



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116031003 A

(43) 申请公布日 2023. 04. 28

(21) 申请号 202310077217.1

(22) 申请日 2023.01.18

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72) 发明人 张大林 李新宇 姜殿强 吕鑫狄 周星光 王成龙 田文喜 苏光辉 秋穗正

(74) 专利代理机构 西安智大知识产权代理事务所 61215

专利代理师 何会侠

(51) Int. Cl.

G21D 9/00 (2006.01)

G21C 15/28 (2006.01)

F28D 21/00 (2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图1页

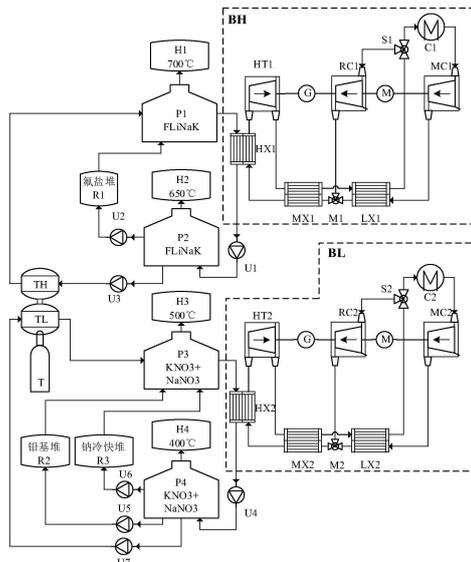
(54) 发明名称

耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统

(57) 摘要

本发明公开了耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,包括氟盐高、低温熔池,硝酸盐高、低温熔池,循环泵回路,氟盐堆、铅基堆、钠冷快堆和光热塔热源,以及高、低温超临界二氧化碳动力循环系统;反应堆和光热塔作为热源,氟盐和硝酸盐储能系统作为中间输热系统,提供四种温度的工艺热接口,并能够适应需求功率变化,减缓功率调节速率、维持反应堆冷却剂温度平衡;超临界二氧化碳动力循环系统用于实现热动转换;本发明充分利用了稳定的核能和清洁的太阳能,提供了高效能量转换方案,为700℃以下高温工艺热提供了相应的接口;包括但不限于热化学制氢、裂化、制甲醇、造纸、盐水淡化和工业供热,有助于我国反应堆、光热和储能技术的发展。

CN 116031003 A



1. 耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,其特征在于:包括氟盐高温熔池(P1)、氟盐高温工艺热接口(H1)、氟盐低温熔池(P2)、氟盐低温工艺热接口(H2)、硝酸盐高温熔池(P3)、硝酸盐高温工艺热接口(H3)、硝酸盐低温熔池(P4)、硝酸盐低温工艺热接口(H4)、第一循环泵(U1)、第二循环泵(U2)、第三循环泵(U3)、第四循环泵(U4)、第五循环泵(U5)、第六循环泵(U6)、第七循环泵(U7)、氟盐堆(R1)、铅基堆(R2)、钠冷快堆(R3)、光热塔(T)、光热塔氟盐高温熔池(TH)、光热塔硝酸低温熔池(TL)、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BH)和低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BL);

氟盐高温熔池(P1)的出口与高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BH)中的第一高温换热器(HX1)热侧入口连接,第一高温换热器(HX1)热侧出口与第一循环泵(U1)入口连接,第一循环泵(U1)出口与氟盐低温熔池(P2)入口连接,氟盐高温熔池(P1)的第一入口与氟盐堆(R1)的冷却剂出口连接,氟盐堆(R1)的冷却剂入口与第二循环泵(U2)的出口连接,第二循环泵(U2)的入口与氟盐低温熔池(P2)的第一出口连接,氟盐高温熔池(P1)的第二入口与光热塔(T)中的光热塔氟盐高温熔池(TH)出口连接,光热塔氟盐高温熔池(TH)的入口与第三循环泵(U3)的出口连接,第三循环泵(U3)的入口与氟盐低温熔池(P2)的第二出口连接;

硝酸盐高温熔池(P3)的出口与低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BL)中的第二高温换热器(HX2)热侧入口连接,第二高温换热器(HX2)热侧出口与第四循环泵(U4)入口连接,第四循环泵(U4)出口与硝酸盐低温熔池(P4)入口连接,硝酸盐高温熔池(P3)的第一入口与铅基堆(R2)的冷却剂出口连接,铅基堆(R2)的冷却剂入口与第五循环泵(U5)的出口连接,第五循环泵(U5)的入口与硝酸盐低温熔池(P4)的第一出口连接,硝酸盐高温熔池(P3)的第二入口与钠冷快堆(R3)的冷却剂出口连接,钠冷快堆(R3)的冷却剂入口与第六循环泵(U6)的出口连接,第六循环泵(U6)的入口与硝酸盐低温熔池(P4)的第二出口连接,硝酸盐高温熔池(P3)的第三入口与光热塔(T)中的光热塔硝酸低温熔池(TL)出口连接,光热塔硝酸低温熔池(TL)的入口与第七循环泵(U7)的出口连接,第七循环泵(U7)的入口与硝酸盐低温熔池(P4)的第三出口连接;

氟盐高温熔池(P1)的第二出口与氟盐高温工艺热接口(H1)连接,氟盐低温熔池(P2)的第三出口与氟盐低温工艺热接口(H2)连接,硝酸盐高温熔池(P3)的第二出口与硝酸盐高温工艺热接口(H3)连接,硝酸盐低温熔池(P4)的第四出口与硝酸盐低温工艺热接口(H4)连接;

高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BH)内部包括第一高温换热器(HX1),第一中温换热器(MX1)、第一低温换热器(LX1)、第一冷却器(C1)、第一主压缩机(MC1)、第一辅压缩机(RC1)、第一透平(HT1)、第一分流装置(S1)和第一合流装置(M1),第一高温换热器(HX1)冷侧出口与第一透平(HT1)入口连接,第一透平(HT1)出口与第一中温换热器(MX1)热侧入口连接,第一中温换热器(MX1)热侧出口与第一低温换热器(LX1)热侧入口连接,第一低温换热器(LX1)热侧出口与第一分流装置(S1)入口连接,第一分流装置(S1)第一出口与第一冷却器(C1)入口连接,第一冷却器(C1)出口与第一主压缩机(MC1)入口连接,第一主压缩机(MC1)出口与第一低温换热器(LX1)冷侧入口连接,第一低温换热器(LX1)冷侧出口与第一合流装置(M1)的第一入口连接,第一分流装置(S1)第二出口与第一辅压缩机(RC1)入口连接,第一辅压缩机(RC1)出口与第一合流装置(M1)的第二入口连接,第一合流装置(M1)

出口与第一中温换热器(MX1)冷侧入口连接,第一中温换热器(MX1)冷侧出口与第一高温换热器(HX1)冷侧入口连接;

低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BL)内部包括第二高温换热器(HX2),第二中温换热器(MX2)、第二低温换热器(LX2)、第二冷却器(C2)、第二主压缩机(MC2)、第二辅压缩机(RC2)、第二透平(HT2)、第二分流装置(S2)和第二合流装置(M2),第二高温换热器(HX2)冷侧出口与第二透平(HT2)入口连接,第二透平(HT2)出口与第二中温换热器(MX2)热侧入口连接,第二中温换热器(MX2)热侧出口与第二低温换热器(LX2)热侧入口连接,第二低温换热器(LX2)热侧出口与第二分流装置(S2)入口连接,第二分流装置(S2)第一出口与第二冷却器(C2)入口连接,第二冷却器(C2)出口与第二主压缩机(MC2)入口连接,第二主压缩机(MC2)出口与第二低温换热器(LX2)冷侧入口连接,第二低温换热器(LX2)冷侧出口与第二合流装置(M2)的第一入口连接,第二分流装置(S2)第二出口与第二辅压缩机(RC2)入口连接,第二辅压缩机(RC2)出口与第二合流装置(M2)的第二入口连接,第二合流装置(M2)出口与第二中温换热器(MX2)冷侧入口连接,第二中温换热器(MX2)冷侧出口与第二高温换热器(HX2)冷侧入口连接。

2. 根据权利要求1所述的耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,其特征在于:以FLiNaK盐作为工质的设备有:氟盐高温熔池(P1)、氟盐高温工艺热接口(H1)、氟盐低温熔池(P2)、氟盐低温工艺热接口(H2)、第一循环泵(U1)、第二循环泵(U2)、第三循环泵(U3)、氟盐堆(R1)堆外冷却剂、光热塔氟盐高温熔池(TH)、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BH)的第一高温换热器(HX1)热侧。

3. 根据权利要求1所述的耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,其特征在于:以KNO<sub>3</sub>+NaNO<sub>3</sub>盐作为工质的设备有:硝酸盐高温熔池(P3)、硝酸盐高温工艺热接口(H3)、硝酸盐低温熔池(P4)、硝酸盐低温工艺热接口(H4)、第四循环泵(U4)、第五循环泵(U5)、第六循环泵(U6)、第七循环泵(U7)、铅基堆(R2)堆外冷却剂、钠冷快堆(R3)堆外冷却剂、光热塔硝酸低温熔池(TL)、低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统(BL)第二高温换热器(HX2)热侧。

4. 根据权利要求1所述的耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,其特征在于:以超临界二氧化碳作为工质的设备有:第一高温换热器(HX1)冷侧,第一中温换热器(MX1)、第一低温换热器(LX1)、第一冷却器(C1)、第一主压缩机(MC1)、第一辅压缩机(RC1)、第一透平(HT1)、第一分流装置(S1)、第一合流装置(M1)、第二高温换热器(HX2)冷侧,第二中温换热器(MX2)、第二低温换热器(LX2)、第二冷却器(C2)、第二主压缩机(MC2)、第二辅压缩机(RC2)、第二透平(HT2)、第二分流装置(S2)、第二合流装置(M2)。

5. 根据权利要求1所述的耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,其特征在于:氟盐高温工艺热接口(H1)输出的工艺热温度为700℃、氟盐低温工艺热接口(H2)输出的工艺热温度为650℃、硝酸盐高温工艺热接口(H3)输出的工艺热温度为500℃、硝酸盐低温工艺热接口(H4)输出的工艺热温度为400℃,各类工艺热温度数值有正负25℃的偏差。

## 耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于核能开发与新能源技术领域,具体涉及一种耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统。

### 背景技术

[0002] 氟盐冷却高温堆具有高温低压、无水冷却、固有安全和结构紧凑等优点,可以实现在偏远、干旱地区高效发电,同时可输出700℃以上的高温工艺热。然而熔盐的凝固点较高,通常大于450℃,且氟盐堆的堆芯入口温度较高,通常大于600℃,这意味着用氟盐堆提供低于600℃的高温工艺热将必须使工质降温,带来不可逆损失。钠冷快堆和铅基堆具有固有安全的特点,通常可实现400-500℃的运行温度,且能够进行燃料增殖,但其堆芯出口温度偏低,热效率要低于氟盐堆系统。此外,考虑到我国西部地区丰富的光热资源但不稳定,不能够完全的作为基准负荷。因此亟需提高光热系统稳定性、提高反应堆系统热效率和综合利用能力。综上,研发基于液态金属堆与氟盐堆的光热核储综合能源系统,既能够完成西部地区能量生产、西电东送和储能的需求,也能充分利用可再生的光热能源并推动相关工艺热的技术部署,有助于推动我国反应堆、光热和储能市场和技术的积累和联合发展。

### 发明内容

[0003] 为了克服上述现有技术存在的问题,本发明的目的在于提供一种耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,在充分利用太阳光照的前提下,通过改变光热塔内部循环盐的流量来控制不同温度,能够将400-700℃的高温工艺热串联为一套整体的工业设备,充分利用各个温度层级的热量以实现多能利用,减少不可逆损失。

[0004] 为了达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0005] 耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统,包括氟盐高温熔池P1、氟盐高温工艺热接口H1、氟盐低温熔池P2、氟盐低温工艺热接口H2、硝酸盐高温熔池P3、硝酸盐高温工艺热接口H3、硝酸盐低温熔池P4、硝酸盐低温工艺热接口H4、第一循环泵U1、第二循环泵U2、第三循环泵U3、第四循环泵U4、第五循环泵U5、第六循环泵U6、第七循环泵U7、氟盐堆R1、铅基堆R2、钠冷快堆R3、光热塔T、光热塔氟盐高温熔池TH、光热塔硝酸低温熔池TL、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH和低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL;

[0006] 氟盐高温熔池P1的出口与高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH中的第一高温换热器HX1热侧入口连接,第一高温换热器HX1热侧出口与第一循环泵U1入口连接,第一循环泵U1出口与氟盐低温熔池P2入口连接,氟盐高温熔池P1的第一入口与氟盐堆R1的冷却剂出口连接,氟盐堆R1的冷却剂入口与第二循环泵U2的出口连接,第二循环泵U2的入口与氟盐低温熔池P2的第一出口连接,氟盐高温熔池P1的第二入口与光热塔T中的光热塔氟盐高温熔池TH出口连接,光热塔氟盐高温熔池TH的入口与第三循环泵U3的出口连接,第三循环泵U3的入口与氟盐低温熔池P2的第二出口连接;

[0007] 硝酸盐高温熔池P3的出口与低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL中的第

二高温换热器HX2热侧入口连接,第二高温换热器HX2热侧出口与第四循环泵U4入口连接,第四循环泵U4出口与硝酸盐低温熔池P4入口连接,硝酸盐高温熔池P3的第一入口与铅基堆R2的冷却剂出口连接,铅基堆R2的冷却剂入口与第五循环泵U5的出口连接,第五循环泵U5的入口与硝酸盐低温熔池P4的第一出口连接,硝酸盐高温熔池P3的第二入口与钠冷快堆R3的冷却剂出口连接,钠冷快堆R3的冷却剂入口与第六循环泵U6的出口连接,第六循环泵U6的入口与硝酸盐低温熔池P4的第二出口连接,硝酸盐高温熔池P3的第三入口与光热塔T中的光热塔硝酸低温熔池TL出口连接,光热塔硝酸低温熔池TL的入口与第七循环泵U7的出口连接,第七循环泵U7的入口与硝酸盐低温熔池P4的第三出口连接;

[0008] 氟盐高温熔池P1的第二出口与氟盐高温工艺热接口H1连接,氟盐低温熔池P2的第三出口与氟盐低温工艺热接口H2连接,硝酸盐高温熔池P3的第二出口与硝酸盐高温工艺热接口H3连接,硝酸盐低温熔池P4的第四出口与硝酸盐低温工艺热接口H4连接;

[0009] 高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH内部包括第一高温换热器HX1,第一中温换热器MX1、第一低温换热器LX1、第一冷却器C1、第一主压缩机MC1、第一辅压缩机RC1、第一透平HT1、第一分流装置S1和第一合流装置M1,第一高温换热器HX1冷侧出口与第一透平HT1入口连接,第一透平HT1出口与第一中温换热器MX1热侧入口连接,第一中温换热器MX1热侧出口与第一低温换热器LX1热侧入口连接,第一低温换热器LX1热侧出口与第一分流装置S1入口连接,第一分流装置S1第一出口与第一冷却器C1入口连接,第一冷却器C1出口与第一主压缩机MC1入口连接,第一主压缩机MC1出口与第一低温换热器LX1冷侧入口连接,第一低温换热器LX1冷侧出口与第一合流装置M1的第一入口连接,第一分流装置S1第二出口与第一辅压缩机RC1入口连接,第一辅压缩机RC1出口与第一合流装置M1的第二入口连接,第一合流装置M1出口与第一中温换热器MX1冷侧入口连接,第一中温换热器MX1冷侧出口与第一高温换热器HX1冷侧入口连接;

[0010] 低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL内部包括第二高温换热器HX2,第二中温换热器MX2、第二低温换热器LX2、第二冷却器C2、第二主压缩机MC2、第二辅压缩机RC2、第二透平HT2、第二分流装置S2和第二合流装置M2,第二高温换热器HX2冷侧出口与第二透平HT2入口连接,第二透平HT2出口与第二中温换热器MX2热侧入口连接,第二中温换热器MX2热侧出口与第二低温换热器LX2热侧入口连接,第二低温换热器LX2热侧出口与第二分流装置S2入口连接,第二分流装置S2第一出口与第二冷却器C2入口连接,第二冷却器C2出口与第二主压缩机MC2入口连接,第二主压缩机MC2出口与第二低温换热器LX2冷侧入口连接,第二低温换热器LX2冷侧出口与第二合流装置M2的第一入口连接,第二分流装置S2第二出口与第二辅压缩机RC2入口连接,第二辅压缩机RC2出口与第二合流装置M2的第二入口连接,第二合流装置M2出口与第二中温换热器MX2冷侧入口连接,第二中温换热器MX2冷侧出口与第二高温换热器HX2冷侧入口连接。

[0011] 以FLiNaK盐作为工质的设备有:氟盐高温熔池P1、氟盐高温工艺热接口H1、氟盐低温熔池P2、氟盐低温工艺热接口H2、第一循环泵U1、第二循环泵U2、第三循环泵U3、氟盐堆R1堆外冷却剂、光热塔氟盐高温熔池TH、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH的第一高温换热器HX1热侧。

[0012] 以 $\text{KNO}_3+\text{NaNO}_3$ 盐作为工质的设备有:硝酸盐高温熔池P3、硝酸盐高温工艺热接口H3、硝酸盐低温熔池P4、硝酸盐低温工艺热接口H4、第四循环泵U4、第五循环泵U5、第六循环

泵U6、第七循环泵U7、铅基堆R2堆外冷却剂、钠冷快堆R3堆外冷却剂、光热塔硝酸低温熔池TL、低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL第二高温换热器HX2热侧。

[0013] 以超临界二氧化碳作为工质的设备有：第一高温换热器HX1冷侧，第一中温换热器MX1、第一低温换热器LX1、第一冷却器C1、第一主压缩机MC1、第一辅压缩机RC1、第一透平HT1、第一分流装置S1、第一合流装置M1、第二高温换热器HX2冷侧，第二中温换热器MX2、第二低温换热器LX2、第二冷却器C2、第二主压缩机MC2、第二辅压缩机RC2、第二透平HT2、第二分流装置S2、第二合流装置M2。

[0014] 氟盐高温工艺热接口H1输出的工艺热温度为700℃、氟盐低温工艺热接口H2输出的工艺热温度为650℃、硝酸盐高温工艺热接口H3输出的工艺热温度为500℃、硝酸盐低温工艺热接口H4输出的工艺热温度为400℃，各类工艺热温度数值可以有正负25℃的偏差。

[0015] 和现有技术相比较，本发明具备如下优点：

[0016] 多温度梯级利用：本发明充分利用了氟盐堆650-700℃的工艺热、钠冷快堆和铅基堆400-500℃的工艺热，而光热塔可以通过改变内部循环盐的流量，来适应不同温度。该温度区间内可实现的工业流程包括但不限于铜氯循环热化学制氢、裂化、制甲醇、造纸、盐水淡化和工业供热，有助于推动我国反应堆、光热和储能市场的技术积累和联合发展。

[0017] 负荷稳定性和核安全性好：FLiNaK盐和KNO<sub>3</sub>+NaNO<sub>3</sub>盐的体积热容分别约为4000和2800千焦/立方米，大型池式结构带来较好的热惯性和温度稳定性。当电网需求端负荷改变时，依靠超临界二氧化碳动力循环的快速响应，能够及时地反映在热端换热器功率变化上，此时通过调节第一循环泵和第四循环泵的流量能够实现快速的功率匹配。在流量改变后由于熔池的大体积热容，温度并不会立刻发生变化，反应堆有足够的响应时间去调节功率以稳定堆芯出入口温度。因此本发明兼顾了负荷稳定性和反应堆的安全性。

[0018] 充分利用光热能源：与单纯的光热能源装置相比，本发明不干扰光热能源的能量输入，光热塔始终以最大可用功率输入，通过熔池的缓冲和反应堆的延迟功率调节来稳定输出功率，能够做到光热能源的充分利用，提高经济性。

[0019] 模块化：本发明的熔盐池、光热塔、反应堆和动力循环系统均可以模块化建造、运输和安装，温度区间和投入的反应堆数量也可以根据不同地区需求来做调整，具有较好的灵活性。

[0020] 燃料循环封闭：利用本发明的快中子堆中的增殖技术，能够为高温氟盐堆提供新的裂变燃料，有助于燃料循环的封闭。

## 附图说明

[0021] 图1是耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统示意图。

## 具体实施方式

[0022] 下面结合附图和实施例对本发明作详细的说明：

[0023] 如图1所示，耦合液态金属堆与熔盐堆的光热核储综合能源系统，包括氟盐高温熔池P1、氟盐高温工艺热接口H1、氟盐低温熔池P2、氟盐低温工艺热接口H2、硝酸盐高温熔池P3、硝酸盐高温工艺热接口H3、硝酸盐低温熔池P4、硝酸盐低温工艺热接口H4、第一循环泵U1、第二循环泵U2、第三循环泵U3、第四循环泵U4、第五循环泵U5、第六循环泵U6、第七循环

泵U7、氟盐堆R1、铅基堆R2、钠冷快堆R3、光热塔T、光热塔氟盐高温熔池TH、光热塔硝酸低温熔池TL、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH和低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL；

[0024] 氟盐高温熔池P1的出口与高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH中的第一高温换热器HX1热侧入口连接,第一高温换热器HX1热侧出口与第一循环泵U1入口连接,第一循环泵U1出口与氟盐低温熔池P2入口连接,氟盐高温熔池P1的第一入口与氟盐堆R1的冷却剂出口连接,氟盐堆R1的冷却剂入口与第二循环泵U2的出口连接,第二循环泵U2的入口与氟盐低温熔池P2的第一出口连接,氟盐高温熔池P1的第二入口与光热塔T中的光热塔氟盐高温熔池TH出口连接,光热塔氟盐高温熔池TH的入口与第三循环泵U3的出口连接,第三循环泵U3的入口与氟盐低温熔池P2的第二出口连接;

[0025] 硝酸盐高温熔池P3的出口与低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL中的第二高温换热器HX2热侧入口连接,第二高温换热器HX2热侧出口与第四循环泵U4入口连接,第四循环泵U4出口与硝酸盐低温熔池P4入口连接,硝酸盐高温熔池P3的第一入口与铅基堆R2的冷却剂出口连接,铅基堆R2的冷却剂入口与第五循环泵U5的出口连接,第五循环泵U5的入口与硝酸盐低温熔池P4的第一出口连接,硝酸盐高温熔池P3的第二入口与钠冷快堆R3的冷却剂出口连接,钠冷快堆R3的冷却剂入口与第六循环泵U6的出口连接,第六循环泵U6的入口与硝酸盐低温熔池P4的第二出口连接,硝酸盐高温熔池P3的第三入口与光热塔T中的光热塔硝酸低温熔池TL出口连接,光热塔硝酸低温熔池TL的入口与第七循环泵U7的出口连接,第七循环泵U7的入口与硝酸盐低温熔池P4的第三出口连接;

[0026] 氟盐高温熔池P1的第二出口与氟盐高温工艺热接口H1连接,氟盐低温熔池P2的第三出口与氟盐低温工艺热接口H2连接,硝酸盐高温熔池P3的第二出口与硝酸盐高温工艺热接口H3连接,硝酸盐低温熔池P4的第四出口与硝酸盐低温工艺热接口H4连接;

[0027] 高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH内部包括第一高温换热器HX1,第一中温换热器MX1、第一低温换热器LX1、第一冷却器C1、第一主压缩机MC1、第一辅压缩机RC1、第一透平HT1、第一分流装置S1、第一合流装置M1,第一高温换热器HX1冷侧出口与第一透平HT1入口连接,第一透平HT1出口与第一中温换热器MX1热侧入口连接,第一中温换热器MX1热侧出口与第一低温换热器LX1热侧入口连接,第一低温换热器LX1热侧出口与第一分流装置S1入口连接,第一分流装置S1第一出口与第一冷却器C1入口连接,第一冷却器C1出口与第一主压缩机MC1入口连接,第一主压缩机MC1出口与第一低温换热器LX1冷侧入口连接,第一低温换热器LX1冷侧出口与第一合流装置M1的第一入口连接,第一分流装置S1第二出口与第一辅压缩机RC1入口连接,第一辅压缩机RC1出口与第一合流装置M1的第二入口连接,第一合流装置M1出口与第一中温换热器MX1冷侧入口连接,第一中温换热器MX1冷侧出口与第一高温换热器HX1冷侧入口连接;

[0028] 低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL内部包括第二高温换热器HX2,第二中温换热器MX2、第二低温换热器LX2、第二冷却器C2、第二主压缩机MC2、第二辅压缩机RC2、第二透平HT2、第二分流装置S2、第二合流装置M2,第二高温换热器HX2冷侧出口与第二透平HT2入口连接,第二透平HT2出口与第二中温换热器MX2热侧入口连接,第二中温换热器MX2热侧出口与第二低温换热器LX2热侧入口连接,第二低温换热器LX2热侧出口与第二分流装置S2入口连接,第二分流装置S2第一出口与第二冷却器C2入口连接,第二冷却器C2出口与

第二主压缩机MC2入口连接,第二主压缩机MC2出口与第二低温换热器LX2冷侧入口连接,第二低温换热器LX2冷侧出口与第二合流装置M2的第一入口连接,第二分流装置S2第二出口与第二辅压缩机RC2入口连接,第二辅压缩机RC2出口与第二合流装置M2的第二入口连接,第二合流装置M2出口与第二中温换热器MX2冷侧入口连接,第二中温换热器MX2冷侧出口与第二高温换热器HX2冷侧入口连接。

[0029] 以FLiNaK盐作为工质的设备有:氟盐高温熔池P1、氟盐高温工艺热接口H1、氟盐低温熔池P2、氟盐低温工艺热接口H2、第一循环泵U1、第二循环泵U2、第三循环泵U3、氟盐堆R1堆外冷却剂、光热塔氟盐高温熔池TH、高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH的第一高温换热器HX1热侧。

[0030] 以 $\text{KN}\text{O}_3+\text{NaNO}_3$ 盐作为工质的设备有:硝酸盐高温熔池P3、硝酸盐高温工艺热接口H3、硝酸盐低温熔池P4、硝酸盐低温工艺热接口H4、第四循环泵U4、第五循环泵U5、第六循环泵U6、第七循环泵U7、铅基堆R2堆外冷却剂、钠冷快堆R3堆外冷却剂、光热塔硝酸低温熔池TL、低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL第二高温换热器HX2热侧。

[0031] 以超临界二氧化碳作为工质的设备有:第一高温换热器HX1冷侧,第一中温换热器MX1、第一低温换热器LX1、第一冷却器C1、第一主压缩机MC1、第一辅压缩机RC1、第一透平HT1、第一分流装置S1、第一合流装置M1、第二高温换热器HX2冷侧,第二中温换热器MX2、第二低温换热器LX2、第二冷却器C2、第二主压缩机MC2、第二辅压缩机RC2、第二透平HT2、第二分流装置S2、第二合流装置M2。

[0032] 氟盐高温工艺热接口H1输出的工艺热温度为 $700^\circ\text{C}$ 、氟盐低温工艺热接口H2输出的工艺热温度为 $650^\circ\text{C}$ 、硝酸盐高温工艺热接口H3输出的工艺热温度为 $500^\circ\text{C}$ 、硝酸盐低温工艺热接口H4输出的工艺热温度为 $400^\circ\text{C}$ ,各类工艺热温度数值可以有正负 $25^\circ\text{C}$ 的偏差。其中, $650-700^\circ\text{C}$ 工艺热接口可用于热化学制氢, $400-500^\circ\text{C}$ 工艺热接口可用于盐水淡化、脱硫、造纸和工业供热等。

[0033] 本发明系统的工作过程如下:氟盐高温熔池P1的出口高温盐进入与高温超临界二氧化碳动力循环系统BH中的第一高温换热器HX1热侧入口,放热后经第一高温换热器HX1热侧出口进入第一循环泵U1入口升压,随后回到氟盐低温熔池P2入口。氟盐堆R1与光热塔氟盐高温熔池TH并联,向氟盐高温熔池P1和氟盐低温熔池P2提供熔盐循环。硝酸盐高温熔池P3的出口高温盐进入低温超临界二氧化碳动力循环系统BL中的第二高温换热器HX2热侧入口,放热后经第二高温换热器HX2热侧出口进入第四循环泵U4入口升压,随后回到硝酸盐低温熔池P4入口。铅基堆R2、钠冷快堆R3与光热塔硝酸低温熔池TL并联,向硝酸盐高温熔池P3和硝酸盐低温熔池P4提供熔盐循环。高温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BH和低温超临界二氧化碳布雷顿动力循环系统BL为常规的再压缩循环配置。

[0034] 系统设置有温度流量传感器,通过自适应控制逻辑调节各部位流量变化以适应功率波动、控制温度稳定。当电网需求端负荷改变时,依靠超临界二氧化碳动力循环的快速响应,能够及时地反映在热端换热器功率变化上,此时通过调节第一循环泵和第四循环泵的流量能够实现快速的功率匹配。在流量改变后由于熔池的大体积热容,温度并不会立刻发生变化,反应堆有足够的响应时间去调节功率和第二、五和六循环泵的流量,以稳定堆芯出入口温度。

[0035] 本发明以反应堆和光热塔作为热源,氟盐和硝酸盐储能系统作为中间输热系统,

提供四种温度的工艺热接口,并起到适应需求功率变化,减缓反应堆调节速率、维持反应堆冷却剂温度平衡的作用,超临界二氧化碳动力循环系统用于实现热动转换;本发明充分利用了稳定的核能和清洁的光热能源,提供了高效率的布雷顿循环能量转换系统方案,并为700℃以下的各类高温工艺热提供了相应的温度接口:包括但不限于热化学制氢、裂化、制甲醇、造纸、盐水淡化和工业供热,有助于推动我国反应堆、光热和储能技术的积累和联合发展。

[0036] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施方式仅限于此,对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干简单的推演或替换,都应当视为属于本发明由所提交的权利要求书确定专利保护范围。

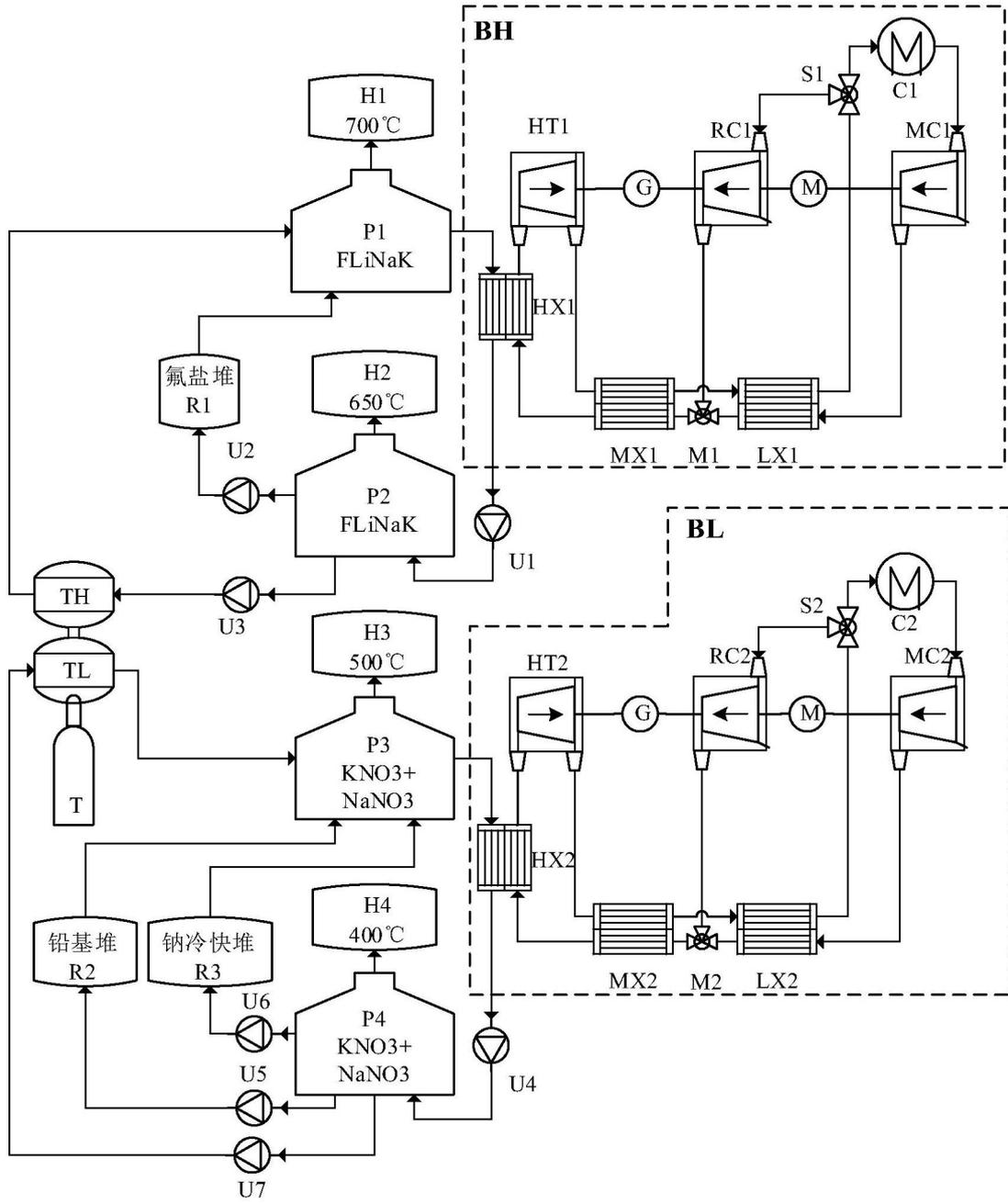


图1