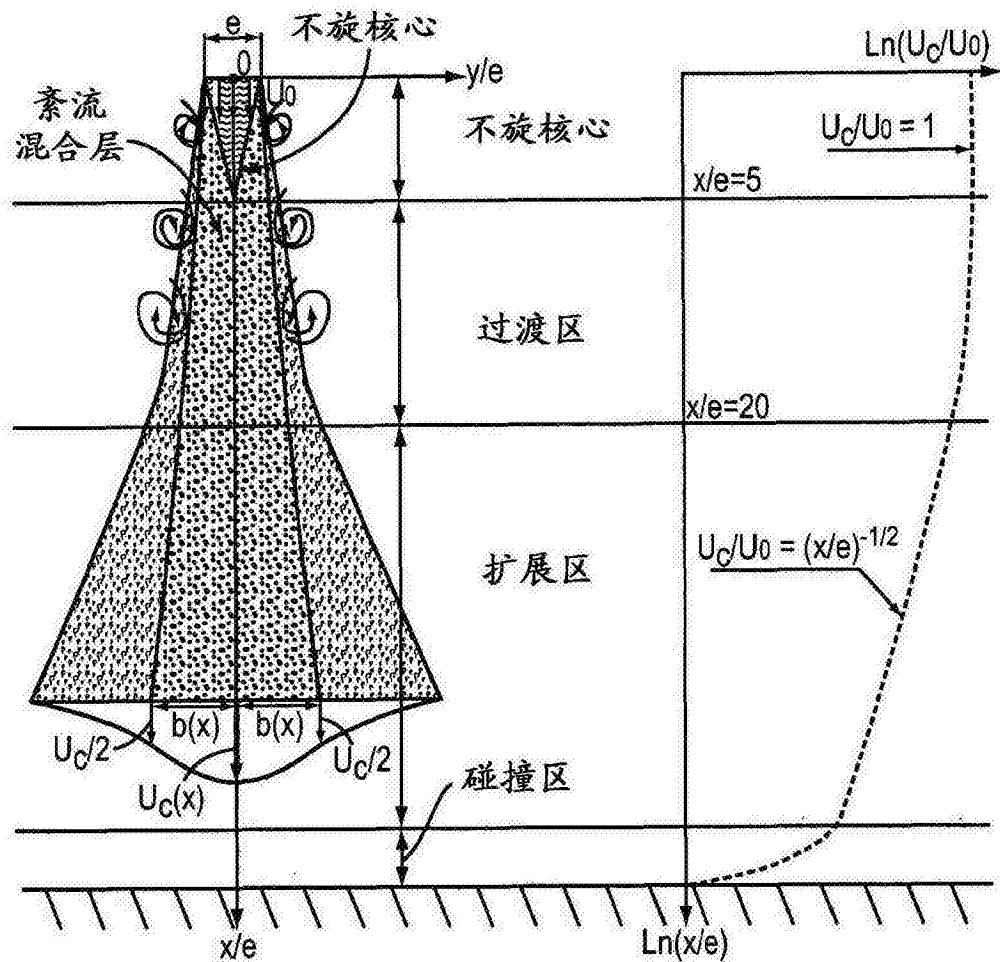


图 7

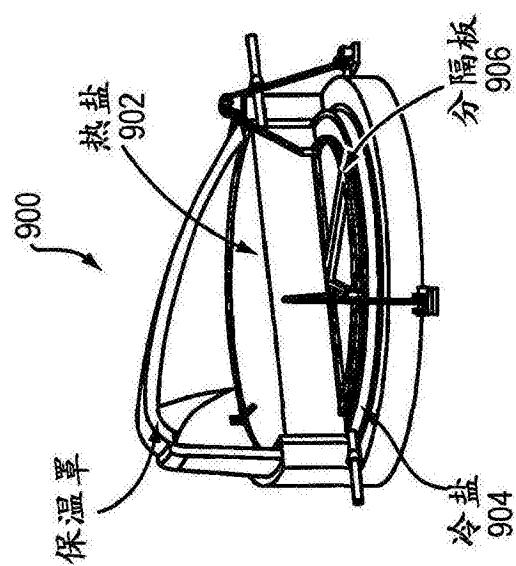
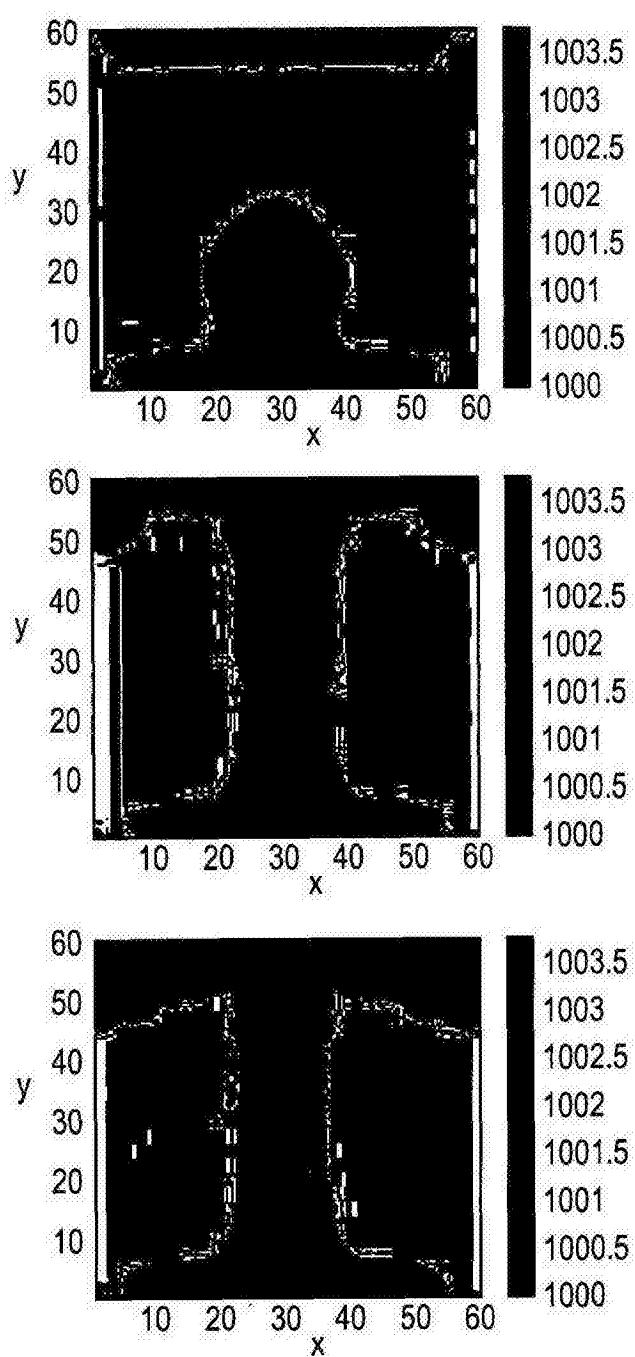


图 9A

图 8

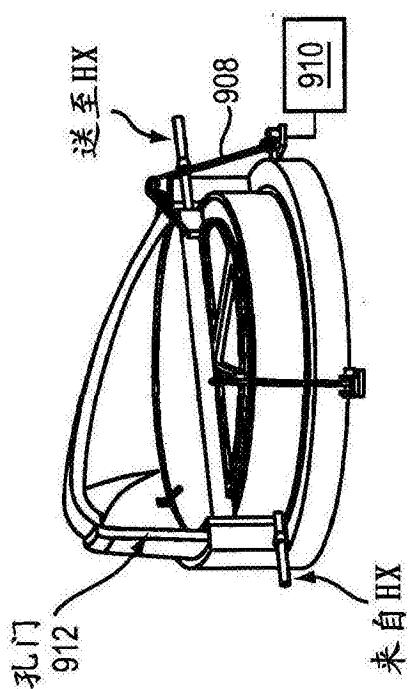


图 9B

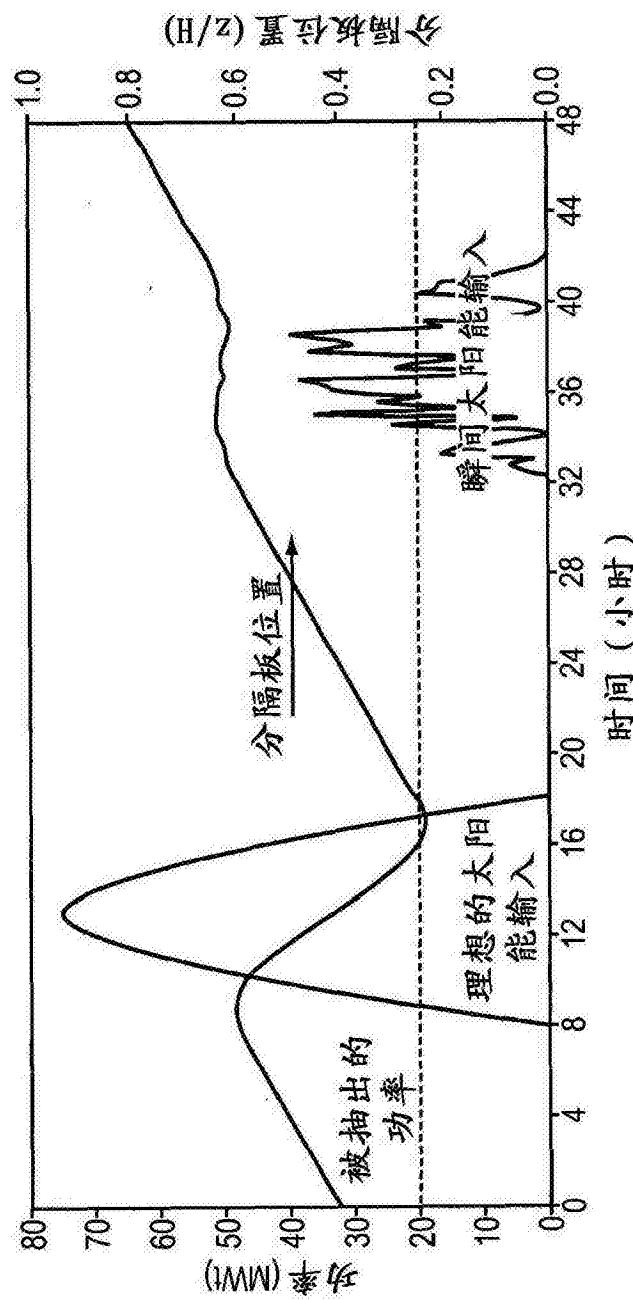


图 10

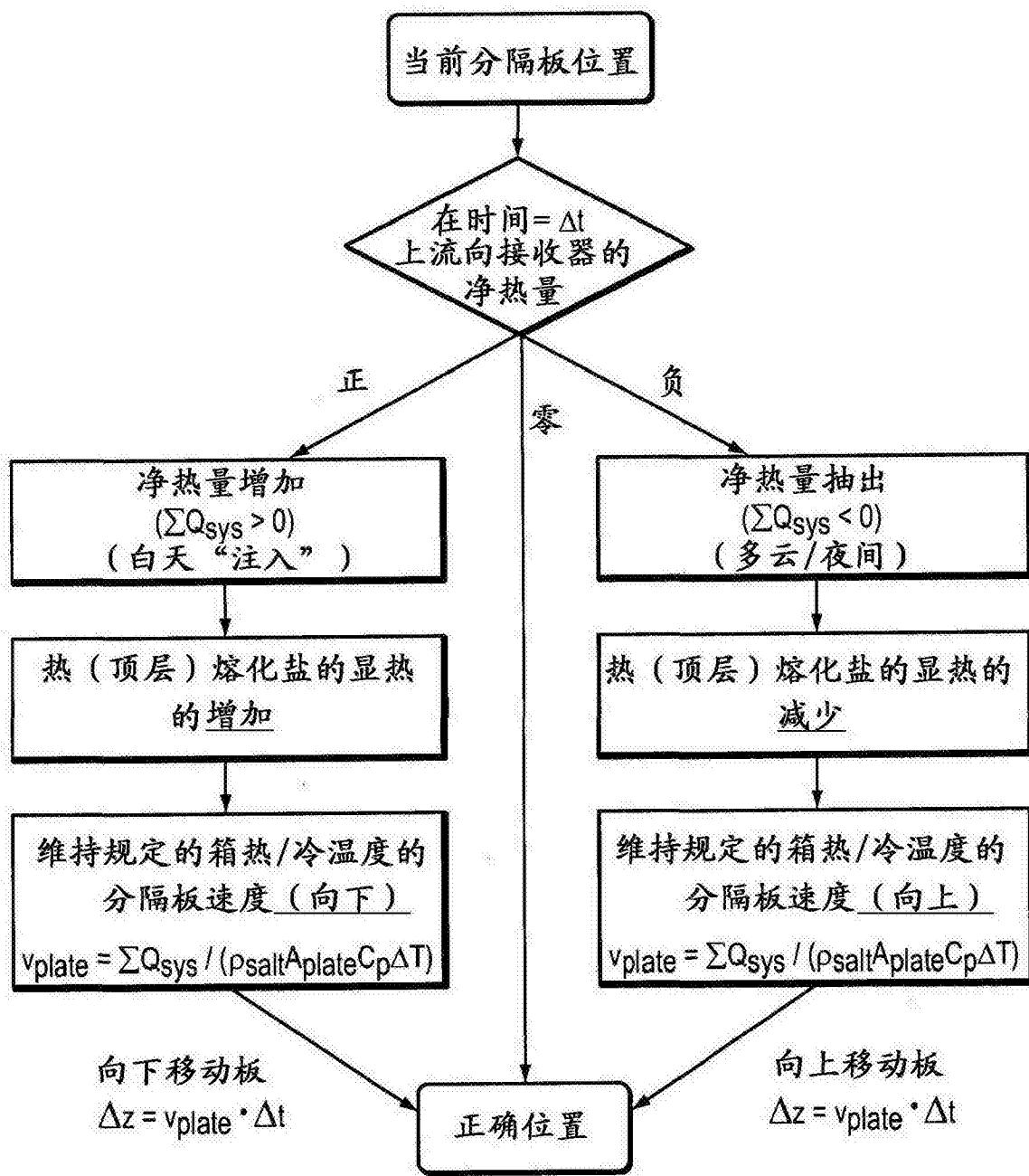


图 11

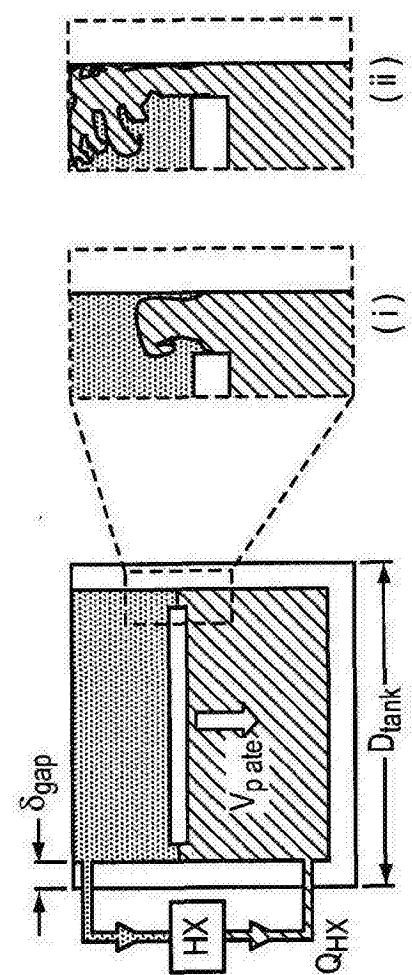


图 12

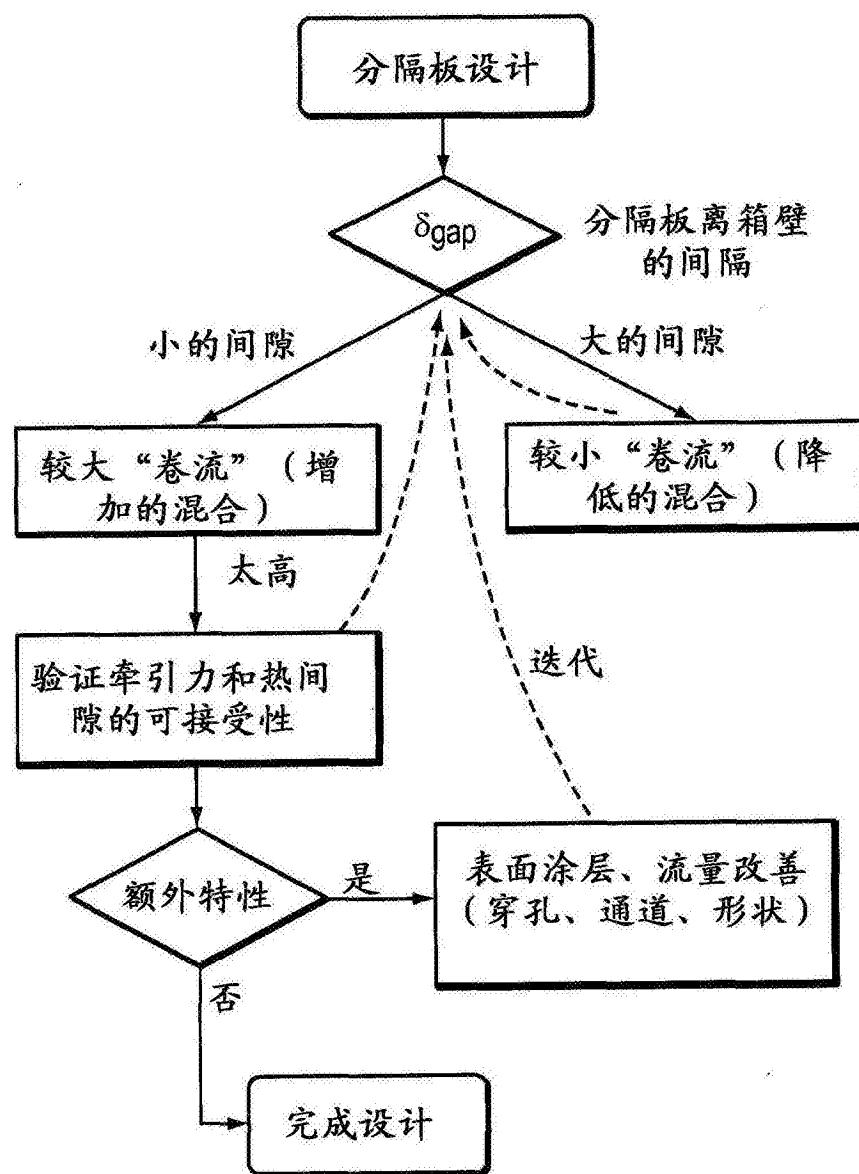


图 13

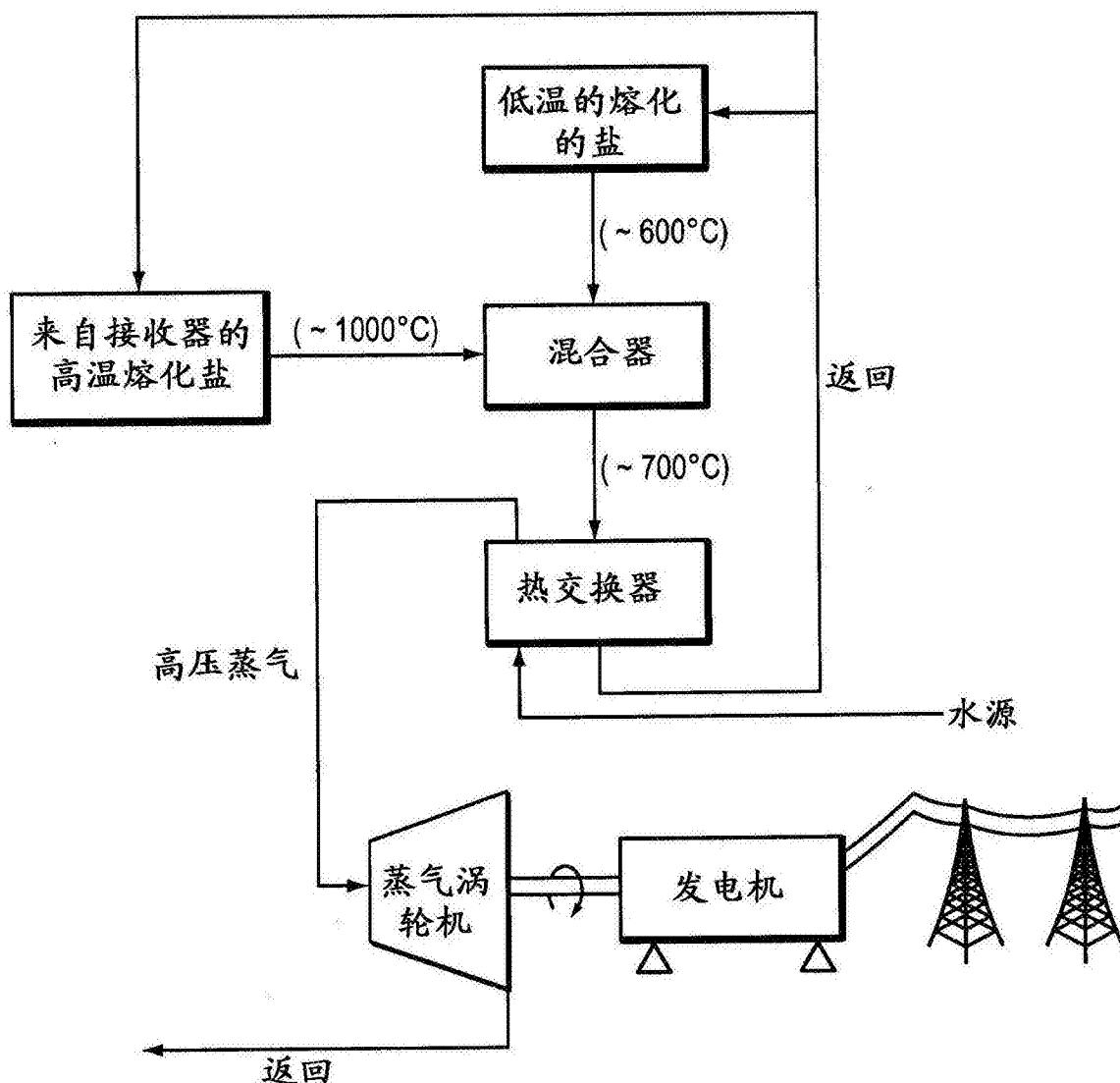


图 14