



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111433443 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 20

(21) 申请号 201880059806.4  
 (22) 申请日 2018.08.15  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 111433443 A  
 (43) 申请公布日 2020.07.17  
 (30) 优先权数据  
 62/545,497 2017.08.15 US  
 (85) PCT国际申请进入国家阶段日  
 2020.03.13  
 (86) PCT国际申请的申请数据  
 PCT/US2018/000163 2018.08.15  
 (87) PCT国际申请的公布数据  
 W02019/035896 EN 2019.02.21

(73) 专利权人 提高能源集团有限责任公司  
 地址 美国罗得岛州  
 (72) 发明人 P·M·邓恩  
 (74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所  
 11256  
 专利代理师 苏娟 张晔  
 (51) Int.Cl.  
 F02B 47/10 (2006.01)  
 F01K 23/06 (2006.01)  
 (56) 对比文件  
 JP 2005326042 A, 2005.11.24  
 JP 2002243120 A, 2002.08.28  
 审查员 樊锦涛

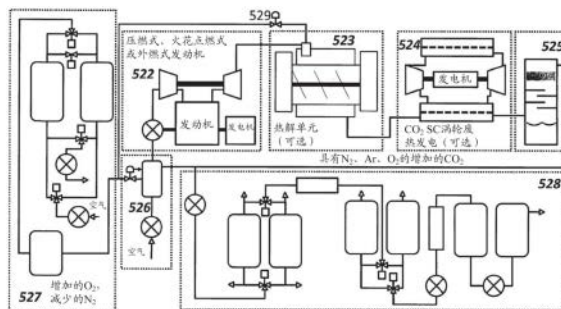
权利要求书3页 说明书14页 附图13页

## (54) 发明名称

碳封存和碳负性动力系统的改进的方法和系统

## (57) 摘要

提供了一种热解活塞发动机动力系统的碳封存的改进的方法和系统。系统包括用于产生动力和排气的热解活塞发动机以及水冷却及分离单元,该水冷却及分离单元接收排气并且冷却和去除来自排气的水,以产生CO<sub>2</sub>气体供应。系统还包括混合压力容器和氧气发生器,该混合压力容器从水冷却及分离单元中接收至少一部分的CO<sub>2</sub>气体供应,并且将CO<sub>2</sub>气体供应与氧气混合以产生待提供到活塞发动机的工作流体,氧气发生器用于向混合压力容器提供氧气。系统还包括用于输入来自热解系统的副产物的热解接口,其中,热解接口包括热解气体接口和热解气体/油接口。



1. 一种半封闭式动力产生系统,包括:  
发动机子系统;  
能够连接到所述发动机子系统的半封闭式循环(SCC)氧气设备子系统;  
能够连接到所述半封闭式循环氧气设备子系统的进气子系统;  
能够连接到所述半封闭式循环氧气设备子系统的气体净化系统(GCS);  
能够连接到所述发动机子系统的热解子系统;以及  
能够连接到所述热解子系统的废热发电子系统,  
其中,所述热解子系统具有燃烧器,该燃烧器被设计成消耗来自发动机子系统的排气的过量氧气。
2. 根据权利要求1所述的半封闭式动力产生系统,进一步包括:  
能够连接到所述废热发电子系统的排气水分离器子系统。
3. 根据权利要求2所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述热解子系统包括:  
入口料斗;  
热解反应室,所述热解反应室包括:  
管道;  
包围所述管道的加热护套;  
分离器容器,其中,所述分离器容器提供液体/焦油产物、气态产物和炭产物;  
与所述管道同心的螺钉,所述螺钉用于使材料穿过所述管道移动到所述分离器容器;  
其中,所述燃烧器能够连接到所述加热护套,并且其中,所述分离器容器能够连接到所述燃烧器。
4. 根据权利要求2所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述废热发电子系统包括:  
布雷顿循环废热发电子系统,所述布雷顿循环废热发电子系统包括:  
第一涡轮机;  
能够连接到所述第一涡轮机的驱动发电机;  
能够连接到所述驱动发电机的压缩机;  
能够连接到所述压缩机以对超临界CO<sub>2</sub>进行冷却的第一热交换器;以及  
能够连接到所述压缩机以对所述超临界CO<sub>2</sub>进行冷却的第二热交换器。
5. 根据权利要求1所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述发动机子系统包括:用于产生动力和排放气体的发动机。
6. 根据权利要求5所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述发动机子系统进一步包括:  
能够连接到所述发动机的轴驱动增压器;和/或  
能够连接到所述发动机的涡轮增压器。
7. 根据权利要求1所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述进气子系统包括:  
压力容器;  
能够连接到所述压力容器的鼓风机;以及  
能够连接到所述压力容器的进气氧气阀。
8. 根据权利要求7所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述半封闭式循环氧气设备子系统(OPS)包括:

氧气设备子系统鼓风机；  
能够连接到所述氧气设备子系统鼓风机的氧气设备子系统阀组件；  
能够连接到所述氧气设备子系统阀组件的至少一个氧气设备子系统分子筛容器；  
缓冲罐；以及  
能够连接到所述缓冲罐和所述至少一个氧气设备子系统分子筛容器的至少一个均衡阀。

9. 根据权利要求8所述的半封闭式动力产生系统,其中,能够连接到所述氧气设备子系统阀组件的所述至少一个氧气设备子系统分子筛容器在变压吸附处理过程中运作。

10. 根据权利要求8所述的半封闭式动力产生系统,其中,能够连接到所述氧气设备子系统阀组件的所述至少一个氧气设备子系统分子筛容器在膜处理过程中运作。

11. 根据权利要求1所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述气体净化系统(GCS)包括:

两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水和捕获系统；  
能够连接到所述两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水系统的气体净化系统鼓风机；以及

能够连接到所述两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水系统的热交换器。

12. 根据权利要求11所述的半封闭式动力产生系统,其中,所述气体净化系统(GCS)进一步包括:

能够连接到所述热交换器的至少两个真空变压吸附(VPSA)容器；

用于从所述真空变压吸附容器中去所捕获的气体的真空泵；

能够连接到所述真空泵的缓冲罐；

能够连接到所述缓冲罐的多级压缩机；以及

能够连接到所述多级压缩机的存储罐。

13. 一种半封闭式循环碳负性动力系统,包括:

发动机子系统；

能够连接到所述发动机子系统的半封闭式循环(SCC)氧气设备子系统；

能够连接到所述半封闭式循环氧气设备子系统的进气子系统；以及

能够连接到所述半封闭式循环氧气设备子系统的气体净化系统(GCS)；

能够连接到所述发动机子系统的热解子系统；

能够连接到所述热解子系统的废热发电子系统；

能够连接到所述废热发电子系统的排气水分离器子系统，

入口料斗；

热解反应室,所述热解反应室包括:

管道；

包围所述管道的加热护套；

分离器容器,其中,所述分离器容器提供液体/焦油产物、气态产物和炭产物；

与所述管道同心的螺钉,所述螺钉用于使材料穿过所述管道移动到所述分离器容器；

以及

能够连接到所述加热护套的燃烧器,并且其中,所述分离器容器能够连接到所述燃烧

器,并且其中,所述燃烧器被设计成使用液体热解产物。

14. 根据权利要求13所述的半封闭式循环碳负性动力系统,其中,所述进气子系统包括:

混合容器,以允许氧气、经冷却的排气和空气的混合物被创造作为用于发动机的人造气氛工作流体;

能够连接到所述进气子系统的压力容器的鼓风机;以及

能够连接到所述混合容器的进气氧气阀。

15. 根据权利要求13所述的半封闭式循环碳负性动力系统,其中,所述半封闭式循环氧气设备子系统(OPS)包括:

氧气设备子系统鼓风机;

氧气设备子系统真空泵;

能够连接到所述氧气设备子系统鼓风机的氧气设备子系统阀组件;

能够连接到所述氧气设备子系统阀组件的至少一个氧气设备子系统分子筛容器;

缓冲罐;

能够连接到所述缓冲罐和所述至少一个氧气设备子系统分子筛容器的至少一个均衡阀;并且

其中,所述半封闭式循环氧气设备子系统经由真空变压吸附(VPSA)处理过程运作。

16. 根据权利要求13所述的半封闭式循环碳负性动力系统,其中,所述气体净化系统(GCS)包括:

在变温吸附(TSA)床处理过程中运作的两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水和捕获系统;

能够连接到所述两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水系统的气体净化系统鼓风机;以及

能够连接到所述两阶段的基于气体净化系统分子筛的脱水系统的热交换器。

17. 根据权利要求16所述的半封闭式循环碳负性动力系统,其中,所述气体净化系统(GCS)进一步包括:

能够连接到所述热交换器的至少两个真空变压吸附(VPSA)容器;

用于从所述真空变压吸附容器中去所捕获的气体的真空泵;

能够连接到所述真空泵的缓冲罐;

能够连接到所述缓冲罐的多级压缩机;

能够连接到所述多级压缩机的存储罐;并且

其中,所捕获的气体也被用于使所述变温吸附床再生。

## 碳封存和碳负性动力系统的改进的方法和系统

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请涉及：要求以下列出的申请的最早可用的有效申请日期(例如，要求临时专利申请以外的最早可用的优先权日期；基于35USC§119(e)要求临时专利申请的权益)，并且在与本申请的主题不矛盾的程度，本申请通过整体引用而包含以下列出的申请(“相关申请”)的所有主题；本申请还要求相关申请的任何和所有父申请、祖父申请、曾祖父申请等申请的最早可用的有效申请日期，并且在与本申请的主题不矛盾的程度，本申请还通过整体引用而包含相关申请的任何和所有父申请、祖父申请、曾祖父申请等申请的所有主题：

[0003] 于2017年8月15日提交的发明人为保罗·M·邓恩的题为“碳封存的改进方法”的美国临时专利申请62545497。

### 背景技术

#### 1、技术领域

[0004] 本发明总体上涉及半封闭式循环动力系统，并且更具体地涉及包括碳捕获设备或至少具有浓缩的排放CO<sub>2</sub>水平的动力系统，从而使得能够采用较低成本的CO<sub>2</sub>捕获设备。此外，本发明涉及热解系统或气化系统，该热解系统或气化系统经由热分解或部分(缺氧)燃烧从固体原料产生合成气体(一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氢气和其他烃类气体)和其他燃料。

[0005] 2、现有技术(背景)的描述

[0006] 常规的动力系统，无论是内燃式或外燃式，都用空气燃烧燃料并且一般将燃烧产物(废气/烟道气)排放到空气(或经由水下接口排放到空气)。对于天然气、汽油和柴油活塞发动机，确实是这样，并且对于燃气涡轮机、喷气发动机或者甚至基于蒸汽锅炉的发电厂，也确实是这样。虽然易于执行，但是未处理的烟道气到空气的排放由于环境原因是不期望的。诸如SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、HC(未燃烧的碳氢化合物)以及最近的CO<sub>2</sub>的气体被定义为污染物并被管制。在特殊用途的应用中，特别是对于海底应用，使系统排气压力与环境压力(升高的背压)有关的需求可以显著降低发动机循环的效率。在其他特殊用途的应用中，特别是在更高海拔处，使系统压力与环境压力(降低的入口压力)有关的需求可以显著降低比功率，并且还可以影响效率。

[0007] 其结果是，存在成为无排放和/或具有较少的来自局部环境压力的不利影响的需求，并且在各种封闭式或半封闭式动力系统上的许多现有工作已经出现，从而产生了大量专利。从历史上看(在二十世纪的第一部分)，这项工作主要涉及特殊用途的应用，最近，它主要是关于提供更高的效率和/或有效地控制排放或甚至捕获系统排放的能力，特别是对CO<sub>2</sub>而言。通过引用并入本文中的同样由本发明人发明的US 9,194,340 B2提供了相关专利的历史和引用。

[0008] 热解和气化系统通常分为两类：连续进料机或间歇式(高压釜)类型的机器。优选的机器将取决于原料，并且在很大程度上取决于原料是否可以通过输送机、输送螺旋或其

他装置有效地输送到反应区域中；如果可能的话，连续进料型机器是优选的。专利US 8,784,616 B2利用父专利和子专利为该领域的十多个专利和非专利文献提供了整组引用。

[0009] 3、改进现有技术的动力

[0010] 大气中的CO<sub>2</sub>水平正在上升，并且这种上升与20世纪开始的快速工业发展相关，该水平从20世纪50年代的约300ppm上升到如今的400ppm以上。所关注的系统远不只是碳中性的，实际上是高度碳负性的，但是这些系统仍会产生动力，因为这些系统在规模上的且长时间的运作会开始校正大气的CO<sub>2</sub>水平。

[0011] 二氧化碳在许多地方都是受管制的污染物。其他温室气体（诸如NO<sub>x</sub>）和发动机排气的其他成分（包括未燃烧的HC/甲烷）也受到严格管制。化石燃料燃烧发动机（诸如例如活塞发动机、燃气轮机或化石燃料锅炉）每兆瓦时（MW-hr）的能量生产所产生的CO<sub>2</sub>在略小于+1000磅（1b）至大于+20001b之间。

[0012] 来自诸如例如水、风和太阳能的能源的可再生动力被认为是碳中性的，因为这些能源在运作期间每兆瓦时排放的CO<sub>2</sub>为零。核动力在运作期间具有相同的碳中性属性；然而，由于系统制造、构建和其他支持活动在运作期间所导致的碳释放，可再生动力和核动力仍是碳正性的。

[0013] 在发动机中使用的可再生燃料（诸如例如垃圾填埋气、沼气和生物衍生气体）也被监管者认为或定义为碳中性。然而，这些发动机中的许多发动机具有释放到大气中的排气，并且这些“可再生燃料”产生CO<sub>2</sub>含量实际上很高的排气。垃圾填埋气可能是最糟糕的，因为垃圾填埋气一开始具有约50%的CO<sub>2</sub>，这在物理上会导致每兆瓦时向大气释放+30001b的CO<sub>2</sub>。这比几乎任何燃煤电厂都要多，但是垃圾填埋气发电仍被认为是可再生的和碳中性的。

[0014] 热解（材料在高温下的热分解）可以产生用于活塞或涡轮发动机的碳中性燃料。通过将热解技术与碳捕获相结合，存在创造出既有利于环境又有利于开发商/运营商的碳负性动力系统的可能。

[0015] 然而，存在本发明试图解决的关于热解的许多问题和效率低下。另外，本发明与半封闭式循环发动机的集成将解决类似的问题和效率低下。这些问题包括但不限于：由于构造中所使用的稀有合金而导致热解设备的高成本；热解系统产生的大部分高价值（气态）燃料必须用于维持所需的温度；某些原料所产生的热解油/焦油缺乏价值；以及来自用于维持热解反应器中所需的温度的燃烧器的排放物（包括CO<sub>2</sub>排放物和其他受管制的污染物）。

[0016] 半封闭式循环（SCC）也具有优势和通过本发明、通过SCC的改进方案以及通过与热解的集成来解决的弱点。那些问题包括但不限于：在排气再循环（EGR）水平过高的情况下运作可能导致碳酸的生成，因为在SCC中可能发生CO<sub>2</sub>溶解在任何液态水中；在高的EGR水平的情况下运作通常还需要高纯度的氧气源以补偿惰性成分，从而导致更高的氧气成本和外来的氧气设备；当与较高纯度的氧气混合物结合时，高的EGR水平会导致在密度（由于分子量和其他因素）和比热比方面与空气完全不同的工作流体；与空气完全不同的工作流体通常需要对活塞发动机进行重大的发动机改造（例如：压缩比、气门正时），而在燃气轮机的情况下，则需要专门为SCC工作流体设计的新型涡轮机械（例如，高压超临界CO<sub>2</sub>涡轮与空气呼吸常规燃气轮机相比较）；除非浪费氧气，否则在过量空气机器（包括稀燃式活塞发动机和燃气轮机）中，SCC将趋于具有低于“设计点”的排气O<sub>2</sub>水平；以及如果允许降低排气O<sub>2</sub>水平，以

对经由EGR被带回循环中的额外工作流体进行补偿并且节省O<sub>2</sub>设备的成本,那么在某个点处,这些水平将太低而根本无法维持燃烧(甲烷可燃性的O<sub>2</sub>极限约为12%),并且几乎在所有情况下都需要对发动机控制系统和燃气轮机燃烧的气体进行改造。

## 发明内容

[0017] 本发明提供了热解系统中的碳封存的改进的方法和系统。为了实现这种优点和其他优点并且根据本发明的目的,如所实施的,本发明在一个方面包括改进的热解活塞发动机半封闭式循环动力系统。本发明的另一方面在于该系统是紧凑的,能够在高于环境排气压力下运作,并且在于发动机运作、热回收、氧产生和气体净化被以提高效率并降低资金成本的方式集成。

[0018] 本发明(1)提高了热解过程的效率,消耗了较少的所产生的燃料以维持温度,2)减少了热解系统以及热解系统相关辅助部件的资金成本支出,3)以使用来自热解过程的油和燃料的方式产生发动机动力,4)从发动机排气中捕获碳,5)从热解排气中捕获碳和其他污染物,6)以不需要新的主要发动机部件(用于活塞发动机的活塞/缸盖或者用于燃气轮机的涡轮机械)或其他显著的发动机改造的方式来运作半封闭式循环动力系统,7)降低并优化了与热解结合或独立的半封闭式循环的成本,以及8)扩大了热解系统和常规发动机中可接受的燃料范围,以及9)提高了碳捕获过程的效率。当利用可再生原料(诸如木材或城市固体废物)运作时,上述属性的组合将导致高净碳负性动力系统。

[0019] 本文中所述的碳封存发明的方法和系统包括:内燃式或外燃式的发动机,该发动机在半封闭式循环中运作,能够燃烧燃料并产生动力;热解系统,该热解系统由发动机排气进行预热,消耗该排气中的过量氧气,并且在比热解系统中典型的温度低的温度下运作,并且消耗所产生的燃料的一小部分,其中所有热解燃烧器的烟气与发动机排气混合;废热发电系统,该废热发电系统产生额外的电能,同时可选地提供通过气体净化系统再生的干热气体;排气冷却及水冷凝系统;气体净化系统,该气体净化系统对被捕获的CO<sub>2</sub>进行脱水、压缩和纯化;发动机进气箱,该发动机进气箱创造人造气氛以支持发动机运作,使得发动机设计不需要改变以在该循环内运作,从发动机的角度来看,该循环包括几乎不可区分的人造气氛,其中,较低的N<sub>2</sub>被较高的CO<sub>2</sub>补偿以支持燃烧和发动机运作;以及“氧气设备”,该氧气设备在该循环中具有从空气中去除一部分氮气而不提供高纯度的氧气的实际目的。

[0020] 本发明从发动机开始,该发动机通常分为三种类型中的一种,这三种类型为浓燃式活塞发动机、稀燃式活塞发动机或小型燃气轮机。

[0021] 在可以是自然吸气、增压和/或涡轮增压的浓燃式发动机中,控制燃料混合物以产生接近化学计量(即,完美平衡)的燃料“空气”混合物,使得理想燃烧的产物为CO<sub>2</sub>和水(H<sub>2</sub>O)。在实践中,设定空燃比控制器,以将排气中的固定的CO或O<sub>2</sub>水平通常维持在0.5%的CO(略浓)至2.0%的O<sub>2</sub>(略稀)的范围内。利用空气和天然气运作的浓燃式发动机通常将产生约10%的CO<sub>2</sub>、其余大部分为氮气和蒸汽的排气混合物。浓燃式发动机总是火花点燃式的。

[0022] 稀燃式活塞发动机可以包括压燃式和火花点燃式。还存在“双燃料”柴油发动机,其中,柴油通过压燃被点燃,该压燃提供了等同的火花,从而点燃了气态混合物。稀燃式发动机通常以1.5至2.0的λ(lambda)值运行。浓燃式发动机被设计成约为λ1.0,即燃料和氧气

的理想化学计量比。在空气(21%的 $O_2$ )中运行时, $\lambda 1.0$ 的浓燃式发动机在排气中将具有基本上为零的 $O_2$ ,而 $\lambda 1.5$ 的浓燃式发动机将具有约5.25%的 $O_2$ ,而 $\lambda 2.0$ (100%的过量空气)的浓燃式发动机将具有约10.5%的 $O_2$ 。在部分负载下的柴油发动机以及在所有负载下的燃气轮机通常将具有更高的排气 $O_2$ 水平,这也很重要地意味着它们具有较低的 $CO_2$ 水平,从而使得碳捕获更加困难。

[0023] 在SCC中,经冷却的EGR(将来自排气的 $CO_2$ 、 $N_2$ 和一些 $H_2O$ 返回到发动机进气口)与去除了一些氮气的空气的组合为发动机创造了人造气氛,并因此创造了工作流体。排气的这种再循环浓缩了 $CO_2$ ,这实现了经济的碳捕获。图10中示出了典型的发动机排气 $O_2$ 和 $CO_2$ 水平,在所有情况下,将21%的 $O_2$ (空气或包括EGR的空气当量)供应到发动机。

[0024] 在水冷凝之后, $CO_2$ 的纯度增加,并且最后一种情况表示经冷却的EGR流中约70%的 $CO_2$ 。在稀燃式机器、活塞或燃气轮机中,排气中的5-15%的 $O_2$ 降低了上述SCC情况中所示的 $CO_2$ 的浓度。然后,对在浓燃式发动机中通常为1000华氏度的排气进行冷却,在某些情况下,使用废热来产生额外的动力,最终冷却至大部分燃烧水冷凝并被分离的点。

[0025] 经冷却的排气通常在100-130华氏度下仍以水蒸气来饱和,其中,115华氏度是有利于活塞发动机的设计点入口温度。经冷却的排气与空气、和/或空气和“氧气”(富含去除了一部分氮气的空气)混合,以便为发动机创造人造气氛。模拟和测试数据(针对浓燃式)表明,在中等的氧气富集水平(22-50%,优选地为25-35%)的情况下、并因此在更适度的EGR水平的情况下,发动机将很好地运行,而没有压缩比或定时变更量,并且在特定燃料消耗上几乎没有或没有明显差异。

[0026] 经冷却的EGR流的一部分被转移到具有两种功能的气体净化系统(Gas Cleanup System,GCS)中。首先,去除排气的速率间接决定了其余部分进行再循环的速率,因此GCS有助于管理EGR水平和发动机进气 $CO_2$ 水平。其次,即使在91%的 $O_2$ 源的情况下,EGR流中的原始 $CO_2$ 的浓度对于商业应用或者甚至经济封存而言仍然太低。结果,GCS还具有对原始 $CO_2$ 进行脱水的功能,以及通过将 $CO_2$ 与可能仍然存在的 $N_2$ 、Ar和 $O_2$ 进行分离来对 $CO_2$ 进行纯化的功能。最后,GCS包括为了封存或用户应用而对 $CO_2$ 进行加压所需的部件。GCS可以是基于胺的 $CO_2$ 吸附、分子筛捕获、蒸馏(基于相分离)或其组合。GCS技术的选择与 $CO_2$ 水平、系统尺寸以及在某些情况下所捕获的 $CO_2$ 规范有关。简单的 $CO_2$ 相分离将需要存在无需低温即可进行分离的足够高的 $CO_2$ 的分压,因此在适度的压缩水平的情况下优选的是50-90%的 $CO_2$ 。胺和分子筛将在非常低的 $CO_2$ 浓度(包括空气中400ppm的 $CO_2$ )下进行物理工作,但是为了使这些过程是经济性的,需要大于14%的 $CO_2$ ,因此需要SCC,与浓燃式发动机相比,稀燃式发动机和燃气轮机更需要SCC,但是需要一定程度的SCC和EGR来对这些发动机中的任何发动机进行优化,以便用于碳捕获。

[0027] 用于实现SCC中的经济碳捕获的技术是氧气设备,或者更确切地说是脱氮设备。在SCC中采用的发动机(无论是浓燃式活塞、稀燃式活塞或燃气轮机)都具有固定的设计点或可接受的运作范围,这需要一定范围的工作流体流率。如果人们经由经冷却的EGR向工作流体添加 $CO_2$ ,除非人们试图实现发动机运作的变化(有时这样做是为了减少排放),否则人们必须通过从空气中去除大约相同量的 $N_2$ (也呈惰性)来补偿在发动机过程中呈惰性的额外的 $CO_2$ 。氧气设备的类型可以包括但不限于变压吸附(Pressure Swing Absorption,PSA)、真空变压吸附(Vacuum Pressure Swing Absorption,VPSA)、膜或低温蒸馏。除了膜之外,



所有上述的氧气设备(在单个阶段中)能够产生纯度大于90%的 $O_2$ ,膜设备产生30-40%的 $O_2$ ,但同时也产生高纯度的 $N_2$ 。在四种类型中,以本发明所关注的规模衡量,VPSC具有最佳的比功率、但第二高的成本,而膜具有最低的成本、但最差的比功率。PSA和膜具有以下优点:它们可以在中等压力(15-25磅/平方英寸(psig))下产生 $O_2$ ,而无需使用增压压缩机。

[0028] 热排气需要作为过程的一部分被冷却,但也可以用作热源,以帮助在GCS中使分子筛床或胺再生,排气废热也可以用于将废热驱动到动力系统(可选),这将有助于抵消与本发明相关联的其他辅助动力需求。根据US 9,194,340,能够设计废热发电系统,在这种情况下,使用 $CO_2$ 作为工作流体,并且也可以将热的 $CO_2$ 排放到GCS中以使系统再生,或者使用GCS捕获的 $CO_2$ 来增加废热发电系统中的工作流体。大多数废热发电系统偏好较高的温度,并且在9,194,340内还存在适度地提高排气温度的技术。

[0029] 最后,热解系统(可选)是本发明的一部分。存在在某些情况下已获得专利、在另一些情况下作为已知的现有技术和商品的方法,以经由热解产生用于活塞发动机或涡轮机的燃料。热解是在升高的温度下在基本上没有氧气的容器中对有机材料(例如木材或城市固体废物)进行热化学分解。生物和非生物材料的热分解产生:1) 低的BTU气体(通常是 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 与 $CO_2$ 的混合物),2) 在一些情况下,油,以及3) 在所有情况下,炭/碳固体产物。所有这些热解产物具有价值,即使是固体。实际上,经常用于户外烧烤的“木炭”坯块经由木材的热解制成。

[0030] 现有技术的热解技术的问题在于,消耗了大部分所生产的燃料(通常是气体)以为过程维持热量,如果目标是木炭坯块,则这样做没有问题,但如果目标是运行发动机,则这样做并无帮助。在本发明中,在热解系统燃烧器中使用通常为1000华氏度(但是根据发动机的类型,通常在500至1500华氏度之间)的热的SCC排气来替代空气。在浓燃式发动机的情况下,这将需要向SCC排气中注入一些额外的 $O_2$ ,但是在稀燃式发动机或燃气轮机的情况下,排气中存在足够的 $O_2$ 以支持燃烧,从而产生热解所需的温度。更好的是,消耗该 $O_2$ 将使得捕获每单位的 $CO_2$ 的GCS系统变小,因为 $CO_2$ 浓度将增加。

[0031] 具体地,例如,约5000马力(hp)的稀燃式发动机在815华氏度下在排气中可能具有9%的 $O_2$ ,而在EGR之前在 $O_2$ 纯度为38%的SCC中运作。向该排气中添加燃料(来自热解)将使温度升高至2300华氏度,并且将使热的 $CO_2$ 百分比增加至23%,从而显著地减小GCS的尺寸。

[0032] 热解通常需要反应区域内的温度为900-1800华氏度,与燃烧器上方的燃烧温度2000+华氏度一致。通常,设计人员将温度尽可能地推高,以增加气态组分的产量,并且减少液体或炭的量。结果,在热解反应器中使用类似于因科内尔(Inconel)的材料。在1600-1800华氏度的高温下,Inconel或其他稀有的镍合金在蠕变或断裂时间方面具有的允许强度约为典型不锈钢的10倍。这些材料具有的成本也约为典型不锈钢的10倍。

[0033] 将过程温度降低约300华氏度仍将会处理原料,但是将产生更多的油/焦油以及更少的气体,但使得能够使用不锈钢。排气中氧气的存在以及在燃烧区域中增加更高纯度的氧气的能力使得能够使用热解油作为加热燃料,因此即使可以降低热解反应器内的反应温度,并因此降低螺钉和其他受压部件的温度,仍会产生与发动机中所使用的净气体相同量的净气体,因为不使用该气体来维持反应温度。

[0034] 最后,即使热解单元在较低温度下运作,来自热解单元的排气仍将比来自SCC发动机的排气处于更高的温度,并且该排气的流率也略微较高。最终结果是,由于热解子系统的

添加,现在增加了可能在设计的废热发电部件中产生的功率。前述的组合在以降低的资金和运营成本获得高碳负性动力系统方面创造了价值。

[0035] 总而言之,本发明针对一种半封闭式循环碳负性动力系统,该半封闭式循环碳负性动力系统包括:发动机,该发动机是浓燃式或稀燃式、活塞或涡轮,用于产生动力和排气;基于分子筛的氧气设备;混合容器,以允许产生氧气、经冷却的排气与空气的混合物,作为用于发动机的人造气氛工作流体;与排气水分离器和除雾器结合对排气进行冷却的方法;基于分子筛的脱水单元,该基于分子筛的脱水单元在变温吸附(Thermal Swing Absorption, TSA)处理过程中运作,直接或间接地采用发动机排气废热;以及基于分子筛的捕获单元,该基于分子筛的捕获单元在真空变压吸附(VPSA)处理过程中运作,其中,过程气体也被用于使变温吸附(TSA)床再生。

[0036] 另外,半封闭式循环碳负性动力系统包括具有以下特征的热解系统:燃烧器,该燃烧器被设计成消耗来自发动机排气的过量氧气;燃烧器,该燃烧器被设计成使用液体热解产物;燃烧器排气,该燃烧器排气与发动机排气结合,从而实现后续的碳捕获,导致无排放热解系统的较低温度运作,与不锈钢构造一致并且增加油/焦油产量。在SCC发动机“双燃料”(柴油天然气)与火花点燃相比较的情况下,可以使用额外的所产生的热解油来替代或增加柴油。

[0037] 本发明还包括废热发电单元,该废热发电单元理想地基于 $\text{CO}_2$ 并且在布雷顿(Brayton)循环中运作;其中:采用足以将排气冷却至300华氏度的压力比;所排放的热的 $\text{CO}_2$ 被用于使系统分子筛的部分再生。

[0038] 本发明还包括:经由膜处理过程运作的氧气设备,该氧气设备在单个阶段中产生纯度为23-40%的 $\text{O}_2$ ;经由变压吸附(PSA)或真空变压吸附(VPSA)运作的氧气设备;混合的 $\text{O}_2$ 与空气水平中 $\text{O}_2$ 介于23-28%之间,从而从浓燃式发动机中产生纯度为15%的 $\text{CO}_2$ ;并且无需改变发动机。而且在混合的 $\text{O}_2$ 与空气水平中 $\text{O}_2$ 介于23-50%的情况下,从稀燃式发动机中产生纯度为20%的 $\text{CO}_2$ ,并且从浓燃式发动机中产生更高的纯度,仅需要改变发动机控制参数,而无需改变内部机械;在发动机进气口处的 $\text{O}_2$ 纯度低于21%的情况下,仅需要改变发动机控制( $\lambda$ 设定)。

[0039] 本发明还针对通过向发动机的部分直接注入 $\text{O}_2$ 来补偿低的 $\text{O}_2$ 纯度的情况;以及通过向热解燃烧器的部分直接注入 $\text{O}_2$ 来补偿低于所需的排气 $\text{O}_2$ 纯度的情况;并且当利用低的 $\text{O}_2$ 纯度(23-45%的 $\text{O}_2$ )运作时,使得分子量和其他关键气体特性(诸如比热比和密度)与小型燃气轮机的运作范围保持兼容,而无需改变涡轮机械或不具有显著的效率影响。

[0040] 本发明还包括在降低的EGR和增加的 $\text{O}_2$ 下的运作,以使得活塞发动机能够在非常低的BTU燃料(通常低至该发动机的标称最小值的1/3,通常低至150BTU/SCF)中运作。可替代地,本发明包括在增加的EGR以及在某些情况下减少的 $\text{O}_2$ 下的运作,以使得活塞发动机能够在高的BTU燃料(通常与纯丙烷一样高或更高,高达4000BTU/SCF)中运作,而没有爆震或降低额定值。

## 附图说明

[0041] 被认为是本发明的主题在说明书的结尾处的权利要求中特别指出并明确要求保护。通过以下结合附图的详细描述,本发明的前述目的、特征和优点以及其他目的、特征和

优点将变得显而易见,在附图中:

[0042] 图1示意性地示出了通用SCC动力系统的基本部件,该基本组件包括 $N_2$ 去除、GCS和压缩;

[0043] 图2示意性地示出了SCC活塞发动机动力系统的部件,该部件具有PSA  $O_2$ 产生、SC  $CO_2$ 废热发电以及采用TSA和相分离的GCS;

[0044] 图3示意性地示出了通用连续进料热解反应器的基本部件;

[0045] 图4示意性地示出了热解系统的现有技术实施方式更加复杂并且可以包括多个燃烧器、排气装置、挡板、管道以及与原料的制备相关联的部件;

[0046] 图5示意性地示出了本发明中的部件和部件的布置,该部件包括SCC发动机子系统、热解子系统、废热发电子系统、排气冷却及水分离子系统、SCC进气子系统、氧气/脱氮子系统、带有压缩和热解氧气进入阀的气体净化子系统;

[0047] 图6示出了图5中所示的发动机子系统;

[0048] 图7示出了图5中所示的废热发电子和排气水分离器子系统;

[0049] 图8示出了图5中所示的SCC进气子系统、氧气设备(脱氮)子系统以及通向热解阀的额外的 $O_2$ ;

[0050] 图9示出了图5中所示的GCS子系统;

[0051] 图10是示出了典型的发动机排气 $O_2$ 和 $CO_2$ 水平的表格;

[0052] 图11是示出了稀燃式中速发动机在3MW级别下的模拟结果的表格;

[0053] 图12是示出了在利用甲烷燃料(无热解)的小型工业燃气轮机上的具有EGR的SCC的化学流程图模拟的结果的表格;以及

[0054] 图13是示出了一种方法的流程图,该方法用于根据本文中所描述的本发明的提供碳负性动力系统的改进的方法和系统。

## 具体实施方式

[0055] 现在参照附图更全面地对本发明进行描述,在附图中示出了本发明的说明性实施例。本发明不以任何方式受限于说明性实施例,因为在下面描述的说明性实施例仅仅是本发明的示例,本发明能够以本领域技术人员所理解的各种形式实施。因此,应当理解的是,本文所公开的任何结构和功能细节不应被解释为限制性的,而是仅仅作为权利要求的基础并作为教导本领域技术人员以各种方式使用本发明的代表。此外,本文使用的术语和短语不旨在是限制性的,而是旨在提供本发明的可理解描述。

[0056] 当提供一个数值范围时,应该理解的是,除非上下文另有明确规定,否则该范围的上限与下限之间,到下限单位的十分之一的每个中间值,以及在所述范围中的任何其他规定值或中间值包含在本发明之内。这些较小范围的上限和下限可独立地包括在较小范围中,这些较小范围也包含在本发明内,在所述范围内服从任何明确排除的限值。当所述范围包括限值中的一个或两个时,排除了所包括的限值中的一两个的范围也被包括在本发明中。

[0057] 除非另有定义,否则本文使用的所有技术和科学术语具有由本发明所属技术领域的普通技术人员普遍理解的含义。尽管类似或等同于本文描述的那些方法和材料的任何方法和材料也可在本发明的实践或测试中使用,但是现在描述的是示范性方法和材料。

本文提及的所有出版物均通过引用并入本文以公开和描述与引用出版物相关的方法和/或材料。

[0058] 本发明总体上涉及一种在半封闭式循环中运作压燃式、火花点燃式、浓燃式或稀燃式往复式活塞发动机或者稀燃式燃气轮机的系统,其运作的方式是无排放的,并且在压力和动力下产生包括CO<sub>2</sub>的产物,同时通过热解对自身的燃料或其他燃料进行处理。动力系统设置有提供氧的基于一体式分子筛的空气分离单元。(可选地,它可以设置有基于膜的空气分离单元,或基于低温的空气分离单元)。

[0059] 对来自发动机的废气进行重新加热以消耗O<sub>2</sub>并且为热解反应器提供热源,来自发动机和热解燃烧器的混合排气(例如,不同百分比的CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、Ar、O<sub>2</sub>和水蒸气)被再循环以提供燃烧稀释剂和工作流体。系统的高等级废热被用于冷却排气(过程的一部分),并通过亚临界/超临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环产生额外动力。所产生的产物CO<sub>2</sub>被压缩、纯化并加压提供给用户,并且还作为热回收系统中的工作流体。所述热回收系统进而还提供干热的CO<sub>2</sub>用于再生气体净化变温吸附分子筛。

[0060] 应当理解的是,本发明是特定用途的,其中,过程需要动力和加压CO<sub>2</sub>两者。提高石油采收率是这样的过程的一个例子。还应理解的是,本发明适用于两冲程或四冲程活塞发动机、浓燃式或稀燃式活塞发动机、旋转活塞发动机或小型燃气轮机。中速发动机(其具有用于燃烧过程的更多时间)以及特别是容忍在高“增压”(进气歧管)净平均有效压力下运作的发动机(诸如中速对置活塞发动机或重型中低速四冲程发动机)均适合于所述循环,但本发明不应被理解为受限于这样的中速发动机。

[0061] 现在描述性地转向附图,在附图中类似的附图标记表示几个视图中的相似元件:

[0062] 图1示意性地示出了通用SCC动力系统的基本部件,该基本部件包括N<sub>2</sub>去除、GCS和压缩。参考图1,项目1代表发动机,该发动机消耗燃料以产生动力和排气,同时呼吸空气(常规地)或呼吸由SCC的部件的组合产生的人造气氛。浓燃式、火花点燃式活塞发动机是可以被用作项目1的发动机的子集。稀燃式、火花式或压燃式活塞发动机是可以被用作项目1的发动机的子集。稀燃式发动机有两冲程或四冲程构造。也为一些压燃式变型提供双燃料。稀燃式发动机有小尺寸,但是本文中的动机可能是使用较大的中速(900rpm)稀燃式发动机。

[0063] 小型燃气轮机(在技术上也属于稀燃式发动机)是可以被用作项目1的发动机的子集。理论上,项目1的发动机具有的排气氧水平可以在零(浓燃)至20%的范围内(空转下的压燃式发动机)的任何地方,但是实际上,活塞发动机的标准为0-10%,其中,当使用空气时或者更特别地是当发动机入口处的氧气含量为约21%时,涡轮发动机的标准为8-15%。

[0064] 仍参考图1,发动机(项目1)向系统(项目2)供给,该系统冷却排气(在某些情况下同时执行其他功能),然后向排气水分离器(项目3)供给,该排气水分离器最终通过冷凝将大部分燃烧水与排气分离。排气的气态成分在项目3之内或下游被分流并且被供给至项目4(进气子系统)和项目6(气体净化子系统)。

[0065] 仍参考图1,项目5是向项目4(进气子系统)提供氧气流(如果是膜设备,则通常提供30-40%的O<sub>2</sub>,或者如果是PSA或VSPA设备,则提供90%的O<sub>2</sub>,或者如果是低温设备,则提供99%的O<sub>2</sub>)的子系统,该进气子系统有助于将O<sub>2</sub>源、经冷却的排气再循环以及可选地空气混合,以便为发动机创造人造气氛。

[0066] 仍参考图1,项目6、6A、6B是指可能在气体净化系统(GCS)中发生的阶段。GCS中的

这些阶段可以以不同顺序发生,这取决于原始的CO<sub>2</sub>纯度和系统设计,但是顺序通常会先脱水(项目6),然后是捕获(项目6A),然后是压缩(项目6B),以生成在高压下纯度约为99%或在压力下被存储为液体的CO<sub>2</sub>产物。这些过程的细节随后将在本文中进行讨论。

[0067] 还参考图2,该图示意性地示出了SCC活塞发动机动力系统的部件,该部件具有PSA O<sub>2</sub>产生、SC CO<sub>2</sub>废热发电以及采用TSA和相分离的GCS。参考图2,与图1的项目1类似的项目21是发动机。仍参考图2,项目22(废热发电或“CO<sub>2</sub> SC涡轮热回收”子系统)对排气进行冷却。仍参考图2,项目23是排气水分离器,该排气水分离器将经冷却的排气(大部分水被去除)送回到进气子系统(项目24)。项目24的子系统接收来自项目25的氧气,如所描绘的那样,项目25是PSA氧气设备,但也可能是膜、VPSA或低温设备。

[0068] 仍参考图2,项目26是GSC,如所描绘的那样,该GCS具有基于TSA处理过程的脱水部分,然后是冷冻,以通过相分离来液化和分离CO<sub>2</sub>。项目26也可能全部是分子筛、基于胺或其组合。最后,参考图2,项目27是压缩机,是项目25的氧气设备的子集,但是在这种情况下直接连接到发动机而不是电驱动的。

[0069] 仍参考图2,在EGR回路中CO<sub>2</sub>纯度为50-90%的这种设计与高纯度O<sub>2</sub>源一致,在这种情况下约有90%的O<sub>2</sub>来自PSA,而没有项目24处的混合空气。这些高的原始CO<sub>2</sub>水平使得能够实现相分离GCS方法。

[0070] 还参考图3,该图示意性地示出了通用连续进料热解反应器的基本部件。参考图3,项目338是原料,该原料被供给到入口料斗和相关的部件(项目339)。用于热解的原料可以包括在设备的温度范围内可热分解的任何物质,包括煤、塑料、轮胎、城市固体废弃物、汽车粉碎残渣或可再生原料流(包括木材、纸张、生物质和其他可再生废物流)。当原料具有较低的温度分解点并且没有灰分(如塑料)时,以及当使用连续进料热解单元时,重要的是该原料还包括灰分或含灰分的原料添加物(如煤),使得存在机械装置以在整个过程中运送原料。

[0071] 仍参考图3,热解反应室实质上是被加热护套(项目311)包围的、装配有螺钉(项目312)的管道(项目310),以在整个过程中以缓慢的速度运送材料,从而将材料供给到分离器容器(项目313)中。

[0072] 仍参考图3,被装配到加热护套(项目311)上的燃烧器(项目314)在管道310的外部为过程提供热量,使得材料仅在接近零氧环境中暴露于热。经由项目315向燃烧器314供给空气或含氧流并且经由项目316向该燃烧器供给燃料。在护套311内存在挡板(项目317),以在某种程度上实现从燃烧器314到原料管道(项目310)的逆流热交换过程。热解燃烧器排气(项目318)通常被排放到大气中。

[0073] 仍参考图3,系统的分离器部分向未示出的接收设备提供项目319(气态产物)、项目320(液体/焦油产物)和项目321(炭产物)。在优选实施例中,在项目316处提供通常不具有太大价值的项目320(液体产物)作为燃料或者在项目316处至少增加燃料。

[0074] 还参考图4,该图示意性地示出了热解系统的实际实施方式更加复杂并且可以包括多个燃烧器、排气装置、挡板、管道以及与原料的制备相关联的部件。

[0075] 还参考图5,该图在系统层面上示意性地示出了本发明中的部件和部件的布置,该部件包括SCC发动机子系统、热解子系统、废热发电子系统、排气冷却及水分离子系统、SCC进气子系统、氧气/脱氮子系统、带有压缩和热解氧气进入阀的气体净化子系统。

[0076] 仍参考图5,项目522是发动机子系统,在优选实施例中,该发动机子系统向热解子系统(项目523)的燃烧器供给热排气,该热排气含有5-15%、但标称为9%的氧气。热解排气从项目523流到项目524,在该项目524中,热解排气将热量排放到SC CO<sub>2</sub>涡轮废热发电子系统。

[0077] 仍参考图5,从废热发电系统(项目524),现在含有额外的原始CO<sub>2</sub>和减少的O<sub>2</sub>的排气流入排气水分离器(项目525)中,在该排气水分离器中,大部分的燃烧水被冷凝。该经冷却的排气被分为两股流,这两股流的一部分流到进气组件(项目526)。项目526(进气组件)将来自项目527的经冷却的排气、空气和氧气进行混合,以便为发动机(项目522)创造人造气氛。

[0078] 仍参考图5,来自项目525的流的一部分被提供到气体净化子系统(项目528)。在项目528内,对原始CO<sub>2</sub>进行脱水、纯化、压缩并存储。最后,在单独的发动机排气不足的那些情况下(通常只有浓燃式发动机存在这些情况),使用项目529(阀)来向子系统523(热解子系统)提供额外的氧气。这些子系统的细节及其实现权利要求的运作将结合下文更详细的附图进行讨论。

[0079] 还参考图6,该图示出了图5的发动机子系统(项目522)。仍参考图6,轴驱动的增压器或鼓风机(项目630)(可选)将工作流体供给到涡轮增压器的压缩机(项目631)(可选),再供给到发动机(项目632)。发动机632被连接到负载,或者在大多数情况下被连接到发电机(项目633)。涡轮增压器(项目634)(可选)经由项目635(排气管线)将涡轮机排气供给到后续系统。通常,发动机(项目632)或发动机进气口(如果存在的话,无论是项目630或631)被供给有非常轻微地低于大气压的压力。在项目635处,发动机排气背压通常仅比进气高2-7英寸水柱。然而,在项目632的进气口处或项目631的排气口处的绝对压力可能是几个大气压,某些发动机在大于30psig的涡轮增压条件下运行。具有发动机设计经验的人员应当认识到,冷却通常存在于本文中未示出的部件之间,并且在大多数情况下不会作为SCC的一部分被更改。对热气体进行冷却的中间冷却器通常会存在于增压器(项目630)与涡轮压缩机(项目631)之间。也对热气体进行冷却的后冷却器通常会存在于涡轮压缩机(项目631)与发动机(项目632)之间。多级涡轮增压器或并联的多个涡轮增压器是常见的并且在本文中不被排除。

[0080] 如后续将讨论的那样,在包括高达“涡轮增压”压力的压力的正压力下运作子系统526(进气子系统),并且通过这样做使得发动机632能够提供其额定输出,而无需使用部件(项目630、631或634)或者与那些部件相关联的冷却器。当完成后,在项目635处的温度将更高,因为该项目635将代表项目634的入口,而不是项目634的排放口,在额定功率的中速发动机中该项目635和项目634的温度差约为300华氏度。应当理解,可以进一步提高后续子系统的效率,降低发动机维护成本并且提高可靠性。

[0081] 还参考图7,该图示出了图5的废热发电系统和排气水分离器子系统。参考图7,子系统524(超临界/亚临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环废热发电发生器)在存在热解时经由318在点718处接收高温发动机排气,或者在不存在热解时在发动机排气635处直接接收高温发动机排气并且经由热侧热交换器736对该高温发动机排气进行冷却。这在点737(子系统524的涡轮机入口)处导致1050华氏度(比排气温度低约50华氏度)且标称6000psia的超临界压力的条件。

[0082] 仍参考图7,子系统524使用纯的CO<sub>2</sub>作为工作流体。流体通过涡轮机738膨胀至1200psia(在设计点处),从而驱动发电机739和压缩机740。低侧热交换器741在点742处将超临界CO<sub>2</sub>冷却至约110华氏度。工作流体(CO<sub>2</sub>) 在压缩机740中被再压缩,并在约6000psia、275华氏度下被提供到热交换器736。最终结果是,活塞发动机的排气从在点35或718处的1100华氏度被冷却至在点743处的300华氏度。注意,所有的这些压力和温度是在设计点下进行估计的并会随负载变化。另外注意,封闭式超临界CO<sub>2</sub>布雷顿循环热回收系统通过在发电机739(在恒定速度下运行,因此压力比恒定)处的负载管理进行控制,并通过改变循环中的总质量进行控制。虽然1200psia的入口、6000psia的出口可以是压缩机在全功率下的设计点,但是在1/10功率下,人们会期望在相同点处为标称120psia和600psia-并且循环效率在理论上是不变的(实际上它会略微降低,因为循环在超临界压力下更接近最佳)。在压力比和热交换器设计压力中的其他选择当然是可能的。压力比为5对于单独的布雷顿循环不是最佳的,但是给出了合理地低的压缩机出口温度,使得能够很好地使用可用的发动机或者发动机和热解子系统的排气废热。

[0083] 仍参考图7,子系统525、即排气水分离器(项目744)由集液器(项目745)组成,该集液器通常包括潜水式高流量泵和液位控制系统(未示出)。来自项目745的热水经由未示出的热交换器被冷却,并且被喷射到该子系统上游的管线743中。这使得能够使用来自项目745的约100华氏度的水将来自项目524(管线743)的300华氏度的排气温度快速降低到约115华氏度。由于喷水而导致的水温、流率和温度变化的设计点可能不同,并且可能发生季节性变化和基于功率水平的变化。选择子系统525内的确切水温,并因此选择气体温度,以管理水蒸气分压,使得在发动机中的所有点处防止水冷凝,且使得不会发生腐蚀。项目744还包括挡板(项目746)和除雾垫(项目747),该挡板和除雾垫协同工作以在项目748的EGR管线处提供饱和的但为气态的冷却排气。

[0084] 还参考图8,该图示出了图5中所示的SCC进气子系统、氧气设备(脱氮)子系统以及通向热解阀的额外的O<sub>2</sub>(项目526、527和529)。参考图8,去除了水的经冷却的排气(项目848)(而不是蒸气)进入进气子系统(项目526),该进气子系统在项目849处为发动机创造了人造气氛。进气子系统由具有用于任何冷凝的排水的压力容器(项目850)组成,该压力容器可选地通过鼓风机(项目852)供给空气(项目851)。当存在鼓风机(项目852)时,能够在正压力下运作SCC EGR系统,直至发动机的正常额定涡轮增压压力。当不存在鼓风机时,项目850的容器通常通向空气并且在略低于大气压下运行,从而根据需要吸入空气。

[0085] 仍参考图8,子系统526的进气子系统在阀853处接收纯度为30-90+%的氧气,这取决于氧气源类型和设计点。在燃烧器需要额外的氧气的那些情况下,该氧气管线也经由阀529被提供到热解燃烧器(子系统523)。另外,已经认识到热解系统可以具有多个燃烧器,因此存在多个项目529的可能性。此外,在某些发动机中,可能有利的是,在项目849处的主体O<sub>2</sub>水平基本上低于21%的情况下运作发动机,然而,所选择的燃料和氧气的可燃性极限(例如,甲烷的最小O<sub>2</sub>水平为12%)可能指示在火花室或燃烧器处可以将额外的O<sub>2</sub>排放到发动机中,特别是有助于启动或关闭设计点运作。

[0086] 仍参考图8,氧气子系统(项目527)被描绘如下。空气(项目854)被供给到鼓风机(项目855),然后被供给到阀组件(项目856),然后根据时间流入分子筛容器(项目857)中。分子筛优先吸附N<sub>2</sub>,并且富氧流(减少的N<sub>2</sub>)经由阀组件858被提供到缓冲罐859,从而导向排

气阀(项目853)。

[0087] 仍参考图8,周期性地,分子筛容器857将用 $N_2$ 和其他非期望的空气成分来饱和,并且当其饱和或经计算接近饱和时,经由阀组件(项目856和858)切换活动容器。经常将均衡阀(项目860)短暂地打开,以防止由于快速压力变化而引起的喘振或床提升。经由阀组件(项目861)和真空泵(项目862)对不在管线上的床进行装填(去除 $N_2$ 和其他污染物)。通常,VPSA氧气设备中的压力比为3:1或4:1,因此在项目862处的7.5psia的真空与项目855处的约25+psia(11psig)鼓风机相匹配。

[0088] 还参考图9,该图示出了图5中所示的GCS子系统528。参考图9,描绘了两阶段的基于分子筛的GCS。在讨论子系统528的细节之前,重要的是讨论系统设计和运作协议。根据US 9,194,340B2和其他工作,能够设计一种SCC动力系统,该SCC动力系统的经冷却的排气中的原始 $CO_2$ 水平超过50%。理论上,在100%的 $O_2$ 源并且没有空气进入的情况下,在项目848中可能仅具有 $CO_2$ 和水蒸气。于是, $CO_2$ 的纯度主要取决于水的分压。如果管线848在约140华氏度下的压力为15psia并且水的分压为3psia,则管线848中具有80%(以体积计)的 $CO_2$ 。在这种情况下,从GCS的角度来看,优选的是仅对 $CO_2$ 进行压缩、脱水和液化,正如图2中所描绘的那样。更极端的是,如果在某些其他类型的发动机中,管线848的压力大于300psia,则在GCS之前, $CO_2$ 的纯度将为99%。具有80%或99%的原始 $CO_2$ 的这两个动力系统将需要接近100%的 $O_2$ 源,导致 $O_2$ 源几乎只能是低温的,并且将使得成本很高,特别是以本发明所关注的规模衡量。与大型固定式发电厂相比,本发明进一步集中于分布式发电厂,这不仅需要邻近燃料源,而且需要邻近用于 $CO_2$ 封存或使用的位置。结果,尽管理论上人们可以在宽范围内应用本发明和技术,但是本文中的讨论将集中在移动或半永久或模块化的动力系统中,该动力系统包括活塞发动机、或者通常分别具有约500KW至约5MW的输出的浓燃式或稀燃式发动机、以及输出通常远低于30MW的小型燃气轮机(从小型工业机械到小型航空衍生燃气轮机)。结果,本发明只是这些机器的一种用途,并且本发明太小以至于不能从经济的角度证明对这些机器的设计进行重大(如果有的话)的改变,结果,本发明在一个方向上强调了热解和SCC部件,这导致尽可能地减少对标准发动机的改造。

[0089] 可替代地,使得氧气在子系统526处与空气混合的较低成本的氧气源或较小的氧气源从根本上降低了氧气设备的成本。在低纯度氧气下的运作还提供了全新的氧气源级别,即膜,该膜难以产生大于40%(以体积计)的氧气水平。使用较低纯度的 $O_2$ 将增加GCS的成本,但是仍然存在净节省。这些较低氧气纯度的情况(具有较低的原始 $CO_2$ 水平)仍然可以与经济可行的GCS系统兼容,并与发动机参数(在分子量、比热比、进气密度方面)的变化兼容,使得利用SCC运作的发动机落入原始发动机设计的参数内。在某些情况下,其中发动机已经在排气中具有较高的 $CO_2$ 水平的状态下运行,氧气富集和SCC再循环的水平非常低。

[0090] 例如,发动机在排气 $CO_2$ 接近10%空气呼吸的状态下运行。这对于经济上可行的分子筛捕获而言太低了,但是从根本上来说并非如此。在EGR之前将 $O_2$ 水平适度增加至25%,则将实现14%的原始 $CO_2$ 水平,而将 $O_2$ 水平适度增加至35%,则将获得21%的原始 $CO_2$ 。

[0091] 图11中所示的表格示出了稀燃式中速发动机在3MW级别下的模拟结果。如可以看到的,36%至43%的适度的 $O_2$ 水平足以使 $CO_2$ 水平在去除水之后达到接近20%,也就是说,排气 $O_2$ 被保持在 $\lambda 2.0$ 的设计条件下。降低该数值是合理的,其仍是稀燃式的,但与可燃性指标一致,并且使 $CO_2$ 水平达到25%,几乎是空气呼吸的5倍。



[0092] 当然,对于仅是稀燃式的燃气轮机而言也有类似的结果。考虑到氧气设备是本发明的最昂贵的部件,系统的优化通常将在较低的氧气水平、但较大的GCS系统中进行。在燃气轮机的情况下,由于排气 $O_2$ 水平通常为10-15%,因此通常需要与设计点 $O_2$ 的偏差以达到上述相同的原始 $CO_2$ 水平,但是这些偏差并非不合理的。

[0093] 更重要的也许是,SCC EGR由于 $CO_2$ 的存在而增加了进气密度,但是由于水的存在和由于较高的温度而使进气密度降低。进气密度的净变化并不显著,并且实际上即使在相对较大的EGR比率下,也处于燃气轮机设计的范围内,因为很大一部分EGR流仍是 $N_2$ 。对于小型工业燃气轮机或小型航空衍生涡轮机、特别是对于单轴设计而言,最显著的变化是由于高于ISO入口温度而导致的降低额定值(de-rate)。这些降低额定值是显著的,其高达额定功率的25%,但是可避免的替代方案是为小规模的小型市场设计全新的燃气轮机,这显然是行不通的。

[0094] 在图12中总结了在利用甲烷燃料(无热解)的小型工业燃气轮机上的具有EGR的SCC的化学过程流程图模拟的结果,并且指示了利用 $O_2$ 和空气的混合物以及大量的SCC EGR,可以浓缩 $CO_2$ ,从而在仅对分子量进行非常适度的改变的情况下实现GCS运作。当添加热解时,这在 $CO_2$ 浓缩方面会好得多。注意:SCC气氛低于12%的情况将需要将 $O_2$ 直接引入燃烧室中,这在该特殊的涡轮机中容易实现。

[0095] 以上文作为背景,再次参考图9,如所描绘的那样,子系统528由两阶段的基于分子筛的脱水和捕获系统组成。项目963是鼓风机,其具有25-30psia的典型的排气压力。在管线848已经在该压力或更高压力下运作的情况下,该部件不是必需的,而是由控制阀代替。鼓风机(项目963)包括排气热交换器和水分离器,以排出额外的液态水。分子筛容器964由计时器驱动的阀歧管965和966提供服务,以向适当的容器964进料。这些容器(在设计中最常见的数量是3个)均由端口967和968提供服务。项目967连接到干热气体供给部,该干热气体供给部可以直接经由子系统524的涡轮机738处的端口提供,或者替代地可以如本文中后续所述的那样提供。

[0096] 仍参考图9,项目968处的端口通向大气,并且将由水蒸气和惰性气体组成。三个容器是标准的,因为这使得一个容器能够处于处理过程中,一个容器能够用干热气体加热以再生,并且一个容器能够被动地冷却以准备再次处于处理过程中。这也可以用两个容器来完成,但是容器的尺寸必须稍微更大。

[0097] 吸附过程在分子筛964上产生1800英热单位/磅(BTU/lb)的热量,因此来自TSA的干燥废气经由热交换器969被供给到下一阶段,即VPSA捕获系统。如目前的实施方式,GCS由冷水回路提供服务,但是根据系统位置和其他规格,空冷式热交换器也是可能的。

[0098] 仍参考图9,由阀歧管971、972和973提供服务的项目970是VPSA捕获容器。这些VPSA捕获容器被装载有捕获 $CO_2$ 、CO、HC、 $NO_x$ 的分子筛并且是超尺寸的,因此捕获了所有受管制的污染物,从而使系统是无排放的。在释放到大气方面通常在发动机排气中作为一个问题出现的CO、HC和 $NO_x$ 水平(ppm水平)对于封存或EOR应用而言不是问题。真空泵974周期性地去除所捕获的 $CO_2$ 和其他痕量气体,并且经由热交换器975将其输送到缓冲罐976,然后输送到多级压缩机977和存储罐978中。

[0099] 还参考图13,示出了一种方法,该方法用于提供根据本文中所描述的本发明的碳负性动力系统。三个输入步骤驱动方法流程图,步骤142预测功率需求;步骤152预测燃料来

源;以及步骤132预测CO<sub>2</sub>需求。步骤132用于确定所需的SCC(步骤33)。预测的CO<sub>2</sub>需求也与预测的功率需求(步骤142)一起使用,以选择发动机尺寸和类型(步骤143)。确定SCC(步骤33)与步骤144(确定燃料LHV和其他发动机需求)一起使用,以确定所需的O<sub>2</sub>纯度和O<sub>2</sub>设备的尺寸(步骤134),该步骤134驱动了GCS方法的选择(步骤135)和GCS设备的尺寸设定(步骤136)。步骤134和136导向步骤137,该步骤137使GCS和O<sub>2</sub>设备的组合尺寸和所需功率最小化。步骤138将系统净功率、燃料速率和CO<sub>2</sub>速率与需求进行比较,步骤138的输出驱动步骤139,即设定废热发电系统的尺寸。所预测的燃料来源(步骤152)确定是否需要热解,步骤145以及步骤143(发动机选择和尺寸设定)确定热解尺寸设定。步骤160在构建和运作碳负性动力系统170之前进行细化和优化,并且根据需要经由路径161重复进行。

[0100] 其他系统属性

[0101] 还存在只能参考多个附图在系统级别上进行讨论的其他系统属性和独特的好处。在发动机中使用燃料的能力与发动机燃料规范有关,该发动机燃料规范可以包括明显的项目,例如压力和温度,还包括最小热值、最大热值、甲烷值、沃泊指数(Wobbe Index, WI)、污染物水平(例如, H<sub>2</sub>S)以及其他参数。改变人造气氛的能力(包括低于或高于21%的氧气纯度,或者更大或更小的EGR)可以改变发动机的公差。具体地:CO<sub>2</sub>减少了爆震,因此较热的燃料可以与更多的EGR一起使用;燃料中的惰性气体(或者换句话说,低燃料热值)可以通过从人造气氛中去除惰性气体、通过降低EGR、增加O<sub>2</sub>或两者来进行补偿;由于低O<sub>2</sub>或其他混合物相关的问题而导致的熄火情况可以通过调整总体人造气氛或者通过直接注入O<sub>2</sub>(例如,注入燃烧室或火花室中)来进行补偿。

[0102] 热解、特别是低温热解将不能制造出完美管道质量的燃料,并且将制造出根据原料变化的燃料,除非支持某种类型的工厂,否则燃料将趋于随季节和气候(湿度水平、化学成分)而变化。SCC发动机适应各种燃料参数的能力使得能够更加完全地使用热解原料资源。

[0103] 在较高的SCC EGR压力(仍低于涡轮增压压力)下运作(这似乎是发动机设计的根本变化)实际上对该循环非常有益。所有管道装置变小,消除了诸如鼓风机963的部件,鼓风机852处的功率水平低于鼓风机963处的功率水平,较高的压力降低了相对分压,并因此降低了水蒸气含量,通常氧气设备具有在此适度压力下输送O<sub>2</sub>的固有能力和。

[0104] 经由在较高的SCC压力下运作来消除涡轮增压器,将使得能够提高已经提高的热解效率,因为排气将变热约300华氏度,并且排气也将趋于增加可以经由子系统524(废热发电子系统)产生的功率量。

[0105] 稀燃式活塞发动机比浓燃式活塞发动机更高效,但是在SCC中存在与高的排气O<sub>2</sub>水平相关联的问题。如本文中所描述的,稀燃式活塞发动机与热解的结合解决了该问题,并且还使得热解系统是无排放的。

[0106] 燃气涡轮发动机在小尺寸方面并不比稀燃式活塞发动机更高效,但是这些燃气涡轮发动机具有更高的排气温度和高得多的排气O<sub>2</sub>水平,这可能导致与热解系统同等有益的集成,并且当与废热发电子系统集成时有益得多。

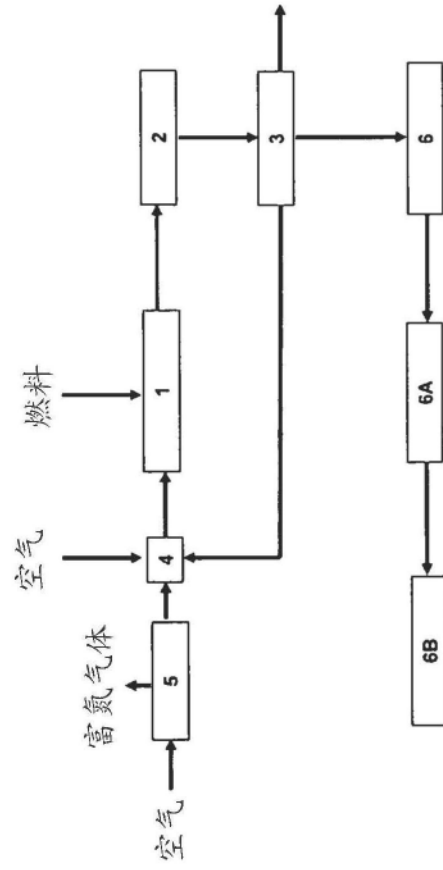


图1

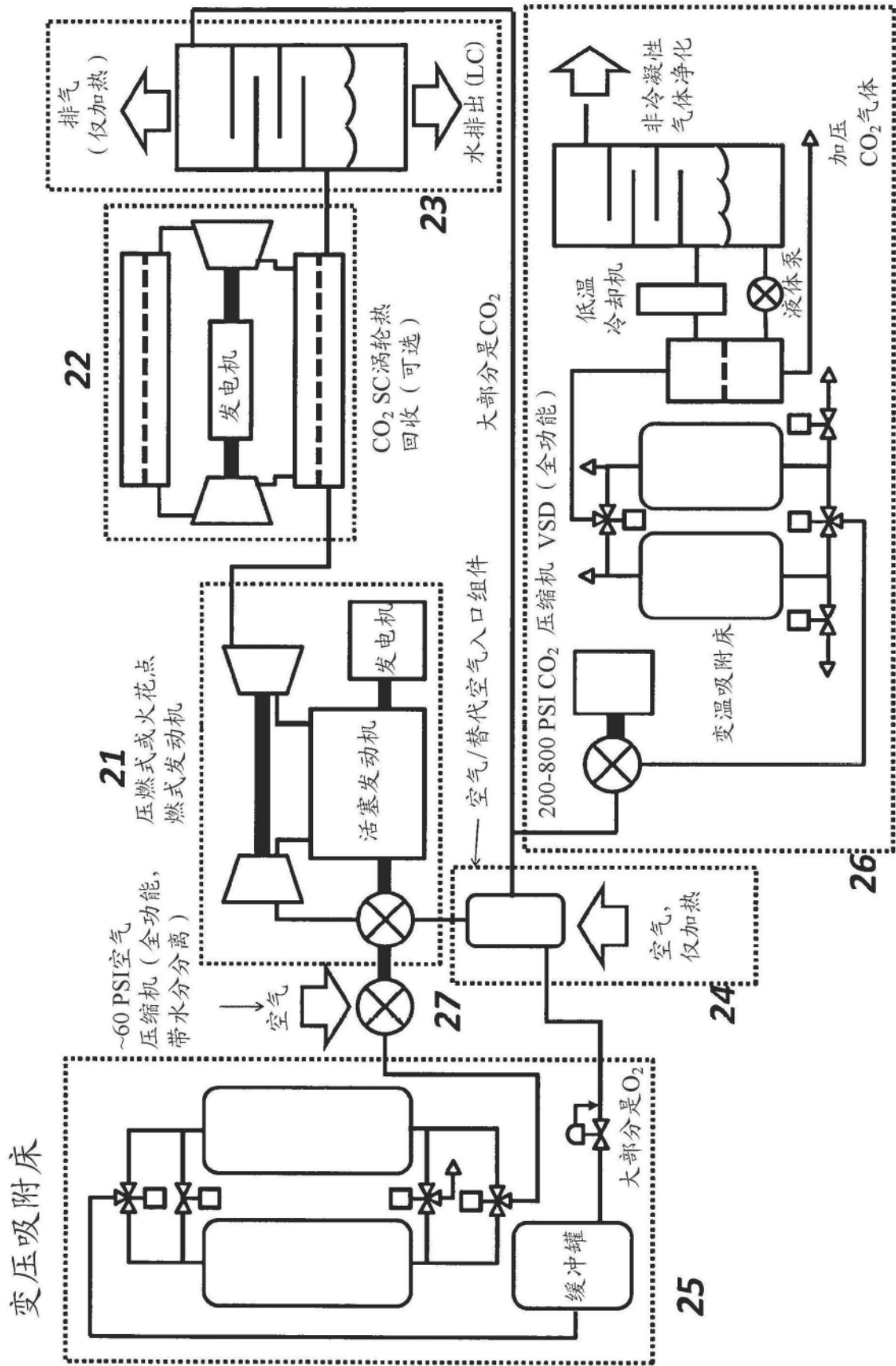


图2现有技术

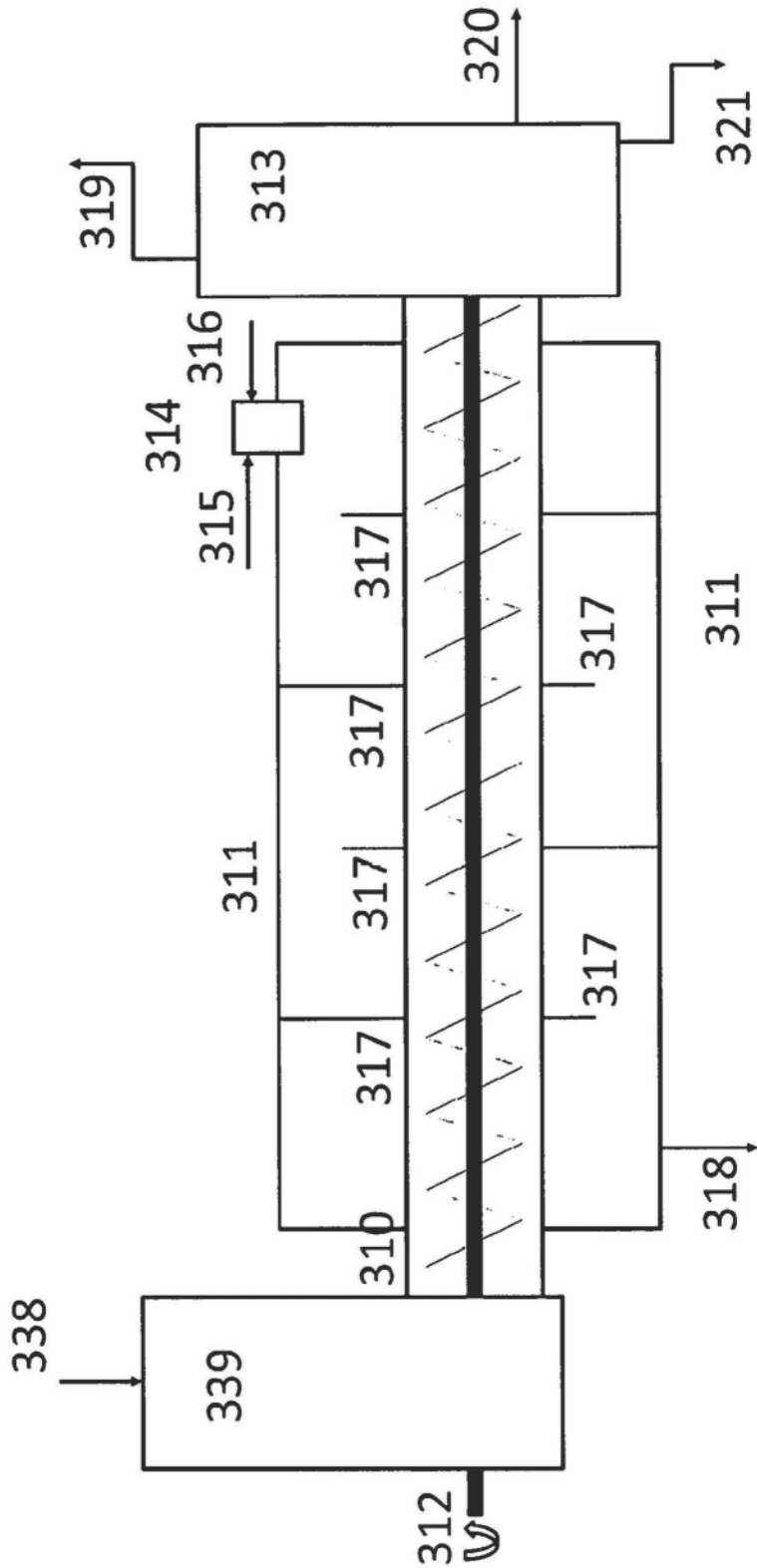


图3

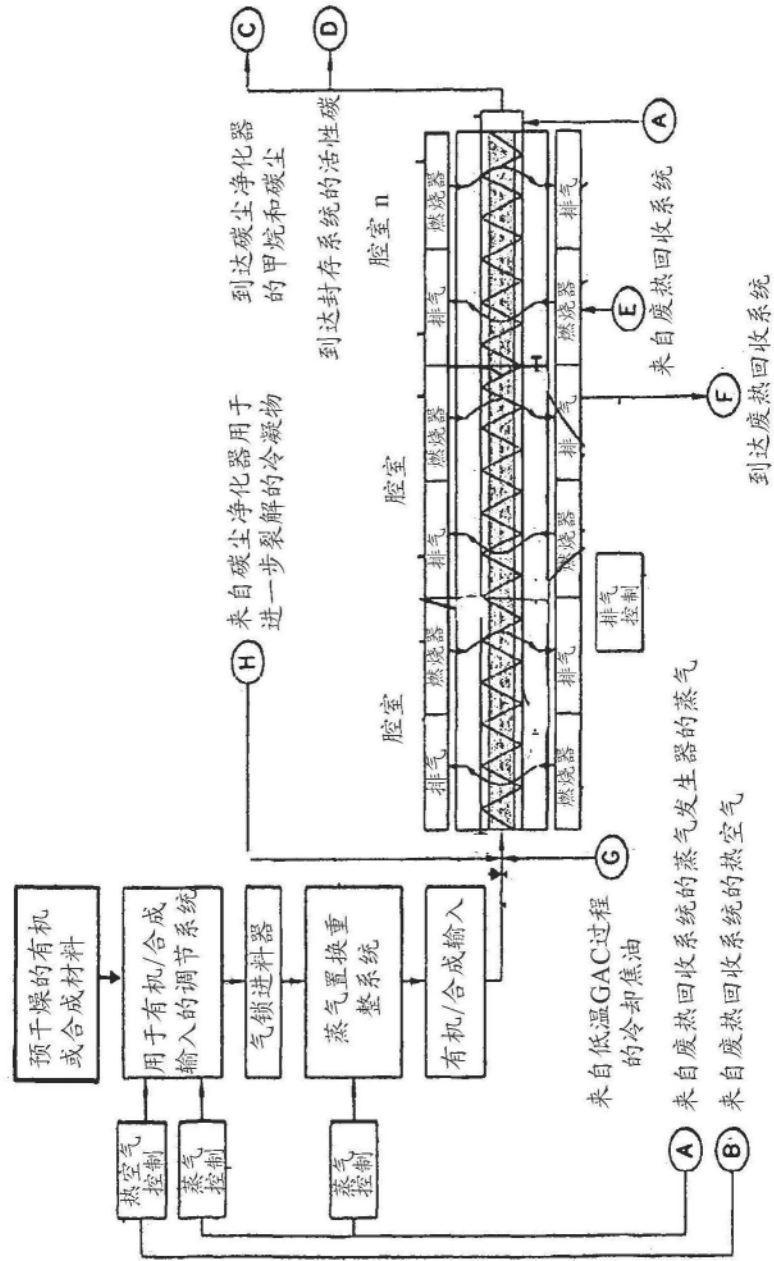


图4现有技术

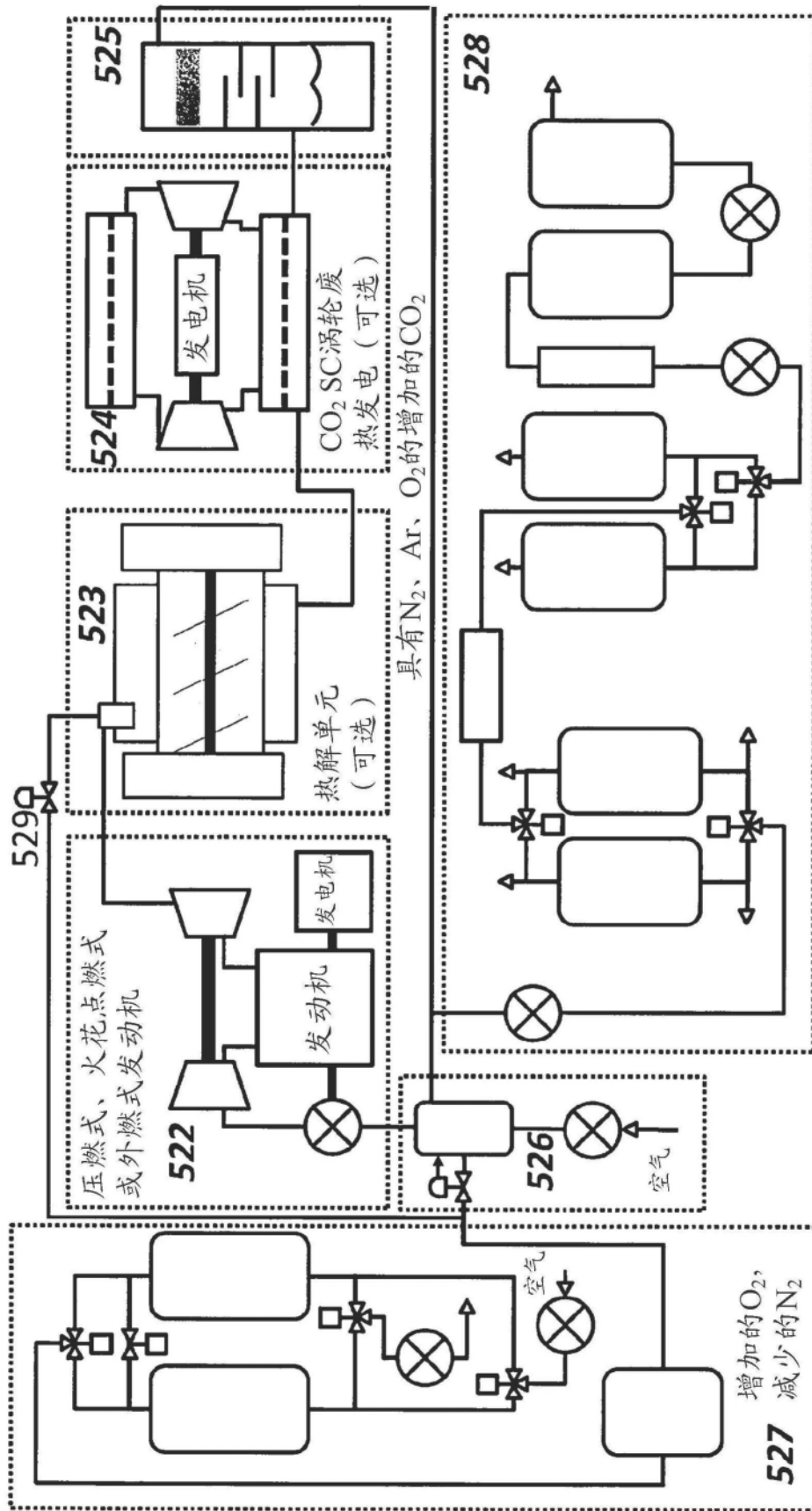


图5

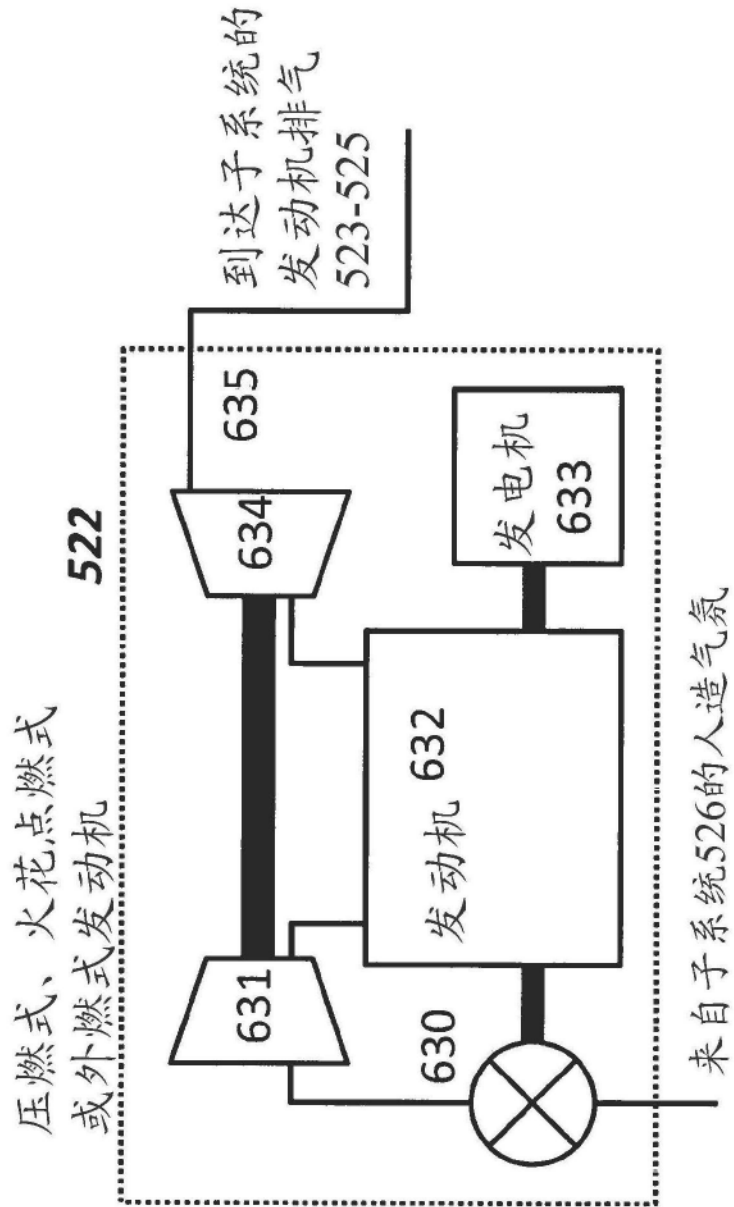


图6



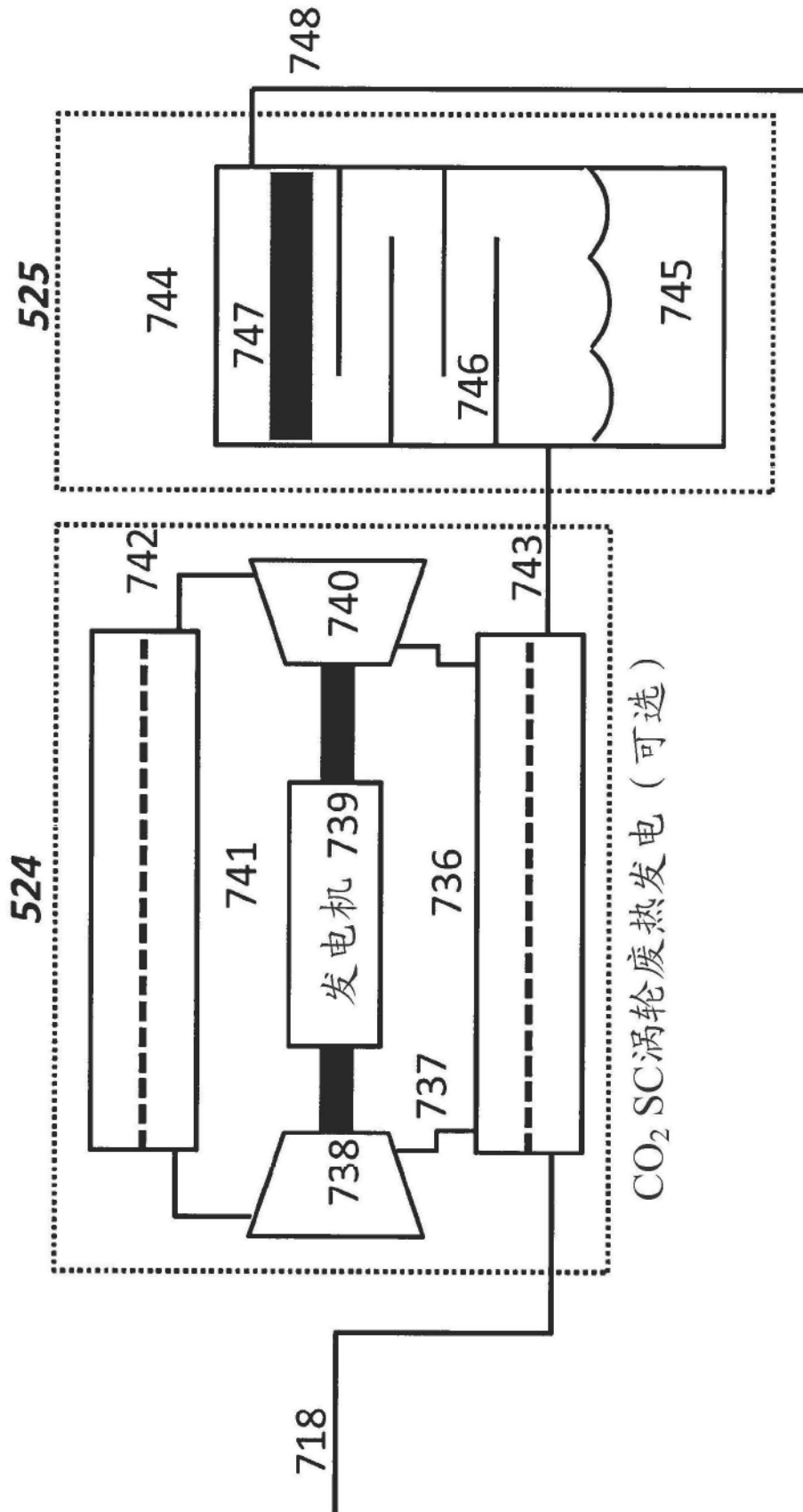


图7

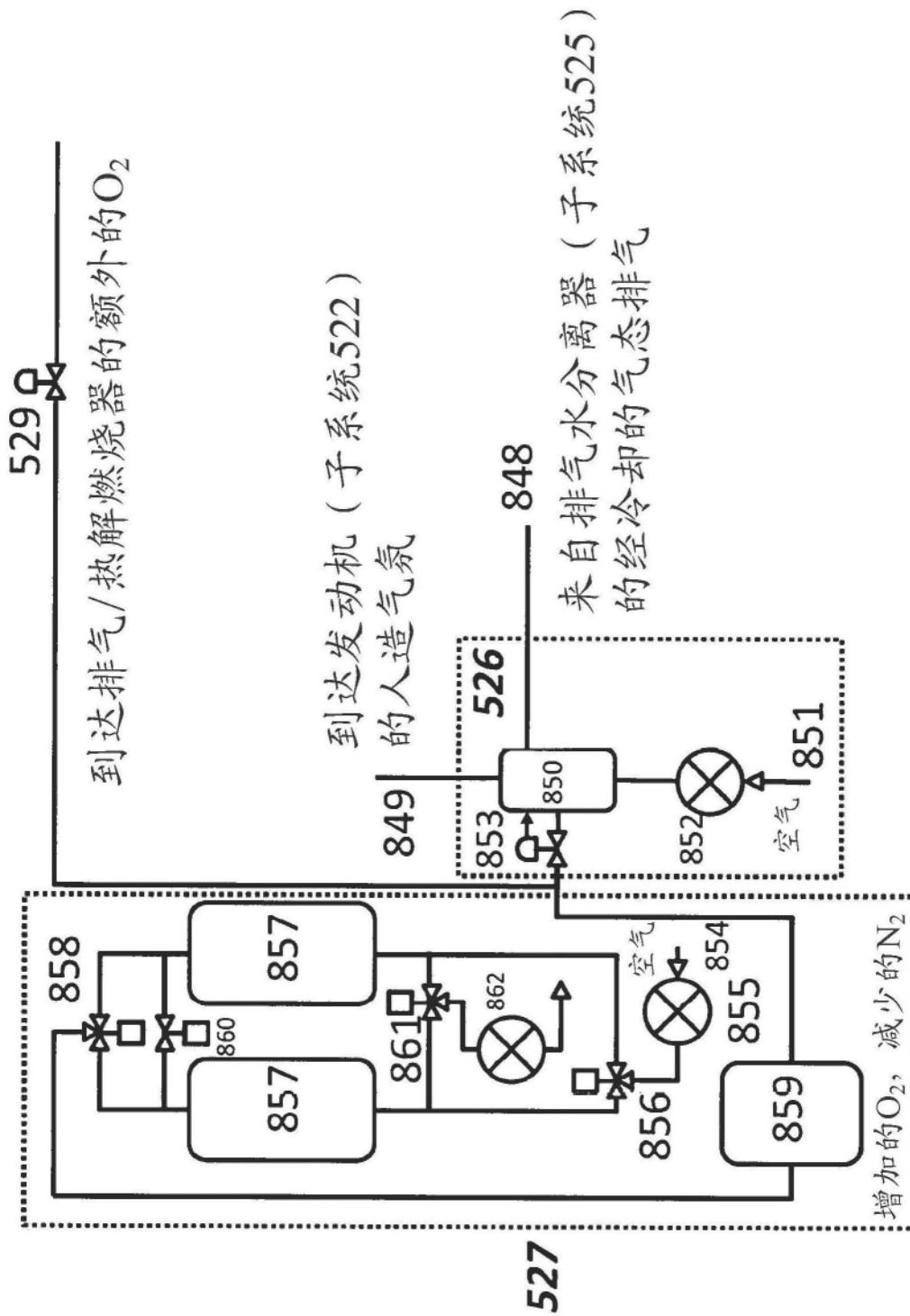


图8

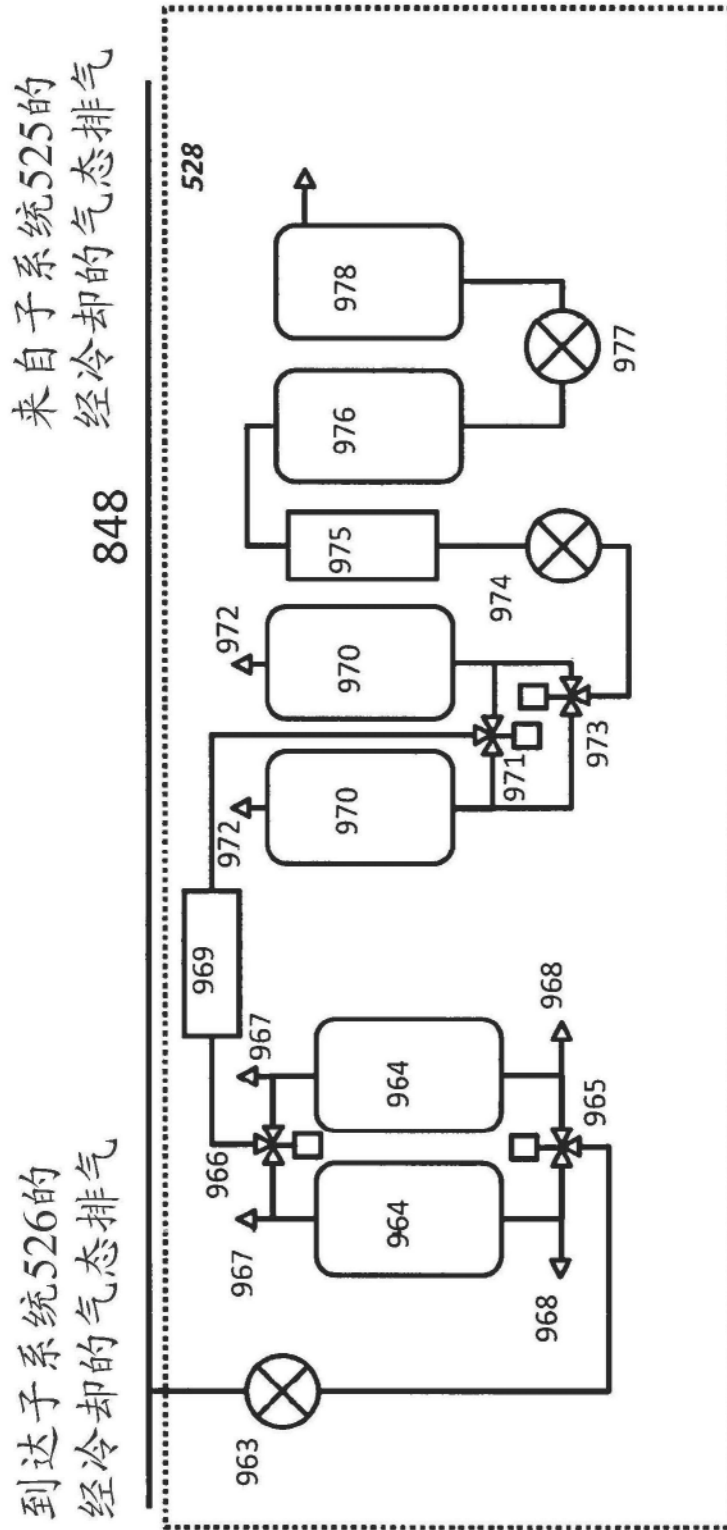


图9

O <sub>2</sub> 纯度	CO <sub>2</sub> 纯度	代表
在EGR之前的进气口处的体积百分比	热排气的体积百分比	
21% (空气)	2%	回收涡轮增压机, 无SCC
21% (空气)	3%	典型涡轮增压机, 无SCC
21% (空气)	6%	典型的稀燃式活塞, 无SCC
21% (空气)	10%	典型的浓燃式活塞, 无SCC
25%	14%	SCC浓燃式活塞
35%	21%	SCC浓燃式活塞
50%	25%	SCC浓燃式活塞
70%	40%	SCC浓燃式活塞
91%	60%	SCC浓燃式活塞

图10

	总功率 (hp)	O <sub>2</sub> 设备进气 (lb/hr)	空气进气 (lb/hr)	SCC部分 (再循环/总计)	原始CO <sub>2</sub> 的百分比 (湿润和干燥)	排气温度和O <sub>2</sub> 的百分比
(空气)(21%)	4510	0	47002	0.00	5.1%, 5.7%	892 F, 9.4%
28%	4443	22000	25000	0.40	8.5%, 10%	892 F, 10.4%
36%	4384	30000	15000	0.59	12.4%, 14.5%	903 F, 10.5%
43%	4339	33000	10000	0.69	16.6%, 19.4%	905 F, 10.0%
50%	4296	36000	7200	0.74	20.0%, 23.4%	917 F, 10.8%

图11

SCC之前的 O <sub>2</sub> 和空气	总功率 (hp)	SCC气氛 (O <sub>2</sub> 的百分比)	排气速率 (lb/hr)	SCC部分和 进气摩尔量	原始CO <sub>2</sub> 的百分比 (湿润和干燥)	排气温度和 O <sub>2</sub> 的百分比
(空气)(21%)	2656	20.7%	116772	0.00 / 28.9	2.7%, N/A	1026 F, 15%
34% O <sub>2</sub> (混合物)	2305	20.4%	113952	0.72 / 29.2	9.2%, 10.6%	1044 F, 15%
34% O <sub>2</sub> (混合物)	2316	12.7%	117910	0.81 / 29.6	13.6%, 15.8%	1039 F, 7%
34% O <sub>2</sub> (混合物)	2312	7.4%	114471	0.84 / 29.8	16.7%, 19.4%	1062 F, 2%
43% O <sub>2</sub> (混合物)	2362	19.8%	115654	0.82 / 30.0	15%, 17.5%	1073 F, 14%
43% O <sub>2</sub> (混合物)	2298	13.3%	119129	0.85 / 30.4	18.8%, 22%	1049 F, 8%
43% O <sub>2</sub> (混合物)	2276	7.7%	118202	0.88 / 30.7	22.2%, 26%	1054 F, 2%

图12

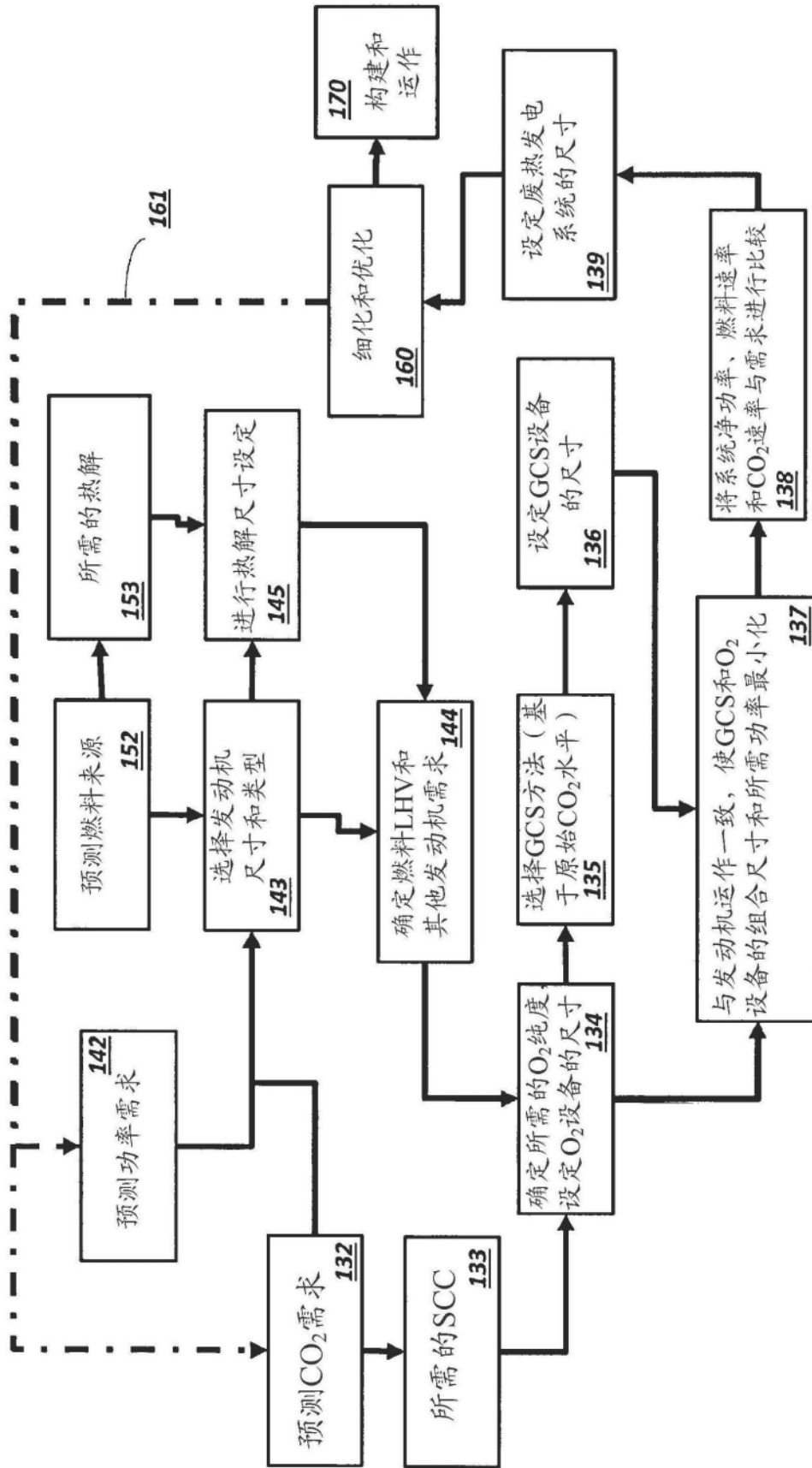


图13