



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106662014 B

(45)授权公告日 2018.08.10

(21)申请号 201580047838.9

(22)申请日 2015.07.07

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106662014 A

(43)申请公布日 2017.05.10

(30)优先权数据
62/021,839 2014.07.08 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.03.06

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2015/039373 2015.07.07

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/007509 EN 2016.01.14

(73)专利权人 八河流资产有限责任公司
地址 美国北卡罗来纳州

(72)发明人 R.J.阿拉姆 B.A.福里斯特
J.E.费特维特

(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所
11105

代理人 刘蕾

(51)Int.Cl.
F02C 3/34(2006.01)

(56)对比文件
US 3754406 A,1973.08.28,
US 2013/0104525 A1,2013.05.02,
US 2013/0205746 A1,2013.08.15,
US 3796045 A,1974.03.12,
WO 2013/067149 A1,2013.05.10,
CN 102834670 A,2012.12.19,

审查员 周红叶

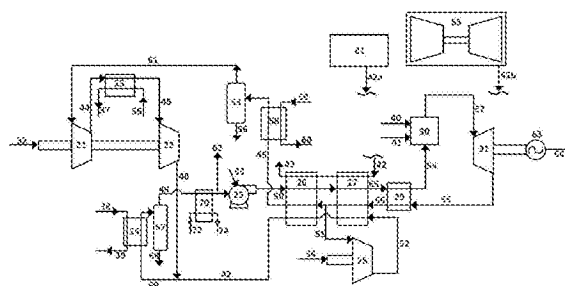
权利要求书3页 说明书13页 附图3页

(54)发明名称

用于加热再循环气流的方法及发电的方法和系统

(57)摘要

本公开涉及主要使用CO₂作为工作流体的提供电力生成的系统和方法。特别是,本公开提供了使用来自CO₂压缩机的一部分压缩热作为提高发电系统和方法的整体效率所需的附加加热。



1. 加热再循环气流的方法,包括:
使气流G在压力 P_1 和温度 T_1 下通过回热式热交换器,使气流冷却到低于 T_1 的温度 T_2 ;
将气流G分离成第一部分 G_1 和第二部分 G_2 ;
将气流部分 G_1 压缩至大于 P_1 的压力 P_2 ;
将气流部分 G_2 压缩至大于 P_1 的压力 P_3 ,从而将气流部分 G_2 加热至高于 T_2 的温度 T_3 ;
从经压缩的气流部分 G_2 中提取热;
将气流部分 G_1 和气流部分 G_2 合并以形成合并的再循环气流 G_c ;
将再循环气流 G_c 泵送到大于 P_2 且大于 P_3 的压力 P_4 ;和
将再循环气流 G_c 通到回热式热交换器,使得气流 G_c 被冷却气流G加热;
其中从经压缩的气流部分 G_2 提取的热被添加到泵送到压力 P_4 之后的再循环气流 G_c 。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中温度 T_3 为 100°C 至 400°C 。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中气流部分 G_1 的压力 P_2 和气流部分 G_2 的压力 P_3 各自独立为40bar (4MPa) 至100bar (10MPa)。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中再循环气流 G_c 的压力 P_4 为100bar (10MPa) 至500bar (50MPa)。
5. 根据权利要求1所述的方法,其中,基于气流G的总质量,气体部分 G_1 与气体部分 G_2 的质量比为50:50至99:1。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中通过回热式热交换器之后并接收来自经压缩的气体部分 G_2 的再循环气流 G_c 的温度 T_4 可与 T_1 相差 50°C 以内。
7. 根据权利要求1所述的方法,其中气流部分 G_2 用不带有中间冷却的多级压缩来压缩。
8. 根据权利要求1所述的方法,其中在从气流部分 G_2 中提取热之后,气流部分 G_2 在与气流部分 G_1 合并之前被进一步压缩。
9. 根据权利要求1所述的方法,其中回热式热交换器包括串联的三个热交换器或三个热交换段,使得热在于温度范围 R_1 中操作的第一热交换器或热交换段、于温度范围 R_2 中操作的第二热交换器或热交换段以及于温度范围 R_3 中操作的第三热交换器或热交换段中传递,其中的温度关系为 $R_1 > R_2 > R_3$ 。
10. 根据权利要求9所述的方法,其中气流G在第一热交换器或热交换段与第二热交换器或热交换段之间分离。
11. 根据权利要求9所述的方法,其中气流G在第二热交换器或热交换段与第三热交换器或热交换段之间分离。
12. 根据权利要求9所述的方法,其中从经压缩的气流部分 G_2 中提取的热在第三热交换器或热交换段与第二热交换器或热交换段中的一个或两个中添加到再循环气流 G_c 中。
13. 根据权利要求1所述的方法,还包括将热添加到泵送至压力 P_4 之后的再循环气流 G_c ,其中所添加的热来自空气分离单元和燃气轮机中的一个或两个。
14. 根据权利要求1所述的方法,还包括将经加热的再循环气流 G_c 从回热式热交换器通入燃烧器,所述燃烧器用氧燃烧燃料以形成燃烧产物流。
15. 根据权利要求1所述的方法,其中气流G为涡轮机排气流。
16. 发电方法,所述方法包括:
在燃烧器中在再循环 CO_2 流存在下用氧燃烧燃料以产生含 CO_2 的燃烧流;

- 将含CO₂的燃烧流通过涡轮机以膨胀所述含CO₂的燃烧流,发电,并形成涡轮机排气流;
从涡轮机排气流中提取热;
将涡轮机排气流分开形成第一涡轮机排气部分和第二涡轮机排气部分;
从第一涡轮机排气部分分离水以形成主再循环CO₂流;
压缩主再循环CO₂流;
压缩第二涡轮机排气部分以形成经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分;
从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取热;
从经冷却、经压缩的第二涡轮机排气部分分离水以形成副再循环CO₂流;
将主再循环CO₂流和副再循环CO₂流合并以形成合并的再循环CO₂流;
压缩合并的再循环CO₂流;
用从涡轮机排气流提取的热来加热合并的再循环CO₂流;和
用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热合并的再循环CO₂流。
17. 根据权利要求16所述的方法,其中含CO₂的燃烧流具有500℃至1,700℃的温度和100bar (10MPa) 至500bar (50MPa) 的压力。
18. 根据权利要求16所述的方法,其中跨越涡轮机的压力比为5至12。
19. 根据权利要求16所述的方法,其中,在包括至少三个段或包括至少三个独立热交换器的回热式热交换器中从涡轮机排气流中提取热。
20. 根据权利要求19所述的方法,其中用从涡轮机排气流中提取的热加热合并的再循环CO₂流以及用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热合并的再循环CO₂流在回热式热交换器中进行。
21. 根据权利要求16所述的方法,其中,基于涡轮机排气流的总质量,第一涡轮机排气部分与第二涡轮机排气部分的质量比为50:50至99:1。
22. 根据权利要求16所述的方法,其中从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热在100℃至400℃的温度范围内。
23. 根据权利要求16所述的方法,其中主再循环CO₂流和第二涡轮机排气部分被独立地压缩至40bar (4MPa) 至100bar (10MPa) 的压力。
24. 根据权利要求16所述的方法,其中用从涡轮机排气流中提取的热加热并用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热之后的合并的再循环CO₂流的温度与涡轮机排气流温度相差50℃以内。
25. 根据权利要求16所述的方法,其中第二涡轮机排气部分被绝热压缩而没有压缩级之间的中间冷却。
26. 发电系统,包括:
燃烧器,其构造为排出燃烧流;
发电涡轮机,其构造为接收和膨胀燃烧流并形成涡轮机排气流;
回热式热交换器,其构造为接收涡轮机排气流;
流分离器,其构造为将经冷却的涡轮机排气流分离成第一气流和第二气流;
第一压缩机,其构造为接收和压缩第一气流;
第二压缩机,其构造为接收和压缩第二气流;
泵,其构造为对第一气流和第二气流联合加压,所述泵位于第一压缩机和第二压缩机

的下游；

第一流路，其穿过回热式热交换器并构造用于涡轮机排气流的通过；

第二流路，其穿过回热式热交换器并构造用于联合加压的第一气流和第二气流的通过；

第三流路，其穿过回热式热交换器并构造用于经压缩的第二气流的通过；

其中第一流路和第三流路构造用于加热第二流路。

27. 根据权利要求26所述的发电系统，其中回热式热交换器包括串联的三个或更多个热交换器或串联的三个或更多个加热段。

28. 根据权利要求26所述的发电系统，还包括一个或多个分离器，其构造用于从第一气流和第二气流中的一个或两个分离至少水。

29. 根据权利要求26所述的发电系统，其中第一压缩机包括带中间冷却的多级压缩机。

30. 根据权利要求26所述的发电系统，其中第二压缩机包括在压缩级之间没有中间冷却的绝热多级压缩机。

用于加热再循环气流的方法及发电的方法和系统

技术领域

[0001] 本公开的主题涉及用于发电(诸如电力)的系统和方法,其以理想效率工作,这通过在热交换器中使用另外热源对至少部分再循环CO₂流进行附加加热来实现。特别地,来自另外来源的热可以至少部分来源于至少部分再循环CO₂流的压缩。

背景技术

[0002] 来自燃料燃烧的常规发电方式通常缺乏同时实现高效发电和碳捕捉(例如,用于封存或其它用途)的能力。具有碳捕捉的高效发电领域中的一个出版物,授予Allam等的第8,596,075号美国专利,在闭合循环燃烧系统中使用CO₂作为工作流体提供了理想的效率。这样的系统特别受益于以下公认的有效性:在回热式热交换器中使用来自热轮机排气的热并且添加更多的来自涡轮机排气之外来源的热来加热再循环CO₂流。尽管有这些进展,本领域中仍然存在对以下改进的发电系统和方法的不断增长的需要:其提供了高效率以及CO₂和来自其它燃料和燃烧的杂质的捕捉。

发明内容

[0003] 本公开提供了具有改进效率的发电系统和方法。所述系统和方法可以利用CO₂作为工作流体,并且可以构造用于捕捉CO₂和来自其它燃料和燃烧的杂质。本发明的改进已被鉴定为涉及在压力升高的氧-燃料燃烧系统和方法中向再循环CO₂流引入低温度水平加热,其还利用来自热轮机排气的热对再循环CO₂流进行的回热式加热。低温度水平加热在本文中可以用“附加加热”术语来描述。因此,应当理解,附加加热是来自除了热轮机排气之外的来源的低温度水平热。换言之,附加加热不是从热轮机排气回收的热。本公开特别地鉴定了在闭合循环或部分闭合循环的氧-燃料燃烧系统和方法中获得和传递附加加热的装置,所述系统和方法提供超过仅来自燃料的热的加热能力的发电输出,并且因此提供有利的效率提高。

[0004] 在一些实施方式中,本公开涉及以理想效率工作的发电(诸如电力)系统和方法,所述理想效率通过以下方式实现:燃料(例如,碳质或含碳燃料)在氧中在升高压力下在再循环CO₂流存在下燃烧,随后将产物气体通过发电涡轮机膨胀,并且在回热式热交换器中冷却涡轮机排气,所述回热式热交换器加热先前所压缩的再循环CO₂流。可通过使用附加加热将至少部分再循环CO₂流在热交换器中进行附加加热而获得提高的发电效率,所述附加加热可以是,例如,至少部分来源于至少部分再循环CO₂流的压缩的热。

[0005] 在多种实施方式中,可利用其中使用CO₂作为工作流体的闭合循环或部分闭合循环系统来实现发电。在这样的系统中,化石燃料(例如,天然气)或来源于化石燃料的燃料(例如,来源于煤或其它固体碳质燃料的合成气)在燃烧器中使用基本纯的氧作为氧化剂完全燃烧以得到氧化流,所述氧化流主要是CO₂、H₂O、过量O₂以及一定量来自燃料或氧化剂中氧化组分(诸如,SO₂、NO_x、Hg和HCl)的杂质。含有不可燃灰分的固体化石燃料,例如煤、褐煤或石油焦,可通过在单级或多级系统中部分氧化而转化为气态燃料。这样的系统,例如,可

包括部分氧化反应器。或者,例如,这样的系统可包括部分氧化反应器以及灰分和挥发性无机成分去除系统。这样的系统还包括燃料气与氧在发电系统的燃烧器中的燃烧。经预热的再循环CO₂流在燃烧器中与来源于燃料气燃烧的燃烧产物混合。可使用任何适于在本文另外描述的条件下操作的燃烧器,并且可通过任何方式将再循环CO₂流引入燃烧器,以通过燃烧进一步加热,并且如果需要,熄火(quench),从而控制出口流的温度。在一些实施方式中,仅为举例的目的,POX反应器和燃烧器中的一个或两个可利用围绕反应或燃烧空间的发汗冷却壁,并且预热的再循环CO₂流可通过壁以同时冷却壁和淬火并由此控制出口流的温度。发汗流促进再循环CO₂和热燃烧的燃料气流之间的良好混合。然而,也可使用其它类型的燃烧器,并且本公开不限于发汗冷却燃烧器的使用。虽然以上例示了某些燃料类型,但应当理解,在燃烧器中可使用其它燃料(例如,氢气)。同样,从使用附加热产生的优点可以应用于部分或全部利用非燃烧加热的系统。如,使用太阳能系统,诸如在其公开通过引用并入本文的第2013/0118145号美国专利公开中所描述,也包括在本公开中。

[0006] 离开燃烧器的合并的燃烧产物和经预热的再循环CO₂处于发电轮机入口所需的温度。在一些实施方式中,CO₂动力循环(power cycle)可使用5至12的跨轮机压力比(pressure ratio across the turbine),但在其它实施方式中可使用更大的压力比(例如,至少20),诸如当利用多个膨胀轮机时。在一些实施方式中,可使用约100bar (10MPa)至约500bar (50MPa)的轮机入口压力。供应给燃烧器的氧可以是基本上纯的O₂或用CO₂稀释的O₂。在一些实施方式中,O₂和CO₂的混合可用于控制燃烧反应的绝热火焰温度。作为非限制性实例,在合并的O₂/CO₂流中O₂的摩尔浓度可为约10%至约50%,约15%至约40%,或约20%至约30%。热轮机排气可在节能热交换器中冷却,其转而预热高压CO₂再循环流。

[0007] 系统的有效操作主要取决于热交换的优化。为实现高效率,可在热交换器的冷端,诸如在约100℃至约400℃的温度水平下,将大量附加热添加到高压再循环流中。在一些实施方式中,这种低温度水平热可来自低温制氧厂的空气压缩机,这些压缩机可全部或部分在高压比绝热模式中的压力范围内操作,使得压缩空气在排出阶段的温度升高到约100℃至约400℃范围内的点,并且使得可容易地实现从压缩空气流到加压再循环CO₂工艺流的热传递。例如,取自节能热交换器中的高压CO₂再循环流的侧流流量可被经冷却的压缩空气加热到约100℃至约400℃的所需温度。用于这种氧燃料燃烧、低水平热生产和低水平热传递的系统和方法在以下专利中描述:第8,596,075号美国专利、第8,776,532号美国专利、第8,986,002号美国专利、第9,068,743号美国专利、第2010/0300063号美国专利、第2012/0067054号美国专利、第2012/0237881号美国专利和第2013/0104525号美国专利,其公开以其全部内容通过引用并入本文。

[0008] 本公开提供了在约100℃至约400℃的温度将热引入到再循环CO₂高压流中的另外的装置,并且因此提高节能热交换器的有效性并且提高了包括本发明热传递装置的发电系统和方法的整体效率。特别地,本公开提供了使用来自再循环CO₂压缩机的一部分压缩热作为增加发电系统和方法的整体效率所必需的附加加热。

[0009] 已提出了先前的建议来优化使用高压CO₂作为工作流体的发电循环的性能。例如,Bryant等(“An Analysis and Comparison of the Simple and Recompression Supercritical CO₂ Cycles”,2011年5月在Boulder(Colorado)的超临界CO₂动力循环研究会中演示)描述了使用以CO₂作为工作流体的回热式热交换器的用于发电的布雷顿循环

(Brayton cycles), 其公开内容通过引用并入本文。该论文用操作参数限定了两个循环的效率, 并且显示了第二循环给出比第一个简单循环更高的效率的条件。

[0010] Bryant等的第一个简单循环如图1所示。其中, 已在近绝热的无中间冷却的压缩机1中被压缩的管线7中的热CO₂在回热式热交换器4中被进一步加热。随后热CO₂通过管线8到达加热器3, 在这里其通过用氧13燃烧燃料14或通过一些外部加热方式而被直接加热。经进一步加热的CO₂随后通过管线9进入发电涡轮机2, 在这里其被膨胀到较低压力而生产轴功(如箭头15所示)。涡轮机排气流10通入回热式热交换器4, 在这里其冷却并将热释放到高压再循环流。涡轮机排气随后在预冷器5中被冷却, 在这里热被排放到冷却流11, 所述冷却流11经由管线12离开并最终在管线6中重新进入压缩机1。

[0011] Bryant的第二循环如图2所示, 除了添加第二压缩级16之外, 所述第二循环与图1中所示的循环相同, 其中在第二压缩级16中, 在预冷器5之前的回热式热交换器4a出口处离开低压回路的低压涡轮机排气流17的一部分在压缩机16中以其热状态被压缩并通过管线18离开。在与以其相应温度离开4a的主高压再循环流混合之后, 该流进入回热式热交换器4b, 并在热交换器段4b中以热涡轮机排气流10加热。附加压缩的效果是从第二压缩机向回热式热交换器注入大量的热, 所述第二压缩机以处于高于主CO₂压缩机入口温度的升高温度的CO₂流作为其入口流。

[0012] Bryant等的教导显示出热输入绕过回热式热交换器的第一级4a的缺点。与在热交换器4a中的低压涡轮机排气流冷却相比, 在热交换器4a中被加热的高压CO₂流的大得多的比热意味着热交换器4a中进入高压流中的热传递必须最大化以实现相近的平衡温度(close temperature approach)。这没有实现, 因为加热的压缩CO₂流绕过了热交换器4a。最大效率所需的是布置如下的热气体压缩系统, 其中经压缩的CO₂在热交换器中冷却并增加向高压CO₂流的可用热传递。本公开部分涉及用于克服该缺点的装置。

[0013] 虽然如图1和图2所示的Bryant等人的循环说明了用于热CO₂压缩的已知现有技术, 它们仅适用于使用主CO₂压缩机而没有中间冷却器给出高排放温度的简单布雷顿循环布置。这又导致离开回热式热交换器4a的冷却涡轮机排出流也处于高温, 因此在预冷器热交换器中排出的热也高。因此, 显而易见的是最佳的效率将仅以低压力比在这种热压缩循环中实现, 所述压力比显示为在2-4范围内具有接近CO₂临界压力的最佳主压缩机入口压力。较高的压力比导致系统中过多的热损失。如图1和图2所示的Bryant等的循环还不能说明系统细节, 诸如在预冷器5中借助环境冷却装置冷却之后在压缩机入口管线6中存在液态水分离。

[0014] 图2中的Bryant等人的循环具有几个另外的限制。例如, Bryant等人的循环效率随着压力比增加显著降低, 因为主压缩机和再压缩压缩机在级间没有中间冷却器的操作中基本绝热。Bryant等人报道的研究说明涡轮机进口温度为750℃时的最佳压力比, 在涡轮机入口压力为100bar时为2.2, 在涡轮机入口压力为250bar时为3.3。对于给定的动力输出, 低压力比需要系统中非常高的CO₂流量, 导致高的资本成本。相反, 本公开提供了具有高压力比和高涡轮机入口压力的循环, 导致高效率 and 低投资成本。

[0015] 根据本公开可用的系统和方法可使用约5或更大, 诸如约5至约30的压力比。在一些实施方式中, 压力比优选可在约5至约12范围内。本发明的系统和方法也可以利用中间冷却的主CO₂再循环压缩系统。高压力比有利于高于7.38MPa的CO₂临界压力的涡轮机入口压力

和低于该压力的涡轮机排出压力。这些更高的压力比为天然气燃料系统提供50%至60%的高效率,所述系统对于每kW净动力输出具有显著更低的CO₂循环速率。根据本公开可用的系统和方法还优选地使用在例如大于100℃、特别是在约100℃至约400℃或约100℃至约300℃范围内的温度水平的非常可观的附加加热输入。本公开的系统和方法特别有利于利用一部分来自主再循环CO₂压缩机的压缩热作为这种附加加热。

[0016] 在一些实施方式中,本公开提供了一种发电方法。例如,所述方法可包括以下步骤的多种组合:将经压缩、经加热的再循环CO₂流通入燃烧器;在燃烧器中在再循环CO₂流存在下用氧燃烧燃料以产生含CO₂流;使含CO₂流通过涡轮机以膨胀含CO₂流,发电,并形成包括CO₂的涡轮机排气流;从包括CO₂的涡轮机排气流中提取热;将经冷却的涡轮机排气流分成第一涡轮机排气部分和第二涡轮机排气部分;从第一涡轮机排气部分分离水以形成主再循环CO₂流;压缩主再循环CO₂流;在没有压缩机级间的中间冷却的情况下绝热压缩第二涡轮机排气部分,以形成经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分;从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取热;从经冷却、经压缩的第二涡轮机排气部分分离水,以形成副再循环CO₂流(secondary recycle CO₂ stream);将主再循环CO₂流和副再循环CO₂流合并以形成总再循环CO₂流;冷却总再循环CO₂流以形成高密度CO₂流;在第二压缩级中使用流体泵压缩总再循环CO₂流;用从涡轮机排气流提取的热加热总再循环CO₂流;以及使用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热总再循环CO₂流,以形成经压缩、经加热的再循环CO₂流。在一些实施方式中,可将副再循环CO₂流提取热后的两个压缩CO₂流合并,然后合并流可被冷却,随后进行液体水分离。在一些实施方式中,第二涡轮机排气流可在多个级中被压缩,其中一个或多个级之间有热传递。例如,第二涡轮机排气流可以经历包括无冷却压缩级(x)和中间冷却压缩级(y)的多级压缩,其中x和y独立地可以是1或更大、2或更大或3或更大的整数(例如,1至5或2至4)。在一些实施方式中,第二涡轮机排气流可在x无冷却压缩级中被加压(和加热)至中间值,加压气体可用于将压缩热提供给回热式热交换器,以便冷却加压气体,经冷却的气体可被脱水,并且气体可在与第一涡轮机排气流合流之前返回以经历剩余的y中间冷却压缩级。

[0017] 在另外的实施方式中,本公开提供一种发电系统。例如,所述系统可包括:燃烧器;发电涡轮;一个或多个热交换器;通过一个或多个热交换器的第一冷却流路;通过一个或多个热交换器的加热流路;与通过一个或多个热交换器的第一冷却流路连通的流分离器;与流分离器连通的第一压缩机;通过一个或多个热交换器的第二冷却流路,所述第二冷却流路与压缩机连通;一个或多个水分离器;第二压缩机;和泵。具体地,通过一个或多个热交换器的加热流路在泵的下流和燃烧器的上游;并且通过一个或多个热交换器的加热流路与通过一个或多个热交换器的第一冷却流路和第二冷却流路呈加热布置。在一些实施方式中,第一冷却流路和第二冷却流路可以由分开和独立的水分离部件和/或泵部件确定。当使用两个或更多个热交换器时,热交换器可以是串联的。

[0018] 在一些实施方式中,本公开可涉及用于加热再循环气体流的方法。作为示例,这种方法可包括以下步骤:使气流G在压力P₁和温度T₁下通过回热式热交换器,使得气流被冷却到低于T₁的温度T₂;将气流G分离成第一部分G₁和第二部分G₂;将气流部分G₁压缩至大于P₁的压力P₂;将气流部分G₂压缩至大于P₁的压力P₃,以便将气流部分G₂加热至高于T₂的温度T₃;从经压缩的气流部分G₂中提取热;将气流部分G₁和气流部分G₂合并以形成合并的再循环气流

G_c;将再循环气流G_c泵送到大P₂且大于P₃的压力P₄;且将再循环气流G_c传送到回热式热交换器,使得气流G_c被冷却气流G加热;其中从经压缩的气流部分G₂提取的热在泵送到压力P₄之后被添加到再循环气流G_c。在另外的实施方式中,用于加热再循环气流的方法可包括任何其组合的以下陈述中的任何一个或多个。

[0019] 温度T₃可为约100°C至约400°C。

[0020] 气流部分G₁的压力P₂和气流部分G₂的压力P₃可各自分别为约40bar (4MPa) 至约100bar (10MPa)。

[0021] 再循环气流G_c的压力P₄可为约100bar (10MPa) 至约500bar (50MPa)。

[0022] 基于气流G的总质量,气体部分G₁和气体部分G₂的质量比为约50:50至约99:1,或可为约50:50至约90:10,或可为约50:50至约70:30,或可为约70:30至约90:10。

[0023] 通过回热式热交换器并接收来自经压缩的气体部分G₂的热之后的再循环气流G_c的温度T₄可与T₁相差50°C以内。

[0024] 气流部分G₂可以用没有中间冷却的多级压缩来压缩。

[0025] 在从气流部分G₂中提取热之后,气流部分G₂可在与气流部分G₁合并之前被进一步压缩。

[0026] 回热式热交换器可包括串联的三个热交换器或三个热交换段。在这样的实施方式中,热可在于温度范围R₁中操作的第一热交换器或热交换段、于温度范围R₂中操作的第二热交换器或热交换段以及于温度范围R₃中操作的第三热交换器或热交换段中传递,其温度关系为R₁>R₂>R₃。

[0027] 气流G可在第一热交换器或热交换段和第二热交换器或热交换段之间分离。

[0028] 气流G可在第二热交换器或热交换段和第三热交换器或热交换段之间分离。

[0029] 从经压缩的气流部分G₂提取的热可在第三热交换器或热交换段和第二热交换器或热交换段中的一个或两个中添加到再循环气流G_c中。

[0030] 该方法可以进一步包括在泵送至压力P₄之后向再循环气流G_c添加热。在这样的实施方式中,添加的热可以从空气分离单元和燃气涡轮机中的一个或两个得到。

[0031] 该方法可以进一步包括将经加热的再循环气流G_c从回热式热交换器传递到燃烧器,所述燃烧器用氧燃烧燃料以形成燃烧产物流。

[0032] 气流G可以是涡轮机排气流。

[0033] 在一些实施方式中,本公开可进一步涉及发电方法。作为示例,所述方法可包括以下步骤:在燃烧器中在再循环CO₂流存在下用氧燃烧燃料以产生包含CO₂的燃烧流;使包含CO₂的燃烧流通过涡轮机以膨胀包含CO₂的燃烧流,发电,并形成涡轮机排气流;从涡轮机排气流中提取热;将涡轮机排气流分成第一涡轮机排气部分和第二涡轮机排气部分;从第一涡轮机排气部分分离水以形成主再循环CO₂流;压缩主再循环CO₂流;压缩第二涡轮机排气部分以形成经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分;从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提抽热;从经冷却、经压缩的第二涡轮机排气部分分离水以形成副再循环CO₂流;合并主再循环CO₂流和副再循环CO₂流以形成合并的再循环CO₂流;压缩合并的再循环CO₂流;用从涡轮机排气流中提取的热加热合并的再循环CO₂流;以及使用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热合并的再循环CO₂流。在进一步的实施方式中,所述方法可包括任何组合的一个或多个以下陈述。

[0034] 包含CO₂的燃烧流可具有约500℃至约1,700℃的温度和约100bar (10MPa) 至约500bar (50MPa) 的压力。

[0035] 跨涡轮机的压力比可为约5至约12。

[0036] 热可以从包括三个或更多个段或包括三个或更多个单独的热交换器的回热式热交换器中的涡轮机排气流中提取。

[0037] 用从涡轮机排气流提取的热加热合并的再循环CO₂流,并且用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热合并的再循环CO₂流可在回热式热交换器中进行。

[0038] 基于涡轮机排气流的总质量,第一涡轮机排气部分与第二涡轮机排气部分的质量比可为约50:50至约99:1。

[0039] 从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热可在约100℃至约400℃的温度范围内。

[0040] 主再循环CO₂流和第二涡轮机排气部分可以独立地压缩至约40bar (4MPa) 至约100bar (10MPa) 的压力。

[0041] 在用从涡轮机排气流提取的热加热并且用从经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分提取的热进一步加热后,合并的再循环CO₂流的温度可与涡轮机排气流温度相差50℃以内。

[0042] 第二涡轮机排气部分可被绝热压缩,而在压缩机级之间没有中间冷却。

[0043] 在一些实施方式中,根据本公开的发电系统可包括以下:燃烧器,其构造成排出燃烧流;发电涡轮机,其构造为接收和膨胀燃烧流并形成涡轮机排气流;回热式热交换器,其构造为接收涡轮机排气流;流分离器,其构造为将经冷却的涡轮机排气流分离成第一气流和第二气流;第一压缩机,其构造为接收和压缩第一气流;第二压缩机,其构造为接收和压缩第二气流;泵,其构造为对第一气流和第二气流联合加压,所述泵置于第一压缩机和第二压缩机的下游;通过回热式热交换器的第一流路,其构造为用于涡轮机排气流的通过;通过回热式热交换器的第二流路,其构造为用于经加压的第一气流和第二气流的联合通过;通过回热式热交换器的第三流路,其构造为用于经加压的第二气流的通过;其中第一流路和第三流路构造为用于加热第二流路。在进一步的实施方式中,所述系统可包括任何组合的以下陈述中的任何一个或多个。

[0044] 回热式热交换器可包括一系列三个或更多个热交换器或一系列三个或更多个加热段。

[0045] 所述系统可以进一步包括一个或多个分离器,其构造为用于从第一气流和第二气流中的一个或两个分离至少水。

[0046] 第一压缩机可包括带中间冷却的多级压缩机。

[0047] 第二压缩机可包括在压缩机级之间没有中间冷却的绝热多级压缩机。

附图说明

[0048] 已经在前述一般术语描述了本公开,现将参考附图,其不一定按比例绘制,并且其中:

[0049] 图1是现有技术的发电循环的流程图;

[0050] 图2是另一现有技术的发电循环的流程图;和

[0051] 图3是根据本公开的示例性实施方式的发电系统和方法的流程图,包括用于压缩再循环CO₂流并从其中导出热以输入到回热式热交换器的多个压缩机。

具体实施方式

[0052] 现在将在下文中参考本主题的示例性实施方式更全面地描述本主题。描述这些示例性实施方式,使得本公开将是彻底和完全的,并且将向本领域技术人员充分传达本主题的范围。实际上,本主题可以以许多不同的形式实施,并且不应被解释为限于本文所阐述的实施方式;相反,提供这些实施方式使得本公开将满足适用的法律要求。除非上下文另有明确说明,在说明书和所附权利要求中使用的单数形式“一(a)”,“一(an)”,“所述(the)”包括复数指示物。

[0053] 本公开涉及提供主要使用CO₂作为工作流体的发电系统和方法。特别地,所述方法使用高压/低压比涡轮机,其膨胀高压再循环CO₂流和由燃料燃烧产生的燃烧产物的混合物。可使用任何化石燃料,特别是碳质燃料。非限制性实例包括天然气、压缩气体、燃料气体(例如,包括H₂、CO、CH₄、H₂S和NH₃中的一种或多种)和类似的可燃气体。也可使用固体燃料,例如煤、褐煤、石油焦炭、沥青、生物质等,或者粘性液体燃料也可结合必要系统元素使用。例如,部分氧化燃烧器可用于将固体或粘性液体燃料转化为基本不含固体颗粒的燃料气体。处于氧化状态的所有燃料和燃烧产生的杂质,诸如硫化物、NO、NO₂、CO₂、H₂O、Hg等可以从动力循环中分离出来,用于基本或完全不向大气排放的处理。如前所述,也可使用其它燃料。纯氧可以用作燃烧过程中的氧化剂。在一些实施方式中,可通过用本文另外指出的CO₂比率稀释氧来调节燃烧温度。

[0054] 热涡轮机排气用于部分预热高压再循环CO₂流。与该加热组合,可使用可从CO₂压缩机的压缩能量导出的附加加热进一步加热再循环CO₂流。CO₂压缩机的操作条件可以如本文进一步所述变化。例如,在一些实施方式中,使用高于环境冷却装置的正常值的CO₂压缩机入口温度可能是有用的。例如,进入CO₂压缩机的流的最小入口温度可接近操作条件下水的露点。在一些实施方式中,CO₂压缩机可具有约50℃至约250℃的入口温度。可选地,除了可从CO₂压缩获得的加热之外,可使用提供低于约400℃的温度水平的热的其它加热装置。这种装置可包括从低温空气分离厂的空气压缩机传递的热,所述低温空气分离厂部分或全部在没有中间冷却的绝热模式下操作。当利用这种热时,空气压缩机优选可在绝热级中以高于2.5的压力比操作。

[0055] 根据本公开,已发现发电效率可通过如本文所确定的附加加热改善,这种附加加热特别是在低于约400℃的温度水平下提供(例如,在约100℃至约400℃的范围内)。附加加热的提供可以克服在约300bar (30MPa)的典型高压涡轮机入口处的CO₂比热与在约30bar (3MPa)的典型低压涡轮机排气压力下CO₂比热的大差异。这种差异在下面提供的表中是显而易见的。

[0056]

温度/K (°C)	30 bar (3 MPa)下 CO ₂ 比热(kJ/kg)	300 bar (30 MPa) 下 CO ₂ 比热(kJ/kg)
300 (26.85)	1.18	1.95
350 (76.85)	1.05	2.00
400 (126.85)	1.02	1.90
450 (176.85)	1.03	1.63
500 (226.85)	1.06	1.47
600 (326.85)	1.10	1.31
750 (476.85)	1.17	1.23
1000 (726.85)	1.24	1.28

[0057] 根据本公开的发电方法特别地可包括能提供改进效率的一系列步骤。所述方法可包括将经压缩、经加热的再循环CO₂流送入燃烧器。经压缩、经加热的再循环CO₂流可以如以下进一步描述所形成。在燃烧器中，在再循环CO₂流存在下，燃料可与氧化剂（例如，至少98%或至少99%纯度的氧气，可选地用CO₂稀释）燃烧以产生含CO₂流。来自燃烧器的含CO₂流可具有约500℃或更高（例如，约500℃至约1,700℃或约800℃至约1,600℃）的温度，以及约100bar（10MPa）或更高（例如，约100bar（10MPa）至约500bar（50MPa））的压力。含CO₂流可通过涡轮机以膨胀含CO₂流，发电，且形成包括CO₂的涡轮机排气流。含CO₂的流可以小于12或小于10（例如，约5至约12）的压力比穿过涡轮机膨胀。在替代实施方式中，可使用如本文所述的高压力比，诸如在利用多个涡轮机的情况下，如在第2013/0213049号美国专利公开中所述，其公开通过引用其全部内容并入本文。

[0058] 涡轮机排气流可被处理以去除燃烧产物和由燃料燃烧产生的任何净CO₂。为此，涡轮机排气流可通过穿过热交换器的通路来冷却。可使用适合在本文所述温度和压力条件下使用的任何热交换器。在一些实施方式中，热交换器可包括串联的至少两个、至少三个或甚至更多的节能热交换器。可使用具有至少两段、至少三段（或甚至更多段）的单个热交换器。例如，可描述具有至少三个在不同温度范围内操作的热交换段的热交换器。从涡轮机排气流提取的热可用于加热再循环CO₂流，如下所述。

[0059] 涡轮机排气流可被分成两个或更多个部分。第一部分可包括涡轮机排气流的总质量流量的50%或更多、70%或更多或90%或更多（但少于100%）。第一涡轮机排气部分优选在离开热交换器之后在低于水露点的温度下被冷却。第一涡轮机排气部分可通过分离器以除去水，并且可以进一步处理以除去其它燃烧产物或杂质。所得到的流可被描述为主再循环CO₂流，并且该流可被压缩，诸如在级间具有中间冷却的多级压缩机中。优选地，将主再循环CO₂流压缩至约40bar（4MPa）至约100bar（10MPa）的压力。在一些实施方式中，主再循环CO₂流被压缩至约60bar（6MPa）至约100bar（10MPa）或约67bar（6.7MPa）至约80bar（8MPa）的压力。

[0060] 涡轮机排气流的第二部分可被压缩以形成经加热、经压缩的第二涡轮机排气部分。第二涡轮机排气部分可包括不存在于第一部分中的涡轮机排气的剩余部分(例如,涡轮机排气流的总质量流量的50%或更少、30%或更少或10%或更少(但多于0%))。优选地,第二涡轮机排气部分可以从在第二和第三热交换段之间的涡轮机排气中提取(例如,串联的第二和第三热交换器从热转移到冷——换言之,热交换器在最低温度和中间温度之间工作)。优选压缩第二涡轮机排气部分以达到约100℃至约400℃范围的温度和约40bar (4MPa)至约100bar (10MPa)的压力。在一些实施方式中,压力可为约60bar (6MPa)至约100bar (10MPa)或约67bar (6.7MPa)至约80bar (8MPa)。第二涡轮机排气部分可被重新引入到热交换器,优选从中间温度热交换器的热端流到低温热交换器的冷端。经冷却的第二涡轮机排气部分可以处于低于水露点的温度,并且经冷却的流可通过一个或多个分离器以除去水和任何其它杂质。剩余的流是副再循环CO₂流,并且其可以与主再循环CO₂流合并。这种合并可在多个点。例如,主再循环CO₂流可在通过低温热交换器之后和在通过分离器之前被添加到经冷却的涡轮机排气的第二部分。或者,主再循环CO₂流和副再循环CO₂流可在水分离后或在循环的另一端合并。可在此点处提取由燃烧产生的净CO₂,诸如用于提高采油率,用于封存等。

[0061] 在一些实施方式中,第二涡轮机排气部分可使用级间没有中间冷却的多级压缩来压缩,随后在后续级之间进行中间冷却。离开无冷却级的第二涡轮机排气部分的经压缩和经加热的气体可以如上另外所述被引入热交换器,并且这样的经冷却的流可在与第一涡轮机排气部分合并之前经受带中间冷却的压缩。无冷却级(x)和中间冷却级(y)的数量可以独立地为1或更多、2或更多或3或更多(例如,1至5或2至4)。

[0062] 可将总再循环CO₂流(由主再循环CO₂流和副再循环CO₂流形成)泵送至适于流通进入燃烧器的压力。优选地,将总的再循环CO₂流泵送至100bar (10MPa)或更大或约200bar (20MPa)或更大,诸如约100bar (10MPa)至约500bar (50MPa)的压力。然后将经压缩的再循环CO₂流返回通过热交换器以进行加热。使用从涡轮机排气流(其可表征为保留在涡轮机排气流中的燃烧热)提取的热来加热经压缩的再循环CO₂流。然而,涡轮机排气流中的热不足以在涡轮机排气流和在热交换器的热端处的经加热、经压缩的再循环CO₂流之间实现相近的平衡温度。根据本公开,来自经压缩的第二涡轮机排气部分的热可以用作附加加热,以减小涡轮机排气流和离开热交换器并进入燃烧器的经加热、经压缩的再循环CO₂流之间的温差。附加加热可表征为再压缩热并且区别于存在于涡轮机排气中的燃烧热。附加加热的使用可有利于使涡轮机排气流和离开热交换器并进入燃烧器的经加热、经压缩的再循环CO₂流之间的温度差减少至约50℃或更少、约40℃或更少、或约30℃或更少,诸如约10℃至约50℃或约20℃至约40℃。

[0063] 在一些实施方式中,可通过与再压缩热结合或作为其替代的其它方式提供附加加热。例如,可利用来自外部来源的经加热的CO₂。这种外部来源可以是,例如从地质来源中提取的CO₂,从管线取得的CO₂等。在这样的实施方式中,涡轮机排气流的分离可以是不必要的,并且经加热的CO₂可以与上述再压缩热相同的方式输入到系统。额外的CO₂可以从具有净CO₂产物的系统中提取并且可以返回到热源。以这种方式,来自完全在发电系统外部的再循环CO₂可用作附加加热。或者,部分或全部附加加热可来自燃气涡轮机排气或来自冷凝流。

[0064] 根据本公开系统的示例性实施方式在图3中示出。所述实施方式关于利用限定的参数的燃烧方法的示例性实施方式来描述。因此,特定的温度和压力可以基于具体的操作条件而变化。

[0065] 在图3的实施方式中,如图3所示,在728℃和30bar (3MPa) 下的涡轮机排气流55通过串联的三个节能热交换器29、27和26并作为流46以46℃和29bar (2.9MPa) 离开。热交换器29可表征为高温热交换器,热交换器27可表征为中间温度热交换器,且热交换器26可表征为低温热交换器。应当理解,术语“高温”、“中间温度”和“低温”旨在仅仅描述三个热交换器相对于彼此的操作温度范围。流46在水冷热交换器58中冷却至17.2℃,并且冷凝水流56在相分离器容器53中分离。顶部CO₂气流61离开相分离器容器53并进入两级离心CO₂再循环压缩机21(级1)和22(级2),其中来自第一级压缩机21的排出流44在中间冷却器23中冷却至17.2℃并作为流45离开,然后在第二级压缩机22中压缩,以在80bar (8MPa) 下形成流48。该主再循环压缩机排出流48与流47合并,并且合并的流69在水冷热交换器24中冷却至22.7℃的温度。在其它实施方式中,该温度可在10℃至约30℃范围内。冷凝水68在相分离器67中分离,产生处于超临界状态并具有850Kg/m³的高密度的总再循环CO₂流49。相当于燃烧器中转化为CO₂的燃料气体中的碳的净产物CO₂流62从系统中去除(在冷却之后,如图所示,或在冷却之前),用于封存,用于提高油采收率等。

[0066] 将总再循环CO₂流49在热交换器70中冷却至17.2℃的温度,然后进入具有305bar (30.5MPa) 的排出压力的多级离心泵25中以形成高压CO₂再循环流50,其在串联的三个节能热交换器26、27和29中加热作为流54在725℃的温度和302bar (30.2MPa) 下离开。通过在320bar (32MPa) 下的天然气流40与99.5%的O₂流41的直接燃烧,将流54在燃烧器30中加热至1154℃。在示例性的实施方式中,使用纯CH₄作为燃料气体进行建模。再循环CO₂和燃烧产物57的混合流进入具有30bar (3MPa) 的排放压力的动力涡轮机31,并作为涡轮机排气流55离开。

[0067] 如上表所示,300bar (30MPa) 和30bar (3MPa) 下CO₂比热的差异随着温度从1000K (727℃) 降低而增加。鉴于这种差异,需要附加加热以在涡轮机排气流55和再循环CO₂流54之间实现非常相近的平衡温度值,并且这种附加加热可以例如在“低温”节能热交换器26和/或“中间温度”节能热交换器27中供应。根据本公开,可通过利用绝热的部分再循环CO₂流的压缩热来提供附加加热,所述再循环CO₂流在示例性实施方式中被压缩到约29bar (2.9MPa) 至约80bar (8MPa) 的压力。

[0068] 返回到图3的示例性实施方式,两个节能热交换器段27和26之间的温度为138℃的一部分冷却涡轮机排气流51可被提取和在单级或多级绝热压缩器28中压缩,产生在246℃和80bar (8MPa) 下的流52。经压缩和经加热的流52重新进入节能热交换器27的热端,并且所述流通过热交换器27和热交换器26,在那里其冷却并作为流47在54℃离开。由工作流34供应的压缩机28中的全部压缩热因此被传递到高压再循环CO₂流,并且该热输入等效于在燃烧器30中传递的燃烧热,因为它减小了热端温差。最大化流51的流量以在高温节能热交换器29的入口处实现流65和66之间的显著小的温差。流65和66之间的温差优选为约50℃或更低、约40℃或更低、约30℃或更低、约20℃或更低,特别是约10℃至约50℃或约20℃至约40℃。如上所述,流47与主再循环压缩机排出流48合并,用于在热交换器24中冷却至22.7℃。如上所述由CO₂压缩提供的附加加热提供了发电系统中的改进效率。

[0069] 注意,可使用其它低温度水平加热来源(例如,燃气轮机排气或冷凝流)作为附加加热。图3的示例性实施方式包括低温空气分离厂81,已被绝热压缩到5.7bar (0.57MPa)和223℃的主空气流42a作为流42进入节能热交换器27的热端,并作为流43在54℃离开热交换器26。在一些实施方式中,流42可以从流42b产生,流42b被示为从燃气轮机83获得的热。尽管没有在如图3中示出,在一些实施方式中, O_2 流可以由在80bar (8MPa)和环境温度下的空气分离厂供应,并且可以与来自流49的 CO_2 混合以得到25mol%的 O_2 ,其可被压缩到320bar (32MPa),然后在节能热交换器27、26和29中加热至725℃。在实践中,该 CO_2+O_2 压缩机还可以热气压缩机段为特征,如已经示出的用于 CO_2 再循环压缩机。在图3中,冷却水入口流表示为流38、59、72和36,而各自的出口流表示为流39、60、74和37。压缩机动力输入在图3中示出,要素32和34以及这种动力输入可以是电动的或可以是涡轮驱动的。 CO_2 泵电动力输入示为要素33。涡轮机轴动力输出被示为来自发动机63的要素64。

[0070] 使用实际机器效率、热交换器温度差和系统压降,用ASPEN建模软件评估所述的示例性实施方式,得到的净效率为58.5% (LHVbasis)。该计算基于燃烧器30的500MW的热输入。

[0071] 尽管所公开的系统和方法可以特别适用于用于发电的燃烧系统和方法,但是也包括对气流的有效加热的更广泛的应用。因此,在一些实施方式中,本公开可涉及用于加热气流,特别是用于加热再循环气流的方法。再循环气流可以是连续循环通过加热和冷却级的任何气流,可选地包括压缩和膨胀级。

[0072] 可经受根据本公开的经加热的气流G可以是任何气体;然而,特别有利的是气流G包含 CO_2 ,诸如至少约10%、至少约25%、至少约50%、至少约75%或至少约90%质量的 CO_2 。再循环气流G特别地可以处于升高的温度 T_1 (例如,大约500℃至大约1700℃)和压力 P_1 ,压力 P_1 使得能够形成期望量的压缩热-例如小于大约40bar (4MPa)。可以诸如经由通过回热式热交换器来冷却处于压力 P_1 和温度 T_1 的气流G。优选地,冷却使得气流G被冷却到低于 T_1 的温度 T_2 。在一些实施方式中,可使用一系列多个热交换器(例如,2、3或更多个热交换器)或使用包括多个热交换段的热交换器或使用其组合来进行冷却。各个热交换器(或热交换段)可在不同温度范围内交换热,所述范围可以重叠。使用多个热交换器和/或热交换段使得能够在不同的温度范围内添加或提取流。

[0073] 气流G可以分离成第一部分 G_1 和第二部分 G_2 。这种分离可在气流G已经冷却到温度 T_2 或者在 T_1 和 T_2 之间的中间温度 T_{int} 之后发生。温度 T_2 例如可以是回热式热交换器(或者在最低温度范围内工作的热交换器或热交换段)的冷端的温度,并且温度 T_{int} 例如可以是在三个或更多个热交换器(或热交换段)的系列中的第二热交换器(或第二热交换段)的冷端的温度。优选地,第二气体部分 G_2 可在进一步冷却第一气体部分 G_1 之前在中间温度下提取。在气流部分 G_1 被冷却之后,其然后可被压缩到更大的压力 P_2 ,该压力优选地可以大于 P_1 。例如,这种压缩,例如,可以利用中间冷却的多级压缩机来执行。压力 P_3 可为,例如,约40bar (4MPa)至约100bar (10MPa)、约60bar (6MPa)至约100bar (10MPa)或约67bar (6.7MPa)至约80bar (8MPa)。

[0074] 被提取的气流部分 G_2 可以单独地被压缩到也优选地大于 P_1 的压力 P_3 。压力 P_3 可在 P_2 相同的压力范围内;然而, P_2 和 P_3 不一定需要相同。在一些实施方式中,可使用没有中间冷却的绝热压缩来压缩气流部分 G_2 ,以便将气流部分 G_2 加热到高于 T_2 的温度 T_3 。在可在中间温度

T_{int} 下提取出气流部分 G_2 的实施方式中, T_3 优选高于 T_{int} 。来自压缩气流部分 G_2 的热可被提取并且用作对再循环气流的附加加热,如下面进一步描述。

[0075] 在已从气流部分 G_2 中提取压缩热之后,气流部分 G_1 和气流部分 G_2 可以合并以形成合并的再循环气流 G_c 。再循环气流 G_c 将具有基本上类似于压力 P_2 和/或 P_3 的压力,并且可被泵送到大于 P_2 并大于 P_3 的更大的压力 P_4 。这样的泵送是所期望的,即再循环气流 G_c 在高压应用中被利用。然而,在一些实施方式中,压力 P_2 和/或 P_3 可以是合适的,并且可以不需要进一步的压缩。

[0076] 再循环气流 G_c (可选地处于压力 P_4)可被传送到回热式热交换器,使得气流 G_c 被冷却气流 G 加热。从压缩气流部分 G_2 提取的热可被添加到再循环气流 G_c 。这种附加加热可在泵送至压力 P_4 之后进行。在一些实施方式中,附加加热可在回热式热交换器中进行。例如,如果使用单个回热式热交换器,则经压缩的气流部分 G_2 的热可在合适的点处输入到热交换器,以在期望的温度范围内向再循环气流 G_c 提供附加加热。在使用多个热交换器(或多个热交换段)的实施方式中,压缩气流部分 G_2 的热可以添加到一个或多个较低温度的热交换器(或热交换段)。例如,在压缩期间,气流部分 G_2 可被加热到约 100°C 至约 400°C 范围内的温度,并且来自经压缩的气流部分 G_2 的热可被添加到在此温度范围内工作的一个或多个热交换器(或热交换段)。在图3中,例如,经压缩的气流部分 G_2 将等同于流52,其通过热交换器26和27,热交换器26和27相比热交换器29在更低的温度范围内工作。通常,串联的热交换器,诸如图3所示,包括三个热交换器,每个热交换器在单独的温度范围(该范围可以重叠)中传递。在图3的示例中,热交换器29可以表征为在温度范围 R_1 中操作,热交换器27可以表征为在温度范围 R_2 中操作,并且热交换器26可以表征为在温度范围 R_3 中操作。如图所示,由于热交换器29位于串联的热端,热交换器26位于串联的冷端,所以串联的热交换器的温度关系将为 $R_1 > R_2 > R_3$ 。

[0077] 使用由经压缩的气流部分 G_2 中的压缩热提供的附加加热可有利于使合并的再循环气流 G_c 的温度显著接近冷却之前的气流 G 的温度。例如,在通过回热式热交换器并接收来自压缩气体部分 G_2 的热之后,再循环气流 G_c 可具有与 T_1 相差 50°C 以内的温度 T_4 。通常,在通过回热式热交换器之后,再循环气流 G_c 的温度 T_4 将保持低于 T_1 。在这样的实施方式中,在穿过回热式热交换器并接收来自经压缩的气体部分 G_2 的热之后,再循环气流 G_c 可具有比 T_1 低不超过 50°C 的温度 T_4 。

[0078] 使 T_4 接近 T_1 可通过添加来自一个或多个附加来源的热而进一步改善。这种额外的热源可包括任何构造为向流加热的装置或装置的组合,其足以加热如本文所述的气流,使得气流达到期望的质量和热量。作为非限制性实例,额外的热源可以是燃烧热源、太阳能热源、核热源、地热热源和工业废热源中的一种或多种。额外的热源可包括热交换器、热泵、发电装置,以及适于形成、提供或传递必要热量的要素(例如,管道等)的任何进一步组合。

[0079] 用于加热再循环气流的方法可以进一步包括一个或多个步骤。例如,气流 G 可以是离开涡轮机的流。因此,气流 G 的压力 P_1 可以小于气流在通过涡轮机之前的较早的压力 P_0 。在一些实施方式中, P_0 可以基本上类似于 P_4 (例如,与其相差10%以内、5%以内或2%以内)。在一些实施方式中,再循环气流 G_c 可在离开热交换器的热端(即,在热交换器中再加热并接收来自 G_2 的附加的压缩热)之后经受过热步骤。例如,再循环气流 G_c 可以用燃烧热、太阳能加热、核加热、地热加热、工业废热加热或其任何组合加热。在一些实施方式中,再循环气流 G_c

可以如此加热,然后通过涡轮机用于膨胀和发电。离开涡轮机的流然后可以再次表征为气体流G。

[0080] 受益于前述描述和相关附图中呈现的教导的本主题所属领域的技术人员将想到本公开主题的许多修改和其它实施方式。因此,应当理解,本公开不限于本文所描述的具体实施方式,并且修改和其它实施方式旨在包括在所附权利要求的范围内。虽然本文采用了特定术语,但是它们仅在一般和描述性意义上使用,而不是为了限制的目的。

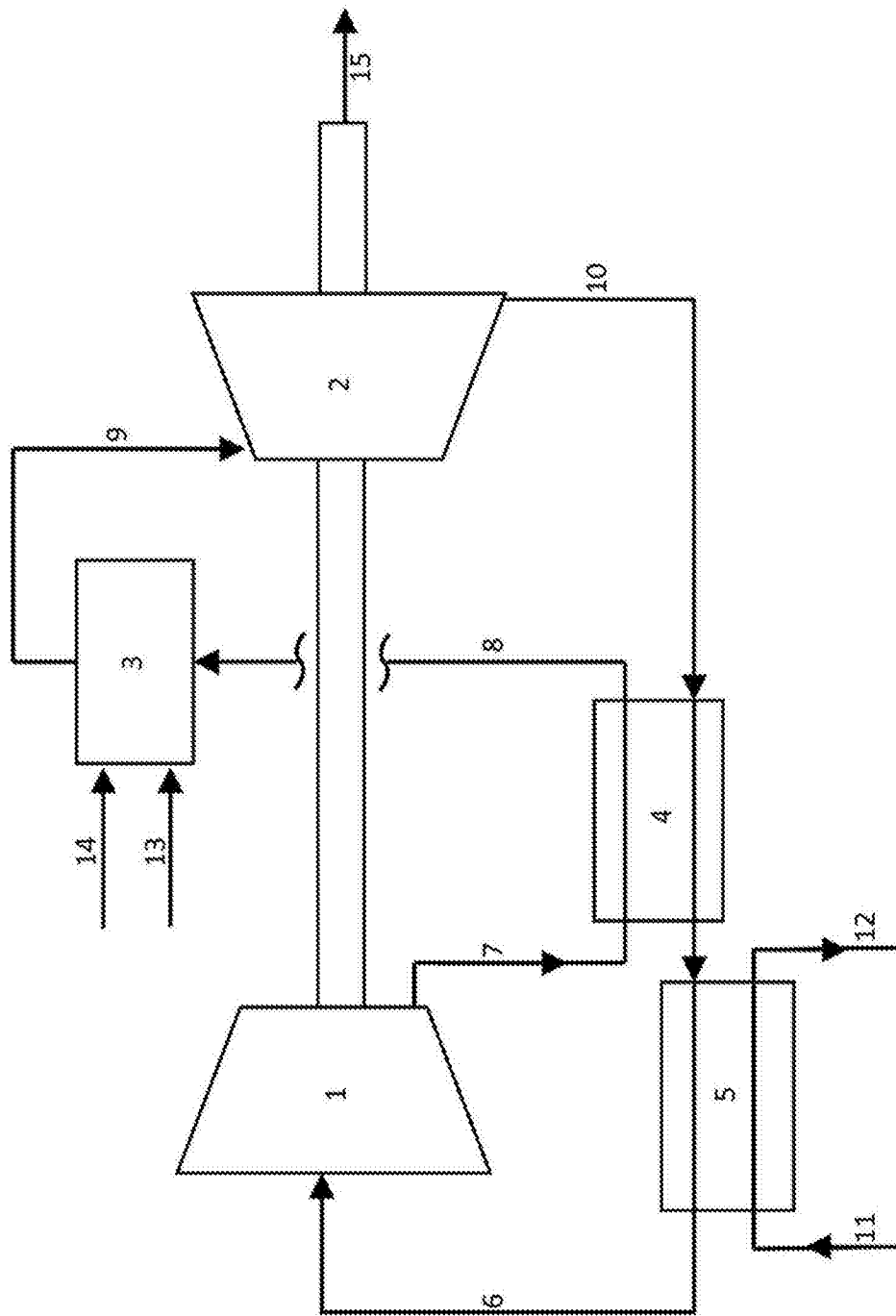


图1

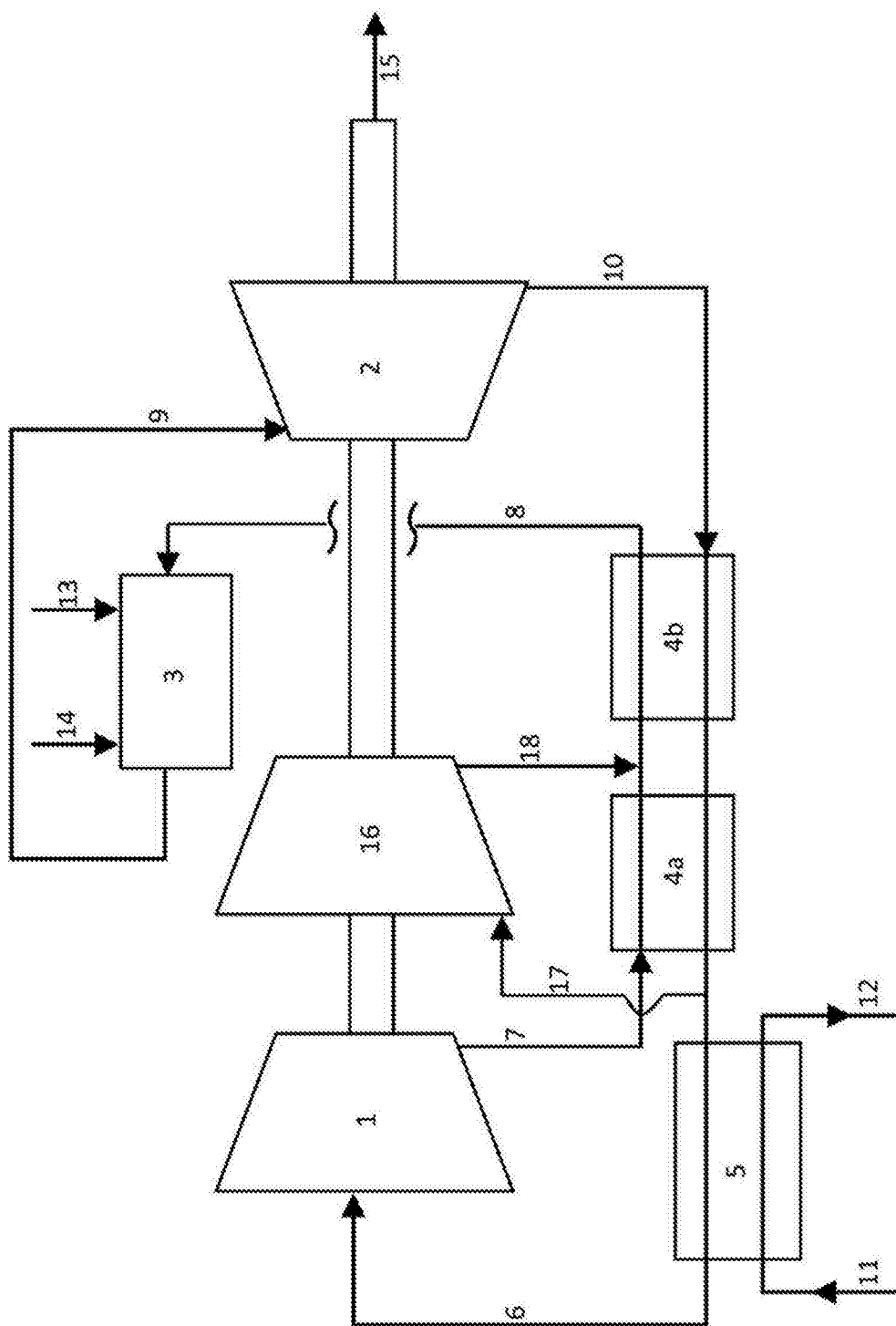


图2

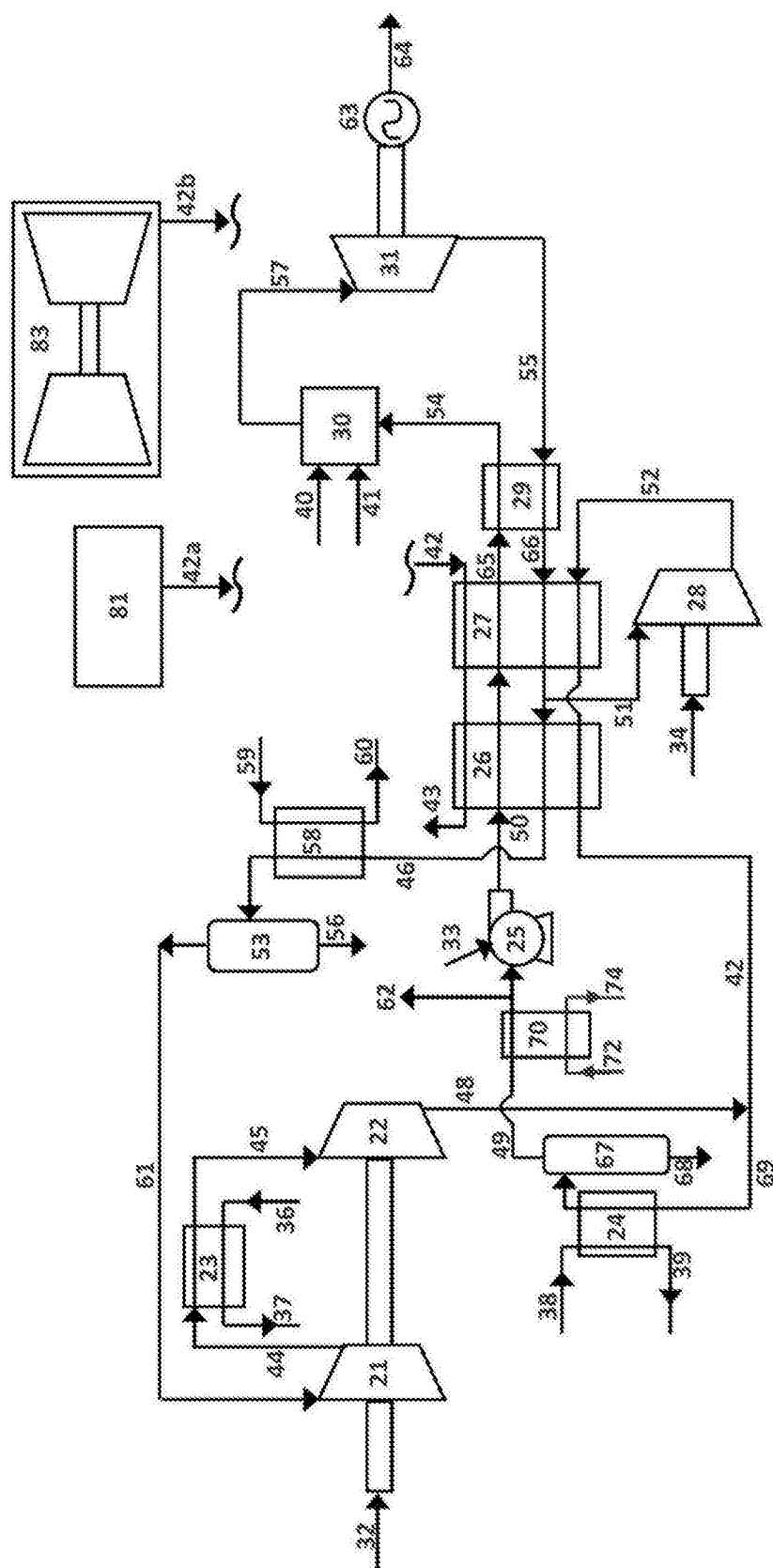


图 3