



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116568910 A

(43) 申请公布日 2023.08.08

(21) 申请号 202180083179.X

(22) 申请日 2021.12.09

### (30) 优先权数据

63/123,266 2020.12.09 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.06.09

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2021/062675 2021.12.09

### (87) PCT国际申请的公布数据

W02022/125816 EN 2022.06.16

(71) 申请人 超临界存储公司

地址 美国特拉华州

(72)发明人 蒂莫西·赫尔德

(74) 专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

专利代理师 韩雪梅

(51) Int.Cl.

F01K 7/16 (2006.01)

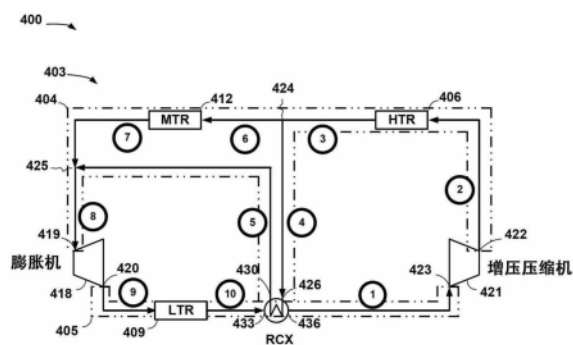
权利要求书4页 说明书14页 附图6页

(54) 发明名称

### 三罐电热蓄能系统

(57) 摘要

本公开涉及一种热泵蓄能 (PTES) 系统运行方法, 包括: 使工作流体循环通过工作流体回路, 工作流体具有质量流率和比热容, 当工作流体循环通过工作流体回路时, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积。该 PTES 系统包括工作流体回路中的旁路, 工作流体的第一部分通过该旁路旁通复热器高压侧, 同时工作流体的第二部分循环通过复热器高压侧。



1. 一种热泵蓄能 (PTES) 系统运行方法, 该方法包括:  
使工作流体循环通过工作流体回路, 所述工作流体具有质量流率和比热容;  
当所述工作流体循环通过所述工作流体回路时, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积。
2. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 当所述工作流体循环通过所述工作流体回路时, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积包括:  
在所述复热器高压侧使所述工作流体分流成第一部分和第二部分;  
使所述第一部分旁通所述复热器高压侧;  
旁通期间冷却所述第一部分;  
使所述第二部分循环通过复热器;  
所述第二部分离开所述复热器后, 使冷却后的第一部分与所述第二部分合流。
3. 根据权利要求2所述的方法, 其中, 旁通期间冷却所述第一部分包括:  
使所述工作流体循环通过旁路;  
在所述工作流体与中温蓄热罐之间传热, 包括:  
充电阶段, 从所述工作流体向所述中温蓄热罐传热;  
发电阶段, 从所述中温蓄热罐向所述工作流体传热。
4. 根据权利要求2所述的方法, 其中, 所述工作流体的第一部分约占工作流体份量的40%, 所述第二部分约占工作流体份量的60%。
5. 根据权利要求1所述的方法, 其中,  
使所述工作流体循环通过所述工作流体回路包括循环二氧化碳;  
所述工作流体的第一部分约占工作流体份量的40%;  
所述第二部分约占工作流体份量的60%。
6. 根据权利要求2所述的方法, 其中, 使所述工作流体循环通过所述工作流体回路包括循环二氧化碳。
7. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积包括:  
充电阶段:  
使约60%由二氧化碳组成的工作流体循环通过所述复热器高压侧;  
使100%由二氧化碳组成的工作流体循环通过所述复热器低压侧;  
发电阶段:  
使约60%由二氧化碳组成的工作流体循环通过所述复热器高压侧;  
使100%由二氧化碳组成的工作流体循环通过所述复热器低压侧。
8. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 当所述工作流体循环通过所述工作流体回路时, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积包括: 降低所述复热器高压侧的质量流率。
9. 根据权利要求1所述的方法, 还包括: 所述复热器高压侧所述工作流体的第二部分与所述复热器低压侧所述工作流体的合流部分之间进行换热。
10. 一种热泵蓄能 (PTES) 系统, 包括:  
中温蓄热罐;

工作流体回路,包括:

具有高压侧和低压侧的复热器,当工作流体循环通过所述工作流体回路时,平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积。

11. 根据权利要求10所述的系统,其中,所述工作流体为二氧化碳。

12. 根据权利要求10所述的系统,其中,所述工作流体回路包括旁路,所述工作流体的第一部分通过所述旁路旁通复热器高压侧,同时所述工作流体的第二部分循环通过所述复热器高压侧。

13. 根据权利要求10所述的系统,其中,

所述旁路包括所述第一部分与中温蓄热罐之间传热;

所述工作流体回路还包括:

所述复热器高压侧的分流器,使所述工作流体分流成第一部分和第二部分,所述第一部分小于第二部分,所述第二部分从所述复热器高压侧循环通过所述复热器;

所述复热器高压侧的合流点,所述第二部分离开所述复热器后,所述第一部分与所述第二部分在所述合流点处合流。

14. 根据权利要求10所述的系统,其中,所述第一部分约占工作流体总量的40%,所述第二部分约占工作流体总量的60%。

15. 根据权利要求10所述的系统,其中,

所述工作流体为二氧化碳;

所述第一部分约占工作流体总量的40%;

所述第二部分约占工作流体总量的60%。

16. 根据权利要求10所述的系统,其中,在运行中,所述复热器高压侧所述工作流体的第二部分与所述复热器低压侧所述工作流体的合流部分之间进行换热。

17. 一种热泵蓄能 (PTES) 系统运行方法,该方法包括:

使工作流体循环通过工作流体回路;

降低复热器高压侧所述工作流体的质量流率,以当所述工作流体循环时平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热容之积,包括:

使所述工作流体的第一部分旁通所述复热器高压侧;

使所述工作流体的第二部分循环通过所述复热器高压侧。

18. 根据权利要求17所述的方法,其中,旁通所述复热器高压侧包括:

充电阶段所述工作流体与高温蓄热罐之间传热后,使所述工作流体的第一部分旁通所述复热器高压侧,旁通期间从所述第一部分向中温蓄热罐传热,同时使第二部分循环通过复热器,所述第一部分小于第二部分;

发电阶段离开泵后,使所述工作流体的第三部分旁通所述复热器高压侧,同时旁通期间从所述中温蓄热罐向所述第三部分传热,同时使所述工作流体的第四部分循环通过所述复热器。

19. 根据权利要求17所述的方法,还包括:所述复热器高压侧所述工作流体的第二部分与所述复热器低压侧所述工作流体的合流部分之间进行换热。

20. 根据权利要求17所述的方法,其中,降低复热器高压侧所述工作流体的质量流率,以当所述工作流体循环时平衡复热器高压侧和复热器低压侧所述工作流体的质量与比热

容之积,还包括:

在所述复热器高压侧使所述工作流体分流成第一部分和第二部分,所述第一部分小于所述第二部分;

旁通期间往来所述第一部分传热;

所述第二部分离开所述复热器后使所述第一部分与所述第二部分合流。

21. 根据权利要求20所述的方法,其中,旁通期间往来所述第一部分传热包括所述工作流体与中温蓄热罐之间传热,还包括:

充电阶段,从所述工作流体向所述中温蓄热罐传热;

发电阶段,从所述中温蓄热罐向所述工作流体传热。

22. 根据权利要求17所述的方法,其中,使所述工作流体循环通过所述工作流体回路包括循环二氧化碳。

23. 根据权利要求17所述的方法,其中,所述工作流体的第一部分约占工作流体份量的40%,所述第二部分约占工作流体份量的60%。

24. 根据权利要求17所述的方法,其中,

使所述工作流体循环通过所述工作流体回路包括循环二氧化碳;

所述工作流体的第一部分约占工作流体份量的40%,所述第二部分约占工作流体份量的60%。

25. 一种热泵蓄能 (PTES) 系统,包括:

低温蓄热罐;

高温蓄热罐;

中温蓄热罐;

工作流体回路,配置用于热泵蓄能工作循环的充电阶段和发电阶段,使用中,工作流体循环通过所述工作流体回路,所述工作流体回路包括:

复热器;

充电阶段:

膨胀机,位于所述复热器与所述低温蓄热罐之间;

增压压缩机,位于所述复热器与所述高温蓄热罐之间;

发电阶段:

泵,位于所述复热器与所述低温蓄热罐之间;

动力涡轮机,位于所述复热器与所述高温蓄热罐之间;

旁路,充电阶段和发电阶段,所述工作流体的第一部分旁通复热器高压侧并流过所述中温蓄热罐,所述中温蓄热罐在所述工作流体与所述中温蓄热罐之间传热,同时所述工作流体的第二部分循环通过所述复热器。

26. 根据权利要求25所述的系统,其中,所述工作流体为二氧化碳。

27. 根据权利要求25所述的系统,其中,所述第一部分约占工作流体总量的40%,所述第二部分约占工作流体总量的60%。

28. 根据权利要求25所述的系统,其中,

所述工作流体为二氧化碳;

所述第一部分约占工作流体总量的40%;

所述第二部分约占工作流体总量的60%。

29. 一种热泵蓄能 (PTES) 系统运行方法, 该方法包括:

使高热容工作流体循环通过包含复热器的工作流体回路;

降低复热器高压侧所述工作流体的质量流率, 使得所述复热器两侧的质量与比热容之积相同, 包括:

充电阶段:

使所述工作流体的第一部分旁通复热器, 旁通期间从所述第一部分向中温蓄热罐传热, 同时使所述工作流体的第二部分循环通过所述复热器;

使所述第二部分循环通过所述复热器, 同时使所述第一部分旁通所述复热器, 所述第二部分循环通过所述复热器的同时从所述第二部分传热;

所述第一部分旁通所述复热器并且所述第二部分循环通过所述复热器后, 使所述第一部分和所述第二部分一起循环通过膨胀机;

发电阶段:

使所述工作流体的第三部分旁通所述复热器, 旁通期间从所述第三部分向中温蓄热罐传热, 同时使所述工作流体的第四部分循环通过所述复热器;

使所述第四部分循环通过所述复热器, 同时使所述第三部分旁通所述复热器, 所述第四部分循环通过所述复热器的同时向所述第四部分传热;

所述第三部分旁通所述复热器并且所述第四部分循环通过所述复热器后, 使所述第三部分和所述第四部分一起循环通过高温蓄热罐。

30. 根据权利要求29所述的方法, 其中, 所述工作流体为二氧化碳。

31. 根据权利要求30所述的方法, 其中,

所述第一部分约占40%;

所述第二部分约占充电阶段工作流体质量流率的60%;

所述第三部分约占发电阶段工作流体质量流率的40%, 所述第四部分约占发电阶段工作流体质量流率的60%。

32. 根据权利要求29所述的方法, 其中,

所述第一部分约占充电阶段工作流体质量流率的40%, 所述第二部分约占充电阶段工作流体质量流率的60%;

所述第三部分约占发电阶段工作流体质量流率的40%, 所述第四部分约占发电阶段工作流体质量流率的60%。

## 三罐电热蓄能系统

[0001] 优先权文件

[0002] 本申请主张申请人Timothy Held于申请日2020年12月9日和2021年12月9日提交的名称为“3-Reservoir ETES System”的共同未决美国临时专利申请US 63/123,266和美国非临时专利申请US 17/546,963的优先权,该申请各方面如同逐字陈述那样全文引用归并本文,包括优先权在内。

### 技术领域

[0003] 本公开涉及一种电热蓄能(ETES)系统,更具体地涉及一种基于二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的热泵蓄能(PTES)系统。

### 背景技术

[0004] PTES系统有时又称电热蓄能系统,用于储存和再生能量。PTES系统常用可配置的热力循环,其中通过工作流体回路中的工作流体在高温蓄热罐与低温蓄热罐之间传递热能。极简版本PTES的热力循环中,如图1A所示,循环在流体热流的一个方向上作为热泵运行又在流体热流的反方向上作为热机运行,在两个蓄热罐之间传递热能,一个蓄热罐处于高温,另一个蓄热罐处于低温。PTES的运行可以概述为包括“充电”阶段和“发电”阶段。

[0005] 运行“充电”阶段,通过使用所谓的正向热泵循环,热能从低温蓄热罐(LTR)升级到高温蓄热罐(HTR)。在此过程中,用电机驱动气体压缩机,从而增高工作流体的压力和温度。通过使用间接换热件将工作流体中所含的热能传递到高温蓄热罐(HTR)。在复热器换热件中,从间接换热件下游的工作流体向气体压缩机上游的工作流体传递更多热能。然后流体通过涡轮机膨胀,涡轮机产生用于帮助驱动压缩机的轴功。涡轮机出口处的工作流体压力较低,温度也低得多。热量从低温蓄热罐(LTR)传递到工作流体,使工作流体在压缩机入口处恢复到初始状态。

[0006] 运行“发电”阶段,流体和热流方向相反。对离开LTR的流体进行压缩,但此时“压缩机”入口和出口温度过低一事实上,对于基于二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的系统,流体可能处于液态,因此“压缩机”实则是泵。然后,流体被HTR加热到相对较高的温度,通过涡轮机膨胀,涡轮机产生轴功。此时,涡轮机的功超过了压缩机的功,发电机将余功转换为电能并反馈回电网。在复热器换热件中,涡轮机排放的剩余热能传递到HTR上游的工作流体。

### 发明内容

[0007] 本公开技术减少了复热器热容失配的影响,从而避免了下述变温传热(TQ)斜率失配相关的能量损失。本公开技术还显著改善了循环性能。如本文所用,“烟”是系统与蓄热罐达成平衡过程中可能的最大有用功。

[0008] 本公开技术包括方法和设备。一种热泵蓄能(PTES)系统运行方法包括:使工作流体循环通过工作流体回路,工作流体具有质量流率和比热容,当工作流体循环通过工作流体回路时,平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积。该PTES系统

包括工作流体回路中的旁路,工作流体的第一部分通过该旁路旁通复热器高压侧,同时工作流体的第二部分循环通过复热器高压侧。

### 附图说明

[0009] 下面结合附图并参阅具体实施方式可以更清楚地理解本公开。需要强调,根据行业标准惯例,各特征未按比例绘制。事实上,为了清楚起见,可以任意缩放各特征的尺寸。

[0010] 图1A为现有技术PTES系统在PTES工作循环充电阶段的工序流程图。

[0011] 图1B为现有技术PTES系统在PTES工作循环发电阶段的工序流程图。

[0012] 图2为基准PTES循环的压焓图,其框内数字是图1A和图1B所示现有PTES系统的发电阶段状态点。

[0013] 图3为图1A和图1B所示PTES系统中图2所示基准PTES循环的变温传热(TQ)图。

[0014] 图4A为根据一个或多个实施例的PTES系统在PTES工作循环充电阶段的工序流程图。

[0015] 图4B为根据一个或多个实施例的PTES系统在PTES工作循环发电阶段的工序流程图。

[0016] 图5为图4A和图4B所示工作流体回路可配置用于图4A所示充电阶段和图4B所示发电阶段的控制系统的具体实例。

[0017] 图6A至图6F为各实施例可用的图4A和图4B所示蓄热罐的几种实施方案。

### 具体实施方式

[0018] 一种整体循环性能度量是“往返效率”(Round-Trip Efficiency-RTE)。此参数定义了发电阶段可产生的电能量(kWh)除以充电阶段消耗的电能量。另一种关键性能参数是系统资本成本,可根据发电容量或蓄电容量来定义。

[0019] 图1A和图1B示出了具有PTES工作循环的现有技术PTES系统100,图2示出了该系统循环的压焓图。图1A和图1B中用圆圈表示工作流体状态,图2中用方块表示工作流体状态。因此,PTES系统100的工作循环中各点的运行状态可以从图2的压焓图映射到图1A和图1B的工序流程图。图1A示出了工作循环充电阶段,而图1B示出了工作循环发电阶段。下述内容和附图中,将使用表1所列的命名。

[0020] 表1命名

| 首字母缩略词 | 含义                        |
|--------|---------------------------|
| ACC    | 风冷式冷却器                    |
| HTR    | 高温蓄热罐                     |
| HTX    | 高温蓄热罐到CO <sub>2</sub> 复热器 |
| LPT    | 低压涡轮机                     |
| LTR    | 低温蓄热罐                     |
| LTX    | 低温蓄热罐到CO <sub>2</sub> 复热器 |
| MTR    | 中温蓄热罐                     |
| MTX    | 中温蓄热罐到CO <sub>2</sub> 复热器 |
| PFD    | 工序流程图                     |

|      |        |
|------|--------|
| PTES | 热泵蓄能   |
| RCX  | 复热器换热件 |
| RTE  | 往返效率   |

[0022] PTES系统100包括工作流体回路103、HTR 106、LTR 109和复热器RCX。工作流体回路103的配置部分取决于PTES系统100是处于工作循环的充电阶段还是发电阶段。鉴于本公开，本领域技术人员应会理解，该配置一般是流体流量阀程控函数。因此，充电阶段，通过控制工作流体流过工作流体回路103来接通工作流体回路103中一些组件并断开一些组件。同理，发电阶段，可以再次通过控制工作流体流过工作流体回路103来接通一些其他组件并断开一些其他组件。因此，为了清楚起见，图1A和图1B中省略了流体流量阀和控制器。

[0023] 如图1A所示的充电阶段，工作流体回路103包括膨胀机115、增压压缩机112和复热器RCX与膨胀机115之间的风冷式冷却器ACC1。膨胀机115用于使工作流体膨胀的膨胀过程。增压压缩机112用于使工作流体压缩的压缩过程。如图1B所示的发电阶段，工作流体回路103包括用于压缩过程的泵118。同理，工作流体回路103包括发电阶段中的动力涡轮机121。此外，工作流体回路103的充电阶段不含风冷式冷却器ACC1而发电阶段包含风冷式冷却器ACC2。风冷式冷却器ACC2位于LTR 109与复热器RCX之间。

[0024] 本文所用的术语中，“高温”和“低温”构成相对概念一即，HTR的工作温度高于LTR的工作温度。术语“热”和“冷”用作相对概念。例如，根据本公开实施例，HTR 106可以在100-340℃的温度范围内运行，而LTR 109可以在-2-2℃的温度范围内运行。

[0025] 如图1A所示的充电阶段，分别从LTR 109向工作流体传热以及从工作流体向HTR 106传热。如图1B所示的发电阶段，在相反方向上发生热传递。分别从工作流体向LTR 109传热以及从HTR 106向工作流体传热。

[0026] 有别于传统热力发动机，理论上100%高效涡轮机械、无压力损失、通过换热件完美匹配温度的理想循环中，PTES过程的RTE为100%。实际上，热力过程不可逆、有压力损失、通过换热件变温有限会导致RTE值较低。对于图1A中描绘的基准循环充电阶段，使用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)以及一组合率的效率值等，可以计算出RTE为50%-55%。

[0027] 例如，热力过程不可逆会导致效率低下。热力学上理想的压缩膨胀过程称作“等熵等熵”装置。图2中膨胀压缩过程由对角线表示一例如，发电阶段从状态4到状态5。术语“等熵”是指定熵过程。所示的非理想情况下，压缩过程为非等熵过程，因此增压时表现出比相应发电膨胀过程斜率更缓。由于这样的不可逆性，压缩过程的耗功多于膨胀过程的返功。

[0028] 工作流体的循环也导致效率低下。加热和散热过程中的压力损失(例如，发电过程中状态7到状态1)表示通过换热件和管道的循环流体中的功损失。因此，工作流体循环的基本行为本身会导致效率低下。

[0029] 此外，需要工作流体与蓄热介质之间的有限温差来驱动这两种材料之间的热传递。充电阶段和发电阶段的传热方向相反，蓄热罐材料的温度固定，因此充电期间工作流体温度需要高于HTR并低于HTR，而发电期间工作流体温度需要低于HTR并高于HTR。这样的温差代表热力势损失，这会降低系统的往返效率。

[0030] 再者，PTES系统100利用了内部传热，又称“回收”。PTES系统100中由复热器RCX代表这个过程。充电循环期间，利用回收增高进入压缩机112的工作流体的温度，同时又降低进入动力涡轮机115的工作流体的温度。相反，发电循环期间，PTES系统100利用回收在工作

流体进入HTR 106之前通过从涡轮机121排气提取余热来预热工作流体。

[0031] 通过相应蓄热罐的换热件发生工作流体与LTR 109之间以及工作流体与HTR 106之间的热传递。为了清楚起见,图中未示出换热件。通过复热器的传热过程可以用变温传热图(又称“TQ图”)来说明。

[0032] 图3为图1A和图1B所示PTES系统100中图2所示基准PTES循环的变温传热(TQ)图。图3的TQ图显示了工作流体高压时(曲线402)和工作流体低压时(曲线404)流体温度随热传递降低/升高的方式。TQ曲线斜率可显示为同流体质量流率与比热容之积成反比。图1A和图1B中PTES系统100的工作流体为CO<sub>2</sub>。

[0033] 基准循环版本中,通过复热器RCX两侧的工作流体流率相同。理想热力情况下,复热器RCX两侧的工作流体比热容相同。在此情况下,两条TQ曲线402、404平行。随着换热件电导率(UA)增高,两条曲线相互逼近,在UA无穷大的极值下,两条曲线相互重合。

[0034] 然而,一些工作流体(包含CO<sub>2</sub>)具有随压力和温度变化的比热容特性。由于换热件两侧处于不同的压力,TQ曲线不再平行,而换热件的一个“末端”处表现出“夹点”行为。即使热流损失的热量与冷流获得的热量相同,离开复热器的热流温度也会高于进入热流的温度。这种温差代表损失“热力势值”,降低了系统性能(可以使用热力焓损计算方法进行更严格的分析来得出相同的结论)。在此情况下,离开复热器高压端的流体温度过高,需要向外排放热量到环境中,以在膨胀机出口处达到近乎全液态。这种热损失对循环性能造成直接影响。

[0035] 如上所述,本公开技术减少了复热器比热容失配的影响,避免了TQ斜率失配相关的焓损,从而显著提高循环性能。为了TQ曲线斜率匹配,降低高热容流体的质量流率,使得复热器两侧的质量(m)与比热容(cP)之积(mcP)相同。在称为再压缩布雷顿循环(RCB循环)的超临界二氧化碳(SCO<sub>2</sub>)动力循环中,这一点是通过使用第二个“旁路”压缩机有意旁通低温复热器高压侧周围的部分CO<sub>2</sub>流来实现。然而,由于PTES循环要比RCB循环工作温度低得多,这个选项无法应用,因为需要从两个阶段的入流口进行压缩。

[0036] 相比之下,充电阶段,本公开技术增添了平行于复热器高压侧的流动路径。约40%的高压CO<sub>2</sub>流旁通复热器高压侧,并将其热量传递到第三种传热介质(中温蓄热罐或MTR),其余约60%的CO<sub>2</sub>流继续通过复热器。现在,复热器两侧的质量与比热容之积几乎相同,因此允许流体间温度愈加接近。然后这两路流重新合流后通过膨胀机。从前40%高压CO<sub>2</sub>中提取的热量转移到蓄热介质中。

[0037] 发电循环期间,过程相反。从泵排放中分流出约60%的CO<sub>2</sub>流,其温度因从MTR介质传热而升高。其余CO<sub>2</sub>通过复热器高压侧,从复热器传热。这两路流重新合流后才进一步受高温蓄热罐材料加热。

[0038] 降低焓损会显著改善系统性能。在高温蓄热罐和低温蓄热罐以及其他压力、温度和换热件面积限制相当的情况下,新循环实现了往返效率(RTE)提高8个百分点,大约从52%提高到60%。另外,还能取消充电阶段ACC。

[0039] 回顾附图,图4A和图4B分别示出了根据本公开技术一个或多个实施例的PTES系统400工作循环的充电阶段和发电阶段。参照图4A和图4B,PTES系统400包括可配置的工作流体回路403、高温蓄热罐(HTR)406、低温蓄热罐(LTR)409和中温蓄热罐(MTR)412。PTES系统400可以表征为“三罐系统”,因为存在三个蓄热罐HTR 406、LTR 409和MTR 412。

[0040] HTR 406如此命名是因为其工作温度高于LTR 409和MTR 412的工作温度。同理，LTR 409的工作温度低于HTR 406和MTR 412的工作温度。MTR 412的工作温度介于HTR 406和LTR 409的工作温度之间。因此，关于蓄热罐HTR 406、LTR 409和MTR 412，术语“高”、“中”和“低”描述了这三个蓄热罐HTR 406、LTR 409和MTR 412的相对工作温度。

[0041] 每个蓄热罐HTR 406、LTR 409、MTR 412均包含蓄热介质(未单独示出)。所示实施例中，对于HTR 406、MTR 412和LTR 409，蓄热介质分别为沙、液态水和冰水混合物。然而，蓄热介质可以是任何合适的蓄热介质，替选实施例中可以使用替选的蓄热介质。每个蓄热罐HTR 406、MTR 412、LTR 409均可包括换热件、管道、泵、阀和其他控制装置(未单独示出)，以在PTES系统400运行期间在蓄热介质与工作流体之间传热。

[0042] 例如，图4A和图4B所示的实施例中，HTR 406可以是所谓的三罐系统，如图6A所示的三罐系统600。三罐系统中，在充电过程中，工作流体进入第一换热件HTX1，在此将热量传递给蓄热介质。然后工作流体进入第二换热件HTX2，在此将额外的热量传递给第二蓄热介质。蓄热介质从第一罐HTRc输送到第二换热件HTX2，在此从工作流体接受热量。第二罐HTRm中储存有额外的蓄热材料，在中间温度下与蓄热材料混合。然后混合的蓄热材料输送到第一换热件HTX1，在此从工作流体接受热量，然后储存于第三罐HTRh中。

[0043] 在发电过程中，流动方向相反。工作流体首先进入第二换热件HTX2，在此从蓄热介质接受热量。然后工作流体进入第一换热件HTX1，在此从蓄热介质接受额外的热量。蓄热介质从第三罐HTRh输送到第一换热件HTX1，在此将热量传递给工作流体。然后将冷却后的蓄热介质分流成第一部分和第二部分。第一部分蓄热材料储存于第二罐HTRm中。第二部分蓄热材料输送到第二换热件HTX2，在此将额外的热量传递给工作流体。冷却后的第二部分蓄热材料储存于第一罐HTRc中。

[0044] 同理，图4A和图4B所示的实施例中，MTR 412和LTR 409可以实施在双罐系统中，如图6B所示的双罐系统603。双罐蓄热罐中，在充电过程中，工作流体进入换热件并将热量传递给蓄热介质，该蓄热介质可以是液体，如油、水或熔盐，也可以是流动性颗粒介质，如硅砂或烧结铝矾土。蓄热介质从第一罐HTRc输送到换热件，在此从工作流体接受热量，然后储存于第二罐HTRh中。

[0045] 在发电过程中，流体流动方向相反。工作流体进入换热件并从蓄热介质接受热量。蓄热介质从第二蓄热罐HTRh输送到换热件，在此将热量传递给工作流体。冷却后的传热介质随后储存于第一罐HTRc中。

[0046] 替选实施例中可以使用其他类型的罐系统。一种这样的罐系统是固体温跃层蓄热罐606，请见图6C。温跃层蓄热器中，在充电过程中，工作流体进入温度相对较低的蓄热介质。蓄热介质一般是固相材料，工作流体可以流过该蓄热介质，要么流过蓄热介质中的孔隙，要么流过蓄热介质材料内嵌入的管路或管道(图中未示出)。随着工作流体流过蓄热介质，热量从工作流体传递到蓄热介质，从而使其温度升高。工作流体冷却到较低温度并离开蓄热罐。

[0047] 在发电过程中，工作流体的流动方向相反。温度相对较低的工作流体进入受热后的蓄热介质。热量从蓄热介质传递到工作流体，蓄热介质温度降低，工作流体温度升高。受热后的工作流体然后离开蓄热罐。

[0048] 另一种替选的罐系统是包含传热流体(TTF)回路的温跃层609，请见图6D。替选地，

在充电过程中,工作流体可以在换热件中将热量传递给流体传热介质,如油、水或空气。然后,传热介质可以流过蓄热介质而将热量传递给蓄热介质。冷却后的传热流体随后输送到换热件,在此重新受热于工作流体。在发电过程中,工作流体和传热流体的方向相反。

[0049] 还存在单罐温跃层蓄热系统,如图6E所示的单罐温跃层蓄热系统612。单罐温跃层蓄热罐中,在充电过程中,工作流体进入换热件,在此将热量传递给传热流体。受热后的传热流体输送到罐顶,因其流体密度较低而导致热分层,而温度较高的流体则留在上层。从罐底抽出温度较低的传热流体并输送到换热件。

[0050] 在发电过程中,流动方向相反。温度相对较高的传热流体从罐顶输送到换热件,在此加热工作流体。冷却后的传热流体输送到蓄热罐底,在此与温度较高的传热流体保持热分层并分离。

[0051] 如图6F所示系统615的嵌入式传热面系统也为公知系统。嵌入式传热面蓄热罐中,通过一系列浸没在温度相对均匀的蓄热介质中的管路、管道或其他流体通道输送工作流体。本例中,蓄热介质可以是水或接近水冷凝点的其他流体,工作流体可以是接近水沸点的液体或处于水沸点的液汽混合物。在传热过程中,热量从工作流体传递到蓄热介质,使工作流体在恒温下沸腾,同时蓄热介质从液体冷凝成固体。工作流体在其沸点或略超其沸点时呈蒸汽状态离开蓄热罐。

[0052] 在发电过程中,工作流体的流动方向相反。工作流体在一定压力下进入,使工作流体的沸点略高于蓄热介质的冷凝点。热量从工作流体传递到蓄热介质,使工作流体冷凝成液态,使蓄热介质熔化成液态。

[0053] 图6A至图6E所示的一个或多个罐系统可用于各种替选实施例中根据实施具体考虑来实施HTR 406、MTR 412和LTR 409。但该列表既非穷举也非排他。也可以采用其他罐系统设计。

[0054] 回顾图4A和图4B,旁路415也是充电阶段和发电阶段中可配置工作流体回路403所共有的旁路。旁路415包括MTR 412。如上下文所述,旁路415允许一部分工作流体旁通复热器RCX的高压侧。

[0055] 图4A具体说明了PTES工作循环的充电阶段。在充电阶段中,可配置的工作流体回路403包括膨胀机418和增压压缩机421。所示实施例中,工作流体为CO<sub>2</sub>。替选实施例可以使用本领域公知的替选工作流体。下面关于充电阶段的内容结合表2列出的工作条件进行考虑。鉴于本公开,本领域技术人员应会理解,表2列出的值部分取决于工作流体是CO<sub>2</sub>。对于表2中的工作条件,工作流体的不同实施方案可能产生不同的值。

[0056] 此外,在下述内容中,图4A所示的充电阶段期间工作流体回路403中任何既定点处的工作流体状态用圆圈内数字来表示。因此,在图4A中,第一状态或状态1显示为圆圈内数字1。然后可将其映射回表2以更全面地表征状态。

[0057] 表2充电阶段工作条件

[0058]

| 状态 | 流出      | 流入     | H<br>(kJ/kg) | P<br>(MPa) | T<br>(°C) | S<br>(kJ/kg/K) | w<br>(kg/sec) |
|----|---------|--------|--------------|------------|-----------|----------------|---------------|
| 1  | RCXl    | Compr  | 568.91       | 3.20       | 114.94    | 2.287          | 49.53         |
| 2  | Compr   | HTR    | 791.45       | 30.00      | 362.60    | 2.326          | 49.53         |
| 3  | HTR     | Split1 | 428.89       | 29.80      | 118.22    | 1.594          | 49.53         |
| 4  | Split1A | RCXh   | 428.89       | 29.80      | 118.22    | 1.594          | 28.76         |
| 5  | RCXh    | Mix1A  | 196.14       | 29.70      | 1.16      | 0.890          | 28.76         |
| 6  | Split1B | MTR    | 428.89       | 29.80      | 118.22    | 1.594          | 20.77         |
| 7  | MTR     | Mix1B  | 238.23       | 29.70      | 23.45     | 1.037          | 20.77         |
| 8  | Mix1    | Exp    | 213.79       | 29.70      | 10.57     | 0.953          | 49.53         |
| 9  | Exp     | LTR    | 189.36       | 3.40       | -4.34     | 0.961          | 49.53         |
| 10 | LTR     | RCXl   | 433.75       | 3.30       | -1.05     | 1.863          | 49.53         |

[0059] 本公开涉及复热器RCX的“高压侧”和“低压侧”，或分别为“RCXh”和“RCXl”。图4A所示的充电阶段中，增压压缩机421对工作流体进行增压，为充电阶段的工作流体提供循环动力。膨胀机418对工作流体进行膨胀或减压。

[0060] 由增压压缩机421增压的工作流体循环通过一部分工作流体回路403，可称为工作流体回路403的“高压侧”。同理，由膨胀机418膨胀的工作流体循环通过一部分工作流体回路403，可称为工作流体回路403的“低压侧”。因此，工作流体回路403的高压侧404从增压压缩机421的出口422延伸到膨胀机418的入口419。低压侧405从膨胀机418的出口420延伸到增压压缩机421的入口423。

[0061] 复热器RCX的高压侧是复热器RCX与工作流体回路403的高压侧404交界的一侧。图4A所示的充电阶段中，这是复热器RCX中由端口426、430界定的一侧，增压后的工作流体经由端口426、430循环通过复热器RCX。复热器RCX的低压侧是与工作流体回路403的低压侧405交界的一侧。复热器RCX的低压侧由端口433、436界定，膨胀后的工作流体经由端口433、436循环通过复热器RCX。

[0062] 充电阶段，从复热器RCX开始，工作流体离开复热器RCX并在第一温度 $T_1$ 和第一压力 $P_1$ 下以第一状态或状态1进入增压压缩机421。增压压缩机421压缩工作流体并增高工作流体的温度和压力。然后，工作流体在第二温度 $T_2$ 和第二压力 $P_2$ 下以第二状态离开增压压缩机421，第二温度 $T_2$ 和第二压力 $P_2$ 分别大于第一温度 $T_1$ 和第一压力 $P_1$ 。

[0063] 然后，工作流体在第二温度 $T_2$ 和第二压力 $P_2$ 下以第二状态进入高温蓄热罐HTR 406。在HTR 406中，热量从工作流体传递到HTR 406中的蓄热介质。工作流体在第三温度 $T_3$ 和第三压力 $P_3$ 下离开HTR 406时，传热过程使工作流体的压力和温度降低到第三状态。

[0064] 工作流体随后到达工作流体回路403中的点424并分流。工作流体的第一部分进入旁路415，第二部分进入管线427。第二部分在第四温度 $T_4$ 和第四压力 $P_4$ 下以第四状态进入管线427。表2表明第四状态处于第三温度和第三压力，即 $T_4 = T_3$ 和 $P_4 = P_3$ ，但不同于分流前的第三状态。不同之处在于，虽然第二部分与第三状态的工作流体处于相同的温度和压力，第四状态的质量流率低于第三状态的质量流率。然后，第二部分在第四温度 $T_4$ 和第四压力 $P_4$ 下以第四状态通过端口426进入复热器RCX的高压侧。

[0065] 在复热器RCX中,第二部分与复热器低压侧的循环工作流体之间进行换热。这种换热使第二部分冷却到第五状态,如表2所示,此时第二部分处于明显更低的第五温度 $T_5$ 和略低的第五压力 $P_5$ 。然后,第二部分在第五温度 $T_5$ 和第五压力 $P_5$ 下以第六状态通过端口430从复热器RCX的高压侧离开复热器RCX。

[0066] 第二部分循环通过复热器RCX的同时,第一部分以第六状态进入旁路415。表2表明第六状态不同于分流前的第三状态。不同之处在于,虽然第二部分与第四状态的工作流体处于相同的温度和压力,第六状态的质量流率低于第三状态的质量流率。然后,第一部分在第六温度 $T_6$ 和第六压力 $P_6$ 下以第六状态进入MTR 412。

[0067] MTR 412中,在中温蓄热罐MTR 412与工作流体的第一部分之间传递热量。就此重申,MTR 412的工作温度高于LTR 409的工作温度并低于高温蓄热罐HTR 406的工作温度。然后,第一部分在第七温度 $T_7$ 和第七压力 $P_7$ 下以第七状态离开中温蓄热罐MTR 412。

[0068] 第一部分以第七状态离开MTR 412而第二部分以第五状态离开复热器RCX后,第一部分和第二部分在点425处合流。合流后,如表2所示,工作流体处于第八状态、第八压力 $P_8$ 和第八温度 $T_8$ 。然后,第一部分和第二部分的合流或“合流部分”在第八压力 $P_8$ 和第八温度 $T_8$ 下以第八状态进入膨胀机418,随后经历膨胀和冷却。工作流体的合流部分在第九温度 $T_9$ 和第九压力 $P_9$ 下以第九状态离开膨胀机418。

[0069] 然后,工作流体在第九温度 $T_9$ 和第九压力 $P_9$ 下以第九状态进入LTR 409。在LTR 409中,热量从LTR 409传递到工作流体。应当注意,如表2所示,LTR 409的工作温度低于中温蓄热罐MTR 412和高温蓄热罐HTR 406的工作温度。工作流体在第十温度 $T_{10}$ 和第十压力 $P_{10}$ 下以第十状态离开LTR 409。

[0070] 离开LTR 409后,工作流体在第十温度 $T_{10}$ 和第十压力 $P_{10}$ 下以第十状态进入复热器RCX,在第一温度 $T_1$ 和第一压力 $P_1$ 下以第一状态离开复热器RCX。在复热器RCX中,热量从复热器RCX的高压侧工作流体传递到低压侧工作流体。表2证实:(1)高压侧404的工作流体因从第四状态过渡到第五状态而温度下降;(2)低压侧405的工作流体因从第十状态过渡到第一状态而温度上升。然后,工作流体再次开始如上所述循环通过工作流体回路403。

[0071] 回顾图4B,示出了PTES工作循环发电阶段中工作流体回路403的配置。表3列出了工作流体回路403中各点的工作条件。如上所述,工作流体通过工作流体回路403的流动方向与工作循环充电阶段中的流动方向相反。应当注意,图4A所示充电阶段配置中的膨胀机419和增压压缩机421分别替换为泵450和动力涡轮机453。比较表3中的状态1和2以及表3中的状态9和10可以看出,泵450对工作流体增压,动力涡轮453对工作流体减压。

[0072] 因此,工作循环的这个阶段中,工作流体回路403的高压侧404从泵450的出口451延伸到动力涡轮机453的入口454。低压侧405从动力涡轮机453的出口455延伸到泵450的入口452。应当注意,高压侧404包括旁路415、管线427、点425和点424。复热器RCX的高压侧404又由端口426、430界定,复热器RCX的低压侧405又由端口433、436界定。

[0073] 表3发电阶段工作条件

[0074]

| 状态 | 流出      | 流入     | H<br>(kJ/kg) | P<br>(MPa) | T<br>(°C) | S<br>(kJ/kg/K) | w<br>(kg/sec) |
|----|---------|--------|--------------|------------|-----------|----------------|---------------|
| 1  | LTX     | Pump   | 204.69       | 3.87       | 2.00      | 1.016          | 79.71         |
| 2  | Pump    | Split1 | 234.60       | 29.23      | 21.52     | 1.027          | 79.71         |
| 3  | Split1A | RCX1   | 234.60       | 29.23      | 21.52     | 1.027          | 27.12         |
| 4  | RCX1    | Mix1A  | 413.93       | 29.13      | 109.95    | 1.558          | 27.12         |
| 5  | Split1B | MTR    | 234.60       | 29.23      | 21.52     | 1.027          | 52.58         |
| 6  | MTR     | Mix1B  | 358.20       | 29.13      | 83.04     | 1.408          | 52.58         |
| 7  | Mix1    | HTR    | 377.17       | 29.13      | 92.12     | 1.460          | 79.71         |
| 8  | HTR     | PT     | 747.69       | 28.93      | 327.50    | 2.262          | 79.71         |
| 9  | PT      | RCXh   | 589.50       | 4.07       | 139.10    | 2.296          | 79.71         |
| 10 | RCXh    | ACC    | 528.48       | 3.97       | 81.58     | 2.141          | 79.71         |
| 11 | ACC     | LTX    | 454.38       | 3.92       | 20.00     | 1.912          | 79.71         |

[0075] 从LTR 409开始,工作流体在第一温度 $T_1$ 和第一压力 $P_1$ 下以第一状态离开LTR 409并进入泵450。泵450为发电阶段提供循环动力。工作流体在第二温度 $T_2$ 和第二压力 $P_2$ 下以第二状态离开泵450。

[0076] 工作流体以第二状态离开泵450后在点425处分流成第一部分和第二部分。应当注意,图4A所示的充电阶段中,两部分工作流体在点424处分流并在点425处合流。然而,发电阶段与充电阶段中工作流体的流动方向相反,因此两部分工作流体在点425处分流并在点424处合流。

[0077] 分流后第二部分在点425处进入管线428。第二部分在第三温度 $T_3$ 和第三压力 $P_3$ 下以第三状态进入管线428。从表2可知,第三状态处于第二温度和第二压力,即,第三温度 $T_3$ 和第三压力 $P_3$ 与第二温度 $T_2$ 和第二压力 $P_2$ 相同。尽管如此,第三状态与第二状态的不同之处在于其质量流率明显低于第二状态。然后,第二部分从复热器RCX的高压侧404循环通过复热器RCX,通过端口430进入复热器RCX并通过端口426离开复热器RCX。第二部分在第三温度和第三压力下以第三状态进入复热器RCX并在第四温度和第四压力下以第四状态离开复热器RCX。

[0078] 在点425处分流后,工作流体的第一部分在第五温度 $T_5$ 和第五压力 $P_5$ 下以第五状态进入旁路415。第一部分在第五温度 $T_5$ 和第五压力 $P_5$ 下以第五状态进入MTR 412。在MTR 412中,热量从中温蓄热罐MTR 412传递到第一部分。然后,第一部分在第六温度 $T_6$ 和第六压力 $P_6$ 下以第六状态离开MTR 412。

[0079] 第六状态的第一部分和第四状态的第二部分离开MTR 412和复热器RCX后在点424处合流。还应注意,图4A所示的充电阶段中,两部分工作流体在点424处分流并在点425处合流。然而,发电阶段与充电阶段中工作流体的流动方向相反,因此两部分工作流体在点425处分流并在点424处合流。点424后工作流体的合流部分处于第七温度 $T_7$ 、第七压力 $P_7$ 和第七状态。

[0080] 然后,合流部分在第七温度 $T_7$ 和第七压力 $P_7$ 下以第七状态进入高温蓄热罐HTR 406。在高温蓄热罐HTR 406中,热量从高温蓄热罐HTR 406传递到合流部分。然后,合流部分

在第八温度 $T_8$ 和第八压力 $P_8$ 下以第八状态离开高温蓄热罐HTR 406。

[0081] 然后,工作流体的合流部分在第八温度 $T_8$ 和第八压力 $P_8$ 下以第九状态进入动力涡轮机453。具体而言,合流部分从工作流体回路403的高压侧404通过入口454进入动力涡轮机453。动力涡轮机453使工作流体膨胀,使合流部分冷却并降压。然后,合流部分在第九温度 $T_9$ 和第九压力 $P_9$ 下以第九状态离开动力涡轮机453。具体而言,合流部分通过出口455离开动力涡轮机到达工作流体回路403的低压侧405。

[0082] 然后,合流部分经由端口433、436循环通过复热器RCX的低压侧。在复热器RCX中,如上所述从复热器RCX的高压侧进入复热器RCX的工作流体的第二部分与从复热器RCX的低压侧进入复热器RCX的合流部分之间进行换热。然后,合流部分在第十温度 $T_{10}$ 和第十压力 $P_{10}$ 下以第十状态离开复热器RCX。然后,合流部分在第十温度 $T_{10}$ 和第十压力 $P_{10}$ 下以第十状态进入风冷式冷却器ACC。然后,风冷式冷却器ACC将合流部分在第十一温度 $T_{11}$ 和第十一压力 $P_{11}$ 下冷却到第十一状态。

[0083] 然后,合流部分在第十一温度 $T_{11}$ 和第十一压力 $P_{11}$ 下以第十一状态进入LTR 409。在LTR 409中,热量从合流部分传递到LTR 409。然后,合流部分在第一温度 $T_1$ 和第一压力 $P_1$ 下以第一状态离开LTR 409,如上所述再次循环通过工作流体回路403。

[0084] 如上所述,图4A所示充电阶段与图4B所示发电阶段之间的工作流体回路403的配置可由流体流量阀来控制。虽然本领域技术人员清楚了解此类控制系统,为了完整起见,图5仍示出了一种这样的控制系统500。控制系统500可包括多个流体流量阀505以及通过电线515发送控制信号的控制器510。

[0085] 控制器510包括基于处理器的资源520,例如但不限于微控制器、微处理器、专用集成电路(ASIC)、电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)等。根据基于处理器的资源的实施方案,控制器510还可以包括用指令(未示出)编码的存储器525,基于处理器的资源520可执行这些指令来实施控制器510的功能。同样,根据基于处理器的资源520的实施方案,存储器525可以是该基于处理器的资源520的一部分或独立设备。例如,指令可以是存储于微处理器内存部分中的固件,也可以是存储于独立的只读或随机存取存储器芯片中的例程。同理,基于处理器的资源520的某些实施方案中,例如ASIC,可以完全省略存储器535。

[0086] 现参照图4A、图4B和图5,诸如控制器510等控制器可用于图4A所示充电阶段与图4B所示发电阶段之间配置工作流体回路403。控制器510可以向流体流量阀505发送控制工作流体流量的控制信号。因此,为了配置充电阶段的工作流体回路403,控制器510控制流体流量阀505引导工作流体进入增压压缩机421和膨胀机418,同时引导工作流体离开动力涡轮机453和泵450。相反,为了配置发电阶段的工作流体回路403,控制器510控制流体流量阀505引导工作流体进入动力涡轮机453和泵450,同时引导工作流体离开增压压缩机421和膨胀机418。

[0087] 现参照图4A和图4B,工作流体回路403的高压侧404包括处于充电阶段和运行阶段的旁路415。因此,包括MTR 412的换热件(未示出)的旁路415在两阶段中均位于复热器RCX的高压侧。工作流体进入复热器RCX之前,在充电阶段的点424处和发电阶段的点425处分流。第一部分通过旁路415旁通复热器RCX的高压侧,同时第二部分进入复热器RCX。第二部分在充电阶段的点425处和发电阶段的点424处通过复热器RCX之后,第一部分和第二部分随后合流。

[0088] 所示实施例中,工作流体回路402的高压侧404的分流和合流发生在点424、425处。然而,点424、425是分流点还是合流点则取决于工作循环是处于充电阶段还是发电阶段。点424在充电阶段为分流点而在发电阶段为合流点。相反,点425在充电阶段为合流点而在发电阶段为分流点。应当注意,替选实施例可以具有分流点和合流点作为本公开的补充或代替。设计目标与实施本公开技术无关时尤其如此。

[0089] 本公开目的是平衡复热器RCX低压侧405的质量与比热容之积和复热器RCX高压侧404的质量与比热容之积。术语“平衡”是指复热器RCX两侧的质量与比热容之积相等。但由于各种原因,这在实践中可能难以精确实现。因此,这两个乘积“大约”、“大致”或“大概”相等时,达成“平衡”,因为它们都处于整体系统运行达到某个预期效率水平的某个误差范围内。这个预期效率水平可表达为适应这类问题的一系列值。

[0090] 同理,本公开中任何数量相关术语“大约”、“大概”等表示所述数量的容许偏差,只要实际数量处于整体系统运行达到某个预期效率水平的某个误差范围内即可。例如,所示实施例中,第一部分可以是合流工作流体总量的40%,第二部分可以是合流工作流体总量的60%,如下详述。采用CO<sub>2</sub>作为工作流体的任何给定实施例中,可能难以实现这样精确的配比。因此,只要比例“大约”或“大概”达40%和60%,可以容许一定偏差。这同样适于本文论述或公开的任何其他量值。

[0091] 鉴于本公开,本领域技术人员应会理解,任何给定实施例中的质量流率和比热容都将针对实施方案,这取决于例如选取实施工作流体等因素。诸如泵、膨胀机、压缩机等其他因素可能影响工作流体回路各部分的工作条件。因此,表2和表3中各参数量在采用不同物质作为工作流体或不同实施某些设备的替选实施例中可能有所不同。

[0092] 如上所述,所示实施例中的工作流体为CO<sub>2</sub>。如前所述,工作流体分流时,第一部分占工作流体总量的40%,第二部分占工作流体总量的60%。充电阶段和发电阶段皆是如此。采用不同工作流体或不同质量流率的替选实施例中,可以更改这个比例来保持复热器高压侧和低压侧的质量流率和比热平衡。

[0093] 鉴于上述,第一实施例中,一种热泵蓄能(PTES)系统运行方法包括:使工作流体循环通过工作流体回路,工作流体具有质量流率和比热容,当工作流体循环通过工作流体回路时,平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积。

[0094] 第二实施例中,第一实施例可实施为,当工作流体循环通过工作流体回路时,平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积包括:在复热器高压侧使工作流体分流成第一部分和第二部分;使第一部分旁通复热器高压侧;旁通期间冷却第一部分;使第二部分循环通过复热器;第二部分离开复热器后,使冷却后的第一部分与第二部分合流。

[0095] 第三实施例中,第二实施例可实施为,旁通期间冷却第一部分包括:使工作流体循环通过旁路;在工作流体与中温蓄热罐之间传热。传热包括:充电阶段,从低温蓄热罐向工作流体传热,并从工作流体向中温蓄热罐和高温蓄热罐传热;发电阶段,从高温蓄热罐和中温蓄热罐(热)向工作流体传热,并从工作流体向低温蓄热罐传热。

[0096] 第四实施例中,第二实施例可实施为,工作流体的第一部分占工作流体份量的40%,第二部分占工作流体份量的60%。

[0097] 第五实施例中,第一实施例可实施为,使工作流体循环通过工作流体回路包括循

环二氧化碳(CO<sub>2</sub>), 工作流体的第一部分占工作流体份量的40%, 第二部分占工作流体份量的60%。

[0098] 第六实施例中, 第二实施例可实施为, 使工作流体循环通过工作流体回路包括循环二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

[0099] 第七实施例中, 第一实施例可实施为, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积包括充电阶段和发电阶段。充电阶段包括: 使60%由二氧化碳(CO<sub>2</sub>)组成的工作流体循环通过复热器高压侧; 使100%由CO<sub>2</sub>组成的工作流体循环通过复热器低压侧。发电阶段包括: 使60%由CO<sub>2</sub>组成的工作流体循环通过复热器高压侧; 使100%由CO<sub>2</sub>组成的工作流体循环通过复热器低压侧。

[0100] 第八实施例中, 第一实施例可实施为, 当工作流体循环通过工作流体回路时平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积包括: 降低复热器高压侧的质量流率。

[0101] 第九实施例中, 第一实施例可实施为, 复热器高压侧工作流体的第二部分与复热器低压侧工作流体的合流部分之间进行换热。

[0102] 第十实施例中, 一种热泵蓄能 (PTES) 系统包括中温蓄热罐和工作流体回路。工作流体回路包括具有高压侧和低压侧的复热器, 当工作流体循环通过工作流体回路时, 平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积。

[0103] 第十一实施例中, 第十实施例可实施为, 工作流体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

[0104] 第十二实施例中, 第十实施例可实施为, 工作流体回路包括旁路, 工作流体的第一部分通过该旁路旁通复热器高压侧, 同时工作流体的第二部分循环通过复热器高压侧。

[0105] 第十三实施例中, 第十一实施例可实施为, 旁路包括第一部分与中温蓄热罐之间传热。此外, 工作流体回路还包括: 复热器高压侧的分流器, 使工作流体分流成第一部分和第二部分, 第一部分小于第二部分, 第二部分从复热器高压侧循环通过复热器; 复热器高压侧的合流点, 第二部分离开复热器后, 第一部分与第二部分在合流点处合流。

[0106] 第十四实施例中, 第十一实施例可实施为, 第一部分占工作流体总量的40%, 第二部分占工作流体总量的60%。

[0107] 第十五实施例中, 第十一实施例可实施为, 工作流体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>), 第一部分占工作流体总量的40%, 第二部分占工作流体总量的60%。

[0108] 第十六实施例中, 第十实施例可实施为, 在运行中, 复热器高压侧工作流体的第二部分与复热器低压侧工作流体的合流部分之间进行换热。

[0109] 第十七实施例中, 一种热泵蓄能 (PTES) 系统运行方法包括: 使工作流体循环通过工作流体回路; 降低复热器高压侧工作流体的质量流率, 以当工作流体循环时平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积。降低质量流率可以包括: 使工作流体的第一部分旁通复热器高压侧; 使工作流体的第二部分循环通过复热器高压侧。

[0110] 第十八实施例中, 第十七实施例可实施为, 旁通复热器高压侧包括: 充电阶段工作流体与高温蓄热罐之间传热后, 使工作流体的第一部分旁通复热器高压侧, 旁通期间从第一部分向中温蓄热罐传热, 同时使第二部分循环通过复热器, 第一部分小于第二部分; 发电阶段离开泵后, 使工作流体的第三部分旁通复热器高压侧, 同时旁通期间从中温蓄热罐向第三部分传热, 同时使工作流体的第四部分循环通过复热器。

[0111] 第十九实施例中,第十七实施例可实施为,复热器高压侧工作流体的第二部分与复热器低压侧工作流体的合流部分之间进行换热。

[0112] 第二十实施例中,第十七实施例可实施为,降低复热器高压侧工作流体的质量流率以当工作流体循环时平衡复热器高压侧和复热器低压侧工作流体的质量与比热容之积,还包括:在复热器高压侧使工作流体分流成第一部分和第二部分,第一部分小于第二部分;旁通期间冷却第一部分;第二部分离开复热器后使冷却后的第一部分与第二部分合流。

[0113] 第二十一实施例中,第二十实施例可实施为,旁通期间冷却第一部分包括:在工作流体与中温蓄热罐之间传热。所述传热还可以包括:充电阶段,从工作流体向中温蓄热罐传热;发电阶段,从中温蓄热罐向工作流体传热。

[0114] 第二十二实施例中,第十七实施例可实施为,使工作流体循环通过工作流体回路包括循环二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

[0115] 第二十三实施例中,第十七实施例可实施为,工作流体的第一部分占工作流体份量的40%,第二部分占工作流体份量的60%。

[0116] 第二十四实施例中,第十七实施例可实施为,使工作流体循环通过工作流体回路包括循环二氧化碳(CO<sub>2</sub>),工作流体的第一部分占工作流体份量的40%,第二部分占工作流体份量的60%。

[0117] 第二十五实施例中,一种热泵蓄能(PTES)系统包括低温蓄热罐、高温蓄热罐、中温蓄热罐以及使用中工作流体循环通过的工作流体回路,该工作流体回路可配置用于PTES工作循环的充电阶段和发电阶段。工作流体回路可以包括:复热器;充电阶段:膨胀机,位于复热器与低温蓄热罐之间;增压压缩机,位于复热器与高温蓄热罐之间;发电阶段:泵,位于复热器与低温蓄热罐之间;动力涡轮机,位于复热器与高温蓄热罐之间;旁路,充电阶段和发电阶段,工作流体的第一部分旁通复热器高压侧并流过中温蓄热罐,中温蓄热罐在工作流体与中温蓄热罐之间传热,同时工作流体的第二部分循环通过复热器。

[0118] 第二十六实施例中,第二十五实施例可实施为,工作流体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

[0119] 第二十七实施例中,第二十五实施例可实施为,第一部分占工作流体总量的40%,第二部分占工作流体总量的60%。

[0120] 第二十八实施例中,第二十五实施例可实施为,工作流体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>),第一部分占工作流体总量的40%,第二部分占工作流体总量的60%。

[0121] 第二十九实施例中,一种热泵蓄能(PTES)系统运行方法包括:使高热容工作流体循环通过包含复热器的工作流体回路;降低复热器高压侧工作流体的质量流率,使得复热器两侧的质量与比热容之积相同。降低质量流率可以包括:充电阶段:使工作流体的第一部分旁通复热器,旁通期间从第一部分向中温蓄热罐传热,同时使工作流体的第二部分循环通过复热器,第一部分占工作流体份量的比例低于第二部分占工作流体份量的比例;使第二部分循环通过复热器,同时使第一部分旁通复热器,第二部分循环通过复热器的同时从第二部分传热;第一部分旁通复热器并且第二部分循环通过复热器后,使第一部分和第二部分一起循环通过膨胀机。降低质量流率可以包括:发电阶段:使工作流体的第三部分旁通复热器,旁通期间从第三部分向中温蓄热罐传热,同时使工作流体的第四部分循环通过复热器,第三部分高于第四部分;使第四部分循环通过复热器,同时使第三部分旁通复热器,第四部分循环通过复热器的同时向第四部分传热;第三部分旁通复热器并且第四部分循环

通过复热器后,使第三部分和第四部分一起循环通过高温蓄热罐。

[0122] 第三十实施例中,第二十九实施例可实施为,工作流体为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

[0123] 第三十一实施例中,第三十实施例可实施为,第一部分约占40%,第二部分约占充电阶段工作流体质量流率的60%,第三部分约占发电阶段工作流体质量流率的40%,第四部分约占发电阶段工作流体质量流率的60%。

[0124] 第三十二实施例中,第二十九实施例可实施为,第一部分约占充电阶段工作流体质量流率的40%,第二部分约占充电阶段工作流体质量流率的60%,第三部分约占发电阶段工作流体质量流率的40%,第四部分约占发电阶段工作流体质量流率的60%。

[0125] 鉴于本公开,本领域技术人员应会理解本公开技术的其他实施例。

[0126] 上文概述了若干实施例的特征,以便本领域技术人员可以更清楚明了本公开技术。本领域技术人员应会理解,很容易利用本公开作为设计或修改其他工艺和结构的基础来实现与本公开实施例相同的目的和/或相同的优点。本领域技术人员还应理解,此类等同构型不背离本公开的精神和范围,可以在不背离本公开精神和范围的前提下作出各种更改、替换和修改。

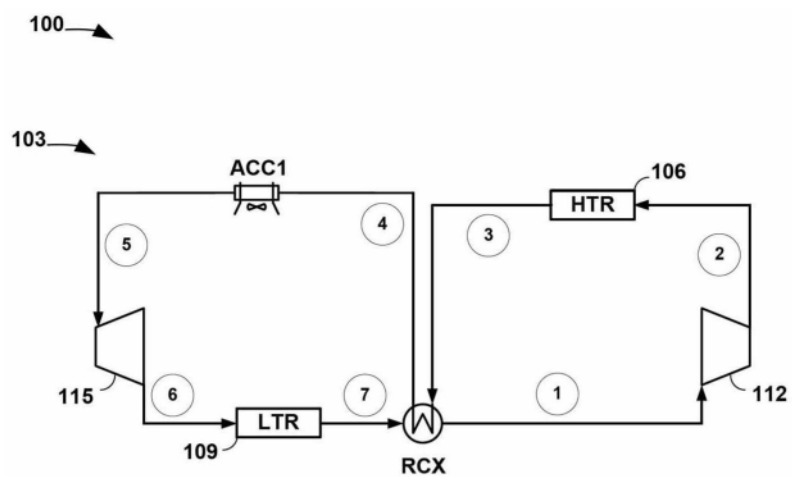


图1A(现有技术)

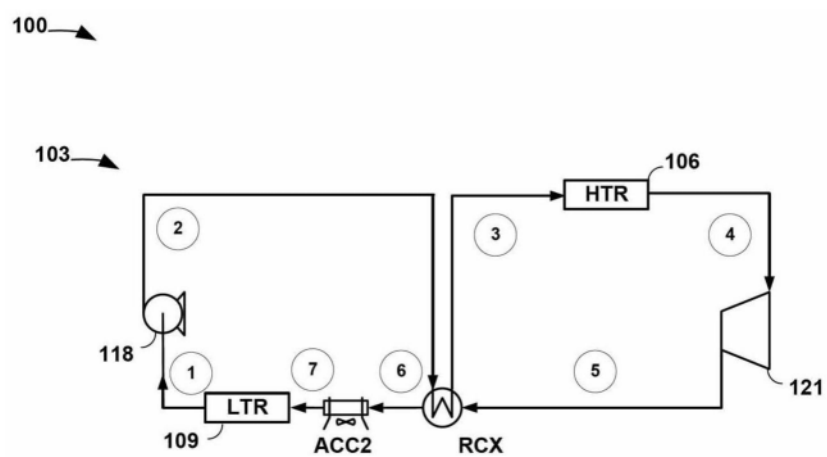


图1B(现有技术)

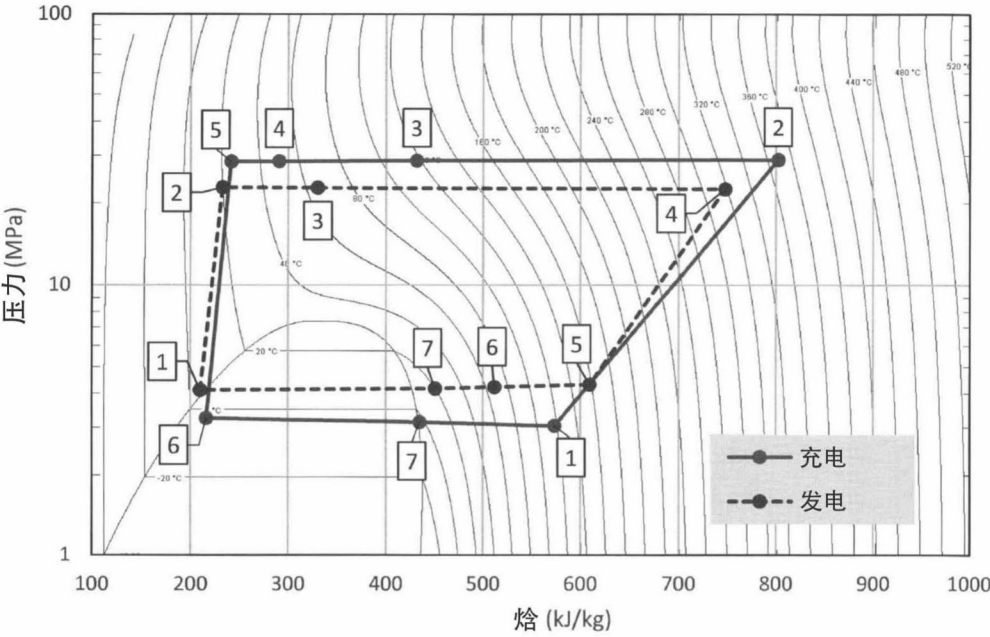


图2(现有技术)

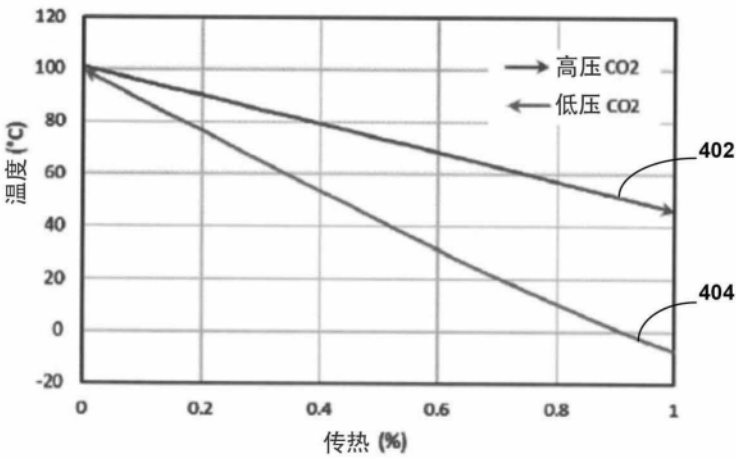


图3(现有技术)

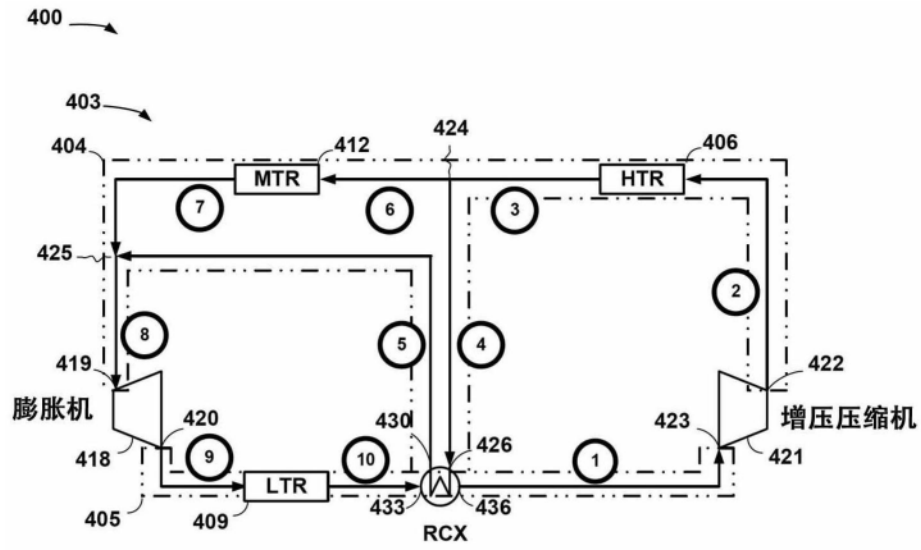


图4A

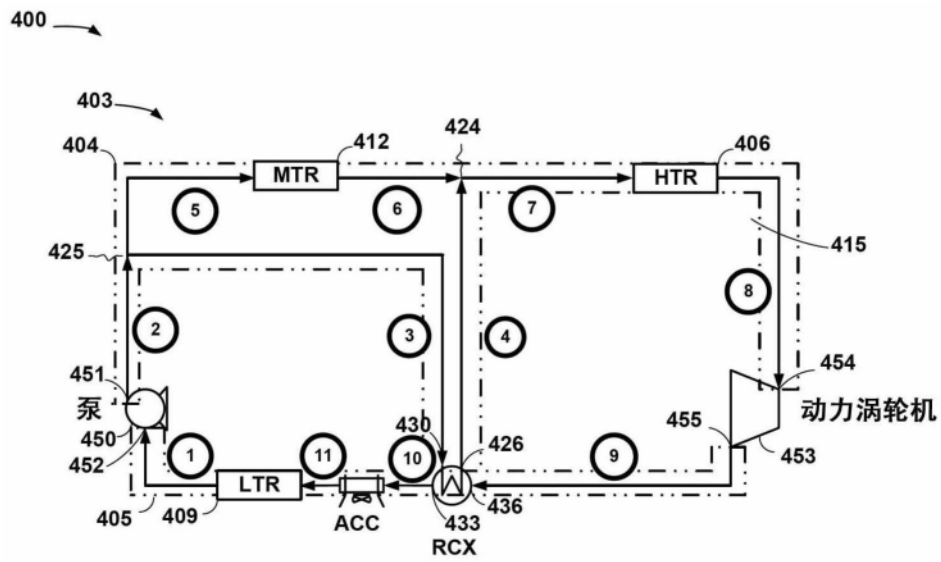


图4B

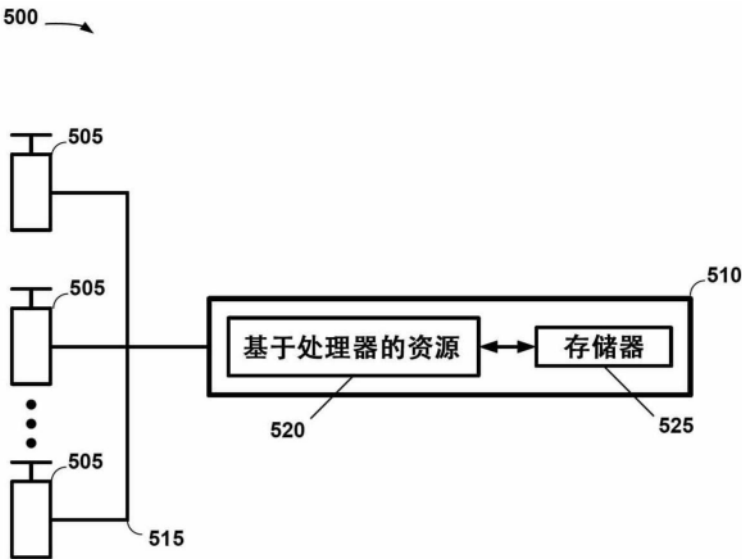


图5

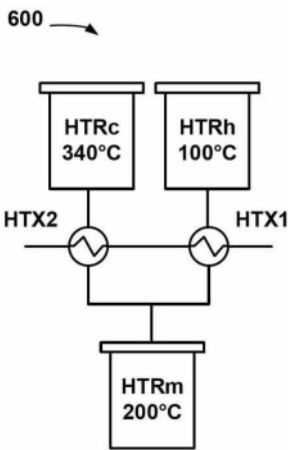


图6A

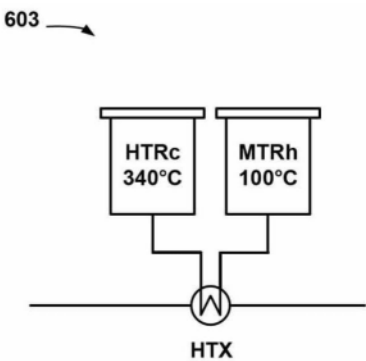


图6B

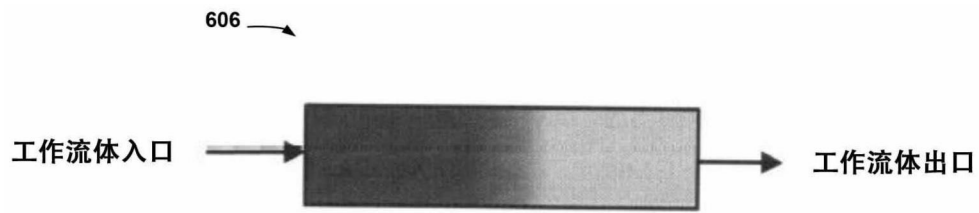


图6C

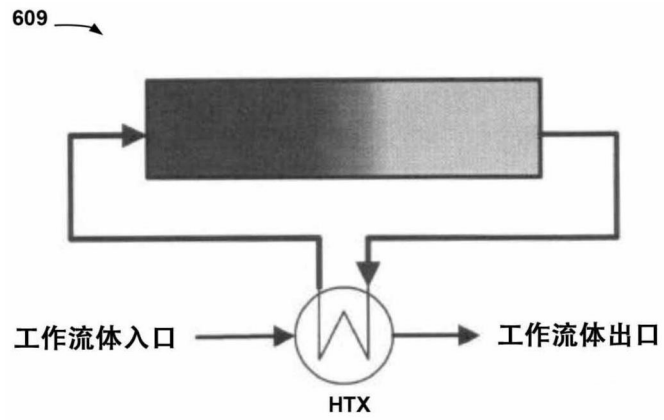


图6D

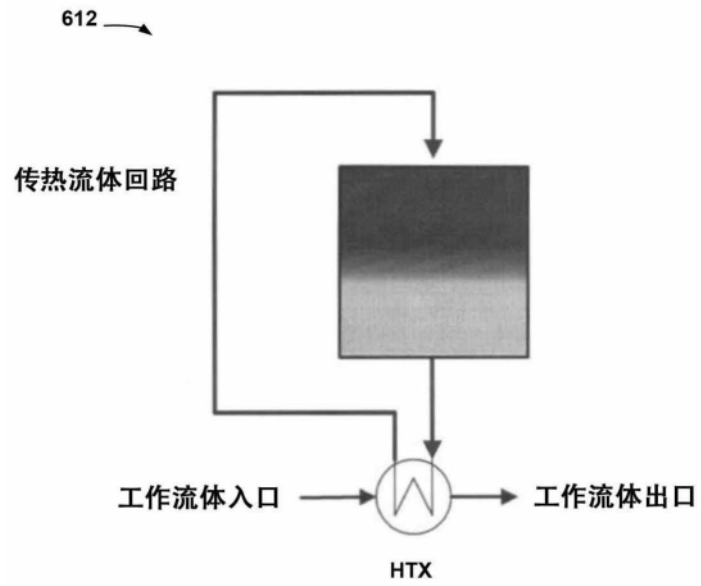


图6E

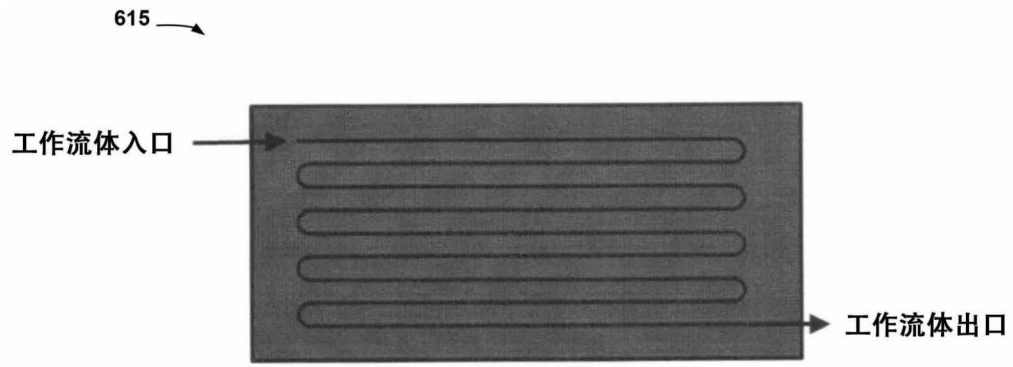


图6F