



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104930815 A

(43) 申请公布日 2015. 09. 23

(21) 申请号 201510334802. 0

(22) 申请日 2015. 06. 16

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路 800 号

(72) 发明人 巨永林 陈卓

(74) 专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司

公司 31236

代理人 郭国中 陈少凌

(51) Int. Cl.

F25J 1/02(2006. 01)

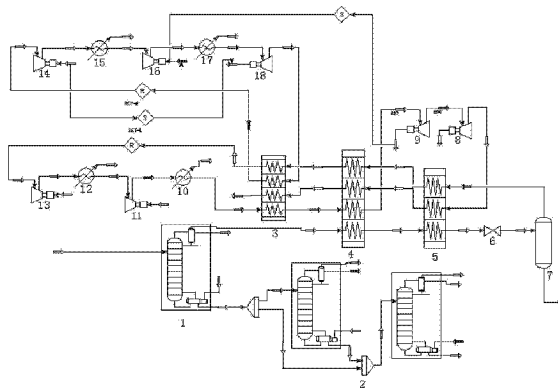
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

适用于海上的天然气液化及 NGL 回收系统及应用

(57) 摘要

本发明提供了一种适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统,其包括:用于回收天然气凝液的 NGL 分馏模块;用于液化并过冷天然气的天然气液化模块;CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块;以及用于为液化和过冷天然气提供冷量的氮气膨胀制冷循环模块。与现有技术相比,本发明具有如下的有益效果:本发明所述的适用于海上 LNG-FPSO 的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺,在保证单位液化能耗比较低的前提下,简化流程,该流程具有启动快,开停机及维护方便,设备布置紧凑,便于成撬的特点。



1. 一种适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统,其特征在于,包括:  
用于回收天然气凝液的 NGL 分馏模块;  
用于液化并过冷天然气的天然气液化模块;  
CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块;以及

用于为液化和过冷天然气提供冷量的氮气膨胀制冷循环模块;  
其中,所述 NGL 分馏模块包括依次相连的脱甲烷塔和 TDWC 装置;  
所述天然气液化模块包括依次相连的液化冷箱撬块和天然气存储撬块;  
所述 CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块包括 CO<sub>2</sub>压缩撬块和膨胀机;  
所述氮气膨胀制冷循环模块包括氮气膨胀增压撬块;

所述的液化冷箱撬块包括依次相连的第一级换热器、第二级换热器、第三级换热器和节流阀,所述氮气膨胀增压撬块包括依次相连的氮气第一级增压机、氮气第一级冷却器、氮气第二级增压机、氮气第二级冷却器和依次相连的氮气第一级膨胀机和氮气第二级膨胀机,所述 CO<sub>2</sub>压缩撬块包括依次相连的 CO<sub>2</sub>第一级增压机、CO<sub>2</sub>第一级冷却器、CO<sub>2</sub>第二级增压机、CO<sub>2</sub>第二级冷却器;

所述第一级换热器与氮气第二级冷却器以及脱甲烷塔相连,所述第二级换热器还与氮气第一级膨胀机相连,所述氮气第二级膨胀机另一端还与第三级换热器、第二级换热器、第一级换热器、氮气第一级增压机依次相连,所述 CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块的膨胀机还与第一级换热器、CO<sub>2</sub>第一级增压机依次相连;

所述液化天然气分离器的液相出口与天然气存储撬块相连,所述液化天然气分离器的气相出口与第三级换热器、第二级换热器第一级换热器依次相连。

2. 如权利要求 1 所述的适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统,其特征在于,所述 CO<sub>2</sub>第一级增压机、氮气第一级增压机分别由氮气第一级膨胀机、氮气第二级膨胀机驱动。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统,其特征在于,还应包括天然气增压撬块和天然气存储撬块。

4. 如权利要求 3 所述的适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统,其特征在于,还包括发电机撬块、液氮应急供应单元、CO<sub>2</sub>应急供应单元、仪控单元、仪表风、PSA 制氮单元中的一种或几种。

5. 一种如权利要求 3 所述的适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统的使用方法,其特征在于,包括如下步骤:

A、将原料天然气经所述天然气增压撬块增压、冷却后进入所述 NGL 分馏模块的脱甲烷塔,从顶部脱出除去重烃的天然气,从底部得到重烃,所述重烃再进入 TDWC 装置,从顶部出来一端得到 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>气体,另一端得到 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>气体,从底部出来得到 C<sub>5+</sub>液体;

B、将除去重烃后的天然气通入所述液化冷箱撬块,经第一级换热器液化,再经第二级换热器和第三级换热器过冷,最后经节流阀节流降压至液化天然气储存压力后,进入液化天然气分离器,分离得到液化天然气产品和闪蒸汽,将所述天然气产品输送至天然气存储撬块储存,将所述闪蒸汽依次返回所述第三级换热器、第二级换热器和第一级换热器提供冷量;

C、将 CO<sub>2</sub>气体经所述 CO<sub>2</sub>压缩撬块增压、冷却至超临界状态后,进入节流阀节流,降温降

压至临界点附近进入所述第一级换热器相变换热并过热,为氮气和天然气的预冷提供冷量复温后再返回 CO<sub>2</sub>压缩撬块循环;

D、将氮气通入所述氮气膨胀增压撬块,经氮气第一级增压机、氮气第一级冷却器、氮气第二级增压机、氮气第二级冷却器增压冷却之后依次进入所述第一级换热器、第二级换热器预冷,预冷后的氮气进入氮气第一级膨胀机、氮气第二级膨胀机膨胀制冷,得到低温低压的氮气依次返回第三级换热器、第二级换热器、第一级换热器提供冷量,得到温度升高的氮气重新进入所述氮气膨胀增压撬块。

6. 根据权利要求 5 所述的使用方法,其特征在于,步骤 A 中,所述原料天然气压力高于 4.89MPa 时,不启用所述的天然气增压撬块。

7. 根据权利要求 5 所述的使用方法,其特征在于,步骤 A 中,TDWC 装置为一合成塔,所述合成塔的内部设有将合成塔内空间隔成两半的隔板,合成塔的顶部和底部分别设有一台冷凝器和一台再沸器,根据实际需要,分别提供不同的冷负荷和热负荷;隔板两边的理论塔板数也可根据实际需要分别进行调整。

8. 根据权利要求 5 所述的使用方法,其特征在于,步骤 B 中,所述液化天然气储存压力为 0.23MPa。

9. 根据权利要求 5 所述的使用方法,其特征在于,步骤 C 中,CO<sub>2</sub>循环过程为跨临界循环,在第一级换热器中相变换热并过热至超临界状态。

10. 根据权利要求 5 所述的使用方法,其特征在于,步骤 D 中,所述氮气第二级膨胀机出口压力应高于 0.1MPa。

## 适用于海上的天然气液化及 NGL 回收系统及应用

### 技术领域

[0001] 本发明属于化工与低温工程技术领域,具体涉及一种适用于海上 LNG-FPSO 的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收系统及其方法。

### 背景技术

[0002] 天然气与石油、煤炭作为世界上主要的化石能源,在一次能源中占有很大的比率。天然气作为一种优质清洁能源,越来越多的国家开始重视天然气资源的开发和利用。

[0003] 随着我国能源结构的不断优化和天然气消费需求的不断增长,加之我国绝大多数天然气田储量都不大的现状,我国天然气供需缺口在不断加大。据预测,到 2020 年我国天然气的供应缺口将达  $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

[0004] 另一方面,我国存在大量产储量较小的边际气田、伴生气田、深海气田,单井储量较小,距离供气管网较远,采用管输方法由于经济上不合理而没有得到有效开发利用,长期以来被点火炬放空。常规海上天然气开发,包括海上平台建设,铺设海底天然气输送管道,岸上天然气液化工厂的建设以及建造公路、LNG 外输港口等基础设施,投资大、建造周期长、现金回收迟、风险大。针对以上不足,FLNG 的技术开发和装置设计着眼于低投资、快投产和高效益,集液化天然气的生产、储存与卸载于一身,简化了海上气田的开发过程,特别适用于边际气田和深海气田的开发,优点颇多。

[0005] 另外,FLNG 装置远离人口密集区,对环境的影响较小,有效避免了陆上 LNG 工厂建设可能对环境造成的污染问题。FLNG 装置便于迁移,可重复使用,当开采的气田衰竭后,可拖至新的气田重新投入生产。据测算,在适合应用浮式液化天然气技术的前提下,浮式液化天然气生产装置与相同规模的岸上液化天然气工厂相比,投资减少 20%,建设工期减少 25%。

[0006] 到目前为止,浮式 LNG 生产装置面临的主要问题是平台自身的运动性能、受限制的甲板布置空间以及相关的安全措施,大量的研究工作集中于货物围护系统、生产工艺模块、外输技术方面。经过近几年来国外关于浮式液化装置的技术及经济性研究,系统的可行性基本得到认可。目前国外已有一型 FLNG/FLPG 装置在建,10 余型装置在研究。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种适用于海上 LNG-FPSO 的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收系统及其方法,该撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 分馏流程简单,启动快,开停机及维护方便,设备布置紧凑,便于成撬,能耗较低,冷却剂部分均为单相气体循环,且制冷剂为安全、无毒、环保、不可燃介质,极大地适应了海上 LNG-FPSO 平台晃动、安全性及紧凑性的要求。NGL 回收部分应用了 TDWC(TOP DIVIDING WALL COLUMN,见图 1) 装置,将脱乙烷塔和脱石油气塔两塔合并为一塔,内部中间有一隔板将空间隔成两半,顶部两边各有一台冷凝器,根据实际脱出气体成分的需要,分别提供不同的冷负荷,底部有一台再沸器,隔板两边的理论塔板数目及压力也可根据实际需要分别进行调整,简化设备的同时又能得到所

需要的各种烃类组分。

[0008] 本发明是通过以下技术方案实现的：

[0009] 本发明提供一种适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统，其包括：

[0010] 用于回收天然气凝液的 NGL 分馏模块；

[0011] 用于液化并过冷天然气的天然气液化模块；

[0012] CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块；以及

[0013] 用于为液化和过冷天然气提供冷量的氮气膨胀制冷循环模块；

[0014] 其中，所述 NGL 分馏模块包括依次相连的脱甲烷塔和 TDWC 装置；

[0015] 所述天然气液化模块包括依次相连的液化冷箱撬块和天然气存储撬块；

[0016] 所述 CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块包括 CO<sub>2</sub>压缩撬块和 CO<sub>2</sub>膨胀机；

[0017] 所述氮气膨胀制冷循环模块包括氮气膨胀增压撬块；

[0018] 所述的液化冷箱撬块包括依次相连的第一级换热器、第二级换热器、第三级换热器和节流阀，所述氮气膨胀增压撬块包括依次相连的氮气第一级增压机、氮气第一级冷却器、氮气第二级增压机、氮气第二级冷却器和依次相连的氮气第一级膨胀机和氮气第二级膨胀机，所述 CO<sub>2</sub>压缩撬块包括依次相连的 CO<sub>2</sub>第一级增压机、CO<sub>2</sub>第一级冷却器、CO<sub>2</sub>第二级增压机、CO<sub>2</sub>第二级冷却器；

[0019] 所述第一级换热器与氮气第二级冷却器相连，所述第二级换热器与脱甲烷塔及氮气第一级膨胀机相连，所述氮气第二级膨胀机另一端还与第三级换热器、第二级换热器、第一级换热器、氮气第一级增压机依次相连，所述 CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷模块的 CO<sub>2</sub>膨胀机还与第一级换热器、CO<sub>2</sub>第一级增压机依次相连；

[0020] 所述液化天然气分离器的液相出口与天然气存储撬块相连，所述液化天然气分离器的气相出口与第三级换热器、第二级换热器第一级换热器依次相连。

[0021] 作为优选方案，所述 CO<sub>2</sub>第一级增压机、CO<sub>2</sub>第二级增压机分别由 CO<sub>2</sub>膨胀机、氮气第一级膨胀机驱动。

[0022] 作为优选方案，还应包括天然气增压撬块。

[0023] 作为优选方案，还包括发电机撬块、液氮应急供应单元、CO<sub>2</sub>应急供应单元、仪控单元、仪表风、PSA 制氮单元中的一种或几种。当气源地没有供电系统时，由所述发电机撬块为液化流程提供电能；液氮应急供应单元和 CO<sub>2</sub>应急供应单元是作为应急使用的。

[0024] 一种如前述的适用于海上 LNG-FPSO 的天然气液化及 NGL 回收系统的使用方法，其特征在于，包括如下步骤：

[0025] A、将原料天然气经所述天然气增压撬块增压、冷却后进入所述 NGL 分馏模块的脱甲烷塔，从顶部脱出除去重烃的天然气，从底部得到重烃，所述重烃再进入 TDWC 装置，从顶部出来一端得到 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>气体，另一端得到 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>气体，从底部出来得到 C<sub>5+</sub>液体；

[0026] B、将除去重烃后的天然气通入所述液化冷箱撬块，经第一级换热器液化，再经第二级换热器和第三级换热器过冷，最后经节流阀节流降压至液化天然气储存压力后，进入液化天然气分离器，分离得到液化天然气产品和闪蒸汽，将所述天然气产品输送至天然气存储撬块储存，将所述闪蒸汽依次返回所述第三级换热器、第二级换热器和第一级换热器提供冷量；

[0027] C、将 CO<sub>2</sub>气体经所述 CO<sub>2</sub>压缩撬块增压、冷却至超临界状态后，进入膨胀机膨胀，降

温降压至临界点附近进入所述第一级换热器相变换热并过热,为氮气的预冷提供冷量复温后再返回压缩撬块循环;

[0028] D、将氮气通入所述氮气膨胀增压撬块,经氮气第一级增压机、氮气第一级冷却器、氮气第二级增压机、氮气第二级冷却器增压冷却之后依次进入所述第一级换热器、第二级换热器预冷,预冷后的氮气进入氮气第一级膨胀机、氮气第二级膨胀机膨胀制冷,得到低温低压的氮气依次返回第三级换热器、第二级换热器、第一级换热器提供冷量,得到温度升高的氮气重新进入所述氮气膨胀增压撬块。

[0029] 作为优选方案,步骤A中,所述原料天然气压力高于4.89Mpa时,不启用所述的天然气增压撬块。

[0030] 作为优选方案,步骤B中,所述液化天然气储存压力为0.23MPa。

[0031] 作为优选方案,步骤C中,CO<sub>2</sub>循环过程为跨临界循环,在第一级换热器中相变换热并过热。

[0032] 作为优选方案,步骤D中,所述氮气第二级膨胀机出口压力应高于0.1MPa。

[0033] 与现有技术相比,本发明具有如下的有益效果:

[0034] 1、本发明所述的适用于海上LNG-FPSO的撬装式氮膨胀天然气液化及NGL回收工艺,在保证单位液化能耗比较低的前提下,简化流程,该流程具有启动快,开停机及维护方便,设备布置紧凑,便于成撬的特点;

[0035] 2、本发明天然气液化工艺冷却剂部分均为单相气体循环,且制冷剂为安全、无毒、环保、不可燃介质,极大地适应了海上LNG-FPSO平台晃动、安全性及紧凑性的要求;

[0036] 3、本天然气液化及NGL回收工艺NGL回收部分应用了TDWC(TOP DIVIDING WALL COLUMN)装置,将两塔合并为一塔,简化设备的同时又能得到所需要的各种烃类组分;

[0037] 4、通过油气行业广泛采用的HYSYS软件的模拟计算,证实本液化工艺能耗较低,对不同气源适应性较强,是比较适合海上LNG-FPSO的撬装式天然气液化及NGL回收装置的液化流程。

## 附图说明

[0038] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0039] 图1为本发明中TDWC合成塔的结构示意图;

[0040] 图2为本发明的撬装式氮膨胀天然气液化及NGL回收工艺流程图;

[0041] 图中:1、脱甲烷塔、2、TDWC合成塔、3、第一级换热器、4、第二级换热器、5、第三级换热器、6、节流阀、7、液化天然气分离器、8、氮气第二级膨胀机、9、氮气第一级膨胀机、10、氮气第二级冷却器、11、氮气第二级增压机、12、氮气第一级冷却器、13、氮气第一级增压机、14、CO<sub>2</sub>第一级增压机、15、CO<sub>2</sub>第一级冷却器、16、CO<sub>2</sub>第二级增压机、17、CO<sub>2</sub>第二级冷却器、18、CO<sub>2</sub>膨胀机;21、第一冷凝器;22、第二冷凝器;23、隔板;24、塔身;25、再沸器。

## 具体实施方式

[0042] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术

人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0043] 本发明的适用于海上 LNG-FPSO 的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺流程如图 2 所示,该系统包括 NGL 分馏模块、天然气液化模块(也称天然气液化回路)、CO<sub>2</sub>跨临界预冷循环模块(也称 CO<sub>2</sub>跨临界预冷循环回路)和氮气膨胀制冷循环模块(也称氮气膨胀制冷循环回路)。

[0044] 所述 NGL 分馏模块包括依次相连的脱甲烷塔 1 和 TDWC(TOP DIVIDINGWALL COLUMN)合成塔 2,脱甲烷塔 1 和 TDWC(TOP DIVIDINGWALL COLUMN)合成塔 2 可组成 NGL 分馏撬块。

[0045] TDWC(TOP DIVIDINGWALL COLUMN)合成塔 2 的结构如图 1 所示,包括第一冷凝器 21、第二冷凝器 22、隔板 23、塔身 24 和再沸器 25,塔身 24 的顶部外侧设有两个流体通路,两个流体通路上分别设有第一冷凝器 21 和第二冷凝器 22,塔身 24 的顶部内侧固设有隔板 23,塔身 24 的底部设有一个流体通路,该流体通路上设有自沸器 25,使用时,TDWC 合成塔 2 的中设有第一冷凝器 21 的一个流体通路和第二冷凝器 22 的一个流体通路均与第二级换热器相连通,设有自沸器 25 的一个流体通路与第三级换热器相连通。

[0046] 所述天然气液化回路包括依次相连的第一级换热器 3、第二级换热器 4、第三级换热器 5、节流阀 6、液化天然气分离器 7;所述液化天然气分离器 7 的液相出口与液化天然气储罐相连,所述液化天然气分离器 7 的气相出口与第三级换热器 5、第二级换热器 4、第一级换热器 3 依次相连。

[0047] 所述第一级换热器 3、第二级换热器 4、第三级换热器 5、节流阀 6、液化天然气分离器 7 可组成液化冷箱撬块。

[0048] 所述 CO<sub>2</sub>跨临界循环预冷回路包括依次相连的 CO<sub>2</sub>第一级增压机 14、CO<sub>2</sub>第一级冷却器 15、CO<sub>2</sub>第二级增压机 16、CO<sub>2</sub>第二级冷却器 17 和 CO<sub>2</sub>膨胀机 18;所述 CO<sub>2</sub>膨胀机 18 还分别与天然气液化回路中第一级换热器 3、CO<sub>2</sub>第一级增压机 14 依次相连。

[0049] 所述 CO<sub>2</sub>第一级增压机 14、CO<sub>2</sub>第一级冷却器 15、CO<sub>2</sub>第二级增压机 16 和 CO<sub>2</sub>第二级冷却器 17 组成 CO<sub>2</sub>压缩撬块。

[0050] 所述氮气膨胀制冷循环回路包括依次相连的氮气第一级增压机 13、氮气第一级冷却器 12、氮气第二级增压机 11、氮气第二级冷却器 10 和依次相连的氮气第一级膨胀机 9 和氮气第二级膨胀机 8;所述天然气液化回路第一级换热器 3 还与氮气第二级冷却器 10 相连,所述天然气液化回路第二级换热器 4 还与氮气第一级膨胀机 9 相连,所述氮气第二级膨胀机 8 另一端还与天然气液化回路第三级换热器 5、第二级换热器 4、第一级换热器 3、氮气第一级增压机 13 依次相连。

[0051] 所述氮气第一级增压机 13、氮气第一级冷却器 12、氮气第二级增压机 11、氮气第二级冷却器 10 和氮气第一级膨胀机 9、氮气第二级膨胀机 8 组成氮气膨胀增压撬块。

[0052] 在 CO<sub>2</sub>跨临界预冷循环回路中,所述 CO<sub>2</sub>第一级增压机 14、CO<sub>2</sub>第二级增压机 16 分别由 CO<sub>2</sub>膨胀机 18 及氮气膨胀制冷循环回路中所述氮气第一级膨胀机 9 驱动。

[0053] 本发明的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收系统还包括发电机撬块、液氮应急供应单元、CO<sub>2</sub>应急供应单元、仪控单元、仪表风、PSA 制氮单元中的一种或几种。当气源地没有供电系统时,由所述发电机撬块为液化流程提供电能;液氮应急供应单元和 CO<sub>2</sub>应急供

应单元是作为应急使用的。

[0054] 应用本发明的撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收系统液化天然气及回收 NGL 的方法具体见以下实施例：

[0055] 实施例 1：

[0056] 天然气摩尔组分 1.54% N<sub>2</sub>、86.39% CH<sub>4</sub>、6.47% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、2.87% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、0.72% i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、0.82% n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、0.41% i-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>、0.31% n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>、0.31% n-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>、0.16% C<sub>7+</sub>，压力 4.9MPa、温度 35℃、流量 1.512\*10<sup>4</sup>kgmol/h，撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺的具体步骤如下：

[0057] 1、原料天然气进入脱甲烷塔 1 精馏，从底部得到重烃，温度为 84.95℃，压强为 4.9MPa，顶部得到天然气，温度为 -78.24℃，压强为 4.89MPa；

[0058] 2、经步骤 1 得到的重烃进入 TDWC 合成塔 2 精馏，从底部得到 C<sub>5+</sub>，温度为 166.7℃，压强为 2.11MPa，顶部一端得到 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>，温度为 6.142℃，压强为 2.725MPa，另一端得到 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>（石油气），温度为 58.79℃，压强为 2.1MPa；

[0059] 3、经步骤 1 得到的天然气经过第二级换热器 4、第三级换热器 5 液化并过冷至 -154.6℃；

[0060] 4、经过步骤 3 得到的液化天然气过冷液通过一个节流阀 6 节流降压至 0.2MPa 后，进入液化天然气分离器 7，从底部得到液化天然气产品，闪蒸气返回三个换热器（第三级换热器 5、第二级换热器 4 和第一级换热器 3）提供冷量；

[0061] 5、CO<sub>2</sub>气体经两级增压机（CO<sub>2</sub>第一级增压机 14、CO<sub>2</sub>第二级增压机 16）增压至 2.5MPa，经冷却器（CO<sub>2</sub>第一级冷却器 15、CO<sub>2</sub>第二级冷却器 17）冷却至 40℃；

[0062] 6、经步骤 5 冷却后的高压 CO<sub>2</sub>气体通过 CO<sub>2</sub>膨胀机膨胀后降温降压至临界点（温度为 -76.99℃，压强为 0.185MPa）后进入第一级换热器 3 换热，温度升高至 37℃，返回 CO<sub>2</sub>第一级增压机 14，完成循环；

[0063] 7、氮气经两级增压机（氮气第一级增压机 13、氮气第二级增压机 11）增压至 2.2MPa，经冷却器（氮气第一级冷却器 12、氮气第二级冷却器 10）冷却至 40℃；

[0064] 8、经步骤 7 冷却后的高压氮气依次进入第一级换热器 3、第二级换热器 4 预冷至 -60℃；

[0065] 9、经步骤 8 预冷的氮气依次进入两级膨胀机（氮气第一级膨胀机 9、氮气第二级膨胀机 8）膨胀降压至 0.14MPa，温度降为 -156.4℃后返回三个换热器（第三级换热器 5、第二级换热器 4 和第一级换热器 3）提供冷量，并使自身温度升高；

[0066] 10、经步骤 9 复温至 -17.89℃后的氮气重新进入氮气第一级增压机 13 完成循环。

[0067] 经过模拟计算得出，该撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺的每消耗 1.244\*10<sup>5</sup>kWh 的功量，可得到 1.331\*10<sup>4</sup>kmo1LNG，349.9kmo1C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>，968.6kmo1C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>（石油气），223.7kmo1 C<sub>5+</sub>，该液化工艺的 LNG 液化率为 98%。

[0068] 实施例 2（针对我国南海海域海上某油田伴生气源的情况）：

[0069] 天然气摩尔组分 1.1% N<sub>2</sub>、90.9% CH<sub>4</sub>、4.2% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、1.6% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、0.4% i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、0.4% n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、0.2% i-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>、0.1% n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>、0.2% n-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>、0.9% C<sub>7+</sub>，压力 5MPa、温度 40℃、流量 20\*10<sup>4</sup>Nm<sup>3</sup>/d，撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺的具体步骤如下：

[0070] 1、原料天然气进入脱甲烷塔 1 精馏，从底部得到重烃，温度为 136.8℃，压强为



4. 9MPa, 顶部得到天然气, 温度为  $-74.73^{\circ}\text{C}$ , 压强为 4. 89MPa ;

[0071] 2、经步骤 1 得到的重烃进入 TDWC 合成塔 2 精馏, 从底部得到  $\text{C}_{5+}$ , 温度为  $195.3^{\circ}\text{C}$ , 压强为 2. 11MPa, 顶部一端得到  $\text{C}_1$ 、 $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$ , 温度为  $3.695^{\circ}\text{C}$ , 压强为 2. 725MPa, 另一端得到  $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  (石油气), 温度为  $64.9^{\circ}\text{C}$ , 压强为 2. 1MPa ;

[0072] 3、经步骤 1 得到的天然气经过第二级换热器 4、第三级换热器 5 液化并过冷至  $-153.4^{\circ}\text{C}$  ;

[0073] 4、经过步骤 3 得到的液化天然气过冷液通过一个节流阀 6 节流降压至 0. 2MPa 后, 进入液化天然气分离器 7, 从底部得到液化天然气产品, 闪蒸气返回三个换热器 (第三级换热器 5、第二级换热器 4 和第一级换热器 3) 提供冷量 ;

[0074] 5、 $\text{CO}_2$  气体经两级增压机 ( $\text{CO}_2$  第一级增压机 14、 $\text{CO}_2$  第二级增压机 16) 增压至 2. 5MPa, 经冷却器 ( $\text{CO}_2$  第一级冷却器 15、 $\text{CO}_2$  第二级冷却器 17) 冷却至  $40^{\circ}\text{C}$  ;

[0075] 6、经步骤 5 冷却后的高压  $\text{CO}_2$  气体通过  $\text{CO}_2$  膨胀机膨胀后降温降压至临界点 (温度为  $-76.99^{\circ}\text{C}$ , 压强为 0. 185MPa) 后进入第一级换热器 3 换热, 温度升高至  $37^{\circ}\text{C}$ , 返回  $\text{CO}_2$  第一级增压机 14, 完成循环 ;

[0076] 7、氮气经两级增压机 (氮气第一级增压机 13、氮气第二级增压机 11) 增压至 2. 2MPa, 经冷却器 (氮气第一级冷却器 12、氮气第二级冷却器 10) 冷却至  $40^{\circ}\text{C}$  ;

[0077] 8、经步骤 7 冷却后的高压氮气依次进入第一级换热器 3、第二级换热器 4 预冷至  $-60^{\circ}\text{C}$  ;

[0078] 9、经步骤 8 预冷的氮气依次进入两级膨胀机 (氮气第一级膨胀机 9、氮气第二级膨胀机 8) 膨胀降压至 0. 14MPa, 温度降为  $-156.4^{\circ}\text{C}$  后返回三个换热器 (第三级换热器 5、第二级换热器 4 和第一级换热器 3) 提供冷量, 并使自身温度升高 ;

[0079] 10、经步骤 9 复温至  $-6.164^{\circ}\text{C}$  后的氮气重新进入氮气第一级增压机 13 完成循环。

[0080] 经过模拟计算得出, 该撬装式氮膨胀天然气液化及 NGL 回收工艺的每消耗  $2.852 \times 10^3 \text{kWh}$  的功量, 可得到 347. 6kmol LNG, 1. 492kmol  $\text{C}_1$ 、 $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$ , 9. 146kmol  $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  (石油气), 6. 493kmol  $\text{C}_{5+}$ , 该液化工艺的 LNG 液化率为 98%。比较实施例 1 和实施例 2 可以发现, 该液化工艺可以适应原料气在一定范围内的变化, 只需要调整工艺中的某几个参数, 证明该液化工艺对不同气源有较强的适应性。

[0081] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是, 本发明并不局限于上述特定实施方式, 本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改, 这并不影响本发明的实质内容。

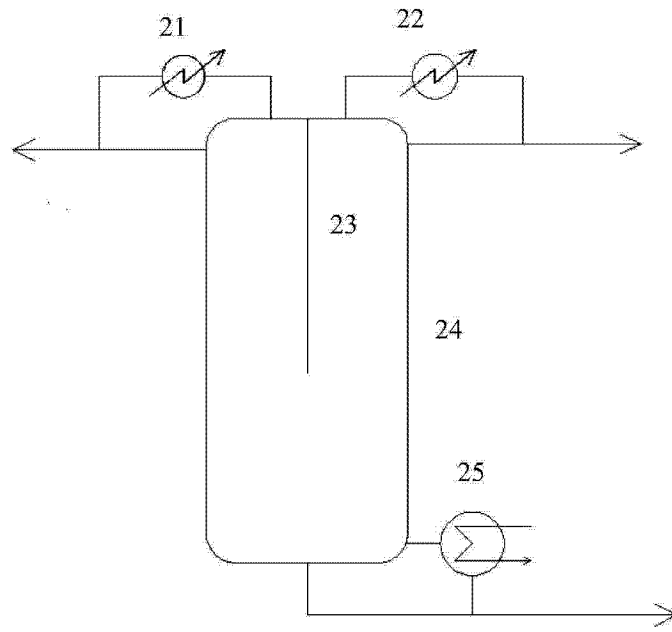


图 1

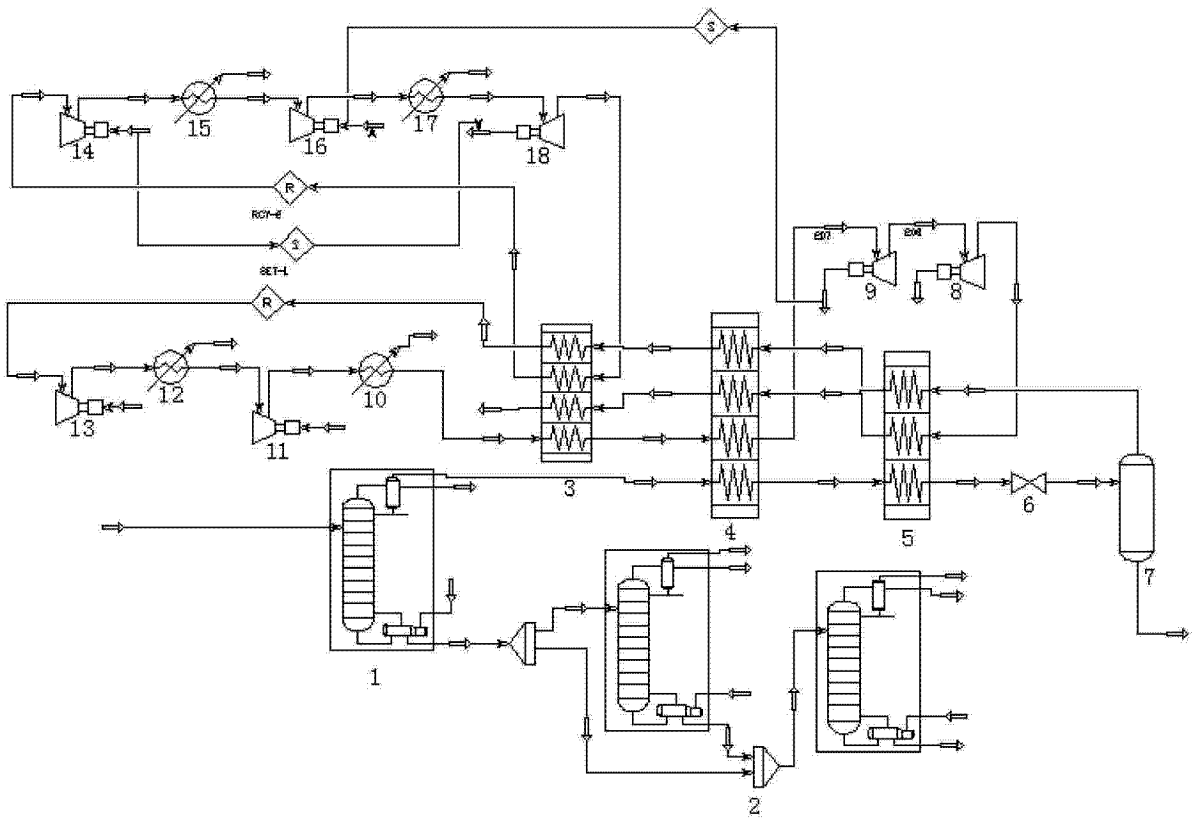


图 2