

渔船用冷冻冷藏系统的研究进展

Progress on refrigeration systems and cold storage methods of fishing boats

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

ZHU Shi-xin^{1,2} XIE Jing^{1,2} GUO Yao-jun^{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. China Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

摘要:在渔船渔业作业过程中,渔获物的冷冻冷藏方式直接影响着渔获物本身的营养价值与经济价值。文章在分析不同制冷系统及冷藏方式的基础上,综述渔船上常用的冷冻冷藏系统的研究进展,以期对渔船用渔获物冷冻冷藏系统改进与优化设计研究提供依据。目前,渔船常用的渔获物冷藏保鲜方式分 4 种:冰藏保鲜、冷海水保鲜、微冻保鲜及冻结保鲜。其中,前 3 种冷藏保鲜方式通常采用单级压缩制冷系统,冻结保鲜则通常采用单机双级活塞式压缩制冷系统。渔船低温冷藏舱中常使用的蒸发器形式主要有冷风机和直接蒸发盘管两种。中国的渔船用制冷系统多使用不环保的 R22 作为制冷剂,寻找新型环保、安全、高效的替代制冷剂亦是当下研究的热点。

关键词: 渔船; 冷冻冷藏; 冷藏舱; 保鲜; 制冷剂

Abstract: In the process of fishing on boats, refrigeration technology has a direct impact on the nutrition and economic value of catches. Based on the analysis of different refrigeration systems and methods of cold storage, the resent research progress on refrigeration systems was summarized, which might be useful to provide the basis for the improvements and optimization design of refrigeration system on the fishing boats. At present, there were four methods to keep the catches fresh by low temperature, such as iced preservation, sea water preservation, partial freezing preservation and freezing preservation. Among them, the former three refrigerated preservation methods usually adopted single stage compression refrigeration system, while the freezing preservation commonly used double stage compression refrigeration system. Forms of evaporator in tanks of fishing boats were mainly air cooler and direct-expansion coils. Chinese fishing boats with refrigeration system often selected R22 as refrigerant,

which was environmental unfriendly, looking for new environmental protection safe and efficient alternative refrigerants was also a hot spot in present research.

Keywords: fishing boat; cold storage; refrigerated compartment; preservation; refrigeration

海产品富含蛋白质、矿物质以及不饱和脂肪酸等营养物质^[1],容易受外界环境的影响而发生腐败变质,直接影响着渔获物本身的营养价值与经济价值,因而在渔业作业过程中,对捕捞的渔获物进行及时有效的冷藏保鲜处理非常必要,目前渔船上常用的保鲜方式主要有 4 种:冰藏保鲜^[2](-1~0℃)、冷海水保鲜^[3](-1~0℃)、微冻保鲜^[4](-5~-3℃)及冻结保鲜^[5](-18℃及以下)。冰藏保鲜、冷海水保鲜及微冻保鲜方式的保鲜期一般不超过 2 周^[6],其中冰藏保鲜与冷海水保鲜方式的保鲜期仅约 1 周^[7]左右,其较短的储藏期仅适用于近海渔业作业,通常采用单级压缩制冷系统即可制取其所需的低温环境。对于进行远洋渔业作业的渔船,则需要采取冻结保鲜的方式来长期储藏渔获物,中国的渔船一般采用单机双级活塞式压缩制冷系统来实现渔获物的冻结保鲜。一般情况下,大多数渔获物在-18℃的冷藏温度下就可以长期储藏,而某些特殊渔获物则需要更低的冷冻冷藏温度,如:南极磷虾采用-40℃冻结、-35℃冷藏^[8];金枪鱼采用-55℃冻结、-50℃冷藏^[9]。

在世界范围内,渔业渔船向着大型化、自动化和信息化^[10]的方向发展,远洋渔船的渔获物保鲜方式也向着低温趋势发展。在渔船建造方面中国处于世界领先水平,但落后的配套设施、不完善的冷冻冷藏系统及设备方案严重制约了中国远洋渔业的发展^[11]。文章重点综述了渔船用制冷系统形式、冷藏舱的保温研究现状及渔船用制冷系统中替代制冷剂的研究现状,以期为中国渔船配套冷冻冷藏系统的优化设计及 R22 替代制冷剂的研究提供参考。

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:朱世新(1990—),男,上海海洋大学在读硕士研究生。

E-mail:1322012367@qq.com

通讯作者:谢晶

收稿日期:2014-12-29

1 渔船用制冷系统

1.1 单级压缩制冷系统

单级压缩制冷系统在渔船上有着广泛的应用,通过对制冷剂流量的调节来控制系统的制冷量,使冷藏舱温度处于一个较小的范围内波动,较冰藏保鲜而言冷藏舱的温度控制更为方便。试验^[10]研究表明,拥有单级制冷压缩系统的中小型渔船的渔业作业方式具有较大的灵活性,且长期运行时经济效益较好。

传统的碎冰保鲜方式通常需要消耗大量的碎冰,且随着碎冰的不断消耗,保鲜的效果不能得到良好的保证。为此,徐玉成等^[12]提出在 447 kW 的对拖渔轮上采用 2F10 单级压缩制冷机组风冷与碎冰保鲜同时使用的保鲜保藏方法,该制冷机组采用 R22 为制冷剂,标准工况下制冷量为 16.28 kW,通过单级压缩制冷机组来使冷藏舱控温为 $(0\pm1)^{\circ}\text{C}$,同时,利用单级压缩机组使得碎冰消耗大大减少。

冯毅等^[13]研究了冷海水保鲜方式在渔船上的应用,利用单级压缩制冷系统来制取 $-5\sim0^{\circ}\text{C}$ 的冷海水,为了强化传热效果,系统采用锡黄铜管水冷冷凝器和钛管蒸发器,换热效果明显提高,这不仅保证了冷海水保鲜的效果,而且缩小了单级压缩制冷系统的占地面积;詹望等^[14]在新型灯光围网渔船上,将冷海水保鲜作为渔获物处理的第一步,采用 CYF8F2S10 单级压缩制冷机组,以 R22 为制冷剂,为渔船提供 0°C 的冷海水,以便在捕获的第一时间对渔获物进行初步冷却处理。

在大量的试验研究^[12-14]中,单级制冷压缩系统在渔船上应用的灵活性可见一斑,无论是在减少碎冰消耗还是在延长渔船航行周期方面(传统携冰保鲜渔船航行周期受制于碎冰的消耗),单级制冷压缩系统在渔船上的使用都显示了其长期运行较经济的优势。

1.2 单机双级活塞式压缩制冷系统

在远洋渔业作业过程中,为了更长时间地保鲜贮藏渔获物,通常采取冻结保鲜方式来处理渔获物。一般渔获物冻结保鲜的推荐温度为 -18°C ,对于某些特殊鱼类,如金枪鱼,最佳的冻结保鲜温度为 -55°C ,因而对于金枪鱼渔船而言,通常需要设置温度为 -55°C 的低温冷藏舱。目前,中国大部分渔船采用单机双级活塞式压缩制冷系统来制取相应的低温环境。

杨富华等^[15]介绍了由大连冰山集团采用中国国产设备自主开发的超低温金枪鱼延绳钓船用速冻装置,采用的 CJZS812.5CDW 双级压缩制冷机组,以 R22 为制冷剂,该机组蒸发温度可达 -70°C ,通过采用高可靠性的、高效的内导向气阀及油冷却器与中间冷却器合二为一的结构等,提高了系统运行性能,且使外型尺寸更紧凑,占地面积更小;李红波^[16]介绍了 520GT 超低温金枪鱼延绳钓船制冷系统,选用 3 台高速多气缸双级压缩机,采用 R22 直接膨胀制冷,为了

实现了对制冷剂流量精确的控制,系统采用 NCC 控制器接收设置在冻结室内及制冷剂回气管上设置的传感器发出的信号,并向对应的电子膨胀阀发出指令,使系统更加节能高效;蔡秀安^[17]设计了一 60°C 超低温单丝延绳钓渔船,该船选用 SFW62 型单机双级压缩制冷机组,采用 R22 直接膨胀供液方式,系统采用水冷卧式壳管式冷凝器,且在冷凝器上设置放空气器,简化系统的同时可以排出低压侧长期处于负压运行时渗入的不凝性空气,确保了系统的安全运行。

双级压缩制冷系统的应用不仅为渔获物的长期储存提供了可能,而且在低温环境下渔获物的鱼品也得以较好的保存,经济效益显著。然而,双级压缩制冷系统在渔船上的使用还存在部分问题,尤其在系统性能优化及制冷剂方面还有待改进,很多学者^[15-17]已经做了相应研究。目前中国中低温制冷剂仍以 R22 为主体,作为即将面临淘汰的制冷剂,中国可以使用的时间有限,寻找新型环保、高效、安全制冷剂迫在眉睫。

1.3 其他制冷系统

传统的冰藏保鲜方式通常在渔船出航时将大量的碎冰装入冷藏舱,以备冷藏渔获物。然而,随船携冰的方式不仅麻烦,而且随着冰的不断消耗,渔获物的保鲜效果也会受到影响。因此,不少学者^[18-21]研究了利用渔船主机排烟余热驱动的吸收式/吸附式制冰机,希望可以更加合理地利用渔船动力余热资源来获得冰藏保鲜所需的冰块。为了验证利用主机排烟余热驱动的吸收式制冷在渔船上进行制冰的可行性,王维伟等^[22]通过对某配备了主机功率 4 963 kW 的渔船进行了试验分析,将渔船制冷系统中的一台制冷压缩机由吸收式制冷机取代,表明渔船主机排气余热足以用于驱动相当于 60 kW 压缩机制冷量的吸收式制冷机,且替代后的制冷系统运行更加经济;齐朝晖等^[23]采用 CaCl_2 和 NH_3 为吸附工质对,以 112 kW 渔船柴油机排出的尾气为热源,成功实现了日产片冰 800 kg;姜周曙等^[24]提出了一种柴油机余热驱动的渔轮吸附式制冰系统,以 Z6170ZLCZ-3 型船用柴油机为例,利用柴油机排烟余热驱动以活性炭—甲醇为工质对的固体吸附式制冰系统,通过试验分析发现,吸附式制冰机的制冷量可达 13.57 kW,制冰量约为 98.28 kg/h,渔轮每天开动 10 h 可制冰 1 t。

吸收式/吸附式制冷系统利用主机排烟余热来驱动,符合节能环保的新要求,然而在渔船所处的摇摆环境下,吸收式/吸附式制冷系统还存在运行不稳定等问题,在渔船上的实际应用推广还需要进行深入的研究与探讨。在吸收式/吸附式制冷系统研究方面,应当注重对系统进行改进,增加其在渔船上使用时的稳定性,提高其运行时的系统性能,使其在渔船上使用时不仅节能环保,而且稳定高效。

2 渔船冷藏舱研究进展

对于远洋渔船而言,渔船冷藏舱是作业渔船必不可少的

部分。具有良好保温性能的冷藏舱是渔船节能及渔获物保鲜效果良好的保证。冯毅等^[13]对某渔船冷藏舱进行了渔获物保鲜试验,冷藏舱用 150 mm 厚的保温隔热板分成三间,分别进行冷藏风冷保鲜、冷海水保鲜与冰藏保鲜试验。在冷藏舱内,钛管蒸发器均匀布置在试验舱顶部,并使用直流风扇强化传热,保鲜舱温度设定在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时设有海水喷雾装置,每隔 12 h 喷雾一次以降低渔获物的干耗,结果表明冷藏舱保鲜的鱼的口感与外观优于冷海水保鲜及冰藏保鲜;詹望等^[14]在新型灯光围网渔船上采用“冷海水保鲜→冻结→冷藏”的保鲜方式,渔获物经过冷海水预处理后进行冻结,最终进入冷藏舱,该冷藏舱设计冷藏温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷藏舱壁布置蒸发排管,材质为无缝钢管,舱壁采用发泡厚度为 200 mm 的聚氨酯材料保温,并设有玻璃钢保护层。

目前,渔船低温冷藏舱中常使用的蒸发器形式分两种:冷风机和直接蒸发盘管。然而在实际使用过程中,采用冷风机易导致舱内温度波动较大,且有渔获物干耗大的现象,因而金枪鱼渔船的冷藏舱一般采用直接蒸发式冷却盘管,盘管一般设置在舱顶、舷侧、舱壁和舱底,以便直接吸收舱外渗入热^[25]。对于金枪鱼的贮藏舱因要求控制在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,所需蒸发面积非常大,若盘管全部采用钢质材料,系统的重量会大大增加而影响船舱稳定性。为此王国永等^[26]指出远洋金枪鱼钓船的冷藏舱和冻结舱的舱顶蒸发器可采用铝质翅片管,但考虑到铝质较软易变形,在舱的舷侧、舱壁和舱底则仍采用钢质光滑盘管,这样在考虑到渔船安全平稳运行的同时,可适当减少渔船重量;蔡秀安^[17]设计了一 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温单丝延绳钓渔船,冷藏舱设计温度 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷藏舱顶部、舷侧壁及其他壁面分别采用厚 250,250,200 mm 的聚氨脂泡沫塑料保温,冷藏舱顶部和壁面布置铝合金翅片管,底部光滑冷却盘管采用无缝钢管,为减少冷却盘管过多占用舱内容积,冷却盘管均安装在加强横梁和肋骨之间的凹处,在试验运行过程中,冷藏舱的保温性能良好。

3 渔船制冷系统用制冷剂替代的研究

目前,中国及世界上大部分的渔船用制冷系统一般采用 R22 作为制冷剂,然而,根据《蒙特利尔议定书》,发达国家和发展中国家最晚将分别于 2020 年和 2030 年全面禁止使用该制冷剂。考虑到渔船运行时的摇摆环境及空间的有限性,寻找一种安全、高效、环保的可长期替代 R22 的制冷剂显得尤为重要。目前,可用于替代 R22 的制冷剂可分为两类:HFC 类工质、自然工质。

3.1 HFC 类替代工质

作为替代 R22 的 HFC 类制冷剂,研究相对成熟的主要有 R410A、R407C 及 R134a。毛海萍^[27]在对比国内外实际使用情况的基础上,对这几种制冷剂进行了深入研究,认为 R134a 作为替代 R22 的制冷剂无替代风险,但其单位容积制冷量比 R22 小 40%,使用时其充注量约为 R22 的 2 倍;R410A 在工作

压力及制冷量方面均比 R22 高出约 50%左右,其优良的制冷性能,使其替代 R22 成为可能,但 R410A 的使用需要进行设备的更新,成本较高;R407C 无论在工作压力还是制冷量方面均与 R22 相当,但其温度滑移较大,在实际操作运行过程中实际的制冷量和系统运行 COP 均会降低^[28]。

Xu Xing 等^[29]提出 R32 在环境性能方面优于 R22 与 R410A,其 ODP 为 0,GWP 仅为 543,热工性能良好,但排气温度及排气压力过高,限制了其推广应用;刘靖等^[30]通过理论分析提出用 R152a 和 R134a 多比例混合制冷剂替代 R22,指出这些混合制冷剂的 ODP 为 0,GWP 值很小,且其温度滑移特性优于 R407C,运行 COP 较 R407C 高出 8%左右,且润滑性能良好,值得再深入研究;史琳等^[31]提出新型替代 R22 的三元混合制冷剂 THR03,其 ODP 为 0,GWP 为 954,并进行试验分析认为其热工性能与 R22 相当,在原 R22 系统使用时仅需要将原润滑油改为酯类油,具有一定的应用前景,但还需要进行更深入的研究。

3.2 自然替代工质

自然替代工质中, NH_3 与 CO_2 的研究相对成熟。 NH_3 作为中温制冷剂使用历史悠久,其 ODP 为 0、GWP 接近 0,且易于获得,传热性能好,然而,因其具有一定的毒性,且具有易燃易爆等缺点使得其在船上使用还有待进一步研究。 CO_2 的 ODP 为 0 和 GWP 为 1,同时 CO_2 具有良好的热物理性能,但因其较高的临界压力和较低的临界温度^[32]使得其制冷循环通常为超临界循环,操作压力较高,在船上使用易造成事故。赵新颖等^[33]提出 NH_3/CO_2 复叠式制冷系统,充分利用两种介质在各自工作温度区间的优势,避免了 CO_2 的跨临界循环,且可以通过系统的分离设置使氨系统部分远离货物区,只在有限的空间中循环,降低了发生事故的概率,但其船用系统还需深入研究。

陈永强等^[34]通过试验分析了 R290 替代 R22 的可行性,认为 R290 与 R22 的性能相近且部分性能,如汽化潜热、导热系数等,优于 R22,同时 R290 的充注量仅为 R22 的 40%左右,COP 系数比 R22 高出 12%左右,节能效果显著,只是在可燃性方面还有待进一步研究,是具有前途的替代制冷剂;Chang 等^[35]在 ASHRAE 标准规定的工况下对几种自然工质(主要包含丙烯、丙烷、丁烷和异丁烷)混合制冷剂进行试验分析,表明该几种混合型制冷剂的优势在于物性参数接近 R22,且制冷循环系数接近 R22,甚至超越 R22;王松岭等^[36]提出用 R290 与 R152a 混合制冷剂代替 R22,通过试验分析认为 65%的 R290 与 35%的 R152a 混合时,其温度滑移较小,优于 R407C,且在压力特性、排气温度方面均优于 R22,但该混合制冷剂具有一定的可燃性,在安全性方面还需作进一步研究;Dalkilic 等^[37]对基于 R134a,R152a,R32,R290,R1270,R600 和 R600a 的多比例混合制冷剂在蒸汽压缩式制冷系统中的使用性能进行试验分析,认为质量分数为

20%的 R290 与 80%的 R1270 的混合物的 ODP 为 0、GWP 约为 20,且 COP 与 R22 相当,是替代 R22 的最佳选择。

根据《蒙特利尔议定书》,HFC 类制冷剂由于对臭氧层具有一定的破坏作用,因而寻找新的环保、安全、高效的制冷剂来替代 HFC 类制冷剂势在必行。国内外大批学者^[38-41]对用于替代 HFC 类工质的制冷剂做了大量的研究,其中混合工质制冷剂的研究成为主流趋势。混合制冷剂通过对混合成分的比例的控制,不仅使得新型混合制冷剂继承了其组成成分环保(低 ODP,低 GWP)的优点,同时通过加入安全制冷剂组分来达到抑制燃烧、爆炸的效果,确保了新型混合制冷剂的安全性,同时通过对混合成分比例的调整有望使混合制冷剂具有优秀的热物性能,从而使得新型替代制冷剂不仅环保,而且安全、高效。

4 展望与讨论

中国渔业发展起步较晚,且受到渔业发达国家技术封锁政策的影响,中国渔船的配套设施及渔业技术一直处于较低水平。中国的渔船用制冷系统几乎全部采用 R22 作为制冷剂,在渔船制冷系统、冷冻冷藏设备及渔获物保鲜技术方面均承袭于渔业发达国家。为保证中国渔业更好、更快的发展,笔者认为可从以下 4 个方面考虑:

(1) 中国使用的大部分大型渔船均为国外淘汰的二手船,即使近几年在国内新建的大型渔船其配套的冷冻冷藏系统与设备的核心部件也都依赖进口,这不仅增加了渔业成本,同时也制约了中国对远洋渔业开发的力度,中国应当加快自主开发研究进度,早日实现船用配套的冷冻冷藏系统与设备的国产化,提升中国远洋渔业竞争力;

(2) 对利用渔船主机排烟余热驱动的吸附式/吸收式制冷系统在船上的使用作进一步研究,寻找合适的工质对,同时对系统进行改进,使得其在渔船上运行更加稳定,不仅更合理利用了主机燃料能源的余热,而且还能节约成本为中小型渔船提供碎冰来冰藏渔获物;

(3) 制冷剂在一定程度上决定了制冷系统的性能,具有优秀的制冷性能的制冷剂可以使制冷系统小巧,且较低的工作压力还能使系统运行更加安全,因而在寻找合适的制冷剂来替代船用制冷系统中 R22 的应用应加大研究力度;

(4) 远洋渔业的发展需要配套的超低温制冷系统的支撑,理论上自复叠式制冷系统较双级压缩系统可以更轻易地获取低温,且系统结构紧凑,占地面积较小,在系统制冷性能方面比双级压缩制冷优越,虽然自复叠系统在混合制冷剂选择、制冷剂配比以及制冷剂流量控制方面还需要做大量的研究,但在渔船上,尤其是配备超低温冷藏渔舱的应用研究,值得深入的探讨。

参考文献

1 王振华. 海产品加工副产品中的生物活性物质[J]. 肉类研究, 254

2009(3): 83~85.
2 Hernández A, García García B, Jordán M J, et al. Improved conservation of gilthead seabream (*Sparus aurata*) in ice storage. The influence of doses of rosemary extract added to feed[J]. Aquaculture, 2014, 26(1):31~40.
3 严凌苓,陈婷,龙映均,等. 国内外水产品保鲜技术研究进展[J]. 江西水产科技, 2013(2): 38~41.
4 蔡青文,谢晶. 微冻保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 248~252.
5 黎柳,谢晶. 水产品冰鲜技术的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 259~263.
6 贾景福. 水产品的冷藏保鲜技术[J]. 科学养鱼, 2009, 16(5): 69~70.
7 Ghaly A E, Dave D, Budge S, et al. Fish spoilage mechanisms and preservation techniques: review[J]. American Journal of Applied Sciences, 2010, 7(7):846~864.
8 刘会省,迟海,杨宪时,等. 冻结温度对南极磷虾品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(3): 77~82.
9 Kamalakanth C K, Ginson J, Bindu J, et al. Effect of high pressure on K-value, microbial and sensory characteristics of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) chunks in EVOH films during chill storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4): 451~455.
10 Torres-Irineo E, Gaertner D, Chassot E, et al. Changes in fishing power and fishing strategies driven by new technologies: The case of tropical tuna purse seiners in the eastern Atlantic Ocean[J]. Fisheries Research, 2014, 155(7): 10~19.
11 王传荣. 加快远洋渔船装备发展 提升远洋渔业战略地位[J]. 中国水产, 2012(6): 11~14.
12 徐玉成,郑福麟. 东海区渔船渔获物保鲜现状和发展方向[J]. 水产科技情报, 2005, 15(2): 24~27.
13 冯毅,梅海青. 渔获保鲜装置在渔船上的应用研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22(4): 28~30.
14 詹鋈,张建一. 新型灯光围网渔船及其制冷技术[J]. 渔业现代化, 2011, 16(2): 56~59.
15 杨富华,李郁,孟运蝉. JQY 超低温金枪鱼延绳钓船速冻装置[J]. 制冷与空调, 2002, 5(1): 17.
16 李红波. 520GT 超低温金枪鱼延绳钓船制冷系统[C]//孙培廷. 2004 年大连国际海事技术交流会论文集. 大连:大连海事大学出版社, 2004:284~285.
17 蔡秀安. -60℃超低温印度渔船制冷系统的设计[J]. 船舶工程, 2008, 5(1): 93~96.
18 He Yi-jian, Chen Guang-ming. Experimental study on an absorption refrigeration system at low temperatures[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(3): 294~299.
19 Wang Ru-zhu, Xia Zai-zhong, Wang Li-wei, et al. Heat transfer design in adsorption refrigeration systems for efficient use of low-grade thermal energy[J]. Energy, 2011, 36(9): 5 425~5 439.
20 Tamainot-Telto Z, Metcalf S J, Critoph R E, et al. Carbon - ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice

making, air conditioning and heat pumping[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1 212~1 229.

21 Farshi L G, Infante Ferreira C A, Mahmoudi S M S, et al. First and second law analysis of ammonia/salt absorption refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 4(1):111~121.

22 王伟伟, 潘新祥, 沈波. 远洋渔船吸收式制冷应用可行性分析[J]. 节能技术, 2012, 30(5): 397~399.

23 齐朝晖, 汤广发, 李定宇, 等. 吸附制冷技术在余热回收中的应用[J]. 中国能源, 2001, 4(1): 30~32.

24 姜周曙, 王如竹. 柴油机余热驱动的渔轮吸附式冷藏系统的研究[J]. 新能源, 2000, 22(12): 19~23.

25 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.

26 王国永, 林乐杰. 远洋金枪鱼钓船的超低温制冷系统[J]. 渔业现代化, 2001, 6(2): 34~35.

27 毛海萍. R22 氟利昂制冷剂的替代[J]. 压缩机技术, 2011, 10(3): 27~29.

28 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.

29 Xu Xing, Hwang Yun-ho, Radermacher R. Performance comparison of R410A and R32 in vapor injection cycles[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 892~903.

30 刘靖, 程艳华. R152a 与 R134a 混合制冷剂替代 R22 的可行性研究[J]. 流体机械, 2010, 38(11): 77~80.

31 史琳, 张青. HCFC-22 替代制冷剂 THR03 的试验研究[J]. 暖通空调, 2000, 30(2): 1~4.

32 Pamitran A S, Choi K I, Oh J T. Evaporation heat transfer coefficient in single circular small tubes for flow natural refrigerants of C₃H₈, NH₃, and CO₂[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(7): 794~801.

33 赵新颖, 黄文超, 朱陈程. 我国渔船用制冷剂替代分析[J]. 渔业现代化, 2013, 40(5):69~73.

34 陈永强, 刘金平, 张波. 新型制冷剂 R290 热物性分析及试验研究[J]. 环境技术, 2005, 22(6): 19~23.

35 Chang Y S, Kim M S, Ro S T. Performance and heat transfer characteristics of hydrocarbon refrigerants in a heat pump system[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(3): 232~242.

36 王松岭, 论立勇, 谢英柏, 等. 用 R290 与 R152a 混和制冷剂替代 R22[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 115~118.

37 Dalkilic A S, Wongwises S. A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(9): 1 340~1 349.

38 Zhao Yang, Wu Xi. Retrofits and options for the alternatives to HCFC-22[J]. Energy, 2013, 59(11): 1~21.

39 In S, Cho K, Lim B, et al. Performance test of residential heat pump after partial optimization using low GWP refrigerants[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 72(1): 315~322.

40 朱志伟, 韩晓红, 孙洁, 等. 新型混合制冷剂 R161+ R227ea 的理论与实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(10): 1 789~1 794.

41 Li Min-xia, Dang Chao-bin, Hihara E. Flow boiling heat transfer of HFO1234yf and HFC32 refrigerant mixtures in a smooth horizontal tube; Part II. Prediction method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64(10): 591~608.

(上接第 245 页)

26 Wang T, Hicks K, Moreau R. Antioxidant activity of phytosterols, oryzanol, and other phytosterol conjugates [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2002, 79(8):1 201~1 206.

27 Gomes T. Oligopolymer, diglyceride and oxidized triglyceride contents as measures of olive oil quality[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1992, 69(7): 1 219~1 223.

28 Takenaka A, Hosokawa M, Miyashita K. Unsaturated phosphatidylethanolamine as effective synergist in combination with α -tocopherol[J]. Journal of Oleo Science, 2007, 56(12): 511~516.

29 Bandarra N, Campos R, Batista I, et al. Antioxidant synergy of α -tocopherol and phospholipids[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1999, 76(4):905~913.

30 Yoshida H. Participation of free fatty acids in the oxidation of purified soybean oil during microwave heating[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1992, 69(6): 1 136~1 140.

31 Chen Bing-can. A critical review of their roles on lipid oxidation chemistry in bulk oils and emulsions[J]. Food Science and Nutrition, 2011, 51(10): 901~916.

32 Burton G W. Antioxidant action of carotenoids[J]. Journal of Nutrition, 1989, 119(6): 109~111.

33 Malecka M. The effect of squalene on the heat stability of rapeseed oil and model lipids[J]. Food, 1991, 35(6): 541~542.

34 Mateos R, Domiguez M M, Espartero J L, et al. Antioxidant effect of phenolic compounds, α -tocopherol, and other minor components in virgin olive oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(8): 7 170~7 175.

35 Gordon M H. The effect of sterols on the oxidation of edible oils[J]. Food Chemistry, 1983(10): 141~147.

36 Yoon S H, Jung M Y, Min D B. Effects of thermally oxidized triglycerides on the oxidative stability of soybean oil[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1988, 65(6): 1 652~1 656.

37 Gomes T, Caponio F, Paradiao V M. Effects of monoacylglycerols on the oxidative stability of olive oil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(8): 2 228~2 232.

38 Koga T, Terao J. Antioxidant activity of a novel phosphatidyl derivative of vitamin E in lard and its model system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(5): 1 291~1 294.

39 Chaiyasit W, Elias R J, McClements D J. Role of physical structures in bulk oils on lipid oxidation[J]. Food Science and Nutrition,2007, 47(4): 299~317.