

# 制冷空调新技术进展

王如竹 丁国良 主编

上海交通大学出版社

# 制冷空调新技术进展

(2003)

王如竹 丁国良 主编

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书是第二届制冷空调新技术研讨会论文集,反映了我国在制冷空调领域的最新研究成果和技术进展。全书共收录了55篇论文,依次分为:制冷空调技术前沿问题,建模、仿真与控制,新型制冷蓄冷工质及应用,空调系统,热泵、能量综合利用与新型制冷装置等六个部分。内容包括:制冷空调中的节能新技术、能源利用新技术、新工质的使用、新的控制技术、新的空气洁净技术、新型制冷技术、液化天然气技术,以及其他制冷、空调、低温系统的最新技术进展。

本书可作为高等院校制冷与低温工程学科和暖通空调学科面向本科生和研究生的学科前沿课程的教学参考书,也可供制冷空调研发、设计和生产技术人员阅读和参考并得到最新的技术信息。

### 图书在版编目(CIP)数据

制冷空调新技术进展. 2003/王如竹,丁国良主编.  
2版. —上海:上海交通大学出版社, 2003  
ISBN 7-313-02815-6

I.制... II.①王...②丁... III.制冷—空气调节器—新技术—2001 IV.TB657.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第066372号

### 制冷空调新技术进展

(2003)

王如竹 丁国良 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:880mm×1230mm 1/16 印张:20.25 字数:601千字

2001年10月第1版 2003年11月第2版 2003年11月第2次印刷

印数:1 051~2 600

ISBN7-313-02815-6/TB·032 定价:38.00元

版权所有 侵权必究

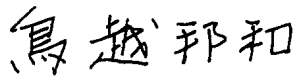
## 贺 词

我代表大金工业株式会社热烈祝贺第二届制冷空调新技术研讨会胜利召开!

本届制冷空调新技术研讨会将会反应中国高校、研究机关以及企业在制冷空调领域里的最新研究成果和最新技术。我确信这次研讨会不但能对中国制冷空调领域里的最新成果做出最好的概括,而且还会起着中国产学研结合的桥梁作用,将能为未来的中国制冷空调事业的发展做出不可估量的贡献。

大金工业株式会社为能在本次研讨会上和来自中国制冷空调领域里的各位教授、专家、研究者相识感到很荣幸,同时也为能成为本次研讨会的赞助单位感到自豪。近年来,我们在中国制冷空调领域里积极地拓展业务的同时,也和清华大学、上海交通大学建立了长期友好的研究合作伙伴关系。我们很珍惜这次和中国同行们交流的机会,衷心地希望我们两国制冷空调事业发展壮大。

最后祝大家身体健康,事业成功!

大金工业株式会社常务 

2003年11月吉日于日本大阪

# 序 言

为及时交流与反映我国制冷空调发展的最新技术、架设产学研结合的桥梁,上海交通大学发起并承办了“制冷空调新技术研讨会”。该会议力求反映高校及研究机构有关制冷空调的最新成果,以及企业在此领域的技术创新。在2001年举行的第一届“制冷空调新技术研讨会”上发表的论文已被收录于《制冷空调新技术进展(2001)》。而《制冷空调新技术进展(2003)》收录的是在第二届“制冷空调新技术研讨会”上发表的论文。本书将成为系列丛书,我们希望读者可以从这系列书籍中了解到制冷与空调学科的发展情况及新技术发展趋势。

《制冷空调新技术进展(2003)》着重反映的制冷空调领域的新技术包括:制冷空调中的节能新技术、能源利用新技术、新的制冷与蓄冷工质的使用、新的控制技术、新的设计技术、新的空气洁净技术、液化天然气技术,以及其他制冷、空调、低温系统的最新技术进展。

第二届“制冷空调新技术研讨会”会议学术委员会由王如竹、厉彦忠、陈光明、张寅平、李玉国、张旭、罗二仓等7位教授组成,会议组织委员会由丁国良、谷波、连之伟、吴静怡、汪荣顺、邱利明、掘宪治等组成。本次会议得到了日本大金(DAIKIN)公司的独家赞助。

考虑到专业面的覆盖性,本书安排了若干个综合论文,内容涉及LNG汽车空调器、中央冷却系统的故障诊断与优化控制、个人送风系统的节能效果及吸入空气质素、环保制冷剂研究的现状和趋势、多级脉管制冷机、室内环境中含SARS病毒颗粒的传播和控制等方面。

目前为改善我国制冷与低温工程学科和暖通空调学科的本科生、研究生的教学效果,许多高校已开设了学科前沿课程,本书可以作为此类课程的教学参考书。企业的产品研发需要吸取最新的技术成果,本书涉及了制冷空调新技术的诸多方面,可以为制冷空调企业研发人员提供较多的技术信息。我们期望本书的出版,能够为制冷空调学科的教学改革服务,也为我国制冷空调企业的技术发展服务。

王如竹 丁国良

2003年10月于上海交通大学

# 目 录

## 第一篇 制冷空调技术前沿问题

LNG 汽车空调器的研究与发展 .....	厉彦忠,陈曦,王强 (3)
中央冷却系统的故障诊断与优化控制 .....	王盛卫,崔景潭 (11)
个人送风系统的节能效果及吸入空气质素 .....	牛建磊,徐洪涛 (22)
环保制冷剂研究的现状和趋势 .....	史琳,朱明善 (27)
多级脉管制冷机的研究进展 .....	陈国邦,孔博 (39)
室内环境中含 SARS 病毒颗粒的传播和控制——传播路径及 病房通风 .....	李玉国,陈德仪,梁耀彰,李行伟 (51)
促进空调发展的技术 .....	矢嶋,龍三郎 (60)
下送风空调的负荷计算 .....	连之伟 (67)

## 第二篇 建模、仿真与控制

空调房间风机停转故障的神经网络诊断 .....	谷波,王志毅,黎远光 (77)
建筑装饰材料 VOC 散发计算的简化模型及结束判据 .....	成通宝,江亿 (81)
制冷系统稳态仿真算法的图论生成方法 .....	张春路,梁贞潜,丁国良 (84)
电加热相变蓄热地板采暖房间热性能数值模拟及分析 .....	罗晓熹,张寅平,林坤平 (89)
避免湿压缩的智能化控制方法 .....	丛晓春,张旭 (95)
复杂供热空调水力管网计算机模拟分析软件的开发 .....	冯小平 (99)
热交换器结构对空调器室内机换热性能的影响分析 .....	胡俊伟,丁国良,张春路 (103)
面向对象的空调换热器快速仿真软件开发技术 .....	丁国良,张春路,刘建,魏文建 (108)
蓄冰空调控制方法的研究与应用 .....	刘秋新,张彦,刘冬华 (114)
小型商用(户式)蓄冰空调试验台的设想与建设 .....	刘秋新,周传辉,刘冬华 (120)
基于 LabVIEW 的暖通空调综合试验台 CAT 系统 .....	姜周曙,黄国辉,王永皓 (124)
暖通空调综合试验台 CAT 系统的研制 .....	黄国辉,姜周曙 (129)

## 第三篇 新型制冷蓄冷工质及应用

CO <sub>2</sub> 跨临界循环膨胀机的开发 .....	李敏霞,马一太,杨俊兰,苏维诚 (135)
二氧化碳热泵热水器研究新进展 .....	马一太,管海清,李敏霞,杨俊兰 (140)
制冷剂二氧化碳蒸发换热性能研究 .....	马一太,杨俊兰,管海清,卢苇 (146)
一种 HCF-22 的新型替代制冷剂 .....	宣永梅,陈光明,王勤 (151)
混合工质汽液相平衡关联模型 .....	韩晓红,陈光明,崔晓龙 (157)
氯化钙—氨工质对的吸附衰减特性分析 .....	王丽伟,王如竹,吴静怡,王凯 (163)
一种低温相变蓄冷材料蓄冷特性实验研究 .....	刘真泉,王馨,张寅平,赵庆珠,赵勇 (167)
新型复合相变蓄冷材料热性能研究 .....	李辉,方贵银 (172)

## 第四篇 空调系统

- 高压静电除尘灭菌技术在中央空调系统的应用 ..... 郑晓红,王如竹,晋欣桥,谷波 (179)
- 采用低温送风对室内热舒适的影响 ..... 张智力,张旭 (184)
- 去湿蒸发制冷空调系统运行特性的初步分析 ..... 杨建坤,张旭 (189)
- 太阳能液体除湿空调新技术的研究 ..... 施明恒,赵云,孙健,张村 (193)
- 溶液除湿空调系统及经济性分析 ..... 陈晓阳,李震,刘晓华,江亿,张寅平 (199)
- 低温送风条件下人体热舒适性的研究 ..... 李锐,康小鹏,郝学军 (204)
- 低温送风条件下送风口出流特性的研究 ..... 李锐,丁涛,杨晖 (209)
- 中央空调冷凝热回收技术在我国推广应用与经济分析 ..... 邹才福 (213)
- 洁净技术在家用空调器设计中的应用 ..... 袁琪,刘艳华 (217)

## 第五篇 热泵、能量综合利用与新型制冷装置

- 基于热气机的热电冷三联供方案比较与分析 ..... 孔祥强,王如竹,黄兴华 (223)
- 热声热机工作机理的热力学分析 ..... 孙大明,邱利民 (228)
- 混合工质热物性对热声制冷影响的研究 ..... 欧阳录春,邱利民,蒋珍华,李祥成 (232)
- 太阳能辅助热泵系统的研究背景及样机开发实例 ..... 旷玉辉,王如竹 (237)
- 地源热泵运行特性的实验研究 ..... 王景刚,马一太 (243)
- 燃气机热泵技术及能源利用分析 ..... 孙志高,孙文哲,王如竹 (248)
- 热电热泵干衣机的研制与性能分析 ..... 王静伟,汤广发,罗清海 (252)
- 天然气发动机驱动制冷机组中发动机的能量平衡 ..... 许鹰,秦朝葵,任家龙,徐吉浣 (255)
- 天然气发动机驱动制冷机组的能量调节实验研究 ..... 任家龙,秦朝葵,许鹰,徐吉浣 (260)
- 冷库制冷装置的余热利用 ..... 沈学明 (266)

## 第六篇 其他

- 冷藏条件下锦绣黄桃主动气调包装研究 ..... 刘颖,李云飞,王如竹,田平海 (273)
- 导热塑料盘管与钢盘管的比较 ..... 周伟坤,周俊凯,陈国邦 (279)
- 边缘提取技术在霜层厚度测量中的应用 ..... 李春林,李俊明,王补宣 (282)
- 新型制冷机氨冷凝器性能研究及工业应用 ..... 王学生,王如竹 (286)
- 分离式热管在空调系统中的应用现状及前景分析 ..... 任华华,冯圣红 (292)
- 汽车空调用变排量压缩机特性的试验研究 ..... 田长青,杨新江,窦春鹏,李先庭 (298)
- 联合式除湿机的研究 ..... 朱培根,朱志平 (304)
- 空调列车运行时围护结构传入热量的研究 ..... 陈焕新,杨培志,黄素逸 (310)

制冷空调技术的研究与发展

## 第一篇

# 制冷空调技术前沿问题



1948

# LNG 汽车空调器的研究与发展

厉彦忠 陈曦 王强

西安交通大学制冷与低温工程系,西安,710049

Tel:029-2668725,E-mail:yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn

**摘要** 液化天然气(LNG)作为汽车燃料可以降低汽车尾气排放,同时,LNG蕴藏着大量的冷能,回收该冷能并可用作汽车空调制冷。本文论证了LNG冷量回收用于汽车空调的可行性,提出并设计了回收利用冷能的汽车空调系统,设计了低温多级热交换系统及以环保制冷剂乙二醇为载体的蓄冷系统。对影响系统性能的参数进行了实验研究,液氮模拟实验结果显示该系统具有较好的瞬态和稳态性能,实现了低温工况下的大温差换热以及冷量随汽车冷负荷自动调节功能。冷量回收率达到80%以上,可满足汽车空调的冷量需求,替代常规的空调制冷系统,既节省了汽车的运行费用,又杜绝了制冷剂泄漏所造成的环境破坏。LNG汽车空调系统的研究和实际运用对于节能和环保具有重大的意义。

**关键词** LNG 冷能回收 汽车空调

## Research and Development of LNG Auto Air-conditioning

Li YanZhong Chen Xi Wang Qiang

(Xi'an JiaoTong University)

**Abstract** Air pollution caused by auto exhaust gas will decrease when Liquefied Natural Gas (LNG) is used as the auto fuel. Moreover, LNG has plenty of cold energy, which can be used as cold source for vehicle refrigeration. A method to recover and utilize the cold energy of LNG in auto air-conditioning was proposed and its feasibility has been proved in the experiment. The results of simulative experiment of Liquefied Nitrogen ( $LN_2$ ) show that the system has good performance for both transient state and steady state. The recovering efficiency of the cold energy is above 80% and the cold energy recovered can sufficiently meet the cold load of automobile air-conditioning. The auto air conditioning system, instead of a conventional refrigerating system, is economy in operation and also completely eliminates ozonosphere depletion caused by the leakage of CFCs. The new auto air-conditioning system proposed in this paper is significant to both energy saving and environment protection.

**Keywords** LNG Cold energy recovery Auto air-conditioning

### 0 前言

全球性不断加剧的环境污染以及石油资源的紧缺,使得污染小、燃烧性能好、储量丰富的天然

气的应用越来越广泛。我国的天然气资源较为丰富,特别是西部地区。目前正在施行的西气东输工程也正是为了改变我国的能源结构。另外,过度使用石油产品导致了大气污染的日益严重。储量丰富的天然气用作汽车燃料是改善能源消费结

构、保护环境、实现可持续发展的重要战略步骤。

为了便于天然气的储藏运输,通常将其干燥脱酸处理后,降温液化成 LNG。LNG 工业近几年的发展非常迅速,世界 LNG 的生产应用以年均 20% 的速度增长,年运输与贸易额达 6 000 多万吨,占到了总贸易额的 24%,预计 2010 年 LNG 年产量将达到 2 400 亿立方米<sup>[1]</sup>。目前,用作汽车燃料的天然气大多是以压缩天然气(CNG)的形式存储。将天然气在常态下压缩并存储在 20MPa 以上的高压罐内,因而储罐体积较大、安全性能差、车载重、一次行驶里程短、充气时间较长,这很大程度上制约了天然气汽车的发展;从实用效果上看,液化天然气(LNG)汽车弥补了 CNG 汽车的许多不足,它以液态存储的方式代替压缩存储,因而存储体积大大减小,且能量密度大,一次充注行驶里程长,是一种更具发展优势的汽车燃料<sup>[2, 3]</sup>。世界许多国家和地方当局都为推行使用 LNG 燃料采取扶持政策,美国政府已向福特公司、库尔威公司和通用公司提供资助,用以研制 LNGV;日本和俄罗斯也分别制定了用 LNG 作汽车燃料的综合计划和一系列地方计划<sup>[4]</sup>。这些都为 LNGV 的发展创造了良好的条件,对汽车工业的发展、环境保护具有重大的现实意义。

我国西部天然气储量十分丰富,迄今为止已探明川渝、陕甘宁、新疆、青海四大气区累计天然气地质总储量达 15000 亿立方米。由于受气田区域限制,目前用气范围较小,因而气体的开采量还十分有限。西北地区的天然气产气压力高(约 15MPa)、储量大,可利用天然气的自身压力通过先进的膨胀制冷技术使天然气液化,因而具有较低的液化成本。同时我国也正在东南沿海地区建立液化天然气的接收站,为我国大量进口 LNG 做准备<sup>[5]</sup>。这为我国 LNG 生产和使用提供了良好的外部环境条件。

城市污染问题在我国已非常严重,为了缓解这种状况,许多城市都采取了相应的措施,如北京市在 2002 年已有部分公交车辆开始使用 LNGV。目前,我国的汽车保有量较之发达国家还较少,但随着经济的发展和加入 WTO,我国的汽车工业将极有发展潜力,考虑到可持续发展、环境保护及能源结构多样化的需要,我国汽车工业应该紧跟世界前沿技术。相信随着 LNG 生产技术的进步,充灌、计量等配套设施的逐步完善,低温液体储运技术的发展,LNGV 在我国将有着广阔的发展前景<sup>[6]</sup>。

LNG 存储在 110K 的低温下,当其汽化成为常温气体供给发动机的过程中会释放出大量的冷能(860~883kJ/kg)。迄今为止,国际上关于 LNG 汽车冷量利用的研究还十分有限,我国尚在起步阶段。资料表明,德国已开发出利用 LNG 冷量的冷藏运输汽车,一些国家也在研究探索回收冷量的其他途径。西安交大近四年来开始研究用于小型轿车和用作大卡车驾驶室的汽车空调系统。利用 LNG 冷量的汽车空调器可以替代现有的压缩制冷装置,既节约了设备制造成本,又解决了因制冷剂泄漏造成的臭氧层破坏,成为一种真正的绿色环保汽车<sup>[7]</sup>。本文以小型轿车为对象进行了系统的分析和试验研究。为综合利用 LNG 能量开辟新的途径。

## 1 LNG 冷量回收汽车空调可行性分析

### 1.1 汽车空调冷负荷与 LNG 冷量的匹配分析

LNG 是低温组分液体混合物,其主要成分是甲烷( $\text{CH}_4$ ),体积通常占到 90% 以上。对于时速在 80~120km/h 的小型轿车,其 100km 耗油量一般为 10L 汽油,25℃ 时,汽油的密度  $\rho=0.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,燃烧值为 43100kJ/kg;同样条件下,LNG 的燃烧值为 46100kJ/kg,则 100km 的 LNG 的耗量为

$$G = (43100 \times 10 \times 0.9) / 46100 = 8.42(\text{kg})$$

一个大气压下,LNG 的汽化潜热为 515.43kJ/kg,假设汽化后复温到 5℃,则回收的冷量包括潜热和显热,根据上述冷量焓的分析可得,理论上每千克液化天然气可回收的 LNG 最大冷量为

$$q_{\max} = r + c_p \Delta T = 515.43 + 2.14 \times (278 - 110) = 874(\text{kJ})$$

每小时消耗 8.42kg 所能回收的 LNG 最大冷量为

$$W = \frac{Q_{\max}}{3600} = \frac{Gq_{\max}}{3600} = \frac{7359}{3600} = 2.04(\text{kW})$$

考虑到实际回收的效果,假定系统冷量回收率为 90%,则该 LNG 冷量回收系统的制冷量为

$$W = 2.04 \times 90\% = 1.85(\text{kW})$$

现在通常认为:理想的车内温度夏季为 22~27℃,冬季为 25~30℃,相对湿度为 45%~50% 时,人体感觉舒适。各型汽车的空调冷负荷大小

由我国岳阳制冷设备总厂的推荐以供参考,如表1所示。

表1 各型汽车的空调冷负荷

车型及座位状况	功率大小(P)
中型客车(40座左右)	18.6~21kW
3吨旅行车(20~25座左右)	11.6kW
1吨旅行车(9座以下)	7kW
大型货车,工程车驾驶室	2.5~4.5kW
轿车,普及型	1.5~4.5kW

由表1可以看出,将小轿车所需冷量取为1.5~2kW,则LNG冷量回收系统比较适合于这种小冷负荷的小轿车空调系统。

## 1.2 启、停及变工况问题

(1) 启动:指汽车发动机和冷量回收系统的启动过程,此时空调制冷系统开始对车内环境冷却降温,降温速度与降温过程与系统设计有关,也与系统的蓄冷能力大小有关,同时需要考虑冷量回收系统与发动机供气系统协调工作问题。

(2) 停车:指汽车发动机停止工作,冷量回收系统停止供冷,但汽车空调系统的蓄冷器会继续向车内提供冷量,随着冷量的逐步减小,车厢内缓慢趋于常温。

(3) 变工况:当汽车处于加速与减速、爬坡与下山、高速运行与缓慢行驶等不同的运行工况时,消耗气量不同,产生的冷量就不同,而汽车内对冷负荷需求情况各异,有时也需要人为地增大与减小制冷量,因此发动机变工况行驶和汽车空调变工况运行需要协调。

## 1.3 LNG冷量回收系统需要解决的关键问题

LNG冷量回收系统需要解决以下几个关键性问题。其一,必须使冷量回收与天然气的供气结合起来,即必须在满足对汽车发动机供气的基础上进行冷量回收;其二,必须解决大温差换热,要保证系统的不冻结性,必须实现从低温循环到制冷循环的转变;其三,必须解决冷量回收与冷量需求间的自动调节。这三个问题在文中设计的系统中都得到了比较圆满的解决。

## 2 LNG冷量回收系统的实施方案

### 2.1 用于冷藏车

目前,世界上首台LNG冷藏车首先由德国梅赛尔公司(Messer AG)制造完成,并于1997年底在德国REWE零售连锁店投入使用。这种冷藏车经过1998年一个夏天的运输检验,以其稳定的运行工况、良好的冷藏效果以及轻污染的环境优势,得到了科隆地区政府的认可<sup>[6]</sup>。其设计系统如图1所示。

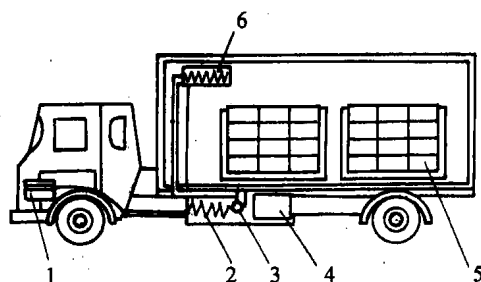


图1 LNG冷量回收用于汽车冷藏运输

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—热交换器

### 2.2 用于汽车空调

本文的研究工作是将LNG的冷量回收用于汽车空调,由于LNG的温度为111K,而要进入发动机中燃烧使用则天然气的温度必须复温到10~40℃,如果直接加热,温差将达到170~200℃。如此大的传热温差一方面对加热工质要求高,换热器的烟损失也非常大,而且换热器的设计制造将会很困难。通过对LNG的冷量特性分析,并考虑最大限度的回收冷量,以满足汽车空调的使用要求,考虑将换热分为两级实现,将传热的温差缩小,使其控制在100℃以内,这样有利于保证系统的可行性和可靠性。基于以上的构想,提出如图2的LNG冷量回收系统。

在图2中,为了实现110K的LNG从低温温度向空调温度的过渡,并且尽量减小冷量损失,本系统采用了两个循环,一个是天然气多次自增压、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的作用就是将天然气冷量传递给乙二醇,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。

在天然气的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,盘管内循环流动的天然气加热低温储罐内的LNG而获得冷量,继而冷却乙二醇。这样避免了LNG与乙二醇的直接换热,降低了传热温差,减小了烟损失,也避免了乙二醇冻结而堵塞换热器流道。

在乙二醇载冷蓄冷循环中,乙二醇溶液通过主换热器4获取冷量。乙二醇是一种无色、无味、不腐蚀、无污染、化学性质稳定且价格便宜的“绿色”载冷剂,采用浓度为60%的乙二醇溶液,其凝固点低于 $-30^{\circ}\text{C}$ ,且具有较大的比热容,因而是一种最佳的载冷剂。乙二醇蓄冷箱5具有蓄冷功能,当冷量有富裕时,多余的冷量储存在乙二醇蓄冷箱5内,而在高热负荷时补充利用,这样解决了冷量需求与天然气耗量之间不匹配的问题,也实现了变负荷空调制冷的工况要求。

为了提高冷量利用率,需要尽量使得冷量回收系统的冷量匹配均匀、温度分布最佳,对于主换热器4,设计了四股天然气和一股乙二醇换热,四股天然气的进出口温度保持一致,对此五股互不混合的流体换热,采用了板翅式换热器。板翅式换热器具有结构紧凑、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质量。

### 3 LNG汽车空调系统实验结果分析

在理论分析基础上,设计制造了LNG冷量回收系统,采用液氮进行模拟实验,实验环境温度在 $26\sim 36^{\circ}\text{C}$ 之间,实验内容包括系统的整体性能和局部性能,测试汽车空调的瞬态性能、稳态性能、蓄冷性能以及怠速、停车时的供冷情况。

#### 3.1 启动工况

实验对环境温度为 $30^{\circ}\text{C}$ 、氮气体积流量为 $8.5\text{m}^3/\text{h}$ 、乙二醇流量为 $100\text{L}/\text{h}$ 时,系统各点参数随时间的变化进行了测试,以模拟汽车启动时的瞬态性能。冷量回收系统启动后,板翅式换热器氮气进出口平均温度随时间的变化如图3所示。

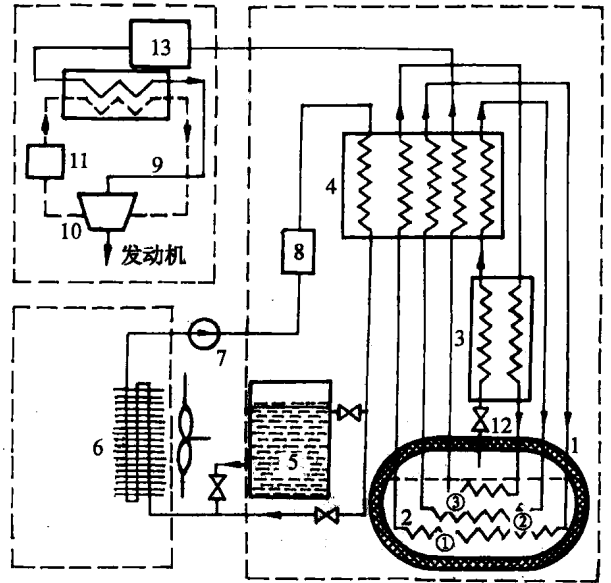


图2 LNG冷量回收系统

- 1-液化天然气杜瓦;2-盘管换热器;3-套管换热器;4-板翅式换热器;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

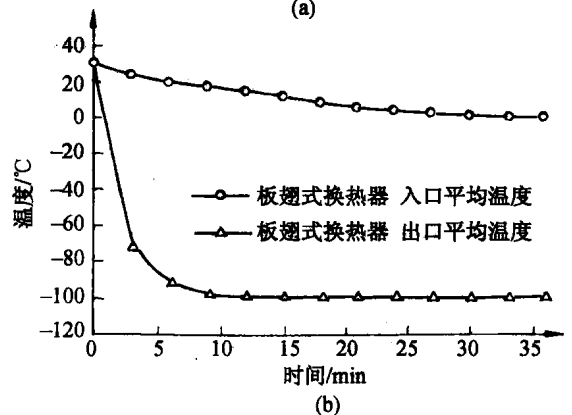
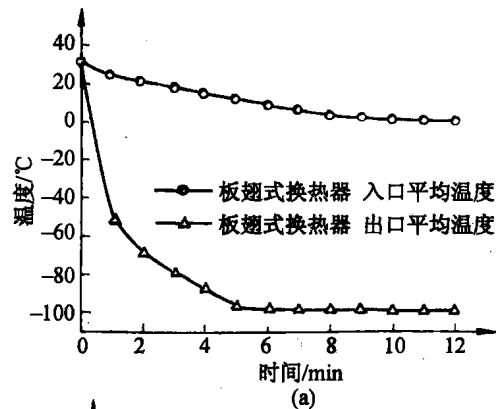


图3 板翅式换热器氮气进出口平均温度随时间变化情况  
(a) 无蓄冷;(b) 有蓄冷

从图 3 可以看出,在无蓄冷时,入口温度下降很快,经过 5min 左右,入口温度由环境温度 30℃ 下降到大约 -98℃ 左右,并保持稳定;在有蓄冷时,大约需要 8min 达到稳定值 -98℃。在不蓄冷的情况下,10min 后氮气出口平均温度达到了稳定值 0℃ 左右;在有蓄冷的情况下,需要 33min 氮气出口平均温度才达到稳定值 0℃。这是因为有蓄冷的情况下,蓄冷箱内的乙二醇参与换热,乙二醇入口温度下降缓慢,直接影响着板翅式换热器中氮气的出口温度,使得系统温度下降的响应速度变慢。另外,板翅式换热器自身的热容存在也直接影响到换热器进出口气体温度的瞬态响应时间。

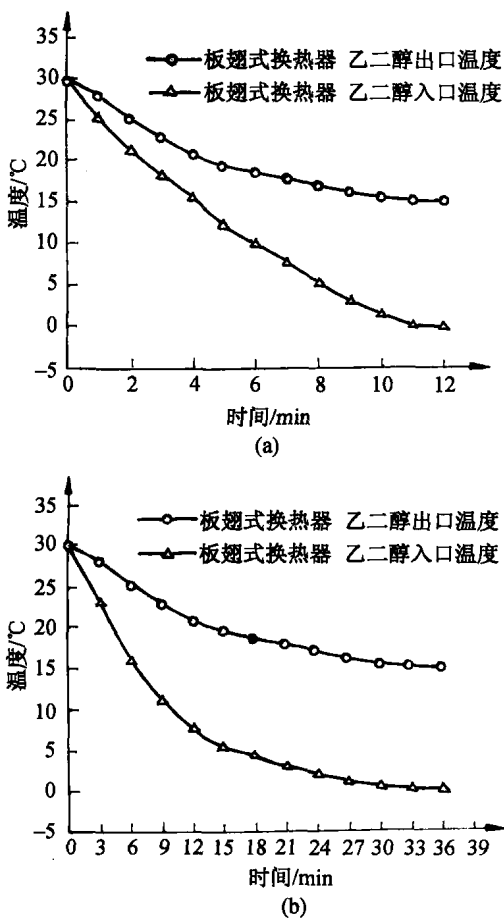


图 4 板翅式换热器中乙二醇进出口温度随时间变化情况  
(a) 无蓄冷; (b) 有蓄冷

图 4 表示出板翅式换热器中乙二醇进出口温度随时间的变化曲线,可以看出,乙二醇的进出口温度随着系统启动后不断下降,且出口温度比入口温度下降速度快,入口温度和出口温度间的温差由 0℃ 逐渐增大,最后达到稳定状态,乙二醇进出口温度保持恒定,其温差达到最大值约 15℃。对比图 4 中的(a)和(b)可以看出,在无蓄冷时,乙二醇进出口温度随时间变化较快,启动系统

10min 后,进出口温度基本达到稳定,入口温度由 30℃ 下降到 15℃ 左右,出口温度由 30℃ 下降到 0℃ 左右;在有蓄冷时,乙二醇进出口温度随时间的响应明显变慢,进出口温度需要 30min 以后才可以达到稳定状态。这是由于启动时乙二醇流经制冷剂储槽再经泵送入空气换热器,蓄冷器中的乙二醇吸收大量的冷量,使得降温过程有很大的滞后性,从而延缓了降温过程。

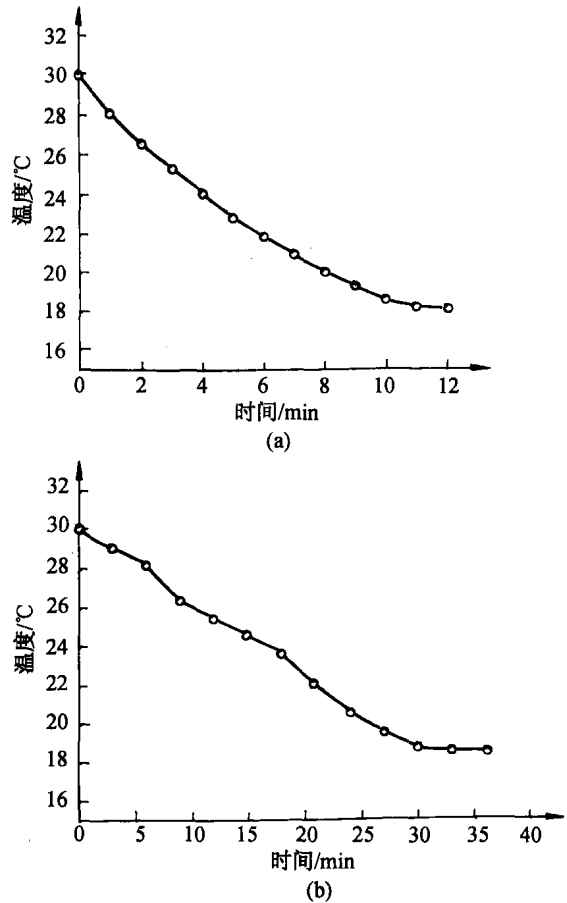


图 5 风冷器吹风出口温度随时间变化情况  
(a) 无蓄冷; (b) 有蓄冷

启动过程中,风冷器吹风温度随时间的变化如图 5 所示。空气经过换热器后被乙二醇所冷却,出口风温随时间在不断下降,风冷器的制冷量也随之不断增大。由图 5(a)可看到,在不蓄冷时,系统运行 10min 以后基本达到稳定,送风温度由 30℃ 下降到最低 18℃ 左右,此时制冷量也达到最大值。而在有蓄冷的情况下(图 5(b)),风冷器的送风温度下降较慢,一般需要 30min 才达到稳定送风温度,对于刚启动的汽车内空气温降是不利的,因而在汽车刚启动时不宜使用蓄冷功能。

### 3.2 停车工况

为了模拟汽车停车后的制冷情况,在图 6 中,

分别就有蓄冷和无蓄冷两种情况,分析了在冷量回收系统停止运行后的风温变化。

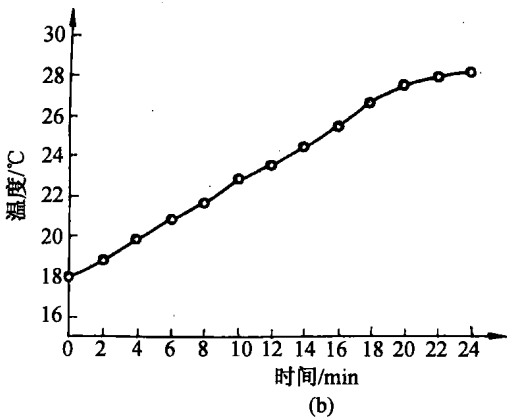
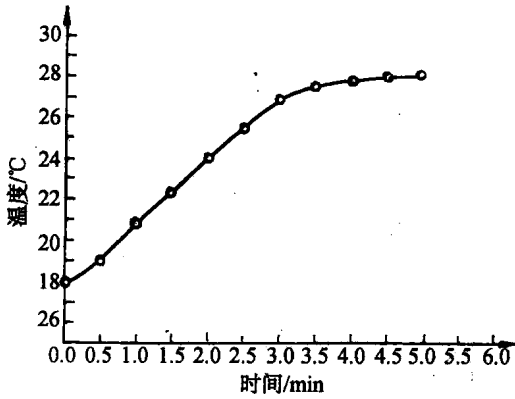


图6 停止供冷后风冷器空气出口温度随时间变化  
(a) 无蓄冷;(b) 有蓄冷

汽车停车后,不再消耗 LNG,也不会有冷量继续提供,此时的冷量全部来自于系统自身各部件的储备。由图 6(a)和(b)对比分析可以看出,在无蓄冷的情况下,风温在 5min 内就迅速升高到 28°C;而在有完全蓄冷的情况下,风温提升也较缓慢,大约需要 25min 才升高到 28°C。这就是乙二醇蓄冷功能的重要优势。在短期的停车后,蓄存的冷量仍可以满足汽车空调的制冷需求,短期停车后再次启动时,系统不至于由于停车造成的温升过快,造成启动时系统温度的过大波动,有利于保持系统的稳态过程。

### 3.3 稳态性能分析

系统的稳态性能分析主要考虑 LNG 流量、乙二醇流量以及环境温度、系统压力的变化对系统温度、压损以及冷量回收效率的影响。在液氮模拟实验中,测定了乙二醇进出口温度及风温随氮气流量变化和乙二醇流量变化情况,同时也测定了不同条件下的流动阻力。

由图 7 可以看出,随着氮气流量的增大,板翅式换热器中乙二醇进出口温度都逐渐降低,且进

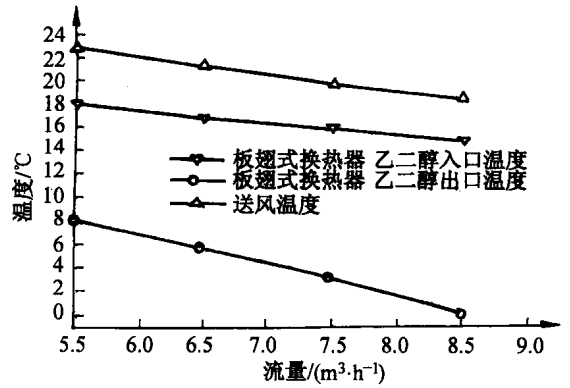


图7 乙二醇进出口温度及风温随氮气流量变化

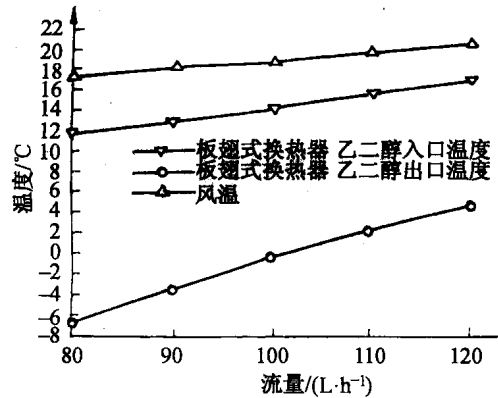


图8 乙二醇进出口温度及风温随乙二醇流量变化

出口温差逐渐增大,而且风温连续降低。因为氮气流量增大,意味着可回收的冷量增大,当乙二醇流量不变时,进出口温度降低。而在不同的乙二醇流量条件下,其进出口温度及风温也大不相同。由图 8 可以看出,随着乙二醇流量的增大,乙二醇进出口温度不断提高,出口温度提高得更快,因而进出口温差降低。由于风冷器内的乙二醇温度升高,送风温度也随着升高,但温升的幅度较小。

在系统稳定运行时,对乙二醇溶液的流量和温度有三个方面的要求:①满足低温送风;②保证风冷器表面不出现严重结霜;③乙二醇不能在板翅式换热器内被冻结。计算确定,对于一定的回收冷量,存在一个最佳乙二醇流量值,对于本实验系统来说,最佳值近似为 100L/h。

氮气流量变化对压损的影响如图 9 所示。可以看出,随着氮气流量的增大,其流动总压力损失也相应地增加,因为氮气流量增大,流速增大,流动阻力相应增大。气体的压损大小决定了低温储罐应有的压力,为了降低系统压力就需要尽力减小气体侧的流动阻力。板翅式换热器中乙二醇的压损随其流量变化关系如图 10 所示。随着乙二醇流量的增大,其压力损失也相应的增加。其原因如同氮气通道的分析。

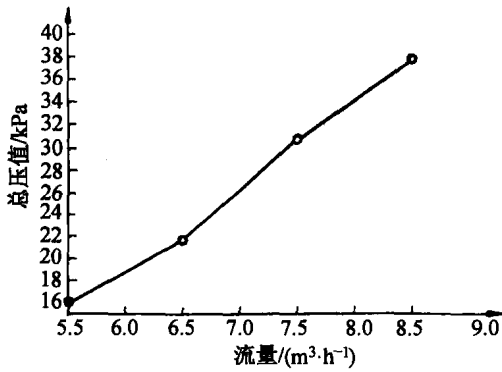


图9 气侧总压损随氮气流量变化关系

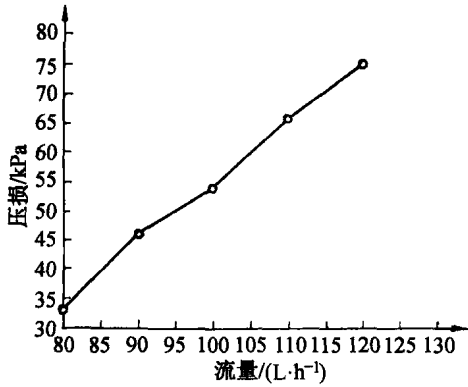


图10 板翅式换热器中乙二醇的压损随其流量变化

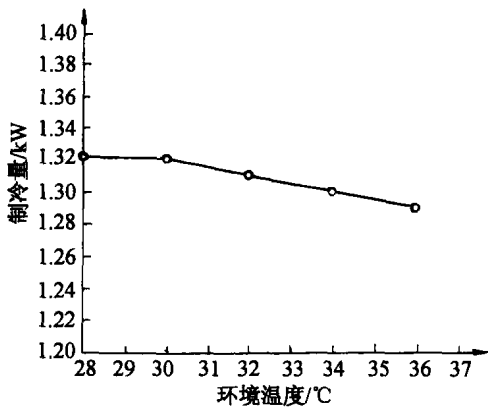


图11 稳态工况下环境温度对制冷量的影响

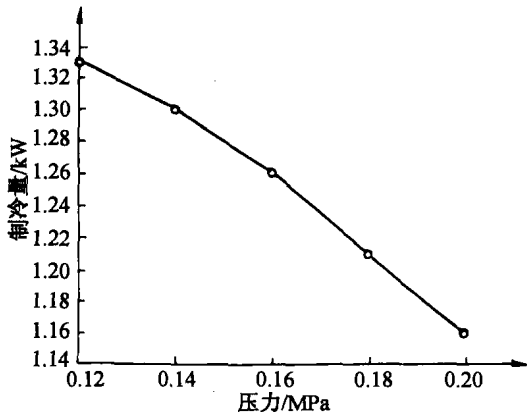


图12 稳态工况下系统压力对制冷量的影响

由图 11 可以看出,随着环境温度的升高,系统的制冷量相应会有少量下降,这是因为,一方面较高的环境温度和回收系统中的温度形成更大的温差,将有更多的冷量可以释放出来,这对汽车空调有利;另一方面,随着环境温度的升高,系统的冷损也不断增大,冷损的大小与系统保冷措施有关。针对实验情况而言,实际回收的冷量有一定的下降,但并不明显。

稳态工况下系统压力对制冷量的影响如图 12 所示。可以看出,随着系统的压力逐渐增大,系统的制冷量在下降。根据前面分析可知,压力提高,汽化温度提高,液氮的汽化潜热和显热都下降,可回收的制冷量就减小。可见系统压力的提高对于冷量回收是不利的。因而需要尽力降低系统压力,降低气体的流动压损。

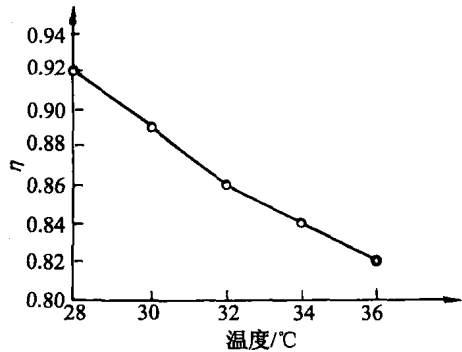


图13 不同环境温度下系统冷量回收率

图 13 示出了环境温度对系统冷量回收率的影响关系。可以看出,随着环境温度的升高,系统冷量回收率下降,环境温度由 28°C 升到 36°C 时,冷量回收率由 91.5% 下降到 81.7%,即环境温度上升 8°C,则冷量回收率下降 10%。因为环境温度越高,冷损越大,空调系统所需要的冷量也越大,冷量回收率的下降对于汽车空调的制冷是十分不利的。因而在系统的设计中需要考虑环境温度对系统制冷量的影响,尽力减小管路及换热器系统对环境的冷量散失。

## 4 发展与展望

本文对用作汽车燃料的 LNG 冷量回收进行了系统的研究,并进行了液氮模拟试验。模拟试验结果表明,LNG 的冷量回收效果较好,其制冷能力可以满足小型汽车空调冷负荷要求。这对于燃用 LNG 的交通工具来说,提供了一种新的冷量利用思路。对于回收 LNG 冷量全面研究具有极大的指导意义。



本冷量回收系统可以应用的领域包括小轿车空调,大货车驾驶室空调,大客车的车载冰箱及冷柜等,具有极大的市场价值。以上海市为例,全市有公交车 1.85 万辆,出租汽车 4.7 万辆,轿车超过 10 万辆,货物运输车 5 000 辆。在这些车辆中只要有 10% 采用 LNG 燃料,则可进行的冷量回收都是很可观的。

随着城市污染治理的加强,环保和节能将得到更进一步的重视,北京市的部分公交车已开始使用 LNG 燃料。相信会向更多的大城市推广,对于使用 LNG 燃料的交通工具,其冷量回收的应用将具有极大的价值。

## 参考文献

[1] Kuwahara N. Liquefied natural gas supply optimization[J]. Energy Conversion & Management, 2000,

(41):153—161

[2] 张笑波,林在犁. 液化天然气汽车的开发与应用[J]. 汽车研究与开发,2001,(3):10—13

[3] 徐文渊. 液化石油气(LPG),压缩天然气(CNG),液化天然气(LNG)作汽车燃料的现状和发展[J]. 石油与天然气化工,1995,24(3):163—167

[4] Liu H. You L. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas[J]. Energy Conversion & Management, 1999, (40): 1515—1525

[5] 顾安忠等. 液化天然气应用的基础研究[J]. 深冷技术,2001,(2):5—8

[6] 陈曦,厉彦忠,王强. 液化天然气汽车(LNGV)的发展优势[J]. 低温与超导,2002,30(4):44—48

[7] 王强,厉彦忠,陈曦. 液化天然气(LNG)冷量焓特性及在汽车空调中的回收利用. 西安交通大学报[J], 2003,37(3):294—297