

环境试验与评价

# 大型气候实验室高低温模拟系统 关键技术研究

刘海燕, 马建军, 吴相甫

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 突破关键技术, 获得适用于大型气候实验室的高低温环境模拟系统方案。**方法** 通过分析大型气候实验室载冷/载热系统和空气处理系统的工作原理和工作模式, 指出高低温环境模拟系统在可能遇到的极端温度下存在的安全风险, 从低温试验工况推断出换热器结霜的必然性。根据载冷剂物性设计规避系统安全风险和融霜的技术方案。**结果** 在 AS-6 系统和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  系统的二次循环中设计了充注/排空功能, 规避了载冷/载热系统的安全风险。设计了内外融霜结合的融霜方案, 进行换热器融霜。**结论** 试验和工程应用证明, 通过增加载冷剂充注/排空方案和换热器融霜方案完善的大型气候实验室的高低温环境模拟系统方案合理可行, 采用的关键技术可以指导类似系统设计。

**关键词:** 气候实验室; 空气处理系统; 载冷/载热系统; 充注/排空; 融霜

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.015

**中图分类号:** V216.5+7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)11-0079-06

## Key Issues on Extreme High and Low Temperature Simulation Systems for Large Climatic Laboratory

LIU Hai-yan, MA Jian-jun, WU Xiang-fu

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT: Objective** To break through key technology and obtain the high and low temperature environment simulation system scheme for large climatic laboratory. **Methods** The workflow and work model of the secondary refrigerant system and air handling system were analyzed. Safety risks of the high and low temperature environment simulation system at extreme temperature were found. The necessity of frost in exchanger in low temperature test was deduced. Then a technical scheme for avoiding safety risk and frost was developed for secondary refrigerant. **Results** A charge/drain function is designed for secondary circulation of AS-6 and  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  systems to avoid the safety risks of secondary refrigerant. The inner and outer defrosting systems are combined to defrost the exchanger. **Conclusion** The auxiliary system solves the safety and frost problems in the temperature simulation systems and can be used in other similar projects.

**KEY WORDS:** climatic laboratory; air handling system; secondary refrigerant system; charge/drain; defrost

大型气候环境试验室以全尺寸装备为试验对象<sup>[1-2]</sup>, 可进行多种综合气候环境试验<sup>[3-4]</sup>, 如低温、高温、太阳辐照、淋雨、降雪、冻雨、冻雾等。实验

室重要组成部分之一是高低温环境模拟系统, 该系统的核心是由空气处理系统和载冷/载热系统, 载冷剂通过空气处理系统中的换热器与空气进行换热实现

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 刘海燕(1968—), 男, 陕西户县人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机气候适应性分析与试验技术。

实验室 $-55\sim 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度环境<sup>[5-7]</sup>。为了实现 $-55\sim 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温域,选用AS-6和 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 两种载冷剂分别实现实验室不同温度段,其中,AS-6为中/高温载冷剂,实现实验室“ $-25\sim 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”,其冷源为循环冷却水和R507蒸发器,热源为电加热器和蒸汽; $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 为低温载冷剂,实现实验室“ $-55\sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”,其冷源为R23蒸发器,热源为电加热器。两种载冷剂在循环风系统中有对应的换热器,AS-6换热器和 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 换热器在风道中串行布置<sup>[8]</sup>。无论是从冷源、热源、制冷剂 and 载冷剂的选择以及搭配方式看,还是从可行性、安全性、环保性和经济性综合分析看,独立的载冷/载热系统方案是比较理想的,而且,独立的空气处理系统方案也不存在技术缺陷。当把两者结合在一起、换热器以串联模式串联运行时,就会发现两个系统耦合会带来AS-6低温结冰、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 高温沸腾问题。如何解决这些问题,就成为大型气候实验室高低温模拟系统的关键技术。为了使高低温模拟系统方案在实验室得到工程应用,就必须通过深入分析总体系统方案、理清问题、研究解决方案并验证效果来完善方案<sup>[9]</sup>。

## 1 系统简介

实验室高温和低温环境模拟系统由载冷/载热系统、空气处理系统、冷源、热源及外围的供电、供气和循环冷却水组成,其核心为载冷/载热系统和空气处理系统。

鉴于体量巨大,大型气候实验室空气处理系统通

常由多个相同的单元并联组成,每个单元配备一组载冷/载热二次循环系统。各组载冷/载热二次循环系统从一次循环系统取液、并联运行,同时为对应的空气处理系统单元提供冷/热量。

### 1.1 载冷/载热系统

大型气候实验室载冷/载热系统包括AS-6和 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 两个独立系统。每个系统由一次循环系统和多个并联的二次循环系统组成。

AS-6和 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 这两个独立的载冷/载热系统的总体运行模式是相同的,即在一次循环系统中,载冷剂被冷却或加热后供二次循环使用,在二次循环中通过换热器与空气进行热交换后回到一次循环系统再次被冷却或加热,如此连续运行。

#### 1.1.1 AS-6系统

AS-6系统如图1所示。一次循环系统主要由氮气定压罐、循环泵、R507蒸发器、AS-6/蒸汽板式换热器、AS-6/冷却水板式换热器、阀门等设备组成;二次循环系统主要由循环泵、AS-6/空气换热器、管道电加热器、调节阀等组成。系统中布置压力、温度和流量传感器,用于控制和监测。

在该系统中,通过向定压罐氮气充压/排放,将系统中的压力维持在设定值。二次循环系统为恒流量设计,其配有旁通管路,通过调节回液阀和旁通阀的开度来调整一次循环中的取液量,进而调整换热器中AS-6的入口温度和送风温度,实现室内温度控制。

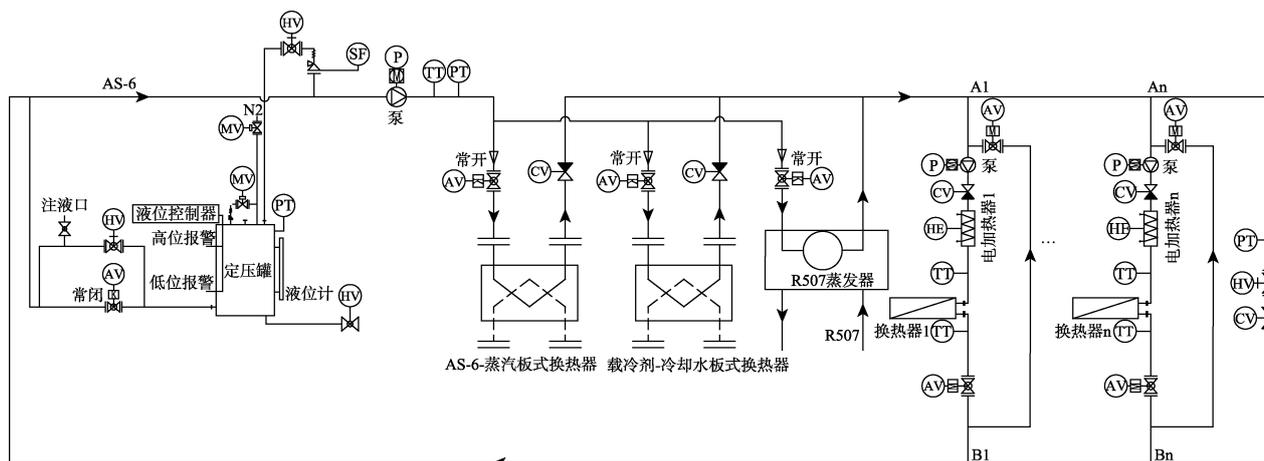


图1 AS-6系统

#### 1.1.2 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 系统

$\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 系统如图2所示。一次循环系统主要由膨胀罐、定压泵、循环泵、R23蒸发器和阀门等组成;二次循环系统主要由循环泵、 $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ /空气换热器、管道电加热器、调节阀等组成。该系统中同样布置了压力、温度和流量传感器,用于控制和监测。

该系统完全是闭式系统,通过定压泵向定压罐充

液或抽液实现管道系统压力控制。二次循环系统的工作原理与AS-6二次循环系统相同。

### 1.2 空气处理系统

空气处理系统由多个独立、并联运行的空气处理机组构成,每个机组主要包括风机、风阀、换热器、加湿器等设备组成,如图3所示。空气处理机组工作时,打开风阀F1和F2,风机定风量运行,将室内空

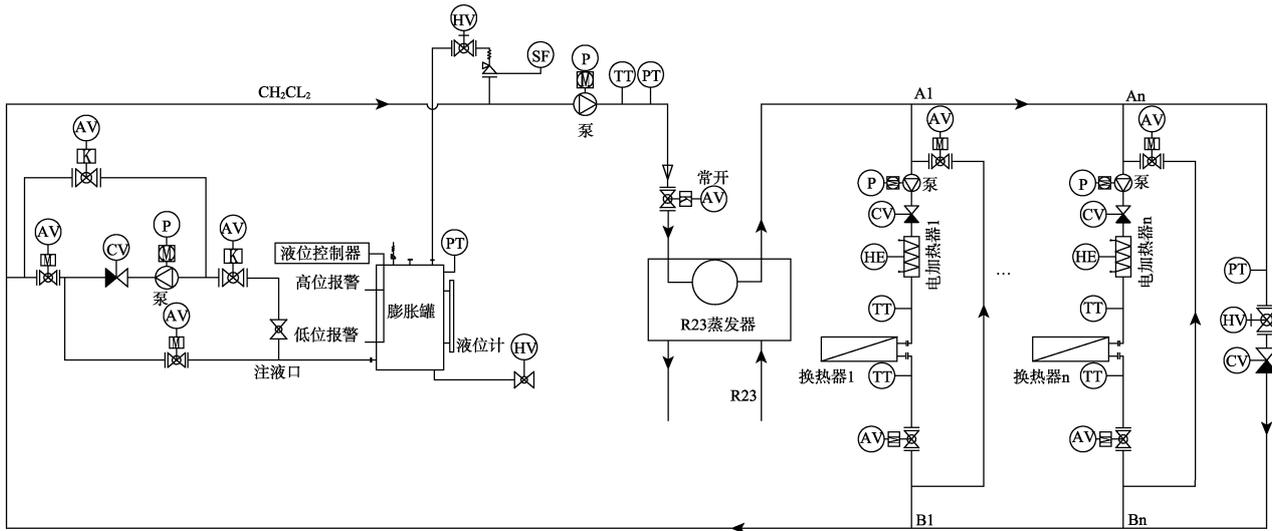


图 2 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 系统

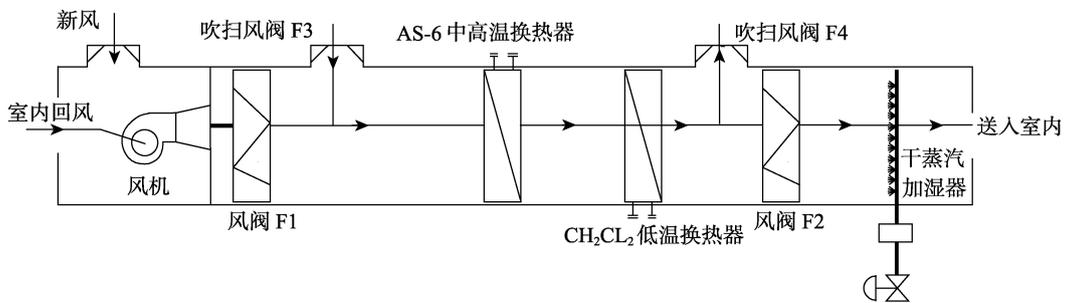


图 3 气候实验室空气处理机组

气送进风道进行温湿度处理，然后送入室内。其中，在需要维持室内正压或需要除湿时，补充新风；在需要加湿时，干蒸汽加湿器工作。

### 1.3 工作模式

载冷/载热系统和空气处理系统联合运行，实现实验室目标温度。系统的工作模式由当前温度和目标温度共同决定，共有以下 6 种：需要通过降温实现  $\geq -25$  °C 目标温度时，AS-6 换热器工作，冷源来自 R507 或冷却水；需要通过降温实现  $-55 \sim -25$  °C 目标温度时，CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 换热器工作，冷源来自 R23； $-55 \sim -25$  °C 的回温，CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 换热器工作，热源为 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 管道内布置的电加热器； $-25$  °C~常温的回温，AS-6 换热器工作，热源为 AS-6 管道内布置的电加热器或循环冷却水；需要通过升温实现常温~74 °C 目标温度时，AS-6 换热器工作，热源来自蒸汽；需要通过降温实现 74 °C~常温目标温度时，AS-6 换热器工作，冷源来自 R507 或冷却水。

## 2 系统分析

将载冷/载热系统与空气处理系统组合，便构成了气候实验室的高低温环境模拟系统。逐一分析上述 6 种工作模式和实验室的环境工况，会发现以下问题：

1) 因为 AS-6 的冰点为  $-55$  °C，在 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 换热器工作实现  $-55 \sim -25$  °C 目标温度时，循环风内的最低温度会达到  $-60$  °C 甚至更低，此时 AS-6 换热器中的载冷剂会结冰，换热器有胀裂风险。

2) 因为 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 在标准大气压下的沸点为 39.8 °C，AS-6 换热器工作实现常温~74 °C 的目标温度时，循环风内的最高温度会达到 80 °C 甚至更高，将引发 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 蒸发使换热器管内压力超过 0.45 MPa，换热器有爆管风险。

3) 在实验室温度  $\leq 5$  °C 时，无论使用 AS-6 或 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub>，其温度均会  $\leq 0$  °C，AS-6 换热器和 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 换热器结霜将不可避免。换热器结霜会导致换热效率降低<sup>[10-11]</sup>，严重结霜引起的风阻会导致循环风系统瘫痪。

只有从技术方案上彻底解决因载冷剂物性带来的安全风险问题，采取有效的换热器融霜措施，气候实验室的高低温环境模拟系统方案才可以在工程上应用。

## 3 解决方案

通过对系统的深入分析，认识到在极端低温工况，AS-6 会冰点，其换热器有胀裂风险；在极端高

温工况,  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  会沸腾, 其换热器有爆管风险。从导热系数、黏度、闪点、冰点等重要物理性能和环保性、经济性等综合评估, 又没有比 AS-6 和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  更优的载冷剂可供选择。因此, 必须立足于使用 AS-6 和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$ , 通过有效的技术方案解决问题, 规避 AS-6 换热器胀裂风险和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  爆管风险。为此, 设计了两套载冷剂辅助系统: 在极端低温工况, 排空换热器中的 AS-6; 在极端高温工况, 排空换热器中的  $\text{CH}_2\text{CL}_2$ , 需要时再重新给换热器充注 AS-6 或  $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 。

为解决换热器低温结霜问题<sup>[12]</sup>, 设计了内融霜与外融霜联合的融霜方案<sup>[13]</sup>。融霜时停止二次循环, 将换热器接入内融霜循环管路, 使用蒸汽板式换热器对换热器进行循环加热融霜并使换热器表面的水蒸发。

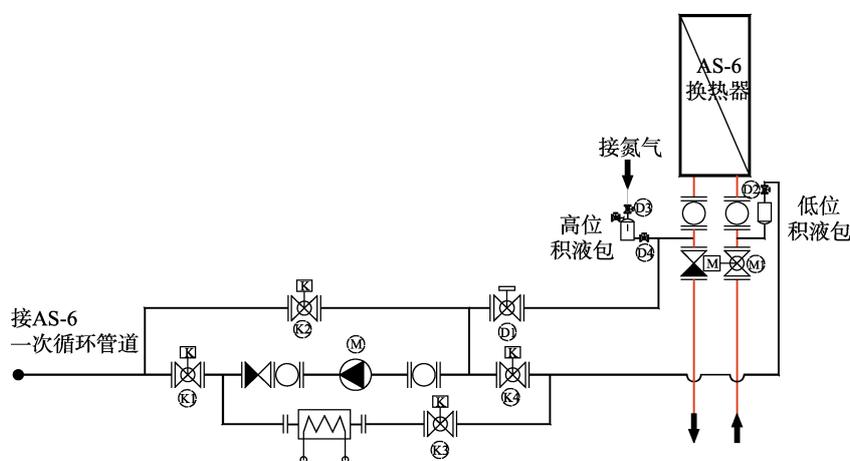


图4 AS-6 辅助系统

AS-6 排空流程: 关闭电动阀 M1→打开电动阀 K1 和 K4, 关闭 K2 和 K3→打开电磁阀 D2、D3 和 D4, 关闭 D1, 运行泵 M1, 同时充注氮气以维持换热器内压力, 使泵正常运行→当低位积液包的液位到达指定高度后, 判定排空完成, 然后关闭电磁阀 D2、D3、D4 和电动阀 K1、K4, 停止泵 M。

AS-6 充注流程: 关闭电动阀 M1→打开电动阀 K2 和 K3, 关闭 K1 和 K4→打开电磁阀 D2、D3 和 D4, 关闭 D1, 运行载冷剂泵 M, 同时排出氮气→当高位积液包的液位到达指定高度后, 判定充注完成, 然后关闭电磁阀 D2、D3、D4 和电动阀 K1、K4, 停止泵 M。

AS-6 换热器内融霜流程: 电动阀 M1 关闭→电动阀 K3 打开, K1、K2、K4 关闭→电磁阀 D1、D2 打开, D3、D4 关闭, 运行载冷剂泵, 开启蒸汽加热器进行融霜。

### 3.2 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 辅助系统

在极端高温工况进行气候试验前, 将换热器中的  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  排到  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  一次循环系统中。在需要  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  换热器工作时, 再将  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  充注到  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  换热器中, 规避  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  换热器高温超压爆管风险。 $\text{CH}_2\text{CL}_2$  排空/充注子系统如图 5 所示。

同时启用外融霜, 利用室外空气对换热器进行吹扫进一步除湿, 直到换热器表面和风道内干燥, 确保恢复低温时换热器不会快速结霜。

为了简化系统管系, 在设计时, 将内融霜集成功能到载冷剂辅助系统中, 通过阀门切换, 实现排空、充注和内融霜功能。

### 3.1 AS-6 辅助系统

在极端低温工况进行气候试验前, 将换热器中的 AS-6 排到 AS-6 一次循环系统中。在需要 AS-6 换热器工作时, 再将 AS-6 充注到 AS-6 换热器中, 规避 AS-6 换热器低温胀裂风险。AS-6 辅助系统如图 4 所示。

$\text{CH}_2\text{CL}_2$  与 AS-6 辅助系统的区别在于:  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  为闭式系统, 不能用氮气维持换热器内压力。在泵抽液过程中, 会因为泵前压力逐渐降低而使泵不能正常运行, 无法彻底排空换热器。因此, 在换热器上装有压力传感器, 通过监测压力变化实时控制泵的启停, 确保管道压力始终处在合理的范围内。

$\text{CH}_2\text{CL}_2$  排空流程: 电动阀 M1 关闭→电动阀 K1、K4 打开, K2、K3 关闭→电磁阀 D2 打开, D1 关闭, 运行泵 M 进行排空→当换热器内压力低至指定值时, 关闭电磁阀 D2, 停止泵 M。

$\text{CH}_2\text{CL}_2$  充注流程: 电动阀 M1 关闭→电动阀 K2、K3 打开, K1、K4 关闭→电磁阀 D2 打开, D1、D3 关闭, 运行泵 M, 进行充注。

$\text{CH}_2\text{CL}_2$  换热器内融霜: 电动阀 M1 关闭→电动阀 K3 打开, K1、K2、K4 关闭→电磁阀 D1、D2 打开, D3、D4 关闭, 运行泵, 开启管道电加热器进行内融霜。

### 3.3 换热器融霜方案

在 AS-6 和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  辅助系统中已经附带介绍了换热器内部融霜, 在此仅对外部融霜作简要说明。实现外部融霜需要在图 3 所示的空气处理单元 AS-6 换热器的前端和  $\text{CH}_2\text{CL}_2$  换热器的后端各加一个风阀 F3

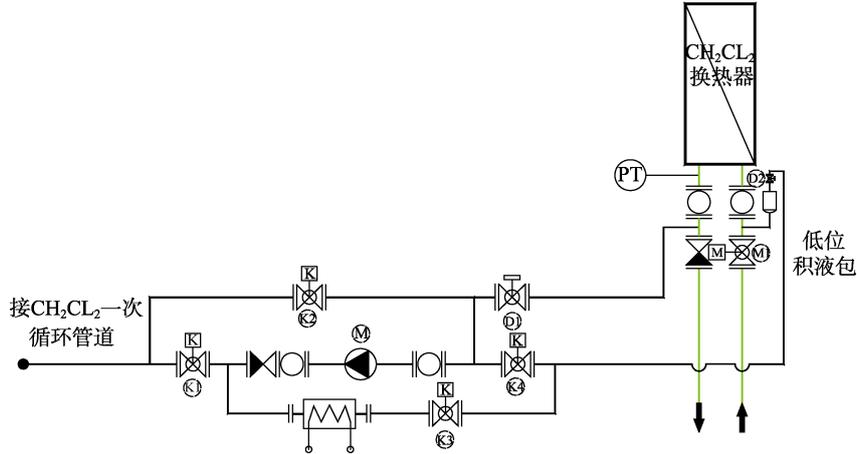


图 5 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 辅助系统

和 F4。外融霜时，关闭 F1 和 F2，打开 F3 和 F4，吹扫风由 F3 进、由 F4 出，将风道内的湿气带出风道即可。

以换热器前后的压差判断换热器是否需要融霜是可行的，但经过系统调试发现，综合换热器载冷剂进出温差来判断是否需要融霜更精确。以吹扫风的进出口温度和持续时间作为融霜是否完成的判据，具体量值需要通过调试获得。

### 3.4 系统方案完善与应用

通过在实验室高低温环境模拟系统中增加 AS-6 和 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 辅助系统，规避系统在极端温度下存在的安全风险。在 AS-6 和 CH<sub>2</sub>CL<sub>2</sub> 辅助系统集成换热器内融霜功能，与外融霜协同运行，解决换热器结霜问题，从而使实验室高低温环境模拟系统得以完善，如图 6 所示。图 6 中的 A1 点为 AS-6 排空/充注子系统

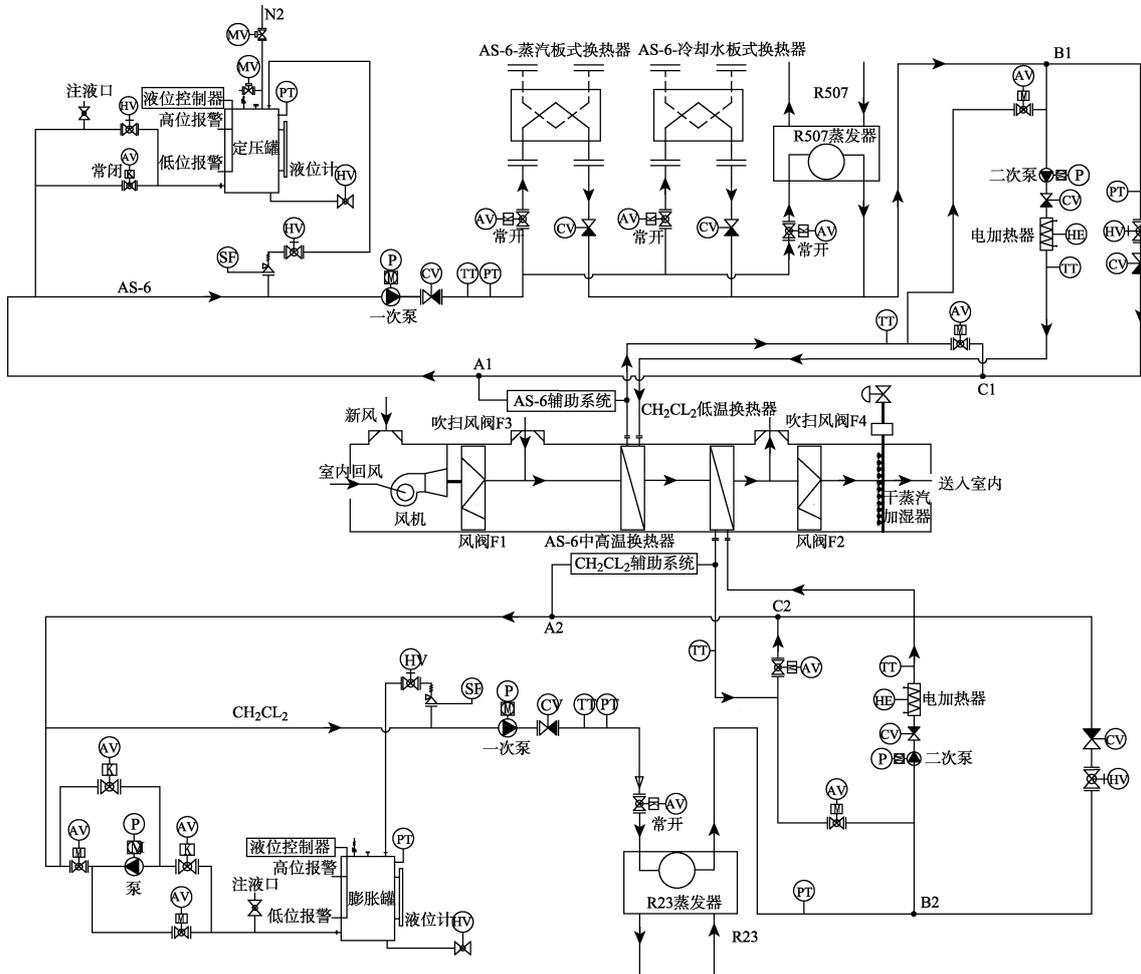


图 6 高低温环境模拟系统

接入点(接图4的A1点),A2点为 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 排空/充注子系统(接图5的A2点)。

目前这套高低温环境模拟系统已成功应用于某大型综合性气候实验室,可实现室内 $-55\sim 74\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度环境。AS-6辅助系统可以在20 min完成中高温换热器的排空和充注, $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 辅助系统可以在高温工况下将低温换热器内的压力维持在不超过0.4 MPa,并在需要时20 min内将 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 充注完成。降雪时室内湿度接近饱和,且有大量的冰晶通过回风管道进入空气处理系统,导致换热器较短时间内结霜。内融霜+外融霜的方式可以在短时间内将霜彻底除去,多套空气处理系统轮流除霜则保证了降雪的持续性。图7显示了某次降雪调试后换热器除霜过程中中高温换热器AS-6温度和吹扫出风温度的变化趋势,实际上一旦AS-6温度上升到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,霜即开始迅速融化,不到20 min即可完全融化,继续升温并辅以新风吹扫可以将换热器彻底烘干。

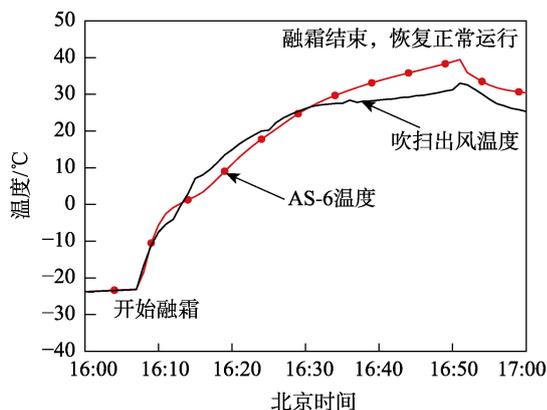


图7 融霜过程中AS-6和吹扫出风温度变化

## 4 结语

分析气候实验室高低温环境模拟系统,发现AS-6和 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 载冷/载热系统存在的安全风险,以及在低温下换热器的结霜问题。设计了AS-6和 $\text{CH}_2\text{CL}_2$ 排空/充注子系统和内外结合的融霜方案,突

破了解决上述问题的关键技术,完善了气候实验室高低温环境模拟系统方案。该方案在气候实验室中得到了成功应用,采用的技术方案可以指导类似系统的设计。

## 参考文献:

- [1] 唐虎,李喜明.飞机气候试验[J].装备环境工程,2012,9(1):60-65.
- [2] 王德言,管博,罗伟强,等.环境与可靠性试验方法研究[J].环境技术,2017,35(4):5-7.
- [3] 张昭,唐虎,成竹.军用飞机实验室气候环境试验项目分析[J].装备环境工程,2017,14(10):87-91.
- [4] 张亚娟,吴敬涛,刘海燕.气候环境实验室加湿系统设计的关键技术研究[J].环境技术,2017,35(6):76-79.
- [5] 张惠,刘海燕,李喜明,等.大型气候环境试验室冷媒的分析选择[J].装备环境工程,2015,12(2):104-107.
- [6] 刘坤,张保军,岳磊,等.综合气候环境试验室载冷剂方案选择研究[J].装备环境工程,2016,13(5):105-110.
- [7] 曹兴中.各种载冷剂的技术经济性比较[J].低温与特气,2013,31(3):9-12.
- [8] 刘海燕,马建军,张惠.大型气候环境实验室空气处理系统方案讨论[J].装备环境工程,2014,11(5):107-113.
- [9] 窦小强,古文刚,黄茂生.军用软件测评实验室能力评估指标体系研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2018,36(3):33-36.
- [10] LEE M, KIM Y, DONG B, et al. Air-side Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Finned-tube Heat Exchangers with Large Fin Pitches under Frosting Conditions[J]. Heat Mass Transf, 2010, 53(13): 2655-2661.
- [11] XIA Y, ZHONG Y, HRNJAK P S, et al. Frost, Defrost, and Refrost and Its Impact on the Air-side Thermal-hydraulic Performance of Louvered-fin, Flat-tube Heat Exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2006(29): 1066-1079.
- [12] MOHAMMED A, WANG Chi-chuan. Review of Defrosting Methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(73): 53-74.
- [13] 马建军,刘海燕.间接制冷换热器除霜方案研究[J].装备环境工程,2018,15(7):50-54.