

工艺与装备

R507/R744 复叠式制冷系统在水产品冷冻中的应用

轩福臣^{a,b}, 谢晶^{a,b,c,d}, 顾众^{b,c,d}

(上海海洋大学 a.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心 b.上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台 c.食品科学与工程国家级实验教学示范中心(上海海洋大学) d.食品学院, 上海 201306)

摘要: **目的** 研究 25 间 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水产品速冻库和 4 间 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水产品低温冷藏库的方案及选型设计, 找出最佳的制冷系统优化设计方案。**方法** 基于 CO_2 制冷剂绿色、高效、节能的优点, 通过 CO_2 压缩机并联技术, 提出用于水产品冻结与冻藏的 R507/R744 复叠式制冷系统, 并在蒸发温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 选用不同制冷剂, 采用 BITZER 压缩机软件, 研究计算不同系统的制冷效率(COP), 并对不同制冷系统的 COP、经济性进行分析。**结果** 该系统相比 R507 制冷系统的 COP 提高了 10%以上, 该系统整体年运行电费平均比国内氨制冷系统节省了 50%以上, 并对这类工程应用中需要关注的安全问题提出了设置备用电机及主安全阀的解决方案。**结论** 在水产品冷冻冷藏中, 通过对不同制冷系统进行制冷效率和年耗电量的对比, 得出选用 R507/R744 复叠式制冷系统, 具有制冷效率更高, 年耗电量更少的优点。

关键词: 复叠式制冷; 水产品; 冷冻; 自然工质; 制冷效率

中图分类号: TB66; F762.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0173-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.024

Application of R507/R744 Cascade Refrigeration System in the Freezing of Aquatic Products

XUAN Fu-chen^{a,b}, XIE Jing^{a,b,c,d}, GU Zhong^{b,c,d}

(a.Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation b.Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation
c.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering
d.College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to study the schemes and type selection design of 25 aquatic product quick-freezing warehouses at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 4 aquatic product low-temperature refrigerators at $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, and find out the best refrigeration system optimization design scheme. Based on the advantages of CO_2 refrigerant such as green, high efficiency and energy saving, R507/R744 cascade refrigeration system was proposed for the freezing and refrigeration of aquatic products with the CO_2 compressor parallel technology. When the evaporation temperature was $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, different refrigerants were selected and the BITZER compressor software were used to study and calculate the refrigeration efficiency (COP) of different systems, and the COP and economy of different refrigeration systems were analyzed. Compared with R507 refrigeration system, the COP of the cascade system was increased by more than 10%. The average annual electricity cost of the cascade system as a whole was over 50% less than that of the domestic ammonia refrigeration system. At the same time, setting

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(2018YFD0400605); 上海市科委平台能力建设项目(19DZ2284000); 上海市科委公共服务平台建设项目(17DZ2293400)

作者简介: 轩福臣(1996—), 男, 上海海洋大学硕士生, 主攻水产品保鲜。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授、博导, 主要研究方向为食品工程。

the backup motor and the main safety valve was put forward for the safety problems that needed to be emphasized in such engineering applications. In the aquatic product refrigeration, the comparison of cooling efficiency and annual power consumptions of different refrigeration systems indicate that, the R507/R744 cascade refrigeration system selected is featured by higher refrigeration efficiency and less annual power consumptions.

KEY WORDS: R507/R744 cascade refrigeration; freezing of aquatic products; natural working fluid; refrigerating efficiency

水产品美味可口,营养价值高,但在常温下易腐败变质,所以其初加工、运输、精加工、包装、贮藏、销售过程都必须处于低温环境中^[1-3]。目前,我国食品冷库容量年增长率超过10%,其中水产品冷冻行业发展尤其迅速^[4]。在水产品速冻加工中,要求制冷系统降温必须快,速冻是要求降温速度能达到5~20 cm/h,或者30 min以内中心温度从-1℃降到-5℃^[5]。氨作为制冷剂,已被大型水产品冷库广泛使用,氨制冷剂虽然是自然工质,但具有毒性、易燃易爆的特性,另一方面,如果氨泄漏后接触到水产品,则会因鱼类体内的还原糖可与氨化合物反应,造成颜色褐变,而且即使是少量的氨泄漏也会造成鱼类体内脂肪氧化、酸败^[6-8]。复叠式制冷系统一般用于-60~120℃的低温冷冻,所用的工质对大部分是R22/R13, R22/R12^[9]。申江等^[10]建立了R507/R744和R717/R744复叠系统热力学模型,对冷凝蒸发器的不同换热温差进行研究,分析结果表明,冷凝蒸发器换热温差对R507/R744复叠系统制冷效率影响更大。靳新春^[11]结合工程案例,分别计算了R507/R744复叠制冷系统与R507双级压缩制冷系统的制冷系数,结果表明,当蒸发温度等于-52℃时,二者的COP几乎相同。Raiza等^[12]对R507/R744复叠制冷系统进行热力学研究,得出R744复叠系统比单一制冷系统的COP提高32%,压缩机输入功率降低23%。将R507(高温系统)(ODP为0, GWP为3985)与CO₂复叠,就可以利用CO₂在低温下制冷效率高、降温快、无毒、不燃烧且价格低廉的优点,实现-35~-50℃的速冻需求,而且可降低初投资的成本^[7],因此,根据CO₂的环保性和经济性,速冻库和低温冷库可以采用CO₂(R744)的复叠系统。

1 R507/R744复叠式制冷系统

R507/R744复叠式制冷系统由CO₂低温压缩机组、R507高温压缩机组、冷凝蒸发器、冷风机、蒸发式冷凝器等单元组成,冷库(除机房外)的制冷剂管路中只有含CO₂制冷剂的单一管路,能保证安全环保无污染。R507/R744复叠系统的高低温级各使用一套独立的制冷系统,CO₂制冷剂到末端冷风机为冷库提供冷量,排出的热量由高温机组吸收经蒸发式冷凝器排出,其原理见图1。

1) 低温级系统原理。CO₂制冷剂在蒸发器中吸

收周围环境的热量而气化,然后被压缩机吸入压缩,高温高压的CO₂制冷剂进入冷凝蒸发器,被高温级的制冷剂冷却,然后CO₂制冷剂进入节流阀节流降压后,重新进入蒸发器蒸发吸热,实现连续制冷。

2) 高温级系统原理。R507制冷剂在冷凝蒸发器中吸收低温级CO₂制冷剂的热量,然后被压缩机吸入,在压缩机进行绝热压缩后进入冷凝器冷凝;然后经节流阀节流降压,随后制冷剂进入冷凝蒸发器与CO₂制冷剂进行换热,往复循环,实现连续制冷。

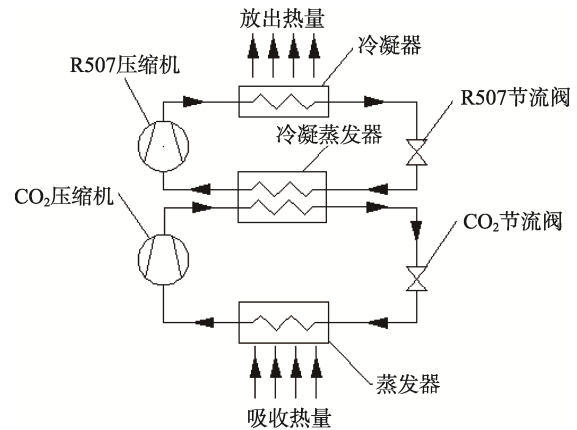


图1 R507/R744复叠制冷系统原理

Fig.1 Principle of R507/R744 cascade refrigeration system

2 CO₂复叠(直膨)制冷系统设计

因为CO₂单位容积制冷量是常用氟利昂制冷剂的6倍,且CO₂导热系数高,液体和蒸气的密度比值小,节流阀节流后制冷剂分配比较均匀,所以R507/R744复叠式制冷系统管路简单、安装及可维护性好、设备体积小^[13]。R507/R744复叠系统的机房占地面积可减少1/3以上,而且直接膨胀供液方式可有效降低制冷剂充注量,减少管路直径及保温材料消耗^[14]。

CO₂低温工况下具有其他制冷剂无法比拟的能效,在1个标准大气压(1 atm=101.325 kPa)下,CO₂的沸点为-56.6℃,可以获得-50~-40℃的温度,同样低温条件下,CO₂的饱和压力比NH₃, R134a高,低温下不会产生负压^[15],因此,采用CO₂复叠式制冷循环可以在蒸发温度较低条件下工作,CO₂复叠式制冷系统在-35℃温度及以下运行时效率更高,制冷系统的尺寸管路可以设计得更紧凑,机房和设备间占地更省^[16]。

该工程设计方案为 25 间-30 °C 水产品速冻库和 4 间-25°C 的水产品低温冷藏库。制冷系统方案设计以高安全可靠、高稳定性、节能、降低投入成本为设计指导，25 间速冻库为一个系统，制冷循环采用 CO₂ 复叠桶泵供液方式，低温高效率大冷量，速冻效果好；4 间冷藏库用另一个系统，采用 CO₂ 直膨供液，末端采用大换热面积小风量冷风机，以提高系统整体能效同时降低冻藏过程的干耗。

2.1 工程概况及负荷计算

根据当地气象资料，室外计算温度夏季通风取 32 °C，夏季空调日平均取 30 °C，室外计算最热月平均相对湿度取 83%，夏季通风相对湿度取 65%，冷间具体技术信息及负荷计算参数详见表 1。

2.2 设备选型

2.2.1 CO₂ 制冷机组的选型

由于 CO₂ 临界压力 (7.38 MPa) 高，导致系统的工作压力会非常高，系统的结构强度特别是动态强度设计非常重要。当长时间停用时，随着温度的升高系统压力会有突增的情况出现，需安装针对 CO₂ 储液罐

的冷却装置，因而 CO₂ 制冷压缩机的使用条件与氟利昂制冷压缩机有所差别^[17]。该工程 CO₂ 压缩机选用进口的半封式活塞压缩机，基于压缩机运行稳定性的要求，对 CO₂ 压缩机采用并联设计，并采用变频技术，根据库温变化，调节制冷速度，从而提高了系统的稳定性和制冷效率，且减小了温度波动范围，CO₂ 复叠主机选型见表 2。

2.2.2 冷风机选型

对于不同库温、不同食品，冷库保鲜的侧重点不同，在选择制冷末端的换热温差和冷风机翅片间距时，需要根据具体情况确定，传热温差越小则库内相对湿度越高、食品干耗越小。该工程速冻库共 25 间，每间安装 2 台浙江某公司生产的 CO₂ 吊顶冷风机，单台制冷量为 100 kW，满足负荷要求；冷藏库共 4 间，每间安装 2 台浙江某公司生产的 CO₂ 吊顶冷风机，单台制冷量为 43.6 kW，满足负荷要求。该 CO₂ 吊顶冷风机采用独特小管径设计，可降低制冷剂灌注量，并采用微风出口设计，可大幅度降低干耗；速冻库冷风机和冷藏库冷风机均采用水冲霜系统，以满足节能的需求。冷风机的选型见表 3。

表 1 冷间负荷计算参数
Tab.1 Cooling room load calculation parameters

编号	冷间名称	库温/°C	容量/t	数量/间	进货量/%	降温时间/h	工况/°C	设备负荷/kW	机械负荷/kW
1	速冻库	-30	10	25	100	6~8	-37/35	4464	1971
2	冷藏库	-25	1558	4	5	24	-32/35	317	264

注：工况栏/前表示蒸发温度，/后表示冷凝温度；容量=冷库公称容积×冻品密度×冷库容积利用系数

表 2 主机设备选型
Tab.2 Main engine equipment selection

系统划分	库温/°C	主机设备	工况/°C	制冷量或散热量/kW	总输入功率/kW
速冻系统	-30	CO ₂ 复叠低温压缩机 (3 台)	-37/-5	2090	550
		低温桶泵机组 (1 台)	-37		16
		R507 复叠并联压缩机 (2 台)	-10/35	2664	898
		冷凝蒸发机组 (1 台)	-10/-5		5
		蒸发式冷凝器 (2 台)	35	3880	75
冷藏系统	-25	CO ₂ 复叠并联一体式机组 (1 台)	-30/35	287	178
		蒸发式冷凝器 (1 台)	35	960	10

注：工况栏/前表示蒸发温度，/后表示冷凝温度

表 3 冷风机的选型
Tab.3 Selection of cooling fan

冷间	库温/°C	设备负荷/kW	末端		
			形式	单台制冷量/kW	单台功率/kW
速冻库	-30	4464	CO ₂ 吊顶冷风机 (50 台)	100	13.6
冷藏库	-25	317	CO ₂ 吊顶冷风机 (8 台)	43.6	3.4

2.2.3 系统阀件的选型

全自动控制制冷系统中膨胀阀、电磁阀、截止阀等阀件必须满足最高运行压强为 45 kPa,系统中所用阀件选自丹佛斯;干燥过滤器满足最高运行压强 50 kPa,安全阀泄压值为 40 kPa。由于 CO₂ 系统的高静压特性,系统关键部件必须设计维修保养使用的截止阀及保护用的安全阀。当系统压力上升时释放 CO₂,系统部分的关闭功能用带维修通道连接专用角阀实现,角阀运动的同时可激活辅助安全阀。每个蒸发回路组都设置辅助安全阀,用以保护所有冷风机,每个冷风机都可以被独立出来以便维修。

3 R507/R744 复叠系统应用分析

3.1 R507/R744 复叠系统问题性分析研究

虽然 CO₂ 无毒,但是发生 CO₂ 泄漏后,因密度比空气大,会集聚在空间底部,当 CO₂ 体积分数超过 2%时,会使人窒息^[18]。为此,可在 CO₂ 制冷剂泄漏时可能积聚的地方如机房、地下室或地势低的房间设置 CO₂ 检测探头。

CO₂ 制冷系统具有高静压的特性,制冷系统的任何部分都不得随意关闭,当发生非预期的停电事故时,CO₂ 制冷剂在系统内停止循环流动,且同时 CO₂ 制冷剂会与周围环境进行热量交换,致使 CO₂ 温度上升,当达到临界温度(31.3 °C)后,CO₂ 全部气化,系统压力会出现突增,当系统压力上升到上限压力,制冷系统会有爆炸的风险,因此,可配备独立的备用柴油发电机组在断电时维持系统运行,以及在管路系统设计时采用分布式的安全阀。

CO₂ 系统管路承受比氟利昂制冷剂更高的压强,系统所有压力容器的设计压强和工作压强应高于或等于 40 kPa,测试压强高于或等于 45 kPa。当 CO₂ 制冷机组停机后,为了防止 CO₂ 制冷剂压力突增破坏制冷机组,主安全阀要求处于永久激活状态,其可起到保护压缩机吸气侧(箱体)、贮液器、蒸发器、过冷却器、管路、阀件的作用;主安全阀出口设置在吸气管路和贮液器处并通过管路连接到系统,触发时释放 CO₂ 到大气中。

3.2 不同制冷系统经济性分析研究

因 CO₂ 压缩机效率高,且 CO₂ 制冷剂本身换热能力强,并且对系统中的中间换热器盘管结构的优化也可以提高制冷效率。在蒸发温度为-30 °C条件下,根据 BITZER 压缩机选型软件,选用不同的制冷剂和压缩机,分别可以得到不同的高温级制冷系数(用 C₁ 表示)和低温级制冷系数(用 C₂ 表示),而复叠系统的 COP(用 C₃ 表示)计算见式(1)^[19]。

$$C_3 = \frac{Q_0}{N} = \frac{C_1 C_2}{1 + C_1 + C_2} \quad (1)$$

式中:Q₀为制冷量(kW);N为总功率(kW)。

R507/R744 复叠制冷系统和 NH₃/R744 复叠制冷系统、NH₃/R744 载冷制冷系统、R507/R744 载冷制冷系统、R507 制冷系统相比,在蒸发温度为-30 °C,冷凝温度为 35 °C,由 BITZER 压缩机选型软件或式(1)计算得出的制冷效率(COP)分析见图 2。

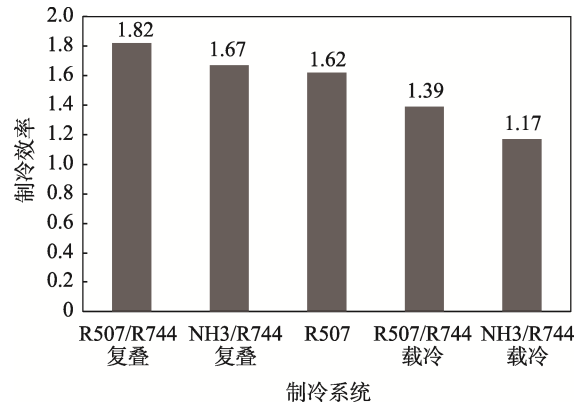


图 2 R507/R744 复叠制冷系统与其他制冷系统 COP 对比
Fig.2 COP comparison of R507/R744 cascade refrigeration system with other refrigeration systems

对 R507/R744 复叠制冷系统进行计算研究,研究结果可见,与氟利昂系统相比整体运行能耗显著降低,其中比 R507 制冷系统的 COP 提高了 10%以上。

根据浙江当地夏季气象条件,室外环境温度为 30 °C,要达到相同的蒸发温度(-30 °C),根据该工程的用户反馈,R507/R744 复叠式制冷系统冷冻水产品年平均耗电量为 45 kW·h/m³,相同上述工况条件下,该工程冷冻水产品年平均电费与国内外氨系统年平均电费^[20]的对比分析,见图 3。R507/R744 复叠式系统整体年使用平均电费比国内氨系统减少

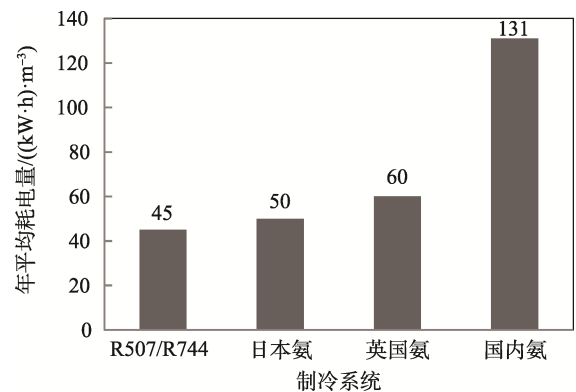


图 3 R507/R744 复叠系统与氨系统国内外平均年耗电量对比

Fig.3 Comparison of average annual power consumption of R507/R744 cascade system and ammonia system at home and abroad

50%以上,这是因为 CO₂ 制冷剂本身具有优良的热力学性质,加上 CO₂ 压缩机采用并联变频技术,不仅可以降低运行费用,而且 R507/R744 复叠式制冷系统若使用冷热联供技术,还可以减少锅炉的使用,这对保护环境也起到重要的意义。R507/R744 复叠式制冷系统相比氨制冷系统,其人工维护简单、冷媒灌注量降低,机房占地面积减少,CO₂ 复叠式制冷系统的经济性能远优于氨制冷系统。有文献报道 CO₂ 复叠式制冷系统其平均年运行成本可减少 13.9%^[21]。

4 结语

R507/R744 复叠制冷系统经过工程实践研究,尤其配备有变频的 CO₂ 压缩机并联机组,在确保水产品安全速冻的前提下,R507/R744 复叠制冷系统能够高效、绿色、节能、稳定的运行,这降低了系统能耗和人工成本,可以为企业和社会带来很大的经济和环境效益。R507/R744 复叠制冷系统是一种值得推广使用的制冷技术,在不久的将来,随着 CO₂ 制冷剂研究的更加深入,R507/R744 复叠制冷技术将得到更广泛的使用,从而带来更大的经济和环境效益。

参考文献:

- [1] 蔡路昀, 台瑞瑞, 曹爱玲, 等. 冷冻对水产品品质的影响及其保持技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 308—313.
CAI Lu-yun, TAI Rui-rui, CAO Ai-ling, et al. Research Progress on the Effect of Refrigeration on Aquatic Product Quality and Its Maintenance Technology[J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(2): 308—313.
- [2] 戈阳, 周应恒, 胡浩. 日本水产品冷链物流发展及对中国的启示[J]. 世界农业, 2017, 46(6): 181—190.
GE Yang, ZHOU Ying-heng, HU Hao. Development of Cold Chain Logistics of Japanese Aquatic Products and Its Enlightenment to China[J]. World Agriculture, 2017, 46(6): 181—190.
- [3] 贺羽西. A 企业网购水产品冷链配送服务质量满意度影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 2—8.
HE Yu-xi. A Study on the Influence of Service Quality Satisfaction on Cold Chain Delivery of Aquatic Products Online by Enterprise A[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 2—8.
- [4] 刘峰, 李春雷. 第 6 章冷风机产品市场分析[J]. 制冷技术, 2019, 39(S1): 63—68.
LIU Feng, LI Chun-lei. Chapter 6 Market Analysis of Air Cooler Products[J]. Refrigeration Technology, 2019, 39(S1): 63—68.
- [5] 何丽. 水产品的冷库冷冻保鲜技术之观察[J]. 现代农机, 2017, 34(1): 47—49.
HE Li. Observation on Refrigerated Preservation Technology of Aquatic Products[J]. Modern Agricultural Machinery, 2017, 34(1): 47—49.
- [6] 赵育川. 氨制冷剂冷库当前发展趋势[J]. 制冷技术, 2015, 35(4): 66—70.
ZHAO Yu-chuan. Current Development Trend of Ammonia Refrigerant Cold Storage[J]. Refrigeration Technology, 2015, 35(4): 66—70.
- [7] 王昕. 冷库氨制冷系统的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 14—20.
WANG Xin. Application Research of Ammonia Refrigeration System in Cold Storage[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 14—20.
- [8] 李新生, 严新龙, 高徐梅, 等. 模拟涂布液体体系中利用美拉德反应降低烟草薄片还原糖含量的方法研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(8): 2450—2451.
LI Xin-sheng, YAN Xin-long, GAO Xu-mei, et al. Study on Reducing Sugar Content in Tobacco Flakes by Maillard Reaction in Simulated Coating Liquid System[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(8): 2450—2451.
- [9] 吕静, 王伟峰, 周传煜. 二氧化碳复叠式制冷循环的热力性能分析[J]. 低温工程, 2008, 29(4): 38—41.
LYU Jing, WANG Wei-feng, ZHOU Chuan-yu. Thermal Performance Analysis of Carbon Dioxide Cascade Refrigeration Cycle[J]. Cryogenic Engineering, 2008, 29(4): 38—41.
- [10] 赵力蕃, 申江, 胡开永, 等. NH₃/CO₂ 和 R507/CO₂ 复叠式制冷系统性能模拟分析[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 95—100.
ZHAO Li-fan, SHEN Jiang, HU Kai-yong, et al. Simulation Analysis of Performance of NH₃/CO₂ and R507/CO₂ Cascade Refrigeration Systems[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2019, 47(3): 95—100.
- [11] 靳新春. R507/R744 复叠制冷系统与 R507 双级压缩制冷系统的对比分析[J]. 冷藏技术, 2018, 41(4): 55—57.
JIN Xin-chun. Comparative Analysis of R507/R744 Overlapping Refrigeration System and R507 Two-stage Compression Refrigeration System[J]. Refrigeration Technology, 2018, 41(4): 55—57.
- [12] LUIZ H P, RAIZA B C, STELLA M R, et al. Thermodynamic Performance Evaluation of a Cascade Refrigeration System with Mixed Refrigerants: R744/R1270, R744/R717 and R744/RE170[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 10(106): 201—212.
- [13] YING W, HAN B W, LIN H Q, et al. Laminated Mica Nanosheets Supported Ionic Liquid Membrane for CO₂ Separation[J]. Nanotechnology, 2019, 8(6): 2—8.
- [14] 郭永辉. 直接膨胀式地源热泵单 U 换热器传热特性及系统性能分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012: 5—10.
GUO Yong-hui. Heat Transfer Characteristics and System Performance Analysis of Single U Heat Exchanger of Direct Expansion Ground Source Heat Pump[D]. Changsha: Hunan University, 2012: 5—10.
- [15] 李丹. CO₂ 复叠式制冷系统的应用研究[D]. 哈尔滨:

- 哈尔滨商业大学, 2014: 15—30.
- LI Dan. Application Research of CO₂ Cascade Refrigeration System[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2014: 15—30.
- [16] 马一太, 代宝民, 田华, 等. CO₂/R290 复叠制冷系统热经济性及焓最优化分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(5): 797—803.
- MA Yi-tai, DAI Bao-min, TIAN Hua, et al. Thermal Economy and Exergy Optimization Analysis of CO₂/R290 Cascade Refrigeration System[J]. Journal of Solar Energy, 2014, 35(5): 797—803.
- [17] WANG D, LIU Y R, KOU Z L, et al. Energy and Exergy Analysis of an Air-source Heat Pump Water Heater System Using R744/R170 Mixture as an Azeotropic Refrigerant for Sustainable Development[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 5—11.
- [18] 邢振禧, 晁风芹, 任传林. CO₂/NH₃ 复叠式制冷在冷冻冷藏工程中的应用[J]. 山东商业职业技术学院学报, 2013, 13(5): 106—108.
- XING Zhen-xi, CHAO Feng-qin, REN Chuan-lin. Application of CO₂/NH₃ Cascade Refrigeration in Refrigeration Engineering[J]. Journal of Shandong Vocational and Technical College of Commerce, 2013, 13(5): 106—108.
- [19] 于韶山, 王景刚, 鲍玲玲. 带回热器的 R404a/R744 复叠式制冷系统的理论分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(4): 75—77.
- YU Shao-shan, WANG Jing-gang, BAO Ling-ling. Theoretical Analysis of R404a/R744 Cascade Refrigeration System with Regenerator[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(4): 75—77.
- [20] 涂中强, 魏龙. 氨制冷系统在国内冷库中的应用分析[J]. 洁净与空调技术, 2010, 16(4): 59—61.
- TU Zhong-qiang, WEI Long. Application Analysis of Ammonia Refrigeration System in Domestic Cold Storage[J]. Clean and Air Conditioning Technology, 2010, 16(4): 59—61.
- [21] 马一太, 代宝民, 田华, 等. CO₂/R290 复叠制冷系统热经济性分析及最优化分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(5): 795—801.
- MA Yi-tai, DAI Bao-min, TIAN Hua, et al. Thermal Economy and Optimization Analysis of CO₂/R290 Cascade Refrigeration System[J]. Journal of Solar Energy, 2014, 35(5): 795—801.