

Review and Prospect of Research on Alternative R22 Refrigerant

Zhiwang Guo, Yingxia Qi*

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

Received: Oct. 14th, 2016; accepted: Oct. 31st, 2016; published: Nov. 3rd, 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

With the increasing greenhouse effect and ozone depletion, the author introduces the research status of R22 alternative refrigerants from the aspects of environmental protection, safety, and thermodynamic properties. We make a conclusion about some alternative refrigerants. In order to meet the need of national conditions at present, the domestic and foreign scholars have made a summary of the research on improving the safety of natural refrigerants. In this paper, we discuss about the issue that the HFO refrigerants (as a flame retardant) are mixed into R290 or R1270 refrigerant to look forward to solve the refrigerant alternative.

Keywords

Alternative Refrigerant, R290, R1270, HFO Refrigerant, Security, Mixed Refrigerant

替代R22制冷剂的研究现状 综述与展望

郭志旺, 祁影霞*

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

收稿日期: 2016年10月14日; 录用日期: 2016年10月31日; 发布日期: 2016年11月3日

*通讯作者。

摘要

首先讲述了温室效应和臭氧空洞的形势严峻性, 然后从环保、安全、热力性能等方面介绍了R22替代制冷剂的研究现状, 并通过对比总结了常见的几种替代制冷剂的特点。依据适应当前国情的需要, 总结了国内外学者对提高自然制冷剂安全性研究并进行了综述。本文对R290和R1270加入HFO制冷剂(充当阻燃剂)展开分析和展望, 以期盼可以有效的解决制冷剂替代这一热门问题。

关键词

制冷剂替代, R290, R1270, HFO制冷剂, 安全, 混合制冷剂

1. 引言

关于制冷剂替代, 一直以来是中国空调行业最热门的话题。随着制冷技术的飞速发展, 类似空调、冰箱等制冷设备也随着进入千家万户, 进而引发的问题就是制冷剂的过量使用。制冷剂的发展可分为四个阶段[1], 因其第二阶段氟氯烃(CFCs)制冷剂具有较高ODP值(臭氧消耗潜值)和GWP值(全球变暖潜势), 导致产生“温室效应”和“臭氧空洞”等一系列环境问题。自1987年《蒙特利尔议定书》签订后, 制冷空调界为遏制臭氧空洞形势进一步恶化, 提出使用ODP值相对较少或者ODP=0的氢氯氟烃(HCFCs)和氢氟烃(HFCs)过渡制冷剂逐步完成对CFCs制冷剂的替代[2][3]。被称为HCFCs和HFCs的过渡制冷剂, 虽然ODP=0, 但是其GWP值很大。随着“温室效应”的形势越来越严峻, 《蒙特利尔议定书》和《京都议定书》的缔约国大会上决定加速淘汰HCFCs[4][5]。目前, 国内空调主要使用R22制冷剂, 但R22属于HCFCs类制冷剂, 且国外已经出台了相应的法律法规来限制这种制冷剂类型的空调使用, 因此, 此类制冷剂的空调的出口也受到了一定的影响。迫于国内外形势的影响, 近年来国内学者也加紧了推进R22的替代进程[6]-[10]。

2016年是HCFCs和HFCs淘汰工作正式进入第二阶段的开端。中国政府预计在2016-2020年期间加快淘汰速率, 在第一阶段的基础上, 再次淘汰10%。与此同时, 欧盟和美国均已出台相关法规, 正式实施淘汰HCFCs和HFCs制冷剂。因此, 制冷剂R22的替代已经成为国内外制冷行业的研究热点。本文先调研了替代R22制冷剂的研究现状以及几种新型制冷剂的热物性, 借鉴混合制冷剂可以弥补单一纯制冷剂不足的基础上, 结合我国国情和方针政策, 提出了以自然工质为基底, 混合HFO制冷剂作为后续的重点研究方向。

2. 替代制冷剂 R22 的研究现状

目前, 发展中国家的空调主要使用R22制冷剂。R22因其具有效率高, 应用领域广等因素, 使其年消耗量占制冷剂总量的85%以上。然而因其较高的GWP值, 从环境保护的角度出发, 此类型制冷剂不得不被替代。在制冷界, R22的主要替代物有R32、R290、R134a、R410a、R407C以及新型HFO类制冷剂R1234yf等等。

现阶段关于R22的替代物研究, 国际上主要有两条主流的技术路线: 一条是以美日为代表, 支持开发HCFCs和HFCs替代物, 如: R134a, R407C和R410a等; 另一条是以德国和北欧一些国家为代表, 主张采用天然工质(碳氢化合物)为替代物, 如R717和R290等[11]。在国际国内这个大环境下, 摆在发展中国家制冷空调行业淘汰、替代R22制冷剂有三个选择[12][13]: 1) 相沿发达国家的R22替代技术, 依旧采用高GWP值的HCFCs和HFCs替代R22的技术路线, 在前10年中, 先以负责任的态度使用HCFCs

制冷剂来有效减少 HCFCs 的使用与排放, 同时研发低 GWP 值的 HFO 应用技术, 在后十年中, 采用拥有自主知识产权的低 GWP 值得 HFO 产品与技术, 实现加速淘汰、替代 HCFCs 和 HFCs 的目标; 2) 采用不安全的天然工质替代 R22, 走目前一部分欧洲人所主张的技术路线; 3) 采用不同组分的 HCFCs 或 HFCs 制冷剂 and 天然工质制冷剂, 按照一定的规则配成混合制冷剂, 以达到符合要求的制冷剂。

2.1. HCFCs、HFCs 制冷剂

由表 1 可知 HCFCs、HFCs 制冷剂的 ODP 值相对较低, 符合可持续发展的要求, 但是 GWP 值相对较高, 对“温室效应”有很大的影响, 且大气寿命比较长。

S. Karagoz [15] 等人在蒸汽压缩式热泵中进行了 R134a 替代 R22 的实验, 结果表明: R134a 的 COP 值比 R22 高, 且 R134a 的灌注量随蒸发器进口温度上升而增大。张太康[16]等应用焓差法对 R134a 和 R22 在空气源热泵热水器进行了测试和数据分析, 实验结果表明: R134a 系统比 R22 系统的吸、排气压力变化小, 有利于系统的安全可靠运行; R134a 系统的平均制热功率比 R22 小, 相当于 R22 系统的 70%。

林小茁[17]等从环保、安全、热力性能等角度, 讨论分析了 R32 替代 R22 的优势, 深入的论述了 R32 替代 R22 的可行性。Xing Xu [18]等在蒸汽喷射式热泵系统中验证了 R32 在性能方面对于 R22 和 R410A 的优良性。陈政文[19]等在风冷单元式空调机上针对 R32 和 R22 进行了实验研究。研究发现: R32 与 R22 的 COP 基本相同, R32 的单位容积制冷量大于 R22 的单位容积制冷量。黄雪强[20]等对 R32 和 R22 制冷系统, 应用焓分析法从“质”的角度验证了 R32 替代 R22 的合理性。

上述研究表明, HCFCs、HFCs 制冷剂虽然制冷量和制冷效率优于 R22, 但是因其较高的 GWP 值, 不得被淘汰。

2.2. HFO 制冷剂

由表 2 已知性质可以看出 HFO 类制冷剂的 ODP、GWP 均满足《蒙特利尔议定书》和《京都议定书》规定的要求。HFO 类制冷剂安全性也相对较高, 且大气寿命值比较短, 不具备任何污染环境的因素。

Steven Brown [21] 等对 R1234yf 的密度方程、饱和压力方程等热物性方面进行了详细的总结。张青[22]等通过实验可知 R1234yf 在高温工况 T3 [23] 下, 能效比 R22 高 2%, 其排气温度比 R22 平均降低 9.8℃。金听祥[24]等针对 R1234yf 在窗式空调器中通过毛细管和充注量优化实验来代替 R22。实验结果显示: 标准工况下 R1234yf 制冷量比 R22 低 28%, COP 低 0.25, 排气温度低 7℃。高温工况下, R1234yf 的性能比 R22 好, COP 比 R22 高 0.02, 排气温度低 12.7℃。R1234yf 衰减率比 R22 低 10%, 适合在高温工况下

Table 1. The basic parameters of R134a, R32 and R22

表 1. R22、R32 和 R134a 的基本参数

名称化学式	ODP	GWP	安全级别[14]	大气寿命临界压力/MPa
R22CHClF ₂	0.045	1700	A1	11.8yr4.97
R32	CH ₂ F ₂ 0	670	A2	4.8yr5.81
R134a	CH ₂ FCF ₃ 0	1430	A1	16yr4.07

Table 2. The basic parameters of R1234ze, R1234yf and R22

表 2. R22、R1234yf 和 R1234ze 的基本参数。

名称化学式	ODP	GWP	安全级别	大气寿命临界压力/MPa
R22CHClF ₂	0.045	1700	A1	11.8yr4.97
R1234yfCF ₃ CF=CH ₂	0	0	A2	11d3.38
R1234zeCF ₃ CF=CH ₂	0	0	A2	11d3.64

替代。张累[25]等通过对 R1234ze、R22、R4117A 三种制冷剂, 从热力性能、环境、安全性能等方面做了全面分析, 结果显示: 标准工况下, R1234yf 的环境性良好, R1234yf 的 COP 与 R22 相当, 且优于 R417A 6%~8%。因为 R1234yf 的单位容积制热量小的原因, R1234yf 制热量最小。

上述研究发现, HFO 类制冷剂在热物性方面完全符合节能及环境友好的特点; 从性能角度出发, HFO 制冷剂虽然有一定的可行性, 然而其单位制冷量小, 且 HFO 制冷剂只在高温工况下优于其他类型制冷剂。因此在这类型制冷剂应用方面, 可考虑混加一些其他类型制冷剂来提高单位制冷量和通过设备方面的技术手段弥补 HFO 类的温度区域限制。

2.3. 天然工质制冷剂

由表 3 可知, 天然工质制冷剂的 ODP 与 GWP 值相对而言都比较低, 是一种环境友好型制冷剂。然而美中不足之处是安全性比较差。

林岷[26]等通过焓差实验室对 R1270 和 R22 在家用空调中的制冷性能进行了试验研究。结果表明: 在相同工况下, R1270 与 R22 的系统制冷量基本相同, 相比 R22 的 COP 提高了 4.3%, 充注量减少了 59%, 充分验证了 R1270 替代 R22 的可行性。

Devotta 和 G.B. Zhou [27] [28] 等人实验发现: R290 的制冷能力比 R22 低 6.6%~9.7%, 而 COP 相对高 2.8%~7.9%。张永梨[29]等在大型螺旋杆机组中首次使用 R290 进行实验, 结果表明: R290 与 R22 的能效比几乎相等。李静[30]等在一台额定制冷量为 5KW 的热泵空调热水器中进行了 R290 与 R22 的性能对比试验, 研究得出: R290 的制热水能力比 R22 高出 5%~15%, 在同等条件下, 耗电量为 R22 的 80%~90%, 此外充注量为 R22 的 45%。

通过上述研究, 验证了天然工质制冷剂可以替代 R22, 且节能环保, 具有什么广阔的前景。然而天然工质制冷剂的弊端是安全性差, 可以从安全技术方面考虑, 通过加入一定量的阻燃剂使其达到安全可控范围。

2.4. 混合制冷剂

张萍[31]特别设计一高精度试验台, 对以 R22、R410A 为制冷工质的制冷系统在 20 种工况下进行了实验研究, 实验结果表明: 相同工况下, R410A 的制冷量比 R22 大 45%~50%; R410A 的 COP 比 R22 的小, 排气温度低。

张志巍[32]等在实验数据基础上, 建立了适用于 R32/R1234ze 的二元混合工质的热物性模型。通过对模型的预测精度分析比较, 平均相对误差小于 1.5%。模拟得出以下结论: R32/R1234ze 为非共沸工质, 在 500 KPa、组分为 25:75 时, 滑移温度值最大。通过热物性模型, 做出不同组成的混合物饱和性质曲线, 为替代分析和系统性能计算提供了参考。Qiqi Tian [33]等人将 R32 和 R290 以 68:32 的组成的混合制冷剂与 R410 进行性能比较, 实验结果表明: 该混合制冷剂的制冷量比 R410A 增加了 14%~23.7%; 充注量相对减少。

Table 3. The basic parameters of R290, R1270 and R22

表 3. R22、R1270 和 R290 的基本参数

名称化学式	ODP	GWP	安全级别	大气寿命临界压力/MPa
R22CHClF ₂	0.045	1700	A1	11.8yr4.97
R1270CH ₂ =CHCH ₃	0	0	A3	4.56
R290CH ₃ CH ₂ CH ₃	0	20	A3	<1h4.25

霍二光[34]等将 R1234ze 和 R152A 以 40:60 组成一种新型混合制冷剂, 并对该新型制冷剂进行理论分析。将该新型制冷剂与 R22 及其主要替代制冷剂 R410A、R407C 进行对比, 结果显示: 该混合制冷剂对环境影响非常小, 与 R22 的饱和压力线相接近, 且具有较高的 COP 值和较低的排气温度。验证了替代 R22 的可行性。

Ankit Sethi [35]等在一小型分体式空调器上, 对 R444B 和 R22 进行了性能测试, 发现在高温工况下, R444B 与 R22 的制冷量和 COP 相差不大; 尤其是温度从 35°C~52°C 时, R444B 的滑移温度是可以避免的; 通过 LCCP 分析, 可知 R444B 对环境的影响最小, 并指出对 R444B 的安全性考虑是下一步研究的方向。林恩新[36]等使用霍尼韦尔公司最新研发的制冷剂 R444B 在空调中进行了替代 R22 的实验研究。R444B 是一组由 R32、R152A、R1234ze 以 41.5:10:48.5 组成的三元混合制冷剂, 其 ODP = 0, GWP = 295。研究表明: 分体式空调在高温气候区域 T3 工况下, R444B 的制冷量和 COP 值与 R22 相当, 略高于 R407C, R444B 的制冷剂流量约为 R22 的 80%。

李廷勋[37]等以 R410A 空调系统为基准, 测试 R32 以及 R447A 的系统特性。R447A 是一组由 R32、R123、R1234ze 以 68:3.5:28.5 组成的三元混合制冷剂, 其 ODP = 0, GWP = 570。试验表明: R32 的制冷效率最高, 高压 R410A 的 3%~5%, R447A 次之, 可提高 2%~4%; R32 的制冷能力比 R410A 高 3%~5%, R447A 比 R410A 低 2%~7%; R447A 仅在高温地区有一定的优势, 具有较好的能效。

上述研究表明, 混合制冷剂可以弥补单一类型制冷剂方面的部分缺陷[38], 有效的降低了 GWP 值和天然气带来的安全隐患。虽然目前所配比出的制冷剂还不完善, 但可以通过技术手段尽量避免。

通过上述调研可以明确知道, 现阶段 R22 的替代物依旧不完善, 各类型的制冷剂存在不同的弊端, 例如 HCFCs、HFCs 制冷剂的 GWP 值高、HFO 制冷剂单位制冷量小、天然工质制冷剂安全性差。虽然混合制冷剂一定程度上弥补了部分缺陷, 但是这些混合制冷剂还是会受到一定的条件限制。

3. 小结与展望

在节能与环保的双重压力下, HCFCs、HFCs 制冷剂的替代势在必行。R22 的替换成为了制冷行业的重点, 而 HFO 制冷剂则是一大亮点, 此外还有霍尼韦尔公司研制的专门针对空调领域替换 R22 的 R444B、R447A。因为自然工质 R290 的 COP 和 R22 的相接近, 且 HFO 制冷剂的 COP 优于其他种类的制冷剂; R290 自然工质的单位制冷量优于其他制冷剂[4] [10] [25] [39], 因此具有较高 COP 和单位制冷量的 R290 在替代 R22 上具有广阔的前景。

2016 年元旦起, 国家正式颁布实施了《使用可燃性制冷剂房间空调器安装、维修和运输技术要求》, 以及有可能年底公布的针对 R290 空调的生产线安全标准, 可以推断出国家正在为推动普及自然工质制冷剂做准备。

自然工质制冷剂 R290 的安全性较差, 具有“易燃易爆”的缺点, 为提高 R290 空调安全性, 可依据欧盟 EN 60335 和 EN378 标准中最大灌入量公式来限制 R290 的灌注量[40] [41]。R290 的最大灌注量需满足下列公式:

$$m_{\max} = 2.5(LEL)^{5/4} h_0 A^{1/2} \quad (1)$$

式中: m_{\max} ——空调系统最大灌注量, Kg;

LEL ——冷媒最低可燃浓度, R290 取值 0.038Kg/m³;

h_0 ——市内机安装高度, m;

A ——房间面积, m²

借鉴混合制冷剂的方法, 通过添加其他安全性高的制冷剂充当阻燃剂, 可以使 R290 的安全性提高[42]。

唐汝宁[43]等将 R290 中混入不同比例的 R22 进行了自燃点实验和爆炸极限实验, 发现加入 R22 量越高, 爆炸的危险性越小, 即使加入微量的 R22 也会降低 R290 单位爆炸性。Jung D [44]等使用了 14 种制冷剂进行混合实验, 实验得出当 R134a 与 R290 的组分为 55:45 时, 其配制的新二元混合制冷工质可以替代 R22, 制冷量和能效比都有一定的提高。

因 R1270 与 R290 的物理性质相似, 同为自然工质制冷剂, 且 R1270 类似 HFO 制冷剂, 分子式中具有 C=H 键, 在同等数量的条件下可释放较大的能量, 国内外学者开始合作研究新型 HFO 制冷剂[45]。因此, 在后续的替代制冷剂研究中, 可朝着 R290 加 HFO 制冷剂或 R1270 加 HFO 制冷剂的多元混合制冷剂的方向研究。

致 谢

在这边论文的截稿之际, 首先我得向我的导师—祁影霞老师说声感谢。写作这篇论文的过程中, 我曾得到祁老师的悉心指导。祁老师多次询问我研究进展如何, 并为我指点迷津, 帮助我开拓研究思路, 精心点拨、热诚鼓励。祁老师一丝不苟的作风、严谨求实的态度和踏踏实实的求真精神, 不仅授我以文, 还教我如何为人。历时一个多月, 终将截稿, 传我以终身受益无穷之道。在此, 向指导和帮助过我的老师表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] Calm, J.M. (2012) Refrigerant Transitions Again Moving towards Sustainability. *Proceedings of the ASHRAE/NIST Conference*, American Society of Heating Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, Atlanta.
- [2] 王洪利, 黄杰, 等. 常用制冷剂及其替代物性能[J]. 河北联合大学学报, 2013, 35(3): 1-3.
- [3] 张姝婷, 李志生. 替代制冷剂的发展现状与优选分析[J]. 洁净与空调技术, 2015(2): 62-66.
- [4] 陈伟, 祁影霞, 张华. HCFCs 制冷剂替代物的发展及环境保护[J]. 低温与特气, 2011, 29(6): 5-9.
- [5] Lorentzen, G. and Pettersen, J. (1995) A New Efficient and Environmentally Benign System for Car Air Conditioning. *International Journal Refrigeration*, **16**, 4-12. [http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007\(93\)90014-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007(93)90014-Y)
- [6] 马一太, 王伟. 制冷剂的替代与延续技术[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 11-17.
- [7] 刘荣, 陶乐仁, 高立博, 等. R410A 在内螺纹管内无润滑油沸腾换热实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(4): 20-24.
- [8] 王大鹏, 田琦, 李风雷. 混合工质 R134a/R22 的可行性研究[J]. 2011, 71(8): 67-70.
- [9] 文命清, 魏勤学, 汪海定, 等. R404A 在螺杆式制冷机中替代 R22 的性能研究[J]. 制冷与空调, 2014, 14(8): 54-59.
- [10] 林海. R407C 取代 R22 的工况计算及分析[J]. 青岛远洋船员职业学院学报, 2014, 35(1): 61-64.
- [11] 陈斌, 陈光明. R407C、R410A 制冷系统相关特性研究进展[J]. 流体机械, 2003, 31(2): 42-45.
- [12] 涂中强. 当前我国 R22 系统的制冷剂替代策略分析[J]. 洁净与空调技术, 2010(6): 29-31.
- [13] 汪训昌. 发展中的中国制冷空调行业淘汰与替代 R22 的出路何在[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 58-62.
- [14] 任金禄. 制冷剂安全性评估[J]. 制冷与空调, 2008, 8(2): 13-17.
- [15] Karagoz, S., Yilmaz, M., Comakli, O. and Ozyurt, O. (2004) R134a and Various of R22/R134a as an Alternative to R22 in Vapour Compression Heat Pumps. *Energy Conversion and Management*, **45**, 181-196. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00144-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00144-4)
- [16] 张太康, 翁文斌, 喻晶. R134a、R417a 和 R22 用于空气源热泵热水器的性能研究[J]. 流体机械, 2010, 38(5): 72-76.
- [17] 林小茁, 赵熏, 江辉民. R32 替代 R22 的可行性探讨[J]. 制冷与空调, 2011, 11(2): 73-77.
- [18] Xu, X., Hwang, Y.H. and Radermacher, R. (2013) Performance Comparison of R410A and R32 in Vapor Injection Cycles. *International Journal of Refrigeration*, **36**, 892-903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.12.010>
- [19] 陈政文, 王娜娜, 胡文举, 等. R32、R22、R410A 风冷空调机性能实验研究[J]. 低温建筑技术, 2012, 131(11): 120-122.
- [20] 黄雪强, 高秀峰. R32 替代 R22 制冷系统的焓分析[J]. 制冷与空调, 2012, 12(6): 55-57.

- [21] Brown, S., Zilio, C. and Cavallini, A. (2010) Critical Review of the Latest Thermodynamic and Transport Property Data and Model, and Equations of State for R1234yf. *13th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, 12-15 July 2010.
- [22] 张青, 胡云鹏, 陈焕新, 等. 制冷剂R1234yf替代R22的理论分析和试验研究[J]. 制冷与空调, 2015, 15(1): 54-57.
- [23] Ozone Secretariat. Montreal Protocol [EB/OL] [2016-5-29].
<http://ozone.unep.org/en/treaties-and-decisions/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer>
- [24] 金听祥, 徐冉, 李改莲, 马驰. HFO-1234yf 在房间空调器中替代 R22 的试验研究[J]. 制冷技术, 2014, 42(9): 44-48.
- [25] 张雷, 王芳, 王珂, 刘艳, 姜昆. HFO-1234ze 在空气源热泵热水器中替代 R417A、R22 的研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(3): 102-108.
- [26] 林岷, 金听祥, 张静, 等. 家用空调器中 R1270 替代 R22 的性能试验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(3): 33-36.
- [27] Devotta, S., Padalkar, A.S. and Sane, N.K. (2005) Performance Assessment of HC-290 as a Drop-In Substitute to HCFC-22 in a Window Air Conditioner. *International Journal of Refrigeration*, **28**, 594-604.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.09.013>
- [28] Zhou, G.B. and Zhang, Y.F. (2010) Performance of a Spit-Type Air Conditioner Matched with Coiled Adiabatic Capillary Tubes Using HCFC22 and HC290. *Applied Energy*, **87**, 1522-1528.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.005>
- [29] 张永梨, 董明伟, 董庆明. 大型螺杆式冷水机组使用绿色环保工质的实验研究[J]. 制冷学报, 2002, 23(1): 32-35.
- [30] 李静, 陈剑波, 岳畏畏, 王俊. R290 在热泵空调热水器中的应用实验研究[J]. 能源研究与信息, 2011, 27(3): 174-180.
- [31] 张萍, 陈光明. R410A 替代 R22 制冷系统的实验与分析[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 741-746.
- [32] 张志巍, 李敏霞, 马一太. HFC32/HFO1234ze 二元混合工质的热物性模型[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 218-222.
- [33] Tian, Q.Q., Cai, D.H., et al. (2015) An Experimental Investigation of Refrigerant Mixture R32/R290 as Drop-In Replacement for HFC410A in Household Air Conditioners. *International Journal of Refrigeration*, **57**, 216-228.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.05.005>
- [34] 霍二光, 戴源德, 耿平, 曹孟冰. R1234ze 与 R152a 混合制冷剂替代 R22 的可行性[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4725-4729.
- [35] Sethi, A., Becra, E.V., Yana Motta, S.F. and Spatz, M.W. (2015) Low GWP R22 Replacement for Air Conditioning in High Ambient Conditions. *International Journal of Refrigeration*, **57**, 26-34.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.05.013>
- [36] 林恩新, 牛永明, 霍永祥, 林云. 替代高温气候区域分体式家用空调 R22 的低 GWP 制冷剂 R444B 实验研究[J]. 制冷技术, 2015, 35(5): 7-13.
- [37] 李廷勋, 鲁键, 何东财, 刘振. 新型替代制冷剂房间空调器系统特性实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 56-60.
- [38] Sarbu, I. (2014) A Review on Substitution Strategy of Non-Ecological Refrigerants from Vapour Compression-Based Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pump Systems. *International Journal of Refrigeration*, **46**, 123-141.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.023>
- [39] 梁斌, 张明杰, 付裕. R22 替代工质 R32/R290/R410A 性能的理论 and 实验研究[J]. 中国家用电器技术大会, 2013.
- [40] International Electrotechnical Commission. IEC 60335-2-40:2005 (2005) Household and Similar Electrical Appliances—Safety—Part 2-40: Particular Requirements for Electrical Heart Pumps, Air-Conditioners and Dehumidifiers. IEC, Geneva.
- [41] British Standards Institution. BS EN 378-1:2008 (2008) Refrigerating Systems and Heat Pumps—Safety and Environmental Requirements—Part 1: Basic Requirements, Definitions, Classification and Selection Criteria. BSI, London.
- [42] 徐明仿, 杜维明, 晏刚. 可燃制冷剂抑爆方法[J]. 家电科技, 2004, 2(3): 106-109.
- [43] 唐汝宁, 宋智. 丙烷与 R22 混合工质可燃性分析及相关实验方法研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2000, 19(4): 289-293.
- [44] Jung, D., Song, Y. and Park, B. (2000) Performance des mélanges de frigorigènes utilisés pour remplacer le HCFC22. *International Journal of Refrigeration*, **23**, 466-474. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00066-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00066-3)
- [45] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Molés, F. and Peris, B. (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>

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