

超低温制冷装置的研究现状和进展

Research status and progress of ultra-low temperature refrigeration plant

郭耀君^{1,2} 谢 晶^{1,2} 朱世新^{1,2} 王金锋^{1,2} 汤元睿^{1,2}

GUO Yao-jun^{1,2} XIE Jing^{1,2} ZHU Shi-xin^{1,2} WANG Jin-feng^{1,2} TANG Yuan-rui^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工与贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation, Shanghai 201306, China)

摘要: $-40 \sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温被广泛应用于食品加工、石油化工、生物制药、科学实验等领域。文章主要介绍了超低温制冷系统及其所用制冷剂和压缩机的研究进展, 通过对国内外的技术分析比较, 指出未来超低温制冷装置的发展可从自复叠制冷系统优化、制冷剂替代采用天然工质、压缩机变频技术和 CO_2 压缩机性能等方面进行进一步研究。

关键词: 超低温; 制冷系统; 制冷剂; 替代; 压缩机

Abstract: Ultralow temperature of $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ is mainly used in the fields such as food processing, petrochemical industry, biological pharmacy and scientific experiments. The ultralow temperature refrigeration system and the research progress with refrigerant and compressor were introduced. Based on the comparison with the current research at home and abroad, the future development of ultra-low temperature refrigeration unit can be optimized from the auto-cascade refrigeration system, and the natural refrigerants as a substitute can also be concerned, further studies for the compressor inverter technology and other aspects of CO_2 compressors' performance.

Keywords: ultralow temperature; refrigeration system; refrigerants; alternative; compressor

超低温是指在食品加工、工业生产过程所用到的 $-40 \sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围^[1]。这个温度范围广泛应用于高档水产品(如金枪鱼)的速冻储藏、药品(如冬虫夏草)的储藏和生产、特殊食品(如冰淇淋)的加工、低温生物(如稀有物种种子)保存和电子元件在低温下性能测试。另外, 它还可以为材料的低温下性能试验提供所需要的冷环境, 例如对乙烯液化装置低温管道的焊缝进行 $-46 \sim -58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的低温冲击试验等^[2]。文章重点介绍了实现超低温的制冷方式、超低温制

冷系统中环保制冷剂的应用、超低温制冷用压缩机研究进展、超低温制冷系统的应用等方面的研究现状, 旨在为中国超低温制冷装置的发展提供依据。

1 实现超低温的制冷方式

在实际运用中获得超低温所需的制冷方式主要有双级压缩制冷循环、复叠式制冷循环以及自复叠式制冷循环等系统。其中复叠式制冷是获取该低温段最主要的方法^[3]。

1.1 双级压缩制冷循环系统

双级压缩制冷系统能够有效减少单级压缩制冷循环中由于压比过大引起的不利因素, 其制冷剂的压缩过程由高、低压两级压缩完成; 根据节流级数分为一级节流和二级节流两种, 同时又根据制冷剂液体和蒸汽中间冷却方式不同分为中间完全冷却和中间不完全冷却。不同的制冷剂可以达到不同的低温, 目前常用的 R22、R507 和 R717 可分别获得 $-70, -70, -57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。

目前, 对双级压缩制冷循环的研究主要集中在中间冷却器的优化^[4,5]。田华等^[6]建立了带中间冷却器的 CO_2 双级压缩系统, 通过实验验证了优化后的中间冷却器可以实现最优压缩机排气压力和最优中间压力。针对当前超低温冷藏库的双级压缩制冷系统频繁启停的问题, 杨永安等^[7]提出一种将多台压缩冷凝机组并联的一次节流中间完全冷却双级压缩制冷系统, 通过调节制冷剂流量来控制冷量, 有效解决了双级压缩制冷系统频繁启停的问题并能达到节能效果。

1.2 两级复叠式制冷循环系统

两级复叠式制冷系统由两个不同制冷剂工作的制冷系统组合而成, 其中, 高温系统中的制冷剂蒸发用来冷凝低温系统的制冷剂, 高温环路的蒸发器和低温环路的冷凝器合成一个设备, 称为冷凝蒸发器^[8]。

两级复叠制冷系统低温级润滑油的回油效果直接影响到系统的性能和可靠性^[9]。Chung 等^[10]对高温级使用 R22

基金项目: “十二五”国家支撑计划项目(编号: 2012BAD38B09); 上海市科委(编号: 13dz1203702)

作者简介: 郭耀君(1987—), 男, 上海海洋大学在读硕士研究生。

E-mail: 616885141@qq.com

通讯作者: 谢晶

收稿日期: 2014-10-20

和低温级使用 R23 的复叠制冷系统的启动特性进行了试验研究,探究低温级的压缩机吸气压力和排气压力以及蒸发器入口压力对整个复叠制冷系统整体温度变化的影响,结果表明,低温级压缩机的排气压力和吸气压力以及蒸发器入口压力等都对复叠制冷系统所能取得的最低温度影响较大。牛宝联等^[11]对复叠制冷系统高温级环路和低温级环路不同的启动间隔进行了试验,结果表明不同的时间间隔对复叠系统整体能耗影响不同,较长的时间间隔导致了高温级环路浪费了大量能量;而适当的时间间隔既能达到高温级环路耗能比较适中的效果,又能达到低温级环路迅速降温的目的;如果要实现较短的时间间隔,则需要保证低温级排气压力在安全的范围内,否则这种较短时间间隔启动不可行。程有凯等^[12]对双级压缩制冷系统和复叠制冷系统在蒸发温度 $-60\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行了比较分析,分析指出,在 $-60\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内复叠式制冷系统在压缩机效率、蒸发温度上表现出了更大的优势。因此,复叠制冷系统在低于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸发温度时具有更高的应用价值和发展前景。

1.3 自复叠式制冷循环系统

相对于复叠制冷系统,双级压缩制冷系统具有结构复杂和成本较高等特点,同时双级压缩系统因为使用同一制冷剂,往往会受到制冷剂凝固点、系统压比、蒸发压力过低等因素的限制,所以双级压缩制冷系统一般用于制取蒸发温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的低温区^[13]。而复叠制冷系统由于采用两套独立的高低温度回路,冷量藕合要求高、高低温度回路启动时间间隔控制难度大,另外低温回路需要安装油分离装置解决压缩机回油困难的问题^[14]。双级压缩系统和复叠系统所用的压缩机必须是多缸压缩机或是串联多台的压缩机,因此以上两种制冷系统不是小型超低温制冷装置的最佳选择。

而采用一台压缩机进行一次压缩的自复叠制冷系统是获得 $-40\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温区的另一种重要方式^[15],通过分凝或者分馏装置将非共沸制冷剂自然分离、多级复叠的方法,实现制取低温的目的。这种方式极大地简化了制冷系统,还达到了减小制冷装置体积的效果,十分适用于小型制冷装置^[16]。

Young 等^[17]通过一个可控调节阀将压缩机出气口与气液分离器的底部相连,对自复叠制冷系统结构进行了改进,通过调节阀的连接使高温高压制冷剂进入气液分离器,根据调节阀的不同开度达到制冷剂变容量调节的效果,以此实现

自复叠制冷系统在较低压比的工况下仍能获得较大的制冷量。陈光明等^[18]搭建了一套低温恒温槽系统并成功地引入了精馏型自复叠制冷循环,进一步拓宽了自复叠制冷循环的应用范围。芮胜军等^[19]针对自复叠制冷系统在刚开机时排气压力和排气温度过高的问题,提出了一种压力调节和控制方法,通过旁通支路调节方式达到了系统工质在开机初期快速冷却的效果。

2 超低温制冷系统中环保制冷剂的应用

制冷剂替代技术的发展推动着制冷技术的进步。以前超低温制冷系统经常使用的制冷剂是 R22、R13 和 R501、R502、R503 系列,其中以 R22、R13 和 R502 使用最广泛^[20]。根据《蒙特利尔协议》,制冷剂的消耗臭氧潜能值(ozone depression potential, ODP)和全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)是两项重要的考核指标,基于此 R13 和 R502 于 2010 年完全淘汰;R22 也是要被淘汰的工质,因此寻找新的环保替代工质是超低温制冷技术发展的趋势。

2.1 自然工质的应用

自然工质大体上可分为两类:① 天然的碳氢类物质,如丙烷、丁烷等;② 各种天然无机物,如 CO_2 、 NH_3 等^[21]。

其中 CO_2 、 NH_3 最具竞争力。 NH_3/CO_2 复叠式制冷系统的出现,解决了两种工质独立作为超低温制冷系统制冷剂的缺点。Pettersen 等^[22]研究表明,与 NH_3 双级压缩系统相比,高温级采用 NH_3 和低温级采用 CO_2 的复叠压缩系统可获得 $-45\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温区。瑞士雀巢公司在法国的 Beauvi-ai 冷库于 20 世纪 90 年代中期就已经开始采用 NH_3/CO_2 复叠式系统^[23]。从 2008 年开始到 2013 年 1 月,美国市场上安装了超过 25 套 NH_3/CO_2 复叠式超低温制冷装置^[24]。

以 R290 为代表的碳氢化合物是目前国际上比较看好的长期替代 R22 的碳氢类化合物,R290 与 R22 的物性相似,二者主要性能比较见表 1。

马一太等^[25]对以 R290/ CO_2 与 R22/R13 为制冷剂的复叠式制冷循环进行了热力学分析,分析指出,R290/ CO_2 复叠式制冷循环的性能系数(coefficient of performance, COP)比 R22/R13 的低,提出在 CO_2 低温环路安装膨胀机代替热力膨胀阀,从而提高 R290/ CO_2 系统的 COP。

Christensen 等^[26]对超市用 R290/ CO_2 复叠式制冷系统

表 1 R22 和 R290 主要性能比较[†]

Table 1 Main performance comparison between R22 and R290

制冷剂	化学分子式	标准沸点/ $^{\circ}\text{C}$	凝固点/ $^{\circ}\text{C}$	临界压力/MPa	ODP	GWP	燃烧范围
R22	CHClF_2	-40.78	-160	4.974	0.045	1 900	不燃
R290	C_3H_8	-42.07	-187.7	4.254	0	0	2.2%~9.5%(V/V)

[†] ODP 是全球变暖潜能值,是描述物质对平流层臭氧破坏能力的一种量值;GWP 是全球变暖潜能值,用来表示和比较消耗臭氧层物质对全球气候变暖影响力的大小的一种量值。

(-40~-60℃)进行能耗和经济性分析后发现,与传统的 R404A 系统相比,采用 R290/CO₂ 复叠系统初投资增加 20%,随着研究的深入和技术的逐渐成熟,初投资的增加降为 10%左右,而与原来的 R404A 制冷系统相比,系统整体能耗可减少 5%。

以 CO₂、氨、R290 为代表自然工质将是解决环境问题的最终方案。虽然当前欧美一些超市已经安装了 R717/CO₂、R290/CO₂等超低温复叠制冷系统,但是此类制冷剂在设备运行压力、可燃性、刺激性等方面的问题,限制了其在全球范围内的推广。所以降低天然工质运行设备成本、寻找与之相匹配的阻燃剂以及减小爆炸极限是扩大天然工质替代范围的一条有效出路。

2.2 HFC 工质的应用

目前,常用于双级或者复叠制冷系统的 HFC 类环保替代制冷剂主要有 R134a、R404A、R507、R116、R508B 和 R23。6 种制冷剂的物性对照见表 2。

表 2 6 种制冷剂物性对照
Table 2 Comparison of physical property of six kinds of refrigerant

制冷剂	分子式(组分)	ODP	GWP
R134a	CH ₂ FCF ₃	0	1 600
R404A	R125/R143a/R134a (44/52/4)	0	4 540
R507	R125/R143a (50/50)	0	4 600
R116	CF ₃ CF ₃	0	11 900
R508B	R23/R116 (46/54)	0	11 940
R23	CHF ₃	0	12 000

R23、R116 与 R13 的沸点都在-80℃左右,彼此很接近,是 HFC 物质中替代 R13 的制冷剂最有可能的选择。在实际应用中发现,R23 具有破坏压缩机运动部件和分解润滑油等问题,长期使用还可导致电机线圈短路^[27]。此外 R23、R116 和 R508B 的 GWP 值很高,故只能作为过渡性制冷剂使用。

对于 R23、R508B 的试验研究主要集中在其作为复叠系统低温环路制冷剂的循环性能上。Agnew 等^[28]在复叠制冷系统中以制冷剂 R717/R508B 替代 R12/R13 并进行了模拟运行,模拟结果表明在-45~-60℃的超低温范围内,R717/R508B 具有更好的循环性能。Keumnam 等^[29]研究了在复叠制冷系统低温环路使用 R23 作为 R13 替代物的循环性能。Robert 等^[30]研究了在蒸发温度为-50~-70℃,制冷剂为 R134a/R508B 的复叠制冷系统在蒸发器中的质量流量为 50~70 g/min。

随着对 R134a 制冷剂应用推广,有不少学者将其应用到了低温系统;其中 Kilicarslan^[31]通过理论计算和实验验证 R134a 制冷剂可以应用在多种复叠压缩制冷系统中并作为高温环路制冷剂。Murat 等^[32]通过对以 R134a 作为制冷剂

的单级制冷系统和以 R134a/R508B 的复叠制冷系统进行了比较,分析指出复叠制冷系统可以实现更低的蒸发温度(-50~-75℃)和更高的单位容积效率。

R404A 和 R507 在超低温系统中是 R502 的中长期替代品^[33]。孙艳秀等^[34]对 R404A、R507 和 R22 在双级压缩制冷系统中的运行性能进行模拟,模拟结果表明:R404A 和 R507 的各项性能比较接近,另外双级压缩系统采用 R404A 和 R507 达到的低温范围是-45~-75℃,比 R22 更广。王维等^[35]完成了一套采用工质 R404A/R23 替代 R22/R13 的复叠制式系统试验机组的设计。试验结果表明,在-45~-60℃内,使用替代工质 R404A/R23 的系统较原系统的制冷量略有降低,但其它系统运行参数均优于 R22/R13 系统,系统的可靠性大大提高。文献^[36]、^[37]通过对 R507 和 R502 试验研究,发现在相同的低温工况(蒸发温度-40℃)下,两者的 COP 相当,但 R507 的单位容积制冷量略高于 R502。

HFC 类工质的 ODP 为 0,但其温室效应高于天然工质,低于 CFC 类工质,仍属于京都协议所规定的温室气体;但是根据测算,其排量在全球温室气体排放中所占比重很小。当前 HFC 类工质替代最大问题是超低温系统润滑和压缩机匹配的问题,若能解决好这些问题,选择 HFC 类工质作为超低温制冷系统中长期替代制冷剂还是不错的选择。

3 超低温制冷用压缩机研究进展

3.1 压缩机变频技术

在实际运行过程中,压缩机能耗几乎占了电机输入功率的 1/3^[38],应作为节能考虑的主要切入点。压缩机变频技术在超低温制冷系统中的应用已取得了一些进展^[39]。

杨昭等^[40]通过实例分析得出,变频压缩机虽然初投资较大,但良好的节能效果使得其在超低温制冷系统运行过程中具有较高的投资回报率,应用前景广泛。杨光等^[41]在较大冷量范围的-40~-55℃工况下,分析比较了活塞式压缩机和螺杆式压缩机的 COP 值以及配置的相应功率之后发现,在较大制冷量时选用螺杆式压缩机具有明显的节能效果。王衍智等^[42]研究了超低温装置中常用的几种形式制冷机组的原理和产品性能对比,在对单机双级变频螺杆机组的实测数据分析后发现,在-40~-65℃速冻装置中,单机双级变频螺杆机组表现出了效率高、降温快的优势,和市场上的同类产品相比具有突出的节能效果。蔡宗莲等^[43]针对超低温复叠制冷系统设计了一种复叠式螺杆压缩机组的自动控制装置,通过变频器和滑阀分别控制高、低温螺杆压缩机实现了制冷量调节,两种能量调节方式的有机组合完成了对整个制冷系统的制冷量调节,使整个制冷压缩机组能够在多种工况条件下达到节约能源、降低成本的良好效果。

由于节能减排的需要,螺杆制冷压缩机的节能改进将会受到越来越多的关注。其中,变频螺杆制冷压缩机由于其优越性能具有良好的发展前景。然而目前大型变频器的成本是变频螺杆制冷压缩机的成本的 2 倍左右,变频器的高价格

限制了变频螺杆制冷压缩机的发展。可见,降低变频器成本将成为今后变频螺杆制冷压缩机研发的主要方向。

3.2 CO₂ 压缩机研究

CO₂ 压缩机是 CO₂ 复叠式超低温制冷系统的核心部件。

CO₂ 压缩机具有运行压力高、压差大、运动部件间隙难以控制、润滑较困难等不足^[44]。因此 CO₂ 压缩机的研究开发一直是 CO₂ 制冷技术应用推广的难点。目前国内外 CO₂ 压缩机的研究进展见表 3。

表 3 国内外 CO₂ 压缩机的研究及应用
Table 3 Research and application of domestic CO₂ compressors

时间	研究单位	研究方向	研究成果
2002 年	英国伦敦城市大学 ^[45]	压缩机优化	开发了用于 CO ₂ 冷媒的螺杆式压缩机
2004 年	日本松下公司 ^[46]	压缩机结构	开发了带有动涡盘背压调节机构的 CO ₂ 变频涡旋压缩机
2004 年	日本 SANYO 公司 ^[47]	超低温制冷装置	开发了 CO ₂ 两级压缩滚动转子式全封闭变频压缩机
2004 年	上海交大制冷研究所 ^[48]	制冷装置优化	开发出了车用斜盘式 CO ₂ 压缩机样机
2008 年	上海交大机械动力学院 ^[49]	压缩机优化	开发了具有中间冷却两级压缩全封闭旋转式 CO ₂ 压缩机样机
2013 年	上海理工大学制冷研究所 ^[50]	制冷测试技术优化	设计开发了 CO ₂ 跨临界压缩机性能试验台

因此,不管是基于加快中国在 CO₂ 压缩机方面的研究速度,还是出于对环境保护的考虑,中国都必须加大 CO₂ 压缩机的研制开发力度,并建立和完善与之配套的性能测试系统,为 CO₂ 压缩机样机和成品的性能改善进一步提供试验依据,最终加速 CO₂ 制冷技术在中国的发展和成熟。

4 超低温制冷系统的应用

超低温制冷系统在食品加工保藏方面的应用主要在速冻加工上。速冻就是迅速冷冻使食物以最短的时间通过最大结晶区,并形成均匀分布的细小冰晶,对细胞组织损伤较小,从而保存时间较长。其最大优点就是使食品在解冻后基本能保持原有的色、香、味,同时使食品营养最大限度地保存下来,可以达到错开季节,提升食品价值,创造更高经济效益的超低温^[51]。

4.1 水产品的冷冻冷藏

超低温最典型的应用就是金枪鱼的冷冻冷藏链的开发。金枪鱼是大洋性水产品中的珍品,其鱼肉因血红素含量高而呈鲜红色,且具有高蛋白、低脂肪等优点,同时富含维生素、不饱和脂肪酸(EPA 和 DHA)以及牛磺酸,其中 EPA 为金枪鱼所特有的营养物。因此基于对金枪鱼肉质保障,金枪鱼贮藏必须保证-55~-65℃的超低温环境^[52]。而超低温制冷装置是金枪鱼渔业发展的关键,目前金枪鱼远洋渔业作业船所用低温冻藏制冷系统一般采用活塞式单机双级压缩制冷系统,采用 R22 作制冷剂^[53]。杨利艳等^[54]指出双级复叠速冻系统(-75℃)与单级压缩制冷系统(-18℃)相比,更能延长凡纳滨对虾的储藏时间并保证其新鲜品质。

4.2 淀粉及淀粉类食品的低温冷藏

淀粉凝沉是制约淀粉类食品行业发展的瓶颈问题,而温度是影响淀粉凝沉的主要因素。Kelekci 等^[55]通过带有自复叠制冷系统的小型低温冷冻装置进行试验,发现-60℃下淀粉基本不发生凝沉现象,结论认为小麦粉饼在-60℃贮

藏能长期保持面饼的品质。超低温制冷系统在淀粉及淀粉类食品低温贮藏方面应用将会有很大的发展前景。

4.3 其他方面的应用

Bassols 等^[56]研究指出两级复叠式制冷系统在咖啡深加工过程中可提供-55℃低温冷冻环境。此外,超低温制冷系统还可以应用在科学试验和工业生产中。钢筋、混凝土结构正被越来越多地应用于超低温环境领域,实验室通常利用复叠式制冷系统创造的-50~-80℃低温环境对钢筋与混凝土粘结性能开展研究^[57]。在化工生产过程中,从产生的燃料气中回收液化石油气则需要-50℃的制冷温度,现有的天然气液化领域普遍采用-40℃的低温将丙烷预冷。

5 展望

近年来中国超低温制冷装置的研究已经取得了一定进展,但由于起步较晚,以日本和欧美为主的发达国家又进行技术封锁,导致中国超低温制冷压缩机制造技术、新型环保制冷剂替代技术等核心技术落后于发达国家,为实现超低温制冷装置的核心技术国产化,未来的超低温制冷装置发展可从以下三方面加强研究:

(1) 加强对自然工质(CO₂、R290 等)的复叠系统传热过程的模型化研究,对自然工质复叠系统的动态控制进行可视化的研究,根据其实际运行的数据特点,寻找合适、准确的控制方法。

(2) 对替代工质的安全性、热稳定性、与系统润滑油的互溶性等性质完成从模拟到实验验证的过程,以及新的制冷设备的结构、设计方案、耐压性、密封性等展开研究,并完善制定替代工质实施标准。

(3) 变频螺杆压缩机的优化:提高核心零部件设计与加工精度,减少转子压缩腔运动部件间隙的泄漏,提高转子齿面加工精度,降低转子振动的噪声,深入变频器结构研究,降低变频器的应用成本;尽快出台 CO₂ 压缩机性能试验方法的

相应行业规范及各种工况的国家执行标准。

参考文献

- 1 杨富华, 孟运婵. 超低温冷藏系统[J]. 机电设备, 2002, 19(2): 8~11.
- 2 Yumrutaş R, Kunduz M, Kanoğlu M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems[J]. Exergy, an International Journal, 2002, 2(4): 266~272.
- 3 韩润虎. 自然复叠系统与低温制冷[J]. 制冷学报, 1999(4): 59~61.
- 4 Røytta P, Turunen-Saaresti T, Honkatukia J. Optimising the refrigeration cycle with a two-stage centrifugal compressor and a flash intercooler [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1 366~1 375.
- 5 杨永安, 陈少为. 一次节流双级压缩制冷系统: 中国, CN103322714A[P]. 2013—09—25.
- 6 田华, 马一太, 王洪利, 等. CO₂跨临界双级压缩带中间冷却器系统[J]. 天津大学学报, 2010, 43(8): 685~689.
- 7 杨永安, 陆佩强, 严雷, 等. 一次节流中间完全冷却变流量双级压缩制冷系统: 中国, CN103335436A[P]. 2013—10—02.
- 8 牛宝联. 复叠制冷系统低温环路自然工质混合物的理论及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- 9 刘井龙, 胡泳波, 汪重婧. 两级复叠制冷系统设计中一些问题的探讨[J]. 制冷与空调 (北京), 2008, 8(3): 84~86.
- 10 Chung H S, Jeong H M, Kim Y G, et al. Temperature characteristics of cascade refrigeration system by pressure adjustment [J]. Journal of mechanical science and technology, 2005, 19(12): 2 303~2 311.
- 11 牛宝联, 张于峰. 复叠制冷系统启动特性实验研究[J]. 低温工程, 2009(5): 51~53.
- 12 程有凯, 常琳, 张文虎. 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.
- 13 王玉珏, 黎立新, 季建刚. 非共沸工质自复叠制冷技术研究现状[J]. 制冷与空调, 2009, 8(6): 22~26.
- 14 杜恺, 廖开蒙. 自然复叠制冷系统初探[J]. 低温工程, 2002(3): 29~33.
- 15 陈光明, 侯虞钧. 非共沸混合工质用于冰箱循环的热力学分析 [J]. 制冷学报, 1990, 44(2): 1~3.
- 16 陈光明, 何一坚, 季益华. 一个改进自行复叠制冷循环的实验研究[J]. 低温工程, 2001(6): 27~31.
- 17 Missimer D J. Refrigerant conversion of auto-refrigerating cascade (ARC) systems[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(3): 201~207.
- 18 王勇. 精馏型自动复叠制冷循环的理论及实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- 19 芮胜军, 张华, 黄理浩. 自动复叠制冷系统压力特性[J]. 化工学报, 2012, 63(2): 176~180.
- 20 张彦所. HCFC-22 替代制冷剂节能环保性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- 21 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2012, 32(6): 53~58.
- 22 Pettersen J, Jakobsen A. A dry ice slurry system for low temperature refrigeration[M]. 2nd ed. Norway: SINTEF, 1994.
- 23 胡姆·格贝哈尔特. Nestlé 公司采用 NH₃ 和 CO₂ 制冷剂[J]. 制冷与空调, 2002(1): 46~52.
- 24 周子成. 自然制冷剂氨与二氧化碳[J]. 制冷, 2013, 32(1): 31~36.
- 25 卢苇, 马一太, 王志国. 低温级以 CO₂ 为工质的复叠式制冷循环热力学分析[J]. 天津大学学报, 2004, 37(3): 245~248.
- 26 Christensen K G, Bertelsen P. Refrigeration systems in supermarkets with Propane and CO₂ — Energy Consumption and Economy[C]//International Congress of Refrigeration, Proceedings of the 2003. Washington: IIR, 2003: 72~76.
- 27 Kilicarslan A, Hosoz M. Energy and irreversibility analysis of a cascade refrigeration system for various refrigerant couples[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2 947~2 954.
- 28 Agnew B, Ameli S M. A finite time analysis of a cascade refrigeration system using alternative refrigerants[J]. Applied thermal engineering, 2004, 24(17): 2 557~2 565.
- 29 Cho K, Park J, Cho H. Performance of the cascade system using alternative refrigerants[C]// National Heat Transfer Conference, Proceeding of ASMENTC01 35th, Anaheim, California: IIR, 2001: 595~600.
- 30 Wadell R P. Design of compact evaporators for ultra low temperature thermal management of microprocessors[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.
- 31 Kilicarslan A. An experimental investigation of a different type vapor compression cascade refrigeration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(17): 2 611~2 626.
- 32 Hoşöz M. Performance comparison of single-stage and cascade refrigeration systems using R134a as the working fluid [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2009, 29(5): 285~296.
- 33 万立波, 蒋能照. R502 的四种长期替代制冷剂[J]. 流体机械, 1997, 25(12): 57~59.
- 34 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(9): 53~56.
- 35 王维, 吴兆林, 周志钢, 等. 低温复叠系统制冷工质替代研究 [J]. 流体机械, 2009, 37(7): 52~55.
- 36 张建一. 制冷剂 R22 和 R502 替代物研究的新进展[J]. 制冷, 1995(4): 6.
- 37 王春燕, 蒋能照. R507 与 R502 理论循环性能分析与比较[J]. 制冷与空调, 1997(2): 11.
- 38 McGovern J A, Harte S. An exergy method for compressor performance analysis[J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(6): 421~433.
- 39 石毅登, 田怀璋, 陈林辉, 等. 采用变频技术的制冷装置的优势分析[J]. 制冷与空调, 2004(5): 31~34.
- 40 杨昭, 谭晶莹, 李喜宏, 等. 冷库压缩机变频技术节能原理与经

济效益分析[J]. 压缩机技术, 2005(5): 24~26.

41 杨光, 祁影霞. 低温冷库中压缩机选择及其节能效果探讨[J]. 流体机械, 2009, 37(11): 42~45.

42 王衍智, 周丹, 韩伟. 单机双级变频螺杆机组在速冻装置中的应用分析[C]//中国制冷学会冷藏冻结专业委员会. 2011 年全国冷冻冷藏行业与山东制冷空调行业年会暨绿色低碳新技术研讨会论文集. 青岛: 中国制冷学会冷藏冻结专业委员会, 2011: 10~14.

43 蔡宗莲, 焦玉学, 于志强, 等. 复叠式螺杆压缩机组的变频控制[J]. 制冷与空调, 2008, 8(4): 81~84.

44 李敏霞, 马一太, 李丽新, 等. CO₂ 跨临界循环制冷压缩机的研究进展[J]. 压缩机技术, 2004(5): 38~42.

45 Stosic N, Smith I K, Kovacevic A. A twin screw combined compressor and expander for CO₂ refrigeration systems[C]//International Compressor Engineering Conference, Proceedings of the 2002. Purdue: Purdue University, 2002: 1 591~1 594.

46 Hiwata A. Development of accumulator-less CO₂ scroll compressor[C]//The International Symposium on New Refrigerant and Environmental Technology, Proceedings of the 2004. Kobe, Japan: IIR, 2004: 45~48.

47 Yamaguchi K. Development of the CO₂ compressor for large output heat pump system[C]//The International Symposium on New Refrigerant and Environmental Technology, Proceedings of the 2004. Kobe, Japan: IIR, 2004: 22~26.

48 Liu H S, Chen J P, Chen Z J. Experimental evaluation of the optimal refrigerant mass charge in a carbon dioxide automotive air conditioner[C]//Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, 2004 6th International Conference at Glasgow, UK: IIR, 2004: 32~37.

49 杨军, 陆平, 张利, 等. 新型全封闭旋转式 CO₂ 压缩机的开发及性能测试[J]. 上海交通大学学报, 2008(3): 426~429, 435.

50 高联斌, 李征涛, 陈忆喆, 等. CO₂ 跨临界压缩机性能实验台的设计[J]. 低温与超导, 2014(1): 82~86.

51 叶琼娟, 余铭, 张全凯, 等. 速冻技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 农产品加工· 学刊, 2013(12): 97~100.

52 谢晶, 汤元睿. 金枪鱼气调保鲜技术的研究进展[J]. 食品科学, 2014(9): 296~300.

53 杨富华. 金枪鱼冷冻冷藏链研究及开发[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

54 杨利艳, 曹文红, 章超桦, 等. 冷冻方式对凡纳滨对虾品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 149~152.

55 Kelekci N N, Pascut S, Waniska R D. The effects of storage temperature on the staling of wheat flour tortillas[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 37(3): 377~380.

56 Bassols J, Kuckelkorn B, Langreck J, et al. Trigeneration in the food industry[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(6): 595~602.

57 Rocco C, Planas J, Guinea G V, et al. Fracture properties of concrete in cryogenic conditions[C]//Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Proceeding of the 2001. Roman: FIB, 2001: 411~416.

(上接第 166 页)

表 5 微波辅助复合酶提取正交试验结果表
Table 5 Results of the orthogonal experiments

试验号	A	B	C	空列	α -氨基氮含量/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)
1	1	1	1	1	0.107
2	1	2	2	2	0.121
3	1	3	3	3	0.131
4	2	1	2	3	0.158
5	2	2	3	1	0.181
6	2	3	1	2	0.137
7	3	1	3	2	0.120
8	3	2	1	3	0.132
9	3	3	2	1	0.120
k_1	0.120	0.128	0.125	0.136	
k_2	0.159	0.145	0.133	0.126	
k_3	0.124	0.129	0.144	0.140	
R	0.039	0.016	0.018	0.014	

基酸、核酸风味物质的释放。

(2) 采用正交试验优化了微波辅助复合酶提取草菇风味物质的最佳工艺条件: 水解时间 120 min, 水解温度 55℃, 食用菌水解酶 1 号和食用菌水解酶 2 号的用量为 1:2(m :

m), 初始 pH 为 5.5, 微波功率 800 W, 微波温度 70℃, 微波时间 10 min。

(3) 在今后的试验需要进一步研究草菇中各种主要风味物质如特有的芳香成分醇类、酮类的提取效果和损失程度。

参考文献

1 郭勇, 彭卫红, 甘炳成, 等. 我国草菇生产现状及四川草菇发展面临的问题[J]. 西南农业学报, 2001, 14(增刊 1): 124~126.

2 赵谋明, 平燕超, 邱慧霞, 等. 草菇抽提物最佳提取工艺条件的研究[J]. 食品工业科技, 1997(2): 35~39.

3 徐怀德. 天然产物提取工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006: 49.

4 苏慧, 郑明珠, 蔡丹, 等. 微波辅助技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 165~167.

5 黄琼, 丁玲. 微波协同酶法提取金针菇多糖工艺的优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 128~130.

6 李磊, 陈均志, 张海平. 微波复合酶水解植物蛋白制取小分子多肽的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(19): 5 655~5 656, 5 660.

7 韦寿莲, 刘君红, 严子军, 等. 微波辅助—旋转回流提取仪的组装及其在叶下珠有机酸提取中的应用[J]. 分析测试学报, 2009, 28(7): 773~779.

8 中国轻工业联合会. QB/T 1686—2008 啤酒麦芽[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.