(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 104653419 A
(43)申请公布日 2015.05.27

(21)申请号 201510067888.5

(22)申请日 2015.02.09

(71)申请人 南京瑞柯徕姆环保科技有限公司
地址 211103 江苏省南京市江宁区东麒路33号东山国际企业研发园A508室

(72)发明人 王海波 魏然

(51)Int.Cl.
F03G 6/06(2006.01)
F01D 15/10(2006.01)

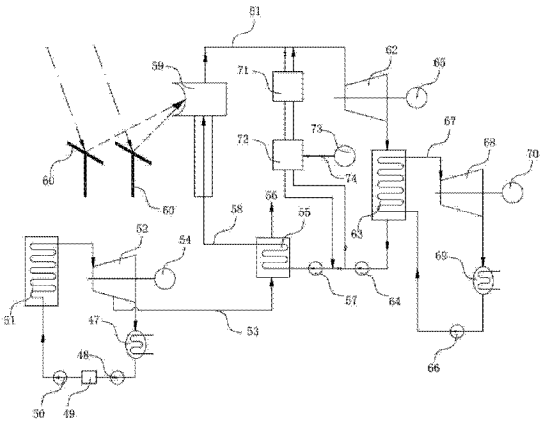
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统

(57)摘要

本发明涉及一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统，该方法保留超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统液体增压、闭式布列顿循环的优点，消除其系统压力过高、临界温度过低的缺点，采用高压端蒸汽朗肯循环的汽轮机抽汽作为塔式太阳能热发电系统中蒸汽发生器的热源、水蒸汽作为塔式太阳能热发电系统腔体式接收器的吸热工质，利用液态水不可压缩流体的特性、极好的传热性能特性，大幅度降低太阳能热发电中布列顿循环的工质增压功耗，底部朗肯循环用于吸收闭式布列顿循环释放出的热量，从而形成效率更高、经济性更好的抽汽型蒸汽朗肯－闭式布列顿－朗肯联合循环太阳能热发电系统。



CN 104653419 A

1. 一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法，其特征在于：

该方法采用水作为闭式布列顿循环的工质，经给水泵增压后送入蒸汽发生器，利用高压端蒸汽朗肯循环中高压汽轮机的抽汽作为蒸汽发生器的热源，加热水产生过热或饱和蒸汽，再送入塔式太阳能热发电系统的腔体式接收器吸热热量，产生高温的水蒸气，驱动水气轮机拖动水气轮机发电机发电，从而将太阳能转换为电能；水气轮机排出的蒸汽，经冷凝蒸发器冷凝成凝结水，再经给水泵增压后送入蒸汽发生器，从而形成闭式布列顿循环回路；

冷凝蒸发器释放出来的热量，用于加热底部朗肯循环的工质，产生过热或饱和的底部循环蒸汽，驱动汽轮机拖动汽轮发电机发电，从汽轮机排出的蒸汽经凝汽器凝结成液态的底部朗肯循环工质，再经循环泵增压后送入冷凝蒸发器，从而形成底部朗肯循环回路；所述的蒸汽发生器采用开式布列顿循环中燃气轮机的排气或其他工艺过程的热量作为热源加热水，产生饱和或过热的蒸汽；

所述的底部朗肯循环工质采用水、有机低沸点工质、无机低沸点工质，或有机和无机混合的低沸点工质；

所述的低沸点工质是指标准大气压下的沸点小于 -10℃的工质。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：

设有双级蓄热子系统，所述的双级蓄热子系统包括高温蓄热器、低温蓄热器：从腔体式接收器出来的高温水蒸气，经高温蓄热器将高温水蒸气的全部或部分显热储存起来，经过高温蓄热器储存显热后的水蒸气转化为饱和蒸汽或低过热度蒸汽，输送给低温蓄热器；低温蓄热器储存蒸汽的剩余显热和潜热，经低温蓄热器储存潜热后的饱和蒸汽转化为凝结水，经给水循环泵返回蒸汽发生器，再进入腔体式接收器；

所述的双级蓄热子系统在太阳辐射能量充足时储存热量，在太阳辐射能量不足时，从闭式布列顿循环的冷凝蒸发器出来的凝结水，经给水泵、低温蓄热器吸收热量转化为饱和蒸汽，再经高温蓄热器进一步加热转化成过热的水蒸气，进入水气轮机驱动水气轮机发电机发电；

所述的高温蓄热器中包含高温蓄热工质，该高温蓄热工质包括熔盐、金属蓄热材料或耐高温的混凝土蓄热材料；

所述的低温蓄热器中包含低温蓄热工质，该低温蓄热工质包括导热油、高压饱和水或相变工质。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于：

设有空气或氮气吹扫管路：吹扫风机送出的吹扫气体经低温蓄热器、高温蓄热器加热后，用于置换闭式布列顿循环系统的水蒸汽，从而消除水蒸汽冷凝造成的对闭式布列顿循环系统中的保温材料或金属材料性能的影响。

4. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：

所述的冷凝蒸发器的冷凝侧、蒸发侧的绝对压力均高于标准大气压，从而有效避免外界空气的漏入。

5. 一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电系统，该系统包括闭式布列顿循环及底部朗肯循环，其特征在于：

所述的闭式布列顿循环是指液态的水经给水泵 (64) 增压后，进入蒸汽发生器 (55) 吸收热量，产生饱和或过热的蒸汽 (58)，再送往腔体式接收器 (59)，利用太阳能定日镜场

(60)，将阳光聚集到固定在塔顶部的腔体式接收器 (59) 上，用以产生高温，加热蒸汽 (58)，产生的高温水蒸气 (61)，驱动水气轮机 (62) 拖动水气轮机发电机 (65) 发电，从而将太阳能转换为电能；所述的水气轮机 (62) 排出的蒸汽，经冷凝蒸发器 (63) 冷凝成凝结水；冷凝蒸发器 (63) 形成的凝结水再经给水泵 (64) 增压后送入蒸汽发生器 (55)，从而形成闭式布列顿循环过程；

所述的底部朗肯循环是指工质经循环泵 (66) 增压后，进入冷凝蒸发器 (63) 吸收水气轮机 (62) 排出的蒸汽热量，产生过热或饱和的底部循环蒸汽 (67)，驱动汽轮机 (68) 拖动汽轮发电机 (70) 发电，从汽轮机 (68) 排出的蒸汽经凝汽器 (69) 凝结成液态的底部朗肯循环工质，再进入循环泵 (66)，从而形成底部朗肯循环过程；

所述的底部朗肯循环工质采用水、有机低沸点工质、无机低沸点工质，或有机和无机混合的低沸点工质；

所述的低沸点工质是指标准大气压下的沸点小于 -10℃的工质。

6. 根据权利要求 5 所述的系统，其特征在于：

采用高压汽轮机 (52) 的抽汽 (53) 作为蒸汽发生器 (55) 的热源，加热闭式布列顿循环中的水产生饱和或过热蒸汽 (58)，汽轮机抽汽 (53) 形成冷凝水 (56)，返回高压端蒸汽朗肯循环的高压端凝汽器 (47) 或除氧器 (49)；

所述的高压端蒸汽朗肯循环是指从高压端凝汽器 (47) 出来的凝结水经凝结水泵 (48)、除氧器 (49)、高压给水泵 (50)、锅炉 (51)，产生高温高压的过热蒸汽，进入高压汽轮机 (52) 拖动高压轮机发电机 (54) 发电，从高压汽轮机 (52) 排出的乏汽经高压端凝汽器 (47) 冷凝形成凝结水，从而形成高压端蒸汽朗肯循环回路。

7. 根据权利要求 5 所述的系统，其特征在于：

设有双级蓄热子系统：

所述的双级蓄热子系统包括高温蓄热器 (71)、低温蓄热器 (72)；

从塔式太阳能系统腔体式接收器 (59) 出来的高温水蒸气 (61)，经高温蓄热器 (71) 将高温水蒸气 (61) 的全部或部分显热储存起来，经过高温蓄热器 (71) 储存显热后的水蒸气转化为饱和蒸汽或低过热度蒸汽，输送给低温蓄热器 (72)；低温蓄热器 (72) 储存蒸汽的剩余显热和潜热，经低温蓄热器 (72) 储存潜热后的饱和蒸汽转化为凝结水，经给水循环泵 (57) 返回蒸汽发生器 (55)，再进入腔体式接收器 (59)；

所述的双级蓄热子系统在太阳辐射能量充足时储存热量，在太阳辐射能量不足时，从闭式布列顿循环的冷凝蒸发器 (63) 出来的凝结水，经给水泵 (64)、低温蓄热器 (72) 吸收热量转化为饱和蒸汽，再经高温蓄热器 (71) 进一步加热转化成过热的水蒸气 (61)，进入水气轮机 (62) 驱动水气轮机发电机 (65) 发电。

8. 根据权利要求 7 所述的系统，其特征在于：

所述的高温蓄热器 (71) 中包含高温蓄热工质，该高温蓄热工质包括熔盐、金属蓄热材料或耐高温的混凝土蓄热材料；

所述的低温蓄热器 (72) 中包含低温蓄热工质，该低温蓄热工质包括导热油、高压饱和水或相变工质。

9. 根据权利要求 7 所述的系统，其特征在于：

设有空气或氮气吹扫管路：吹扫风机 (74) 送出的吹扫气体 (74) 经低温蓄热器 (72)、

高温蓄热器 (71) 加热后，用于置换闭式布列顿循环系统的水蒸汽，从而消除水蒸汽冷凝而造成的对闭式布列顿循环系统中的保温材料、金属材料性能的影响。

10. 根据权利要求 6 所述的系统，其特征在于 ：

所述闭式布列顿循环中的水气轮机 (62) 的进出气体压比范围为 4 ～ 16。

11. 根据权利要求 5 所述的系统，其特征在于 ：

所述的水蒸气 (61) 的工作温度范围为 700℃～ 1500℃。

闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种塔式太阳能聚焦热发电方法及系统，具体涉及一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统。

背景技术

[0002] 随着可再生能源利用在全世界的蓬勃发展，太阳能聚热发电（CSP）与光伏太阳能发电（PV）得到了较快的发展。利用太阳能光伏发电，只能使波长较短的光得到利用，波长较长的光完全浪费，且使电池的温度升高，导致电池的效率下降，而利用太阳能光热发电，可以充分利用整个波长的太阳光，因而太阳能聚热发电（CSP）逐步为人们所认识、研究和重视。太阳能聚热发电（CSP）相比光伏太阳能发电（PV）具有规模大、集中度高、效率高等突出特点，但是面临的共同问题是如何降低投资成本以及如何提高发电效率进而降低发电成本，尤其是降低投资成本和提高发电效率就成为两种太阳能发电技术竞争的焦点。

[0003] 太阳能聚热发电（CSP）主要有槽式、碟式及塔式等热发电模式，其中槽式太阳能聚热发电（CSP）已经实现商业化，美国SEGS电站以及西班牙AndaSol电站已经具有商业化运行的经验；该技术主要采用导热油为传热工质，经导热油换热后驱动常规蒸汽轮机带动发电机组发电。由于目前的导热油工作温度必须控制在400℃左右，超出这一温度将会导致导热油裂解、粘度提高以及传热效率降低等问题，因此限制了槽式太阳能聚热发电的工作温度及发电效率。

[0004] 碟式太阳能热发电系统以单个旋转抛物面反射镜为基础，构成一个完整的聚光、集热和发电单元。采用双轴跟踪装置，其聚光比一般在1000～3000之间。吸热器吸收太阳辐射并将其转换成热能，来加热吸热工质，驱动热机（如燃气轮机、斯特林发动机或其它类型透平等），实现光电转化。目前单个碟式系统的功率多为5～50kW，峰值发电效率可达29％，在太阳能热发电的各种方式中，其效率最高。碟式太阳能热发电系统主要应用于分散式动力系统，虽然可以将多个碟式装置组成一个较大的发电系统，但它们原则上仍然是小型系统，不易于大型化；同时目前还没有适合于碟式太阳能热发电系统的动力机械，其应用受到了一定的限制。碟式太阳能热发电系统相对其他方式，具有模块化的灵活部署能力、较高的聚光比和发电总效率等优点，其缺点是大型化聚热发电时，成本比同规模的塔式太阳能热发电系统高得多。

[0005] 塔式太阳能热发电系统，也称集中型太阳能热发电系统。太阳能塔式热发电系统的基本形式是利用独立跟踪太阳的定日镜群，将阳光聚集到固定在塔顶部的接收器上，用以产生高温，加热工质产生过热蒸汽或高温气体，驱动汽轮机发电机组或燃气轮机发电机组发电，从而将太阳能转换为电能。由许多定日镜组成的庞大的定日镜场，其面积非常大，聚光比很高，一个接收器可以收集100MW的辐射功率，运行温度可达到1000～1500℃。用以吸收太阳热能的热流体通常有水、熔盐、空气等。对应不同的热流体，塔式太阳能接收器的类型也不同：

（一）热流体为水（水蒸气）的系统

以水(水蒸气)作为热流体的塔式太阳能热发电系统,直接利用聚焦的太阳能加热类似电站锅炉的蒸汽发生设备。在此系统中,给水一次经过塔式太阳能接收器的预热、蒸发、过热等换热面后,成为朗肯循环汽轮机的做功工质,带动发电机发电;蒸汽轮机的排汽被送往凝汽器中凝结成水后,通过给水泵重新送往接收器中。为保证生产蒸汽的稳定性,常常设置蒸汽蓄热系统,在阳光充足的时候,将多余的蒸汽热量储存在蓄热罐中,从而保证系统运行参数的稳定。由于入射太阳辐射的瞬变特性和分布不均,布置于接收器中的吸热管经常发生泄漏。

[0006] 目前采用直接蒸汽生产方式的塔式太阳能热电站主要包括意大利 0.75MW 的 Eurelios 电站、西班牙 1.2MW 的 CESA-1 电站、美国 10MW 的 Solar One 电站、西班牙 11MW 的 PS10 电站等。

[0007] (二)热流体为熔盐的系统

为了避免直接蒸汽生产方式的塔式太阳能发电系统的接收器泄漏,同时为了获得更高的工作温度,可采用熔盐作为接收器中的吸热流体。使用熔盐作为热流体的塔式太阳能发电站有美国的 MSEE 电站及 Solar Two 电站、西班牙的 Solar TRES 电站等。Solar Two 是为了推进塔式太阳能发电系统商业化发展的一个实用性项目,为促进塔式 / 熔盐太阳能热发电技术的发展作出了重要贡献。

[0008] 但是熔盐也存在一定的缺点,即有高温分解和腐蚀问题,相关材料必须耐高温、耐腐蚀,使系统成本增加、可靠性降低;熔盐还有低温凝固问题,必须对相关设备进行保温、预热和伴热等,使系统的能耗增加。新型的结晶点在 100℃以下的熔盐研究值得关注,如美国桑迪亚实验室正在研究结晶点在 100℃以下的熔盐,如果成功将有希望取代导热油。

[0009] (三)热流体为空气的系统

以空气作为吸热介质的塔式太阳能发电系统,可达到更高的工作温度。接收器通常采用腔体式接收器。以空气作为吸热介质的塔式太阳能发电系统可以采用以下两种工作方式。

[0010] 一种工作方式是将接收器中产生的热空气应用于朗肯循环热电系统,如附图 2 所示。在该系统中,接收器周围的空气以及来自送风机的回流空气在接受器中吸收来自太阳能镜场的太阳辐射,被加热后的热空气送往热量回收蒸汽生产系统(Heat Recovery Steam Generating, HRSG),HRSG 中产生的蒸汽送往汽轮机中做功,带动发电机发电。热空气在 HRSG 中将热量传递给工质后,变成低温空气,然后被送风机重新送往塔顶的接收器中。这种系统的缺点是采用低压空气作为吸热介质,吸收器的体积庞大,且蒸汽朗肯循环发电机组的蒸汽温度受制于耐高温的材料,目前用于蒸汽朗肯循环的蒸汽温度还没有超过 625℃。其流程如附图 2 所示

另一种工作方式是将接收器中产生的热空气应用于布列顿 - 朗肯联合循环发电系统。可以直接将高压空气加热到 1000℃以上去推动燃气轮机,推动燃气轮机后的气体仍有较高温度,再通过热交换器加热水生成水蒸气,水蒸气再去推动汽轮机,有效利用热量。也可以把经过腔体式接收器加热后的高压空气直接送入燃烧室,进一步加热后进入燃气轮机发电,燃气轮机的排气进入底部朗肯循环进行发电。

[0011] 欧洲和以色列对采用空气作为吸热介质的塔式太阳能发电系统的换热技术及蓄热技术的研究较为关注,并开展了一些著名的研究项目,如 Phoebus-TSA、SOLAIR 和 DIAPR

等，取得了一定的研究成果。德国于 2009 年投运的 Jülich 电站，是一个试验验证电站，也是世界上第一个采用空气作为传热介质的塔式太阳能发电系统。电站的工作示意图如附图 3 所示。

[0012] 中国南京江宁开发区与以色列合作研发建成国内首座 70kw 塔式太阳能热发电示范工程，于 2005 年 10 月底成功并网发电，这是采用布雷顿循环原理建立的中国第一个塔式太阳能热发电站。该电站通过太阳能空腔式接收器以空气作传热工质，辅之以天然气和小型燃气轮机率先实现了利用太阳能和布雷顿循环技术结合的热发电装置，其塔式系统的塔高为 33 米，采用 32 台有效反射面积为 19.6 ㎡的定日镜，接收器的出口工作温度为 900℃，进口压力为 0.4MPa，测试峰值转换效率为 85%，燃气轮机热电效率为 28.5%。但由于腔式太阳能接收器入口太小，进气温度难于和燃气配套致使实验效果不太理想。但燃气轮机的极高的热电效率值得关注，显然解决匹配性问题后，将是极有应用前景的塔式太阳能热发电系统。 以色列和澳大利亚实施的“郁金香”小型塔式太阳能热发电试验项目实际是该技术的继续。目前，由中科院电工所在北京延庆县进行的 1MW 塔式太阳能发电项目正在试验中。

[0013] 集成式太阳能热发电系统包括太阳能辅助燃煤发电系统、集成式太阳能与燃气 - 蒸汽联合循环发电系统、太阳能光热利用与地热集成发电系统、太阳能和风能集成系统以及太阳能光热发电与光伏发电混合的集成发电系统等。太阳能辅助燃煤发电系统是将太阳能集热器与普通的燃煤电厂集成，利用太阳能加热给水或与锅炉的某一加热段并联来加热蒸汽，以减少相同数量电能生产时的耗煤量，其优点是投资省、发电系统稳定性好，缺点是受制于给水或蒸汽加热温度的限制，仍属太阳能的低品位利用。集成式太阳能与燃气 - 蒸汽联合循环发电系统主要包括太阳能整体联合循环系统、利用太阳能预热空气的集成系统、利用太阳能重整燃气的集成系统和利用太阳能实现煤气化的集成系统。中国专利 201120430468.6 太阳能和风能互补储能热发电装置、201120430469.0 太阳能和生物质气化互补储能热发电装置等提供了多种集成式太阳能热发电系统。

[0014] 程氏循环（Cheng Cycle）又称双工质燃气轮机循环或并联型联合循环，是由美籍华人程大酋博士于 1974 年提出的。程氏循环的热力系统如附图 4 所示，图中 :C- 压气机，B- 燃烧室，T- 燃气透平，HRSG- 余热锅炉。这种循环的性能既与由简单燃气轮机循环和简单蒸汽轮机循环叠置而成的余热锅炉型联合循环有很大差别，也与回热型燃气轮机循环有很大差别。与采用空气回热的燃气轮机循环相比，该循环的最大特点是削弱了对燃气轮机压比的限制。采用空气回热的燃气轮机的排气余热是由经过压气机压缩的空气来回收的，压气机出口空气的温度一定要低于透平排气的温度。这就限制了燃气轮机压比的提高。而在程氏循环中，燃气轮机的排气余热是采用温度很低的水来回收的，根本没有这样的限制。这一特点使得燃气轮机可以采用更高的压比，并可达到更高的效率。同时，由于液态水是一种比热大、不可压缩的流体，所以将液态水汽化产生的部分或全部蒸汽注入燃气轮机燃烧室，可以在多消耗极少量压缩功的前提下，大幅度提高燃气轮机的流量和功率，从而使燃气轮机获得更大的比功。另外，由于蒸汽注入燃烧室有利于降低火焰温度，所以氮氧化物排放量低 ；又由于含有水蒸气的烟气的传热系数高，所以其余热锅炉的换热效果好、效率高。以 GE 船用与工业公司的 LM2500-PH STIG 型程氏循环机组为例，其主要技术参数 :基本功率 28060kw，供电效率 41.02%，压比 20.2，空气流量 75.75kg/s，透平入口温度为 807.2℃，注入蒸汽 22680kg/h。注入的蒸汽与空气的质量比为 :22680/（75.75*3600）=8.32%，显然掺入

的蒸汽比例并不低。值得注意的是燃烧室的保温材料在烟气中有高含量的蒸汽时仍能安全运行。

[0015] 程氏循环的主要缺点是烟气中含有大量的水蒸气排入大气，需要大量补水，这不仅需要庞大的水处理设备，而且浪费水资源，一般来说，双工质燃气轮机循环的耗水量要比余热锅炉型联合循环多 38% 左右，回注蒸汽用水大约为 0.2 ～ 0.4kg/（kW·h）。由于这种机组有其特别适用的场合，所以国外已经将其商品化，并形成了系列产品。

[0016] 日本 Y.Mori 教授 1983 年提出的 HAT(Humid Air Turbine)循环，即湿空气透平循环。该循环与回热型燃气轮机循环很相似，所不同的是，HAT 循环在回热器之后增加了一个给水预热器，并在压气机和回热器之间增加了一个给水蒸发器。预热器利用温度很低的给水来吸收回热器排出的烟气的热量，来降低排烟温度，减少放热损失。蒸发器利用给水的蒸发来吸收高压空气的热量，以降低空气温度，增强回热效果。该过程中，有一定的给水变成了蒸汽，并与空气一起参与循环。给水量的大小受到一定限制，最大只能达到使高压空气成为饱和湿空气的程度。由于该循环的工作介质是湿空气，所以被称为湿空气透平循环。从本质上看，HAT 循环也是一种双工质、并联型的燃气轮机循环，具有程氏循环所具有的一些优点，缺点是也是浪费水资源。

[0017] 《燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置》一书（ISBN978-7-5083-5400-2，中国电力出版社，北京，2007，上册，P53）介绍了一种利用核能的闭式循环燃气轮机，采用氦气作为循环工质，既作为反应堆的冷却剂，又作为燃气轮机的工质，鉴于气冷反应堆能达到 700℃以上的高温，使循环能达到较高的效率。与开式循环相比，闭式循环的工质循环与周围空气无关，因而循环的最低工作压力可以高于或低于大气压力。为了减少透平机械通流部分的尺寸，往往把最低压力选成高于大气压力，例如取 0.4 ～ 0.6MPa，可见工质工作的压力水平要比开式循环的高得多，使其压气机和透平的尺寸比开式循环的小很多，把循环的工作压力选得高，还可以减少提及庞大的气体锅炉的尺寸，以减少整台机组的尺寸。另外机组在变工况下工作时，可采用改变工质的质量流量的办法，使机组效率随功率下降的变化平稳，即部分负荷下机组效率在很大的功率变化范围内基本不变。中国清华大学有该种闭式循环燃气轮机应用于高温气冷反应堆的报道。

[0018] 中国专利 201020168753.7、201210237402.6、201320792430.2、201310178790.8、201420007400.0 等公开了采用气体增压方式的闭式布列顿循环系统。

[0019] 美国专利 US7685820“超临界二氧化碳聚光太阳能发电系统装置”详述了通过熔盐换热并采用超临界二氧化碳气体作为动力工质的装置构造，该专利是在传统太阳能熔盐储热换热基础上将郎肯循环蒸汽热发电技术简单替换为超临界布雷顿循环动力发电，该专利的中国同族专利为 200710306179.3。但其也有一定的缺点：由于二氧化碳的临界温度较低、临界压力较高，分别为 31.05℃、7.53MPa，要确保对循环工质采用液体增压方式，布列顿循环的出口压力要控制在 1146psi（即 7.9MPa）左右，因此超临界二氧化碳聚光太阳能发电系统装置必须采用较高的运行压力、较低的冷凝温度，系统承受压力高。

[0020] 中国专利 201010277740.1 公开了一种带蓄热的超临界二氧化碳太阳能热发电系统，该专利推荐采用二氧化碳增压泵将液态二氧化碳增压到至少 100bar，布列顿循环中二氧化碳膨胀机的出口压力至少 80bar，通过闭式布列顿循环中的冷凝器将二氧化碳冷凝为液态二氧化碳，推荐的二氧化碳冷凝温度为≤ 26.85℃。显然在夏季室内温度较高时，冷凝

器的运行条件将极为苛刻。

[0021] 上述系统采用了布列顿热发电技术，其最突出的优点是系统热电转换效率高，主要采用空气、空气和水蒸气、氦气、二氧化碳气为动力工质，以及由燃油、燃气、核能、太阳能提供高温热能运行。很明显，布列顿热发电技术不仅在燃气发电、核电领域，而且在太阳能热发电领域也将会有很好的应用前景。但是，对于燃气轮机来说，压气机的耗功通常会占到燃机涡轮膨胀功的 1/2 ～ 2/3 左右(《燃气轮机湿压缩性能与水滴运动研究》，哈尔滨工程大学，博士论文，孙兰昕，2012 年 5 月)，因此如何降低压气机的功耗，这是开式或闭式布列顿循环系统值得研究的方向。

[0022] 目前国际太阳能聚热发电 (CSP) 领域采用用水直接做传热工质的 DSG 技术已经试验多年，由于该技术存在的主要问题是压力难以控制，以及水在集热管内传输和汽化等方面都存在很多困难，因此这一普遍被看好的技术仍停留在试验阶段。但是，只要这一问题被解决，那么 DSG 技术就是成本最低、效率最高的太阳能热发电技术。

[0023] 值得特别关注的是以空气作为吸热介质的塔式太阳能发电系统，该系统采用空气作为热载体。空气的热传导性能虽然不好，但它的工作温度范围大、操作简单、无毒性，不仅能和蒸汽驱动的汽轮机相连，还可以直接利用高温空气驱动燃气轮机，效率更高；在这种方案中，聚焦的光线被投射到一种透气材料(例如一种金属丝编织物)，空气从这种被加热的材料中通过，由于空气和这种集热材料的接触面很大，故传热很快，效率很高，而且可以把空气加热到 700℃以上的高温。显然，如采用水蒸气替代空气，从被聚焦光线加热的透气材料中通过，同样可以升高到 700℃以上的高温，直接驱动燃气轮机发电。

[0024] 塔式太阳能热发电系统因其聚光倍数高、能量集中过程简单、热转化效率高等优点，相比于其他聚热型太阳能热发电系统，更易于实现大功率的发电。

[0025] 因此如何解决上述现有技术存在的问题，充分发挥塔式太阳能聚光比高、温度高的优势，选择合适的塔式太阳能吸热工质，拓展程氏循环及 HAT 循环的优点，克服布列顿循环气体压缩功耗过高的缺点，建立效率更高的闭式布列顿循环发电模式，成为该领域研究的难点。

发明内容

[0026] 本发明是为解决现有技术存在的问题，提供一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统，选择水作为塔式太阳能吸热工质，利用液态水不可压缩流体的特性，大幅度降低吸热工质的增压功耗，拓展程氏循环及 HAT 循环的优点，达到建立效率更高、经济性更好的闭式布列顿发电模式的目的。

[0027] 本发明的目的是通过以下措施实现的：

一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统，其特征在于：

一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法，该方法采用水作为闭式布列顿循环的工质，经给水泵增压后送入蒸汽发生器，利用高压端蒸汽朗肯循环中高压汽轮机的抽汽作为蒸汽发生器的热源，加热水产生过热或饱和蒸汽，再送入塔式太阳能热发电系统的腔体式接收器吸热热量，产生高温的水蒸气，驱动水气轮机拖动水气轮机发电机发电，从而将从而将太阳能转换为电能；水气轮机排出的蒸汽，经冷凝蒸发器冷凝成凝结水，再经给水泵增压后送入蒸汽发生器，从而形成闭式布列顿循环回路；

冷凝蒸发器释放出来的热量，用于加热底部朗肯循环的工质，产生过热或饱和的底部朗肯循环蒸汽，驱动汽轮机拖动汽轮发电机发电，从汽轮机排出的蒸汽经凝汽器凝结成液态的底部朗肯循环工质，再经循环泵增压后送入冷凝蒸发器，从而形成底部朗肯循环过程；

所述的底部朗肯循环工质采用水、有机低沸点工质、无机低沸点工质，或有机和无机混合的低沸点工质。

[0028] 设有双级蓄热子系统，所述的双级蓄热子系统包括高温蓄热器、低温蓄热器：从塔式太阳能系统腔体式接收器出来的高温水蒸气，经高温蓄热器将高温水蒸气的全部或部分显热储存起来，经过高温蓄热器储存显热后的水蒸气转化为饱和蒸汽或低过热度蒸汽，输送给低温蓄热器；低温蓄热器储存蒸汽的剩余显热和潜热，经低温蓄热器储存潜热后的饱和蒸汽转化为凝结水，经给水循环泵返回蒸汽发生器，再进入塔式太阳能光热转换系统的腔体式接收器。

[0029] 所述的双级蓄热子系统在太阳辐射能量充足时储存热量，在太阳辐射能量不足时，从闭式布列顿循环的冷凝蒸发器出来的凝结水，经给水泵、低温蓄热器吸收热量转化为饱和蒸汽，再经高温蓄热器进一步加热转化成过热的水蒸气，进入水气轮机驱动水气轮机发电机发电。

[0030] 所述的高温蓄热器中包含高温蓄热工质，该高温蓄热工质包括但不限于为熔盐、金属蓄热材料或耐高温的混凝土蓄热材料。

[0031] 所述的低温蓄热器中包含低温蓄热工质，该低温蓄热工质包括但不限于为导热油、高压饱和水或相变工质。

[0032] 设有空气或氮气吹扫管路：吹扫风机送出的吹扫气体经低温蓄热器、高温蓄热器加热后，用于置换闭式布列顿循环系统的水蒸汽，从而消除水蒸汽冷凝而可能造成的对闭式布列顿循环系统中的保温材料等性能的影响。

[0033] 作为一种优选的方法，闭式布列顿循环中的冷凝蒸发器采用正压运行方式，从而有效避免外界空气的漏入。

[0034] 一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电系统，该系统包括高压端蒸汽朗肯循环、闭式布列顿循环及底部朗肯循环，其特征在于：

所述的高压端蒸汽朗肯循环是指从高压端凝汽器 47 出来的凝结水经凝结水泵 48、除氧器 49、高压给水泵 50、锅炉 51，产生高温高压的过热蒸汽，进入高压汽轮机 52 拖动高压轮机发电机 54 发电，从高压汽轮机 52 排出的乏汽经高压端凝汽器 47 冷凝形成凝结水，从而形成高压端蒸汽朗肯循环回路；

高压汽轮机 52 的抽汽 53 作为蒸汽发生器 55 的热源，加热闭式布列顿循环中的水产生饱和或过热蒸汽 58，汽轮机抽汽 53 形成冷凝水 56 返回高压端蒸汽朗肯循环系统的高压端凝汽器 47 或除氧器 49；

所述的闭式布列顿循环是指液态的水经给水泵 64 增压后，进入蒸汽发生器 55 吸收汽轮机抽汽 53 的热量，产生饱和或过热的蒸汽 58，再送往塔式太阳能腔体式接收器 59，利用独立跟踪太阳的太阳能定日镜场 60，将阳光聚集到固定在塔顶部的腔体式接收器 59 上，用以产生高温，加热蒸汽 58，产生的高温水蒸气 61，驱动水气轮机 62 拖动水气轮机发电机 65 发电，从而将太阳能转换为电能；所述的水气轮机 62 排出的蒸汽，经冷凝蒸发器 63 冷凝成

凝结水；冷凝蒸发器 63 形成的凝结水再经给水泵 64 增压后送入蒸汽发生器 55，从而形成闭式布列顿循环回路；

所述的底部朗肯循环是指底部朗肯循环工质经循环泵 66 增压后，进入冷凝蒸发器 63 吸收水气轮机 62 排出的蒸汽热量，产生过热或饱和的底部循环蒸汽 67，驱动汽轮机 68 拖动汽轮发电机 70 发电，从汽轮机 68 排出的蒸汽经凝汽器 69 凝结成液态的底部朗肯循环工质，再进入循环泵 66，从而形成底部朗肯循环回路；

所述的底部朗肯循环工质采用水、有机低沸点工质、无机低沸点工质，或有机和无机混合的低沸点工质；

所述的低沸点工质是指标准大气压下的沸点小于 -10℃的工质。

[0035] 作为一种优选，所述的水蒸气 61 的工作温度范围为 700℃～ 1500℃。

[0036] 作为另一种优选，所述的冷凝蒸发器 63 的冷凝侧、蒸发侧的绝对压力均高于标准大气压，从而有效避免外界空气的漏入。

[0037] 作为另一种优选，所述的闭式布列顿循环的给水经除盐、除氧后补入。

[0038] 作为另一种优选，所述的闭式布列顿循环系统设有必要的滤网设施。

[0039] 作为另一种优选，设有双级蓄热子系统，所述的双级蓄热子系统包括高温蓄热器 71、低温蓄热器 72：从塔式太阳能系统腔体式接收器 59 出来的高温水蒸气 61，经高温蓄热器 71 将高温水蒸气 61 的全部或部分显热储存起来，经过高温蓄热器 71 储存显热后的水蒸气转化为饱和蒸汽或低过热度蒸汽，输送给低温蓄热器 72；低温蓄热器 72 储存蒸汽的剩余显热和潜热，经低温蓄热器 72 储存潜热后的饱和蒸汽转化为凝结水，经给水循环泵 57 返回蒸汽发生器 55，再进入塔式太阳能光热转换系统的腔体式接收器 59。

[0040] 所述的双级蓄热子系统在太阳辐射能量充足时储存热量，在太阳辐射能量不足时，从闭式布列顿循环的冷凝蒸发器 63 出来的凝结水，经给水泵 64、低温蓄热器 72 吸收热量转化为饱和蒸汽，再经高温蓄热器 71 进一步加热转化成过热的水蒸气 61，进入水气轮机 62 驱动水气轮机发电机 65 发电。

[0041] 所述的高温蓄热器 71 中包含高温蓄热工质，该高温蓄热工质包括但不限于为熔盐、金属蓄热材料或耐高温的混凝土蓄热材料。

[0042] 所述的低温蓄热器 72 中包含低温蓄热工质，该低温蓄热工质包括但不限于为导热油、高压饱和水或相变工质。

[0043] 作为另一种优选，设有空气或氮气吹扫管路：吹扫风机 74 送出的吹扫气体 74 经低温蓄热器 72、高温蓄热器 71 加热后，用于置换闭式布列顿循环系统的水蒸汽，从而消除水蒸汽冷凝而可能造成的对闭式布列顿循环系统中的保温材料等性能的影响。

[0044] 作为另一种优选，闭式布列顿循环中的水气轮机的进出气体压比范围为 4 ～ 16，采用低压高温的运行方式，相比于超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统，有效降低了系统的承压能力要求，闭式布列顿系统的安全性和经济性有较大幅度的提高。

[0045] 本发明中未说明的设备及其备用系统、管道、仪表、阀门、保温、具有调节功能的旁路设施等采用公知的成熟技术进行配套。

[0046] 设有与本发明系统配套的安全、调控装置，采用现有太阳能热发电系统、蒸汽朗肯循环发电系统、程氏循环或燃气 - 蒸汽联合循环发电系统中的成熟调控技术进行配套，使闭式布列顿循环的太阳能热发电系统能经济、安全、高效率运行，达到节能降耗的目的。

[0047] 本发明相比现有技术具有如下优点：

1、保留超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统液体增压、闭式布列顿循环的优点，消除其系统压力过高、临界温度过低的缺点，采用高压端蒸汽朗肯循环的抽汽作为塔式太阳能热发电系统中蒸汽发生器的热源，选择水蒸汽作为塔式太阳能热发电系统的腔体式接收器的吸热工质，利用液态水不可压缩流体的特性、极好的传热性能特性，大幅度降低布列顿循环的工质增压功耗，拓展程氏循环为全部水蒸气的闭式布列顿循环，从而形成效率更高、经济性更好的布列顿循环发电新模式；

2、闭式布列顿循环采用正压运行方式，避免周围空气的漏入，简化了闭式布列顿循环的除氧要求，同时利用配套的底部朗肯循环有效回收闭式布列顿循环中释放出来的水蒸气的汽化潜热，消除了程氏循环耗水量大的缺点；

3、保留中科院工程热物理研究所塔式太阳能热发电双级蓄热技术的优点(ZL200710175970.5 带有双级蓄热的塔式太阳能热发电系统)，拓展其应用范围，将其应用于 700℃以上的全新的循环系统，消除了太阳能辐射不稳定、受天气变化及季节变化影响较大的缺点，保证系统运行参数的稳定；

4、联合循环系统的变工况运行调节能力强，机组在变工况下工作时，可采用改变高压端蒸汽朗肯循环的汽轮机抽汽的质量流量的办法或双级蓄热运行调节方式，使机组效率随功率下降的变化平稳，即部分负荷下机组效率在很大的功率变化范围内基本不变；

5、闭式布列顿循环中的水气轮机的进出气体压比范围为 4 ～ 16，采用低压高温的运行方式，水蒸气的工作温度为 700℃～ 1500℃，底部蒸汽朗肯循环采用有机工质朗肯循环或卡琳娜循环，利用中低温范围较水蒸汽朗肯循环效率高得多的优点，并结合与闭式布列顿循环配套的独有的吹扫系统，从而确保联合循环系统运行的安全性及经济性。

附图说明

[0048] 图 1 是本发明的一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统流程示意图；

图 1 中：47- 高压端凝汽器，48- 凝结水泵，49- 除氧器，50- 高压给水泵，51- 锅炉，52- 高压汽轮机，53- 汽轮机抽汽，54- 高压汽轮发电机，55- 蒸汽发生器，56- 冷凝水，57- 给水循环泵，58- 蒸汽，59- 腔体式接收器，60- 太阳能定日镜场，61- 水蒸气，62- 水气轮机，63- 冷凝蒸发器，64- 给水泵，65- 水气轮机发电机，66- 循环泵，67- 底部循环蒸汽，68- 汽轮机，69- 凝汽器，70- 汽轮发电机，71- 高温蓄热器，72- 低温蓄热器，73- 吹扫风机，74- 吹扫气体。

[0049] 图 2 是一种以空气为热流体的塔式太阳能热发电系统工作原理(发电系统采用朗肯循环)流程示意图。

[0050] 图 3 是一种以空气为热流体的塔式太阳能热发电系统工作原理(发电系统采用联合循环)流程示意图。

[0051] 图 4 是一种程氏循环热力系统流程示意图。

[0052] 图 5 是一种 HAT 循环热力系统流程示意图；

图 5 中：1- 低压压气机，2- 高压压气机，3- 燃气透平，4- 燃烧室，5- 回热器，6- 预热器，7- 蒸发器，8- 回水泵，9- 后冷器，10- 间冷器。

具体实施方式

[0053] 以下结合附图和具体实施例对本发明作进一步详细描述。

[0054] 实施例 1 ：

如图 1 所示，本发明的一种闭式布列顿型塔式太阳能热发电方法及系统流程示意图。该系统包括高压端蒸汽朗肯循环、闭式布列顿循环及底部朗肯循环。

[0055] 所述的高压端蒸汽朗肯循环是指从高压端凝汽器 47 出来的凝结水经凝结水泵 48、除氧器 49、高压给水泵 50、锅炉 51，产生高温高压的过热蒸汽，进入高压汽轮机 52 拖动高压轮机发电机 54 发电，从高压汽轮机 52 排出的乏汽经高压端凝汽器 47 冷凝形成凝结水，从而形成高压端蒸汽朗肯循环回路 ；高压汽轮机 52 的抽汽 53 作为蒸汽发生器 55 的热源，加热闭式布列顿循环中的水产生饱和或过热蒸汽 58，汽轮机抽汽 53 形成冷凝水 56 返回高压端蒸汽朗肯循环系统的高压端凝汽器 47 或除氧器 49 ；

所述的闭式布列顿循环是指液态的水经给水泵 64 增压后，进入蒸汽发生器 55 吸收燃气轮机 53 排出的高温烟气的热量，产生过热的蒸汽 58，再送往塔式太阳能腔体式接收器 59，利用独立跟踪太阳的太阳能定日镜场 60，将阳光聚集到固定在塔顶部的腔体式接收器 59 上，用以产生高温，加热蒸汽 58，产生 800℃的高温水蒸气 61，驱动水气轮机 62 拖动水气轮机发电机 65 发电，从而将太阳能转换为电能 ；所述的水气轮机 62 排出的蒸汽，经冷凝蒸发器 63 冷凝成凝结水 ；所述的冷凝蒸发器 63 的冷凝侧的绝对压力选用 0.4MPa，从而有效避免外界空气的漏入 ；冷凝蒸发器 63 形成的凝结水再经给水泵 64 增压后送入蒸汽发生器 55，从而形成闭式布列顿循环过程 ；

所述的底部朗肯循环采用有机朗肯循环，有机工质经循环泵 66 增压后，进入冷凝蒸发器 63 吸收水气轮机 62 排出的蒸汽热量，产生过热的底部循环蒸汽 67，驱动汽轮机 68 拖动汽轮发电机 70 发电，从汽轮机 68 排出的有机工质蒸汽经凝汽器 69 凝结成液态的有机工质，再进入循环泵 66，从而形成底部有机朗肯循环过程 ；

设有双级蓄热子系统，所述的双级蓄热子系统包括高温蓄热器 71、低温蓄热器 72 ；从塔式太阳能系统腔体式接收器 59 出来的高温水蒸气 61，经高温蓄热器 71 将高温水蒸气 61 的全部或部分显热储存起来，经过高温蓄热器 71 储存显热后的水蒸气转化为饱和蒸汽或低过热度蒸汽，输送给低温蓄热器 72 ；低温蓄热器 72 储存蒸汽的剩余显热和潜热，经低温蓄热器 72 储存潜热后的饱和蒸汽转化为凝结水，经给水循环泵 57 返回蒸汽发生器 55，再进入塔式太阳能光热转换系统的腔体式接收器 59。

[0056] 所述的双级蓄热子系统在太阳辐射能量充足时储存热量，在太阳辐射能量不足时，从闭式布列顿循环的冷凝蒸发器 63 出来的凝结水，经给水泵 64、低温蓄热器 72 吸收热量转化为饱和蒸汽，再经高温蓄热器 71 进一步加热转化成过热的水蒸气 61，进入水气轮机 62 驱动水气轮机发电机 65 发电。

[0057] 所述的高温蓄热器 71 选用耐高温的混凝土蓄热材料。所述的低温蓄热器 72 选用高压饱和水。

[0058] 设有空气或氮气吹扫管路 ：吹扫风机 74 送出的吹扫气体 74 经低温蓄热器 72、高温蓄热器 71 加热后，用于置换闭式布列顿循环系统的水蒸汽，从而消除水蒸汽冷凝而可能造成的对闭式布列顿循环系统中的保温材料等性能的影响。

[0059] 本发明中未说明的设备及其备用系统、管道、仪表、阀门、保温、具有调节功能的旁

路设施等采用公知的成熟技术进行配套。设有与本发明系统配套的安全、调控装置，采用现有太阳能热发电系统、蒸汽朗肯循环发电系统、程氏循环或燃气－蒸汽联合循环发电系统中的成熟调控技术进行配套，使闭式布列顿循环的太阳能热发电系统能经济、安全、高效率运行，达到节能降耗的目的。

[0060] 虽然本发明已以较佳实施例公开如上，但它们并不是用来限定本发明，任何熟悉本领域专业的技术人员，在不脱离本发明之精神和范围内，可作各种简单修改、等同变化，仍属于本发明技术方案的保护范围。

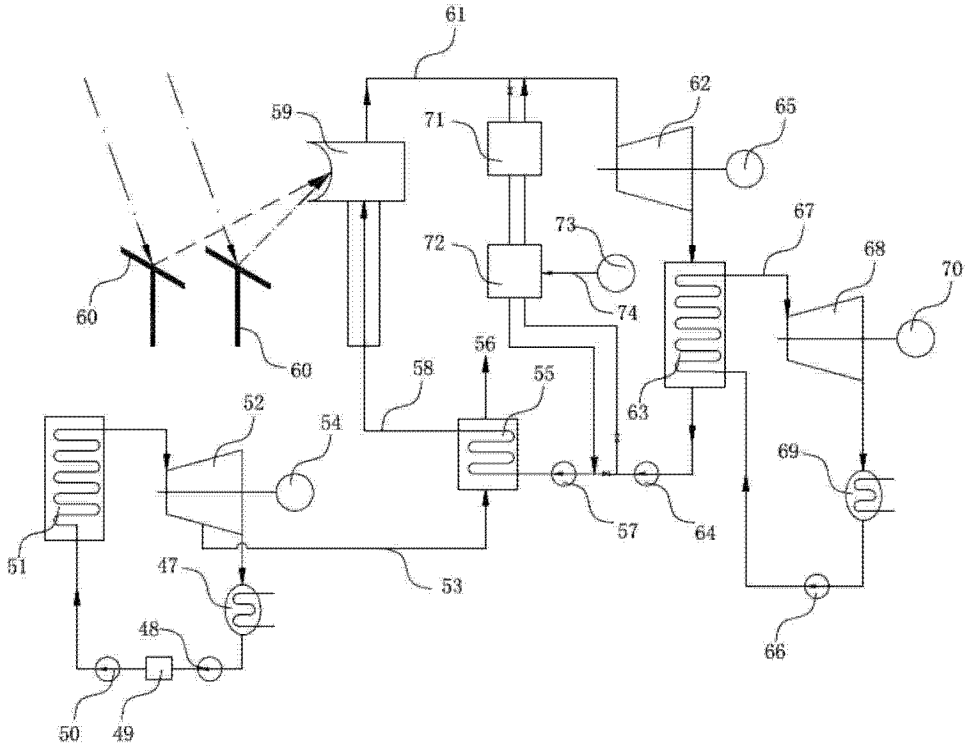

61
59
71
62
65
60
72
73
67
68
70
74
60
56
58
55
52
54
63
69
51
57
64
47
53
48
66
50
49

图 1

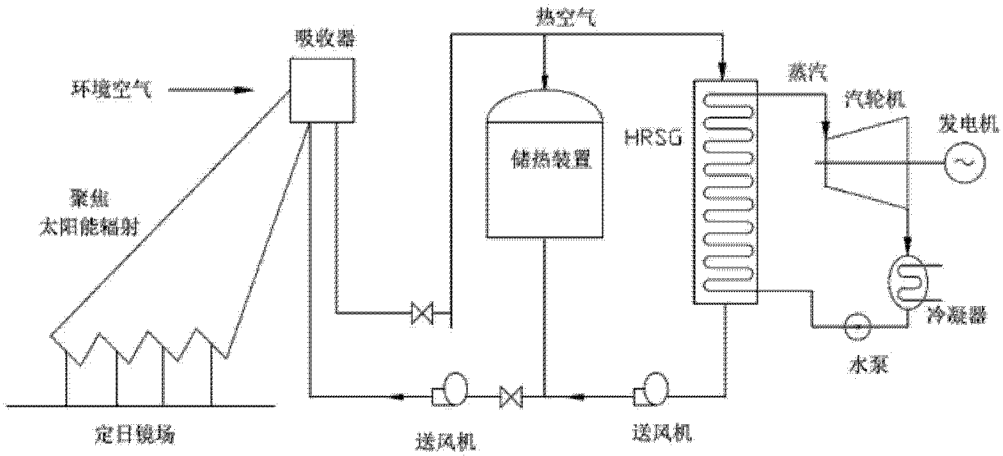

热空气
吸收器
环境空气
蒸汽
汽轮机
发电机
储热装置
HRSG
聚焦
太阳能辐射
冷凝器
水泵
定日镜场
送风机
送风机

图 2

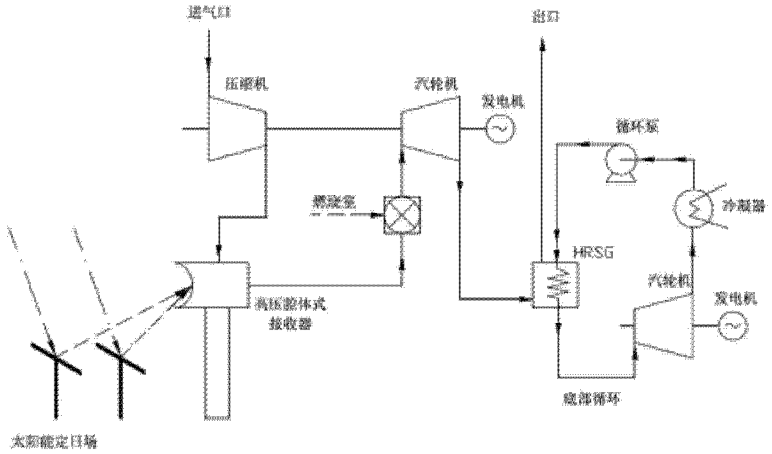

进气口
出口
压缩机
汽轮机
发电机
循环泵
冷凝器
燃烧室
HRSG
汽轮机
发电机
高压腔体式
接收器
底部循环
太阳能定日场

图 3

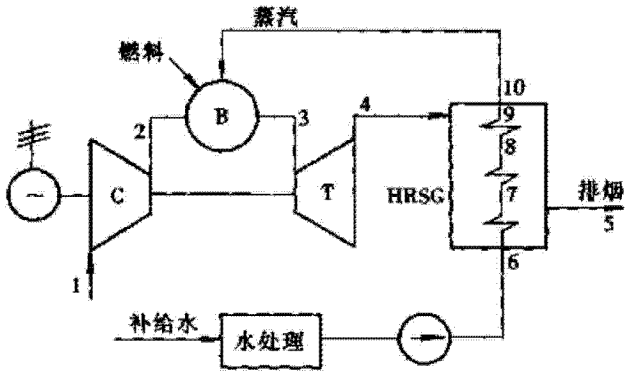

蒸汽
燃料
B
C
T
HRSG
排烟
补给水
水处理
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

图 4

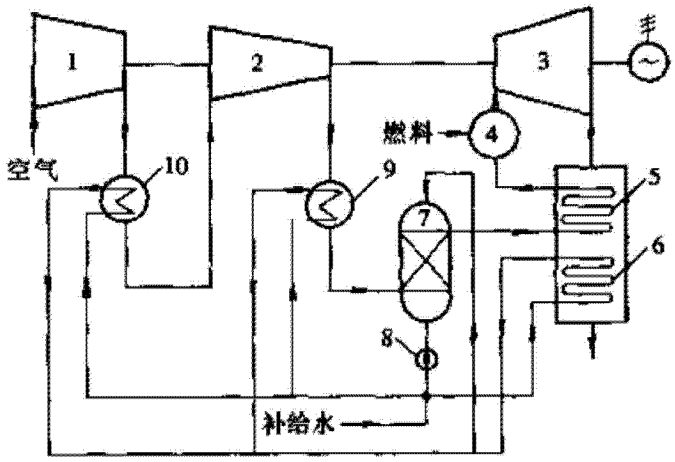

1
2
3
空气
燃料
4
5
6
7
8
9
10
补给水

图 5