

The Research Progress of New Environmental Protection Refrigerant Mixture R290/R600a

Rui Cao, Yingxia Qi

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: caoruibest@163.com, qipeggy@126.com

Received: Oct. 19th, 2016; accepted: Nov. 5th, 2016; published: Nov. 8th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The Global Warming Potential (GWP) of hydrofluorocarbons (HFCs) is usually higher, which can't meet the current requirements of the refrigerant environmental protection, so finding new alternative refrigerant is imminent. As the new type of refrigerant, R290/R600a is gradually being concerned. In this paper, the thermal physical properties of the new type of environmentally friendly refrigerant mixture R290/R600a and its refrigeration properties were summarized. It was also compared with the commonly used refrigerant R134a, and it revealed that R290/R600a had the potential to replace R134a.

Keywords

R290/R600a, Refrigerant Substitution, Thermo-Physical Property, Refrigeration System

新型环保混合制冷剂R290/R600a的研究进展

曹睿, 祁影霞

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email: caoruibest@163.com, qipeggy@126.com

收稿日期: 2016年10月19日; 录用日期: 2016年11月5日; 发布日期: 2016年11月8日

摘要

由于现在使用的HFCs制冷剂GWP较高, 不符合当前对制冷剂环保性的要求, 寻找新型替代制冷剂已迫在眉睫。R290/R600a作为新型环保制冷剂逐渐被人们关注, 本文主要概述了混合制冷剂R290/R600a的热物性及制冷研究现状, 并与目前常用的R134a进行分析比较, 表明了R290/R600a具有替代R134a的潜力。

关键词

R290/R600a, 制冷剂替代, 热物性, 制冷系统

1. 引言

现在, 空调制冷行业飞速发展, 但由此带来的环境问题也越来越引起人们的关注。制冷空调设备中使用的氟利昂制冷剂加剧了臭氧层的破坏和全球变暖。氯氟烃(CFCs)和氢氯氟烃(HCFCs)由于臭氧层消耗潜值(ODP)和全球变暖潜值(GWP)较高, 是破坏臭氧层, 产生温室效应的重要物质, 已被《蒙特利尔议定书》列入淘汰目录中, 各个国家正在加速淘汰; 而作为它们的替代物-氢氟烃(HFCs)虽然 ODP 为零, 但 GWP 值较高, 大量使用仍能产生温室效应, 已被《京都议定书》列为温室气体, 现在也逐渐被淘汰[1]。2014年欧盟对 F-gas 法规进行了修订[2], 从2020年起, 禁止 GWP 大于 2500 的 HFCs 用于商用制冷机组中; 到2022年, 禁止 GWP 大于 150 的 HFCs 用于商用制冷机和冷冻机中。多项法规明令控制高 GWP 工质的使用, 这势必会成为一种寻找新型替代制冷剂的动力。

霍尼韦尔和杜邦公司联合开发的氢氟烃(HFOs)制冷剂包括 R1234yf 和 R1234ze(E)等被认为是替代 HFCs 的新一代制冷剂[3] [4] [5] [6] [7]。HFOs 的 ODP 为零, $GWP < 1$, 大气寿命非常短暂(0.029年), ASHRAE 将其化为 A2L, 属弱可燃制冷剂。但同时 HFOs 具有一些缺点, 单位容积制冷量小, COP 较低, 换热系数小, 价格昂贵, 而且 HFOs 的使用存在专利缺陷, 目前围绕 HFOs 系列制冷剂均被国外大公司申请了专利保护[8]。另外, HFOs 及其混合工质一般不能直接充注在 HFCs 的制冷系统中, 若要达到与原有制冷剂 COP 和制冷量相同的要求, 就需要对原先的制冷系统进行改进和优化[9] [10] [11] [12]。因此, 国内若以 HFOs 作为替代制冷剂来替代 HFCs, 那么必定会成本高, 难度大。

碳氢制冷剂(HCs)的 ODP 为零, GWP 极低, 无毒, 单位制冷量大, 热物理性质良好而且来源广、价格便宜, 但易燃易爆。由于其具有良好的环保性能和物理性质, 因此 HCs 及其混合物仍具有极大的作为替代制冷剂的潜力[13] [14] [15]。一些常用的 HCs 制冷剂与 R134a 的临界状态点和常压沸点如表 1 所示。

Table 1. The normal pressure boiling point and critical state point of HCs and R134a [16]

表 1. 常用的 HCs 与 R134a 的常压沸点和临界状态点[16]

制冷剂常压	沸点/°C	临界温度 T_c /°C	临界压力 P_c /MPa
R134a	-26.1	101.1	4.06
R170	-88.6	32.2	4.87
R290	-42.1	96.7	4.25
R600	-0.60	152.0	3.80
R600a	-11.7	134.7	3.64
R1270	-47.7	92.4	4.66

从表 1 中可以看出, 没有单工质的 HCs (如 R290、R600a、R600 等) 与 R134a 的热物理性质相似, 但一些学者研究发现 R290/R600a (质量比为 50/50, 40/60, 55/45) 能表现出与 R134a 热物性相似的性质, 其中 R290/R600a (质量比为 55/45) 与 R134a 的相似性最好[16], 具有替代 R134a 的潜力。本文就 R290/R600a 混合制冷剂的各种性能及国内外研究进展进行介绍, 为新型环保制冷剂的替代提供新思路。

2. R290/R600a 的热物性研究

2.1. 可燃性研究

众所周知, HCs 作为制冷剂使用的一个很大缺陷就是易燃易爆, 这使得 HCs 的充注量不能过多, 只能用于小型制冷系统如冰箱、冷柜中。若要将 R290/R600a 充注在制冷系统中, 就必须要对它进行可燃性研究, 确保它的充注量在安全范围内。R290 与 R600a 的燃烧特性如表 2 所示。根据 EN-378 标准, 应用方程(1)进行可燃制冷剂最大充注量的计算[17]进行计算:

$$M_{\max} = 2.5 \times LFL_m^{1.25} \times h \times A^{0.5} \quad (1)$$

式中, M_{\max} 为房间内所允许的最大充注量, kg; LFL_m 为燃烧下限, kg/m^3 ; A 为房间面积, m^2 ; h 为装置的高度, m。假定设备中 R290/R600a (质量比为 50/50) 充注量为 150 g, 设备高度 1.8 m, R290/R600a 的最低燃烧下限为 $0.041 \text{ kg}/\text{m}^3$, 则房间的最小面积为 3.26 m^2 。

从表 2 可以看出, R290、R600a 及其混合物的燃烧上下限差别不大, 燃烧范围较广。对于可燃制冷剂来说, 使用过程中的安全性是最需要关注的, 所以为了保证使用 HCs 作为冰箱空调制冷剂的安全性, 就必须计算出它们的最大充注量, 根据方程(1)可以实现可燃制冷剂最大充注量的求解。

2.2. 二元相互作用系数的研究

为了能得到 R290/R600a 混合后的性质, 把它作为新型替代制冷剂应用于制冷空调系统中, 则需要建立 R290/R600a 的热力学状态方程, 而若要根据状态方程求得状态数据, 还需得到 R290/R600a 的二元相互作用系数。对于二元混合物质, 常用的状态方程是 PR 方程以及 vdW 混合法则。PR 状态方程式的具体形式如下:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (2)$$

$$a(T) = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \alpha(T) \quad (3)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (4)$$

$$\alpha(T) = \left[1 + k \left(1 - T_r^{0.5} \right) \right]^2 \quad (5)$$

Table 2. The combustion characteristics of R290 and R600a [18]

表 2. R290 与 R600a 的燃烧特性[18]

制冷剂	分子量	LFL (kg/m^3)	UFL (kg/m^3)
R290	44.10	0.038	0.171
R600a	58.12	0.043	0.202
R290/R600a (50/50)	50.13	0.041	0.187

$$k = 0.34746 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2 \quad (6)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (7)$$

其中, T_c 为临界温度, K; P_c 为临界压力, kPa; ω 为偏心因子。

为了使 PR 方程适用于二元混合物, 应用 vdW 混合法则, 如下:

$$a = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 x_i x_j a_{ij} \quad (8)$$

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) a_i^{1/2} a_j^{1/2}, i = 1, 2; j = 1, 2 \quad (9)$$

$$b = \sum_{i=1}^2 x_i b_i \quad (10)$$

其中, k_{ij} 为二元相互作用系数, $k_{ij} = k_{ji}$, $k_{ii} = k_{jj} = 0$ 。

对于这种立方型状态方程中的混合法则而言, 二元相互作用系数 k_{ij} 针对不同的物质有不同的取值, 得到 k_{ij} 的方法主要由实验法和解析法。国内外许多学者对 R290/R600a 二元相互作用系数进行了深入研究。国外学者 Akasaka 等[19]建立 R290/R600a 混合工质的 PR + vdW 方程模型, 运用最小二乘法和目标函数对 k_{ij} 进行优化, 得到 R290/R600a 的二元相互作用系数 $k_{ij} = -0.01116$, 通过解析法将 k_{ij} 代回原式可以得到一系列热物性数据, 并与实验值作比较, 绝对误差为 0.83%, 具有很好的重合度。

胡鹏等[20]运用解析法提出了 HC/HC 二元混合工质的相互作用系数 k_{ij} 的计算公式, 如下:

$$k_{ij} = \left(\frac{\omega_j P_{c,j}^{0.5}}{T_{c,j}} \right) k_i \left(\frac{\omega_i P_{c,i}^{0.5}}{T_{c,i}} \right) k_j, i < j \quad (11)$$

他们运用解析法将上述公式与实验测出的 k_{ij} 相比较, 相对误差较小, 精度比较高。这为后续研究 R290/R600a 二元混合工质的热力学性质提供了可靠的依据。

以上学者通过实验法或解析法得到 R290/R600a 的二元相互作用系数, 根据二元相互作用系数运用 PR 状态方程和 vdW 混合法则可以得到 R290/R600a 的 PVT 性质, 这样就可以通过理论方法得到 R290/R600a 的基本热物性, 为 R290/R600a 作为新型替代制冷剂提供了理论基础和依据。

3. R290/R600a 制冷系统试验研究

目前, 国内制冷空调市场上许多冷柜、冰箱中依然采用 R134a 作为制冷剂, 但由于 R134a 的 GWP 较高, 不符合环保的要求, 针对 R290/R600a 混合制冷剂替代冷柜、冰箱中的 R134a, 国内外众多学者进行了大量的实验研究。何茂刚等[21]对 R290/R600a (质量比为 90/10)混合制冷剂应用于大容量冷柜以替代 R134a 进行了实验研究和理论分析。结果表明, R290/R600a 的单位容积制冷量和 COP 值比 R134a 分别高 48.3% 和 2.4%; R290/R600a 的最佳充注比为 93.75%/6.25%, 此时的功耗比 R134a 低 27.5%。Mohanraj 等[22]对 R290/R600a 应用在家用冰箱中替代 R134a 进行了实验研究。实验中, 他们以 HCM (R290/R600a 质量比为 45.2/54.8)不同的充注量作为研究对象与 R134a 作比较并进行性能分析。通过实验得到了以下结论: 1) 充注 HCM 的冰箱比充注 R134a 的能耗低, 排气温度低 8.5~13.4 K, COP 值高 3.25%~3.6%, 不同充注量的 HCM 与 R134a 的 COP 关系如图 1 所示; 2) 当毛细管长为 5 m 时 COP 达到最大值, 毛细管长度与 COP 之间的关系如图 2 所示; 3) 蒸发器中的温度滑移为 3K; 4) HCM 与润滑油的相容性很好。

与此同时, Lee 等[16]将 R290/R600a (质量比为 55/45)和 R134a 分别充入不同的冰箱中, 实验研究发现, R290/R600a 的充注量是 R134a 的一半, 但毛细管的长度要比充有 R134a 的长约 500 mm。另外, 由

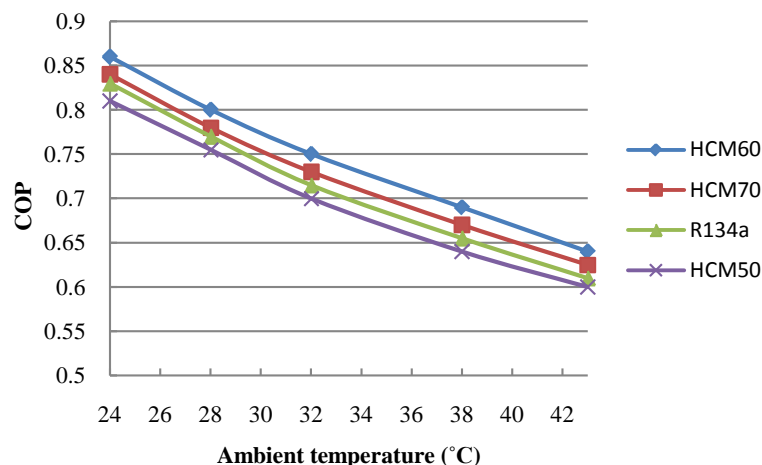


Figure 1. The relationship diagram of R134a for HCM and COP

图 1. HCM 与 R134a 的 COP 关系图

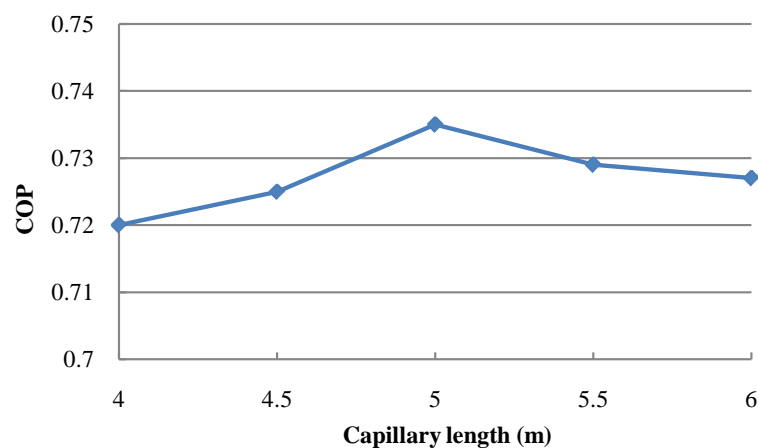


Figure 2. Relationship between capillary length and COP

图 2. 毛细管长度与 COP 之间的关系图

于 R290/R600a 的工作压力比 R134a 高, 换热能力也比 R134a 强, 使得充有 R134a 的冰箱的能耗比充有 R290/R600a 的高 12.3%, 冷却速度低 28.8%。Yu 等[15]将三种不同质量比的 HCs 制冷剂, HC1 (R290/R600a 质量比为 65/35)、HC2 (R290/R600a 质量比为 50/50)、HC3 (R290/R600a 质量比为 0/100) 分别充注在 R134a 类型的冰箱中, 在最佳充注量的情况下, 使用 HC 类制冷剂比 R134a 的冰箱的温度和能耗高; 调整 R134a、HC1、HC2、HC3 的毛细管的长度分别为 2.77 m、5.05 m、5.34 m 和 5.6 m, 改变毛细管的长度后, 所有的 HC 类制冷剂都能用在 R134a 的冰箱中。以上学者的研究表明, R290/R600a 的各种热力性能都优于 R134a, 用 R290/R600a 替代 R134a 不仅环保而且效率高, 耗能少; 另外, 不同质量比的 R290/R600a 完全可以充注于 R134a 的冰箱中来替代 R134a, 但需要相应的改变毛细管的长度。

R436A 是由 R290/R600a 按照质量比为 54/46 混合而成的新型天然制冷剂, R436A 比 R134a 节能 20%, 而且它的热工性能与 R134a 相近, 所以对 R134a 制冷系统无须变更, 目前 R436A 已经商业化。Mehdi 等[23]对 R436A 作为 R134a 的替代制冷剂应用在家用冰箱中进行了能效分析。他们分别将 R436A 充注在 HFC 类压缩机和 HC 类压缩机中, 研究表明, 在 HFC 类压缩机中, R436A 的最佳充注量为 60 g, 而且相对于 R134a 而言, 它的充注量减少了 14%; 在 HC 类压缩机中, R436A 的最佳充注量为 50 g, 充注

量减少了 14.6%。另外, Mehdi 等[24]还将 R436A 充注于 238 L 的家用冰箱中, 实验结果表明, 与 R134a 相比, 冰箱的开启时间比减小 13%, 每天的能耗相应降低 5.3%, 蒸发器的吸气温度降低 3.5°C, TEWI 值降低 11.8%, 这从不同角度说明了 R436A 应用在家用冰箱中比 R134a 性能优越。

液化石油气 LPG 是 R290/R600/R600a 按照质量比为 30/55/15 组成的, 可以看出 LPG 也是由 HCs 混合而成, 它天然环保的特点引起了人们的注意, 近年来有许多人提出用 LPG 作为替代制冷剂应用于家用冰箱中, 也有许多学者将 LPG 充注于家用冰箱中进行性能测试实验。Mohamed 等[25]对 LPG 作为替代 R134a 应用在家用冰箱中进行了能量和火用分析。分析结果表明, LPG 的 COP 值比 R134a 低约 10%, 火用效率低 5%, 而且具有较大的不可逆性。Fatouh 等[26]将 LPG 充注于 283 L 的冰箱中, 并与 R134a 作性能比较结果发现, 当 LPG 充注量为 60 g, 毛细管长为 5 m 时, 表现出最优性能, 与 R134a 相比较, 充注 60 g LPG 的排气温度、压缩比、质量流量、耗电量和开启时间分别降低 3.8%、5.5%、51%、4.3% 和 14.3%。从以上实验分析可以看出, 适当调整 LPG 的充注量, 改变毛细管道的长度, 就使得 LPG 的性能比 R134a 优越, 而且 LPG 来源广, 价格便宜, 使用成本低, 因此依然具有作为新型替代制冷剂的潜力。

4. 其他制冷系统中的应用

R290/R600a 除了应用在冷柜、冰箱等蒸汽压缩式制冷系统中, 有些学者还将其充注在其他制冷系统中, 并进行比较。Jose 等[27]将 R290/R600a 混合制冷剂应用于蒸汽喷射式制冷系统中, 并进行了性能评价。实验表明, 当 R290 占 30%~50% 时, R290/R600a 的表现出的性能最为理想, 带有闪蒸罐的蒸汽喷射式制冷比普通的蒸汽压缩式制冷的 COP 值高, 而且当膨胀阀的膨胀比为 50% 时, 系统的 COP 值最高, 同时温度滑移也较大。晏刚等[28]以 R290/R600a (质量比 50/50) 做制冷剂应用在喷射式制冷循环系统中, 经理论分析表明, 该系统的 COP 值、容积制冷量和火用效率分别比传统的蒸汽压缩式制冷循环高 56%, 4.5% 和 77.7%。此外, 他还将 R290/R600a 充注在自复叠式制冷循环中, 分析表明, R290/R600a 应用在复叠式制冷循环中的 COP 与容积制冷量比传统的制冷系统分别高 7.8%~13.3% 和 10.2%~17.1%, 压缩机的压缩比减小 7.4%~12.3% [29]。可以看出, 近几年许多学者也逐渐将 R290/R600a 应用在其他制冷系统如喷射式制冷系统和复叠式制冷系统中进行研究, 这从另一个角度说明 R290/R600a 作为替代制冷剂应用的广泛性, 从而扩大其使用范围, 这也是作为替代制冷剂的必要趋势。

近期还有许多关于 R290/R600a 混合制冷剂性能及替代实验的研究[30] [31] [32] [33]。从这些研究中可以看出, R290/R600a 作为制冷剂具有很好的热物性, 在管道中的压降大, 传热系数高, 与矿物油互溶性较好等, 这些都为 R290/R600a 作为新型替代制冷剂提供依据。

5. 总结与展望

目前, 全球变暖形势日趋严重, HFCs 作为高 GWP 制冷剂, 被替代的呼声也越来越高。R290/R600a 是一种新型环保混合制冷剂, 从近期研究可以发现, R290/R600a 具有优良的性能, 不管是制冷能力还是环保效果都优于 R134a, 而且只需对毛细管长度做相应的改变, R290/R600a 就可以直接充灌在 R134a 的家用冰箱系统中。因此 R290/R600a 具有很大的作为 R134a 替代制冷剂的潜力。

热物性研究是替代制冷剂推广和应用的关键所在, 目前对于 R290、R600a 单工质热物性的研究已经相当成熟, 但对于 R290/R600a 混合制冷剂的热物性仍然缺乏必要的的数据, R290/R600a 若要作为新型替代制冷剂, 就必须对它的气液相平衡、PVTx 数据、以及二元相互作用系数等进一步展开研究, 这样才能为其成为替代制冷剂提供可靠的依据。

易燃易爆是 R290/R600a 作为制冷剂的一大缺陷, 这决定着 R290/R600a 只能充注在小型制冷系统中。在 R290/R600a 中加入一定的阻燃剂以及在制冷系统中充注量的计算也是接下来要研究的重点。

致 谢

我历时近一个月时间将这篇论文写完了, 在这段充满奋斗的历程中, 带给我的学生生涯无限的激情和收获。在论文的写作过程中遇到了无数的困难和障碍, 都在同学和老师的帮助下渡过了。在校图书馆查找资料的时候, 图书馆的老师给我提供了很多方面的支持与帮助, 尤其要强烈感谢我的论文指导老师——祁影霞老师, 没有她对我进行了不厌其烦的指导和帮助, 无私的为我进行论文的修改和改进就没有我这篇论文的最终完成。在此, 我向指导和帮助过我的老师们表示最衷心的感谢!

同时, 我也要感谢本论文所引用的各位学者的专著, 如果没有这些学者的研究成果的启发和帮助, 我将无法完成本篇论文的最终写作。至此, 我也要感谢我的朋友和同学, 他们在我写论文的过程中给予我了很多有用的素材, 也在论文的排版和撰写过程中提供热情的帮助!

金无足赤, 人无完人。由于我的学术水平有限, 所写论文难免有不足之处, 恳请各位老师和同学批评和指正!

参考文献 (References)

- [1] 郑东芳, 吴克安, 史婉君, 等. 美国低 GWP 值制冷剂评估研究最新进展[J]. 制冷与空调, 2014, 14(7): 41-46.
- [2] (2014) Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EC), No 842/2006. *Official Journal of the European Union*, **150**, 195-230.
- [3] Leek, T.J. (2010) New High Performance, Low GWP Refrigerants for Stationary AC and Refrigeration. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue University e-Pubs, Purdue.
- [4] Adrian, M.B., Joaquin, N.E., Francisco, M., *et al.* (2016) A Review of Refrigerant R1234ze(E) Recent Investigations. *Applied Thermal Engineering*, **95**, 211-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.055>
- [5] 汪训昌. 不饱和氟化烯烃及其混合制冷剂应用研究的最近进展与成果[J]. 暖通空调, 2012, 42(4): 1-18.
- [6] 邱金友, 张华, 祁影霞, 等. 新型制冷剂 R1234ze(E)及其混合工质研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 9-16.
- [7] McLinden, M.O., Kazakov, A.F., Brown, J.S. and Domanski, P.A. (2014) A Thermodynamic Analysis of Refrigerants: Possibilities and Tradeoffs for Low-GWP Refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, **38**, 80-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.032>
- [8] 张朝辉, 陈敬良, 高钰, 等. 制冷空调行业制冷剂替代进程解析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(1): 1-8.
- [9] Shigeharu, T. and Tomoyuki, H. (2014) Evaluation of Performance of Heat Pump System Using R32 and HFO-Mixed Refrigerant. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue University e-Pubs, Purdue.
- [10] Ankit, S., Samuel, Y.M., Elizabet, V.B., *et al.* (2014) Low GWP Refrigerants for Air Conditioning Applications. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue University e-Pubs, Purdue.
- [11] Wang, X. and Amrane, K. (2014) AHRI Low Global Warming Potential Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP)—Summary of Phase 1 Testing Results. *International Refrigeration and Air-Conditioning Conference*, Paper 1416. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1416>
- [12] Adrian, M.B., Joaquin, N.E., Angel, B.C., *et al.* (2015) Analysis Based on EU Regulation No 517/2014 of New HFC/HFO Mixtures as Alternatives of High GWP Refrigerants in Refrigeration and HVAC Systems. *International Journal of Refrigeration*, **52**, 21-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.021>
- [13] Zhao, Y.X., Gong, M.Q., Dong, X.Q., *et al.* (2016) Prediction of Ternary Azeotropic Refrigerants with a Simple Method. *Fluid Phase Equilibria*, **425**, 72-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2016.05.010>
- [14] Peder, B. and Trygve, E. (2016) Reducing the Global Warming Impact of a Household Heat Pump Dishwasher Using Hydrocarbon Refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, **99**, 1295-1302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.018>
- [15] Yu, C.-C. and Teng, T.-P. (2014) Retrofit Assessment of Refrigerator Using Hydrocarbon Refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, **66**, 507-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>
- [16] Lee, M.Y., Lee, D.Y. and Kim, Y.C. (2008) Performance Characteristics of a Small-Capacity Directly Cooled Refrigerator Using R290/R600a (55/45). *International Journal of Refrigeration*, **31**, 734-741. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.11.014>

- [17] Zhao, Y. and Xi, W. (2013) Retrofits and Options for the Alternatives to HCFC-22. *Energy*, **59**, 1-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.065>
- [18] AIRAH (2013) Flammable Refrigerants-Safety Guide. Melbourne, Australia.
- [19] Ryo, A., Yukihiko, H., Katsuyuki, T., *et al.* (2007) Vapor-Liquid Equilibrium Measurements and Correlations for the Binary Mixture of Difluoromethane + Isobutene and the Ternary Mixture of Propane + Isobutene + Difluoromethane. *Fluid Phase Equilibria*, **261**, 286-291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2007.06.029>
- [20] Hu, P., Chen, L.X. and Chen, Z.S. (2012) A Modified Differential-Model for Interaction Parameters in PR EoS with vdW Mixing Rules for Mixtures Containing HFCs and HCs. *Fluid Phase Equilibria*, **324**, 64-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2012.03.027>
- [21] He, M.-G., Song, X.-Z., Liu, H. and Zhang, Y. (2014) Application of Natural Refrigerant Propane and Propane/Isobutene in Large Capacity Chest Freezer. *Applied Thermal Engineering*, **70**, 732-736. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.097>
- [22] Mohanraj, M., Jayaraj, S., Muraleedharan, C. and Chandrasekar, P. (2009) Experimental Investigation of R290/R600a Mixture as an Alternative to R134a in a Domestic Refrigerator. *International Journal of Thermal Sciences*, **48**, 1036-1042. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.08.001>
- [23] Rasti, M., Aghamiri, S.F. and Hatamipour, M.-S. (2013) Energy Efficiency Enhancement of a Domestic Refrigerator Using R436A and R600a as Alternative Refrigerants to R134a. *International Journal of Thermal Sciences*, **74**, 86-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.009>
- [24] Rasti, M., Hatamipour, M.S., Aghamiri, S.F. and Tavakoli, M. (2012) Enhancement of Domestic Refrigerator's Energy Efficiency Index Using a Hydrocarbon Mixture Refrigerant. *Measurement*, **45**, 1807-1813. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.002>
- [25] El-Mohamed, M. (2015) Energy and Exergy Analysis of LPG (Liquefied Petroleum Gas) as a Drop in Replacement for R134a in Domestic Refrigerators. *Energy*, **86**, 344-353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.035>
- [26] Fatouh, M. and El Kafafy, M. (2006) Experimental Evaluation of a Domestic Refrigerator Working with LPG. *Applied Thermal Engineering*, **26**, 1593-1603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.026>
- [27] d'Angelo, J.V.H., Aute, V. and Radermacher, R. (2016) Performance Evaluation of a Vapor Injection Refrigeration System Using Mixture Refrigerant R290/R600a. *International Journal of Refrigeration*, **65**, 194-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.01.019>
- [28] Yan, G., Bai, T. and Yu, J.L. (2016) Thermodynamic Analysis on a Modified Ejector Expansion Refrigeration Cycle with Zeotropic Mixture (R290/R600a) for Freezers. *Energy*, **95**, 144-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.067>
- [29] Yan, G., Hu, H. and Yu, J.L. (2015) Performance Evaluation on an Internal Auto-Cascade Refrigeration Cycle with Mixture Refrigerant R290/R600a. *Applied Thermal Engineering*, **75**, 994-1000. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.063>
- [30] Liu, X.Q., Yu, J.L. and Yan, G. (2015) Theoretical Investigation on an Ejector-Expansion Refrigeration Cycle Using Zeotropic Mixture R290/R600a for Applications in Domestic Refrigerator/Freezers. *Applied Thermal Engineering*, **90**, 703-710. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.069>
- [31] Araghi, H.A., Khiadania, M. and Hooman, K. (2016) A Novel Vacuum Discharge Thermal Energy Combined Desalination and Power Generation System Utilizing R290/R600a. *Energy*, **98**, 215-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.007>
- [32] 范晓伟, 徐葭, 王方. R744/R290/R600a 混合工质热泵循环性能分析[J]. 制冷与空调, 2014, 14(10): 104-108.
- [33] Yan, G., Cui, C.F. and Yu, J.L. (2015) Energy and Exergy Analysis of Zeotropic Mixture R290/R600a Vapor-Compression Refrigeration Cycle with Separation Condensation. *International Journal of Refrigeration*, **53**, 155-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.01.007>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：japc@hanspub.org