

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102061994 A

(43) 申请公布日 2011. 05. 18

(21) 申请号 200910237837. 7

(22) 申请日 2009. 11. 11

(71) 申请人 中国科学院工程热物理研究所
地址 100080 北京市北四环西路 11 号

(72) 发明人 张娜

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021

代理人 周长兴

(51) Int. Cl.

F02C 3/22(2006. 01)

F02C 7/22(2006. 01)

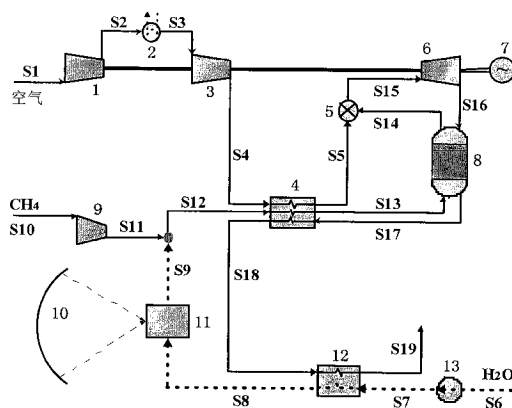
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 1 页

(54) 发明名称

中低温太阳热能品位间接提升方法及装置

(57) 摘要

一种中低温太阳热能品位间接提升的方法，在化学回热循环中引入中低温太阳热能，提供蒸汽蒸发潜热从而转化为蒸汽内能，通过蒸汽参与重整反应转化为合成气化学能，实现品位提升，最后在燃气轮机系统中实现热功转换。由于本发明引入了太阳能，而改善了透平排烟余热回收，减少了化石能源消耗，同时增加蒸汽产率，增进化学回热、物理回热收益。太阳能热转功净效率可达 25 ~ 30%，和常规化学回热循环相比，效率提高 5. 7 个百分点，化石能源节约率可达 20 ~ 30%，同时实现了 CO₂ 减排。可见，本方法具有良好的经济性和广阔的工程应用前景。



1. 一种中低温太阳热能品位间接提升的方法,在化学回热循环中引入中低温太阳热能,提供蒸汽蒸发潜热从而转化为蒸汽内能,通过蒸汽参与重整反应转化为合成气化学能,实现品位提升,最后在燃气轮机系统中实现热功转换。

2. 一种实现权利要求 1 所述方法的装置,主要包括:

低压压气机:将空气升至一定压力;

间冷器:对升至一定压力的空气进行冷却降温;

高压压气机:将空气升压至 Brayton 循环的最高压力;

燃料压气机:将燃料气体升压至重整反应的压力;

泵:将淡水升压至重整反应的压力;

回热器:利用透平排气对水蒸汽与压缩后燃料气体的混合气、压缩后的空气进行加热;

重整器:由烟气供热,使燃料与水蒸汽在压力下进行化学重整反应;

燃烧室:合成气和空气发生燃烧反应,得到高温气体;

燃气透平:高温燃气膨胀做功;

发电机:与燃气透平连接,将燃气透平产生机械功转化为电能输出;

省煤器:由烟气供热,加热淡水流股至重整反应压力下的饱和态;

蒸发器:利用太阳能将重整反应压力下的饱和水蒸发;

太阳能集热器:收集太阳能;

加压后的水送入省煤器加热至重整压力下的饱和水态,再进入太阳能集热器供热的蒸发器加热为蒸汽,与燃料压气机压缩后的燃料气体混合后送入回热器进一步被加热,随后进入重整器发生吸热反应,生成的合成气送入燃烧室;空气经低压压气机压缩后,送入间冷器进行冷却,再送入高压压气机压缩至 Brayton 循环的最高压力,随后送入回热器进一步被加热,最后送入燃烧室,与合成气燃烧生成高温燃气,送入燃气透平膨胀做功,实现动力输出。

3. 如权利要求 2 所述的装置,其中,重整器热侧进口为燃气透平排气,出口连接回热器,冷侧进口与回热器连接,出口连接燃烧室。

4. 如权利要求 2 所述的装置,其中,回热器热侧进口与重整器连接,出口连接省煤器,冷侧进口与高压压气机、燃料气体与蒸汽的混合室连接,出口分别连接燃烧室、重整器。

5. 如权利要求 2 所述的装置,其中,蒸发器所需热量由太阳能集热器提供,进口与省煤器相连,出口蒸汽与压缩后燃料气体进行混合。

6. 如权利要求 2 所述的装置,其中,省煤器热侧进口与回热器连接,冷侧出口连接蒸发器,进口与泵相连。

7. 如权利要求 2 所述的装置,其中,压缩空气的低压压气机和高压压气机之间布置了间冷器。

8. 如权利要求 2 所述的装置,其中,空气采用了间冷压缩。

9. 如权利要求 2 所述的装置,其中,回热器的冷侧布置了压缩后燃料气体与水蒸汽的混合气体、压缩后的空气两股物流。

中低温太阳热能品位间接提升方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种中低温太阳热能品位间接提升的方法及据此提出的太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统 (SOLRGT)。

背景技术

[0002] 目前与本发明相关的技术主要包括中低温太阳能利用技术和利用化学回热循环发电技术,其各自技术的发展状况和系统特征如下:

[0003] 1) 中低温太阳能利用技术

[0004] 鉴于化石能源资源的有限性及其利用过程中产生污染的严重性,开拓新型洁净能源资源(特别是非碳能源)转换利用成为可持续发展的一个重要方面。近年来,太阳能以其独具的储量无限性、存在的普遍性、开发利用的清洁性以及逐步提升的经济性等优势获得广泛关注,成为解决能源短缺、环境污染和温室效应的有效途径之一。

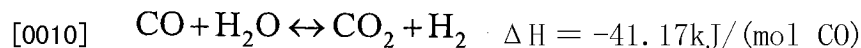
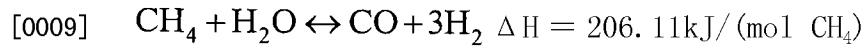
[0005] 当前,太阳能利用技术的主要发展方向是太阳能光电转化和光热转化,其中光热转化的太阳能热动力发电又是未来二三十年最具吸引力的太阳能技术。但是诸如储能难和能量转化效率低等造成的太阳能发电技术成本居高不下,一直是困扰太阳能热动力发电系统大规模发展和工程应用的重大瓶颈。究其原因,一方面是太阳能能量密度低、时空分布不连续;另一方面且更为重要的是太阳能集热效率与热力循环热功转换效率一直存在难以调和的矛盾。目前太阳能热发电技术以及新兴的热化学能量转换技术(如天然气重整的热化学能量转化系统等)研究多集中在 $900 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 的高温太阳热能的转化和利用,且多为高温集热和热化学转换等部件性能的提高和相关新材料的研发。 1000°C 以上的高温集热无不以设备复杂、投资成本高和光热转换效率低为代价。相对而言,当前 $150 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 的中低温太阳能热利用技术以其良好的集热性能和经济简单的集热装置获得大规模商业化。这个温度范围的集热器大多采用低聚光比的简单聚光装置,集热性能良好,集热效率一般能达到60%以上,且有效避免了高温太阳能能量转化系统的高成本代价。然而,由工程热力学原理可知工质的温度越低,实现热转功越困难,目前中低温热量的利用尚缺乏行之有效的技术。与此相对,常规能源利用系统经过百余年的发展,技术和工艺已日臻完善,如先进的燃气轮机工质温度已达 1400°C 以上。设想太阳能等可再生能源如果得以在常规能源系统中实现能量转换和释放,不但可以替代部分化石能源消耗,减少相应的污染物排放,更将极大地提高可再生能源能量释放品位和热转功效率,同时缓解其不稳定、不连续的供给难题。中低温太阳能和化石燃料的互补梯级利用有望为同时解决太阳能能量转化效率低和实现化石燃料的清洁利用提供一条全新的途径。

[0006] 多能源互补系统中,中低温太阳能可以和热力系统中某些物理吸热过程相集成(热集成),如蒸发过程、回热过程;也可以和某些吸热化学反应相集成(热化学集成),如热解反应和重整反应等。前者如 N. Lior 和 K. Koai 提出的蒸汽朗肯循环互补系统,低温段工质水吸收约 100°C 太阳能热量蒸发,高温段化石燃料燃烧提供热量使蒸汽过热,形成不同热源在不同温度段的匹配利用,太阳能热输入份额高达80%,系统热效率可达18%。后者

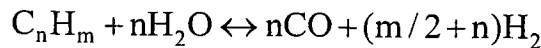
如 H. Hong 和 H. Jin 提出的一种中低温太阳能与化石燃料热化学互补的联合循环系统,利用甲醇燃料在中低温条件下的热解特性,以 200 ~ 300℃ 的太阳能驱动甲醇热解吸热反应,生成以 H₂ 和 CO 为主要成分的合成气,从而使低品位太阳能转化为高品位合成气化学能;合成气驱动燃气/蒸汽联合循环做功,实现了中低温太阳能品位的提升和其在动力系统中的高效转化。其案例分析中,太阳能热输入比例为 18%,太阳能发电净效率和系统热效率分别达到 35% 和 60.7%,但该计算忽略了透平叶片冷却影响。

[0007] 2. 利用化学回热循环发电技术

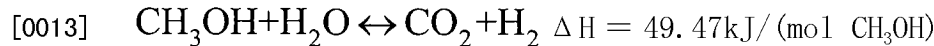
[0008] 化学回热循环在燃气透平 Brayton 循环的基础上引进了燃料的化学重整反应,当燃料为甲烷时,反应主要为:



[0011]



[0012] 当燃料是甲醇时,反应主要为:



[0014] 它们都是吸热反应,压力越小、温度越高、水碳比越高,燃料转化率越高。燃料转化为合成气后,燃料的热值得以改善,相比原来余热锅炉、回热器中对烟气余热的物理回收过程,化学回热循环增添了重整器中对烟气余热的化学回收过程,从而使循环达到较高的效率。甲烷是天然气的主要成分,较甲醇而言应用更广。但是甲烷重整反应在镍基催化剂下一般需要 800℃ 以上的高温,而在 330℃ 以下基本不发生反应。因此直接以中低温太阳能提供反应热来驱动甲烷重整反应是不可行的。相较而言,甲醇在 200 ~ 300℃ 即可实现完全重整。Kesser 等人 1994 年模拟结果表明:以甲烷为燃料的基本化学回热循环(无间冷再热)的热效率达到 48.8%,高于相同注汽率下的注蒸汽循环。同时,由于合成气中含有大量的水蒸汽,循环的 NO_x 排放相当低、比功大幅提高。

发明内容

[0015] 本发明的目的是提供一种中低温太阳热能品位间接提升方法及装置,以实现中低温太阳热能高效转换以及和化石燃料互补的综合梯级利用。

[0016] 为实现上述目的,本发明提供的中低温太阳热能品位间接提升的方法,在化学回热循环中引入中低温太阳热能,提供蒸汽蒸发潜热从而转化为蒸汽内能,通过蒸汽参与重整反应转化为合成气化学能,实现品位提升,最后在燃气轮机系统中实现热功转换。

[0017] 本发明提供的用于实现上述方法的装置,主要包括:

[0018] 低压压气机:将空气升至一定压力;

[0019] 间冷器:对升至一定压力的空气进行冷却降温;

[0020] 高压压气机:将空气升压至 Brayton 循环的最高压力;

[0021] 燃料压气机:将燃料气体升压至重整反应的压力;

[0022] 泵:将淡水升压至重整反应的压力;

[0023] 回热器:利用透平排气对水蒸汽与压缩后燃料气体的混合气、压缩后的空气进行

加热；

[0024] 重整器：由烟气供热，使燃料与水蒸汽在压力下进行化学重整反应；

[0025] 燃烧室：合成气和空气发生燃烧反应，得到高温气体；

[0026] 燃气透平：高温燃气膨胀做功；

[0027] 发电机：与燃气透平连接，将燃气透平产生机械功转化为电能输出；

[0028] 省煤器：由烟气供热，加热淡水流股至重整反应压力下的饱和态；

[0029] 蒸发器：利用太阳能将重整反应压力下的饱和水蒸发；

[0030] 太阳能集热器：收集太阳能；

[0031] 加压后的水送入省煤器加热至重整压力下的饱和水态，再进入太阳能集热器供热的蒸发器加热为蒸汽，与燃料压气机压缩后的燃料气体混合后送入回热器进一步被加热，随后进入重整器发生吸热反应，生成的合成气送入燃烧室；空气经低压压气机压缩后，送入间冷器进行冷却，再送入高压压气机压缩至 Brayton 循环的最高压力，随后送入回热器进一步被加热，最后送入燃烧室，与合成气燃烧生成高温燃气，送入燃气透平膨胀做功，实现动力输出。

[0032] 所述的装置中，重整器热侧进口为燃气透平排气，出口连接回热器，冷侧进口与回热器连接，出口连接燃烧室。

[0033] 所述的装置中，回热器热侧进口与重整器连接，出口连接省煤器，冷侧进口与高压压气机、燃料气体与蒸汽的混合室连接，出口分别连接燃烧室、重整器。

[0034] 所述的装置中，蒸发器所需热量由太阳能集热器提供，进口与省煤器相连，出口蒸汽与压缩后燃料气体进行混合。

[0035] 所述的装置中，省煤器热侧进口与回热器连接，冷侧出口连接蒸发器，进口与泵相连。

[0036] 所述的装置中，压缩空气的低压压气机和高压压气机之间布置了间冷器。

[0037] 所述的装置中，空气采用了间冷压缩。

[0038] 所述的装置中，回热器的冷侧布置了压缩后燃料气体与水蒸汽的混合气体、压缩后的空气两股物流。

[0039] 本发明实现了中低温太阳热能高效转换以及和化石燃料互补的综合梯级利用，效率提高的同时实现了 CO₂ 减排，热力性、环保性俱佳，具有广阔的工程应用前景。

附图说明

[0040] 图 1 为本发明的中低温太阳能品位的间接提升。

[0041] 图 2 为本发明的太阳能品位间接提升的 SOLRGT 循环装置流程图。

具体实施方式

[0042] 本发明通过燃料重整反应实现中低温太阳热能品位间接提升的方法和太阳能化石燃料互补的化学回热循环 (SOLRGT) 系统，是将太阳能品位间接提升与高效燃气轮机循环相结合，在化学回热循环中引入中低温太阳能，首先提供蒸汽蒸发潜热转化为蒸汽内能，再通过参与重整反应进一步转化为合成气化学能，品位提升后，最后在燃机中实现热功转换。主要设备包括：

- [0043] 低压压气机 :将空气升至一定压力 ;
- [0044] 间冷器 :对升至一定压力的空气进行冷却降温 ;
- [0045] 高压压气机 :将空气升压至 Brayton 循环的最高压力 ;
- [0046] 燃料压气机 :将燃料气体升压至重整反应的压力 (考虑压损) ;
- [0047] 泵 :将淡水升压至重整反应的压力 (考虑压损) ;
- [0048] 回热器 :利用透平排气对水蒸汽与压缩后燃料气体的混合气、压缩后的空气进行加热 ;
- [0049] 重整器 :由烟气供热,使燃料与水蒸汽在一定的压力下进行化学重整反应 ;
- [0050] 燃烧室 :合成气和空气发生燃烧反应,得到高温气体 ;
- [0051] 燃气透平 :高温燃气膨胀做功 ;
- [0052] 发电机 :与燃气透平连接,将燃气透平产生机械功转化为电能输出 ;
- [0053] 省煤器 :由烟气供热,加热淡水流股至重整反应压力下的饱和态 ;
- [0054] 蒸发器 :利用太阳能将重整反应压力下的饱和水蒸发 ;
- [0055] 太阳能集热器 :收集太阳能。

[0056] 上述各设备之间的连接均为通常采用的管道连接。

[0057] 所述的太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统 (SOLRGT),其特征在於:重整器热侧进口为燃气透平排气,出口连接回热器,冷侧进口与回热器连接,出口连接燃烧室;回热器热侧进口与重整器连接,出口连接省煤器,冷侧进口与高压压气机、燃料气体与蒸汽的混合室连接,出口分别连接燃烧室、重整器;蒸发器所需热量由太阳能集热器提供,进口与省煤器相连,出口蒸汽与压缩后燃料气体进行混合;省煤器热侧进口与回热器连接,冷侧出口连接蒸发器,进口与泵相连;压缩空气的低压压气机和高压压气机之间布置了间冷器。

[0058] 本发明的太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统 (SOLRGT) 的流程:

[0059] 加压后的水送入省煤器加热至重整压力下的饱和水态,再进入太阳能集热器供热的蒸发器加热为蒸汽,与燃料压气机压缩后的燃料气体混合后送入回热器进一步被加热,随后进入重整器发生吸热反应,生成的合成气送入燃烧室;空气经低压压气机压缩后,送入间冷器进行冷却,再送入高压压气机压缩至 Brayton 循环的最高压力,随后送入回热器进一步被加热,最后送入燃烧室,与合成气燃烧生成高温燃气,送入燃气透平膨胀做功,实现动力输出。

[0060] 所述的太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统 (SOLRGT) 的流程,其特征在於:

[0061] 烟气自燃气透平排出后,温度从高到低依次流经重整器、回热器、省煤器进行余热回收;重整反应的水先在省煤器中由烟气加热至饱和水态,再在太阳能集热器供热的蒸发器中由中低温太阳能加热为蒸汽;空气采用了间冷压缩;回热器的冷侧布置了压缩后燃料气体与水蒸汽的混合气体、压缩后的空气两股物流。

[0062] 本发明与中低温太阳能直接提供重整反应热 (即直接热化学集成) 不同,在以甲烷为例的中低温太阳能品位间接提升中 (图 1),太阳能提供重整反应所需蒸汽的汽化潜热,从而转化为蒸汽内能,这是一个热集成过程;所产生的蒸汽进而和甲烷在较高温度下进行重整反应,太阳热能借蒸汽内能的形式参与反应,通过热化学反应间接转化为合成气化

学能。可视为两步法转换过程,实现了热集成和热化学转化的有机结合及中低温太阳能热品位间接提升。可见,该系统具有优秀的热力性能,节省了化石能源,更加环保。

[0063] 下面将结合相应附图对本发明的具体实施例进行详细描述。

[0064] 具体实施例参看图 2,本发明的主要部分为以空气为主要循环工质的太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统(SOLRGT)。其中:1- 低压压气机;2- 间冷器;3- 高压压气机;4- 回热器;5- 燃烧室;6- 燃气透平;7- 发电机;8- 重整器;9- 燃料压气机;10- 太阳能集热器;11- 蒸发器;12- 省煤器;13- 泵。

[0065] 上述系统中的连接为公知技术,本发明在此不作具体描述。

[0066] 系统流程描述:

[0067] 该系统主要包括太阳能和化石能源综合互补的化学回热循环系统。

[0068] 加压后的水(S7)送入省煤器 12 加热至重整压力下的饱和水态(S8),再进入太阳能集热器 10 供热的蒸发器 11 加热为蒸汽(S9),与燃料压气机 9 压缩后的燃料气体(S11)混合后(S12)送入回热器 4 进一步被加热,随后进入重整器 8 发生吸热反应(S13),生成的合成气(S14)送入燃烧室 5;空气经低压压气机 1 压缩后(S2),送入间冷器 2 进行冷却(S3),再送入高压压气机 3 压缩至 Brayton 循环的最高压力(S4),随后送入回热器 4 进一步被加热(S5),最后送入燃烧室 5,与合成气(S14)燃烧生成高温燃气(S15),送入燃气透平 6 膨胀做功,实现动力输出。烟气(S16)自燃气透平 6 排出后,温度从高到低依次流经重整器 8、回热器 4、省煤器 12 进行余热回收(S17、S18、S19)。

[0069] 具体实施例在平衡工况性能参数见表 1。主要有关条件为:系统稳态运行状况下,压气机效率 89%;燃烧室燃烧效率 100%,压损为 3%;燃气透平等熵效率 88%,重整器热侧压损 2%,冷侧压损 10%,节点温差 20°C,余热锅炉节点温差 15°C。

[0070] 具体实施例循环平衡工况热力性能参数参看表 2,表 2 同时在相同的假设条件下(包括透平初温 1308°C、节点温差及部件性能等),对常规间冷化学回热燃气轮机(IC-CRGT)循环和 SOLRGT 循环进行了模拟对比,可见 SOLRGT 系统中,太阳热输入份额为 20.3%,化石能源节约率可达 23.3%。太阳热能净转功效率可达 26.5%,远高于同样温度下常规太阳能热发电系统。单位发电量 CO₂ 排放为 342.7g/kWh,比 IC-CRGT 系统中低 23.3%,CO₂ 相对减排量和化石能源节约率相一致,这是因为 CO₂ 排放量和化石燃料消耗量成正比。需要指出的是,上述结果是在理想情况下、也即在太阳热能温度满足 220°C 水蒸发要求的情况下得到的。如果太阳热能达不到上述温度要求,需要采用补燃或降低蒸发温度(压力)、蒸发后再提升蒸汽压力至重整反应要求压力等情况下,系统效率会相应降低。

[0071] 和常规化学回热燃气轮机(CRGT)系统相比,新系统需要增设中低温太阳能集热设备,可以采用技术相对成熟、造价较低的槽式集热器。槽式集热器在中低温应用场合具有优良的集热性能,即使在 100W/m² 的太阳辐照强度下也可达到 50% 以上的集热效率。应该指出的是,系统效率和太阳能热转功效率的提升与系统经济性改善直接相关;此外系统在 CO₂ 减排、及化学回热循环本身在 NO_x 排放等方面的优势也是进行经济性分析时应该考虑的因素。

[0072] 表 1:本发明的装置主要性能参数

[0073]

压气机	压比	15
	多变效率 [%]	89
	空气泄露 [%]	1
透平	初温 [°C]	1308
	等熵效率 [%]	88
燃烧室	效率 [%]	100
	压损 [%]	3
燃料压气机	多变效率 [%]	89
重整器	出口压力 [bar]	19.2
	热侧压损 [%]	2
	冷侧压损 [%]	10
	最小温差 [°C]	20
回热器	最小温差 [°C]	20
	压损 [%]	1
余热锅炉	最小温差 [°C]	15
	热侧压损 [%]	2
	冷侧压损 [%]	5
	最低排烟温度 [°C]	100
水泵	效率 [%]	85
太阳能集热器	集热温度 [°C]	~220
	集热效率 [%]	62
	机械效率×发电机效率 [%]	98

[0074] 表 2 : 系统热力性能数据

[0075]

	IC-CRGT	SOLRGT
压气机进口空气流量, m_1 [kg/s]	1.0	1.0
燃料/空气质量比	0.026	0.020
重整器出口温度/压力, [°C]/[bar]	579.4/19.2	575.7/19.2
水碳比, R_{sm}	5.02	6.1
碳转化率, CR	0.340	0.378
蒸汽/空气质量比 (汽空比), X_s	0.145	0.139
太阳能热输入份额, X_{sol} [%]	-	20.3
太阳能净转功效率, η_{sol} [%]	-	26.5
化石燃料节约率, SR_f [%]	-	23.3
单位太阳能热替代化石燃料量, R_f		0.915
单位太阳能电替代化石燃料量, R_{fe}		2.335
单位发电 CO ₂ 排放, [g/kWh]	422.7	342.7
比功, W_{sp} [kJ/kg air]	601.9	586.8
系统效率 (当量焓效率), η_e [%]	46.7	52.4

[0076] 表 2 中 :

[0077] 由于系统有太阳能和化石能源两种不同输入, 因此焓效率是较为合适的评价准则。近似认为燃料焓约等于其低位发热量, 定义系统当量焓效率如下 :

$$[0078] \quad \eta_e = \frac{W_{net}}{Q_f + Q_{sol}(1 - T_0/T_{sol})} = \frac{W_{net}}{m_f \cdot LHV + Q_{sol}(1 - T_0/T_{sol})}$$

[0079] 其中 T_0 为环境温度。当太阳能热输入份额为零时, 上述当量焓效率则等于系统热效率。

[0080] 太阳能热输入份额和其净热电转换效率（后者考虑了集热器损失）定义为：

$$[0081] \quad X_{sol} = \frac{Q_{sol}}{Q_f + Q_{sol}} = \frac{Q_{sol}}{m_f \cdot LHV + Q_{sol}}$$

$$[0082] \quad \eta_{sol} = \frac{W_{net} - W_{ref}}{Q_{rad}} = \frac{W_{net} - Q_f \eta_{e,ref}}{Q_{rad}}$$

[0083] 其中， W_{ref} 是同化石燃料输入下参比系统发电量， $W_{ref} = Q_f \cdot \eta_{e,ref}$ 。本文中选取参比系统为常规间冷化学回热燃气轮机（IC-CRGT）系统。 Q_{rad} 为集热器太阳能总投射量， $Q_{rad} = Q_{sol} / \eta_{col}$ ， η_{col} 为集热器效率。

[0084] 化石能源节约率为同输出下参比系统相比，SOLCRGT 系统中化石能源相对减少量：

$$[0085] \quad SR_f = \frac{W_{net} / \eta_{e,ref} - Q_f}{Q_f} = \frac{W_{net}}{W_{ref}} - 1$$

[0086] 上式中， SR_f 可以看作是太阳能替代化石能源的比例，单位太阳能热输入所替代的化石燃料量可表示为：

$$[0087] \quad R_f = \frac{W_{net} / \eta_{e,ref} - Q_f}{Q_{sol}} = SR_f \cdot \frac{Q_f}{Q_{sol}} = SR_f \cdot \frac{1 - X_{sol}}{X_{sol}}$$

[0088] 单位太阳能热输入所替代的化石燃料量可表示为：

$$[0089] \quad R_{fe} = \frac{W_{net} / \eta_{e,ref} - Q_f}{Q_{sol}(1 - T_0 / T_{sol})} = \frac{R_f}{1 - T_0 / T_{sol}}$$

[0090] 上述计算式中的符号为：

[0091]

E	焓 [kW]	η_e	当量焓效率 [%]
EXL	焓损 [kW]	η_{sol}	太阳热能净转功效率 [%]
LHV	低位发热量 [kJ/kg]		
Q	热量 [kW]	下标	
R_{sm}	水碳（莫尔）比	ex	透平排气余热
R_f	每 kJ 太阳能热替代的化石燃料热	f	化石燃料
R_{fe}	每 kJ 太阳能热替代的化石燃料热	ref	参比系统
SR_f	化石能源节约率 [%]	rad	太阳辐照
T	温度 [°C]	s	蒸汽
W_{net}	净出功 [MW]	sol	太阳热能
X_{sol}	太阳能热输入份额 [%]	syn	合成气
η_{col}	集热器效率 [%]	0	环境状态

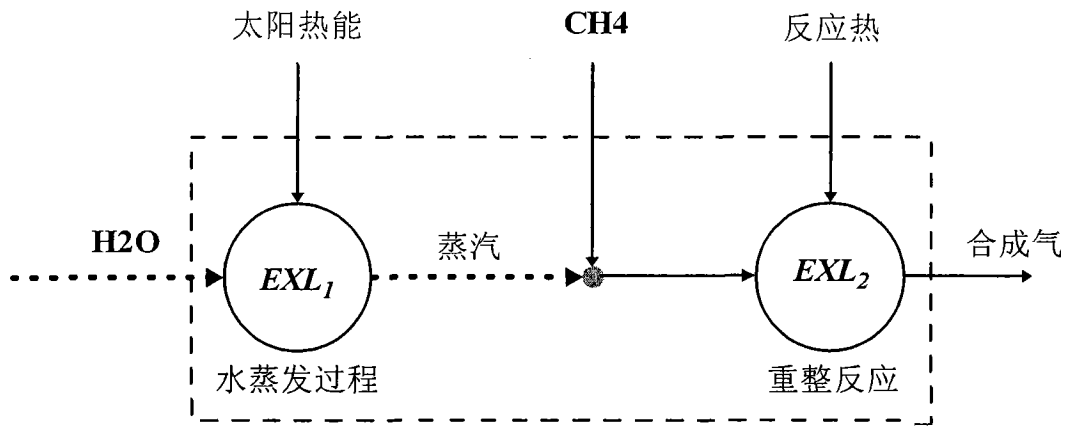


图 1

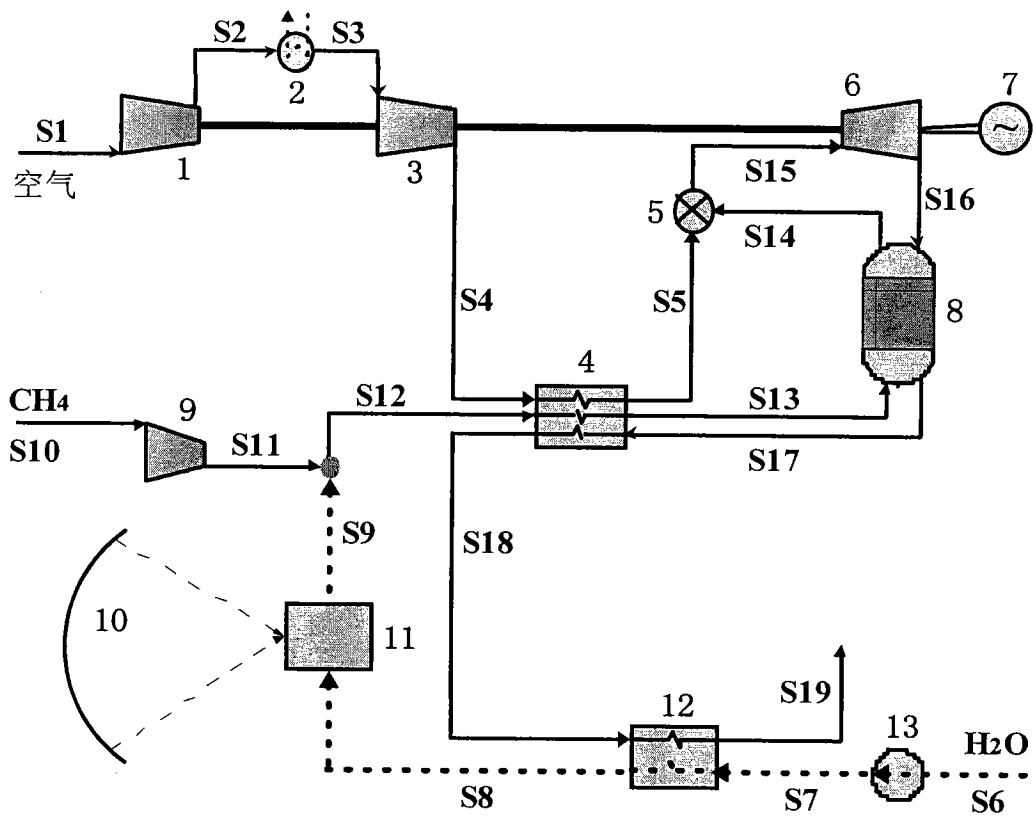


图 2