

液化天然气冷藏车冷量回收理论与稳态实验研究

周满, 厉彦忠, 谭宏博, 田宝聪, 应媛媛
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据我国冷藏运输行业发展现状和趋势以及液化天然气(LNG)汽车的普及与推广, 分析了回收 LNG 冷量用于冷藏车的优越性和可行性, 并对其冷量进行了匹配计算, 提出了清洁、环保、节能的直冷式 LNG 低温冷藏车流程方案. 由于 LNG 的危险性, 以液氮为替代工质, 开展了直冷式低温冷藏车冷量回收稳态实验研究. 结果表明: 系统稳态运行效果理想, LNG 气化复温所提供的冷量充足; 冷藏厢内温度能顺利降低到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 厢内各测点温差在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 降温速度和温度场的均匀性都符合相关规范技术要求; 系统方案切实可行, 节能效果明显, 具有显著的经济和社会效益.

关键词: 液化天然气; 低温冷藏车; 冷量回收; 温度场; 节能

中图分类号: TU86 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0105-05

Theoretical and Steady Experimental Investigation of the Cold Energy Recovering of a LNG-Fueled Refrigerated Truck

ZHOU Man, LI Yanzhong, TAN Hongbo, TIAN Baocong, YING Yuanyuan
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the current development of refrigerated transport industry of China and wide promotion of liquefied natural gas (LNG) vehicles, the advantages and feasibility to recover LNG cold energy for refrigerated truck were analyzed, and cooling capacity demand was theoretically calculated. A process of a direct-cooled refrigerated truck recovering LNG cold energy was proposed. A steady state experiment on a direct-cooled cold energy recovery of a refrigerated truck was conducted, in which liquid nitrogen was used instead of LNG. The experimental results show that the system could operate well and cold energy recovered during the LNG gasification process could match the demand of cold storage. The temperature could drop to $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the carriage, and the temperature difference between the measuring points was all below $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. In addition, the temperature drop rate and uniformity of the temperature field in the carriage could meet the relevant technical standard.

Keywords: liquefied natural gas; low temperature cold storage vehicle; cold energy recovering; temperature field; energy saving

因冷链物流发展滞后,我国每年约有30%的蔬菜和20%~25%的果品在运输和存放过程中腐烂损坏,易腐食品的损耗每年达几百亿元.2006年,国际制冷学会在征集全世界专家学者意见后,将冷藏运输节能列为未来优先研究的问题^[1].因此,大力发展冷藏运输业、提高公路冷藏货物运输比例势在必

行,开展节能环保型冷藏车研究具有重大意义.

随着人们环保意识的不断增强,国家对燃油汽车尾气排放的要求也越来越严格.由于天然气污染小,燃烧热值高,是一种清洁的汽车代用燃料,已经成为汽车燃料发展的主要趋势^[2].随着近年我国几座大型液化天然气(LNG)接收项目的建成投产,

LNG 汽车得到了不断的发展,LNG 相关产业链的技术研究受到越来越多的重视,LNG 冷能回收利用技术作为高效节能的综合用能技术方案,成为该领域研究热点之一^[2-4].作者所在课题组于国内率先开展起基于 LNG 汽车的冷能回收技术的研究工作.LNG 用作汽车清洁燃料的同时,可以将处于 111 K 低温状态下的 LNG 在气化复温过程中所释放的冷量回收用于冷藏车.与传统的机械冷藏车和冷板冷藏车相比较,LNG 冷藏车的冷量完全来自于 LNGd 在气化复温过程,无需给汽车单独配备机械式制冷机组,既节省了投资,降低了运行费用,又消除了机械制冷带来的噪声污染,具有节能和环保的双重意义,是一种真正意义上的“绿色”汽车.

1 LNG 低温冷藏车冷量匹配计算

1.1 低温冷藏车所需冷量

以国内某品牌专用汽车有限责任公司生产的 XKC5045XLCA1 型冷藏保温车为例,该冷藏车车厢为全封闭复合材料板块组合结构,厢板内、外蒙皮采用食品级的玻璃钢板,中间夹层为高密度聚氨酯发泡隔热材料,四侧用高强度胶将玻璃钢板与聚氨酯泡沫材料粘合在一起,并用内埋高强度螺钉进行固定.厢体外尺寸为 3 200 mm×1 900 mm×1 900 mm,壁厚 75 mm,厢体内部净容积 V 为 9.34 m³.文献[5]中已有对冷藏厢体的制冷机组制冷量 $Q_{c,r}$ 的相关规定,如表 1 所示.

表 1 冷藏厢体的制冷机组制冷量要求

V/m^3	$Q_{c,r}/\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$		
	D 级	E 级	F 级
≤ 9	≥ 110	≥ 125	≥ 145
9~18	≥ 95	≥ 105	≥ 125
> 18	≥ 80	≥ 90	≥ 100

D 级: $T_i \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; E 级: $T_i \leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$; F 级: $T_i \leq -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (其中 T_i 为空车厢内部温度).

1.2 LNG 可提供的冷量

LNG 从储罐内饱和液态复温到预定状态时释放的冷量为

$$Q_c = m(r + c_{p,c}(T_0 - T_s)) \quad (1)$$

式中: m 为 LNG 的消耗量; r 为汽化潜热; $c_{p,c}$ 为比定压热容平均值; T_0 为 LNG 复温后的温度; T_s 为储罐内 LNG 的饱和温度.

按照稳态运行(保持 80 km/h 不变)计算知,上述型号冷藏车每小时消耗 LNG13.5 kg,可提供冷

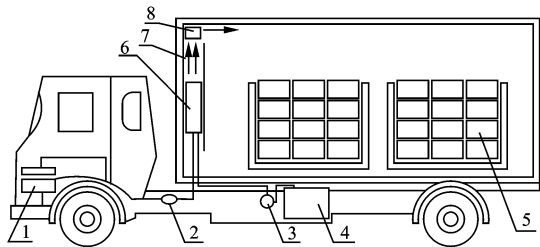
量约 2.8 kW,即 304 W/m³.

由以上分析可知,在正常行驶情况下,LNG 供应的冷量大于冷藏车厢需要的冷量,可以满足将预冷后的货物进行中短途冷藏运输的要求.回收汽车 LNG 冷量用于低温冷藏车的方案完全可行.

2 实验装置及方法

2.1 直冷式 LNG 低温冷藏车工作原理

在对 LNG 冷能性质及其综合利用的研究基础上,本文提出了一套直冷式 LNG 冷藏车流程方案,如图 1 所示.



1: 气体发动机; 2: 加热器; 3: 控制阀; 4: LNG 储液罐;
5: 冷冻货物; 6: 气化器; 7: 风道; 8: 风机

图 1 LNG 冷能回收用于冷藏车示意图

LNG 在储罐压力作用下从储罐送出,经流量控制系统进入气化器.气化器顶部装有风机,四周用薄钢板封闭形成风道,通过向上抽风形成强制对流,在强化换热的同时可以起到除霜的作用.吸上的冷风经风机以一定的速度水平吹出,使整个箱体实现空气循环,从而达到良好的冷藏效果.

作为系统中的核心部件,气化器在低温系统中的传热性能直接关系到冷量回收流程能否实现.在大量收集资料和理论研究的基础上,本文提出采用星型空温式翅片管换热器作为冷量回收流程中的气化器.翅片管换热器结构相对比较简单,体积较小、质量较轻、制造和使用方便,并且传热效率较高^[6].翅片管结构如图 2 所示,气化器由 8 根翅片管串联成一排组合而成,如图 3 所示,具体参数见表

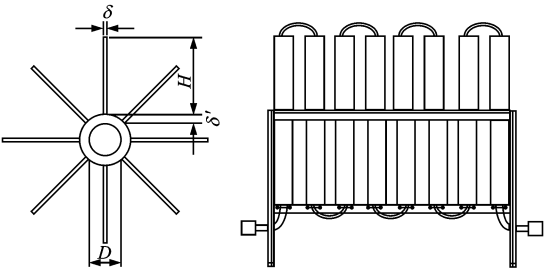


图 2 翅片管截面图 图 3 气化器示意图

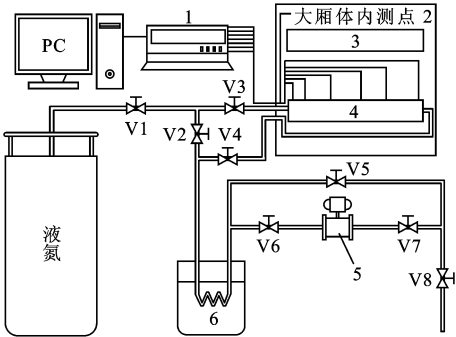
为及时排出凝结水,采用立式管束结构^[7],同时由于气体纵向冲刷管束,可以在保证翅片管传热全面强化的基础上,及时排出凝结水和除霜。

2.2 直冷式 LNG 低温冷藏车制冷系统
模拟实验装置

本实验的目的是验证流程的实际可行性,以及测试系统在低温条件下的制冷性能。由于 LNG 的危险性,因而可选用相对安全且物性相近的物质进行模拟实验。本实验用液氮替代 LNG 作为冷源,由于二者不仅具有流动和换热的相似性^[8],而且在质量流量相同的情况下,从饱和态复温到 0℃时所释放的冷量之比为 0.96:1,因此从冷量回收的角度可以起到很好的替代作用。实验装置如图 4 所示,主要由冷藏车厢、液氮储罐、低温调节阀、低温截止阀、水浴加热装置、气化器、风机、旁通管路、LZB 玻璃转子流量计 (LZB-25, 量程 2.5~25 m³/h, 精度±1.5%) 及 Agilent 34970A 数据采集系统组成,其中风机功率为 300 W,风量为 3 500 m³/h,风速为 13 m/s。

利用 T 型铜-康铜热电偶(精度±0.2℃)测量低温翅片管管内及车厢体内各点的温度。厢体内详细测点布置(共 36 个测点)如图 5 所示。在气化器进出口及中间等分的 9 个不同位置将经过校准的低温热电偶插入翅片管基管内,并用低温胶密封。

实验过程如下:开启低温调节阀 V1 及低温截止阀 V2,关闭低温截止阀 V3 及阀 V4,液氮进入盘管换热器中气化,系统调节过程中由于氮气温度、流量不稳定,故需打开阀 V5,关闭阀 V6、V7,氮气经旁通管路排出,待流量平稳后打开阀 V6、V7,关闭阀 V5,使氮气经流量计排出;当流体温度、流量稳定且达到预定值 22 m³/h(按该型车稳态运行时消耗的 LNG 等质量流量换算而来)后,关闭阀 V2,打开阀 V3、V4,液氮进入车厢开始冷量回收实验。每隔 2 min 记录各测点的温度值。



1:数据采集系统; 2:车厢; 3:风机; 4:气化器;
5:流量计; 6:加热装置; V1~V8:阀门

图 4 实验装置示意图

3 实验结果及分析

本实验主要研究冷能回收用于低温冷藏车方案的可行性、系统流程能否顺利完成以及冷藏车厢体内温度场特性。

3.1 车厢内降温特性

图 6 为在设定液氮流量 G 为 22 m³/h 的条件下,车厢内温度由环境温度降到 -20℃的过程中,各截面不同高度的 3 个测温点的平均温度随时间的变化曲线。由图可见,厢体内温度在 140 min 内达到

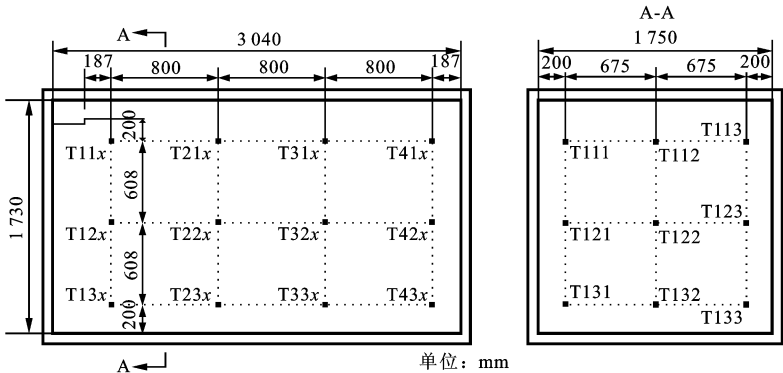


图 5 厢体内测温点布置图

预定温度,在文献[5]规定的 6 h 最长时限以内,满足 F 级冷藏车技术要求. 降温速度由开始的 0.6 °C/min 逐渐降低到 0.2 °C/min,这主要是由于随着厢体温度的降低,厢体内外温差逐渐增大,厢体向外传递热量和漏热量均相应增大,在液氮流量不变即冷量一定的情况下,厢体内能吸收的冷量减少,所以降温速度会逐渐降低.

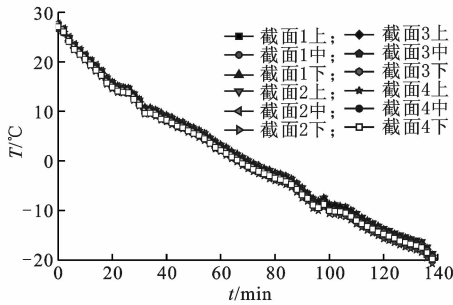


图6 厢体内各截面不同高度处平均温度变化

3.2 车厢内保温特性

由于冷藏车大部分工作时间是在维持厢体内温度,故当厢体内温度分别降到-20 °C和-40 °C后,即调小低温调节阀的开度,使厢体内温度逐渐趋于恒定. 图7、8分别为厢体内平均温度达到-20 °C和-40 °C后,减小液氮流量时厢体内平均温度变化曲线,由此可得为维持厢体内温度为-20 °C和-40 °C所需的液氮流量分别为 13.08 m³/h 和 14.5 m³/h,分别占预定值的 59.45%和 65.91%,这进一步验证了通过系统回收的冷量足以满足低温冷藏车的使用需求,同时为本课题下一步对蓄冷冷藏车的研究指明了方向.

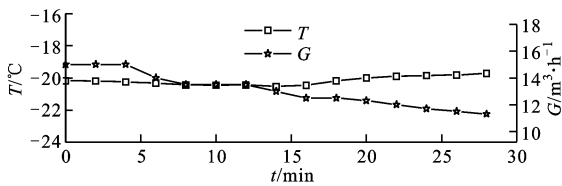


图7 -20 °C附近厢内平均温度及液氮流量变化

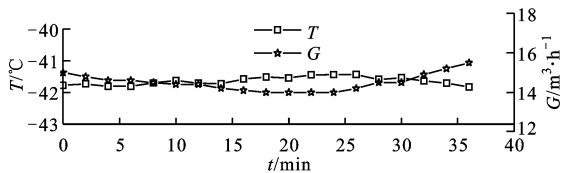


图8 -40 °C附近厢内平均温度及液氮流量变化

3.3 车厢内温度场的均匀性

按照 1 代表测点 111,2 代表测点 112,3 代表测点 113,4 代表测点 121 等依次向下的顺序将厢体内 36 个温度测点的温度值连成一条曲线,选择 5 个不同时间得到以上整个厢体温度场分布图(图9). 由图9可知,整个厢体内温度场的均匀性较好,从环境温度降到-20 °C的过程中,同一时刻各点最大温差在 4 °C 以内,能够满足应用需求.

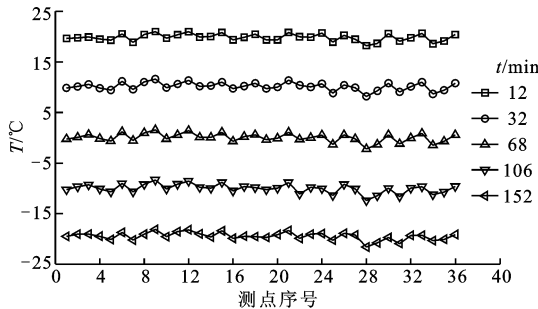


图9 厢体内不同时间的温度场分布

第 1 个纵截面的测温点即为所有测点中编号尾数为 1 的点,即 111、121、131 等共 12 个点,第 2 个纵截面的测温点即为编号尾数为 2 的点,如 112 等,依次类推,选择某两个时刻各测点的温度可得上述不同纵截面上温度的分布如图 10 所示. 由图 10 可知,在整体温差不大的情况下,第 1 纵截面温度下降最快,温度曲线位于下方,第 2 纵截面次之,温度曲线位于中间,第 3 纵截面温度下降最慢,温度曲线位于上方. 这说明厢体内存在左冷右热的温度分层现象,分析可知这主要与气化器的位置有关,第 1 纵截面靠近气化器进口,依次随着气化器温度的升高为第 2、第 3 纵截面,由于空气直接通过气化器与液氮换热,从而造成从左向右空气的温度分层现象.

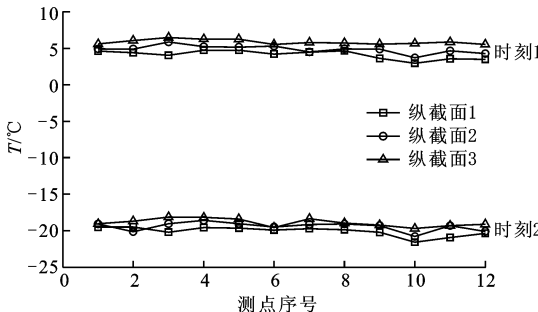


图10 不同纵截面上的温度分布

同理,第 1 个水平面的测温点为所有测点中编号中间数为 1 的点,即 111、112、113、2

同一直线上的左右测点有一定的温差外,不同水平面并无明显上下位置的温差.这说明在-20℃以上的范围内,风机的大风量吸风与高速送风形成的空间空气循环可以排除冷空气密度大对空间温度场的影响.

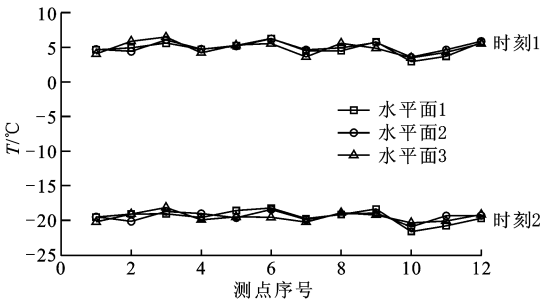


图 11 不同水平面上的温度分布

4 结 论

(1)回收 LNG 冷量用于低温冷藏车具有清洁环保和节约能源的双重优点,是一种真正意义上的“绿色”汽车.本文在理论计算证明其可行性的基础上,提出了一套直冷式 LNG 低温冷藏车流程方案.

(2)开展了直冷式 LNG 低温冷藏车冷量回收稳态实验研究.实验表明:在稳态运行条件下,该系统流程能够顺利完成,回收的冷量足以满足将预冷后的货物进行中短途冷藏运输的需求,厢内温度能顺利降低到-20℃,厢内各测点温差在4℃以内,降温速度和温度场的均匀性都符合相关规范技术要求;系统稳态运行方案切实可行,节能效果明显.

(3)通过系统保温实验,测算出为维持厢体温度不变所需要的液氮流量,进一步证实了方案的可行性,同时为本课题的数值模拟研究,以及下一步动态研究指明了方向.

参考文献:

[1] 国际制冷学会. 国际制冷学会关于制冷领域应优先研究问题的列表[J]. 制冷学报, 2006,30(3):59-62.
International Institute of Refrigeration. List of issues should be given priority in the field of refrigeration of IIR[J]. Journal of Refrigeration,2006,30(3):59-62.

[2] 王强,厉彦忠,陈曦. 液化天然气冷量火用的特性及在汽车制冷中的回收利用[J]. 西安交通大学学报,2003,37(3):294-297.
WANG Qiang, LI Yanzhong, CHEN Xi. Cold exery characteristics of liquefied natural gas and its recovery and application in automobile refrigeration system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2003,37(3): 294-297.
[3] 燕娜,厉彦忠,脱瀚斐. 基于液化天然气冷量的液体空分新流程[J]. 西安交通大学学报,2007,41(1):122-124.
YAN Na, LI Yanzhong, TUO Hanfei. Novel liquid product air separation system based on cold energy of liquefied natural gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2007,41(1):122-124.
[4] 王强,厉彦忠. 基于液化天然气冷能的燃气轮机发电循环[J]. 西安交通大学学报,2003,37(5):531-534.
WANG Qiang, LI Yanzhong. Gas turbine power-generation cycle based on cold energy of liquefied natural gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2003,37(5):531-534.
[5] 上海市城市交通管理局. JTJ 019-2008 城市交通管理局技术规范:道路货物运输冷藏车辆营运技术规范 [S]. 上海:上海市城市交通管理局,2008.
[6] 陈叔平,昌锬,刘振全,等. 低温翅片管换热器的传热试验研究[J]. 低温与超导,2006,34(2):91-93.
CHEN Shuping, CHANG Kun, LIU Zhenquan, et al. An experimental study of heat transfer characteristics of a cryogenic finned-tube heat exchanger[J]. Cryogenics and Superconductivity,2006,34(2):91-93.
[7] 王明富. 强制通风液化天然气汽化器的研制[J]. 深冷技术,2008(6):23-26.
WANG Mingfu. Development of LNG vaporizer with forced ventilation[J]. Cryogenic Technology,2008(6): 23-26.
[8] 王强,厉彦忠,董德发. LNG 汽车冷能回收系统相似模化分析[J]. 天然气工业,2006,26(9): 141-143
WANG Qiang, LI Yanzhong, DONG Defa. Similar modeling analysis of cold energy recovery system of LNG vehicles[J]. Natural Gas Industry,2006,26(9): 141-143.

(编辑 荆树蓉)