

大型气候环境实验室冷媒的分析选择

张惠, 刘海燕, 李喜明, 吴敬涛, 马建军

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 选择适用于大型气候环境实验室制冷系统的制冷剂 and 载冷系统的载冷剂。**方法** 通过对气候环境实验室制冷系统和载冷系统的特性分析, 提出制冷剂和载冷剂的选用原则。对常用制冷剂和载冷剂的物性分别进行对比分析, 综合考虑环保性、制冷内循环特性、循环风系统和空气补偿系统对冷媒的要求等因素优选制冷剂和载冷剂。**结果** 复叠制冷机组的高、低温段制冷剂分别选用 R507 和 R23, 中高温载冷剂选用 AS-6, 低温载冷剂选用 AST-30。**结论** 提出的冷媒介质选择方案适用于大型气候环境实验室。

关键词: 制冷剂; 载冷剂; 气候环境实验室; 循环风系统; 空气处理系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.022

中图分类号: TJ05 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)02-0104-06

Analysis and Selection of Refrigerants Used in the Large Climatic Environmental Test Facility

ZHANG Hui, LIU Hai-yan, LI Xi-ming, WU Jing-tao, MA Jian-jun

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

ABSTRACT: Objective To select the refrigerants and secondary-refrigerants suitable for the large climatic environmental test facility. **Methods** The selection principle of the refrigerants and secondary-refrigerants was proposed based on the analysis of characteristics of cooling systems in climatic environmental test facility. The properties of common refrigerants and secondary-refrigerants were comparatively analyzed, and the optimization of the refrigerants scheme was conducted considering the environmental friendliness, the refrigeration inner-circulating characteristics, the requirements of the cycle air system and the makeup air system. **Results** R507 and R23 were selected as the refrigerants for the high- and low-temperature sections of the cascade system, respectively, AS-6 was selected as the medium- and high-temperature secondary-refrigerant, while AST-30 was selected as the low-temperature secondary-refrigerant. **Conclusion** The scheme of the refrigerants proposed in this paper was applicable to the large climatic environmental facility.

KEY WORDS: refrigerants; secondary-refrigerants; climatic environmental test facility; cycle air system; makeup air system

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-14

Received: 2014-12-05; Revised: 2015-01-14

作者简介: 张惠(1988—), 女, 湖北天门人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为气候环境试验。

Biography: ZHANG Hui(1988—), Female, from Tianmen, Hubei, Master, Assistant engineer, Research focus: climate environment test.

气候环境是导致飞机故障的主要因素,气候环境试验已经成为飞机在进行复杂气象条件试飞之前必须要进行的一项地面验证试验^[1]。气候环境试验用于评估飞行器武器系统在各种环境或极端自然环境条件下的有效性,且可预估其可承受的风险水平^[2]。由于室外进行气候环境试验周期长、成本高,而且环境条件不可控,所以建立飞机气候环境实验室进行室内试验势在必行。气候环境实验室能够模拟高温、低温、淋雨、降雪、太阳辐照、地面雾等多种气候环境,且能模拟飞机发动机启动或运行过程中遭遇的低温、高温、湿热等气候环境^[3]。

气候环境实验室的温度范围为 $-55 \sim 74 \text{ }^{\circ}\text{C}$,由于实验室所需要的试验温度范围宽,不同试验工况负荷变化很大,要求制冷系统的制冷量能在较大温度范围内调节,考虑到实验室的安装及设计等要求,选择复叠式制冷系统^[4]与载冷系统联合运行的制冷方式。

制冷系统中的制冷剂通过自身热力状态变化,实现制冷。载冷系统中的载冷剂作为气候实验室能量输送的载体,在整个能量传递过程中起着举足轻重的作用^[5]。制冷剂和载冷剂的物理性质和化学性质涉及到环保性、设备对安装空间的要求、系统的配置和运行的动力需求、初始投资成本等问题,并与制冷系统和载冷系统的方案密切相关,因此对制冷剂和载冷剂的选择显得尤为重要。制冷剂和载冷剂的制冷剂和载冷剂的选择是一个需要综合考虑多方因素的权衡过程。结合气候实验室的建设背景,分析不同制冷剂和载冷剂的物理及化学特性,选择出适合大型气候实验室的冷媒方案。

1 总体制冷方案简介

气候环境实验室选用复叠制冷系统与载冷系统联合运行来实现实验室的低温需求,复叠制冷系统有2个初步的运行模式,每个模式要求运行的制冷机组及制冷剂不同。复叠制冷机组高温级的蒸发温度设计最低值为 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,可提供 $-35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的载冷剂,将循环风冷却到 $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,用于实现 $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的实验室温度;复叠制冷机组低温级的蒸发温度最低值为 $-70 \text{ }^{\circ}\text{C}$,用于实现 $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最低实验室温度。

制冷剂的选择包含高温段制冷剂和低温段制冷剂的选择。载冷剂的选择包括中高温载冷剂和低温载冷剂。冷媒的选择除需依据制冷剂和载冷剂的物理性能和化学性能,考虑两者的匹配性、初始投资成本、运行效率等因素外,还必须紧密结合制冷系统总

体方案进行权衡。

2 制冷剂的选择

2.1 需要考虑的因素

制冷剂在制冷中循环流动,通过自身热力状态的不断变化与载冷剂发生能量交换,载冷剂向空气传递冷量,实现制冷。选择制冷剂需要考虑的因素如下^[6]:

1) 冷凝压力不能太高,蒸发压力在常压以上,压力比适中;临界温度高,标准沸点低;绝热指数要小,导热系数要高,黏度和密度要小,传热性好,流动性好;单位制冷量大,循环的性能系数好。

2) 化学稳定性和热稳定性要好,在制冷循环中不分解、不变质,无毒、不燃烧、不爆炸;对设备腐蚀性小。

3) 臭氧层的衰减指数ODP和温室效应指数要小。

4) 价格便宜,易于获得。

2.2 常用制冷剂

两级复叠制冷机组通常由高温级和低温级两部分组成。用高/中沸点的制冷剂循环承担高温区段的制冷,用低沸点的制冷剂循环承担低温区段的制冷。高温段制冷剂的蒸发和低温段制冷剂的冷凝通过蒸发冷凝器实现。

在中低温商用制冷系统中,目前应用较多的高温级制冷剂有R22、R404A、R507、氨、丙烷以及丙烯等,低温段制冷剂有R13、R23、R508、乙烯、乙烷以及甲烷等。

R22、R404A、R507、R13、R23、R508等属于氟利昂类制冷剂,通过人工合成方法制取^[6]。乙烯、乙烷、甲烷、丙烷、丙烯属于CH类制冷剂,氨与CH类制冷剂都属于天然制冷剂。

天然制冷剂与合成的氟利昂制冷剂都有各自的优缺点,分析结果见表1。氟利昂制冷剂在制冷与空调装置中广泛使用。氨通常在大型工业制冷中使用,CH类化合物的使用范围较小。

2.3 选择权衡

实验室的复叠制冷系统高温级最低蒸发温度为 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,低温级最低蒸发温度为 $-70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。氨的标准沸点为 $-33.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,毒性大,易燃,所以实验室不选择氨作为高温级制冷剂。由于碳氢化合物的燃爆性很强,考虑到在实验室进行发动机开车试验,会有明火以及

表1 不同类型制冷剂的优缺点分析

Table 1 Advantages and disadvantages of different refrigerants

	氟利昂类制冷剂	氨	CH类制冷剂
优点	无毒、热稳定性和化学稳定性好,能适应不同制冷温度和制冷量需求	单位容积制冷量大,黏度小,密度小,流动阻力小	凝固点低,溶油性好
缺点	密度大,传热性能差,对环境具有一定破坏性	毒性大、易燃、易爆	燃爆性强

高温,所以排除使用碳氢化合物。因此,用在气候环境实验室的制冷剂只能从氟利昂类中进行选择。

R404A属于三元近共沸混合制冷剂^[7],其滑移温度为0.677℃,且换热性能不及R507好,所以中温制冷剂考虑R22或者R507。由于R23的最低蒸发温度为-82℃,且-70℃时,蒸发压力为193kPa,可以保证系统在微正压下运行,因此选择R23作为低温制冷剂。

根据气候实验室温度指标,通过与国际知名制冷设备供应商进行技术交流,认为实验室制冷剂较合适的选择组合是R22/R23或者R507/R23,两种组合都能保证-55℃的温度指标。R22/R23或者R507/R23复叠

制冷系统均可实现-80℃以上温度,能覆盖该实验室的低温范围。

R22与R507基本的物性参数见表2,通过比较两者的物性参数,分析得出选择R22或者R507作为中温制冷剂的优缺点如下所述。

1) 安全性。在复叠制冷机组中,高温级制冷剂的最低蒸发温度为-40℃,此时R22的蒸发压力为105.23kPa,R507的蒸发压力为138.66kPa。采用R507制冷系统的压缩机功耗小。

2) 标准沸点。根据表2,R22的标准沸点为-40.81℃,R507的标准沸点为-47.1℃,考虑到复叠制冷机组的高温级最低蒸发温度为-40℃,采用R507能够有更大的余量。

3) 效率性。文献[8]指出,在相同的压缩机及相同运行工况下,R507机组的制冷量比R22机组大。在环境温度较低时,R507A机组的效率比R22略高。

4) 经济性。目前性能最好的中低温制冷剂是R22,而且市场价格便宜。

5) 环保性。根据表2,R22的ODP值为0.055,对大气臭氧层有破坏作用,属于《蒙特利尔协议定书》规定的要淘汰物质,中国目前也正在加快淘汰R22。

经过R22与R507的综合比较分析,采用R507/

表2 R22与R507的基本物性^[9-10]

Table 2 Basic properties of R22 and R507

制冷剂	ODP	GWP	标准沸点/℃	临界温度/℃	临界压力/MPa	相对分子质量/(g·mol ⁻¹)	-40℃时的蒸发压力/MPa	-40℃时液体的比热/(kJ·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	-40℃时液体的密度/(kg·m ⁻³)
R22	0.055	1700	-40.81	96.145	4.99	86.468	0.10523	0.82274	1406.8
R507A	0	3800	-47.1	70.900	3.79	98.86	0.13866	0.79388	1295.6

R23复叠制冷系统可保证实验室温度指标,而且安全性高、效率高,在环保性能方面可以接受,但是经济性略差。蒸汽压缩式制冷系统随着使用年限的增长,制冷能力会有不同程度的衰减。因此该实验室在制冷系统设计时应考虑部分裕量,以确保实验室在设计寿命期间能保证-55℃温度指标。因此,实验室采用R507/R23复叠制冷系统是合适的。

3 载冷剂的选择

3.1 运行方式

当在气候环境实验室中进行飞机发动机开车试验时,需消耗大量冷/热空气,同时还产生大量高温气体,这会导致室内温度急剧上升,因此需及时向室内

补充冷/热空气,使室内温度处于恒定状态。如采用直接制冷或直接蒸汽加热室外空气进行补气,满足不了实验室在短时间内处理大量空气所需要的冷量或热量,需要采用载冷剂来进行蓄冷或者蓄热。为了便于控制,所以在气候环境实验室的循环风处理单元、发动机开车空气补偿单元中都采用载冷剂来向空气传递冷量或者热量^[11-13]。

载冷剂在实验室的循环风系统^[14](AHU)和发动机开车空气补偿系统(JMAU)中的运行如图1所示,功能见表3。实验室的循环风通道采用并联方式,载冷剂在A通道和B通道运行方式相同。当试验要求室内工况温度为-25℃以上,且实验室进行负温试验(实验室试验温度低于外界环境温度)时,载冷剂A将复叠制冷系统高温级R507的冷量输送到循环风处理单元(AHU)或发动机开车空气补偿单元(JMAU)的制冷换

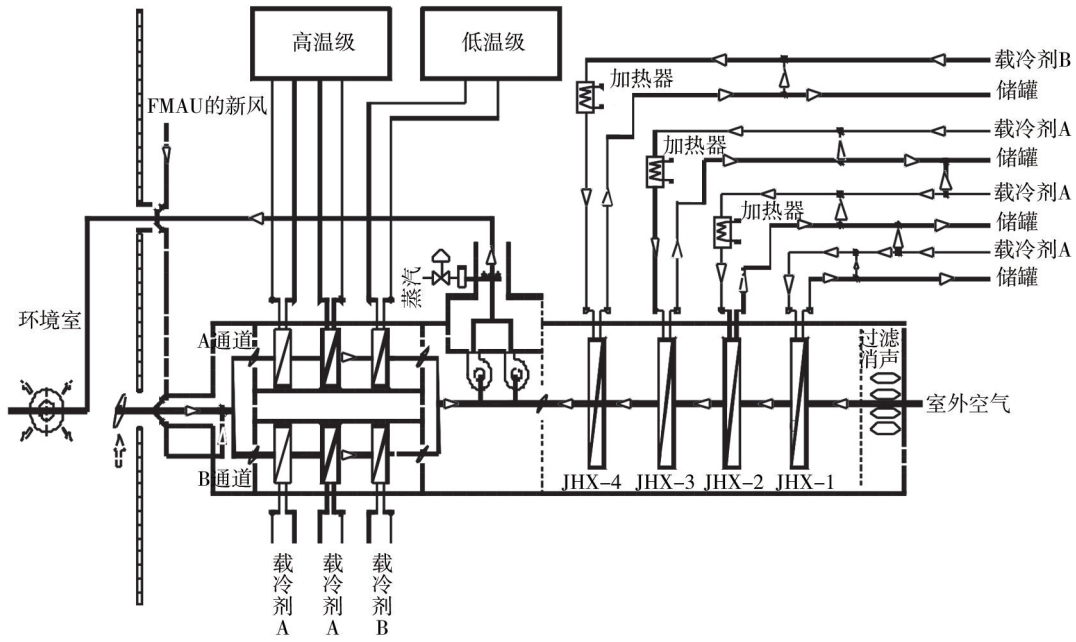


图1 载冷剂在循环风处理单元和发动机开车补气单元中的运行
Fig.1 The flow of the secondary-refrigerants in AHU and JMAU

表3 载冷剂在实验室AHU和JMAU中的功能

Table 3 The function of the secondary-refrigerants in AHU and JMAU

	载冷剂	换热器	功能
AHU	载冷剂A	HX-1A(B)	除湿/结冰
		HX-2A(B)	中温(+10 ~ -25 °C)/高温(+10 ~ 74 °C)换热
	载冷剂B	HX-3A(B)	低温(-25 ~ -55 °C)换热
JMAU	载冷剂A	JHX-1	将空气处理到5 °C
		JHX-2	(5 ~ -10 °C或5 ~ 20 °C)换热
		JHX-3	(-10 ~ -25 °C或20 ~ 55 °C)换热
	载冷剂B	JHX-4	(-25 ~ -55 °C)换热

热器,用于冷却循环风或补偿空气。实验室进行正温试验(实验室试验温度高于外界环境温度)时,将蒸汽热量输送到AHU或JMAU中的加热换热器,用于加热环境室送风或补偿空气。在室内要求工况温度为-55 ~ -25 °C时,载冷剂B将复叠制冷系统低温级R23的冷量输送到循环风处理单元(AHU)或发动机开车空气补偿单元(JMAU)中的制冷换热器,用于冷却环境室送风或补偿空气。

3.2 气候实验室选择载冷剂需要考虑的因素

载冷剂以液态在蒸发器与用冷场所的冷却器之间循环,通过显热传输冷量。载冷剂的选择将会影响换热器的选型以及泵的大小。

根据气候实验室的载冷剂运行方式,气候实验室选用两种载冷剂,与复叠机组的制冷剂进行热交换的

中高温载冷剂A和低温载冷剂B。气候实验室选用的载冷剂应具备如下性质^[15]。

1) 由于实验室要进行发动机开车点火试验,尾喷管温度高达300 °C以上,而且有明火,所以载冷剂选择无闪点型。

2) 载冷剂的凝固温度至少比制冷剂的蒸发温度低4 ~ 8 °C,气候实验室的复叠制冷机组高温级的蒸发温度为-40 °C,所以中高温载冷剂A的凝固温度应低于-45 °C。载冷剂A在进行载热时,需要承受的最高温度为95 °C,所以载冷剂A的沸点应该高于100 °C。气候实验室的复叠制冷机组低温级的蒸发温度为-70 °C,所以低温载冷剂B的凝固温度应低于-74 °C。

3) 实验室的试验工况较多,所需要的温度不尽相同,载冷剂在不同使用温度工况下,导热系数要大,黏

度要小,比热容要大。高低温交变时,载冷剂的物性不发生变化。

4) 化学性质稳定,无毒、不燃、不爆,价格低廉,易于获得。

3.3 气候实验室载冷剂的选择

根据中温载冷剂 A 的选择要求,中温载冷剂在 AS-6, HC-40 以及 RH-8 之间进行选择。这三种载冷剂均无闪点, AS-6 的冰点为 -55 °C, 使用温度范围为 -50 ~ 100 °C; HC-40 的冰点为 -40 °C, 使用温度范围为 -40 ~ 218 °C; RH-8 的冰点为 -62 °C, 使用温度范围为 -60 ~ 115 °C。AS-6, HC-40, RH-8 在使用温度 -40 ~ 80 °C 的物性参数见表 4。可以看出,在 -40 °C

时, RH-8 的黏度比较大,管内流动阻力很大,增加泵的功耗,所以排除 RH-8。HC-40 冰点为 -40 °C, 在实验室工况为 -25 °C, 要求的载冷剂冰点在 -44 °C 以下, 而且 HC-40 采购比较复杂, 价格昂贵。综合分析, 选择 AS-6 作为中高温载冷剂。

低温载冷剂 B 在二氯甲烷或者 AST-30(改性的二氯甲烷)之间进行选择,二氯甲烷与 AST-30 的物性参数比较见表 5。在相同温度下,二氯甲烷与 AST-30 的黏度、密度、导热系数、比热相差不大,但是二氯甲烷中的微量水,在极低温度下会析出,在蒸发器表面形成一层冰膜,导致热量换不出来,制冷剂效率低下。AST-30 中添加防水剂、稳定剂,可以防止二氯甲烷吸水后的冰堵现象,所以选择 AST-30 为低温载冷剂。

表 4 AS-6, HC-40, RH-8 的基本物性参数的比较

Table 4 Comparison of basic properties of AS-6, HC-40 and RH-8

温度/°C	黏度/(mPa·s)			密度/(g·cm ⁻³)			导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)			比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)		
	RH-8	AS-6	HC-40	RH-8	AS-6	HC-40	RH-8	AS-6	HC-40	RH-8	AS-6	HC-40
-40	50.7	25.7	14.9	1.26	1.38	1.34	0.35	0.39	0.44	2.63	2.57	2.79
-30	24.0	11.9	9.22	1.26	1.37	1.34	0.36	0.41	0.45	2.65	2.58	2.82
-20	14.3	8.7	6.49	1.25	1.37	1.33	0.38	0.42	0.46	2.67	2.59	2.84
-10	9.3	5.31	4.91	1.25	1.36	1.33	0.39	0.43	0.47	2.69	2.60	2.86
0	6.4	3.87	3.89	1.24	1.36	1.32	0.40	0.44	0.48	2.71	2.61	2.88
10	4.7	3.53	3.18	1.24	1.36	1.32	0.41	0.45	0.49	2.73	2.61	2.91
20	3.3	3.2	2.66	1.23	1.35	1.31	0.42	0.47	0.50	2.75	2.62	2.93
40	1.8	2.3	1.96	1.22	1.33	1.30	0.44	0.53	0.52	2.78	2.74	2.98
80	1.5	1.4	1.21	1.20	1.31	1.28	0.50	0.57	0.56	2.85	2.82	3.07

表 5 二氯甲烷与 AST-30 的物性参数的比较

Table 5 Comparison of properties of methane chloride and AST-30

温度/°C	黏度/(mPa·s)		密度/(g·cm ⁻³)		导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	
	AST-30	二氯甲烷	AST-30	二氯甲烷	AST-30	二氯甲烷	AST-30	二氯甲烷
-70	—	0.8064	1.487	1.480	0.168	0.1892	0.903	1.2339
-60	1.293	0.7545	1.469	1.464	0.166	0.1858	0.914	1.1242
-50	1.068	0.7023	1.451	1.448	0.163	0.1825	0.925	1.2392
-40	0.901	0.6589	1.433	1.431	0.160	0.1791	0.936	1.1288
-30	0.774	0.6153	1.415	1.414	0.157	0.1757	0.947	1.1317

4 结论

文中主要对大型气候环境实验室制冷系统的制冷剂 and 载冷系统的载冷剂进行了选择分析。大型气候环境实验室采用 R507 作为中温制冷剂, R23 作为低温制冷剂。采用这两种制冷剂的复叠制冷系统制冷

效率高, 能够满足实验室在不同试验温度下的冷量需求, 实现实验室的温度指标。

气候环境实验室选用的载冷剂有中高温载冷剂为 AS-6, 低温载冷剂为 AST-30。这两种载冷剂可以满足实验室循环风系统的载冷需求也可以满足实验室发动机开车空气补偿系统对蓄冷的需求。AST-30 可以避免换热器的冰堵现象, 而且这两种载冷剂黏度

小、比热大、导热系数大,根据载冷剂的性质可以设计合理的换热器。

文中的选择分析对同类大型气候环境实验室制冷系统的制冷剂 and 载冷剂的选择具有一定的指导意义。

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.
TANG Hu, LI Xi-ming. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(1): 60—65.
- [2] 胥泽奇,张世艳,宣卫芳.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, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(1): 54—59.
- [3] 唐虎,刘海燕.气候环境实验室总体技术要求[M].西安:中国飞机强度研究所.
TANG Hu, LIU Hai-yan. Engineering Proposal for the Design of an Environmental Test Facility[M]. Xi'an: Aircraft Strength Institute.
- [4] 孙来燕,黄本诚,成致祥,等.大型空间环境试验设备中的低温技术[J].低温工程,1999(4):218—223.
SUN Lai-yan, HUANG Ben-cheng, CHENG Zhi-xiang, et al. Cryogenics In Large Space Simulators[J]. Cryogenics, 1999(4): 218—223.
- [5] 戴海风,刘妮,陈伟军.第二制冷剂及其制冷系统的应用[J].制冷技术,2012,40(5):85—88.
DAI Hai-feng, LIU Ni, CHEN Wei-jun. Development of Secondary Refrigerants and Applications in Refrigeration Systems[J]. Refrigeration, 2012, 40(5): 85—88.
- [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,牛倩倩. 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):54—56.
SUN Yan-xiu, NIU Qian-qian. Application Analysis of Refrigerant R404A and R507A under Two-stage Refrigeration System[J]. Refrigeration, 2010, 38(9): 54—56.
- [8] 卢智利, CHIN Soon Wee, 孙嵩军. R507A, R404A 与 R22 在低温冷冻工况下的性能比较[J].制冷与空调,2008(8):46—49.
LU Zhi-li, CHIN Soon Wee, SUN Ai-jun. The Comparison of R507A, R404 and R22 at the Cooling of Low Temperature[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2008(8): 46—49.
- [9] 张科,周志刚,吴兆林.两级复叠低温制冷机组制冷剂的替代[J].低温工程,2009,172(6):37—40.
ZHANG Ke, ZHOU Zhi-gang, WU Zhao-lin. Research on Refrigerants Alternative of Two-stage Cascade Refrigeration Units[J]. Cryogenics, 2009, 172(6): 37—40.
- [10] 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[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [11] 咎世超,钟瑜,王博,等.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 Yue, WANG Bo, et al. Research on Corrosion and Protection of Glycol in Refrigeration System[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2012, 12(2): 77—80.
- [12] 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.
- [13] 马建军,孙侠生,李喜明.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, LI Xi-ming, et al. Numerical Analysis of Temperature Uniformity for Climatic Test Chamber[J]. Equipment Environment Engineering, 2014, 11(1): 48—53.
- [14] 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.
LIU Hai-yan, MA Jian-jun, ZHANG Hui. Discussion on Design of the Air Handling System in Large Climatic Environmental Test Laboratory[J]. Equipment Environment Engineering, 2014, 11(5): 107—113.
- [15] 王浚.环境模拟技术[M].北京:国防工业出版社,1996.
WANG Jun. Technical Environmental Simulating[M]. Beijing: National Defense Polytechnic Press, 1996.