

天然气液化装置制冷方法探讨

赵红利 侯予 张敏 陈纯正

(西安交通大学制冷与低温工程研究所)

赵红利等.天然气液化装置制冷方法探讨.天然气工业,2005;25(10):120~123

摘要 回顾了国内外几种比较成熟的天然气液化装置中采用的制冷方法(复叠式制冷循环、混合制冷剂循环、膨胀制冷循环等)以及该领域最新的研究进展,并对其进行了分析比较。在此基础上介绍了一种新式液化天然气的制冷方法——吸收制冷循环。该方法利用溶液浓度的变化来获取冷量,即制冷剂在一定压力下蒸发吸热,再利用吸收剂吸收制冷剂蒸气,这种循环系统不仅适用于海上天然气液化装置,同时也适合于太阳能、地热能丰富的地区,既可降低产品成本又可实现废物利用。最后,还针对液化天然气运输、储存过程蒸气的产生,介绍了几种运输及储存装置中辅助制冷方法:G-M制冷机和 Stirling 制冷机、相变制冷、脉管制冷机。

关键词 天然气液化 制冷 方法 装置 液化天然气储存 液化天然气管道 蒸气 辅助制冷

一、液化制冷方法分析

结合目前的低温技术,天然气液化常用的制冷方法如下。

1. 复叠式制冷循环

复叠式制冷循环由若干个在不同温度下操作的制冷循环重叠组成。在其高、中、低温部分分别使用高、中、低温制冷剂。高温部分中制冷剂的蒸发用来使低温部分中的制冷剂冷凝,低温部分制冷剂再蒸发输出冷量。用几个蒸发冷凝器将这几部分联系起来,蒸发冷凝器既是高温部分的蒸发器,又是低温部分的冷凝器。它既能满足在较低蒸发温度下蒸发时合适的蒸发温度,又可以满足在环境温度下冷凝时适中的冷凝压力。

对于天然气液化,现多采用由丙烷、乙烯和甲烷为制冷剂的三级复叠式制冷循环,提供天然气液化所需的冷量,他们的制冷温度分别为 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该循环原理流程图如图1所示。净化后的原料天然气在3个制冷循环的冷却器中逐渐地被冷却、冷凝液化并过冷,最后用低温泵送入储槽。该循环的优点是冷热介质的平均温差较大,换热器面积小,且制冷循环在天然气液化系统各自独立,相互影响少,操作稳定,适应性强,技术成熟,设计计算简单。缺点是流程复杂,机组多,至少要有3台压缩机,要有生产和储存各种制冷剂的设备,各制

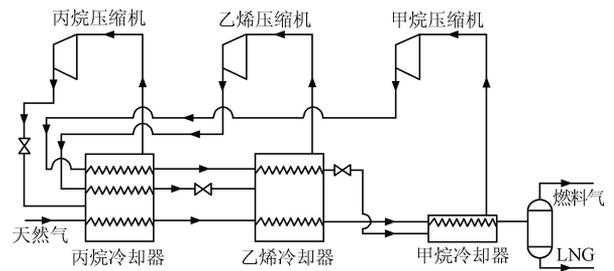


图1 复叠式制冷液化循环原理图

冷循环系统不允许相互渗漏,管线及控制系统复杂,管理维修不方便,对制冷剂的纯度要求严格。目前此制冷循环在天然气液化方面已得到应用,主要用于处理规模大、连续生产的基地型工厂。

2. 混合制冷剂循环

单一工质由于其固有的局限性,液体只能在节流过程中形成,致使节流制冷机的潜力远远没有发挥出来。而用混合工质时,则在热交换器中就出现了液相。节流后在传递热量时混合物逐渐蒸发,使部分冷凝蒸发发生在热交换器中。在这种情况下,保证了混合物高的节流效应,同时也保证了热交换器中所需的热当量比值的高沸点组分。因此从20世纪70年代初 Alfeev 发现在氮中加入少量高沸点工质可以使节流循环效率提高 $10\sim 112$ 倍以来,混合制冷剂循环的研究得到了不断的发展。首先,该循环大大降低节流运行压力,目前国内外均已成功

作者简介:赵红利,1974年生;西安交通大学制冷与低温工程系博士研究生;主要研究方向为低温制冷机与换热器。地址:(710049)陕西省西安市西安交通大学制冷与低温工程系。电话:13032904680。E-mail:hlzhd@stu.xjtu.edu.cn

研制出采用商用单级油润滑空调压缩机来驱动闭式循环混合物工质节流制冷机,大大降低了节流制冷机的制造成本。另外,由于采用合理选配的混合物工质具有较高的节流效应,还可以有效地改善循环高压气流的水当量匹配,减少回热损失,从而也降低了节流损失,最终提高了系统效率。

使用混合工质制冷可以使系统增大制冷能力,改善热交换器中的温度分布,进一步提高系统的效率,并且可以通过改变组分配比影响换热器的温度分布曲线,其制冷温度可达 70~150 K 的范围。同复叠式相比,混合制冷剂液化循环具有流程简单、机组少、投资费用少、对制冷剂纯度要求不高等特点。由于单级混合制冷剂循环的能耗较重叠式循环高 20% 左右,为降低能耗,采用多级混合制冷剂循环。对多级循环特性的评价结果表明,随着级数的增加,能耗降低。通过技术经济优化,一般采用三级混合制冷剂循环较为合理。典型的混合工质天然气液化循环流程如图 2 所示。由于采用多级液化,循环中采用高效、多通道的铝板翅式换热器,从而提高了整个系统的加热效率,使多级混合制冷循环的能耗基本接近重叠式的水平。

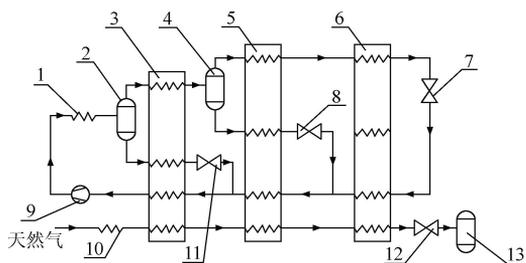


图 2 混合工质天然气液化循环图

1. 预冷器; 2. 第一分离器; 3. 第一换热器; 4. 第二分离器; 5. 第二换热器; 6. 第三换热器; 7. 节流阀 III; 8. 节流阀 II; 9. 压缩机; 10. 预冷器; 11. 节流阀 I; 12. 节流阀; 13. 分离器

混合工质节流制冷循环应根据所要达到的制冷温度及组元的正常蒸发温度、凝固点来考虑各组元的取舍,并在系统达到最大效率时选择混合工质的最佳配比。混合工质组分配比对混合物换热器性能行为是非常重要的,并且应根据小温差换热段对混合物进行分类。

在天然气液化制冷系统中目前多采用由 $C_1 \sim C_5$ 的烃类和氮等 5 种以上组分组成的混合物作为制冷剂,代替复叠式制冷中多种纯组分制冷剂。采用这种混合物作为制冷剂既包容了天然气液化所需的全部温度范围,又可仅用一台压缩机,使流程大为简化。因此,其在天然气液化及分离技术中得到了广

泛应用,目前混合制冷剂循环系统已有开式、闭式和有回热、无回热几种形式。

3. 膨胀制冷循环

膨胀制冷循环多采用逆布雷顿循环,在该循环中工质通过压缩机等熵压缩,经后冷却器冷却,然后在透平膨胀机内等熵绝热膨胀并对外做功,从而获得低温气流来制取冷量。随着低温透平膨胀机,特别是高速气体轴承透平膨胀机和高效紧凑换热器的发展,透平逆布雷顿循环的效率得到了显著提高,而且可获得很低的制冷温度和很宽制冷量范围,且具有高可靠性。因此近几十年来,逆布雷顿制冷循环已得到了很大的发展,其应用范围越来越广。

在天然气液化过程中,主要采用以下 4 种形式: ① 天然气直接膨胀制冷,直接利用高压天然气在膨胀机中绝热膨胀而使天然气液化,其液化能力主要取决于膨胀比及膨胀效率,该循环具有流程简单、设备紧凑、投资少、调节灵活、工作可靠等优点,其原理图如图 3 所示; ② 氮膨胀制冷,它是直接膨胀制冷的

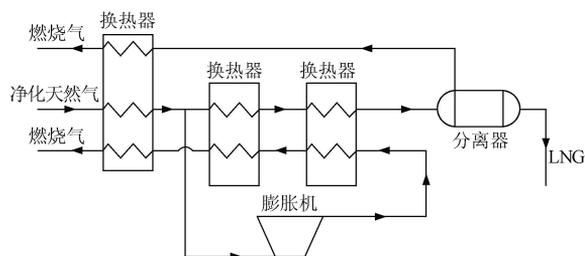


图 3 天然气直接膨胀液化制冷原理图

一种变型,其优点是适应性强,液化能力高,流程简单、运行灵活、操作方便,但缺点是能耗比较高; ③ 氮气—甲烷混合膨胀制冷,它是氮膨胀制冷循环的一种改进,具有流程简单、控制容易、启动时间短等优点,比纯氮气膨胀制冷节省 10%~20% 的动力消耗,但技术还不成熟,有待进一步发展; ④ 采用气波制冷机和透平膨胀机联合进行低温制冷,气波制冷机是大连理工大学气波技术研究所开发研制的新型制冷机械,其在热分离机的基础上,运用气体波运动的理论研制出来的,它吸收了热分离机的优点,更加有效地利用气体的压力,提高了制冷效率,并在结构等方面作了较大改进,具有耐高压、制冷量大,而且结构简单,操作维护方便,无需辅助设备等优点,既保证了设备的高效,操作起来也方便可靠,其原理如图 4 所示。

膨胀制冷循环的主要特点:充分利用天然气本身的压力能,消耗电能很少,节省了设备投资,采用体积小、重量轻、效率高、长期可靠运行的气体轴承

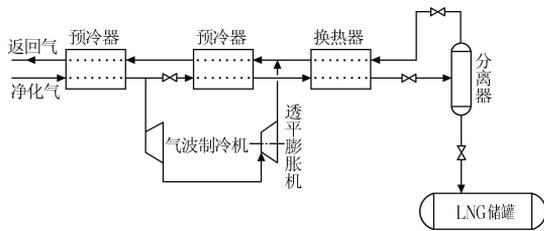


图 4 气波制冷机和膨胀机联合制冷原理图

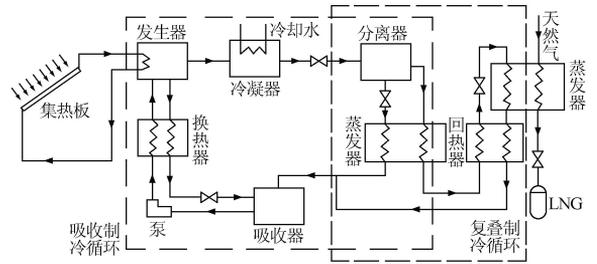


图 5 复叠式吸收制冷循环原理图

透平膨胀机,提高了系统效率,可使用于操作频繁且要求快速启停的调峰型装置中。现已发展到多级膨胀的液化系统,并且膨胀制冷机也日趋成熟,具有长寿命、高可靠性、低振动、重量轻等特点,在天然气液化方面有良好的发展前景。在液化气量日趋加大的要求下,该循环具有更大的优势。

4. 吸收制冷循环

吸收式制冷是利用溶液浓度的变化来获取冷量的装置,即制冷剂在一定压力下蒸发吸热,再利用吸收剂吸收制冷剂蒸气。自蒸发器出来的低压蒸气进入吸收器,被吸收剂吸收,吸收过程中放出的热量被冷却水带走,形成的浓溶液由泵送入蒸发器中,被热源加热后蒸发,产生高压蒸气,进入冷凝器冷却,而稀溶液减压回流到吸收器,完成一个循环。它相当于用吸收器和蒸发器代替压缩机,消耗的是热能。

吸收式制冷可采用太阳能、地热、工业废热等低品位热源驱动,是对大气臭氧层无破坏作用的绿色制冷剂,其在环保、节能等方面有着巨大的潜力。但传统吸收式制冷机的蒸发温度不低是吸收制冷的一个突出缺陷,并且制冷温度高又大大地限制了吸收制冷的应用范围。近年来,随着复叠制冷技术的成熟,吸收制冷循环的不断发展,加上非共沸混合物制冷剂的使用,为一种新式的复叠吸收制冷循环打下了基础。其采用非共沸混合物作为制冷剂,将复叠式循环与吸收式制冷循环结合起来,以达到利用低品位热能获得较低制冷温度的目的。

这种循环系统适用于海上天然气液化装置,也适合于太阳能、地热能丰富的地区,利用大量的太阳能、地热能的自然能源,大大降低了产品的成本。其制冷流程见图 5。随着技术的发展,新的制冷剂和吸收剂不断出现,吸收系统的溶液循环部分采用多效或多级循环,能更有效地加大吸收制冷的浓度差,大大降低制冷温度,有望成为另一种节能、高效的新式液化天然气的制冷方法。

二、运输储存装置中的辅助制冷方法

由于液态天然气温度比外界低得多,又不可能完全与外界绝热,因而在天然气的装载过程中会存在一定的气化。在平时运输储存过程中,有少量的蒸气产生,造成产品损失并成为安全隐患。因此,在运输及储存装置中有必要采取辅助制冷,作为一种有效的冷量补充手段。

1. G—M 制冷机和 Stirling 制冷机

G—M 循环制冷机是由吉福特(Gifford)和麦克马洪(McMahon)二人提出的,其原理是绝热气体放气制冷。由于温度的不同要求,目前已研制出单级、双级和三级 G—M 循环制冷机,单级一般在 77 K 下运转,最低可达 23 K。

Stirling 循环制冷机由柯克 1861 年提出,1954 年由荷兰生产出,其利用逆向斯特林循环进行制冷。当时可达 83 K 的低温,现在斯特林制冷机已发展有多种规格,按电机工作方式可分为旋转驱动型和直线驱动型,而直线驱动型又分单活塞和双活塞对置,按压缩机与膨胀机的结构方式可分为整体式和分置式。已能生产 90 K、26 kW 的大制冷量斯特林制冷机和 80 K、0.5 W 的微型制冷机。这样的制冷机可用于氮、空气和天然气的液化等方面。这两种制冷机的特点是结构紧凑,体积小,重量轻,启动时间短,制冷温度范围宽且降温时间短。目前主要应用于低温领域及制冷量小的产品。结合目前液化天然气的运输及储存过程中少量气化的情况,可以在装置上加装一套 G—M 或 Stirling 制冷机,不定期地将装置上方气化的天然气重新液化。

2. 相变制冷

物质相变制冷是利用液体在低温下的蒸发过程及固体在低温下的熔化或升华过程向被冷却物体吸收热量以达到制冷的目的。因此,相变制冷分为液体气化制冷、固体熔化与升华制冷和液体抽气制冷。

对于液化天然气,可采用固态甲烷进行相变制冷,固态甲烷的工作温度范围为 $-183\sim-213\text{ }^{\circ}\text{C}$,其融化放出大量的潜热。可在运输及储存装置的上方预存一定的固态甲烷,利用固态甲烷高的升华潜热吸收气化产品冷凝所放出的热量,并且固态甲烷溶化为液态,对产品不会造成任何污染。该方法不会造成运输及储存设备添加新的设备,但必须预先将少量天然气冷凝成固态,以备使用。

3. 脉管制冷机

1963年 Gifford 和 Longsworth 首先提出了脉管制冷机,从此开始了脉管制冷机的研究,其基本原理是利用高压气体的绝热放气过程来获得冷效应。但这种基本型脉管制冷机在制冷能力和制冷温度方面的性能都受到限制。随后出现了小孔型脉管制冷机、双向进气脉管制冷机和辅助小孔脉管制冷机等一系列重大突破。所有这些结构上的改进,再加上新回热器材料的采用,使得脉管制冷机在制冷性能和制冷温度方面有了飞速提高。目前已研制出单级、双级和三级脉管制冷机,其制冷温度由开始的124 K发展到现在的4 K以下。随着技术的进步,脉管制冷机的制冷量不断增大,其将成为新一代的主力辅助制冷机之一。目前国内外一些学者也已将脉管制冷法的研究应用扩展到天然气液化和普冷温区等领域。

参 考 文 献

- 1 顾安忠等.液化天然气技术.北京:机械工业出版社,2004
- 2 程有凯等.两级压缩与复叠式制冷方式的比较.制冷与空调,2004;4(3):66~69
- 3 钟永芳等.用于深度冷冻的自行复叠吸收制冷循环理论研究.太阳能学报,2002;23(6):786~790
- 4 张朝昌等.太阳能制冷技术的应用与发展.制冷与空调,2003;3(1):1~5
- 5 陈光明等.使用非共沸混合制冷剂的吸收式制冷机特性.制冷学报,1998;(1):1~5
- 6 牛刚等. $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 天然气液化装置的设计及分析.天然气工业,2002;22(3):92~95
- 7 蒋彦龙等.高性能G-M型单级脉管制冷机直流抑制和制冷特性实验研究.低温物理学报,2004;26(2):112~119
- 8 蒋洪等.天然气液化装置工艺方案设计.油气田地面工程,2001;20(4):23~24
- 9 顾安忠等.中国液化天然气的发展.石油化工技术经济,2004;(1):1~7
- 10 杨克剑等.中小型天然气液化装置及其应用.低温与超导,1996;24(2):54~58
- 11 黑丽民等.液化天然气船研究进展及其相关问题探讨.天然气工业,2002;22(3):92~95

(修改回稿日期 2005-08-22 编辑 居维清)