

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.020

# R290/R600a 混合制冷剂在房间空调器应用的可行性研究

王秋实, 王芳, 花王, 陈夏辉, 韩玮, 张楠

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**针对当前房间空调器应用的制冷剂 R22 具有全球变暖潜能值高的缺点,课题组提出将 R290 和 R600a 以 95%/5% 的比例组成碳氢混合工质来替代 R22。以 REFPROP 9.1 为基础分析 R22, R290 和 95% R290/5% R600a 的环境及热物理性能,并在理论工况下进行计算;在某防爆实验室内,对 R22 房间空调器使用 3 种制冷剂后在额定制冷、制热工况下的性能进行测试并分析数据。结果表明:额定制冷工况下,混合工质的输入功率比 R22 低 17.31%,制冷量为 R22 的 85.85%;额定制热工况下,混合工质的输入功率仅为 R22 的 80.58%,制热量比 R22 低 8.72%;在 2 种工况下,混合工质的性能系数分别比 R22 高 3.82% 和 13.26%。另外,混合工质与 R290 的各项性能参数差别不大,而在制热工况下混合工质的性能系数高于 R290。综上,R290/R600a 混合制冷剂性能优良,在房间空调器上具有替代 R22 的可行性。

**关键词:**房间空调器;混合制冷剂;制冷剂替代;热力学性能

中图分类号:TB64 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0096-05

## Feasibility Study of R290/R600a Mixed Refrigerant in Room Air Conditioner

WANG Qiushi, WANG Fang, HUA Wang, CHEN Xiahui, HAN Wei, ZHANG Nan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In the view of the problem that R22 which is used in room air conditioner has high global warming potential, a low global warming potential hydrocarbon-mixed refrigerant composed of R290 and R600a at a ratio of 95%/5% was proposed to replace R22. The environmental and thermophysical properties of R22, R290, 95% R290/5% R600a were analyzed based on REFPROP 9.1 and calculated under theoretical conditions. In the R22 room air conditioner of an explosion-proof laboratory, performance tests were conducted on three refrigerants under rated cooling and heating conditions and the data were analyzed. The results show that under rated cooling conditions, the input power of mixed refrigerant is 17.31% lower than R22, and the cooling capacity is 85.85% of R22; under rated heating conditions, the input power of mixed refrigerant is only 80.58% of R22, and the heating capacity is 8.72% lower than R22; under the two working conditions, the coefficient of performance of the mixed refrigerant is 3.82% and 13.26% higher than that of R22, respectively; In addition, the performance parameters of the mixed refrigerants have little difference with R290, and the coefficient of performance is slightly higher than R290, especially under heating conditions. In summary, the R290/R600a mixed refrigerant has excellent performance and has the feasibility of replacing R22 in the room air conditioner.

**Keywords:** room air conditioner; mixed refrigerant; refrigerant replacement; thermodynamic properties

房间空调器常用 R22 作为制冷剂,但它的广泛使用使全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)升高,未来将被逐步淘汰。从发展的角度来看,开发新

型环保制冷剂是制冷空调行业的主流趋势<sup>[1]</sup>。丙烷(R290)是与 R22 热物性相近的碳氢化合物,具有良好的热力性能和环境性能<sup>[2-3]</sup>,可用于替代 R22。通过对

收稿日期:2018-10-23;修回日期:2019-03-04

基金项目:上海市大学生创新创业训练计划项目(SH2018011)。

第一作者简介:王秋实(1994),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为制冷设备测试。E-mail:1418477336@qq.com

R290 空调室内外机进行实验研究,模拟可能出现的泄露及爆炸,指出通过一定的控制措施,以达到 R290 使用的安全性<sup>[4-5]</sup>。异丁烷(R600a)是具有环保性的工质,运行压力低,通过调整充注量,可以降低烃类制冷剂易燃的风险<sup>[6]</sup>。

纯制冷剂的种类及热力性能有局限性,因此混合工质得到了广泛关注<sup>[7-9]</sup>。考虑到 R290, R600a 的热力性能及环境性能优良,课题组以 95%/5% 的比例组成低  $G_{GWP}$  值的 R290/R600a 碳氢类混合制冷剂,并在某品牌的 R22 房间空调器上进行测试,并与 R22, R290 系统性能进行比较,研究其替代 R22 可行性并为今后制冷剂替代的研究提供参考依据。

## 1 热力性能比较

对 REFPROP 9.1 提供的 R22, R290 和 95%

表 1 制冷剂临界参数

Table 1 Refrigerant critical parameters

制冷剂	临界温度/K	临界压力/MPa	标准沸点/K	摩尔质量/( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ )	$O_{ODP}$	$G_{GWP}$
R22	369.30	4.990 0	232.34	86.468	0.03	1 810
R290	369.89	4.251 2	231.04	44.096	0.00	20
95% R290/5% R600a	372.37	4.286 3	231.75	44.634	0.00	20

### 1.2 制冷剂导热系数比较

高导热系数制冷剂具备更优的传热性能。图 1 ~ 2 为 3 种制冷剂在不同温度下的导热系数。饱和气体状态下,随着温度的升高,制冷剂导热系数增大,但混合制冷剂的导热系数一直高于 R22;饱和液体状态下,虽然制冷剂的导热系数随温度升高而降低,但混合制冷剂的导热系数仍高于 R22。综上所述,在同等换热面积下,混合制冷剂的传热性能优于 R22。因此,采用该混合工质系统的蒸发器、冷凝器等热交换设备的换热面积小于 R22 系统,降低了系统的成本,使系统体积更小,结构更加紧凑。

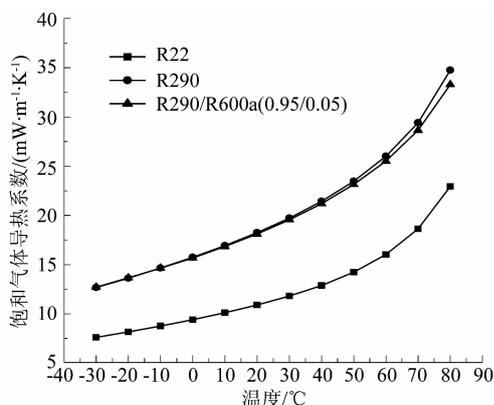


图 1 饱和气体导热系数

Figure 1 Thermal conductivity of saturated gas

R290/5% R600a 的 3 种制冷剂的环境性能、临界参数及热力学特性进行对比分析,初步论证 R290/R600a 在房间空调器中替代 R22 的可行性。

### 1.1 环境性能、临界参数比较

制冷剂的临界参数见表 1。混合工质的临界温度、临界压力相对于 R290 有所增加,其他参数两者基本一致。混合工质的临界温度略高于 R22,临界压力低于 R22,标准沸点基本一致,说明其具有更优良的热物性;由于混合工质的热物性与 R22 相似,则当其替代 R22 用于房间空调器时,不需对原系统进行大的改动。混合工质的  $G_{GWP}$  值仅为 20,远低于 R22,全球变暖潜能小;消耗臭氧潜能值(ozone depletion potential, ODP)为零,对大气臭氧层不造成破坏,在环境性能方面属于环境友好型制冷剂,具有推广和使用的意义。

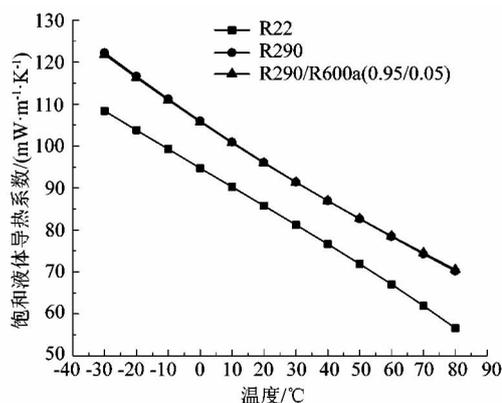


图 2 饱和液体导热系数

Figure 2 Thermal conductivity of saturated liquid

### 1.3 制冷剂黏性比较

黏度反映制冷剂热物性中的迁移性质,反映制冷剂的流动性能。黏度对传热、压降等性质有很大影响,使用黏度较小的制冷剂对系统的设计与优化有一定帮助。图 3 ~ 4 为 3 种制冷剂黏性的比较,在饱和气体及饱和液体状态下,混合制冷剂与 R290 的黏度相近,远低于 R22。因而管道中该混合工质由于黏性造成的流动阻力损失小于 R22,能量损失小。同时混合制冷剂在流动时与管壁形成的附着层薄,使得换热性能更好。故从黏度方面考虑,混合制冷剂应用于房间空调器上具有一定的优越性。

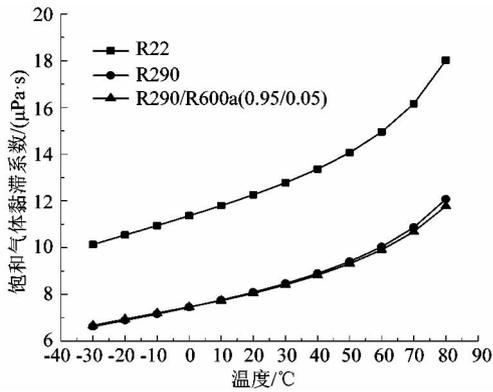


图3 饱和气体黏性

Figure 3 Viscosity of saturated gas

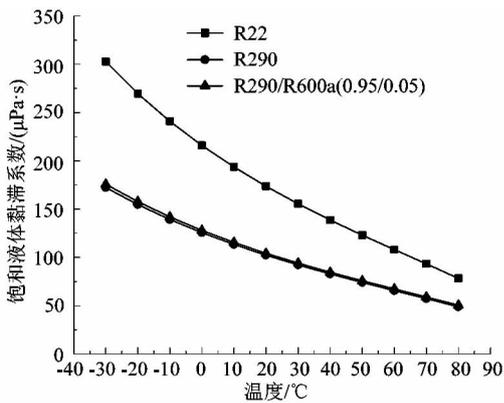


图4 饱和液体黏性

Figure 4 Viscosity of saturated liquid

## 2 制冷剂理论循环性能计算

### 2.1 理论计算工况的确定

采取名义工况,其蒸发温度为7.2℃,冷凝温度为54.4℃。在其他条件一致的情况下,改变过冷度及过热度,即3个计算工况的过热度分别取5,10和10℃,对应的过冷度分别取5,5和10℃。

### 2.2 理论计算结果分析

计算结果见表2。由表2可知,混合工质蒸发压力小于R22,冷凝压力仅是R22的85.2%;由于混合制冷剂中的R600a运行压力低,使得混合工质的冷凝、蒸发压力均小于R290工质。在3种工况下,R290和混合工质的单位制冷量均高于R22,其中混合制冷剂比R22增大分别为71.80%,73.46%和75.30%。虽然R22的单位功耗低于混合工质的单位功耗,但计算得到的3种制冷剂的性能系数( $C_{COP}$ )差别却不大。通过理论循环计算,混合工质在单位质量制冷量和性能系数方面具有替代R22的可行性。

适当的吸气过热度有利于避免液击,适当的过冷度可以保证足够的液相制冷剂以满足蒸发器所要求的制冷量。由计算结果得,增加过热度和过冷度时,R22,R290和混合工质的单位制冷量有所增加;特别过冷度增加时, $C_{COP}$ 也得到一定的提高。因此,可适当增加过冷度和过热度,以获取更高效的制冷性能。

表2 理论循环性能对比

Table 2 Theoretical cycle performance comparison

工况	制冷剂	冷凝压力/MPa	蒸发压力/MPa	单位质量制冷量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	理论单位功耗/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	$C_{COP}$
I	R22	2.194 5	0.625 35	147.77	32.30	4.575
	R290	1.923 3	0.597 61	253.96	56.84	4.467
	95% R290/5% R600a	1.869 8	0.571 17	253.86	56.15	4.521
II	R22	2.194 5	0.625 35	151.56	33.21	4.564
	R290	1.923 3	0.597 61	263.02	58.45	4.500
	95% R290/5% R600a	1.869 8	0.571 17	262.89	57.78	4.549
III	R22	2.194 5	0.625 35	158.50	33.21	4.773
	R290	1.923 3	0.597 61	278.14	58.45	4.759
	95% R290/5% R600a	1.869 8	0.571 17	277.85	57.78	4.809

## 3 工质应用于房间空调器的实验研究

### 3.1 实验设备及测量方法

表3所示为实验工况数据。按照GB/T 7725—2004《房间空气调节器》<sup>[10]</sup>中的标准,在额定工况下,对房间空调器系统分别充注R22、R290和95% R290/5% R600a进行实验。通过查阅资料以及经验所得,

R22为原机组额定充注量1300g,混合制冷剂的充注量为500g,R290充注量为480g。通过铂电阻和压力传感器分别对被测空调器压缩机进出口、冷凝器进出口及蒸发器进出口6个位置的压力和温度进行采集。系统运行1h后记录平稳运行时的相关参数,记录时间间隔为5min,共计7次,取其平均值进行分析。

表3 实验工况数据

Table 3 Experimental conditions

额定 工况	室内		室外	
	干球温度/℃	湿球温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃
制冷	27	19	35	24
制热	20	15	7	6

利用空气焓差法对某品牌的 R22 房间空调器进行相关测试,由于 95% R290/5% R600a 可燃,故在防爆实验室中进行实验。防爆实验室制冷系统原理如图 5 所示,主要由压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀和风机等组成,并用管道连接成一个完整的系统。室内的温度通过制冷系统的冷量和恒温热水的热量来进行调控,湿度通过蒸气加湿装置控制。

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 压缩机吸排气温度、压力对比

表 4 为额定制冷、制热工况下压缩机进出口温度和压力数据。在 2 种工况下,R290 与混合制冷剂的排气温度和压力均低于 R22。其中,混合制冷剂的排气温度分别比 R22 低 7.27 和 10.61 ℃;排气压力分别仅为 R22 的 83.49% 和 78.08%。从系统来看,排气温度的降低有利于保障系统中润滑油和制冷剂的稳定性,

表 4 额定制冷和制热工况下压缩机吸排气温度和压力

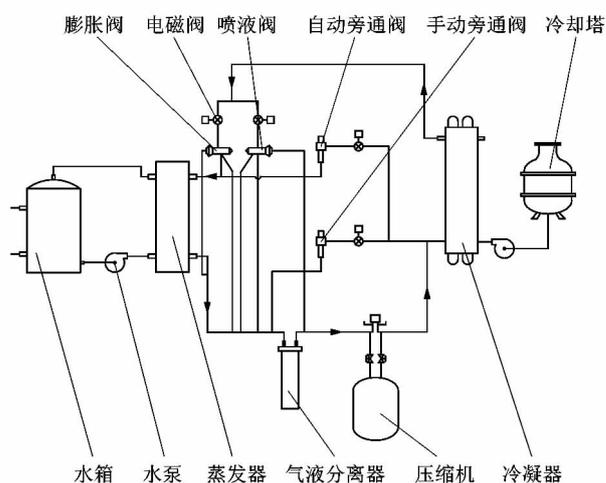
Table 4 Suction and exhaust temperature and pressure of compressor under rated cooling and heating conditions

制冷剂	吸气温度/℃		排气温度/℃		吸气压力/MPa		排气压力/MPa	
	额定制冷	额定制热	额定制冷	额定制热	额定制冷	额定制热	额定制冷	额定制热
	R22	7.090	-0.398 3	76.37	77.79	0.604 3	0.490 4	1.857 8
R290	19.740	5.160 0	70.26	66.95	0.565 4	0.487 3	1.548 3	1.591 3
95% R290/5% R600a	19.670	9.490 0	69.10	67.18	0.539 9	0.470 1	1.551 1	1.583 5

#### 3.2.2 系统输入功率、制冷量、制热量及 $C_{COP}$

图 6~7 所示为 3 种制冷剂在额定制冷、制热工况下的输入功率及换热量。混合制冷剂在额定制冷、制热工况下的输入功率分别比 R22 低 17.31% 和 19.42%。额定制冷工况下,R22 的制冷量最高,混合制冷剂次之,仅为 R22 的 85.85%,R290 最小;额定制热工况下,R22 的制热量最高,混合制冷剂次之,比 R22 低 8.72%。使用混合制冷剂会比 R22 系统的制冷、制热量低,但差值在可接受范围内;混合制冷剂系统相比于 R290 系统的制热、制冷量有所提高,尤其制热量提高了 6.97%。

制冷剂的  $C_{COP}$  值对比如图 8 所示。在 2 种工况下,混合制冷剂的  $C_{COP}$  值分别为 3.156 和 3.613, R22 的  $C_{COP}$  值分别为 3.04 和 3.19,均低于混合制冷剂,此



1—压缩机;2—冷凝器;3—冷却塔;4—喷液阀;5—膨胀阀;6—蒸发器;7—气液分离器;8—电磁阀;9—手动旁通阀;10—自动旁通阀;11—水箱;12 水泵。

图 5 防爆实验室制冷系统原理图

Figure 5 Principle diagram of refrigeration system in explosion-proof laboratory

降低系统功耗,有利于系统的稳定运行;排气压力的降低,有利于压缩机的安全运行,提高房间空调器运行时的安全性。

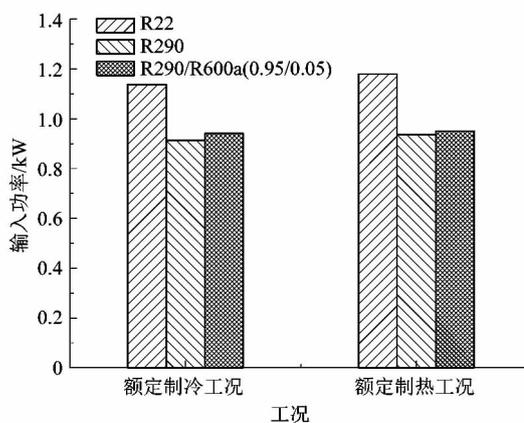


图 6 额定制冷和制热工况下的输入功率

Figure 6 Input power under rated cooling and heating conditions

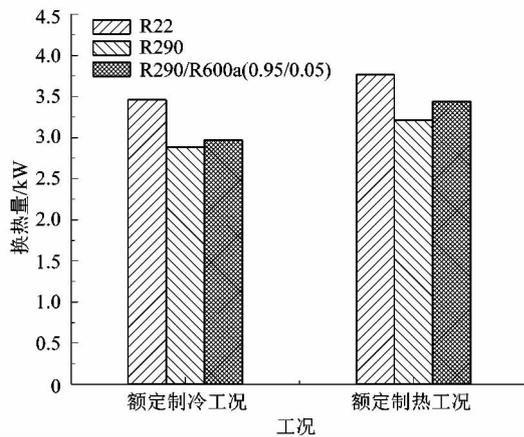


图7 额定制冷和制热工况下的换热量  
Figure 7 Heat exchange capacity under rated cooling and heating conditions

现象是由于R22的排气温度和排气压力高导致压缩机输入功率变高而造成的。对比混合制冷剂以及R290的性能系数来看,混合制冷剂更加高效,尤其在制热工况下性能更好。因此,就性能系数而言,混合工质更加优良,属于节能环保型制冷剂。

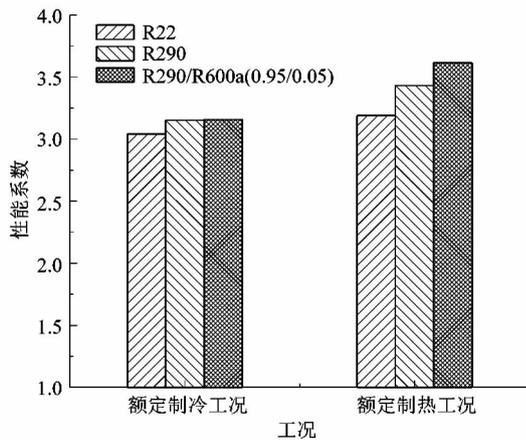


图8 3种制冷剂的性能系数对比

Figure 8 Comparison of COP of three refrigerants

#### 4 结语

从环境、热力性能方面对R22, R290和95% R290/5% R600a进行对比,得出混合工质具有良好热

物性和环保性能。通过理论循环计算,混合制冷剂的单位质量制冷量比R22高70%左右;性能系数方面3者的 $C_{COP}$ 值相当,从理论上证明了该混合工质可替代R22应用于房间空调器上的可行性。

通过在某R22房间空调器上分别进行R22, R290和95% R290/5% R600a的实验,在额定制冷、额定制热工况下对房间空调器的性能进行对比,实验结果表明:混合制冷剂的排气温度、压力均低于R22,有利于提高房间空调器运行的可靠性与安全性;虽然R22在该系统的制冷量、制热量均高于混合制冷剂,但是其系统输入功率变高, $C_{COP}$ 值下降,因此在性能系数方面,混合制冷剂高于R22。综上,混合工质比R22更加环保,应用于房间空调器中具有良好的性能,具有一定的发展潜力。

#### 参考文献:

- [1] 马一太,王伟. 制冷剂的替代与延续技术[J]. 制冷学报, 2010, 31(5): 12-14.
- [2] 李廷勋,杨九铭,曾昭顺,等. R290灌注式替代R22空调整机性能研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 31.
- [3] 高崢,李红旗,刘忠民. R290房间空调器运行特性实验研究[J]. 制冷与空调(四川), 2016(1): 90-91.
- [4] 钟志锋,唐唯尔,周晓芳,等. R290分体式空调器室内泄漏安全性实验研究[J]. 低温工程, 2017(2): 65.
- [5] ZHANG Wang, YANG Zhao, ZHANG Xin, et al. Experimental research on the explosion characteristics in the indoor and outdoor units of a split air conditioner using the R290 refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 416-417.
- [6] JOYBARI M M, HATAMIPOUR M S, RAHIMI A, et al. Exergy analysis and optimization of R600a as a replacement of R134a in a domestic refrigerator system [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4): 1233.
- [7] 范晓伟,徐葳,王方,等. R744/R290/R600a混合工质热泵循环性能分析[J]. 制冷与空调, 2014, 14(10): 105.
- [8] 范晓伟,张鹿,唐向阳,等. R32/R1234yf混合工质热泵循环性能分析[J]. 制冷与空调, 2016, 16(12): 49.
- [9] 霍二光,戴源德,耿平,等. R1234ze与R152a混合制冷剂替代R22的可行性[J]. 化工学报, 2015, 66(12): 4726.
- [10] 全国家用电器标准化技术委员会. 房间空气调节器: GB/T 7725—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.