

LNG 汽车冷能回收空调系统 *

王 强¹ 厉彦忠² 殷秀妮³

(1. 山东建筑工程学院制冷研究室 2. 西安交通大学制冷低温研究所 3. 特灵空调亚洲研发中心)

王强等. LNG 汽车冷能回收空调系统. 天然气工业, 2005; 25(10): 124~126

摘 要 绿色汽车燃料——液化天然气 (LNG) 具有大量的冷能, 将该冷能回收用于汽车空调具有节能和环保的双重意义。为此, 针对 LNG 冷量回收过程中的大温差换热关键技术, 提出了带有蓄冷功能的多级冷能回收汽车空调系统, 并对该系统进行了模块化数值分析; 进而初步研究了空冷器中乙二醇溶液进出口温度及流量对风温的影响。结果表明, 板翅换热器出口乙二醇溶液温度在 275 K 左右, 乙二醇溶液流量保持在 100 L/h 左右较为合适。这为系统中各换热器进出口温度及结构参数的确定, 以及进一步开展实验研究提供了可靠的理论依据。

主题词 液化天然气 汽车 冷能 回收 空调系统 换热 数值分析

LNG 以液态存储方式代替 CNG 压缩存储方式, 作为汽车燃料具有排放污染小、燃烧热值高、能量存储密度大、汽车负载轻、连续行驶里程长、安全性能高等特点, 已经成为一种极具发展潜力的“绿色”汽车替代燃料。液化天然气存储在 111 K 左右的低温下, 在汽化的过程中会释放出大量的冷能, 其制冷量在 860~883 kJ/kg 之间, 若将该冷能回收用于汽车空调, 实现免费供冷, 既节约了能源, 又有利于环保, 具有显著的经济效益和社会价值^[1]。

一、LNG 冷量回收空调系统的建立

空调环境必须保证一定的温度和湿度, 利用 LNG 的潜热或显热直接与空气进行换热显然是不可行的, 容易造成空气中水蒸气、CO₂ 等气体的冻结, 使换热器流道阻塞, 无法正常工作。若增加吸附器和加湿器则势必带来成本增大及系统复杂性增加; 此外, 汽车空调负荷是变化的, 保证空调制冷量的调节也是非常重要的。将 LNG 冷能回收用于汽车空调面临如何降低 LNG 与空气之间的换热温差、如何保证供冷的调节等技术难题。目前国内外还未见 LNG 冷能回收用于汽车空调的报道。

笔者从上述问题入手, 通过中间冷媒来降低换热温差, 即将 LNG 的冷量先转移至低凝固点的中间冷媒上, 再通过冷媒的循环把冷量传递给需要冷却的空气。汽车的不稳定带来 LNG 汽化的不连续, 为了保

证汽车空调系统供冷的连续及冷量的自动调节, 在 LNG 冷量回收的同时, 还需要采用蓄冷技术, 在不增加冷能损耗的前提下, 将 LNG 汽化后产生的多余冷量暂时储存起来, 以满足不同行车工况下的冷量需求。

1. 冷量回收系统的组成

由于 LNG 的温度为 110 K, 而要在发动机中使用其天然气的温度必须为 10~40 ℃ 范围之间, 如果将天然气与空气直接进行潜热、显热的交换, 换热温差将会达到 170~200 ℃。如此大的传热温差对空气换热器来讲是难以实现的。为了最大限度地回收 LNG 冷量, 并能满足汽车空调的使用要求, 考虑使用中间冷媒进行多级换热, 尽量减小一次传热温差, 使传热温差控制在 100 ℃ 以内。

蓄冷系统一则可以实时调整汽车冷量的需求, 二则可以有效减小天然气与空气直接换热的换热温差, 但 LNG 的潜热较大 (约 515 kJ/kg), 蓄冷冷媒与低温天然气进行换热, 其凝结温度很难满足要求, 而且过低的温度也将造成冷媒黏度的增大, 从而会影响其流动与换热, 因而流程中采用回热系统, 用温度较高的天然气对 LNG 进行加热, 从而将 LNG 的潜热顺利释放出来。冷量回收系统如图 1 所示。

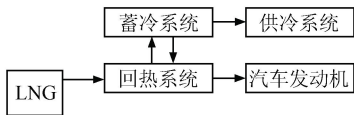


图 1 LNG 冷量回收汽车空调系统组成示意图

* 本文受到教育部高等学校骨干教师基金和山东建筑工程学院科研项目基金资助 (SDAI05)。
作者简介: 王强, 博士, 副教授; 2004 年毕业于西安交通大学制冷与低温工程研究所。地址: (250014) 山东省济南市和平路 47 号。电话: 13964173540。E-mail: xjdwq@163.com

(1) 供气系统

通过加热,使 LNG 汽化,再进行加热使之温度升高,然后经过减压、过滤,与空气混合进入发动机燃烧室。

为保证汽车的行驶要求,天然气要保证一定的流量,即要保证一定的 LNG 汽化量。在该系统中可以设置一个天然气低压储罐,以保证汽车启动时的天然气供气量。同时,为保证较低环境温度下的 LNG 正常汽化,也可以采用汽车尾气加热或者发动机冷却水加热甚至是采用电加热的方法,以保证任何瞬间系统的供气量。

(2) 回热系统

回热系统主要由气液换热器组成。考虑到系统安装及结构要求,可采用 LNG 储罐内沉浸盘管式换热器。盘管内流动的温度较高的天然气将管外罐内的 LNG 汽化,天然气温度降低后进入其他换热器。

(3) 蓄冷系统

蓄冷系统一个目标是完成与低温天然气的冷量交换,另外一个目标是完成冷量的蓄存与传递,从而对系统的冷量供应进行随机调节。

(4) 供冷系统

供冷系统是将蓄冷冷媒携带的从低温天然气中回收的冷能通过空气换热器传递给需要降温的空气。温度较高的回风与室外新风混合后通过轴流风扇强制掠过空冷气的翅片管,与管内的低温乙二醇溶液进行热交换,温度降低后送回车厢。各系统中温度的分布如图 2 所示。

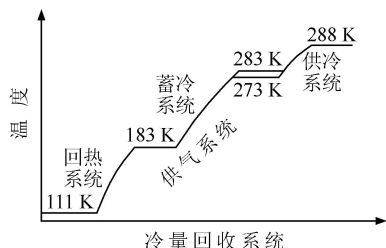


图2 系统中的温度分布图

蓄冷剂要完成与低温天然气的换热就必须在整个换热过程中保持良好的流动性,不能有冻结现象。作为蓄冷剂要有较强的蓄冷能力,也就是要具有较大的比热容。为保证良好的换热性能还要求蓄冷剂具有较小的比重及黏度、较好的传热性能,以减小系统中的流动阻力,从而有效减小换热器的尺寸。

此外,对于 LNG 冷量回收汽车空调系统中的蓄冷剂还必须无毒、不可燃、无刺激性气味、化学稳定性好、对人体无危害。

考虑到乙二醇具有较低的凝固温度,其共晶温

度可达 -60°C (对应的共晶浓度为 0.6 左右) 而且比热容大又对人体无危害。因而在该蓄冷系统中可以选用乙二醇作为蓄冷剂。

2. 系统流程方案的确定

LNG 储存的温度是 111 K, 低温空调的送风温度为 $4\sim 10^{\circ}\text{C}$, 采用 LNG 的自身相变及冷媒乙二醇溶液的蓄冷, 实现两级冷能回收, 尽量减小换热温差, 最大限度地回收冷能。

在对适用于不同温度区域的换热器进行具体分析的基础上, 笔者设计了以翅式换热器为主换热器, 以套管换热器、盘管换热器为辅助换热器的多级冷量回收低温换热系统; 以环保冷媒乙二醇为载体的蓄冷系统的 LNG 冷量回收汽车空调系统 (图 3)^[2]。

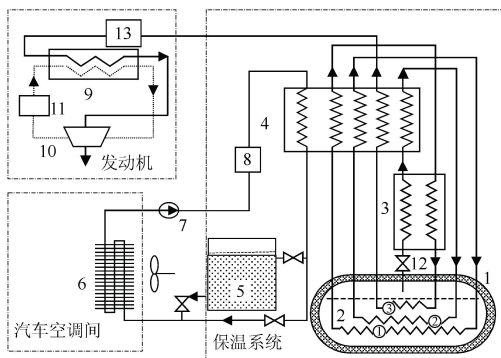


图3 LNG冷量回收汽车空调系统流程图

1. 液化天然气储罐; 2. 盘管换热器; 3. 套管换热器; 4. 板翅换热器; 5. 乙二醇蓄冷箱; 6. 风冷换热器; 7. 液体泵; 8. 过滤器; 9. 冷凝器; 10. 汽车发动机; 11. 冷却水箱; 12. 低温阀门; 13. 低压储气罐

在图 3 中, 为了实现液化天然气的低温温度到汽车空调的制冷温度过渡, 并且尽量减小冷量损失, 采用了两个循环: 一个是天然气多次自加热汽化循环; 另一个是乙二醇载冷蓄冷循环。这两个循环通过换热器 4 联系起来, 主换热器 4 的作用就是使天然气冷量传给乙二醇, 实现了由低温循环向制冷循环的转换, 把低温下的 LNG 冷量用作汽车空调制冷。

在多次自加热汽化循环中, 天然气既是输出冷量的工质, 也是传递冷量的载体, 对于低温罐内的液态天然气来说是一种气体载冷剂。这样避免了低温液态天然气与液体载冷剂乙二醇的直接换热。因为乙二醇与饱和液态天然气换热有极大的换热温差, 这会增加换热的焓损失, 且饱和天然气的沸腾换热会使载冷剂乙二醇由于温度过低而被冻结, 堵塞换热器流道, 使得整个回收系统不能正常运转。

在乙二醇载冷蓄冷循环中, 天然气的冷量通过主换热器 4 传递给了乙二醇溶液, 乙二醇蓄冷箱 5 具有蓄冷的作用, 当汽车全速运行时, 且汽车内热负

荷不大时,可以启动蓄冷循环,把冷量储存在乙二醇蓄冷箱 5 内的乙二醇中,而在怠速或停车时需要冷量大时,利用蓄冷罐内储存的冷量制冷。这样就解决了汽车空调需要的冷量与液化天然气消耗量不匹配的关系,能够使空调制冷达到需要的最佳工况。

为了提高换热器换热效率,需要尽量使得冷量回收系统的温度分布最佳,对于主换热器 4,就要求 4 股天然气入口温度和出口温度尽量一致,让其分别与乙二醇换热。考虑到主换热器 4 有 5 股互不混合的流体换热,因而采用板翅式换热器为好,板翅式换热器还有结构紧凑、体表面积大的优点,有利于减小整个冷量回收系统的体积和重量。

换热器 3 相当于一个回热器,其作用是降低从低温罐进入板翅式换热器 4 的气化天然气的入口温度,由于是两股质量流量相同的天然气逆流换热,且天然气质量流量比较小,因而采用套管换热器比较好,兼有制作方便、结构紧凑、成本较低的优点。

液化天然气杜瓦 1 内的换热器 2 为盘管式换热器,采用紫铜管盘绕在液化天然气杜瓦 1 的底部。由于液化天然气杜瓦 1 装的是饱和 LNG,因而液化天然气杜瓦 1 以及沉浸在杜瓦内的盘管换热器 2 组成了满液式蒸发器。

二、LNG 冷量回收系统模块化数值分析

将整个系统分为天然气低温回热模块和乙二醇载冷与蓄冷两个模块。天然气低温回热系统模块包括盘管换热器、多股流板翅换热器以及套管换热器的数值模拟;乙二醇载冷与蓄冷系统模块包括乙二醇蓄冷器及翅片管空气换热器的数值模拟。通过模块连接,对整个系统进行仿真研究^[3]。

在研究的系统中,主要的部件是各种类型的换热器,建立换热器的多节点模型(全分布参数模型),采用步进计算的方法,把换热器流道分成若干微元段,以上一个微元段的出口参数作为下一个微元段的入口参数,经过迭代计算,得出相关的参数变化情况。在选取微元控制体时, x 方向为换热器纵向, Δx 由换热器的管径或者排间距确定; y 方向则为流道方向, Δy 由选取的微元个数决定。换热器计算单元控制体示意图见图 4。

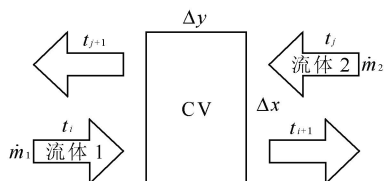


图 4 换热器计算微元控制体示意图

注: $\dot{m}$ 表示流体的质量流量; t_i , t_{i+1} , t_j , t_{j+1} 分别为节点温度

三、系统模拟及结果分析

在对天然气低温回热系统模块及乙二醇载冷与蓄冷系统模块中单个部件进行数值模拟分析后,将各部件组合成一个整体,进行系统计算机仿真。稳态系统仿真用于预测一定工况下装置稳定运行时所表现出来的性能,反映各部件之间的耦合特性。空气冷却器空气出口温度随乙二醇溶液进口温度(即板翅换热器出口乙二醇溶液温度)变化的模拟结果表明:随着乙二醇进口温度的升高,空气冷却器中空气的出口温度逐步上升。当乙二醇温度高于 275 K 左右时,随着乙二醇进口温度的升高,空气出口温度加快上升。因而在 LNG 冷量回收汽车空调系统中最好将板翅换热器出口乙二醇溶液温度控制在 275 K 左右。

空气冷却器中入口、出口乙二醇溶液温度和空气的出口温度随系统中乙二醇溶液流量变化的数值模拟结果表明:随着系统乙二醇溶液流量的增大,空气冷却器中乙二醇溶液进出口温度不断提高。由于出口温度的增加滞后于入口温度的增加,因而进出口温差随着乙二醇溶液流量的增大而降低。由于空气冷却器中乙二醇溶液温度的升高及温差的减小,空气出口温度也随着稍有升高,但温升的幅度不大。

考虑到乙二醇溶液不能在板翅式换热器的出口被冻住,因而必须要保持一定的流速;同时为尽量避免空气冷却器表面结霜,乙二醇溶液的供冷量也不能太大。从以上分析可以看出,对于该冷量回收汽车空调系统,在乙二醇溶液温度满足换热要求的前提下,其流量保持在 100 L/h 左右较为合适。

在上述结论的基础上,结合系统中供气系统、供冷系统以及 LNG 杜瓦罐中 LNG 的状态参数,就可以进一步确定各换热器的定性温度及换热器的结构参数,为系统的加工制造提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 王强,厉彦忠,陈曦.液化天然气在汽车工业中的发展优势.天然气工业,2002;22(5):93~96
- 2 厉彦忠,王强等.LNG 冷量回收汽车空调器.中国技术发明专利 03114438.1,2003
- 3 王强.绿色汽车燃料——液化天然气冷量回收汽车空调系统研究.西安交通大学博士学位论文,2004

(修改回稿日期 2005-08-22 编辑 居维清)