

综合气候环境试验室载冷剂方案选择研究

刘坤, 张保军, 岳磊, 侯宇翔, 马东利, 王腾浩

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: **目的** 为综合气候环境试验室集中冷源选择适用、合理的载冷剂方案。**方法** 通过对试验室制冷需求进行分析, 制定试验室制冷系统方案。对载冷剂运行原理进行分析, 得到综合气候环境试验室载冷剂使用工况和需要考虑的因素。最后综合分析和对比常用载冷剂的物性参数, 总结出适用于综合气候环境试验室集中冷源的载冷剂方案。**结果** 中温机组的载冷剂选择 Dynalene HC-50。**结论** 选择的载冷剂适用于综合气候环境试验室集中冷源载冷剂系统的使用工况, 方案合理。

关键词: 综合气候环境试验室; 集中冷源; 载冷剂

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.017

中图分类号: TJ07; TB61⁺2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0105-06

Research on the Selection of Refrigerants Used in Combined Climatic Environmental Chambers

LIU Kun, ZHANG Bao-jun, YUE Lei, GOU Yu-xiang, MA Dong-li, WANG Teng-hao
(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: **Objective** To select applicative and reasonable refrigerants for the cooling plant centre of combined climatic environmental chambers. **Methods** The scheme of refrigerating system was proposed based on the analysis on refrigerating requirements of the laboratory. And the use condition and the factors to be considered of the refrigerants of the chambers was confirmed based on the analysis on the operation principle of refrigerants. Then the scheme of the refrigerants used in combined climatic environmental chambers was summarized based on the analysis and comparison of the physical parameters of common-used refrigerants. **Results** Dynalene HC-50 was selected as the refrigerant for the mid-temperature refrigerating system. **Conclusion** The refrigerant selected is applicable for the refrigerant system of cooling plant centre of the combined climatic environmental chambers, and the scheme is reasonable.

KEY WORDS: combined climatic environmental chambers; cooling plant centre; refrigerants

随着我国武器装备的快速发展, 各军工行业对地面车辆的需求迫切, 不同功能、不同任务需求的地面车辆大量研制, 武器装备的研制周期明显缩短, 装备环境适应性和可靠性越来越高, 气候环境

模拟试验的应用越来越广泛, 在武器研制过程中的地位也越来越高^[1]。环境模拟试验是考核产品耐环境能力的主要手段, 通过选择和设置一些环境条件, 尽可能真实地再现产品在任务环境中的一些环

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-07-15

Received: 2016-06-15; Revised: 2016-07-15

作者简介: 刘坤(1987—), 男, 山东枣庄人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特种车辆环境试验和环境模拟试验技术。

Biography: LIU Kun(1987—), Male, from Zaozhuang, Shandong, Master, Engineer, Research focus: special vehicle climate environment test and environmental simulation test technique.

境因素及使用方式,从而确定产品能否在预期使用环境中能够有效可靠的工作,最终确定产品的环境适应能力^[2]。

近几年,随着各种新型装备的研制,航天、兵器、总后等多家单位先后建成了环境模拟试验室,民用汽车领域也建设了很多小型环境模拟试验舱和环境模拟试验室^[3]。因此为考核地面车辆和装备而建立能够模拟低温、高温、湿热、高原、降水、降雪、砂尘等多种环境因素的综合气候环境试验室。整个试验室由集中冷源供应试验室降温所需的冷量,并由载冷剂系统进行输送,文中即讨论适用于综合气候环境试验室的载冷剂方案。

1 试验室制冷需求分析

综合气候环境试验室由四个互相独立的环境模拟单元组成,可以进行大型武器装备、地面车辆和工程机械在综合环境下的静态和动态试验。四个单元包括高原环境模拟试验单元、综合环境模拟试验单元、砂尘模拟试验单元、降水模拟试验单元。其中高原环境模拟试验单元可以进行高温、低温环境下车辆动态加载试验,其环境温度范围为-45~70℃;综合环境模拟试验单元可以进行高温、低温、湿热、太阳辐射条件下的车辆静态贮存和工作试验,其环境温度范围为-60~70℃;砂尘模拟试验单元可以进行吹砂、吹尘试验,其环境温度范围为20~70℃;降水模拟试验单元可以进行降雨、降雪、结冰、冻雨试验,其环境温度范围为-20~70℃。四个单元相互独立,共用一套制冷系统作为集中冷源^[4]。

因文中主要对制冷系统进行分析,这里只关注各试验单元低温极值。为适应不同试验单元不同温度范围的制冷需要,将各单元试验温度范围划分为常温段(20~-70℃)、中温段(-45~20℃)和低温段(-60~-45℃),三个温度段分别配备制冷系统提供冷源。

2 制冷系统方案的制定

2.1 制冷系统方案

综合气候环境试验室的试验温度范围为-60~70℃,试验温度范围宽,且四个试验单元试验温

度范围不同,不同试验工况对制冷系统负荷的需求相差很大,考虑到仅有综合环境模拟试验单元的试验温度范围覆盖低温段,且试验频次较低,如果选择一套制冷机组同时覆盖低温段和中温段,对制冷机组的要求很高。复叠制冷系统转为超低温制冷需求设计,低温和高温两个制冷循环可以保证系统长期高效稳定运行^[5];双级制冷系统应用于低温制冷工况,特别是-55~-40℃蒸发温度段,具有较大优势,比复叠制冷系统简洁易于控制,占地面积小,比单级系统制冷效率高,运行成本低。因此选择采用一套复叠制冷机组和一套双级制冷机组分别用于低温段和中温段^[6]。

其中复叠制冷机组高温级制冷剂选择 R507,低温级制冷剂选择 R23,制冷压缩机选择螺杆压缩机,R23 低温时饱和压力较高,R507 高温时饱和压力低。这两种制冷剂配组组成复叠系统,能使低温和高温两个制冷循环运行于合适的工作条件,冷凝压力/蒸发压力比适中,保证系统能长期高效稳定提供低温制冷能力。双级制冷机组制冷剂选择 R507^[7],制冷压缩机选择螺杆压缩机^[8]。复叠制冷机组用于综合环境模拟试验单元进行低温试验时,冷却循环空气,试验环境温度最低为-60℃。双极制冷机组用于高原环境模拟试验单元、综合环境模拟试验单元进行低温试验时,冷却循环空气,试验环境温度最低为-45℃;同时用于淋雨模拟试验单元进行结冰、冻雨试验时,冷却循环空气,试验环境温度最低为-20℃。

在确定了制冷机组的选择方案后,需要考虑制冷机组的制冷方式,常见的制冷方式包括直接制冷和间接制冷两种。直接制冷方式下,制冷剂通过位于循环风道内的蒸发器直接冷却循环风,达到降低试验间内温度的目的;间接制冷则是通过载冷剂系统与制冷剂进行换热,输送冷量至循环风道内的换热器与循环风进行换热,达到间接降低试验间内温度的目的^[9-10]。在高原环境模拟试验单元中,配备有转鼓测功机和履带测功机,可以进行最大 1200 kW 轮式、履带车辆的全负荷加载试验。在综合环境模拟试验单元和淋雨模拟试验单元中也会进行怠速或空载高转速工作试验,这要求制冷系统具备较快的冷量调节能力,以处理试验中迅速产生的热负荷对环境温度的影响,同时还要保证环境试验中对温度均匀性的严格要求。如果使用直接制冷对空气进行冷却,无

法满足短时间内试验间热负荷增加带来的冷量需求，且蒸发器面积过大导致的温度不均匀，会直接影响到试验室内温度的均匀性，因此中温段制冷机组采用载冷剂系统可以实现对冷量的蓄冷，易于实现温度控制^[11—12]。

低温段制冷机组主要用于综合环境模拟试验单元进行低温贮存试验时的制冷需求。进行低温贮存试验时，被试件处于关机状态，本身不产生热负荷，对环境温度影响很小，因此低温段制冷机组可以采用直接制冷或间接制冷的方式，选择何种制冷方式主要取决于载冷剂的选择。

2.2 载冷剂运行原理分析

载冷剂系统运行的原理如图 1 所示，载冷剂管道连接主制冷系统出入口和空气热交换器，形成载冷剂二次回路，二次回路中载冷剂通过载冷剂换热器与制冷系统一次回路中的制冷剂进行换热，通过比例调节阀实现载冷剂定流量，变温度控制，保证试验间内环境温度稳定下降。管道加热器用于加热二次回路中载冷剂，用于高温、高湿试验或平衡低温试验时环境温度。这就要求载冷剂可以满足低温段和中温段制冷需求的同时满足高温试验加热的需求。

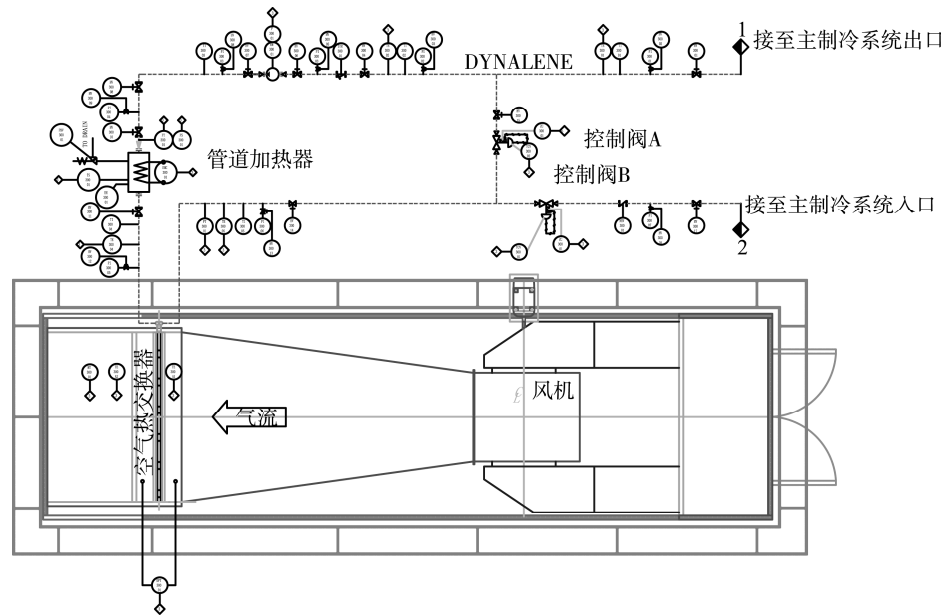


图 1 载冷剂系统运行原理
Fig.1 The principle diagram of refrigerants system

3 载冷剂的选择

3.1 考虑的因素

根据综合气候环境试验室制冷系统设计方案和制冷方式，需选择两种载冷剂分别用于低温段复叠制冷系统和中温段双级制冷系统。用于环境试验室的载冷剂系统不同于工业用制冷系统载冷剂，需考虑以下因素^[13—15]。

1) 综合气候环境试验室各单元均需要进行被试车辆的怠速或高转速空载工作试验，特别是高原环境模拟试验单元需要进行全负荷加载试验。被试车辆排烟口温度高达 600~800℃，且尾气中伴随明火，因此载冷剂需考虑可燃性，选择高闪点或无闪点型。

2) 环境试验室内因试验需要常有试验测试人员进出，为保证人员安全，载冷剂应选择安全、无毒或微毒型。

3) 载冷剂物性参数对载冷剂泵和空气换热器的设计选型影响很大，定压比热大、运动黏度小、导热系数大的载冷剂有利于载冷剂泵和空气换热器的经济选型，降低购置成本和运行成本。

4) 根据制冷系统和气流组织设计要求，在进行低温试验时，载冷剂出液温度应比循环风出风温度低 5℃，循环风出口温度比设计环境温度低 5℃，因此用于低温段的载冷剂冰点应低于-70℃，用于中温段的载冷剂冰点应低于-55℃，才能载冷剂系统正常工作。同理，在进行高温试验时，载冷剂出液温度应高于设计环境温度 10℃，中温段载冷剂既用于中温段制冷，同时用于高温试验升温，

因此中温载冷剂沸点应高于 80 ℃。

3.2 载冷剂的对比

综合载冷剂选择需考虑因素,结合试验室使用现状,确定二氯甲烷、陶氏化学 Dowtherm-J、Dynalene HF-LO 和 Dynalene HC-50 四种载冷剂。各载冷剂使用温度范围见表 1。

表 1 各载冷剂使用温度范围
Table 1 Temperature range of refrigerants

载冷剂名称	使用温度范围/℃	适用范围
二氯甲烷	-70 ~ 40	低温段
Dynalene HC-50	-50 ~ 218	中温段
Dynalene HF-LO	-73 ~ 204	低温段、中温段
陶氏化学 Dowtherm-J	-80 ~ 315	低温段、中温段

由表 1 可知,适用于低温段载冷剂包括二氯甲烷、陶氏化学 Dowtherm-J 和 Dynalene HF-LO;适用于中温段载冷剂包括陶氏化学 Dowtherm-J、Dynalene HF-LO 和 Dynalene HC-50。

由表 2 可知,低温段载冷剂中二氯甲烷无闪点,但遇高浓度氧气混合,强加热下会产生爆炸,且二氯甲烷在高温下易分解为剧毒光气,对试验人员危害较大。二氯甲烷虽不参与高温升温工作,但在高温试验时,低温段空气换热器中存在的二氯甲烷易受热分解。

表 2 各载冷剂闪点、冰点和毒性

Table 2 Flash point/Freezing point and toxicity of refrigerants

载冷剂名称	闪点/℃	冰点/℃	毒性
二氯甲烷	—	-97	高温分解为剧毒光气
Dynalene HC-50	—	<-55	无毒
Dynalene HF-LO	61	<-118	微毒
陶氏化学 Dowtherm-J	57	<-81	微毒

中温段载冷剂应无闪点或高闪点,除 Dynalene HC-50 为水基载冷剂外, Dynalene HF-LO 和陶氏化学 Dowtherm-J 均为油基载冷剂,闪点较低。当遇到高温气体或明火时,如出现载冷剂泄漏,会引起燃烧或爆炸,因此中温段载冷剂应首先考虑 Dynalene HC-50。

由图 2 和图 3 所示,在进行低温段试验时, Dynalene HF-LO 的定压比热比二氯甲烷大 64%。由此可以得出,在同等热负荷条件下, Dynalene

HF-LO 的质量流量可以比二氯甲烷减少约 37%。由于 Dynalene HF-LO 的运动黏度是二氯甲烷的 120 倍,综合质量流量和运动黏度,根据局部阻力和沿程阻力,计算得到 Dynalene HF-LO 载冷剂泵的功率消耗约为二氯甲烷载冷剂泵的 80%,陶氏化学 Dowtherm-J 载冷剂泵的功率消耗约为二氯甲烷载冷剂泵的 30%。

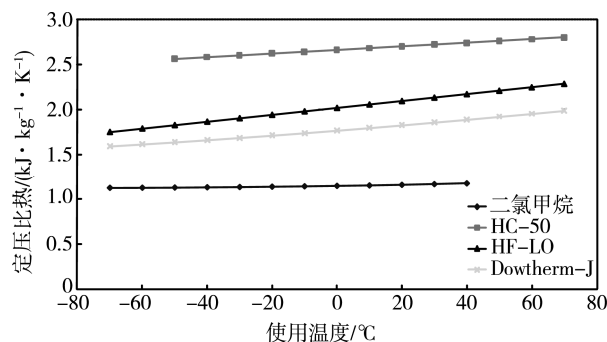


图 2 各载冷剂定压比热曲线对比

Fig.2 The comparison of specific heat at constant pressure curves of refrigerants

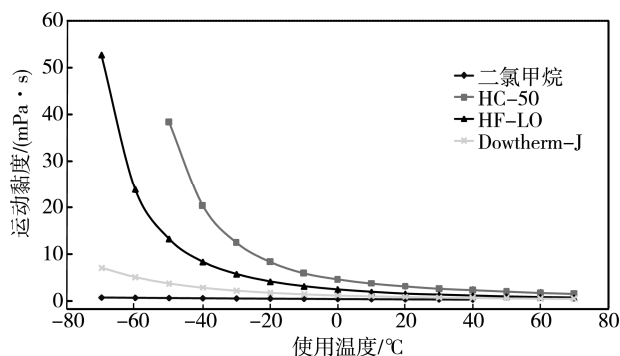


图 3 各载冷剂运动黏度曲线对比

Fig.3 The comparison of kinematic viscosity curves of refrigerants

在进行中温段试验时, Dynalene HC-50 的定压比热比 Dynalene HF-LO 高 20%~30%,同等热负荷条件下, Dynalene HC-50 载冷剂质量流量可以比 Dynalene HF-LO 减少 17%~23%。由于 Dynalene HC-50 的运动黏度比 Dynalene HF-LO 高约 10%~40%,综合质量流量和运动黏度,根据局部阻力和沿程阻力,计算得到 Dynalene HF-LO 载冷剂泵的功率消耗与 Dynalene HC-50 载冷剂泵的功率消耗接近,陶氏化学 Dowtherm-J 载冷剂泵的功率消耗最低。

换热器主要用于载冷剂与试验室内循环空气进行换热,换热器的面积与载冷剂的导热系数之间相关。由图 4 可知, Dynalene HF-LO 的导热系数约是 Dynalene HC-50 的 25%,约是二氯甲烷的

67%, 约是陶氏化学 Dowtherm-J 的 86%。故为达到相同的制冷量, Dynalene HF-LO 的换热器面积约比 Dynalene HC-50 的大 25%, 比二氯甲烷的大 10%, 与陶氏化学 Dowtherm-J 相当。

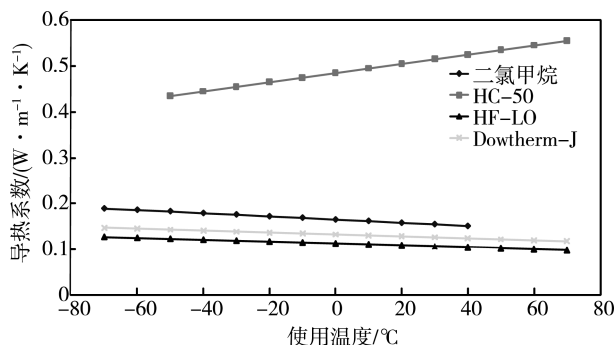


图4 各载冷剂导热系数曲线对比

Fig.4 The comparison of thermal conductivity curves of refrigerants

通过上述分析可知,中温段载冷剂中 Dynalene HC-50 和陶氏化学 Dowtherm-J 的性能要明显优于 Dynalene HF-LO, 且考虑 Dynalene HC-50 为水基载冷剂, 无闪点, 具有更好的安全性, 中温段载冷剂选择 Dynalene HC-50。低温段载冷剂中陶氏化学 Dowtherm-J、Dynalene HF-LO 和二氯甲烷性能相似, 因三种载冷剂中陶氏化学 Dowtherm-J、Dynalene HF-LO 均有闪点, 泄漏遇明火易发生爆燃, 二氯甲烷具有毒性, 又如前文所述, 低温段直接制冷或间接制冷均能满足环境试验室要求, 综合考虑运行风险和实际使用情况, 低温段采用直接冷却方式。

4 结语

文中通过对综合气候环境模拟试验室制冷需求进行分析, 制定了制冷系统方案, 确定了低温段采用复叠制冷系统, 中温段采用双级制冷系统的形式。通过分析载冷剂系统运行原理, 对比载冷剂在环境试验室使用时应考虑的主要因素, 得出了中温段载冷剂选择 Dynalene HC-50, 低温段选择直接冷却的制冷方式。Dynalene HC-50 无毒, 无闪点, 物性参数优良, 能够保证载冷剂泵和空气换热器的经济选型, 满足中温段制冷和加热使用需求。低温段选择直接制冷方式, 保证了试验室安全稳定运行。该载冷剂方案选择分析研究对于同类型大型综合气候环境模拟试验室的设计具有一定的借鉴意义, 为类似载冷剂的选择提供了参考。

参考文献:

- [1] 胥泽奇, 张世艳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54—59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54—59.
- [2] 张伦武. 军用环境试验的发展和趋势[J]. 环境技术, 2003, 21(4): 1—6.
ZHANG Lun-wu. The Advancement and Trend of Military Environmental Test[J]. Environment Technology, 2003, 21(4): 1—6.
- [3] 许翔. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61—65.
XU Xiang. Review of Automobile Environmental Worthiness Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 61—65.
- [4] 刘海燕. 大型气候环境实验室空气处理系统方案探讨[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 107—103.
LIU Hai-yan. Discussion on Design of the Air Handling System in Large Climatic Environmental Test Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 107—103.
- [5] 程有凯. 两级压缩与复叠式制冷方式的比较[J]. 制冷与空调, 2004, 4(3): 66—69.
CHENG You-kai. The Compare of Double-Stage Compression and Cascade Refrigerating System[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2004, 4(3): 66—69.
- [6] 金苏敏. 制冷技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
JIN Su-min. Refrigeration Technical and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [7] 孙艳秀. R404A 和 R507A 在双级制冷系统中的应用分析[J]. 低温与超导, 2010, 38(9): 53—56.
SUN Yan-xiu. Application Analysis of Refrigerant R404A and R507A under Two-stage Refrigeration System[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2010, 38(9): 53—56.
- [8] 马广顺. 大型低温环境试验室制冷系统设计[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 96—98.
MA Guang-shun. Design of Refrigeration System for Large Environmental Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 96—98.
- [9] 解国珍, 姜守忠. 制冷技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
XIE Guo-zhen, JIANG Shou-zhong. Refrigeration Technique[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [10] 阚杰, 郝亮. 间接制冷系统中除霜、能耗及温室效应的

- 比较[J]. 制冷与空调, 2005, 5(3): 53—56.
- KAN Jie, HAO Liang. Comparison of Defrosting, Energy Consumption and Greenhouse Effects of Indirect Refrigeration System[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2005, 5(3): 53—56.
- [11] 咎世超, 钟瑜. 乙二醇在制冷系统中的腐蚀及防护研究[J]. 制冷与空调, 2012, 12(2): 77—80.
- ZAN Shi-chao, ZHONG Yu. Research on Corrosion and Protection of Glycol in Refrigeration System[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(2): 77—80.
- [12] 马建军, 孙侠生. 环境实验室温度均匀性的数值分析研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 48—53.
- MA Jian-jun, SUN Xia-sheng. Numerical Analysis of Temperature Uniformity for Climatic Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 48—53.
- [13] 王俊. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- WANG Jun. Technical Environment Simulating[M]. Beijing: National Defense Polytechnic Press, 1996.
- [14] 曹兴中. 各种载冷剂的技术经济性比较[J]. 低温与制冷, 2013, 31(3): 10—12.
- CAO Xing-zhong. Technical and Economical Comparison of Various Secondary Refrigerants[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2013, 31(3): 10—12.
- [15] 吴敏. 制冷设备中载冷剂的选择分析[J]. 洁净与空调技术, 2013(3): 98—100.
- WU Min. The Selection and Analysis of Secondary Refrigeration in Refrigerating System[J]. Contamination Control and Air-conditioning Technology, 2013(3): 98—100.