



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102159299 A

(43) 申请公布日 2011. 08. 17

(21) 申请号 200980110216. 0

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
责任公司 11219

(22) 申请日 2009. 01. 23

代理人 刘建功 车文

(30) 优先权数据

61/011, 955 2008. 01. 23 US

(51) Int. Cl.

61/195, 418 2008. 10. 07 US

B01D 53/14(2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 09. 21

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/000484 2009. 01. 23

(87) PCT申请的公布数据

W02009/094217 EN 2009. 07. 30

(71) 申请人 班·M·艾尼斯

地址 美国内华达州

申请人 保罗·利伯曼

(72) 发明人 班·M·艾尼斯 保罗·利伯曼

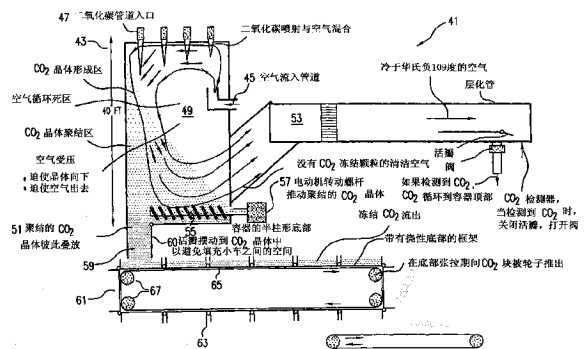
权利要求书 2 页 说明书 21 页 附图 13 页

(54) 发明名称

用于从燃煤发电厂除去二氧化碳气体的方法和设备

(57) 摘要

本发明涉及用于从燃煤发电厂除去 CO₂ 气体排放物的方法和设备, 包括用于从煤物理除去 CO₂ 气体的设备, 然后使用涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置产生超冷却空气, 所述超冷却空气然后可与 CO₂ 气体混合以形成冻结的 CO₂ 晶体, 所述 CO₂ 晶体可以聚结在一起以形成干冰块, 其中冰块可以容易地运输和储存、和/或用于商业目的(例如用于饮料工业)。加热(压缩)和冷却(膨胀)过程优选生成额外的能量, 所述额外的能量可以随后用于补偿与从煤分离 CO₂ 气体有关的较大的成本。



1. 用于从燃煤发电厂除去二氧化碳气体的方法,包括:

使用一种过程来从所述发电厂使用的煤和 / 或来自所述发电厂的烟道排放物分离二氧化碳气体;

使用至少一个压缩机来产生压缩空气和至少一个膨胀机来释放所述压缩空气,其中由此产生超冷却空气作为副产物;

在腔室中将二氧化碳气体与超冷却空气混合,以产生冻结的二氧化碳晶体;和

允许二氧化碳晶体形成冰块,所述冰块能够作为干冰被运输和 / 或被储存用于其它用途。

2. 权利要求 1 的方法,其中混合步骤另外包括将二氧化碳气体注射到所述腔室中,和通过多个开口将超冷却空气注射到所述腔室中,其中二氧化碳气体在静气区域中结晶化并开始聚结,其中在允许超冷却空气与二氧化碳气体混合以形成晶体之后,使所述腔室中的空气被引导通过沿着所述腔室的侧面延伸的侧导管,其中剩余的冷却空气可用于为 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐提供冷却。

3. 权利要求 2 的方法,其中所述方法包括使用螺杆来推动在所述腔室的底部收集的聚结的二氧化碳晶体通过腔口,并允许聚结的晶体落到带有挠性框架的传送装置系统上,所述挠性框架有助于形成冰块。

4. 权利要求 3 的方法,包括确保二氧化碳晶体在所述腔室内聚结以及在冰块被运输和 / 或储存的时候将二氧化碳晶体的温度保持为等于或低于负 109.3° F。

5. 权利要求 1 的方法,其中所述方法包括在感应器中将通过所述方法产生的一部分超冷却空气与环境空气混合以形成相对冷的空气,所述相对冷的空气能够被进给到燃气涡轮发电机组中以便更有效率地产生额外的电。

6. 权利要求 1 的方法,其中涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置用于产生超冷却空气,且其中提供与所述装置连接的至少一个带有冷却剂的换热器,其中所述方法包括在蒸汽涡轮发电机组中利用来自所述换热器的被加热的冷却剂以产生额外的电或者在吸收式冷冻器中利用所述被加热的冷却剂。

7. 权利要求 1 的方法,其中混合步骤另外包括通过所述腔室中的多个开口注射超冷却空气并在向下注射二氧化碳气体时向上或向下引导所述超冷却空气,其中二氧化碳气体在静气区域中结晶化并开始聚结。

8. 用于从燃煤发电厂除去二氧化碳气体的系统,包括:

从所述发电厂使用的煤和 / 或来自所述发电厂的烟道排放物分离二氧化碳气体的系统;

用于产生压缩空气的至少一个压缩机和用于释放所述压缩空气的至少一个膨胀机,其中产生超冷却空气作为副产物;

混合腔室,用于将二氧化碳气体与超冷却空气混合,以产生冻结的二氧化碳晶体;和

允许二氧化碳晶体聚结并形成冰块的设备,所述冰块能够作为干冰被运输和 / 或被储存用于其它用途。

9. 权利要求 8 的系统,其中所述腔室允许将二氧化碳气体和超冷却空气注射到所述腔室中,其中允许二氧化碳气体在静气区域中结晶化并聚结,其中在允许超冷却空气与二氧化碳气体混合之后,使所述腔室中的空气被引导通过沿着所述腔室的侧面延伸的侧导管,

其中剩余的冷却空气可用于为 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐提供冷却。

10. 权利要求 9 的系统, 其中提供螺杆来推动在所述腔室的底部收集的聚结的二氧化碳晶体通过腔口, 并允许聚结的晶体落到带有挠性框架的传送装置系统上, 所述挠性框架有助于形成冰块。

11. 权利要求 10 的系统, 包括确保二氧化碳晶体在所述腔室内聚结时保持其温度等于或低于负 109.3° F。

12. 权利要求 8 的系统, 其中压缩机和膨胀机包含用于产生超冷却空气的涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置, 且其中提供与所述装置连接的至少一个带有冷却剂的换热器, 在蒸汽涡轮发电机组中利用来自所述换热器的被加热的冷却剂以产生额外的电或者在吸收式冷冻器中利用所述被加热的冷却剂。

13. 权利要求 8 的系统, 其中提供一感应器, 在该感应器中, 将由所述系统产生的一部分超冷却空气与环境空气混合以形成相对冷的空气, 所述相对冷的空气能够被进给到燃气涡轮发电机组中以便更有效率地产生额外的电。

14. 用于从燃煤发电厂除去二氧化碳气体的设备, 包括:

从所述发电厂使用的煤和 / 或来自所述发电厂的烟道排放物分离二氧化碳气体的装置;

用于产生压缩空气的至少一个压缩机和用于释放所述压缩空气的至少一个膨胀机, 其中产生超冷却空气作为副产物;

混合腔室, 用于将二氧化碳气体与超冷却空气混合以产生冻结的二氧化碳晶体; 和

允许二氧化碳晶体聚结并形成冰块的设备, 所述冰块能够作为干冰被运输和 / 或被储存用于其它用途。

15. 权利要求 14 的设备, 其中所述腔室允许将二氧化碳气体和超冷却空气注射到所述腔室中, 其中允许二氧化碳气体在静气区域中结晶化并聚结。

16. 权利要求 15 的设备, 其中在使超冷却空气与二氧化碳气体混合之后, 将所述腔室中的空气引导通过沿着所述腔室的侧面延伸的侧导管, 其中剩余的冷却空气可用于为 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐提供冷却。

17. 权利要求 16 的设备, 其中提供螺杆来推动在所述腔室的底部收集的聚结的二氧化碳晶体通过腔口, 并允许聚结的晶体落到带有挠性框架的传送装置设备上, 所述挠性框架有助于形成冰块。

18. 权利要求 14 的设备, 其中压缩机和膨胀机包含用于产生超冷却空气的涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置, 且其中提供与所述装置连接的至少一个带有冷却剂的换热器, 在蒸汽涡轮发电机组中利用来自所述换热器的被加热的冷却剂以产生额外的电或者在吸收式冷冻器中利用所述被加热的冷却剂。

19. 权利要求 14 的设备, 其中提供一个感应器, 在该感应器中, 将由所述设备产生的一部分超冷却空气与环境空气混合以形成相对冷的空气, 所述相对冷的空气能够被进给到燃气涡轮发电机组中以便更有效率地产生额外的电。

用于从燃煤发电厂除去二氧化碳气体的方法和设备

背景技术

[0001] 按照目前的使用速度,据估计全美国的矿藏中还中有大约 300 年的煤储备。煤是一种重要的自然资源,代表了现在在美国可用的最丰富和最有效率的能量来源。同时,煤的使用还涉及严重的环境危害和后果,包括可以引起全球变暖和其它气候变化的二氧化碳气体排放。

[0002] 温室气体存在于地球的大气中并且有助于温室效应。如果没有温室效应,地球的平均温度可以降低到大约负 19°C (或负 2° F),而不是现在的大约 15°C (或 59° F) 的平均温度,由此使地球不适于居住。另一方面,随着温室气体的增加,地球可以经历相反的作用 - 全球变暖。

[0003] 温室气体按照相对丰度的顺序包括水蒸汽、二氧化碳、甲烷、一氧化二氮、和臭氧,以及其它。这些温室气体的大部分是自然存在的,但是任一种特定气体(例如,二氧化碳)增加的程度都可以由于人类活动而改变。

[0004] 在现在存在于地球上的主要温室气体中,据估计水蒸汽引起总的温室效应的大约 36-70% (不包括云);二氧化碳据估计引起大约 9-26%;甲烷据估计引起大约 4-9%,臭氧据估计引起大约 3-7%。确定由任一种气体所引起的温室效应的确切百分比是不可能的,因为各种气体的影响不是相加性的。例如,范围的上端适用于单独的一种气体,而下端适用于多种气体,包括重叠部分。其它温室气体包括但不限于一氧化二氮、六氟化硫、氢氟烃、全氟化碳和氯氟烃。

[0005] 全球变暖的一个主要贡献因素被认为是由于各种人为活动和技术而被排放到地球大气中的二氧化碳气体的增加。在可以影响地球大气并由此增加全球变暖的二氧化碳排放的主要贡献因素中,最主要的七个因素列于如下(以 2000-2004 的贡献百分率表示):

[0006] 1. 固体燃料(例如,煤):35%

[0007] 2. 液体燃料(例如,汽油):36%

[0008] 3. 气体燃料(例如,天然气):20%

[0009] 4. 工业上和油井的燃烧气体:< 1%

[0010] 5. 水泥生产:3%

[0011] 6. 非燃料烃类:< 1%

[0012] 7. 未被包括在国家报表中的航运和空运的“国际性燃料仓”:4%

[0013] 由于煤的效率和丰富,在具有强烈的动机来使用煤产生能量的同时,对于消除在标准燃煤发电厂中的煤燃烧所产生的二氧化碳气体到大气中的不期望的排放也有强烈的兴趣。

[0014] 用于消除过度二氧化碳排放的现有技术之一包括在 CO₂ 从烟囱中排出时将其“捕获”,其目的是要将二氧化碳储存在各种场所,包括地下储集层、海洋、岩石、消费品、化学制品或燃料。首次在 20 世纪 70 年代引入的碳捕获和储存(CCS)的想法通过利用在其中储存 CO₂ 气体的已有地下储集层开始。在这方面,值得一提的可能是存在有已经存在并包含气体达数百万年的许多天然的 CO₂ 储集层。此外,地下储集层中的可用储存空间(例如,耗尽的

油气贮藏、煤层和含盐层)可能足够大,足以储存在剩余化石燃料贮藏中所包含的所有二氧化碳气体。

[0015] 最近,前沿的科学和能量研究所强烈地提倡开发碳捕获和储存技术。例如,在2008年6月,世界上13个主要经济势力的科学研究院呼吁碳隔离(carbon sequestration)的履行为“应予最优先考虑的事”。大约在同时,国际能量协会(IEA)赞同其中碳捕获和储存形成重要组成的能源技术革命。同时,许多非主流(spin-offs)和先驱(start-ups)提供了与将CO₂储存在地下洞穴和储集层中的传统方法不同的各种“创新”观念。

[0016] 例如,从用于纯化天然气的烟囱或在氨生产设施处捕获CO₂已经是持续多年的普通作法。此外,已经在北海、阿尔及利亚、和德克萨斯出现二氧化碳的注射和储存,并且在这些情况中,CO₂被注射到油气储集层中,与其他情况下使用被称为提高采收率法采油(EOR)的方法可能抽出的化石燃料相比,这样提供了能够抽出更多化石燃料的附加利益。并且,对于这些应用中的一些,通过管道或船来运输二氧化碳。

[0017] 尽管这些技术中有一些在最近几年中实现了可靠性,但是许多专家仍认为,因为世界剩余化石燃料供应的快速使用,有必要进一步降低由这些技术引起的环境影响,以努力预防灾难性的气候变化。然而,眼前的问题是,从燃煤发电厂捕获、运输和储存二氧化碳气体的过程可能显著地提高能量消耗成本并引起严重的健康和环境问题和忧虑。例如,如果用于捕获CO₂排放所使用的能源直接来源于化石燃料本身,则通过捕获和储存进行CO₂贮存的利益会被完全相同的能量密集型过程所抵消。并且,如果所述能量来自于可更新的来源,则该技术会变得不必要,因为直接从该可更新来源发电将是更有效率的。

[0018] 实际上,已经发现,从烟囱捕获CO₂并将其压缩以便运输可能是该过程的能源最密集的部分之一。根据政府间气候变化专门委员会(International Panel of Climate Change, IPCC)在三年前进行的一项综合研究,捕获技术(包括压缩气体以便进一步运输和储存)可以使燃煤发电厂的能量消耗平均提高32%。

[0019] 简单地将燃煤发电厂的烟囱倒转也是不够的,因为合适的地下储集层不一定位于世界各发电站下面。碳捕获和储存基础设施还需要能够与已有油气网络相提并论的运输基础设施,诸如由管道(和罐车)组成的基础设施。并且这数千英里管道的制造和安装需要大量的成本和付出。此外,不仅要进行更多的研究以便找出哪个储集层适合于储存哪个不适合储存,而且将CO₂注射到地下储集层中和运输网络的监视(现在的管道是每两周用飞机巡视)、以及通过航运或管道进行气体运输典型地需要大量的付出和费用。

[0020] 在岩石中捕获二氧化碳也需要可与现今煤炭工业相比较的采矿和运输基础设施。例如,要固定一吨CO₂,据估计需要1.6-3.7吨岩石。不仅必需开采这些岩石并运输到燃煤发电厂,而且可以废物利用的工业废料和采矿尾料(例如,来自燃煤发电厂的燃料灰或来自造纸工业的脱墨灰)的量对于实质地抵销所需要的采矿和运输成本来说也是太小了。该过程还生成大量的废料(除碳化的岩石本身之外),并且在岩石中储存每吨二氧化碳产生2.87-45.18吨的可处理材料。

[0021] 过去已经进行了一些尝试来将二氧化碳储存在不可开采的煤床中,所述不可开采的煤床是潜在的用于隔离人为CO₂的大储存容量储集层。这种解决方案提供了增强甲烷生产的利益,可以潜在地抵销一些与CO₂隔离有关的成本。然而,现在对这种方法的经济可行性进行仔细研究的结果表明,将烟道气注射到不可开采的煤层缝中以便从煤层甲烷(CBM)

区域回收甲烷只是边缘经济的,不会显著地有助于世界的二氧化碳隔离需要。

[0022] 考虑到所有上述因素,据估计碳捕获和储存可能在任何给定应用中提高能量消耗达 50%,因此,即使所有的 CO₂ 最后都可以被分离并储存,这种能量消耗和成本的增加也是保持环境清洁所不能付出的太高的代价。由于全部上述原因,需要新的和改进的方法和设备来捕获和储存从燃煤发电厂排放的 CO₂ 气体,以克服与当前二氧化碳提取和去除方法有关的高成本和缺点,使得可以在没有增加人为全球性气候变化后果和以高成本生产能量的情况下使用世界的煤藏。

发明内容

[0023] 尽管上述讨论的一些负面观点,在与使用煤有关的环境忧虑方面越来越多的关注最近导致了某些洁净煤技术的开发,所述洁净煤技术设计用于增强煤提炼、制备和使用(特别是发电)的效率和环境可接受性。已经开发了几种可用的方法来使标准燃煤发电厂散发的烟道气(水蒸汽和 NO_x 气体的混合物)与二氧化碳气体分离。

[0024] 这种方法中的两个是:(1)膜法,和(2)接触溶液法。膜法的一个实例描述在 2003 年 6 月 3 日公布的标题为“Carbon dioxide gas separation using organic-vapor-resistant membranes(使用抗有机蒸气的膜分离二氧化碳气体)”的美国专利 6,572,680 中;接触溶液法的一个实例描述在 1999 年 1 月 19 日公布的标题为“Process for removing carbon dioxide from gas mixture(从气体混合物除去二氧化碳的方法)”的美国专利 5,861,051 中。

[0025] 在已经开发的那些方法中,一个被称为一体化气化联合循环技术(Integrated Gasification Combined Cycle technology,以下称为“IGCC”)的系统特别有前途,因为它同时允许发电和生产环境友好的燃料,例如氢气。IGCC 方法产生用于在发电机中燃烧的氢气,以及随后可以被分离、捕获和隔离的冷的二氧化碳气体物流,以帮助从涉及 IGCC 的发电厂消除对地球大气的 CO₂ 排放。

[0026] 所述方法本质上包括两个一般的技术:煤气化和联合循环发电。煤气化是产生可以用作燃气涡轮用燃料的清洁合成气体(合成气)的过程。在煤与水蒸汽和空气或氧气在高温和高压下反应以生产主要由氢气和一氧化碳组成的气体燃料时产生合成气。然后将合成气在水煤气转换反应器中加以处理,以便将 CO 转化为 CO₂ 并提高 CO₂ 和 H₂ 分子浓度。它导致碳化物反应以形成然后可以容易除去的 CO₂,并且因为 CO₂ 以比在燃烧后烟道气中高得多的浓度存在于合成气中,使用燃烧前技术比燃烧后捕获方法进行 CO₂ 捕获要更廉价。

[0027] 在合成气通过气体清除(cleanup)过程提纯之后,其可以在联合循环燃气轮机过程(“CCGT”)中燃烧以产生电。也就是说,在除去污染物之后,使用以下过程生成电:1)使用燃气涡轮发电机来燃烧合成气,2)使用来自气化的热和来自燃气涡轮发电机的废热来产生水蒸汽,和 3)使用水蒸汽为产生电的蒸汽涡轮发电机提供动力。总的过程被设计用于通过将气化和用于发电和生产氢气富化物流的适合的下游合成气处理集成化来降低燃煤发电厂的环境影响。

[0028] 然而,与 IGCC 有关的主要问题涉及以下缺点:(1)过度的电力损失,(2)运输 CO₂ 的高成本,和(3)隔离 CO₂ 的高成本。本系统的主要目标是降低并在一些构造中完全消除电力损失、对通过昂贵的管道运输回收气体的需要、以及对隔离气体的需要。并且,对于本

发明的目的而言,对 IGCC 的兴趣在于能够使用现有的 IGCC 系统从发电厂的烟道气分离一氧化碳和二氧化碳气体,使得可以将它们从发电厂的排放物中除掉,然后经过加工使得它们可以容易地运输和储存。

[0029] 所提出的解决方案实质上利用任何常规方法(例如,IGCC)从燃煤发电厂排放的气体捕获 CO₂,并且主要集中在将 CO₂ 气体冻结并将其捕获、储存和输送。在所提出的技术方案中,优选 CO₂ 气体通过与超冷却空气的相互作用而被冷却并凝华以产生冻结的二氧化碳晶体,然后可以使其聚结以形成随后可以容易运输的干冰块。这个过程消除了对挖矿、使用现有洞穴、或寻找藻类寄存物、或石灰露天矿、或建造管道的需要。相反,CO₂ 气体被冻结为干冰固体块,其然后可以被运输到实质上任何冷冻产品设施,例如生产碳酸饮料的那些设施,这样允许系统补偿与所述分离 CO₂ 有关的高成本。

[0030] 在这方面,应当注意到 CO₂ 可以以气体、液体和固体形式被捕获和运输—在固体形式时被称为干冰。干冰可以被保持在低于负 109.3° F 的温度并在熔化时直接转化为气体(由此得名)。并且,在被压缩时,一立方英尺的干冰等于 93.65 磅二氧化碳,而在气体形式,相同量(磅数)的 CO₂ 要占据超过 17,657.3 立方英尺。因此,可以看出,从成本和效率的角度看,期望不仅压缩 CO₂ 气体,而且将其形成为干冰块,其中干冰块可以容易地运输和储存。

[0031] 一般而言,本系统将从燃煤发电厂排放的 CO₂ 气体与预定量的超冷却空气一起注射到隔热的混合腔室中,以便快速冻结二氧化碳气体并形成晶体,形成的晶体随后聚结。通过将超冷却空气与 CO₂ 气体在混合腔室中混合,冻结的 CO₂ 气体会在死区区域中形成,引起晶体漂浮、聚结、和下落到底部,可以在底部将它们回收。在这方面,所述方法通常包括以下步骤:

[0032] 1. 使用涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置生产温度低到负 150° F 到负 180° F 的超冷却空气的体积流量,并将经过冷却的空气引入到隔热的混合腔室中。

[0033] 2. 通过从煤分离 CO₂ 气体生产 CO₂ 气体的体积流量,例如使用现有的 IGCC 过程,其中随后可以将 CO₂ 气体引入到腔室中并与超冷却空气混合以引起 CO₂ 气体的温度显著降低。

[0034] 3. 随着 CO₂ 气体开始与冷却的空气混合,并由于热交换而冻结,形成了纯的 CO₂ 晶体,其然后随着向下漂浮而开始聚结在一起。随着时间的过去,例如不到几秒,冻结的 CO₂ 晶体落下到腔室的底部,在那里它们被回收并形成干冰块。一个关键是将适当百分比的 CO₂ 气体(在室温下)与适当百分比的超冷却空气混合,使混合物达到适当的温度并形成冻结的晶体。

[0035] 4. 可以在腔室的底部提供螺杆或其它装置以便推动聚结的 CO₂ 晶体通过腔口,使晶体落在带有框架的传送装置上,所述框架可用于形成干冰块。优选在腔室中提供侧导管以允许冷却的空气逸出,使得可以将冷却的空气与 CO₂ 气体分离。其后,冰块可以容易地运输和储存,和/或出售给可能由于商业目的需要 CO₂ 的企业,包括碳酸饮料工业。因为这些工业需要使用 CO₂ 来生产他们的产品而与 CO₂ 来自何处无关,通过使用来自燃煤发电厂的 CO₂ 而不是新鲜的 CO₂,可以由此降低 CO₂ 的总消费量和到地球大气中的释放。

[0036] 本发明的另一个特点优选包括使用涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置来生产超冷却空气,其中所述装置可以吸进环境空气并将其压缩,然后将其释放,引起经过压缩的空气变为超冷的。本发明考虑了至少两种不同的压缩方法,如下所述:(1) 具有无需最初储存压缩

空气而生成超冷却空气的能力的涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置,和(2)具有高压储槽的压缩空气能量储存系统,其中涡轮压缩机将空气压缩到储槽中,涡轮膨胀机用于释放压缩空气并使其膨胀,以产生超冷却空气。在任一情况中,优选将经过冷却的空气注射到混合腔室中以便使被注射到该腔室中的 CO₂ 气体快速冻结。

[0037] 本发明优选包括可用于以适当量和适当比例引入 CO₂ 气体和超冷却空气的系统,以保证在腔室中形成的 CO₂ 气体晶体的最终温度保持在负 109.3° F 或低于该温度。在这方面,优选在充分的压力下将 CO₂ 气体和超冷却空气引入到腔室中,以引起它们适当地和充分地混合,使得经过冷却的空气将冷的温度传递给 CO₂ 气体。通过将超冷却空气注射到混合腔室中使得 CO₂ 气体与超冷却空气一起流通,CO₂ 气体晶体开始形成并聚结。优选各自的比例和流量以及腔室的总体尺寸和结构是预定的和经过控制的,使得生成的混合物迅速达到最佳温度并实现适当大小的晶体和性质。

[0038] 将 CO₂ 气体和超冷却空气引入到腔室中的方向可以有助于 CO₂ 晶体的适当形成,并由此有助于干冰本体的聚结。在这方面,本发明考虑了以下两种情况:1) 逆向流动方案和 2) 同向流动方案。使用哪种方案的因素取决于需要 CO₂ 多快冻结,这又取决于需要 CO₂ 气体和超冷却空气在进入腔室之前有多冷,以及腔室的尺寸、各自以多少量被引入到腔室中、比例如何等。在逆向流动的实施方案中,优选系统的腔室使注射的 CO₂ 气体通过多个入口向下进入到腔室中,其中超冷却空气通过在周边周围间隔开的多个入口向上引入。这被称为逆向流动过程是因为 CO₂ 气体和超冷却空气以相反的方向注射,以增强混合以及缩短晶体在腔室中的逗留时间。在同向流动实施方案中,CO₂ 气体和超冷却空气二者以相同方向引入,这样允许晶体更快速下降到底部以及 CO₂ 与空气的流畅的气旋分离。

[0039] 在任一情况中,在 CO₂ 晶体通过冷却的空气向下飞行期间,晶体随着下降而变得更冷并聚结在一起,其中在它们到达底部时,优选它们处于适当的温度。优选在腔室的一侧提供侧导管,其允许冷却的空气逸出同时允许 CO₂ 晶体落下或被朝向底部投射。这有助于保证将晶体与冷却的空气分离,其中然后可以将冷却的空气转移出去并用于冷却目的,以便提供额外的冷却用于 HVAC、制冷、脱盐和 / 或燃料驱动发电机组的入口空气,这样进一步提高系统的效率。

[0040] 优选腔室的底部设有螺杆,所述螺杆促进推动聚结的晶体向下通过腔口,所述腔口通向促进形成冰块的传送装置系统。传送装置优选具有用挠性带子不连续地间隔开的框架,使得随着传送装置旋转,冰块形成并被自动释放到诸如运输车辆上。

[0041] 在这方面,已经发现期望腔室底部的晶体本体保持在略低于 CO₂ 的冰点温度,使得干冰块在块形成时保持冻结。因此,期望控制腔室内的冷却空气的温度、CO₂ 气体的温度以及各自的引入速度,以便获得最佳的结果。负 109° F 升华温度是如此之冷,还需要考虑在干冰块形成之后下游对冷却空气的需要,使得下游的冷却空气有力地为本体的最终系统效率作贡献。

[0042] 与所涉及的特点有关,通过使涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置所生成的热和能量再循环并产生电和 / 或额外的冷空气形式的额外的能量用于 HVAC、制冷和脱盐来实现增加效率。这允许实现成本节省更多,可以进一步补偿从煤分离 CO₂ 气体的高成本,即,所述能量可用于驱动 IGCC。

[0043] 在这方面,本发明优选包含在相关的标题为“Method and Apparatus for Using

Compressed Air to Increase the Efficiency of a FuelDriven Turbine Generator(使用压缩空气以增加燃料驱动的涡轮发电机效率的方法和设备)”的美国临时申请序号 61/195,418 中描述的方法和系统。该系统涉及用于提高燃料驱动涡轮发电机效率的改进的方法和系统,其中所述系统利用来自涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置的超冷却空气并将其与环境空气混合以产生冷空气,所述冷空气可以被注射到压缩机涡轮中以便其更有效率的操作。与冷却进口空气的先前的装置不同,该系统利用通过涡轮压缩机和涡轮膨胀机膨胀的压缩空气以生成超冷却空气,其中该系统不仅产生可以被吸进到燃料驱动发电机中的冷空气,而且产生“干燥的”进口空气。并且,通过使用离心机从进口空气除去水分,在进口空气通过短舱(nacelle)加速并加入到压缩机涡轮中时,不形成可能损害涡轮叶片的冰粒。

[0044] 无论装置是 CTT 装置(压缩机/涡轮压缩机/涡轮膨胀机)还是如随后定义的 TCAES 装置(涡轮压缩空气能源系统),考虑了在压力下压缩空气、然后将其释放以产生超冷却空气的联合的涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置。优选该装置释放经过压缩的空气,或者具有在启动时压缩和驱动空气的第一压缩机,以引起涡轮膨胀机开始旋转,然后由于涡轮膨胀机和涡轮压缩机处于同轴上,使涡轮膨胀机旋转引起涡轮压缩机也旋转。这样直到在几秒之后实现操作的稳态状态,其中涡轮压缩机继续压缩空气,涡轮膨胀机继续使空气膨胀,最终结果是产生高质量流量的超冷却空气作为副产物。

[0045] 由装置产生的超冷却空气然后与环境空气混合以产生用于被引入到燃料驱动涡轮发电机的压缩机涡轮中的相对冷的进口空气。优选提供在其中混合冷却空气的混合室或喷射器。随着两个空气本体混合在一起,形成了可以用作进口空气以提高燃料驱动涡轮发电机效率的相对冷的空气质量流量。

[0046] 如以上讨论的,产生冷空气并将其用作压缩机涡轮的进口空气的优点在于空气变得更紧密,并具有更大的质量流量,因此压缩机涡轮不必须象将等体积的进口空气压缩到燃烧室中那样努力地作功。因此,压缩机涡轮耗费较少的能量,其中更多的能量可用于驱动发电机,即,由系统产生的能量的更大部分用于驱动发电机和产生电。结果是较少的能量被用于操作压缩机涡轮,这有利地意味着更多的能量可用于驱动发电机,有助于提高系统消耗每单位体积燃料产生更多能量的能力。

[0047] 所述装置的另一个优点是,超冷却空气可用于从进口空气除去水分并避免可以损害涡轮叶片的冰粒。这通过使用超冷却空气作为使环境空气内的水蒸汽快速冻结的手段来实现,然后从冷却的空气分离冰粒(包括在冰粒内捕获的固体微粒)。随着温暖潮湿的环境空气与超冷却空气混合,存在于环境空气内的大部分水蒸汽被快速冻结,以形成微小的冰粒。然后,随着冰粒落下至分离隔室(或离心机)的底部,可以将冷却的干燥空气引导到相对于离心机的轴以大约九十度延伸的侧导管或通路中,其中随着高速冰粒继续它们朝向底部的笔直惯性轨迹,冷却的干燥空气则转过拐角并通过通路而将冰粒留在后面。结果产生了冷却的“干燥”空气。

[0048] 如所讨论的,从冷却进口空气消除冰粒不仅提高了系统的效率,而且避免了涡轮叶片的点蚀和对其造成损害,并允许以甚至更低的温度提供进口空气。进入燃料驱动涡轮发电机的压缩机涡轮中的入口典型地是喷嘴或短舱的形状,具有相对宽的开口,随后是相对狭窄的短舱,压缩机涡轮桨叶位于所述相对狭窄的短舱中。因此,随着进口空气加速通过短舱,由于流动途径的收缩引起引入空气的近似绝热加速,其中这种状态与焓降低有关,所

述焓降低又产生显著的温度下降。尽管更低的进口空气温度引起更大的系统效率，向下的趋势是，如果进口空气的温度降低到冻结以下，可能形成可以击打涡轮叶片并对涡轮叶片造成损伤的冰粒。

[0049] 在另一个实施方案中，随着冰粒在离心机中融化所产生的冷水被用于为辅助装置提供冷却。也就是说，随着在离心机的底部收集冰粒，可以将它们解冻以产生冷水，所产生的冷水可以被转移到关联的装置例如热能储存系统中，可以在其中储存冷水用于随后使用。热能储存系统优选包括可以在其中储存冷水的层化槽，并且可以将冷水从层化槽中取出以便为辅助装置提供冷却，辅助装置例如是 HVAC、制冷、脱盐等等。在使用冷水为这些装置提供必要的冷却之后，然后将水循环回到层化槽，其中通过用这种方式储存冷水，水可以根据需要来使用。在替代实施方案中，冷水可用于直接为 HVAC、制冷、脱盐等提供冷却，而不首先将其储存。

[0050] 还可以使用换热器来吸取由空气压缩所产生的热并转移给与之关联的蒸汽涡轮发电机和 / 或冷却器系统，以提高其性能。换热器优选包含冷却剂，例如水，所述冷却剂可以经通道通过压缩机单元以便将热从装置转移到关联的蒸汽涡轮发电机和 / 或冷却器系统。在水蒸汽发生器方面，可以为关联的锅炉提供预热的水，以便可以使用较少的能量使锅炉中的水沸腾。通过将热从装置抽出，将冷却水预热，和将冷却水引入到锅炉中，不仅使蒸汽涡轮发电机更有效率，而且整个系统可以更有效率地产生电。蒸汽驱动涡轮发电机可以是使用锅炉来产生水蒸汽的任何常规类型，所述水蒸汽又驱动蒸汽涡轮，借此可以驱动发电机以产生电。

附图说明

[0051] 图 1A 是示意图，示出了用于从燃煤发电厂释放的烟道气提纯和分离 CO 和 CO₂ 气体的现有 IGCC 系统的各组件和步骤 (HRSG = 余热回收蒸汽发生器)；

[0052] 图 1B 是原理图，示出了用于加工煤并从中除去二氧化碳的现有系统 (WGS 反应器 = 水煤气变换反应器 ;ESP = 静电除尘器)；

[0053] 图 2 是示意图，示出了用于生成超冷却空气的 CTT 装置的实施方案，所述 CTT 装置利用具有两级压缩机的两级涡轮压缩机和两级涡轮膨胀机组，其中所述涡轮压缩机和涡轮膨胀机组位于共用轴上，且提供了用于从压缩机除去热的多个换热器；

[0054] 图 3 是示意图，示出了用于生成超冷却空气的 TCAES 系统的实施方案，所述 TCAES 系统包含储槽并利用两级涡轮压缩机和两级涡轮膨胀机组，其中所述涡轮压缩机和涡轮膨胀机组位于共用轴上，且提供了用于从压缩机除去热的多个换热器；

[0055] 图 4 是示意图，示出了具有用于将 CO₂ 气体排放与超冷却空气混合的混合腔室的本发明系统的实施方案，其中所述腔室具有用于将冷却的空气与冻结的 CO₂ 晶体分离的侧导管，且其中允许冻结的 CO₂ 晶体在腔室的底部被收集并在那里形成容易运输和储存的干冰块；

[0056] 图 5 是 CTT 装置的示意图，示出了用于提高燃料驱动涡轮发电机 (包括蒸汽涡轮发电机) 的效率的各组件和方法步骤；

[0057] 图 6 是 TCAES 装置的示意图，示出了用于提高燃料驱动涡轮发电机 (包括蒸汽涡轮发电机) 的效率的各组件和方法步骤；

[0058] 图 7 是示意图,示出了如何将 CTT 装置生成的超冷却空气与通过 IGCC 分离的 CO₂ 混合,其中从腔室取出 CO₂ 的固体块,并且其中回收了来自 CTT 装置的废热,且剩余的冷却空气被用作燃料驱动涡轮发电机的进口空气;

[0059] 图 8 是示意图,示出了如何将 TCAES 装置生成的超冷却空气与通过 IGCC 分离的 CO₂ 混合,其中从腔室取出 CO₂ 的固体块,并且其中回收了来自 TCAES 装置的废热,且剩余的冷却空气被用作燃料驱动涡轮发电机的进口空气;

[0060] 图 9 是示出了一个 CTT 装置实例的热力学状态的图;

[0061] 图 10 是示出了一个 CTT 装置实例的热平衡和空气流动要求的图;

[0062] 图 11 是示出了一个本发明系统实例的来自发电厂的 CO₂ 和空气导管尺寸的图;

[0063] 图 12 是示出了一个本发明系统实例的来自混合管道的 CO₂ 和空气导管尺寸的图;

[0064] 图 13 是示出了一个 CTT 装置实例的压缩机的效率的图;和

[0065] 图 14 是示出了两个不同的 CTT 装置的热力学性能的图。

具体实施方式

[0066] 现代技术的煤利用产生了一些不受欢迎的排放物。这些排放物包括氮和硫的氧化物、颗粒排放物和温室气体例如二氧化碳。有强烈的动机来减少这些排放物和改善煤利用技术的燃料效率。

[0067] 为了解决这些挑战,正在开发新的煤利用技术。这些技术中较有前途的一个是用于发电的一体化气化联合循环技术(“IGCC”)。图 1A 示出了典型的现有 IGCC 系统 1 示意流程图。这个系统 1 是由燃煤发电厂及其排放物洗涤系统使用的,用于从发电厂产生的其它烟道气提纯和分离 CO 和 CO₂ 气体。还可以使用其它过程,尤其是例如亚临界粉煤(SPC)、超临界粉煤(USCPC)和循环流化床(CFB),但是在这里将 IGCC 过程作为优选的系统。

[0068] IGCC 被认为是将来用于供电并且代替老化的煤发电厂和越来越昂贵的天然气发电厂的主要的系统类型。该过程为消除温室气体和产生有用的氢气和/或液体燃料提供了可选方案。

[0069] IGCC 发电厂使用的过程可以分解为两个一般的技术:第一个技术被称为煤气化,其中将煤气化以生产合成气体(合成气)。第二个技术被称为联合循环发电,这是现在可用的商业上生产电的最有效率方法之一。在从合成气除去污染物之后,使用以下过程生成电:1) 使用燃气涡轮发电机来燃烧合成气,2) 使用来自气化的热和来自燃气涡轮发电机的废热来产生水蒸汽,和 3) 使用水蒸汽为帮助发电的蒸汽涡轮发电机提供动力。

[0070] 煤气化是产生可以用作燃气涡轮用燃料的清洁煤气(合成气)的过程。在这个过程中,在煤燃烧之前,使煤与水蒸汽和空气或氧气在高温和高压下反应以生产主要由氢气和一氧化碳组成的气体燃料。优选对气化器内可用的空气或氧气(O₂)的量小心地加以控制,使得只有一部分燃料完全燃烧。这个“部分氧化”过程提供了使燃料化学分解并产生合成气体(合成气)所需的热,所述合成气体(合成气)由氢气(H₂)、一氧化碳(CO)、和少量的其它气体组分组成。

[0071] 然后将合成气在水煤气变换反应器中处理,其优选将 CO 转化为 CO₂ 并提高合成气物流中的 CO₂ 和 H₂ 分子浓度,例如分别达到 40%和 55%。然后一氧化碳和高压水蒸汽在催化剂的存在下形成 CO₂ 和更多的 H₂,这在实践中产生可以包含超过 90%氢气的燃料气体。

它还导致碳化合物反应以形成然后可以容易地除去的二氧化碳,这是因为气体混合物处于高压且 CO_2 处于高浓度。因为 CO_2 在合成气中以比在燃烧后烟道气中高得多的浓度存在,使用燃烧前技术比燃烧后捕获方法捕获 CO_2 更廉价。目前,很少有气化发电厂全负荷运转,且所涉及的投资成本要高于传统的粉煤发电厂。

[0072] 优选通过气体清除过程提纯 IGCC 技术所生产的合成气—可以使用各种溶剂将 CO_2 从富氢的燃料气体中洗涤出来,且在一个这种应用中,所使用的溶剂是 MDEA。替代溶剂,也可以将膜用于 CO_2 分离和氢气净化,采用至少两种方法:1) 水煤气变换 (WGS) 膜反应器,和 2) CO_2 去除随后进行 WGS 反应。在第一个方法(即, WGS 膜反应器)中,由膜除去 CO_2 ,且商业的 $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂处于 130°C - 160°C 并将 CO 转化为 H_2 ,使得它催化 WGS 反应。通过同时除去 CO_2 ,可逆的 WGS 正向进行,使得 CO 被转化为氢气,而 CO 浓度则显著地降低。可以在不同的进气流速实现低于 10ppm 的 CO 浓度和大于 50% 的 H_2 浓度(基于干重)。在第二个方法中,所述过程由 CO_2 选择性膜模块和随后的传统的 WGS 反应器组成。 CO_2 选择性膜模块将合成气中超过 99% 的 CO_2 除去。

[0073] 在联合循环燃气轮机过程(“CCGT”)中,合成气燃烧以产生电。如图 1A 中所示,CCGT 发电机的设计由燃气涡轮/发电机、余热回收蒸汽发生器(H. R. S. G.)、和蒸汽涡轮/发电机组成。来自气化的热和来自燃气涡轮的废热优选在余热回收蒸汽发生器中得以回收以产生水蒸汽。然后这个水蒸汽通过蒸汽涡轮以便为另一个生产电的发电机提供动力。CCGT 比传统的发电系统更有效率,因为它再利用了来自系统的废热以产生更多的电。

[0074] IGCC 是一种包括以下特征的技术:

[0075] ● 与现代的燃煤发电厂相比,IGCC 发电厂中的 SO_x 、 NO_x 和颗粒排放少得多。其挥发性有机物(VOC)排放和汞排放是相当的。

[0076] ● IGCC 发电厂排放的 CO_2 气体比现代的燃煤发电厂少大约 20%。

[0077] ● IGCC 发电厂的用水比现代的燃煤发电厂少 20-40%。

[0078] ● IGCC 发电厂的操作效率比传统的烧煤的发电厂高,因此需要较少的燃料且产生较少的排放。目前的效率是 42%,使用高效率涡轮机和其它的工艺改进预期在不久的将来达到 60%。

[0079] ● 在不进行 CO_2 捕获的情况下的电成本比现代的燃煤发电厂高大约 20%。电成本比以 \$6.50/MMBTU 使用天然气的天然气 IGCC 发电厂低 40%。

[0080] ● 与 25-30% 额外成本增加用于捕获和隔离(不含运输费用)的传统燃煤发电厂相比,来自 IGCC 发电厂的 CO_2 更容易捕获。

[0081] ● IGCC 以经济的方式捕获作为合成气物流的一部分的氢气。

[0082] IGCC 由于目前的传统煤基发电系统的优点包括:

[0083] 1) 更高效率和更少排放:效率的改善显著地降低煤燃烧的排放。例如,效率从 35% 到 40% 的增加使二氧化碳气体排放减少超过 10%。借助目前接近 50% 的效率,与传统的发电厂相比,IGCC 发电厂使用更少的煤并产生更少的二氧化碳排放。随着新的燃气涡轮概念和提高过程温度的发展,目标是超过 60% 的效率。

[0084] 2) 更高的输出量:在燃气涡轮中使用合成气提高其输出量,尤其是在将来自吹氧单元的氮供应给涡轮机时。这样,在燃烧天然气时额定为 170MW 的涡轮机可以在使用合成气时输出 190MW 以上。此外,与使用天然气的情况相比,输出量对周围温度的依赖更少。

[0085] 3) 产品灵活性 - 包括碳捕获和氢气产生 :IGCC 的气化过程不仅能够产生电,而且产生多种化学品、用于工业应用的副产品、和运输燃料。此外,并且是最重要的,可以通过水煤气转换过程从煤合成气(一氧化碳和氢气)捕获二氧化碳。也就是说,可以在浓缩的物流中捕获 CO_2 ,从而使其更容易隔离。额外的优点是,碳捕获的额外费用低,特别在发电厂是氧气驱动的情况下。

[0086] 相关的现有技术示出在图 1B 中,图 1B 示出了概念上的一体化实验室级发电厂方案,来自气化器的合成气经历由洗涤器和静电除尘器(ESP)组成的气体净化工段。合成气被分流为两个物流:第一物流由 80% 的总气流组成,被送往电力生产线,电力生产线的构成为:1) 冷脱硫系统,和 2) 用于电力生产的内燃发动机。第二物流由 20% 的总气流组成,被送往氢气生产线,所述氢气生产线的组成为:1) 热脱硫系统,2) 两个水煤气转换工段(高温和低温),3) 两个 CO_2 分离阶段,用于获得氢气富集的气体物流,和 4) 氢气净化系统。

[0087] 在这个过程中,烟道气中的 CO 通过与水的相互作用被转化为 CO_2 和 H_2 。这样提高了烟道气中的 CO_2 浓度。这个 CO_2 物流然后通过随后的过程被分离:来自转换转化的气体经历进一步的加工以便使二氧化碳与氢气分离。采用了基于用胺吸收的化学方法,使用带有亲水性和疏水性聚合物膜的反应器来从包含氢气的气体物流除去二氧化碳。所述过程包括以下工段:1) 合成气通过亲水性膜扩散到胺溶液中,2) CO_2 被吸收到胺溶液中,和 3) 通过疏水性膜分离经过净化的合成气。

[0088] 尽管目前的 IGCC 发电厂是已经被选择用于本发明的优选方法,但是在现有的 IGCC 发电厂中发现了三个关键的缺点:(1) 过多的电力损失,(2) 运输 CO_2 的高成本,和 (3) 隔离 CO_2 的高成本。然而,本发明系统的目的是减少并在一些构造中消除电力损失、对通过昂贵的管道进行输送的需要和对隔离的需要。

[0089] 由燃煤发电厂及其排放物 - 洗涤操作所生成的二氧化碳气体物流在过去是通过将其通过烟囱释放到大气中来处理的,由此显著地对大气中的温室气体作出贡献。还尝试使用昂贵的管道和压缩设备来运输和隔离 CO_2 排放物,但是这些努力都不是很成功。

[0090] 本发明包括一种系统,代表了相对于过去分离、运输和隔离来自燃煤发电厂的 CO_2 气体排放物的努力的改进,并优选使用可以与 CO_2 气体混合并使 CO_2 气体形成晶体的超冷却空气,所述晶体可以聚结以形成可以容易运输和储存和 / 或用于商业目的(例如用于生产碳酸饮料)的干冰块。以下是 CO_2 商业应用的列举:饮料、食品、气动系统、灭火器、焊接、咖啡因去除、药物和其它化学加工、生物学应用、激光、聚合物和塑料、油回收、作为致冷剂、煤层甲烷(CBM)回收和酿酒。固体二氧化碳冰块可以从燃煤发电厂转移并运输到生产位置外以便在别处使用,由此在生产位置没有剩余的二氧化碳足迹。

[0091] 本发明可以利用实质上任何系统来从煤和 / 或碳燃烧烟道气分离一氧化碳和二氧化碳以及将这两种气体合并以形成一个二氧化碳气体物流,但是优选使用上述的 IGCC 系统。本发明系统的基本操作包括以下步骤:

[0092] 1) 压缩:系统利用一个或多个涡轮压缩机压缩环境空气并提高其压力;

[0093] 2) 冷却剂:系统使压缩空气暴露于冷却剂,使得可以将压缩空气的温度保持在或保持接近室温,其中被加热的冷却剂水随后可用于提高关联的蒸汽涡轮发电机或冷却器的效率,其中能量随后可用于帮助驱动 IGCC;

[0094] 3) 膨胀:系统通过一个或多个涡轮膨胀机释放压缩空气并使其膨胀,从而生成超

冷却空气作为副产物；

[0095] 4) 混合：系统将由涡轮膨胀机生成的超冷却空气（其可以低到负 150° F 到负 180° F）与来自 IGCC 系统的二氧化碳气体流混合。优选地，温暖的二氧化碳气体与超冷的空气之间的质量比导致二氧化碳气体的温度降低到至少负 109.3° F 或更低，导致 CO₂ 气体冻结和固化。得到的是可以容易地运输和储存的固体二氧化碳（干冰）块，并且可以在别处用于 HVAC、制冷和 / 或脱盐的冷空气。残余的冷却空气还可以用于为关联的燃料驱动涡轮发电机提供冷的进口空气，以提高其效率，来源于其中的能量还可以用于帮助驱动 IGCC。

[0096] 尽管上述的冷却和冻结步骤可以容易地通过任何常规的冷却和 / 或制冷系统实现，但是本发明优选使用带有独立并行联机 (free spooling) 设置的涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置，例如在图 2 和图 3 中示出的那些，其允许以空气的更高度压缩实现更高的空气质量流量，从而最终膨胀到大气压力可以产生超冷却空气。此外，与常规的制冷机器相比硬件的覆盖区和体积小。特别是，涡轮机器对于任何低温学过程成功可能都是必需的。可以使用的一个类型实例是由 CryoMachinery (AirProducts) 生产的，是一种向心式涡轮膨胀机，其为当今世界上一些最有效率的空气分离和液化设备提供制冷。高压涡轮膨胀机典型地用于为生产低温液体提供制冷；膨胀机从为该过程提供制冷的高压气体物流提取功 (work)。由膨胀机从气体物流移除的功用于为压缩循环提供动力。

[0097] 图 2 示出了两级涡轮膨胀机 CTT 装置 3，其具有两级压缩机 5、两级涡轮压缩机 7 和 9、和两级涡轮膨胀机 11 和 13，以及第一、第二和第三换热器 15、17 和 19。CTT 装置 3 的操作优选从最初使用来自燃煤发电厂的少量能量使环境空气增压的两级压缩机 5 开始，即，从燃煤发电厂分接最小量功率 6 用以驱动压缩机 5。然而，如所讨论的，可以由于来自系统的废热在同位水蒸汽驱动的发电机组 (co-located steam-fired generator set) 或同位的冷却器中被回收并利用而使这种能量减少。还可以使用单独的动力来源。

[0098] 压缩机 5 优选包括它自己的冷却系统，所述冷却系统有助于压缩空气在被增压时温度降低，其中可以通过压缩机分配冷水（例如，60° F）并用作冷却剂，其中较热的水可以随后被分配给关联的蒸汽驱动发电机组 89，例如图 5 中所示的，以便产生额外的电或者可以进给到冷却器。

[0099] 如图 2 中所示，第一换热器 15 可以设置在压缩机 5 的下游。可以通过第一换热器 15 分配额外的冷水（例如，60° F），以便降低压缩空气的温度，诸如降低到室温，这有助于确保由系统使用的最终冷却的空气实质上是冷却的。然后将被加热的冷却水分配给关联的蒸汽驱动发电机组 89，并用于产生额外的电，同样如图 5 中所示。

[0100] 然后来自压缩机 5 的压缩空气在通过第一换热器 15 之后优选被引入到第一级涡轮压缩机 7 中，在那里压缩空气被再次压缩和加热。第一涡轮压缩机 7 优选获取来自压缩机 5 的压缩空气并将其压缩，以便进一步提高其压力，但是其后，因为还生成了额外的热，被加热和压缩的空气通过第二换热器 17，第二换热器 17 使用与上述涉及第一换热器 15 所述的基本上相同的冷却系统使压缩空气的温度再次降低，在其中可以使用冷水作为冷却剂，并且然后可以在关联的蒸汽发电机组 89 中利用被加热的水，以产生更多的能量，如图 5 中所示。

[0101] 已经被冷却的压缩空气然后进入到第二涡轮压缩机 9 中，在那里压缩空气被再次压缩和加热。然后被加热和压缩的空气通过第三换热器 19，第三换热器 19 利用与上述涉及

第一换热器 15 和第二换热器 17 所述的相同冷却系统再次降低空气的温度,其中然后可以在关联的蒸汽发电机组 89 中利用被加热的水,以产生更多的能量,如图 5 中所示。

[0102] 一旦压缩空气被充分增压(诸如,达到 215psia)和冷却(诸如,冷却到大约室温),然后压缩空气通过第一涡轮膨胀机 11 和第二涡轮膨胀机 13 释放和膨胀(参见图 2),第一涡轮膨胀机 11 和第二涡轮膨胀机 13 释放压缩空气以产生超冷却空气。在这方面,需要指出的是,随着压缩机 5 启动并作功以压缩环境空气,以及空气通过该系统,因为第一涡轮压缩机 7 和第一涡轮膨胀机 11 处于共用轴 8 上,并且因为第二涡轮压缩机 9 和第二涡轮膨胀机 13 处于共用轴 10 上,两个涡轮膨胀机的旋转引起两个涡轮压缩机也旋转,直到实现操作的稳态(并行联机(spooling)状态。每组并行联机(spooling)叶轮是独立地设置的,因此可以具有它们自己的转速。

[0103] 因此装置 3 的基本操作从由压缩机 5 生成压缩空气开始,然后压缩空气被引入到第一级涡轮压缩机 7 中,然后被引入到第二级涡轮压缩机 9 中,并且在压缩空气通过涡轮膨胀机 11、13 释放和膨胀时,因为第一涡轮膨胀机 11 与第一涡轮压缩机 7 处于同一轴上,且第二涡轮膨胀机 13 与第二涡轮压缩机 9 处于同一轴上,在第一涡轮膨胀机 11 和第二涡轮膨胀机 13 开始旋转时,第一涡轮压缩机 7 和第二涡轮压缩机 9 也开始旋转。所有四个组件-第一涡轮压缩机 7、第二涡轮压缩机 9、和第一涡轮膨胀机 11、第二涡轮膨胀机 13-会由于第一涡轮膨胀机 11 和第二涡轮膨胀机 13 所生成的扭矩(机械功)而旋转,以分别驱动第一涡轮压缩机 7 和第二涡轮压缩机 9。在这方面,由第一涡轮膨胀机 11 和第二涡轮膨胀机 13 分别产生的轴 8 和轴 10 的转速优选提供足够的动力以分别驱动第一涡轮压缩机 7 和第二涡轮压缩机 9,直到它们达到平衡输入压力。在实现操作的稳态状态时-所述操作的稳态状态可以在几秒内出现-涡轮压缩机 7、9 继续压缩空气,然后压缩空气继续通过涡轮膨胀机 11、13 释放和膨胀,产生超冷却空气。每组涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置具有它自己的转速和额定功率。

[0104] 优选地,在压缩空气分别由压缩机 5 和涡轮压缩机 7、涡轮压缩机 9 增压时,换热器 15、17 和 19 有助于降低压缩空气的温度。这样,由压缩机生成的热可以被排出,使得所述热不影响或抵销由此生成的冷却空气的温度。在这方面,优选换热器 15、17 和 19 是任何常规的类型,诸如逆向流动系统,其利用冷却剂例如冷水来从压缩机(以及它们产生的压缩空气)吸热,其中一旦热被交换,冷却剂被转移给关联的发电机例如蒸汽涡轮发电机和/或吸收式冷冻器。优选换热器强制由压缩机产生的高温压缩空气将其中包含的热交出给冷却剂,其中随着冷却剂被加热,由压缩机产生的压缩空气的温度可以显著降低。

[0105] 在逆向流动换热器中,优选冷的冷却剂水在与冷空气离开的相同末端被引入到换热器中,而同时,被加热的空气在与被加热的水离开的相同末端被引入到换热器中。也就是说,冷却水被引入到一个末端中,而被加热的空气被引入到相反的末端中,且冷却水和被加热的空气以相反的方向通过换热器。这样,被加热的空气可以被引入到在被加热的水离开的相同末端中,而冷水可以被引入到冷空气离开的相同末端中,从而有助于换热器更有效率地操作。

[0106] CTT 装置 3 通常包括以下特点:1) 在下游涡轮膨胀机中的膨胀过程产生“功”,所述“功”通过所连接的轴输被送给上游的涡轮压缩机,使得下游的涡轮膨胀机和上游的涡轮压缩机在加速期间和在实现最终的平衡转速时具有相同的转速。在达到稳态平衡时,处于

同一轴上的涡轮膨胀机和涡轮压缩机实现相同的转速,其中这种平衡状态被称为“独立并行联机 (free spooling)”模式。在此情况下,涡轮压缩机允许实现更高的压力,使得总体的膨胀到大气压力可以得到增强。2) 由涡轮压缩机的压缩所生成的热空气被冷却剂水冷却,使得涡轮膨胀机的进气可以被降低到诸如大约室温。这样,在由于急剧压降发生膨胀时,可以实现负 150° F 到负 180° F 的空气温度。3) 涡轮压缩机和涡轮膨胀机以量级在 30,000-70,000RPM 的非常高的转速旋转,使得在发生巨大的温度下降时可以处理巨大的空气质量流量。4) 高的转速需要对叶轮进行调节,以避免在叶轮周边出现超声速的叶尖速度。因此,优选这些装置是小的,尤其是与巨大的常规制冷和常规的冷却器系统相比。

[0107] 图 3 示出了两级涡轮膨胀机 TCAES 装置 21,其具有两级涡轮压缩机 23、25,和两级涡轮膨胀机 27、29,以及第一和第二换热器 31、33。TCAES 装置 21 的操作与 CTT 装置 3 相似,不同之处在于压缩空气被储存在高压槽 105 中(如图 6 中所示),并可以在任何时候被释放,这样提供了可以作为时间转换工具的额外的利益,也就是说,产生能量的时间可以不同于其被使用的时间。来自槽 105 的压缩空气优选被引入到第一级涡轮压缩机 23 中,在那里压缩空气被再次压缩和加热。第一涡轮压缩机 23 优选从槽 105 获得压缩空气并将其进一步压缩,以便进一步提高压力。其后,因为还生成了另外的热,优选使被加热和压缩的空气通过第一换热器 31,第一换热器 31 使用与上述涉及 CTT 装置 3 所述的基本上相同的冷却剂系统降低压缩空气的温度,其中可以使用冷水作为冷却剂,并且其中被加热的水可以在关联的蒸汽发电机组 111 中被利用,以产生更多的能量。

[0108] 已经被冷却的压缩空气然后进入到第二涡轮压缩机 25 中,在那里压缩空气被再次压缩和加热。然后被加热和压缩的空气通过第三换热器 33,第三换热器 33 利用与上述涉及第一换热器 31 所述的相同冷却剂系统再次降低空气的温度,其中然后可以在关联的蒸汽发电机组 111 中利用被加热的水,如图 6 中所示,以产生更多的能量。

[0109] 一旦压缩空气被充分增压(诸如,达到 215psia)和冷却(诸如,冷却到大约室温),优选压缩空气通过第一涡轮膨胀机 27 和第二涡轮膨胀机 29 释放和膨胀,第一涡轮膨胀机 27 和第二涡轮膨胀机 29 释放压缩空气并使其膨胀,以产生超冷却空气。在这方面,需要指出的是,随着压缩空气被进给到第一涡轮压缩机 23 中,因为第一涡轮压缩机 23 和第一涡轮膨胀机 27 处于共用轴 30 上,并且因为第二涡轮压缩机 25 和第二涡轮膨胀机 29 处于共用轴 32 上,两个涡轮膨胀机的旋转会引起两个涡轮压缩机也旋转,直到实现操作的稳态状态。

[0110] 装置 21 的基本操作从压缩空气被引入到第一级涡轮压缩机 23 中开始,然后压缩空气被引入到第二阶段涡轮压缩机 25 中,并且在压缩空气通过涡轮膨胀机 27、29 释放和膨胀时,因为第一涡轮膨胀机 27 与第一涡轮压缩机 23 处于同一轴上,且第二涡轮膨胀机 29 与第二涡轮压缩机 25 处于同一轴上,在第一涡轮膨胀机 27 和第二涡轮膨胀机 29 开始旋转时,第一涡轮压缩机 23 和第二涡轮压缩机 25 也开始旋转。所有四个组件 - 第一涡轮压缩机 23、第二涡轮压缩机 25、和第一涡轮膨胀机 27、第二涡轮膨胀机 29 - 会由于第一涡轮膨胀机 27 和第二涡轮膨胀机 29 所生成的扭矩(机械功)而开始旋转,以分别驱动第一涡轮压缩机 23 和第二涡轮压缩机 25。轴 30、32 的转速优选提供足够的动力以分别驱动第一涡轮压缩机 23 和第二涡轮压缩机 25,直到它们达到平衡输入压力。在实现操作的稳态状态时 - 所述操作的稳态状态可以在几秒内出现 - 涡轮压缩机 23、25 继续压缩空气,然后压缩

空气继续通过涡轮膨胀机 27、13 释放,产生超冷却空气。

[0111] 优选地,在压缩空气分别由涡轮压缩机 23、25 增压时,换热器 31、33 有助于降低压缩空气的温度。这样,由压缩机生成的热可以被排出,使得所述热不影响或抵销由此生成的冷却空气的温度。在这方面,换热器 31、33 优选是任何常规的类型,诸如逆向流动或同向流动类型,如以上讨论的。

[0112] 图 4 示出了提出的一个解决方案 41,所述解决方案获得来自煤或来自燃煤发电厂排放的其余气体分离的 CO₂ 气体并将其冻结和储存。也就是说,在所提出的解决方案中,使用 IGCC 系统,来源于煤的 CO₂ 气体优选被引入到腔室 43 中,然后通过超冷却空气(源于 CTT 装置 3 或 TCAES 装置 21)相互作用而被冷却且凝华,以产生冻结的二氧化碳晶体,所述晶体可以聚结形成冰块,然后所述冰块可以容易地运输和储存。这种过程消除了对挖矿、使用现有洞穴、或寻找藻类寄存物、或石灰露天矿、或建造管道的需要。相反,CO₂ 气体被冻结为干冰固体块,其然后可以被运输到实质上任何冷冻产品设施(例如,生产碳酸饮料的那些设备,这又使得系统变成一个会赚钱的投资),这样可以补偿上述的使用 IGCC 的与所述分离 CO₂ 有关的高成本。

[0113] 一般而言,本系统包括一个将 CO₂ 气体与预定量的超冷却空气一起注射到腔室 43 中的系统,其有助于快速冷冻二氧化碳气体以形成晶体,形成的晶体随后聚结在一起形成冰块。优选地,将超冷却空气通过沿着腔室 43 周边间隔开的多个入口 45 向上注射到腔室 43 中,而 CO₂ 气体通过多个入口 47 被向下引入。这样随着其二者混合,可以在死区区域 49 内形成冻结的 CO₂ 晶体并且流通,引起它们聚结在一起。通过将负 150° F 到负 180° F 的超冷却空气的体积流量引入到隔热的混合腔室 43 中,并然后引入 CO₂ 气体的体积流量,CO₂ 气体的温度可以被显著降低,诸如低到负 109.3° F 或更低。然后,随着 CO₂ 气体与超冷却空气混合并由于热交换而冻结,形成了纯的 CO₂ 晶体。随着时间的过去,例如不到几秒,冻结的 CO₂ 晶体聚结并落下到腔室 43 的底部,在那里它们被收集并形成干冰块。

[0114] 一个关键是将适当百分率的 CO₂ 气体(在室温下)与适当量的超冷却空气(负 150° F 到负 180° F)混合,使混合物达到会导致形成冻结的 CO₂ 晶体的适当温度。在这方面,优选在腔室 43 的一侧提供侧导管 53,使冷却的空气能够通过腔室 43 并流通出去,使得冷却的空气可以引起 CO₂ 晶体增压向下(通过重力和惯性),从而有助于强制冻结 CO₂ 晶体朝向腔室 43 的底部。为了使其发生,期望入口 47 处于出口上方(出口是侧面导管 53),使得腔室 43 内的空气有效率地向下流通通过腔室 43。

[0115] 本发明优选包括可用于以适当量和适当比例引入 CO₂ 气体和超冷却空气的系统,以保证在腔室 43 中形成的 CO₂ 气体晶体的最终温度保持在负 109.3° F 或低于该温度。在这方面,优选在充分的压力下引入 CO₂ 气体和超冷却空气,以引起它们适当地和充足地混合,使得空气将冷的温度传递给 CO₂ 气体。优选各自的比例和流量以及腔室 43 和入口 45、47 的总体尺寸和构造是预定的和经过控制的,使得生成的混合物达到最佳温度并可以实现适当大小的晶体和性质。

[0116] 将 CO₂ 气体和超冷却空气引入到腔室中的方向可以有助于 CO₂ 晶体的适当形成,并由此有助于干冰的结块。在这方面,本发明考虑了以下两种情况:1) 逆向流动方案和 2) 同向流动方案。确定使用哪种方案的因素取决于需要 CO₂ 多快冻结,这又取决于在进入腔室 43 之前 CO₂ 气体的温度以及需要超冷却空气有多冷,以及腔室的尺寸、各自以多少量被引入

到腔室 43 中、比例如何等。

[0117] 在逆向流动的实施方案中,优选地,系统具有一腔室,该腔室能够使 CO₂ 气体向下注射到其中,其中超冷却空气从沿腔室的周边间隔开的多个入口向上引入。这被称为逆向流动过程是因为 CO₂ 气体和超冷却空气以相反的方向注射,以增强混合能力以及缩短晶体在腔室中的驻留时间。这还通过降低混合腔室的高度而减少了基本建设投资。在同向流动实施方案中,CO₂ 气体以及超冷却空气二者以相同方向引入,这样允许晶体更快速下降到底部以及 CO₂ 从空气的气旋分离。

[0118] 在任一情况中,在 CO₂ 晶体通过冷却的空气向下飞行期间,晶体随着下降而变得更冷并聚结在一起,其中在它们到达底部时,优选它们处于适当的温度。优选在腔室 43 的一侧提供侧导管 53,以允许冷却的空气逸出同时允许 CO₂ 晶体落下或向下投射到底部。这有助于保证将晶体与冷却的空气分离,其中然后可以将冷却的空气从中腔室 43 导出并用于冷却目的,以便提供额外的冷却,用于 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气、和 / 或脱盐,这样进一步提高整个系统的效率。

[0119] 可以在腔室 43 的底部提供带有马达 57 的螺杆 55 或其它装置以帮助推动在腔室 43 的底部聚结的 CO₂ 晶体通过腔口 59,使晶体落在带有框架 63 的传送装置系统 61 上,所述框架 63 可用于形成干冰块。腔室 43 的底部 65 优选设有与螺杆 55 的外部形状相匹配的半圆柱体形状,使得在底部 65 累积的基本上所有晶体都可以被推动通过腔口 59。腔口 59 可以具有舱门 60,舱门 60 摆动打开以允许聚结的晶体在适当的时间落到传送装置系统 61 上。优选地,可以使舱门 60 操作以便晶体的批料可以落到传送装置系统 61 上,例如带有断续的缺口,这样可以促进形成分离的冰块。腔口 59 的舱门 60 或边缘可以设置为预定的高度,使得随着冰块沿着传送装置系统 61 移动而形成具有预定厚度的厚块。在这方面,已经发现期望腔室底部的晶体本体保持在略低于 CO₂ 的冰点温度,使得干冰块在产生块时保持冻结。为此,重要的是腔室内的冷却空气的温度、和 CO₂ 气体的温度、和各自的引入速度都要加以控制,以便获得最佳的结果。

[0120] 框架 63 优选设置在具有辊 67 的挠性传送装置 65 上,使得随着晶体落下,晶体被所述框架分开并开始形成独立的冰块。传送装置的挠性优选使得所形成的冰块随着传送装置旋转和向下回转而容易被释放,如图 4 中所示的 - 在底部直角处。它还使得传送装置系统 61 能够以循环的形式旋转,即,环状的回路。

[0121] 其后,冰块可以容易被运输和储存、和 / 或卖给可能需要 CO₂ 用于商业目的的企业,包括使用新鲜 CO₂ 的那些。例如,碳酸饮料工业持续使用 CO₂ 来生产软饮料,而不管 CO₂ 来自何处,因此,如果他们使用的 CO₂ 可以源自于燃煤发电厂而不是源自于新鲜的来源,则可以由此降低 CO₂ 进入到大气中的总消耗量。

[0122] 图 5 和图 6 示出了可以为 CTT 装置 3 和 / 或 TCAES 装置 21 添加以便提高其效率的各种组件。

[0123] 在这方面,图 5 示出了 CTT 装置 3,其中来自压缩机 75 和涡轮压缩机 79 的废热可以被利用,以便为蒸汽驱动涡轮发电机 89 提供被加热的水,以提高其效率。由此产生的能量也可以用于为 IGCC 系统提供动力。另外,由 CTT 装置产生的被冷却的空气,除了如上所述被用于冻结 CO₂ 气体之外,可用于提供冷却进口空气到关联的燃料驱动涡轮发电机 91 中。在这方面,可以看出,通过使 CTT 产生的热和能量再循环并产生然后用于为 IGCC 系统提供

动力的电形式的额外能量,和 / 或为 HVAC、制冷和脱盐提供额外冷却的冷却空气实现了效率的提高。这允许实现成本节省更多,可以进一步补偿从煤分离 CO₂ 气体的高成本。

[0124] 在这方面,本发明优选包含在标题为“Method and Apparatus for Using Compressed Air to Increase the Efficiency of a Fuel Driven Turbine Generator (使用压缩空气以增加燃料驱动的涡轮发电机效率的方法和装置)”的相关美国临时应用序号 61/195,418 中描述的方法和系统。该系统涉及用于提高燃料驱动涡轮发电机效率的改进的方法和系统,其中所述系统优选利用来自 CTT 装置超冷却空气以将冷空气注射到燃料驱动涡轮发电机的压缩机涡轮中以便其操作更有效率。与用于冷却进口空气的先前的装置不同,该系统利用了通过涡轮压缩机和涡轮膨胀机装置膨胀的压缩空气以生成超冷却空气,其中系统产生可以被吸入到燃料驱动发电机 91 中的干燥的冷却进口空气。通过使用离心机从进口空气除去水分,在进口空气通过短舱加速并进入到压缩机涡轮中时,不形成可以损害涡轮叶片的冰粒。

[0125] 离开腔室 43 的由 CTT 装置 21 产生的冷却空气优选在喷射器 85 中与环境空气混合,以产生用于引入到燃料驱动涡轮发电机 91 的压缩机涡轮 92 中的相对冷的进口空气。在此情况下,可以通过一个或多个开口将冷却空气引入到喷射器 85 中,其中超冷却空气的速度有助于通过所述开口吸进环境空气并进入到喷射器 85 中。然后,随着两种空气本体混合在一起,形成了可以用作进口空气的相对冷却的空气质量流量,以便提高燃料驱动涡轮发电机 91 的效率。

[0126] 产生冷空气并将其用作压缩机涡轮 92 的进口空气的优点在于空气变得更稠密,并且具有更大的质量流量,因此,压缩机涡轮 92 不必需努力做功以便将等效体积的进口空气压缩到燃烧室 94 中。因此,压缩机涡轮 92 可以消耗更少的能量,有更多的能量可以用于驱动发电机 96,即,由系统产生的能量的更大部分可用于驱动发电机 96 和产生电。结果是较少的能量被用于操作压缩机涡轮 92,这有利地意味着更多的能量可用于驱动发电机 96,有助于提高系统消耗每单位体积燃料产生更多能量的能力。

[0127] 另一个优点是,冷却空气可用于从进口空气除去水分并避免产生可以损害涡轮叶片的冰粒。这通过使用冷却空气作为使环境空气内的水蒸汽快速冻结的手段来实现,然后从冷却空气分离冰粒(包括在冰粒内捕获的固体微粒)。也就是说,随着温暖的环境空气与冷却空气混合,存在于环境空气内的大部分水蒸汽可以被快速冻结,以形成微小的冰粒。然后,随着冰粒落下至分离隔室(或离心机 87)的底部,可以将冷却的干燥空气引导到相对于离心机 87 的轴以大约九十度延伸的侧导管中,其中随着高速冰粒继续它们的笔直惯性轨迹,冷却的干燥空气则转过拐角并通过通路而将冰粒留在后面,从而产生冷却的“干燥”空气。

[0128] 如所讨论的,从冷却进口空气消除冰粒不仅提高了系统的效率,而且避免了涡轮叶片的点蚀和对其造成损害。燃料驱动涡轮发电机 91 的压缩机涡轮 92 的入口典型地是喷嘴或短舱的形状,具有相对宽的开口,随后是相对狭窄的短舱,压缩机涡轮桨叶位于所述相对狭窄的短舱中。因此,随着进口空气加速通过短舱,由于流动途径的收缩引起引入空气的近似绝热加速,其中这种状态与焓降低有关,所述焓降低又产生显著的温度下降。尽管更低的进口空气温度引起更大的系统效率,向下的趋势是,如果进口空气的温度降低到冻结以下,可能形成可以击打涡轮叶片并对涡轮叶片造成损伤的冰粒。

[0129] 还可以使用换热器例如 77、81 来吸掉由空气压缩所产生的热并将其转移给与之关联的蒸汽涡轮发电机 89 和 / 或冷却器系统,以提高其性能。换热器优选包含冷却剂,例如水,所述冷却剂可以经通道通过压缩机单元以便将热从装置转移给关联的蒸汽涡轮发电机装置 89 和 / 或冷却器系统。对于水蒸汽发生器而言,可以为关联的锅炉 90 提供预热的水,以便可以使用较少的能量使锅炉中的水沸腾。通过将热从装置抽出,将冷却剂水预热,并将冷却剂水引入到锅炉 90 中,不仅使蒸汽涡轮发电机 89 更有效率,而且整个系统可以更有效率地产生电。蒸汽驱动涡轮发电机 89 可以是使用锅炉 90 来产生水蒸汽的任何常规类型,所述水蒸汽又驱动蒸汽涡轮 86,其中可以驱动发电机 88 以产生电。

[0130] 在另一个实施方案中,随着冰粒在离心机 87 中融化所产生的冷水用于为辅助装置提供冷却。也就是说,随着在离心机的底部收集冰粒,可以将它们解冻以产生冷水,所产生的冷水可以被转移到关联的装置例如热能储存系统 84 中,可以在其中储存冷水用于随后使用。热能储存系统 84 优选包括可以在其中储存冷水的层化槽,并且可以将冷水从层化槽中取出以便为辅助装置提供冷却,辅助装置诸如 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐等等。在使用冷水为这些装置提供必要的冷却之后,然后将水循环回到层化槽,其中通过用这种方式储存冷水,水可以根据需要加以利用。在替代实施方案中,冷水可用于直接为 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气、脱盐等提供冷却,而不首先将其储存。

[0131] 图 6 示出了 TCAES 装置 21,其中来自压缩机 103 的废热可以用于为蒸汽驱动涡轮发电机 111 提供被加热的水,以提高其效率。在这个实施方案中,优选由压缩机 103 压缩空气并且优选将经过压缩的空气储存在容器 105 中,其中控制阀 104 控制空气离开容器 105 的通道,并允许通过涡轮膨胀机 107 释放压缩空气。由涡轮膨胀机 107 产生的冷却空气可以除了以上讨论的用于冻结 CO₂ 气体之外还用于为关联的燃料驱动涡轮发电机 115 提供冷却的进口空气,以提高其效率。

[0132] 在这方面,可以看出,通过使压缩机 103 产生的热再循环并在蒸汽动力发电机 111 中加以利用(蒸汽动力发电机 111 可以产生可用于为 IGCC 系统提供动力的电),实现了效率提高。由涡轮膨胀机 107 产生的冷却空气还可以用于为 HVAC、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐提供额外的冷却,其中随着涡轮膨胀机 107 旋转还可以由发电机 109 生成额外的电。这允许实现成本节省更多,可以进一步补偿从煤分离 CO₂ 气体的高成本。

[0133] 在图 6 中所示的 TCAES 装置中,优选由该装置产生的并离开腔室 43 的冷却空气与环境空气混合,以产生用于引入到燃料驱动涡轮发电机 115 的压缩机涡轮中的相对冷的进口空气。在此情况下,优选提供混合室或感应器 113,其中可以通过一个或多个开口引入冷却空气,且超冷却空气的速度可以有助于通过所述开口吸进环境空气并进入到感应器 113 中。然后,随着两种空气本体混合在一起,形成了可以用作进口空气的相对冷却的空气质量流量,以便提高燃料驱动涡轮发电机 115 的效率。

[0134] 这个装置的另一个优点是,冷却空气可用于从进口空气除去水分并避免产生可以损害涡轮叶片的冰粒。这通过使用冷却空气作为使环境空气内的水蒸汽快速冻结的手段来实现,然后从冷却空气分离冰粒(包括在冰粒内捕获的固体微粒)。也就是说,随着温暖的环境空气与冷却空气混合,存在于环境空气内的大部分水蒸汽可以被快速冻结,以形成微小的冰粒。然后,随着冰粒落下至分离隔室(或离心机 117)的底部,可以将冷却的干燥

空气引导到相对于离心机的轴以大约九十度延伸的侧导管或通路 118 中,其中随着高速冰粒继续它们的笔直惯性轨迹,冷却的干燥空气则可以转过拐角并通过通路而将冰粒留在后面,从而产生冷却的“干燥”空气。

[0135] 如所讨论的,从冷却进口空气消除冰粒不仅提高了系统的效率,而且避免了涡轮叶片的点蚀和对其造成损害。进入燃料驱动涡轮发电机 115 的入口典型地是喷嘴或短舱的形状,具有相对宽的开口,随后是相对狭窄的短舱,压缩机涡轮桨叶位于所述相对狭窄的短舱中。尽管更低的进口空气温度引起更大的系统效率,向下的趋势是,如果进口空气的温度降低到冻结以下,可能形成可以击打涡轮叶片并对涡轮叶片造成损伤的冰粒。

[0136] 如图 6 中所示,优选装置 21 从压缩机 103 开始,压缩机 103 最初将压力槽或容器 105 内的空气增压,例如增压到 90psia 的压力,其中压缩机 103 和槽 105 可以装备有换热器 102,换热器 102 将被加热的冷却剂水分配给关联的蒸汽涡轮发电机 111。换热器优选包括有助于在压缩空气被增压时降低其温度的冷却剂,其中可以通过压缩机分配冷水(例如, 60° F)并用将其作冷却剂。

[0137] 图 7 和图 8 示意性地示出了各步骤如何实施。图 7 示出了 CTT 装置 3,图 8 示出了 TCAES 装置 21,其中由 IGCC 系统 121 产生 CO₂ 气体,并且根据情况由 CTT 装置 3 或 TCAES 装置 21 产生超冷却空气,CO₂ 气体与超冷却空气在混合腔室 123 中混合,其中可以产生二氧化碳的固体块。残余的冷却空气然后被转移到另一个混合腔室或感应器 125 中并与环境空气混合,其中被冷却的空气然后可以被利用来提高燃料驱动涡轮发电机 127 的效率。

[0138] 提供以下两个实例来显示本发明系统如何可用于不仅从燃煤发电厂分离、捕获和储存 CO₂ 气体,而且以产生额外能量的方式来从燃煤发电厂分离、捕获和储存 CO₂ 气体,所述额外的能量可用于补偿与使用 IGCC 从煤分离 CO₂ 有关的成本。最终的结果是,本发明的 CO₂ 捕获和储存系统的性能可以具有高达 1.7 的性能系数(产生的动力比从最初的发电厂所吸附的动力多),其中系统的效率可与热泵的效率相匹敌。

[0139] 在最终的步骤中,固体二氧化碳气体形成为干冰块,随后从燃煤发电厂转运出来并运输到厂区外用于在别处使用,即,产生了 CO₂ 的固体块并通过卡车有效率地运输到可以在操作中使用 CO₂ 的商业设施,可以由此获得额外的收入来补偿 IGCC 系统的操作成本。此外,在厂区没有剩余的二氧化碳足迹。

[0140] 所述的两个实施例包括:1) 简单的 CTT 装置的方案,其证明了简单的能量平衡且估算了用于将二氧化碳气体转化为紧凑的干冰块所需要的动力能量;和 2) 考虑了在高压空气通过涡轮膨胀机的径向叶轮桨叶的高转速且截面扩大的凹槽的轨迹期间所发生的膨胀过程的细节的实施例,其中这个过程细节证明了有可能利用处于共用轴上的涡轮压缩机和涡轮膨胀机的现有(off-the-shelf)组合。

[0141] 实施例一:在所提出的解决方案的简单形式中,可以使 CTT 装置定位在紧邻燃煤发电厂并使用最小量的来自燃煤发电厂的动力来驱动 CTT 压缩机。在这方面,图 9 示出了压缩机、涡轮压缩机和涡轮膨胀机 CTT 装置以及与它们关联的换热器,其中的图表示出了 CTT 过程中每个步骤的热力学状态。

[0142] 这个装置的目的是使用两种市场上可买到的装置:(1) 气体压缩机,和 (2) 作为用于冻结来自 IGCC 的二氧化碳的单独的 CTT 装置连接的涡轮压缩机和涡轮膨胀机组。图 9 示出了可得自涡轮膨胀机的功率(28,772kW)如何适当地匹配涡轮压缩机所需要的功率

(负 27,859kW)。顶部的图表示出了 27,444kW 的压缩机额定。然而,还有来自压缩机的负 4,115kW 和来自涡轮压缩机的负 25,042kW 的可回收废热。因此,如果附近存在有蒸汽驱动的发电机组 (GenSet) 或冷却器,则功率输出比输入更大,大多数热泵都是这种情况。而且,每秒 487.6 磅的负 109.3° F 的空气被加热到 32° F,且冷冻功率是负 17,445kW。因此,27,400kW 输入生成了负 4,115kW、负 25,042kW 和负 17,445kW 或 46,602kW。因此,这个系统与典型的热泵同样的操作,其中性能系数 (C. O. P.) 等于 46,602kW/27,400kW 或 1.7。

[0143] 图 9 中的表格假定了在下游的混合腔室中需要 30psia 的排出空气以采用高的压降损失来操作。因此,从 215psia 到 30psia 的压降可以导致产生负 126° F 的超冷却空气。然而,有可能要为 CTT 装置重新配置不同的压力设置,使得从 215psia 到 14.67psia 的压降产生负 173° F 的超冷却空气。

[0144] 图 10 示出了典型的 100MW 发电厂所需要的热平衡,所述发电厂生成 26.53 磅 / 秒的 CO₂,需要 487.67 磅 / 秒的负 173° F 的超冷却空气。图 10 还示出了匹配 100MW 发电厂的 CO₂ 流出物的 CTT 装置的流量要求。对于入口导管、混合腔室和出口导管的截面积要求示出在图 11 和图 12 中。

[0145] 以下讨论描述各步骤的细节。在图 1B 中描述了使用用于除去硫化物和飞灰的几种可用现有设备中的一种。图 1B 的系统还除去 H₂O、CO、CO₂ 和 NO_x 的冷却的流出物流烟道气。结果是通过这些过程从这些气体分离 CO₂。CO₂ 气体可以随后与涡轮膨胀机的排出空气合并以形成固体 CO₂。冻结的 CO₂ 然后一起冻结的固体形式被取出用于商业目的。共同生成了仍冷却的空气,其可以在冻结 CO₂ 的下游可用,用于附近商业设施中的 HVAC 或用于冷冻食品售货设备等等。燃煤设施不会由于 CO₂ 排放而承担任何惩罚。

[0146] 图 10 示出了混合腔室的计算和横截面,注射的是超冷却空气和室温二氧化碳气体,流出的是冷却的空气和二氧化碳固体块。例如,发电厂额定为 100MW,并使用 7.24 磅 / 秒的煤 (放热为 13,100BTU / 磅)。产生 26.53 磅的二氧化碳块。供给压缩机的 27.4MW 电力 (图 9) 驱动涡轮压缩机和涡轮膨胀机使空气以 6,417 标准立方英尺 / 秒 (SCFS) 流动 (图 11),进口空气为 70° F,输出空气为负 173° F。负 173° F 设想了进料压缩机中较小的压力升高,且压降为 215psia 到 14.67psia。

[0147] 而且,混合腔室下游的空气比负 109.3° F 更冷,且可以被送往 HVAC 系统,或用于提高燃料驱动涡轮发电机的效率。在实际的方案中,需要考虑较小的效率不足。在启动时必须要有能量用于冷却硬件,有由于压降引起的损失,并且并不是所有的二氧化碳和空气之间的混合都是理想的。因此,需要略多的空气来确保将所有的二氧化碳冻结。

[0148] 使用过量的超冷却空气来确保在处理和运输冻结的 CO₂ 的所有随后步骤中使 CO₂ 保持冻结。来自 CO₂ 冻结过程的剩余的排出空气是低于负 109.3° F 的大的质量流量。残余空气流量的这种冷却潜力可以进一步被用于冷藏设施、空调、制冷、燃料驱动发电机组的入口空气和 / 或脱盐。工业的和商业的冷藏设施可以共同位于燃煤发电厂的接近,以提高操作的效率。

[0149] 在图 11 中计算了导管 (CO₂ 在其中从发电厂流到混合腔室) 的尺寸和流动空气的导管中的尺寸。室温 CO₂ 导管速度限于至多 20ft/sec 以避免过度的压降,则需要考虑 14 个管,每个直径为一英尺。在图 11 中示出了用于空气流动的约束导管尺寸选择。可以使用六个直径 10.7 英尺或一个直径 18.5 英尺的导管来传输冷空气。这取决于现场可用的实际材

料。

[0150] 实施例二：这个实施例考虑了由各涡轮压缩机叶轮圆盘的可用的压缩以及各涡轮膨胀机叶轮圆盘可用的膨胀所提出的限制。特别地，连接于带凹槽的叶片的各个壁的边界层在其从壁分开之前的压力比方面受到限制。而且，因为在其稳态的“独立并行联机 (free spooling)”模式期间有动力从涡轮膨胀机传输给涡轮压缩机，需要使涡轮膨胀机和涡轮压缩机联合的两个组相匹配，其中每个联合具有单独的额定功率。

[0151] 图 13 示出了 14.696psia 和 70° F 环境空气 (A 点) 的压缩机摄入到 50psia 和 247° F 的压缩空气 (C 点)。等熵的压缩过程产生 291° F 的较高温度。然而，存在有与非理想压缩过程以及对向压缩机本体传热有关的温度下降或输入功率的 20% 损失。冷却剂水吸附大约 10.654BTU/ 磅的焓。

[0152] 在压缩空气从 247° F 冷却到 70° F 时，在几乎没有压降的情况下，有 42.87BTU/ 磅的焓可用于加热空气。这个 50psia 和 70° F 的空气可用于驱动下游的 T/T 系统。在为压缩机提供电力时，压缩机的压缩空气驱动两级的涡轮压缩机和两级的涡轮膨胀机。指出的是，涡轮压缩机 #1 和涡轮膨胀机 #1 通过共用轴硬连接，使得涡轮膨胀机 #1 在其使空气膨胀通过其叶轮的同时驱动涡轮压缩机 #1。还要指出的是，涡轮压缩机 #2 和涡轮膨胀机 #2 通过共用轴硬连接，使得涡轮膨胀机 #2 在其使空气膨胀通过其叶轮的同时驱动涡轮压缩机 #2。

[0153] 存在有一系列换热器可用于冷却热压缩空气，使得最终膨胀的空气实现超冷状态。这些换热器将它们的被加热水传递给附近的蒸汽驱动的发电机组或传递给热驱动的吸收式冷冻器。图 14 定义了每个位置的压力和温度状态。指出的是，这个平衡状态以独立并行联机 (free spooling) 模式将 35.037BTU/ 磅的涡轮膨胀机连接于 35.51BTU/ 磅的涡轮压缩机；以及以独立并行联机 (free spooling) 模式将 16.2486BTU/ 磅的涡轮膨胀机连接于 16.15BTU/ 磅的涡轮压缩机。用于实现更接近的一致的一致进一步叠代需要估计现实世界的损失。这对于初步设计来说足够了。

[0154] 还要指出的是在这个实施例中，最终状态输送 24psia 和负 148.35° F 的空气流。这种过多的与环境相比的过压足以驱动下游的喷射器来夹带当地环境的二氧化碳气体进行混合，以形成干冰 (固体 CO₂)。为了向涡轮机械制造者详细说明系统所需要的 T/T 联合的 kW 规格，可以将各热力学状态点之间的 BTU/ 磅之差乘以空气流的磅 / 小时数。然后将得到的 BTU/ 小时转化为千瓦的单位。压缩 135psia 的空气且达到 218° F (状态 2)。冷却剂水用于将空气冷却到 70° F，而压缩空气保持在大约 135psia (状态 3)。这些冷却剂水由附近的蒸汽驱动的发电机组或吸收式冷冻器所利用。

[0155] 然后使 135psia 和 70° F 的空气增压到 220psia 和 138° F，15% 的能量通过摩擦被消耗掉并作为废热被冷却剂水吸收，所述废热可以被附近的蒸汽驱动的发电机组 (GenSet) 或冷却器所利用。然后冷却剂水用于将 220psia 和 138° F 的空气 (状态 4) 冷却到 70° F 并保持大约 220psia (状态 5)。这些冷却剂水由附近的蒸汽驱动的发电机组或吸收式冷冻器所利用。

[0156] 涡轮膨胀机的第一级膨胀使 220psia 和 70° F 膨胀到 55psia 和负 79° F (状态 6)，15% 的能量通过摩擦被消耗掉并作为废热被冷却水吸收，所述废热可以被附近的蒸汽驱动的发电机组 (GenSet) 或吸收式冷冻器所利用。在涡轮膨胀机的第二级膨胀使 55psia

和负 79° F 膨胀到 24psia 和负 148° F (状态 7), 15% 的能量通过摩擦被消耗掉并作为废热被冷却剂水吸收, 所述废热可以被附近的蒸汽驱动的发电机组 (GenSet) 或吸收式冷冻器所利用。

[0157] 这种设计利用 24psia 作为目标压力, 使得排出的冷却空气具有足够的动能以吸引周围的二氧化碳气体到混合管道 (喷射器) 中。然而, 如果使这个设计压力从 24psia 降低到 15psia, 则可以实现更冷的空气温度, 但是这需要 T/T 装置的重新平衡。

[0158] 所述重新平衡解释如下: 已知涡轮膨胀机 #1 以 35BTU/ 磅的需用功率驱动涡轮压缩机 #1。还已知涡轮膨胀机 #2 以 16BTU/ 磅的需用功率驱动涡轮压缩机 #2。

[0159] 为了取得压缩机和各 T/T 组所需要的千瓦数, 只需要用以磅 / 秒为单位的所需空气流 (#/sec) 乘以焓 / 单位质量 (BTU/#) 之差, 以得到 BTU/ 秒或 kW 额定数。

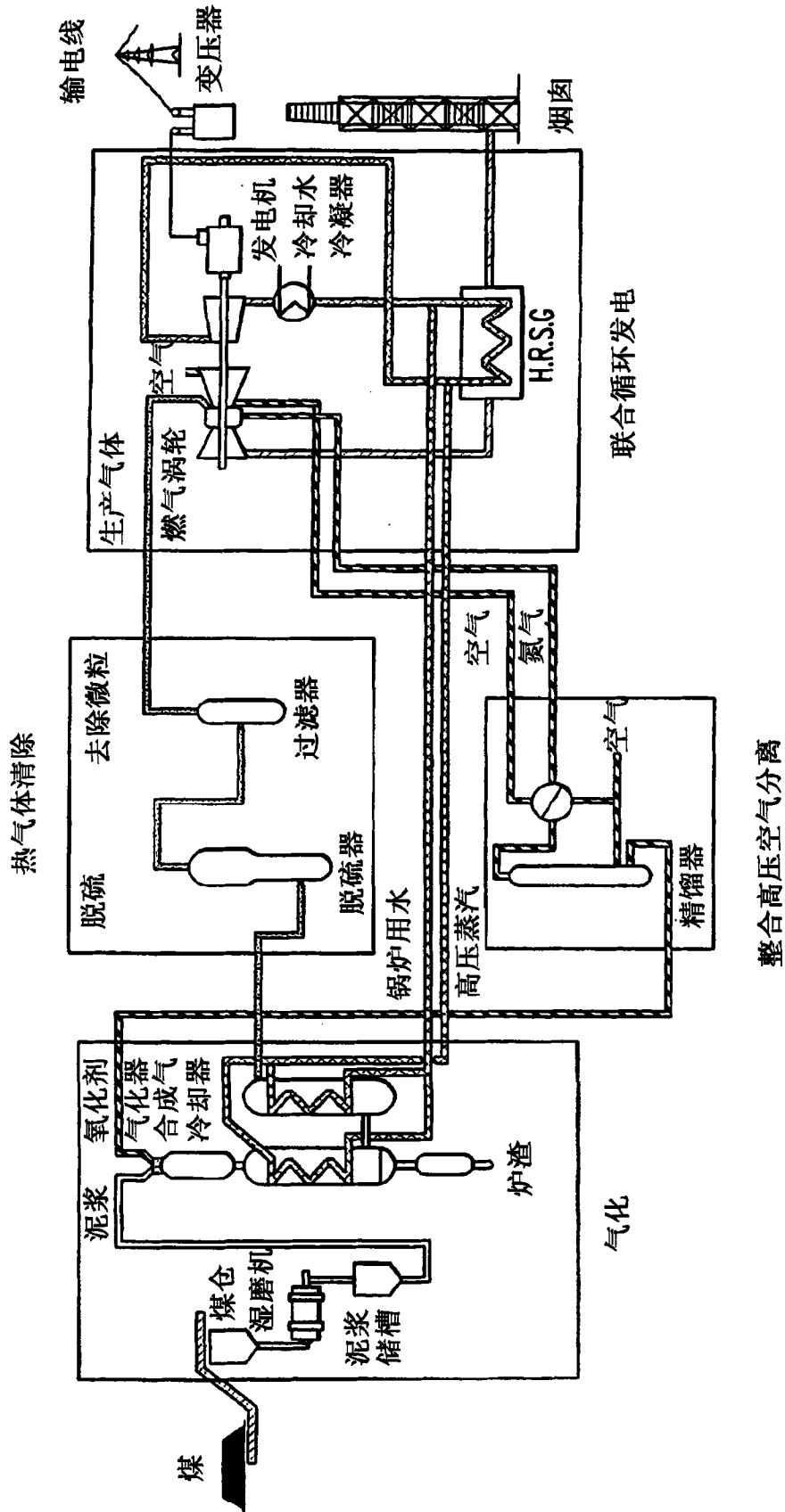


图 1A

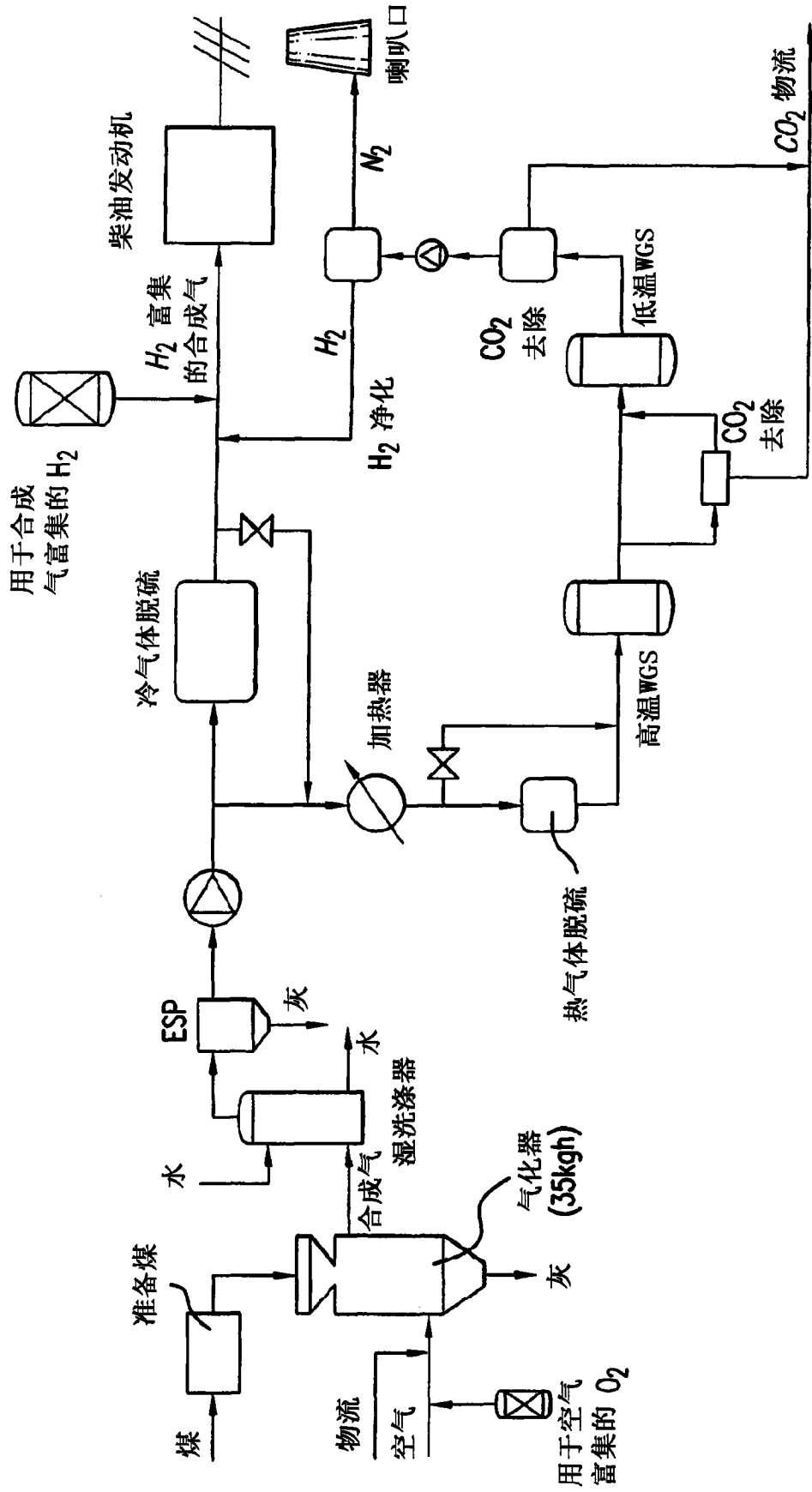


图 1B

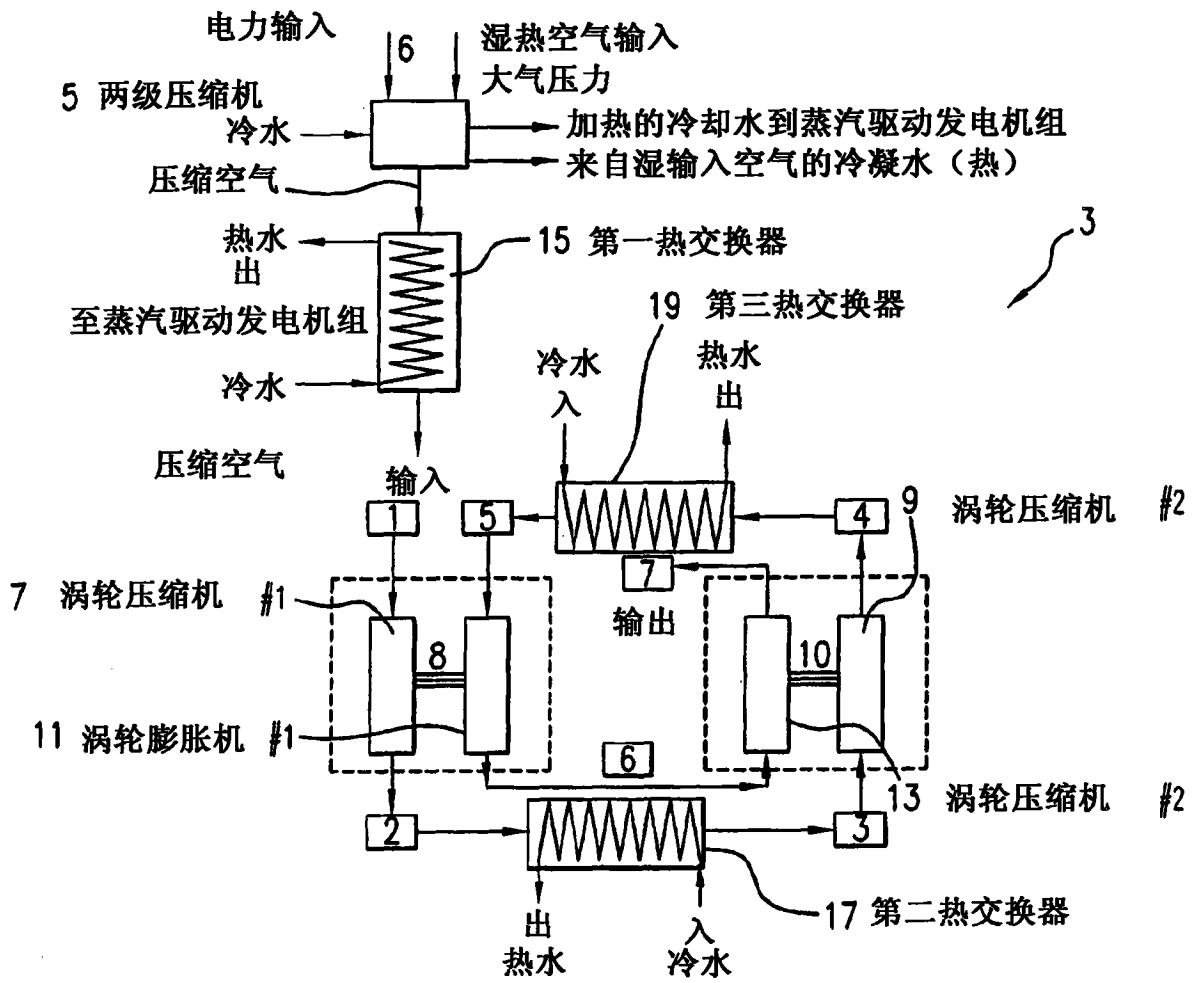


图 2

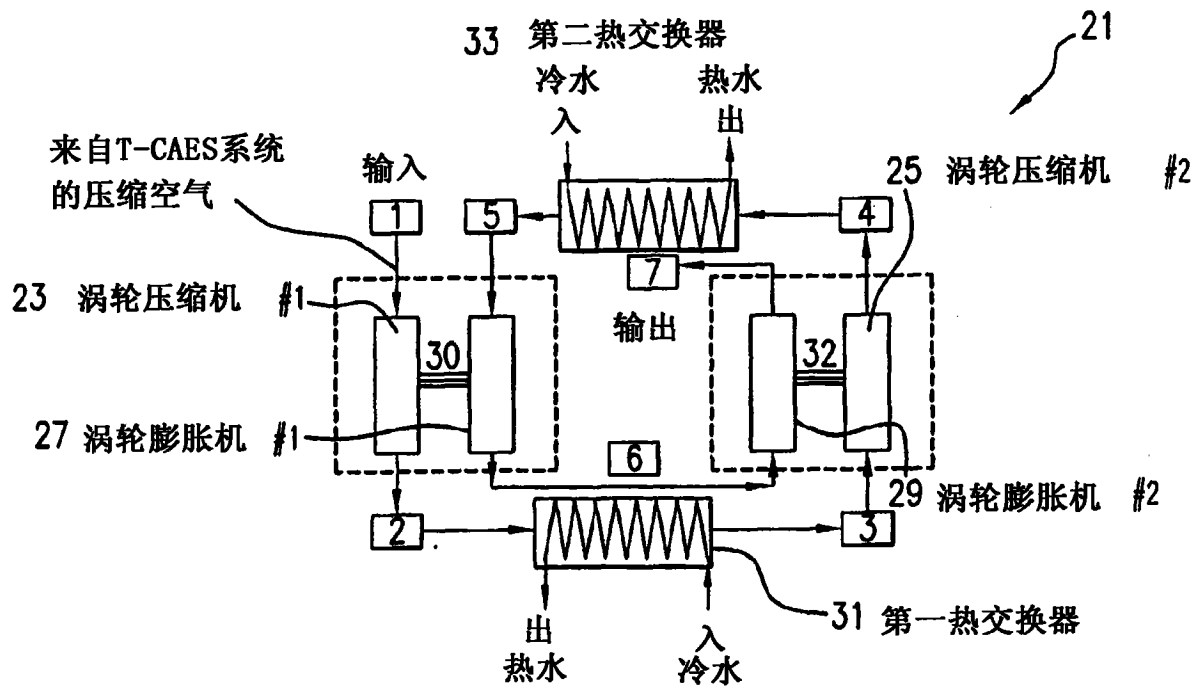


图 3

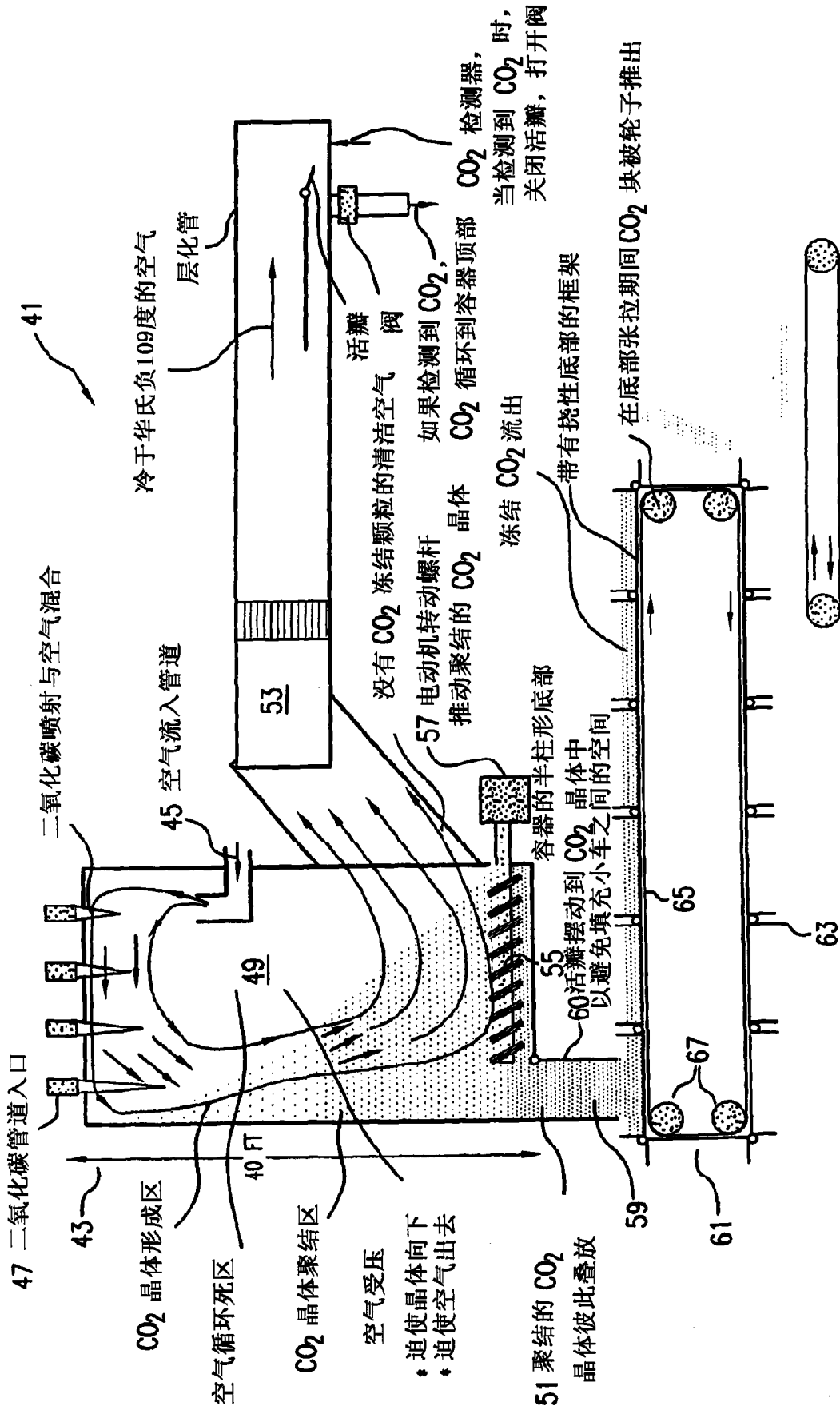


图 4

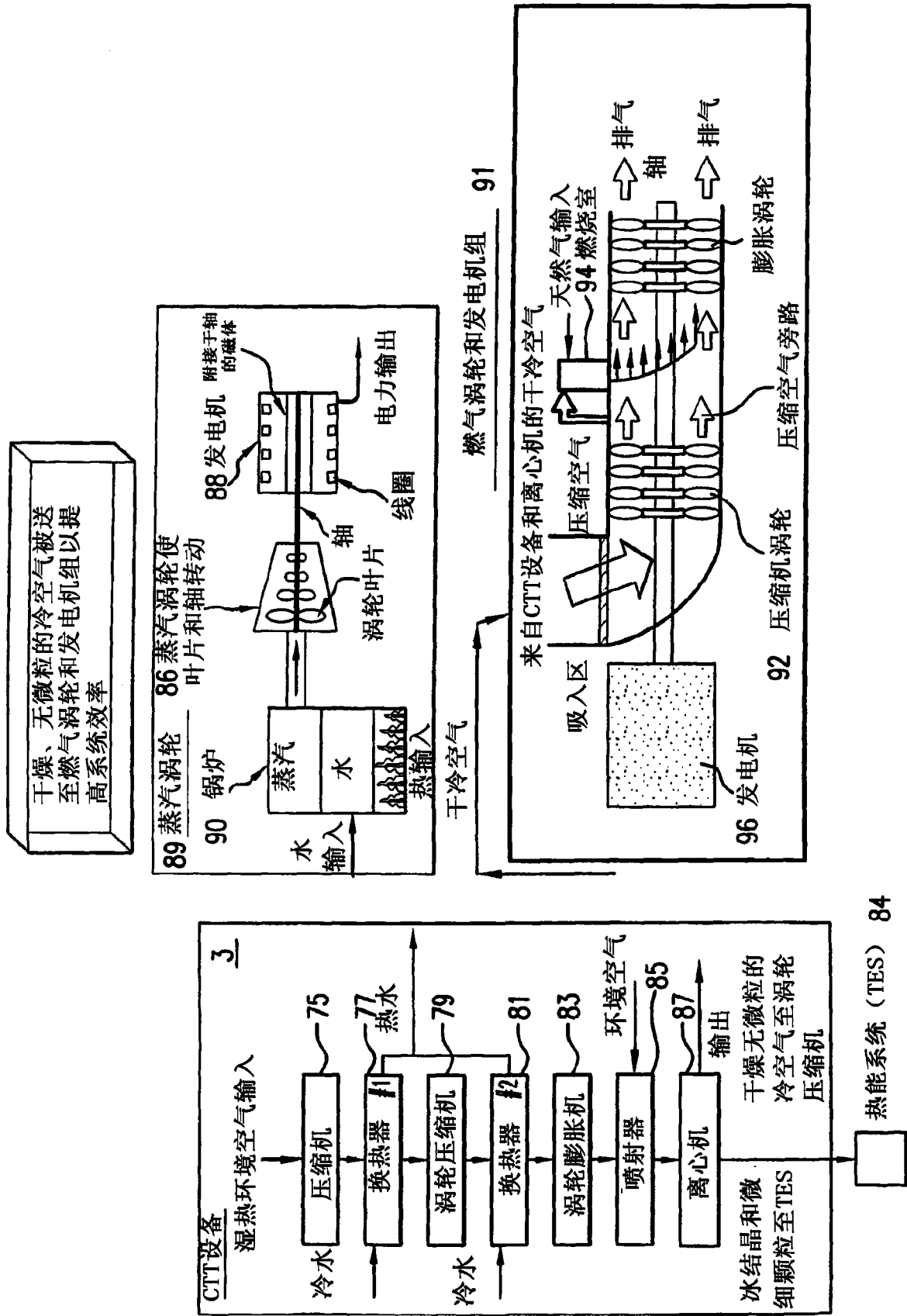


图 5

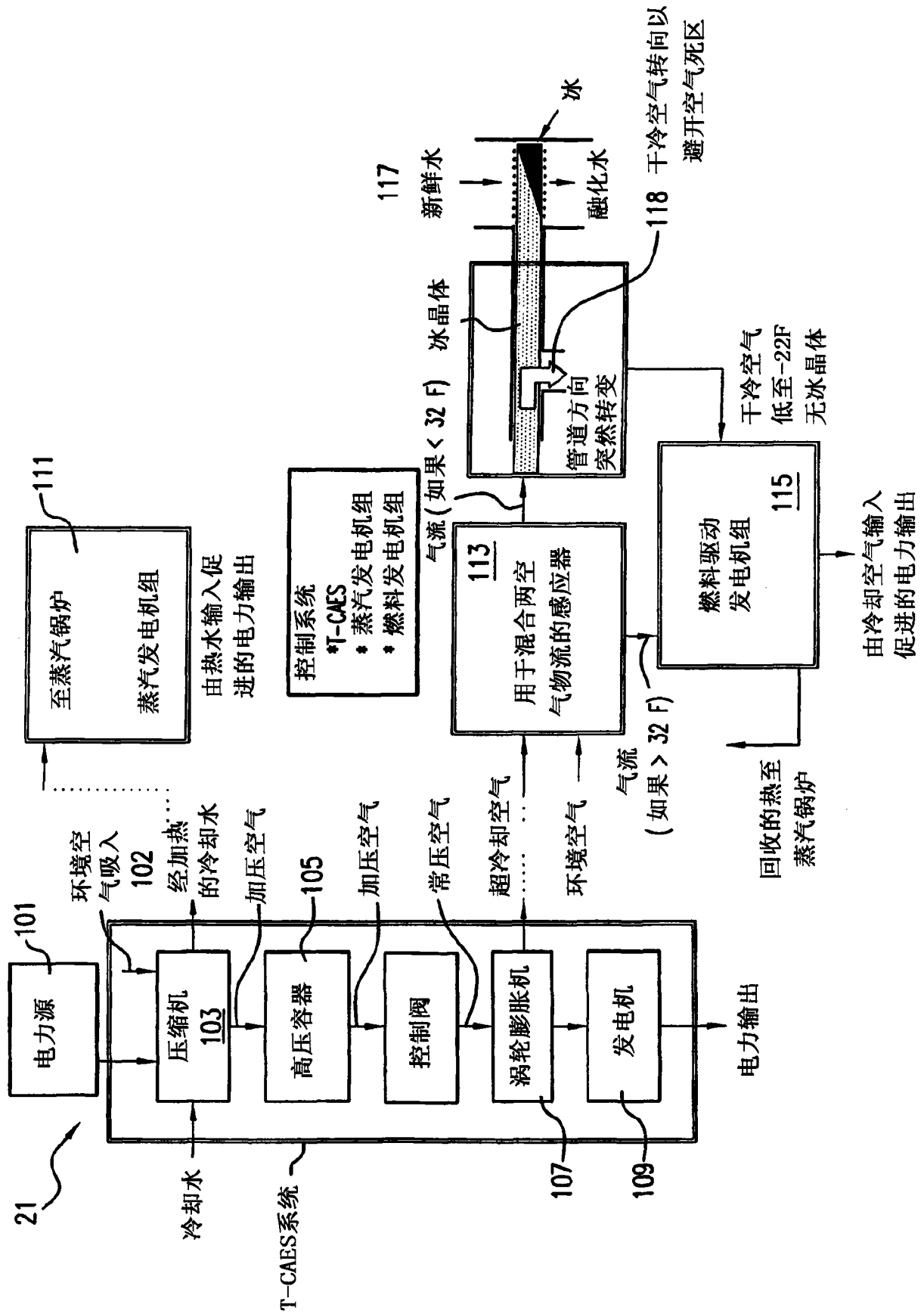


图 6

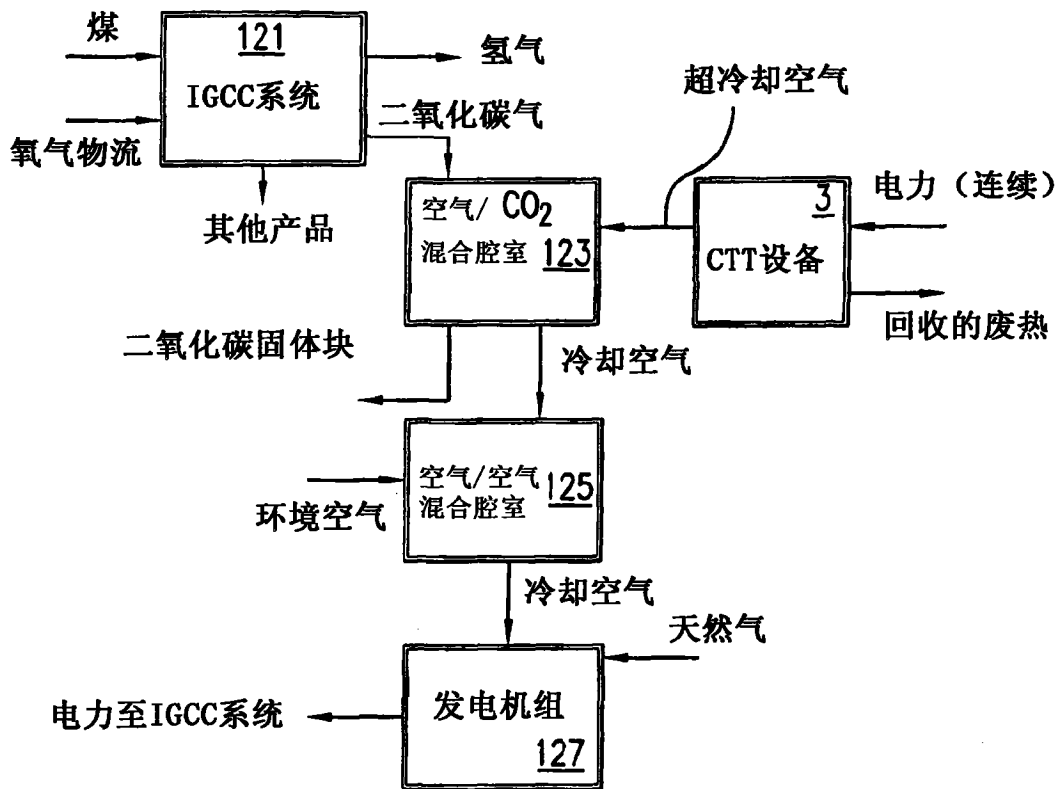


图 7

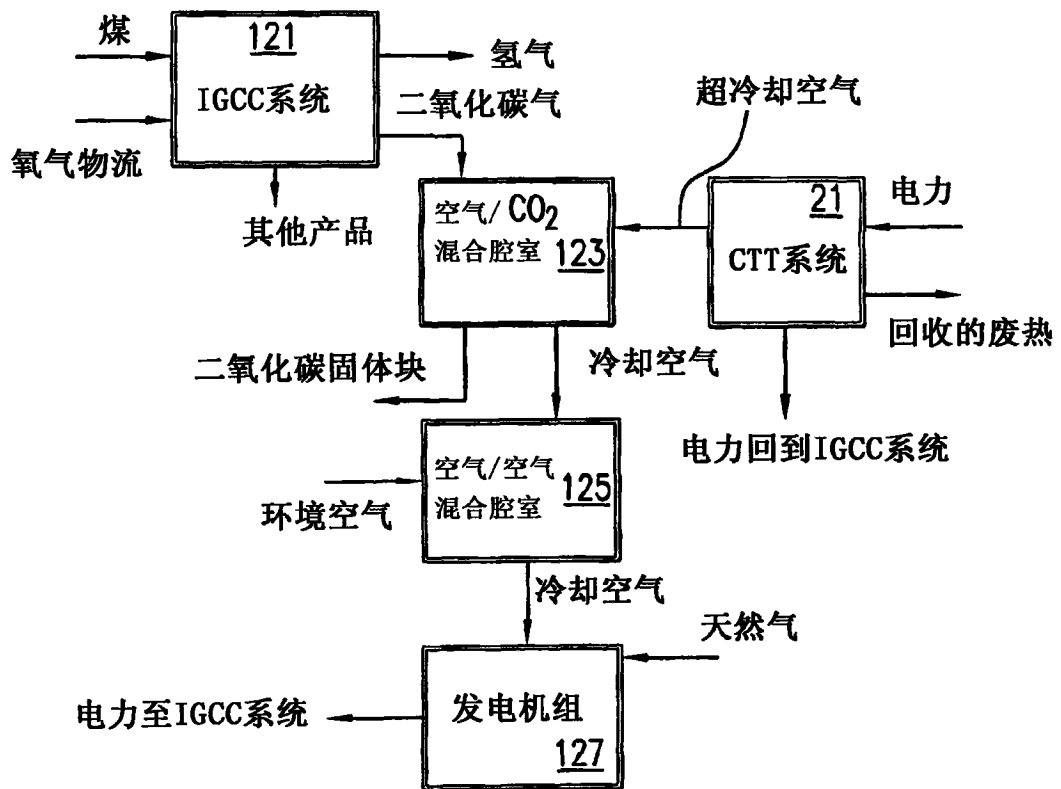


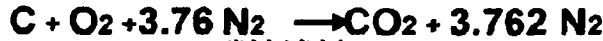
图 8

用于使“CO₂ 冷冻”输出的烟道输出
匹配涡轮膨胀机输出的热平衡

烟煤放热

13,100 BTU/LB
电厂中的煤耗
100 MW
100,000 kW
0.948 (BTU/SEC)/kW
94,800 BTU/SEC
7.24 LB/SEC 煤耗

理想化学反应



12 LBS 碳被消耗
44 LBS 二氧化碳被生成
3.67 LBS 二氧化碳被生成，每磅碳
26.53 LBS/SEC 二氧化碳在100MW电厂中生成

将 CO₂ 气体冷冻成固体

70 deg F
-109.3 deg F CO₂ 的冰点
0.189 BTU/(LB deg F)
246 BTU/LB 升华热
279.9 BTU/LB 冷冻需要
7,426.6 BTU/SEC 冷冻速度需要
冷冻速度的涡轮膨胀机膨胀要求
86.34 BTU/# 压缩机所需的空气
0.00134 (kW/SCFM)/(BTU/#)
0.115696 (kW/SCFM)
10,213 kW 压缩机需要
385,000 SCFM
6,416.67 SCFS
0.076 LB/SCF
487.67 LB/SEC

匹配 CO₂

-173 deg F 空气从涡轮膨胀机的排出速度
-109.3 F CO₂ 的冻结温度
0.24 BTU/(LB deg F)
487.67 LB/SEC 冷却空气
7,455.4 BTU/SEC 可用的冷冻速度

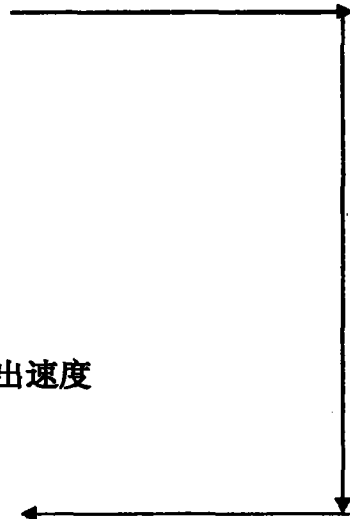
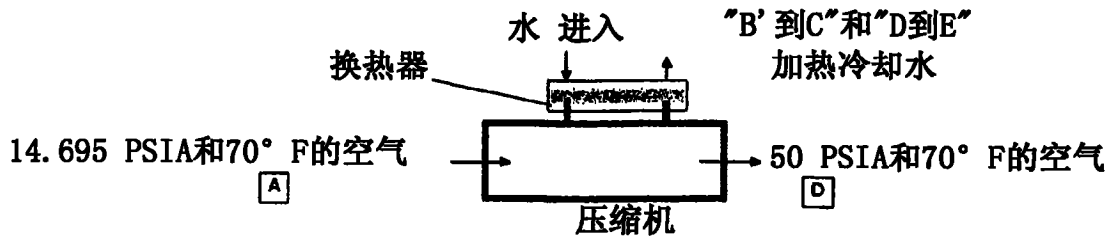


图 10

<p>14 230.7 CU FT/SEC 16.5 CU FT/SEC 20 FT/SEC 0.82 SQ FT 1.0 FT</p> <p>6 5,377 CU FT/SEC 896 CU FT/SEC 10 FT/SEC 89.61 SQ FT 10.7 FT</p> <p>1 5,377 CU FT/SEC 5,377 CU FT/SEC 20 FT/SEC 268.84 SQ FT 18.5 FT</p>	<p>CO₂管道数 CO₂总流量 每管CO₂流量 每管CO₂流速 每管CO₂流通面积 每管直径</p> <p>空气管道数 空气流入量 每管空气流入量 每管空气流速 每管空气流通面积 每管直径</p> <p>空气管道数 空气流出量 空气流出量 每管空气流速 空气流出流通面积 流出管道直径</p>	<p>100 MW 7.24 #/SEC 26.53 #/SEC 0.115 #/CU FT 230.70 CU FT/SEC 487.67 #/SEC 0.0907 #/CU FT 5,376.7 CU FT/SEC 5,607.4 CU FT/SEC 5 FT/SEC 1121.5 SQ FT 36.5 FT 36.4 FT 30.7 FT 8 SEC 40 FT</p>	<p>电厂 耗煤量 CO₂ CO₂ CO₂ 空气 -173F的空气 -173F的空气 CO₂ + 空气 气体向下速度 容器截面积 矩形截面容器的深度 螺杆直径 矩形截面容器的宽度 容器中的滞留时间 容器高度</p>
---	--	---	---

图 12

图 11



状态点	绝对压力 (psia)	温度 (华氏度)	密度 (磅/立方英尺)	焓 (BTU/磅)	熵 (BTU/磅-度 R)	效率
A	14.696	70	0.074897	126.71	1.6365	
B'	50	291.03	0.17959	179.98	1.6365	
B'到C				10.654		
C	50	247.18	0.19076	169.33	1.6219	80%
				42.87		
D	50	70	0.25504	126.46	1.5521	

至冷却水

换热器C

图 13

状态点	绝对压力 (psia)	温度 (华氏度)	密度 (磅/立方英尺)	焓 (BTU/磅)	熵 (BTU/磅-度 R)	效率	
1	50	70	0.25504	126.46	1.5521		
2'	135	243.93	0.5169	168.24	1.5521	0.17366	35.51 BTU/磅的差 至T/C冷却水
				6.267			
				161.973		85%	
2	135	218.24	0.53671	161.97	1.543		
				36.1			至换热器
3	135	70	0.68991	125.87	1.4829		
4'	220	149.77	0.97426	144.87	1.4829		16.15 BTU/磅的差
				2.85			
				142.02		85%	
4	220	138.12	0.99376	142.02	1.4782		
				16.73			至换热器
5	220	70	1.1262	125.29	1.4484		
6'	55	-104.78	0.42219	84.07	1.4484		-35.037 BTU/磅的差
				-6.183			
				90.253		85%	
6	55	-79.383	0.39315	90.253	1.4652		
7'	24	-160.18	0.21785	71.137	1.4652		-16.2486 BTU/磅的差
				-2.8674			
				74.0044		85%	
7	24	-148.35	0.20938	74.004	1.4746		

图 14