

文章编号:0253-4339(2014)06-0028-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.06.028

## 渔船动力余热制冷技术

陈少杰<sup>1</sup> 陈光明<sup>1,2</sup>

(1 浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310058; 2 浙江大学宁波理工学院 宁波 315100)

**摘要** 渔船通常需要带冰或使用压缩式制冷来满足渔获冷藏保鲜的需要,而渔船发动机尾气中有大量的热能被排放到环境中去,利用渔船发动机尾气余热制冷是一种既经济又节能的好方法。本文介绍了吸附式、吸收式和喷射式三种热能驱动的制冷循环,并针对渔船制冰工况对这三种循环在渔船中应用的优缺点进行了分析;重点讨论了使用喷射式制冷技术对渔船现有压缩式制冷系统进行改造的可行性。研究表明,将喷射制冷与压缩制冷结合,可减少渔船制冷系统燃料消耗54.5%,在1年内即可收回改造成本。

**关键词** 制冷;复叠制冷循环;蒸汽喷射制冷系统;冷藏船

**中图分类号**:TB66;TB69

**文献标识码**:A

## Refrigeration Technology Utilizing Engine Waste Heat in Fishing Vessels

Chen Shaojie<sup>1</sup> Chen Guangming<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, 315100, China)

**Abstract** Ice and compression refrigeration are normally used to preserve caught fish on fishing vessels. At the same time, waste heat dissipated in hot exhaust gas on fishing vessels is rejected to the atmosphere. Utilizing the vast amount of the waste energy for refrigeration is both economical and energy saving. Three kinds of heat driven refrigeration cycles as adsorption, absorption and ejection are introduced in this paper. Advantages and disadvantages of the three cycles are analyzed based on the working condition of ice making on fishing vessels. Emphases have been made on the feasibility of transforming the existing compression refrigeration cycle on fishing vessels by ejection technology. The result shows that 54.5% of fuel for refrigeration system can be saved after combining ejection and compression cycle and the transforming cost can be recovered in 1 year.

**Keywords** refrigeration; cascade refrigeration cycle; eject refrigerating cycle; refrigerated ship

多年来,我国渔业保持良好发展趋势,30多年来保持快速发展,产量连续22年位居世界第一,水产品年人均占有量达43.63 kg,其中捕捞产量占水产品总产量的27%。我国农业部渔业局资料显示,截止到2012年底,我国共有捕捞渔船45.14万艘,总功率达 $1.73 \times 10^7$  kW,其中海洋捕捞渔船达19.42万艘,总功率 $1.327 \times 10^7$  kW。2012年全年捕捞产量 $1.619 \times 10^7$  t,总产值2076.52亿元,其中海洋捕捞总产量、总产值分别达到 $1.389 \times 10^7$  t和1706.67亿元。

我国渔业是高产大户,同时也是一个耗能大户。渔船是渔业生产的主要工具,这些渔船普遍存在着老旧、能耗高的问题。根据测算,渔业生产年耗能总量折标准煤大概是 $2 \times 10^7$  t,其中捕捞业占总能耗的

66%;在能源消耗品种构成中,渔船柴油消耗最多,达 $8 \times 10^6$  t。柴油占渔业捕捞生产成本的比重达70%以上。由于渔业生产成本大幅提高,水产品价格持续低迷,很多捕捞渔民收不抵支。如何减少渔船的能耗,特别是渔船制冷保鲜过程中的能耗成为了近年来的研究热点。本文利用渔船柴油发动机尾气驱动喷射式制冷系统,对渔船上现有的压缩式制冷系统改造进行了研究工作。

### 1 制冷技术在渔船保鲜中的应用

由于微生物的生命活动和水产品中酶所进行的生物化学反应,水产品容易腐败变质。鱼类丧失生命后,由于肌体内细胞组织已经死亡,不能抑制酶的作

用和抵抗微生物的入侵,最终导致水产品变质腐败。随着温度降低,微生物和酶的作用会逐步变得很微弱。同时,氧化等化学反应速度也会显著减慢,因而可以较长时间地保持水产品的鲜度,而不会发生腐败变质。这就是水产品低温保鲜的原理,也是制冷技术应用的理论依据<sup>[1]</sup>。

### 1.1 我国渔船制冷现状

在我国近海捕鱼的中小渔船主要是敷冰保鲜。传统的敷冰保鲜方式由于存在着大量消耗淡水,消耗能源,作业灵活性差,保鲜时效差等缺点,已不能适应目前远洋渔业和保鲜时效的要求,根据山东威海当地渔民介绍,中小型渔船出入黄海海域需带冰 20 ~ 30 t,东海海域需带冰 50 ~ 60 t。一般情况下,冰量损耗为 10% ~ 30%。带冰作业不仅增添了渔民的不便,而且增加了渔船动力的功耗。油耗的增加和冰损使渔民的捕捞成本明显升高(一艘 100 t 渔船单购置冰块的费用每年就约 5 ~ 10 万元)<sup>[2-3]</sup>,而且个别岛国用冰的价格相当昂贵,达 70 美元/吨,大大增加了渔船生产成本<sup>[4]</sup>。

广大渔民都认识到渔品保鲜的重要性。100 t 以下的中小型渔船因经济性的限制,不宜安装压缩式制冷机组<sup>[2-5]</sup>。压缩式制冷机组解决了 100 吨位以上渔船的保鲜问题,但是由于压缩机组以电驱动实现制冷循环,对依靠柴油发电的渔船来说,存在动力要求高、设备成本高和运行、维护费用高等弱点,其运行需要消耗大量的燃料和具备较高的维护水平。压缩制冷保鲜把广大渔民挡在了门外。由于我国 100 吨位以下的中小渔船占绝大多数,目前国内 99% 的渔船还没有配备保鲜设备,绝大多数中小渔船仍然依靠带冰作业这种传统且代价高昂的方式出海捕捞。

### 1.2 发动机尾气驱动渔船制冷系统

目前,氯氟烃系列制冷剂的使用量在一些国家已开始受到控制,并将逐渐被禁止使用。在渔船上虽可采用蒸汽压缩制冷方式对水产品进行保鲜,但它既要消耗大量动力燃料,且其制冷剂的使用也将受到限制<sup>[6]</sup>。据 600 马力拖网渔船实际使用效益的统计结果分析,600 马力(450 kW)渔船所需制冷量约为 27000 kcal/h(30 kW),才可基本满足冷藏、冷冻鱼品的需要<sup>[7]</sup>。然而渔船发动机的尾气温高达 400 ~ 500 °C,具有非常高的利用价值,而且海水是优良的冷却介质。船舶动力的热效率一般只有 30% ~ 40%,约 30% 的热量以高温烟气的形式排入大气,其他剩余热量被冷却水等带走,造成了极大的浪费<sup>[5]</sup>,其中废热的分配大致如下:排气:25% ~ 40%,冷却机

油:3% ~ 5%,冷却气缸:10% ~ 14%,热辐射:2% ~ 4%,冷却增压器:5% ~ 8%<sup>[7]</sup>。从渔船本身存在的经济热源和经济冷源入手,尤其是开发渔船发动机尾气驱动的渔船制冷保鲜系统,成为广大科技人员开发经济高效型渔船制冷设备的思考点。

## 2 热驱动制冷技术

吸附式、吸收式与喷射式制冷是热能驱动的制冷循环,下面分别加以介绍。

### 2.1 吸附式制冷

自上世纪末以来,吸附式制冷技术作为一种热驱动的制冷技术得到了广泛的关注<sup>[8]</sup>。

#### 2.1.1 技术简介

吸附式制冷循环通常使用沸石、硅胶、活性炭、氯化钙等作为吸附剂,使用水、甲醇、氨等作为制冷剂<sup>[9]</sup>。与其他制冷循环不同,吸附式制冷循环需要采用两台及两台以上的吸附床,加热脱附与冷却吸附过程交替进行,从而实现系统的连续制冷。图 1 是吸附式制冷循环的流程图。该循环主要由两个吸附器、一个冷凝器和一个蒸发器组成。冷凝器与蒸发器通过一系列阀与两个吸附器相连接。

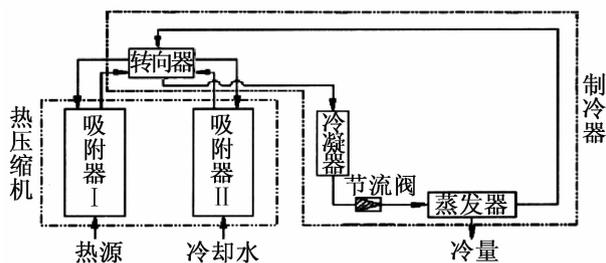


图 1 吸附式制冷循环

Fig. 1 Adsorption refrigeration cycle

当吸附器 I 被加热时,吸附器 I 与冷凝器相连接,制冷剂蒸汽在冷凝压力下从吸附器中脱附出来进入冷凝器,在冷凝器中冷凝并向环境放热,经过节流阀后进入蒸发器。当吸附器 I 被冷却时,吸附器 I 与冷凝器断开连接,并与蒸发器相连,吸附器 I 在蒸发压力下吸附蒸发器中的制冷剂,制冷剂蒸发吸热,实现制取冷量,从而完成循环。吸附器 I 与吸附器 II 交替运作从而保证系统的连续运行<sup>[10]</sup>。

吸附式制冷可分为物理吸附、化学吸附和干燥吸附。物理吸附利用吸附剂和制冷剂之间的范德华力原理,化学吸附利用吸附剂和制冷剂的化学键的作用力,干燥吸附是利用吸附剂吸附空气中的水分来制冷。物理吸附中常用的吸附剂为沸石、硅胶、活性炭和铝,常用制冷剂为甲烷、氨和水等。化学吸附常用工质对为氯化钙-氨和氯化钙-水。干燥吸附常用吸

附剂为硅胶,氯化锂和溴化锂。

### 2.1.2 在渔船中运用的缺点

1) 由于吸附剂为固体,吸附式制冷循环中吸附剂与制冷剂的传热只能采用导热的方式,换热能力较差,需要较大换热面积,单位质量吸收剂的制冷量低,设备体积较大<sup>[11]</sup>;

2) 吸附器在运行过程中反复被加热冷却,造成能量浪费,系统能效比(COP)低,利用活性炭与甲烷作为工质对,在渔船发动机尾气制冰工况下 COP 仅为 0.1 左右<sup>[12-13]</sup>。

### 2.1.3 在渔船中运用的优势

1) 结构简单,操作简便,没有运动部件,无噪声,运行费用低,使用寿命长,便于渔民操作;

2) 常用的工质对没有腐蚀性,系统抗震性好,可以适应渔船中颠簸的环境,保证系统长期稳定运行。

## 2.2 吸收式制冷

吸收式制冷早在 1859 年开始应用<sup>[7]</sup>,系统运行时仅仅需要少量的电功输入,在相同的制冷量下系统体积比吸附式制冷系统小很多。由于吸收剂与制冷剂的流动性好,系统可以改进实现更复杂的效率更高的制冷循环。

### 2.2.1 技术简介

吸收式制冷循环的运行效果很大程度上取决于工质对的物理化学性质<sup>[14]</sup>。工质对必须化学性能稳定,无毒,可燃性低。可用于吸收式制冷的制冷剂有大约 40 种,吸附剂有大约 200 种<sup>[15]</sup>,最常用的制冷剂工质对为水-氨和溴化锂-水。当使用水-氨工质对时,发生器出口需要有精馏塔,有精馏损失,效率较低,主要是利用其制取低于 0 °C 的冷量,0 °C 以上的空调工况可以采用效率较高的溴化锂吸收式制冷机<sup>[5-7]</sup>。图 2 为溴化锂-水单效吸收式制冷循环流程图。该系统主要由吸收器、发生器、冷凝器、蒸发器和循环泵组成。

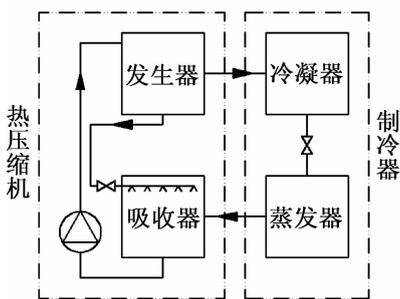


图 2 溴化锂-水吸收式制冷系统

Fig. 2 LiBr-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration cycle

在发生器内为制冷工质的浓溶液,加热浓溶液使得工质在溶液中的溶解度降低,工质在冷凝压力下挥

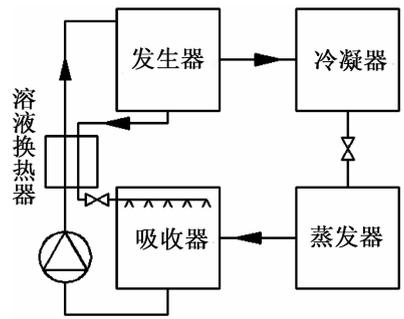


图 3 带溶液换热器的溴化锂水吸收式制冷  
Fig. 3 LiBr-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration cycle  
with heat exchanger

发出来进入冷凝器,向环境放热使制冷工质冷凝成为液体。经过节流使压力从冷凝压力降低到蒸发压力。工质进入蒸发器蒸发吸热,向环境中吸取热量,从而达到制冷的效果。吸收器中的溶液吸收来自蒸发器的蒸气。吸收器中的溶液通过循环泵泵入发生器中完成制冷循环。

高温热源使发生器内的制冷剂从溶液中蒸发出来。所以发生器的高温热量在吸收器和冷凝器造成了不可逆的损失。为了减少这种不可逆的损失,在图 3 中加入了一个溶液换热器。

这个换热器使得来自吸收器的溶液在进入发生器前利用离开发热器的热溶液进行预热。因此,发生器的热量输入减少,使得整个系统的 COP 升高。不仅如此,由于向环境放出的热量减少,吸收器的尺寸可以做的更小。实验表明,加入了溶液换热器后系统的 COP 可以上升 60%<sup>[16]</sup>。

溴化锂吸收式制冷在我国已成功用于万吨级远洋货轮、沿海客货轮、核潜艇的空调设备上<sup>[7]</sup>。

### 2.2.2 在渔船中运用的缺点

1) 结构复杂,设备众多,体积庞大,造价高,控制繁琐,不便于渔民操作,发生温度过高时会发生结晶现象;

2) 四个主要部件即发生器、冷凝器、吸收器和蒸发器需要自由水平面,不太适合船体的颠簸运动状态<sup>[17]</sup>。

### 2.2.3 在渔船中运用的优势

1) 运行连续,具有持续的制冷能力,COP 较高,在渔船发动机尾气制冰工况下 COP 可达 0.5 左右<sup>[17-18]</sup>;

2) 换热器中换热系数高,系统相对于吸附式制冷系统比较紧凑。

## 2.3 喷射式制冷

喷射器在 1910 年首次用于制冷<sup>[19]</sup>,并于 20 世

纪 30 年代广泛运用于大型建筑物的空调制冷系统,但随后被效率更高,设备更紧凑的压缩式制冷所取代,此后喷射器的研究工作一直处于停滞状态。随着能源危机的出现和人们节能意识的提高,喷射式制冷重新得到了人们的关注。

### 2.3.1 技术简介

在喷射器中是复杂的流体之间的能量传递过程。来自发生器的高温高压的工作流体经由工作流体喷嘴降低压力后,获得超音速,并卷吸来自蒸发器的低压低速的流体,两股流体混合后达到相同的速度。混合后的两股流体在扩压器内速度降低,动压转换为静压,实现了压缩气体的作用。

根据工作流体喷嘴位置的不同,喷射器的设计方法通常分为等压法和等截面法,图 4 是等压法喷射器和等截面法喷射器的示意图。当工作流体喷嘴出口在混合室内时,工作流体和引射流体的混合过程可以认为是等压的,这种方法被叫做等压法。当工作流体喷嘴出口伸入到喉部时,叫做等截面法。经过研究发现,等压法设计的喷射器效果要好于等截面法设计的喷射器。因此,目前的研究工作主要集中在等压法<sup>[20-21]</sup>。

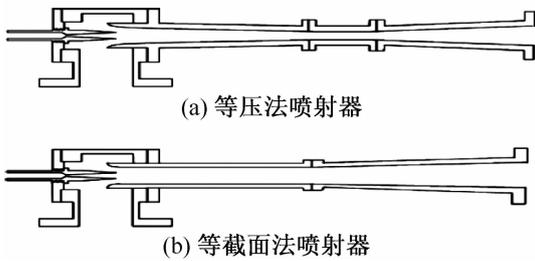


图 4 喷射器设计的两种方法

Fig. 4 Two ejector design methods

图 5 是喷射式制冷循环流程图。该循环主要由循环泵、发生器、喷射器、冷凝器、节流阀和蒸发器组成,其中循环泵、发生器和喷射器取代了蒸汽压缩式制冷循环中压缩机的作用。当发生器被加热时,高温高压的工质作为工作流体进入喷射器。蒸发器内的工质作为引射流体被引射进入喷射器,在蒸发器内形成低压,蒸发器内的工质蒸发获得冷量。喷射器扩压管出口的工质进入冷凝器,在环境温度下被冷凝成液体,一部分的冷凝液通过循环泵进入发生器,剩下的冷凝液通过节流阀进入蒸发器,完成循环。

喷射式制冷循环的性能与其选用的工质有关,分子量大的工质具有较好的循环性能<sup>[22]</sup>。按化学组成成分,常用的喷射式制冷工质分为以下四类<sup>[20]</sup>:

- 1) 卤代烃,如 R11、R113、R114、R134a、R245ca、R245fa 和 R152a。
- 2) 烃类,如甲烷 (R50),乙烷 (R170),丙烷

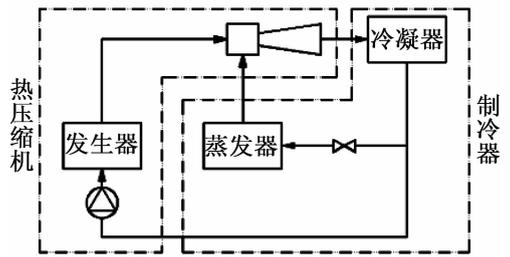


图 5 喷射式制冷循环

Fig. 5 Ejection refrigeration cycle

(R290), 环丙烷 (RC270), 丁烷 (R600), 异丁烷 (R600a) 和乙二醇。

3) 混合工质,如 R407A, R407B 和 R410A。

4) 其他制冷剂,如水 (R718) 和氨 (R717)。

利用水作为工质有许多优势。水的汽化潜热很大,所以制冷剂流量可以很小,从而可以节约泵功。水很便宜而且很容易得到,而且环保,臭氧消耗潜能值 (ODP) 和全球变暖潜能值 (GWP) 都为 0。但是,利用水作为制冷剂也有一些缺点,用水作为制冷剂时系统内为负压,由于水在 0 °C 以下会结冰,制冷温度无法做到 0 °C 以下<sup>[23]</sup>。由于水蒸气的比体积很大,导致制冷剂的体积流量大,因此系统内气相制冷剂管路直径需要足够粗来减少压降损失。

### 2.3.2 在渔船中运用的缺点

1) COP 较低,并且在偏离设计工况的情况下,系统的 COP 有明显的下降,利用水作为工质无法获得 0 °C 以下的冷量;

2) 目前对于喷射器的结构设计和工作性能计算没有一套成熟的方法,并且市场上喷射式制冷的产品较少,为设备选型带来困难。

### 2.3.3 在渔船中运用的优势

1) 系统中没有运动部件,设备结构简单,体积小,成本较低,运行可靠,几乎不需要维护,使用寿命长,通常可达 30 年<sup>[24-25]</sup>;

2) 可利用水等环境友好介质作为系统制冷剂。

## 3 压缩复合制冷系统

除了敷冰式保鲜外,压缩式制冷是目前国内渔船保鲜中应用最广的一门技术。本文作者提出利用渔船柴油发动机余热驱动喷射式制冷循环作为高温级,与机械压缩式制冷循环进行复叠,是一种创新的制冷方法,具有系统简单、投资小、效率高等优点。图 6 是喷射式与蒸汽压缩式复叠制冷循环的流程图,该流程由一个压缩式子循环和一个喷射式子循环组成,它通过冷凝蒸发器使喷射式子循环的蒸发器与压缩式子循环的冷凝器进行耦合,降低蒸发式子循环的冷凝温

度,从而可以提高系统的 COP。下面以 DC808 型 29.00 m 拖网渔船为例,对该循环在渔船保鲜中的应用进行分析。

### 3.1 循环热力计算

DC808 型 29.00 m 拖网渔船额定功率为 176.5 kW,转速为 1500 r/min,所需制冷量为 12 kW<sup>[2]</sup>。经计算当动力烟气进发生器的温度为 350 °C,出发生器温度为 280 °C 时,可利用的烟气热量为 33.2 kW。压缩式子系统选用 R22 作为工质,蒸发温度 -18 °C,冷凝温度 10 °C。喷射式子系统选用水作为工质,发生温度 250 °C,冷凝温度 35 °C,蒸发温度 5 °C。

经计算可得,压缩式子循环在不采用喷射式制冷循环进行复叠,即冷凝温度 35 °C 的情况下压缩式子循环 COP<sub>conv</sub> 为 2。当采用喷射式与压缩式复叠,即冷凝温度 10 °C 的情况下,系统的 COP = 4.4,此时冷凝蒸发器所需要的功率为  $Q_{casc} = 14.7$  kW;喷射式子循环在给定工况下的理论泵功极小,可以忽略不计;经计算<sup>[26]</sup>,喷射式子循环的 COP<sub>ejec</sub> 为 0.6,则发生器需要的热量为:

$$Q_{gen} = \frac{Q_{casc}}{COP_{ejec}} = 24.5 \text{ kW} < 33.2 \text{ kW} \quad (1)$$

此时,渔船发动机尾气余热足可以满足喷射式子循环的发生器热量需要。

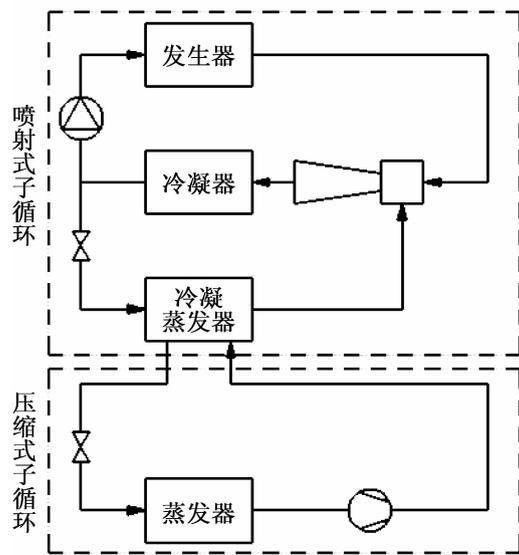


图6 喷射式与蒸汽压缩式复叠制冷循环

Fig. 6 Ejection-compression cascade refrigeration cycle

图7为渔船发动机尾气中可利用的余热、为了维持压缩式子循环正常运行喷射式子循环发生器所需要的热量以及喷射式子循环的 COP 随喷射式子循环中发生器发生温度的变化规律。可以看出,喷射式子循环的 COP 随着发生器发生温度的升高而升高,而发动机的尾气中可以利用的余热以及发生器所需要

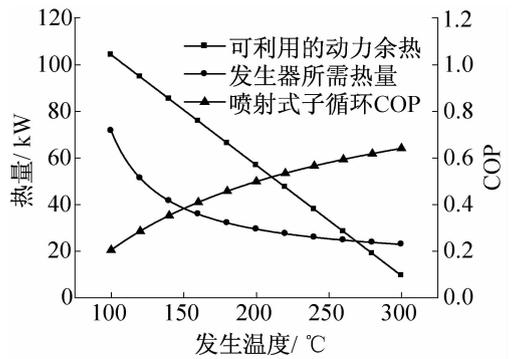


图7 系统性能随发生温度的变化,喷射式子循环:蒸发温度 5 °C,冷凝温度 35 °C

Fig. 7 System performance versus the generation temperature, ejection subsystem: evaporating temperature 5 °C, condensing temperature 35 °C

的热量随着发生器发生温度的升高而减少。当发生温度较低时,发生器所需热量随着发生温度的升高急剧下降,随着发生温度的升高,下降趋势逐渐缓慢。在 270 °C 以下,随着发生温度变化,渔船可利用的动力余热可以满足系统运行的要求。

图8为发生器所需热量以及喷射式子循环的 COP 随喷射式子循环冷凝温度的变化规律。可以看出,随着冷凝温度的升高,由于喷射式子循环负荷增大,发生器所需要的热量也随之增大,喷射式子循环的 COP 随之降低。尽管喷射式子循环的 COP 随着喷射子系统冷凝温度的降低而降低,在很大的范围内,仍有足够的动力余热维持喷射子循环和压缩子循环的正常运行。在 43 °C 以下,随着喷射子循环冷凝温度变化,渔船可利用的动力余热可以满足系统运行的要求,而通常我国沿海海水的温度常年年仅仅在 20 °C 左右,因此,在正常工况下,渔船发动机尾气余热足可以满足喷射式子循环的发生器热量需要。

与喷射式制冷复叠的压缩式制冷系统 COP 比传统的压缩式制冷系统提高了:

$$\eta = \frac{COP - COP_{conv}}{COP_{conv}} = \frac{4.4 - 2}{2} = 120\% \quad (2)$$

用于制冷的动力燃料消耗可减少:

$$\eta_{fuel} = 1 - \frac{1}{1 + \eta} = 1 - \frac{1}{1 + 120\%} = 54.5\% \quad (3)$$

### 3.2 设备占地大小计算

对渔船进行喷射式与压缩式复叠改造需增加冷凝器,冷凝蒸发器,发生器,喷射器和循环泵各一个,上述设备体积都较小,适合渔船狭窄的空间。

### 3.3 经济性分析

目前柴油的价格为 8000 元/吨,柴油的燃烧值为  $3.3 \times 10^4$  kJ/kg,以柴油机效率 30 %,制冷机每年工

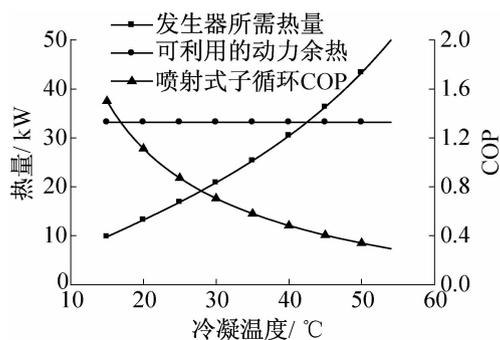


图8 系统性能随喷射子循环冷凝温度的变化, 喷射式子循环: 蒸发温度 5 °C, 发生温度 250 °C  
Fig. 8 System performance versus the condensing temperature of the ejection subsystem, ejection subsystem: evaporating temperature 5 °C, generating temperature 250 °C

作 300 天来算, 则每年可节约柴油约 2 万元。按设计工况进行选型, 壳管式冷凝器价格约 2500 元, 发生器价格约 5000 元, 喷射器价格约 3000 元, 冷凝蒸发器价格约 2500 元, 加上设计安装调试运输费用, 按增加喷射式复叠设备的改造成本为 2 万元来算, 则 1 年内即可收回成本, 而压缩式制冷设备通常使用寿命是 15 年, 喷射式制冷设备是 30 年。

### 3.4 压缩复合制冷系统应用于渔船的优点

采用压缩复合制冷系统具有以下优点:

- 1) 设备体积小, 操作简便, 无需维护, 使用寿命长, 成本低, 节能效果好, 1 年内即可收回成本;
- 2) 系统简单, 可以利用现有的渔船压缩式制冷系统进行改造, 只需增加一个烟气驱动喷射式制冷系统, 改造方便。

## 4 结论

通过对吸附、吸收和喷射三种热驱动的制冷方法进行对比分析可得出以下结论: 吸收式制冷系统在渔船制冰工况下 COP 最高, 但控制繁琐, 且不适合渔船颠簸的工况; 吸附式制冷系统可以适应渔船工况, 操作简便, 但设备体积庞大; 喷射式制冷系统设备体积小, 使用寿命长, 但 COP 较低。本文采用压缩复合制冷系统为渔船提供制冷保鲜, 通过压缩式子循环与喷射式子循环之间的耦合, 克服以水作为工质的喷射式制冷不能实现 0 °C 以下制冷的缺点, 并通过降低压缩式子系统的冷凝温度, 提高了系统的性能。计算分析表明, 渔船发动机尾气热量足够驱动喷射式子系统。通过采用压缩复合制冷系统, COP 可提高 120 % 左右, 可减少动力燃料消耗 54.5 %, 1 年内即可收回改造成本。

### 参考文献

- [1] 彭光, 王永杭. 浅谈制冷技术 (Refrigeration technology) 在渔船保鲜领域的应用 [J]. 现代渔业信息, 2006, 21 (10): 19-20. (Peng Guang, Wang Yonghang. Primarily talking for application of refrigerated technology in fish preservation on the fishing vessel [J]. Modern Fisheries Information, 2006, 21 (10): 19-20.)
- [2] 谭显光, 陈焕新, 齐朝晖. 吸附式制冷系统应用于中小型渔船冷库的探讨 [J]. 制冷空调与电力机械, 2003, 24 (5): 10-13. (Tan Xianguang, Chen Huanxin, Qi Zhao-hui. Discussion on the application of adsorption refrigeration system to cold storage in fishing vessels [J]. Construction Machinery For Hydraulic Engineering & Power Station, 2003, 24 (5): 10-13.)
- [3] 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): 30-32. (Qi Zhao-hui, Tang Guangfa, Li Dingyu, et al. Application of adsorption refrigeration technology in waste heat recovery [J]. Energy of China, 2001 (4): 30-32.)
- [4] 郭夕国. 从制冷、制冰和海水淡化技术改造看发展渔船生产力 [J]. 水产科技, 2003 (6): 32-33. (Guo Xiguo. See the development of fishing vessel productivity from refrigeration, ice making and seawater desalination [J]. Fisheries Science & Technology, 2003 (6): 32-33.)
- [5] 林陈敏, 陈亚平, 田莹. 氨水吸收式制冷系统在渔船尾气中余热利用分析 [J]. 能源研究与利用, 2008 (1): 37-40. (Lin Chenmin, Chen Yaping, Tian Ying. Analysis of fishing vessels waste heat using of aqua ammonia absorption refrigeration system [J]. Energy Research & Utilization, 2008 (1): 37-40.)
- [6] 徐士鸣, 袁一. 利用渔船柴油机排烟余热制冷保鲜的可行性分析 [J]. 渔业现代化, 1995 (5): 31-34. (Xu Shiming, Yuan Yi. Analysis of possibility of refrigeration utilizing waste heat from diesel engine exhaust of fishing vessels [J]. Fishery Modernization, 1995 (5): 31-34.)
- [7] 段若玲, 刘申. 采用氨吸收制冷提高渔船动力装置热效率 [J]. 海洋渔业, 1983 (5): 204-208. (Duan Ruoling, Liu Shen. Using ammonia absorption refrigeration to improve power plant thermal efficiency on fishing vessels [J]. Marine Fisheries, 1983 (5): 204-208.)
- [8] R Z Wang, R G Oliveria. Adsorption refrigeration-an efficient way to make good use of waste heat and solar energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32 (4): 424-458.
- [9] 陈可. 渔船烟气余热吸附制冷技术 [J]. 渔业现代化, 2007 (2): 54-59. (Chen Ke. Adsorption refrigeration technology using waste heat from fishing vessel exhaust [J]. Fishery Modernization, 2007 (2): 54-59.)

- [10] S A Tassou, J S Lewis, Y T Ge, et al. A review of emerging technologies for food refrigeration applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(4): 263-276.
- [11] R E Critoph, Y Zhong. Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology, Proceedings of IMechE, Part E[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2004, 219(E3): 285-300.
- [12] L W Wang, R Z Wang, J Y Wu, et al. Design, simulation and performance of a waste heat driven adsorption ice maker for fishing boat[J]. Energy, 2006, 31(2/3): 244-259.
- [13] L W Wang, R Z Wang, J Y Wu, et al. Adsorption ice makers for fishing boats driven by the exhaust heat from diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(13/14): 2043-2057.
- [14] H Perez-Blanco. Absorption heat pump performance for different types of solution[J]. International Journal of Refrigeration, 1984, 7(2): 115-122.
- [15] P Srihirin, S Aphornratana, S Chungpaibulpatana. A review of absorption refrigeration technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001, 5(4): 343-372.
- [16] S Aphornratana. Theoretical and experimental investigation of a combined ejector-absorption refrigerator[D]. UK: University of Sheffield, 1995.
- [17] 王树刚, 王如竹. 中小型渔船制冷技术的研究进展[J]. 制冷与空调, 2002, 2(3): 16-20. (Wang Shugang, Wang Ruzhu. Progress on research and applications of refrigeration technology in fishing vessels [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2002, 2(3): 16-20.)
- [18] Y Fan, L Luo, B Souyri. Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1758-1775.
- [19] Gosney W B. Principle of refrigeration[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [20] J M Abdulateef, K Sopian, M A Alghoul, et al. Review on solar-driven ejector refrigeration technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7): 1338-1349.
- [21] K Chunnanond, S Aphornratana. Ejectors: applications in refrigeration technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004, 8(2): 129-155.
- [22] Holton W C. Effect of molecular weight of entrained fluid on the performance of steam-jet ejector[J]. ASME Trans, 1951, 50: 905-910.
- [23] Sun D W. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle, operating with various refrigerants [J]. Energy Conversion and Management, 1999, 40(8): 873-884.
- [24] V M Nguyen, S B Riffat, P S Doherty. Development of a solar-powered passive ejector cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(2): 157-168.
- [25] 季红军, 陶乐仁, 王金锋, 等. 太阳能喷射式制冷系统能耗与经济性分析[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(6): 511-514. (Ji Hongjun, Tao Leren, Wang Jinfeng, et al. Energy consumption and economic analysis of ejector refrigeration driven by solar energy[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008, 30(6): 511-514.)
- [26] 燃料化学工业部化学工业设计院. 蒸汽喷射制冷设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1972.

通信作者简介

陈光明, 男(1958 -), 教授, 浙江大学制冷与低温研究所所长, (0571)87951680, E-mail: gmchen@zju.edu.cn。研究方向: 制冷基础热力学理论, 节能与低品位能源利用, 制冷空调热泵技术, 吸收制冷, 新型制冷剂, 低温生物中的热物理技术。

About the corresponding author

Chen Guangming(1958 -), male, professor, head of the Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, (0571) 87951680, E-mail: gmchen@zju.edu.cn. Research fields: fundamentals of refrigeration thermodynamics, low grade energy utilization and energy conservation, refrigeration air-conditioning and heat pump, absorption refrigeration, new refrigerants, thermal technology for cryobiology.

(上接第27页)

- and Experimental Investigation on Vaporization of Fuel System for LNG Vehicle[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2007, 35(6): 533-535.)
- [21] Esarte J, Min G, Rowe D M. Modelling heat exchangers for thermoelectric generators[J]. Journal of Power Sources, 2001, 93(1/2): 72-76.

通信作者简介

厉彦忠, 男(1958 -), 教授, 博士生导师, (029)82668725, E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn。研究方向: LNG冷能回收, 火箭低温燃料管理, ICF冷冻靶温度场控制。现在进行的研究

项目有: 国家科技支撑计划课题——基于LNG冷能全液体空分系统及其关键技术等。

About the corresponding author

Li Yanzhong (1958 -), male, Ph. D./ Professor, (029) 82668725, E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: Cold energy recovery for LNG, cryogenic propellants management for rockets, temperature field control of cryogenic target in ICF. The author takes on project supported by the Research Fund for Key Technologies R&D Program of China: The key techniques of full-liquid air separation system utilizing LNG coldness.