

船用喷射制冷-转轮除湿空调系统工质选择

赵晨旭, 郑超瑜, 陈武

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了给船用喷射制冷-转轮除湿空调选择合适的制冷剂, 在考虑系统构架和工作条件对系统性能影响的基础上, 分析了5种环保制冷工质(R134a, R245fa, R718, R717, R1234yf)的基本物性、引射系数、COP(coefficient of performance)和充注量, 并进行了对比。结果认为没有任何一种制冷剂可以在各种场合都具备最佳的性能。但在船用喷射制冷-转轮除湿空调系统具备较高发生温度($\geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)和较低冷凝温度($\leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, R718具有较好的应用潜力;而当发生温度较低($< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, R1234yf是一种较为理想的选择。

[关键词] 船用空调系统; 温湿度; 喷射制冷; 转轮除湿; 工质选择

[中图分类号] U 664.5

Analysis and Selection of Working Fluid for Marine Ejector Refrigeration Rotary Desiccant Air-conditioning System

ZHAO Chenxu, ZHENG Chaoyu, CHEN Wu

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to select suitable refrigerants for a Marine Ejector Refrigeration Rotary Desiccant(ERRD) Air-conditioning(A/C) system the basic physical properties, ejector coefficient, COP(coefficient of performance) and charge amount of five environmentally friendly refrigerants(R134a, R245fa, R718, R717, R1234yf) were theoretically analyzed and compared on the basis of considering the influence of system architecture and working conditions on system performance. The result is that no refrigerant can have the best performance in various occasions, but in the marine ERRD A/C system with a higher generation temperature($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ and above) and relatively lower condensation temperature($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and below), R718 has a good use potential. However, when the generation temperature is relatively lower($< 90\text{ }^{\circ}\text{C}$), R1234yf is a relatively good choice.

Keywords: marine A/C system; independent temperature and humidity control; ejector refrigeration; rotary desiccant; working medium selection

0 引言

船用喷射制冷-转轮除湿空调系统是一种基于温湿度解耦(独立)控制策略的新型复合式空调系统。该系统由转轮除湿子系统和喷射制冷子系统组成, 采用船舶废热驱动。其中, 转轮除湿子系统

[收稿日期] 2018-11-24

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51679107); 福建省自然科学基金项目(2017J01705)

[作者简介] 赵晨旭(1994—), 男, 硕士生, 从事船舶制冷空调系统研究。通信作者: 陈武(1973—), 教授, 博士, 主要从事空调及冷藏设备的仿真、控制及运行优化, 船舶余热利用以及绿色制冷剂的研究。
E-mail: chenwu73@jmu.edu.cn

承担处理潜热的任务，喷射制冷子系统和海水冷却器共同承担处理显热的任务，可实现对舱室内的温湿度解耦（独立）控制，从而避免出现采用温湿度耦合控制的各种弊端。

单独的转轮除湿系统^[1]和喷射制冷系统^[2]已经有大量的研究，但是将两者结合起来并考虑相互影响的研究还比较少。近年来，部分学者对其展开了初步研究，包括系统的构架研究^[3]以及系统性能的初步理论研究^[4]。在制冷工质方面，尽管国内外已经有大量文献^[5-8]对喷射制冷系统中所使用的制冷剂进行了深入研究，但是仍缺乏对船用喷射制冷-转轮除湿空调系统工质的研究。此外，目前大型商船的主机排气温度约为250~350℃，辅机的排气温度为300~400℃，废气锅炉也可产生大量高压蒸气（120~180℃），拥有丰富稳定的优质热源。这些优质热源不仅在一定程度上提高了喷射制冷系统的性能，而且为高温制冷剂的使用提供了可能。因此，有必要对船用喷射制冷-转轮除湿空调系统的制冷剂选择和分析开展相关研究。

本文针对船用喷射制冷-转轮除湿空调系统工质的选择问题，对几种环保制冷工质（R134a，R245fa，R718，R717，R1234yf）进行综合分析，以期对船用喷射制冷-转轮除湿空调系统工质的合理选择提供参考。

1 船用喷射制冷-转轮除湿空调系统

船用喷射制冷-转轮除湿空调的系统原理图如图1所示。

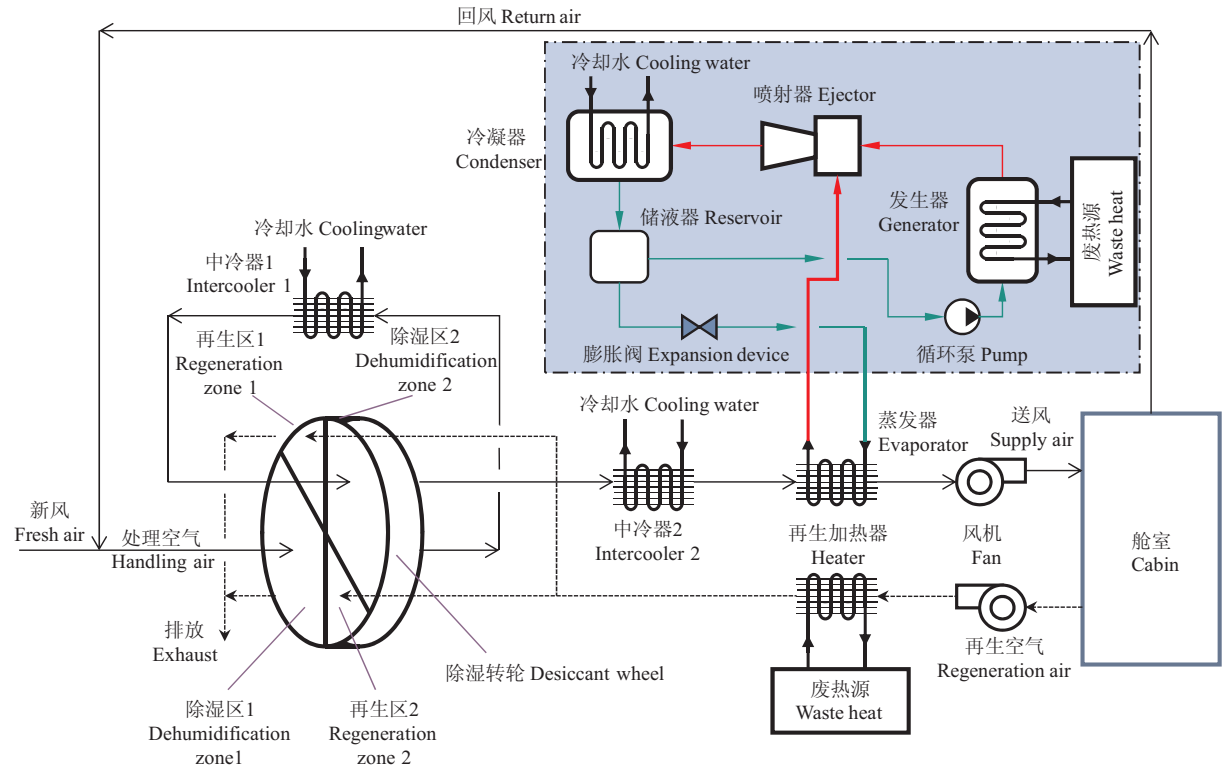


图1 船用喷射制冷-转轮除湿空调系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of a marine ERRD A/C system

船舶舱室的一次回风与外界新风按照新风比的要求混合送入系统，通过转轮的除湿区1对空气进行首次干燥处理，伴随着除湿过程的进行，处理空气的潜热转化为显热，使得空气的温度明显增加。随后空气经由中冷器1利用海水进行冷却降温，并经过除湿区2再次进行除湿。此后将处理空气通过中冷器2进行冷却处理，然而由于海水温度较高，冷却后的处理空气无法达到送风要求，因此需要通过喷射制冷子系统的蒸发器对其进行降温；同时，为了保证系统的连续运转，舱室回风经废热加热后送入转轮再生区进行再生，使之恢复除湿能力。喷射制冷子系统由发生器、喷射器、冷凝器、储液

器、膨胀阀、循环泵等部件构成，制冷工质经由船舶废热源驱动的发生器被加热为高温、高压流体，并经喷射器喷射变为高速流动的流体，进而抽吸蒸发器中的工作流体，使之蒸发，从而实现对处理空气的冷却作用。

由于喷射制冷子系统不需要承担除湿任务，不必采用过度冷却的低温露点除湿方式，因此，其蒸发温度比需要承担除湿任务的喷射制冷系统要高，较高的蒸发温度可以提高喷射制冷子系统的工作效率，这可能会对喷射制冷子系统中制冷剂的选择产生很大影响。

2 喷射制冷子系统工质选择

工作介质显著影响喷射器的性能和制冷循环性能。本文以制冷剂的环保性能和发展趋势为出发点，选择 5 种制冷剂（R134a，R245fa，R718，R717，R1234yf）作为研究对象，其基本物理性质如表 1 所示。由于临界温度和临界压力限制了制冷剂的工作范围，因此在选择制冷剂时，必须注意制冷剂有效工作范围是否与工作条件相匹配。从表 1 中可看出：R718 具有最高临界温度，随后临界温度从高到低依次为 R245fa，R717，R134a，R1234yf；临界压力从高到低依次为 R718，R717，R134a，R245fa，R1234yf；ASHRAE 安全级别用于衡量制冷剂的安全性能，A₁ 代表无毒不可燃，A₂ 代表无毒可燃，B₁ 代表有毒不可燃，B₂ 代表有毒可燃；ODP（ozone depletion potential）和 GWP（global warming potential）评价制冷剂对研究的影响程度，其值越小代表对环境的影响越小。

表 1 制冷剂的基本物性参数
Tab.1 Basic physical properties of the selected refrigerants

工质 Refrigerant	临界温度 Critical temperature /K	临界压力 Critical pressure /MPa	摩尔质量 Molar mass /(g·mol ⁻¹)	临界密度 Critical density /(kg·m ⁻³)	ASHRAE 安全级别	ODP	GWP
R134a	374.25	4.07	102.03	515.3	A ₁	0	1 300
R245fa	427.16	3.65	134.05	516.1	B ₁	0	790
R718	647.10	22.06	18.00	322.0	A ₁	0	0
R717	405.40	11.33	17.03	225.0	B ₂	0	1 950
R1234yf	367.85	3.38	114.04	475.6	A _{2L}	0	<1

2.1 制冷剂分析的基本条件

为了分析和选择制冷剂，设定系统总制冷量 Q_L 为 3 kW，发生温度 T_g 为 90 ℃，由于该喷射制冷子系统仅承担显热负荷，因此，为了满足夏季舱室内的室温为设计参数温度 27℃，考虑换热温差以及流动过程中的传热效应，蒸发温度 T_e 选定为 10 ℃。由于舷外海水温度会随着外界环境温度波动，因此，冷凝温度 T_c 分别选取 28,30,32,34,36,38,40,42,44 ℃ 这 9 组温度进行分析。此外，由于科学界和制造业逐渐放弃卤代烃类，开始转向天然制冷剂和可再生的化石燃料^[10]，而具有最佳环保特性的天然制冷剂 R718 系统不仅可以直接利用废弃锅炉产生的多余蒸气，还可以和船舶的淡水系统进行联合，这会与选用其他制冷工质的系统架构有所区别。同时，考虑到 R718 制冷剂的临界温度较高，可以适用于发生温度较高的情况。因此，又对 R718 制冷剂在发生温度高的情况，对其下性能进行了分析。

2.2 喷射制冷子系统的工作过程和性能指标

蒸气喷射制冷理论循环过程如图 2 所示。图中： T_g 为发生温度； P_g 为一次流体在发生温度下对应的饱

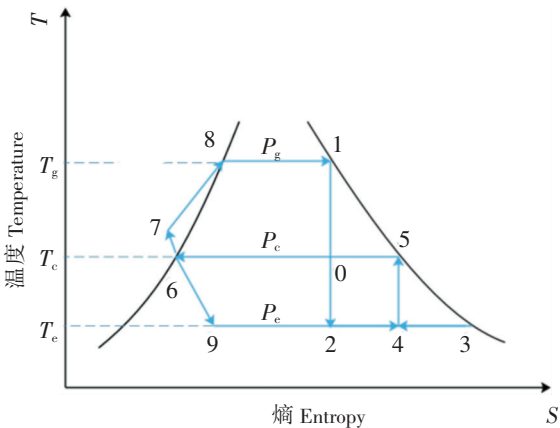


图 2 蒸气喷射制冷理论循环过程 T-S 图
Fig.2 T-S diagram of a theoretical cycle process of an ejector refrigeration

和蒸气压力; T_c 为冷凝温度; P_c 为冷凝压力; T_e 为蒸发温度; P_e 为蒸发压力。通过利用船舶废热驱动蒸气发生器产生高温、高压蒸气或直接利用废弃锅炉产生的蒸气通向喷嘴, 使蒸气压力从 P_g 膨胀至 P_e (1→2), 随之与蒸发器中的冷蒸气进行混合 (2→4, 3→4), 混合后的蒸气经由扩压管扩压后压力升高至 P_c (4→5), 再利用舷外海水冷凝 (5→6) 成冷凝液后分为两路, 一路经由节流阀节流后压力降为 P_e (线 6→9), 并返回到蒸发器蒸发吸热 (线 9→3), 另一路在循环泵的作用下压力升高 (6→7), 被打入蒸气发生器中加热 (7→8), 并汽化 (线 8→1), 从而实现一个完整的循环。

喷射器的性能是通过引射系数 (μ) 来衡量的, $\mu = m_e/m_p$ ^[9]。式中: m_e 为二次流体质量流量 (kg/s); m_p 为一次流体质量流量 (kg/s)。

系统性能通过 COP 来衡量, $COP = Q_e/(Q_p + W_{pump})$ 。其中: Q_p 为蒸气发生器消耗的功率 (kW); Q_e 为蒸发器产生的冷量 (kW); W_{pump} 为循环泵消耗的功率 (kW)。

对于一般循环而言, 循环泵所消耗的功与蒸气发生器消耗的功相比非常小, 因此泵功可以忽略 ^[10]。结合图 2, 系统循环 COP 可表示为:

$$COP = \mu(h_3 - h_9)/(h_1 - h_6)。$$

式中: h_1 为发生温度下饱和蒸气的焓 (kJ/kg); h_3 为蒸发温度下饱和蒸气的焓 (kJ/kg); h_6 为冷凝温度下饱和液的焓 (kJ/kg); h_9 为膨胀阀出口流体的焓 (kJ/kg)。

喷射器的结构通常通过喷射器恒定喉管截面面积与喷嘴喉部横截面积至比来表示, 文中喷射器的面积比均为在给定工况下实现最大性能时的喷射器结构。

2.3 制冷剂分析

2.3.1 安全性和环保性

由表 1 可知所选 5 种制冷剂的安全级别, R245fa 和 R717 都具有毒性, 因为大多数船舱相对封闭, 选择制冷剂时应尽量避免选择有毒制冷剂, 所以这两种制冷剂不具备可选性。R134a 和 R718 的安全级别高, 是这 5 种制冷剂中较为合理的选择。从环保性能考虑, R718 和 R1234yf 由于 GWP 较低, 因此较为理想。

2.3.2 不同工作条件下的引射系数分析

为了分析所选制冷剂在不同工作条件下的性能情况, 采用 I. W. Eames ^[10] 模型, 根据等压混合理论计算并分析了引射系数。图 3 是发生温度为 90 ℃, 蒸发温度为 10 ℃ 时, 引射系数随冷凝温度的变化趋势。总体而言, 所选制冷剂的引射系数都随着冷凝温度的升高而降低, 但相较于其他 4 种制冷剂, R1234yf 具有最佳的引射系数, R134a 和 R717 的引射系数相近但都低于 R1234yf 的, R718 的引射系数则远低于其他几种制冷剂。当冷凝温度范围在 28 ~ 44 ℃ 时, 冷凝温度每上升 1 ℃, R134a, R245fa, R717 和 R1234yf 的引射系数分别平均降低 0.056 25, 0.050 63, 0.054 38 和 0.05 500。当冷凝温度高于 40 ℃ 时, 由于背压过高, 引起工质回流, 致使 R718 制冷剂的引射系数下降为 0。当冷凝温度范围在 28 ~ 40 ℃ 时, 引射系数随着冷凝温度每升高 1 ℃ 而平均下降 0.056 67。尽管 R718 引射系数随冷凝温度的平均变化率相较于其他 4 种制冷剂而言略微敏感, 但差别并不大。此外, 当冷凝温度位于 28 ~ 33 ℃ 时, 尽管 R717 的引射系数比 R134a 略高, 但当冷凝温度升高至 33 ~ 44 ℃ 范围内时,

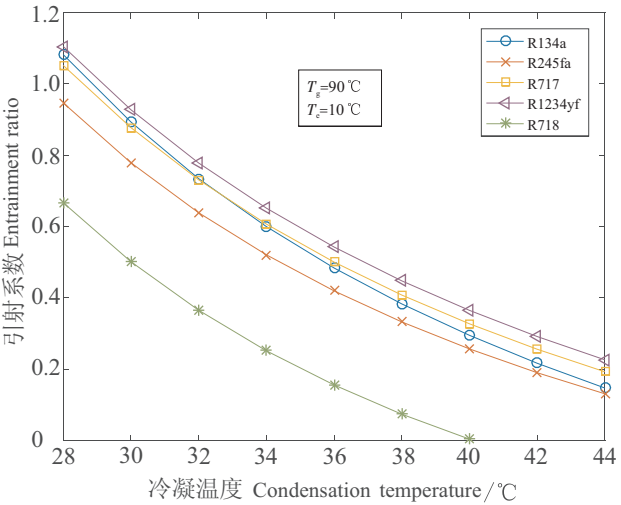


图 3 不同制冷剂的引射系数变化趋势
Fig. 3 The variation trend of the entrainment ratio of ejector at different refrigerants

R134a 的引射系数反而要略高于 R717，这意味着 R134a 相较于 R717 对于冷凝温度更加敏感。总而言之，当发生温度为 90 ℃，冷凝温度在 28 ~ 34 ℃ 时，从引射系数和对冷凝温度敏感度方面考虑，选择 R1234yf 更加理想。在相同条件下，R718 表现欠佳。

2. 3. 3 不同工况下的理论循环 COP

图 4 是所选制冷剂对应的喷射制冷系统的理论循环 COP。显然所选制冷剂的理论循环 COP 都随着冷凝温度的升高而下降，且制冷剂对应的理论循环 COP 从大到小依次为：R717，R1234yf，R134a，R245fa，R718。其中：当冷凝温度低于 30 ℃ 时，R134a 的理论循环 COP 大于 R1234yf 的。当冷凝温度范围在 28 ~ 44 ℃ 内，随着冷凝温度每升高 1 ℃，R134a，R245fa，R717，R1234yf 对应的理论循环 COP 平均下降 0.044 38，0.033 13，0.045 63，0.040 00，0.045 00。从理论循环 COP 角度而言，R717 具有良好的表现，但安全因素限制了它的使用。

通过对比图 3 和图 4 发现，拥有最优的引射系数并不意味着拥有最佳的理论循环 COP，例如 R1234yf 在这 5 种制冷剂中具有最大的引射系数，但是其对应的理论循环 COP 并非最佳。

2. 3. 4 R718 在发生温度高时的性能

虽然 R718 制冷剂对应的引射系数和理论循环 COP 以及可变工况的特性在发生温度低的情况下表现较差，但是船上的高温废热为 R718 的使用提供了有利条件。如图 5、图 6 所示，在相同的蒸发温度和冷凝温度下，随着发生温度从 90 ℃ 升高至 150 ℃，R718 的引射系数和理论循环 COP 显著提高。当引射系数大于 0.5 时，其发生温度为 90，120，150 ℃ 时所有对应的冷凝温度分别低于 28，30，32 ℃，这表明在相同条件下，提高发生温度可以提高冷凝温度的上限以及引射系数。

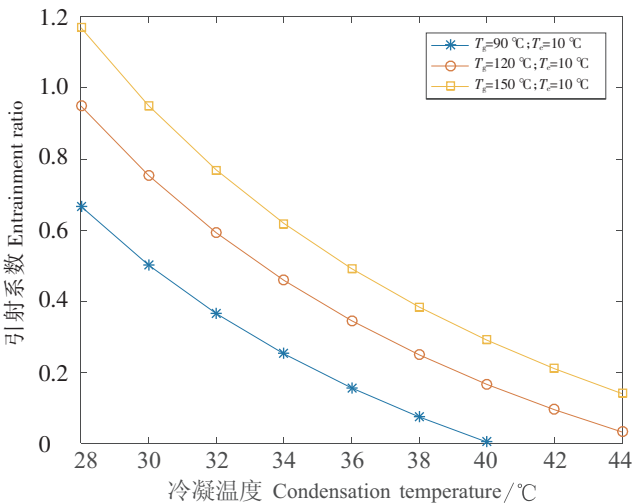


图 5 R718 喷射制冷系统的引射系数变化趋势
Fig.5 The variation trend of entrainment ratio of R718 at different working conditions

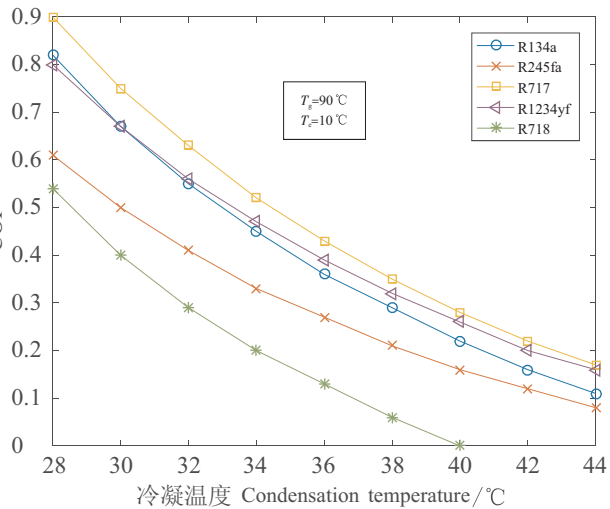


图 4 不同制冷剂的理论循环 COP 变化趋势
Fig.4 The variation trend of theoretical cycle COP of ejector refrigeration system with different refrigerants

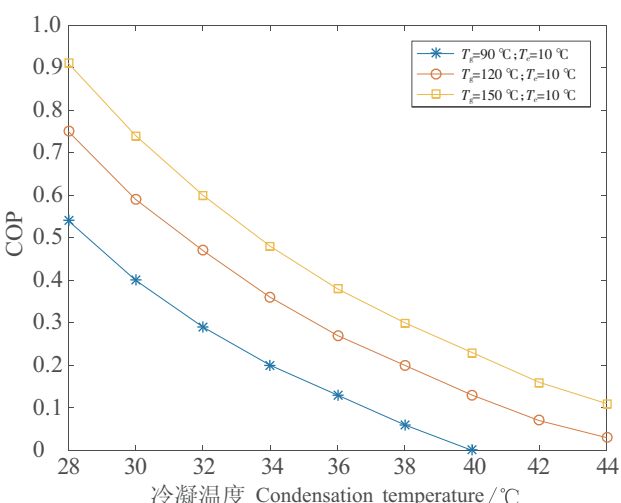


图 6 R718 喷射制冷系统理论循环 COP 变化趋势
Fig.6 The variation trend of theoretical cycle COP of a steam ejector refrigeration system

发生温度越高，冷凝温度可取上限就越大，相应的理论循环 COP 也就越高。图 4 则表明 R718 的理论循环 COP 与 R1234yf 差异很小，特别是在低冷凝温度时 R718 甚至有更优的表现。显然，发生温

度高有利于 R718 制冷剂的使用。

2.3.5 充注量

在实际情况中，系统充注的制冷剂量通常与其设备规模和经济性有关。由于不同制冷剂具有不同的潜热值，获取相同冷量时系统所需的充注量也不同。相比之下，由于 R718 具有较大的气化潜热值，因此获取相同的制冷量所需的充注量可能会更少。但由于不同制冷剂的引射系数不同，因此不同的制冷剂充注量应综合考虑。喷射制冷系统的制冷剂充注量可以通过系统中的总质量流量进行分析，制冷剂总质量流量 $m = m_p + m_e$ 。其中： m_p 为一次流体质量流量； m_e 为二次流体质量流量。

图 7 是所选制冷剂在制冷量为 3 kW 时，制冷剂的质量流量随冷凝温度的变化过程。可以看出，R134a, R245fa 和 R1234yf 的质量流量接近且相对较大；R717 和 R718 的质量流量则远小于其他三种制冷剂，这是因为 R717 和 R718 都具有较大的潜热值。另外，对于 R718 系统，当冷凝温度高于 38℃ 时，由于 R718 的引射系数显著下降，系统质量流量会急剧增加，且系统的 COP 仍然很低，由于这种情况在应用中已经缺乏实际意义，因此图 7 中并未画出冷凝温度高于 38℃ 的曲线。从图 8 中可看出，对于 R718 喷射制冷系统，当其他条件保持不变时，在一定范围内提高发生温度不仅可以减少制冷剂的质量流量，而且显著提高相应的冷凝温度。从充注量角度分析，R718 和 R717 更具优势。此外，图 8 也说明了在相同冷凝温度情况下，随着发生温度的提高，系统内制冷剂的充注量进一步得到降低。

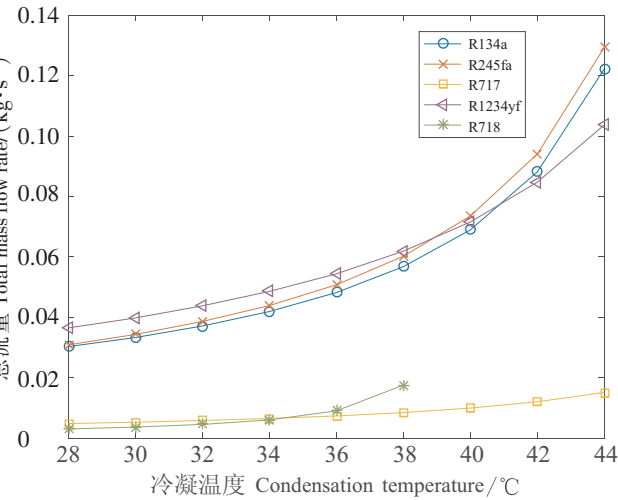


图 7 不同制冷剂的质量流量变化曲线图

Fig.7 The total mass flow rate of different refrigerants

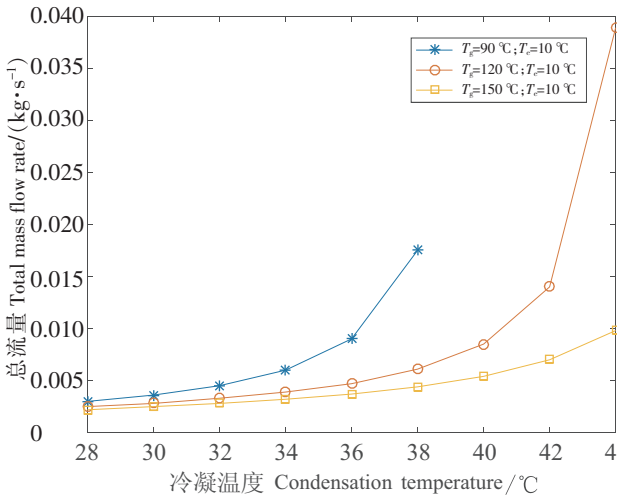


图 8 R718 制冷剂的质量流量变化曲线图

Fig.8 The total mass flow rate of R718 under different working conditions

3 结语

- 1) 从理论循环 COP 方面考虑，R717 具有最高的理论循环 COP 和最小的充注量，但其 ASHRAE 安全等级仅为 B₂，这限制了该种制冷剂在船舶上的使用。
- 2) 从环境角度考虑，R718 具有最佳的环保性能，其不仅价格低廉，具有较大的潜热值，而且化学性能稳定。但由于该制冷剂在低发生温度，高冷凝温度下引射系数和系统循环 COP 都比较低，因此在发生温度高的情况下该种制冷剂才有使用的可能。例如当发生温度达到 150℃ 时，R718 的引射系数和理论循环 COP 已经达到 R1234yf 在发生温度为 90℃ 时的大小。因此，对于拥有丰富热源的船用 ERRD A/C 系统，选择 R718 可以充分利用高热源和 R718 自身的优势。
- 3) 从综合性能方面考虑，R1234yf 具有最佳的引射系数，且具有良好的环保性能，但其临界温度较低。在船用 EERD A/C 中，当发生温度相对较低时，例如发生温度小于 90℃ 时，R1234yf 是一

种较为合适的选择。

4) 总体而言,所选制冷剂都无法在各个方面都具有最佳的性能。对于船用 ERRD A/C 系统,选择 R1234yf 或 R718 是一种相对较为合适的方案,其具体选择主要取决于船舶废热的品质。

[参 考 文 献]

- [1] EL-AGOUZ S A, SATHYAMURTHY R, AND MANOKAR A M. Improvement of humidification-dehumidification desalination unit using a desiccant wheel [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 131: 104-116.
- [2] DONG J, YU M, WANG W, et al. Experimental investigation on low-temperature thermal energy driven steam ejector refrigeration system for cooling application [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 167-176.
- [3] 郑国杰, 郑超瑜, 陈武, 等. 船用转轮除湿空调及其系统方案的比较研究 [J]. 船舶工程, 2012(5): 39-42.
- [4] ZHENG C Y, ZHENG G J, YU W S, et al. Study on the marine ejector refrigeration-rotary desiccant air-conditioning system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 81(1): 1-7.
- [5] GIL B, KASPERSKI J. Efficiency analysis of alternative refrigerants for ejector cooling cycles [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 94: 12-18.
- [6] VARGA S, LEBRE P S, OLIVEIRA A C. Readdressing working fluid selection with a view to designing a variable geometry ejector [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2015, 10(3): 205-215.
- [7] 王菲, 沈胜强. 不同制冷剂喷射制冷性能计算分析 [J]. 化工学报, 2010, 61(2): 275-280.
- [8] 王林, 白得坡, 付文轩. 以 R1234yf 为替代工质的喷射制冷循环特性 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2016, 37(1): 20-25.
- [9] SUN D W. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants [J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(8): 873-884.
- [10] EAMES I W, APHORN RATANA S, HAIDER H. A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(6): 378-386.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)