

文章编号:0253-4339(2025)04-0022-07

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.022

混合物 R1234yf/R290 和 R1234ze(E)/R290 的可燃极限研究

沈军 黄宇杰 钟权 史贺纯 李华杰 赵桓

(珠海格力电器股份有限公司 珠海 519070)

摘要 丙烷(R290)是一种极具潜力的家用空调替代制冷剂,但可燃性限制了其应用。根据 ASHRAE 34-2022 标准测试了 R290、2,3,3,3-四氟丙烯(R1234yf)、反式-1,3,3,3-四氟丙烯(R1234ze(E))和二元混合物 R1234ze(E)/R290、R1234yf/R290 的可燃极限。分析了 R1234yf 和 R1234ze(E)对 R290 可燃性的影响,并对比了 R1234yf、R1234ze(E)、R32、R131I 和 R134a 对 R290 可燃性抑制能力。通过模拟计算了不同组分下 R290 混合物的制冷循环性能。结果表明:R1234yf 和 R1234ze(E)对 R290 可燃性的抑制能力相近且效果较差,当 R1234yf 和 R1234ze(E)的质量分数达到 80%时,混合物的可燃下限仅增加约 1.0%。使用 Le Chatelier 模型对实验数据进行关联,计算结果与实验结果平均绝对偏差为 0.57%。相比 R290 纯质,R1234ze(E)/R290 与 R1234yf/R290 在共沸点附近的能效比衰减小于 1%,单位容积制冷量增加小于 0.4%。制冷剂对 R290 的燃烧抑制能力由大到小排序为:R131I>R134a>R32>R1234ze(E)/R1234yf。

关键词 制冷剂;可燃极限;丙烷;2,3,3,3-四氟丙烯;反式-1,3,3,3-四氟丙烯

中图分类号:TB61⁺2;TB64

文献标识码:A

Research on the Flammability Limits of R1234yf/R290 and R1234ze(E)/R290 Mixtures

Shen Jun Huang Yujie Zhong Quan Shi Hechun Li Huajie Zhao Huan

(Gree Electric Appliances Inc. of Zhuhai, Zhuhai, 519070, China)

Abstract Propane (R290) is a potential refrigerant substitute for household air conditioners. However, its flammability limits its application. In this study, the flammability limits of R290, 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234yf), trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)), R1234ze(E)/R290, and R1234yf/R290 were determined according to the ASHRAE 34-2022 standard. The effects of R1234yf and R1234ze(E) on the flammability of R290 were analyzed, and the inhibiting abilities of R1234yf, R1234ze(E), R32, R131I, and R134a on the flammability of R290 were compared. In addition, the refrigeration cycle performance of R290 mixtures with different compositions was simulated. The results showed that both R1234yf and R1234ze(E) exhibited limited flame inhibition capabilities for R290. When the mass fractions of R1234yf and R1234ze(E) reached 80%, the lower flammability limit of the mixture increased by approximately 1.0%. The experimental data were correlated using the Le Chatelier model, which resulted in an average absolute deviation of 0.57% between the calculated and experimental results. Compared with R290, the energy efficiency ratio of the two refrigerants and R290 mixture decreased by less than 1%, and the volumetric cooling capacity increased by less than 0.4%. The flame inhibition effect of the refrigerant on R290 decreased in the following order: R131I>R134a>R32>R1234ze(E)/R1234yf.

Keywords refrigerant; flammability limit; propane; 2,3,3,3-tetrafluoropropene; trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene

空调使用率和保有量随经济发展而稳步上升,据统计^[1],2020 年中国居民空调保有量达到了 5.2 亿台,碳排放量也随着空调使用量的增加而增加。空调碳排放包括直接排放和间接排放 2 部分,而直接排放为制冷剂的排放。当前空调主要使用 R32 和 R410A 制冷剂,碳排放当量是 CO₂ 的上千倍。2016 年世界各国达成《蒙特利尔议定书>基加利修正案》以减少温室气体氢氟烃(HFCs)的碳排放,R32、R134a、R125 等 18 种 HFCs 被列入管控目录。为达成《基加利修

正案》,各国制定一系列法规以限制高全球变暖潜值(Global Warming Potential,GWP)制冷剂使用,其中欧盟的要求最为严苛,2024 年 1 月欧盟通过了最新的 F-gas 修订案,在 2029 年对于额定制冷量小于 12 kW 的分体式热泵或空调,禁止使用 GWP>150 的制冷剂,低 GWP 制冷剂的应用已成为家用空调发展面临的重要挑战。

R290 的臭氧损耗潜值(ozone depletion potential, ODP)为 0,GWP<1,可燃性类别为 3 类(高可燃

性)^[2],作为一种自然存在的物质,R290 成本低廉且可持续,可以从生物气体或石油和天然气加工的副产品中获取。R290 具有良好的环保性能和热物理特性^[3-4],用于家用空调器的全生命周期碳排放量约为 R32 的 85%^[5],中国政府正积极推动 R290 家用空调产品的市场化,并纳入了《中国消耗臭氧层物质替代品推荐名录》中,但高可燃性限制了它的广泛使用^[6]。一般认为,使用不可燃或弱可燃制冷剂与 R290 混合,可有效抑制 R290 的可燃性。Zhong Quan 等^[7]实验得出 R131I 和 R32 均可抑制 R290 的可燃性。Cai Dehua 等^[8]研究了不同配比下 R134a/R290 和 R134a/R600a 的可燃极限,结果表明 R134a 对 R290 的可燃性抑制效果优于 R600a。Zhong Li 等^[9]通过测试燃烧速度和可燃极限研究了制冷剂 R125 对 R290 的抑制效果。

作为第 4 代制冷剂,2,3,3,3-四氟丙烯(R1234yf)和反式-1,3,3,3-四氟丙烯(R1234ze(E)),不仅 ODP=0,GWP=1,且可燃性分类均为 2L 类(弱可燃性)^[2]。R1234ze(E)和 R1234yf 属于同分异构体,它们的可燃性已被广泛研究。B. Minor 等^[10]根据标准 ASTM E681-04,测得 R1234yf 的可燃极限为 3.83%~15.0%。S. Kondo 等^[11]根据标准 ASHRAE 34-2007,在温度为 35℃时,测得干空气中 R1234yf 的可燃极限为 6.7%~11.7%,在相对湿度为 50%的湿空气中 R1234yf 和 R1234ze(E)的可燃极限分别为 5.5%~13.0%和 5.86%~12.8%。S. Kondo 等^[12-13]研究了环境温度和压力对 R1234yf 可燃极限的影响,环境温度从 5℃增至 100℃,R1234yf 的可燃下限(lower flammability limit,LFL)减小,可燃上限(upper flammability limit,UFL)增加,环境压力从常压增至 2 500 kPa,R1234yf 的 LFL 减小,而 UFL 增加。Dong Hanhai 等^[14]测试了初始温度对 R1234yf 可燃极限和燃烧速度的影响。郭智恺等^[15]根据 GB/T 12474—2008 标准测试了 R1234ze(E)在不同湿度下的可燃极限。Lü Zijian 等^[16]的实验研究结果表明,随着 R1234yf 比例的增加,R1234yf/R32 和 R1234yf/R152a 的燃烧速度减小和可燃极限范围收窄。Feng Biao 等^[17]的研究同样表明,R1234yf 有抑制 R152a 可燃性的效果。因此,可以推断 R1234ze(E)和 R1234yf 具有抑制 R290 可燃性的潜力。

已有学者对 R1234yf/R290 和 R1234ze(E)/R290 的气液相平衡特性^[18-19]和系统循环性能^[20-23]进行研究。Zhang Haiyang 等^[18]测量了 R1234ze(E)/R290 混合物在 253.141~293.284 K 的气液平衡数据。Zhong Quan 等^[19]测量了 R1234yf/R290 混合物

在 254.28~348.30 K 的气液平衡数据。Zhang Nuochen 等^[21]通过仿真计算,得出在汽车空调上使用 R1234yf/R290(摩尔比为 0.3/0.7)的系统循环性能要优于 R134a。Liang Youcai 等^[22]计算分析了余热回收系统,得出使用 R1234ze(E)/R290 工作流体的新型有机朗肯循环和喷射器膨胀制冷循环系统要优于传统的有机朗肯循环和蒸汽压缩制冷循环系统。Wang Lele 等^[23]分析了不同组分的 R290/R1234ze(E)混合物的制冷性能,发现可以用 R1234ze(E)/R290(质量比为 0.45/0.55)代替 R22。王方等^[24]分析了二元非共沸混合工质 R1234ze(E)/碳氢化合物(HCs)热泵系统循环性能,发现 R1234ze(E)/HCs 有望成为新型替代工质。

可燃极限是确定制冷剂可燃等级分类的重要参数之一,若 LFL≤3.5%,可燃等级分类为 3 类^[2],标准法规对于使用 3 类制冷剂产品的系统设计、制造、储存和运输等过程的安全要求管控更加严格,使得推广困难。现有研究主要通过向 R290 添加 R131I、R134a、R32 等物质以降低其可燃性,添加 R1234ze(E)和 R1234yf 的报道较少,虽有 R1234ze(E)/R290、R1234yf/R290 混合物的物性和系统性能研究,但未考虑混合物的安全性能。本文在 ASHRAE 34-2022 标准^[2]的条件下测试了 R290、R1234yf、R1234ze(E)纯质和 R1234ze(E)/R290、R1234yf/R290 二元混合物的可燃极限。使用 H. Le Chatelier 公式^[25]关联实验数据,并分析了 R1234yf 和 R1234ze(E)对 R290 可燃性的影响。此外,模拟计算不同组分下 R290 混合物的制冷循环性能。研究结果可为 R290 混合制冷剂的安全应用提供参考。

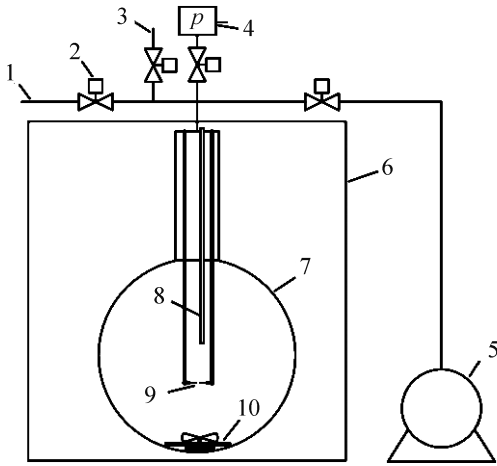
1 实验装置及方法

1.1 实验装置

使用根据标准 ASHRAE 34—2022^[2]搭建的可燃极限测试装置进行实验,如图 1 所示。实验容器为 12 L 单颈球形玻璃烧瓶。磁力搅拌器用于混合玻璃烧瓶中的气体(空气/制冷剂)。使用直径为 1 mm、间距为 6.4 mm 的 L 形钨丝电极点燃气体混合物。将点火源放置在离测试容器底部 1/3 容器直径的高度处。测试在 60℃和大气压下进行。烧瓶中的温度通过恒温防爆箱保持,波动在 1℃以内。

1.2 实验步骤

测试前,首先对烧瓶和管道系统进行 3 次抽真空换气清洁。恒温防爆箱的温度设定为 60℃,烧瓶再次抽空。将混合物加入烧瓶中,通过分压控制加入量,然后引入绝对湿度为 0.008 8 g±0.000 5 g(每克



1 进样口; 2 阀; 3 空气进口; 4 压力传感器;
5 真空泵; 6 恒温防爆箱; 7 12 L 球形烧瓶;
8 铂电阻温度计; 9 点火电极; 10 磁力搅拌器。

图 1 实验系统

Fig.1 The experimental system

干燥空气中水蒸气的克数)的空气,使烧瓶内压力恢复至大气压。开启搅拌器使瓶内物质完全混合并达到热平衡 5 min。搅拌器停止工作 60 s 后,产生电火花(15 kV, 30 mA, 火花持续时间 0.4 s)点燃烧瓶内的气体混合物。通过摄像头观察火焰,从电极顶端到容器壁若形成超过 90°扇形的连续火焰传播,则认为混合物在该浓度下可燃。测试以约 10%的体积分数增量进行,如 2.0%、2.2%、2.4%。记录产生火焰传播和不产生火焰传播的体积分数,将其平均值作为实验可燃极限。本实验使用的样品信息如表 1 所示,所有样品均未经进一步纯化。

表 1 样品材料信息

Tab.1 Information of sample materials

制冷剂	名称	来源	纯度
R290	丙烷	山东粤安	≥0.995
R1234ze(E)	反式-1,3,3,3-四氟丙烯	霍尼韦尔	≥0.998
R1234yf	2,3,3,3-四氟丙烯	霍尼韦尔	≥0.998

对于混合物,实验的不确定度主要来自混合物组分、分压和测试步长。采用重量法,测试混合物由高精度电子天平(梅特勒-托利多 XPR5003S)配制,分辨率为 1 mg,摩尔分数的不确定度小于 0.002。压力由数字压力传感器测量,量程为 101 kPa,额定精度为 0.1%。本文中 LFL 的测量步长在 0.1%~0.3%,UFL 的测量步长在 0.4%~1.0%。考虑以上因素,LFL 和 UFL 的实验不确定度分别小于 0.3%和小于 0.6%。

1.3 装置验证

为了验证测试装置的可靠性,在 60 °C 和 101 325 Pa

下对纯 R290 和 R1234yf、R1234ze(E) 进行测量,实验数据如表 2 所示。

表 2 R290、R1234yf 和 R1234ze(E) 的可燃极限实验值与参考值

Tab.2 Experimental and referenced flammability limits of R290, R1234yf and R1234ze(E)

参数	R290		R1234ze(E)		R1234yf	
	LFL/%	UFL/%	LFL/%	UFL/%	LFL/%	UFL/%
实验值	2.1	9.9	6.5	12.7	5.9	13.5
参考值	2.0 ^[13]	9.9 ^[13]	6.4 ^[26]	12.2 ^[26]	5.5 ^[13]	13.0 ^[13]

对于 R290,LFL 的测试值与文献值之间的偏差为 0.1%,UFL 的偏差为 0,满足 ASTM E681 关于卤代烃的测试误差应不超过 LFL 的 0.1%和 UFL 的 0.9%的要求。对于 R1234yf,LFL 的测试值与文献值之间的偏差为 0.4%,UFL 的偏差为 0.5%,满足 LFL 和 UFL 对大淬灭距离材料的测试偏差应不超过 0.9%和 1.8%的要求。

2 实验结果及分析

2.1 可燃极限计算与测试结果

在 60 °C、常压下测试了 R1234yf/R290 和 R1234ze(E)/R290 的可燃极限,如表 3 所示。

H. Le Chatelier 模型通常用于预测可燃气体混合物的可燃极限,二元混合物的可燃下限和上限可通过以下等式计算^[25]:

$$\frac{1}{L_f} = \frac{x_1}{L_1} + \frac{x_2}{L_2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{x_1}{U_1} + \frac{x_2}{U_2} \quad (2)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (3)$$

式中: L_f 和 U_f 分别为混合物的可燃下限和上限; L_i 和 U_i 分别为组分 i 的可燃下限和上限; x_i 为组分 i 的摩尔分数。通过 H. Le Chatelier 公式分别计算了 R1234yf/R290 和 R1234ze(E)/R290 的可燃极限数据,结果列于表 3 并绘制于图 2。该关联模型计算的可燃下限和可燃上限与实验结果之间的平均绝对偏差分别为 0.22%和 0.57%。由图 2 和表 3 可知,当 R1234yf 或 R1234ze(E) 的质量分数增至 20%时,混合物的 LFL 并未明显变化,质量分数增至 80%时,混合物的 LFL 仅增加约 1.0%,且小于 3.5% (LFL > 3.5% 是制冷剂可燃性为 2 类的必要条件之一^[2])。随着 R1234yf 和 R1234ze(E) 的质量分数增加,混合物的 LFL 和 UFL 均呈现逐渐增大的趋势,

表 3 可燃极限的实验值和计算值
Tab.3 The experimental and calculated flammability limits

质量分数/%	R1234yf/R290				R1234ze(E)/R290			
	LFL _{exp} /%	LFL _{cal} /%	UFL _{exp} /%	UFL _{cal} /%	LFL _{exp} /%	LFL _{cal} /%	UFL _{exp} /%	UFL _{cal} /%
0	2.1	2.1	9.9	9.9	2.1	2.1	9.9	9.9
20	2.1	2.3	10.1	10.2	2.2	2.3	10.1	10.1
40	2.4	2.5	10.8	10.5	2.4	2.5	10.8	10.4
60	2.5	2.8	11.2	11.0	2.7	2.8	11.2	10.8
80	3.1	3.5	13.3	11.8	3.2	3.6	13.3	11.4
100	5.9	5.9	13.5	13.5	6.5	6.5	12.7	12.7

注:1. 质量分数分别指 R1234yf、R1234ze(E) 的质量分数。
2. 下标 exp 和 cal 分别表示实验值和计算值。

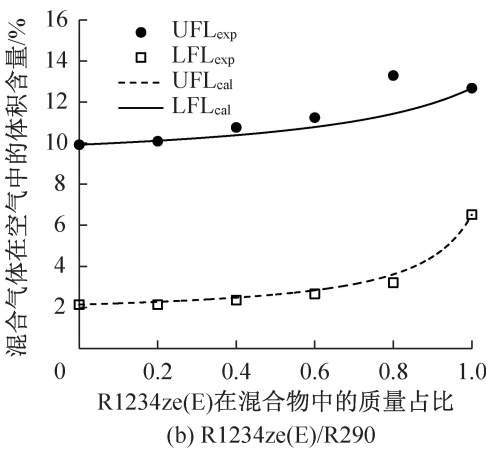
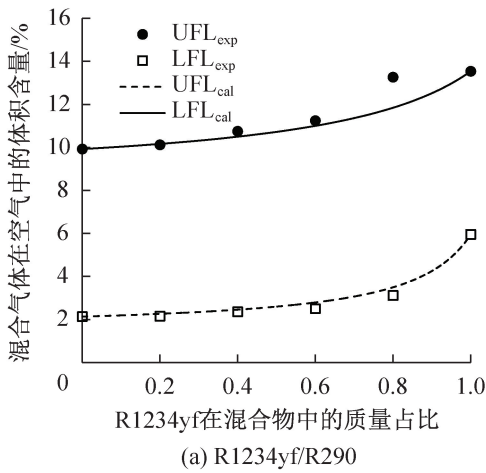


图 2 可燃极限实验值

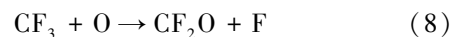
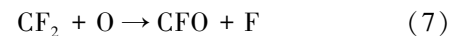
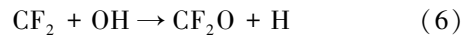
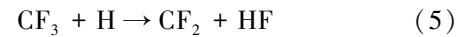
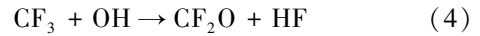
Fig.2 Experimental flammability limits

R1234ze(E)/R290 的可燃极限与 R1234yf/R290 基本相似。R1234yf 或 R1234ze(E) 在 R290 混合制冷剂中的质量分数至少需要高于 80%, 才能使可燃等级由 3 类变为 2 类。

2.2 抑制效果分析

抑制燃烧主要涉及物理和化学 2 个方面。物理

抑制机制主要体现在稀释、隔离和冷却, 而化学抑制机制主要体现在清除活性自由基上。对于 R1234ze(E) 和 R1234yf, 抑制 R290 火焰的机理主要体现在对活性自由基的清除上。R1234yf 初始热分解的主要中间体是 CF₃ 和 H 自由基^[26]。CF₃ 自由基参与清除反应, 途径如反应式(4)~式(8)所示^[27]。燃烧过程中产生的高活性自由基: O、H 和 OH, 会被氟化基捕获并转化为稳定的产物。



使用 F 数对比分析 R1234yf、R1234ze(E)、R32、R131I 和 R134a 对 R290 可燃性抑制能力, F 数是由 S. Kondo 等^[28] 提出以描述可燃物的燃烧特性, 表达式如下:

$$F = 1 - (L/U)^{0.5} \quad (9)$$

式中: L 和 U 分别为可燃物的 LFL 和 UFL。 F 数介于 0~1, 且 F 数越大, 可燃物的可燃性越强。当 F 数为 0 时, 该物质不可燃。

图 3 所示为混合物的 F 数随抑燃制冷剂体积分数的变化。将实验测得的 R1234yf/R290、R1234ze(E)/R290 的 F 数与 Zhong Quan 等^[7] 测得的 R32/R290、R131I/R290 和 Cai Dehua 等^[8] 测得的 R134a/R290 的 F 数进行了对比。由图 3 可知, 各制冷剂对 R290 的燃烧抑制能力由大到小排序为: R131I > R134a > R32 > R1234ze(E)/R1234yf, 可燃物的可燃性同卤素原子与氢原子比值大小以及碳碳双键均有关, 虽然 R1234ze(E) 和 R1234yf 中的卤素原子与氢原子比值较大, 但由于碳碳双键的存在, 它们对 R290 的

可燃性抑制能力最弱。

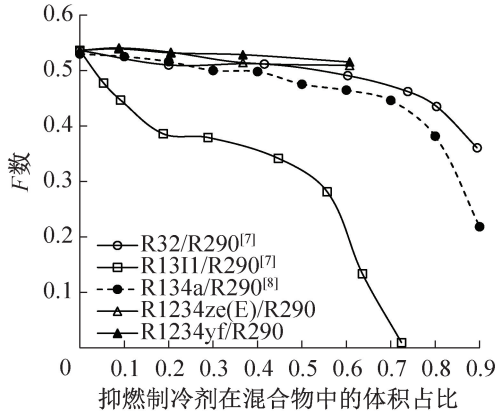


图3 R290 混合物的 F 数

Fig.3 F -number of R290 mixtures

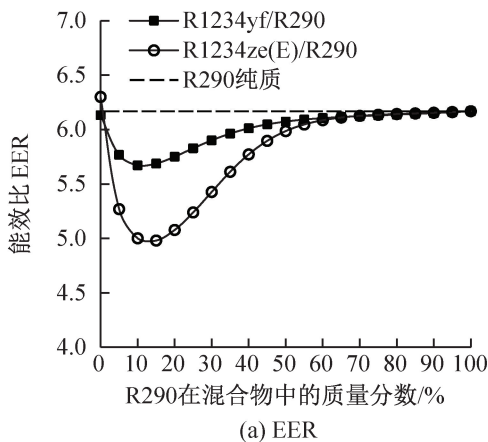
2.3 热力循环分析

基于 REFPROP 10.0 模拟不同组分的 R290 混合物的制冷循环。研究并对比了不同 R290 质量分数下能效比 (energy efficiency ratio, EER)、单位容积制冷量、单位质量制冷量和温度滑移的变化。制冷循环计算工况如表 4 所示,结果如图 4 所示。混合物的 EER 比纯制冷剂的小。随着 R290 质量分数的增加,混合物的 EER 先减小后增大。当 R290 的质量分数在 70% 及以上时,混合物的 EER 衰减小于 1%,单位容积制冷量增加小于 0.4%。当 R290 的质量分数小于 70% 时, R1234yf/R290 的 EER 和单位容积制冷量始终大于 R1234ze(E)/R290, 而温度滑移始终小于 R1234ze(E)/R290。2 种混合物的单位容积制冷量的局部最大值均出现在共沸点附近。

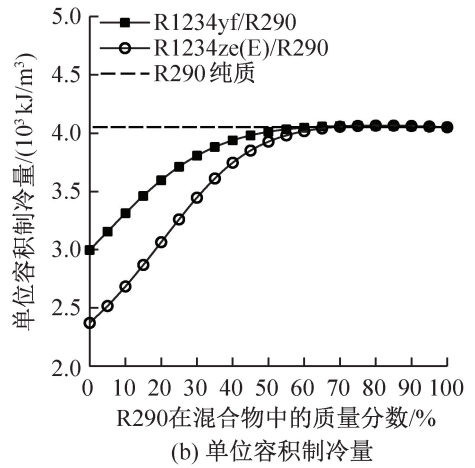
表 4 制冷循环计算工况

Tab.4 Calculation conditions of refrigeration cycle

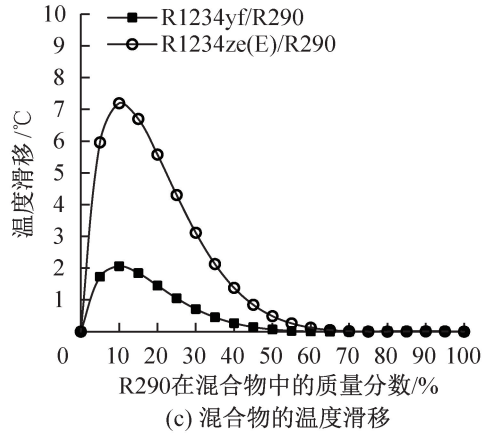
蒸发温度/°C	冷凝温度/°C	过热度/°C	过冷度/°C	等熵效率
10	40	5	5	0.75



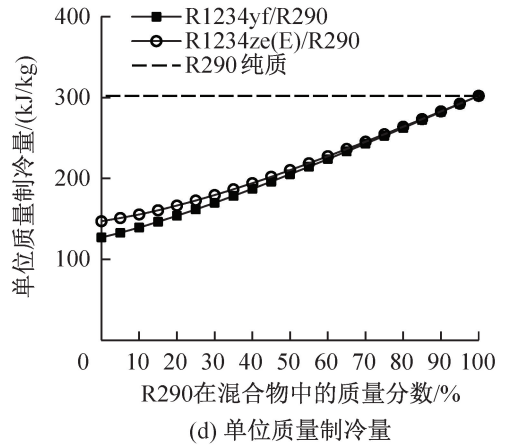
(a) EER



(b) 单位容积制冷量



(c) 混合物的温度滑移



(d) 单位质量制冷量

图4 R290/R1234yf 和 R290/R1234ze(E) 的制冷性能变化
Fig.4 Variation of refrigeration performance of R290 mixed with R1234yf and R1234ze(E)

综上所述,相比 R290 纯质,2 种制冷剂分别与 R290 的混合物在共沸点附近实现了相对较小的 EER 衰减和单位容积制冷量增加。R290 和 R1234yf 或 R1234ze(E) 形成的共沸混合物虽然具有较好的综合性能,并能够提高 R290 的可燃下限,但同时也应考虑单位质量制冷量减小带来灌注量提升的变化。

3 结论

本文测量了 R1234yf/R290 和 R1234ze(E)/

R290 混合制冷剂的可燃极限,使用 Le Chatelier 模型对实验数据进行关联,并对比了 R1234yf、R1234ze(E)、R32、R131I 和 R134a 对 R290 可燃性的抑制能力。此外,模拟研究了不同组分下 R290 混合物的制冷循环性能。得到结论如下:

1) 在 60 °C 和 1 个大气压下,R290 的 LFL 和 UFL 分别为 2.1% 和 9.9%;R1234ze(E) 的 LFL 和 UFL 分别为 5.9% 和 13.5%;R1234yf 的 LFL 和 UFL 分别为 6.5% 和 12.7%。

2) R1234yf 和 R1234ze(E) 对 R290 可燃性抑制能力较差,R1234yf 或 R1234ze(E) 的质量分数达到 20% 时,混合物的 LFL 并没有明显变化,当质量分数达到 80% 时,混合物的可燃下限仅增加约 1.0%。

3) 在 R1234yf、R1234ze(E)、R32、R131I 和 R134a 中,R1234yf 和 R1234ze(E) 对 R290 可燃性抑制能力最弱,R131I 对 R290 可燃性抑制能力最强。

4) 相比 R290 纯质,R1234yf 和 R1234ze(E) 分别与 R290 形成的混合物在共沸点附近的 EER 衰减小于 1%,单位容积制冷量增加小于 0.4%,单位质量制冷量明显减小。

作为制冷剂可燃性等级分类的关键参数,本文只测试研究了可燃极限,未进行燃烧速度实验研究以进一步确定混合制冷剂的可燃等级,此外对于混合物的热力循环性能也未进行整机实验验证,在未来可以进行进一步的实验分析,得到可燃性和整机循环性能均较优的混合比例。

本文受广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515010733)项目资助。(The project was supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2023A1515010733).)

参考文献

[1] 奥维云网. 2020 年中国空调市场年度报告[EB/OL] (2021-01-21) [2024-03-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/b5Xlvthh_bF5NmTlFD6RVg. (AVC. 2020 China air conditioning market annual report[EB/OL]. (2021-01-21) [2024-03-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/b5Xlvthh_bF5NmTlFD6RVg.)

[2] Designation and safety classification of refrigerants; ASHRAE 34 - 2022 [S]. Atlanta: American National Standards Institute, 2022.

[3] 解元飞. R290 应用于房间空调器的性能实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015. (XIE Yuanfei. Experimental study on the performance of R290 applied to room air conditioner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.)

[4] 宁静红, 刘圣春, 彭苗, 等. R290 制冷空调系统的现状与未来发展[J]. 流体机械, 2012, 40(7): 72-79. (NING Jinghong, LIU Shengchun, PENG Miao, et al. Today and future development of R290 refrigeration and air-conditioning system[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(7): 72-79.)

[5] 李小燕, 宁前, 何国庚. 采用 R290 和 R32 的家用空调器全生命周期碳排放研究[J]. 低温工程, 2021(2): 33-40. (LI Xiaoyan, NING Qian, HE Guogeng. Study on carbon emission of household air conditioners using R290 and R32 as refrigerants in whole life cycle [J]. Cryogenics, 2021(2): 33-40.)

[6] 陈志强, 刘亚洲. R290 空调控制器的防爆设计及研究[C]//2020 年中国家用电器技术大会论文集. 宁波, 2020: 797 - 801. (CHEN Zhiqiang, LIU Yazhou. Explosion-proof design and research of R290 air-conditioning controller [C]//Proceedings of China Household Appliances Technology Conference 2020. Ningbo, 2020:797-801.)

[7] ZHONG Quan, HUANG Yujie, ZHAO Huan, et al. Experimental study on the influence of trifluoriodomethane on the flammability of difluoromethane and propane[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 135: 14-19.

[8] CAI Dehua, HAO Zian, XU Hao, et al. Research on flammability of R290/R134a, R600a/R134a and R600a/R290 refrigerant mixtures [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 137: 53-61.

[9] ZHONG Li, ZHANG Wang, LI Xing, et al. Effects of trifluoriodomethane and pentafluoroethane on combustion characteristics of flammable refrigerant propane [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 148: 25-34.

[10] MINOR B, SPATZ M. HFO-1234yf low GWP refrigerant update [C]//Proceedings of the 12th International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette:Purdue University, 2008:937-944.

[11] KONDO S, TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, et al. Flammability limits of olefinic and saturated fluoro-compounds[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1/2/3): 613-618.

[12] KONDO S, TAKIZAWA K, TOKUHASHI K. Effects of temperature and humidity on the flammability limits of several 2L refrigerants[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2012, 144: 130-136.

[13] KONDO S, TAKAHASHI A, TAKIZAWA K, et al. On the pressure dependence of flammability limits of CH₂ = CFCF₃, CH₂F₂ and methane [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(5): 289-293.

[14] DONG Hanhai, LIU Yi, LI Yuxiao, et al. Effect of initial temperature on explosion characteristics of 2,3,3,3 -

- tetrafluoropropene[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 68: 104324.
- [15] 郭智恺, 谢品赞, 吴佳萍. HFO-1234ze(E)在不同湿度下燃烧极限实验研究[J]. *浙江化工*, 2016, 47(3): 1-3. (GUO Zhikai, XIE Pinzan, WU Jiaping. Flammable limit study of HFO-1234ze(E) under different humidity [J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2016, 47(3): 1-3.)
- [16] LYU Zijian, YANG Zhao, CHEN Yubo, et al. Experimental studies on the flammability limit and burning velocity of the mixtures of 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene [J]. *Fuel*, 2021, 298: 120698.
- [17] FENG Biao, YANG Zhao. Research on burning velocity of R152a and its binary mixture[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228: 184-192.
- [18] ZHANG Haiyang, ZHONG Quan, GONG Maoqiong, et al. Experimental study on the saturated liquid density and bubble point pressure for R1234ze(E) + R290 [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2016, 61(9): 3241-3249.
- [19] ZHONG Quan, DONG Xueqiang, ZHAO Yanxing, et al. Thermodynamic properties of (R1234yf+R290): isochoric $p\rho T_x$ and specific heat capacity c_p measurements and an equation of state [J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2019, 129: 36-43.
- [20] ZHANG Nuochen, DAI Yuande. Performance evaluation of alternative refrigerants for R134a in automotive air conditioning system[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2022, 17(1): e2732.
- [21] ZHANG Nuochen, LI Biao, FENG Linghao, et al. Research on the thermophysical properties and cycle performances of R1234yf/R290 and R1234yf/R600a [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2021, 42(8): 123.
- [22] LIANG Youcai, WU Jintao, SUN Zhili, et al. Thermodynamic and economic analysis of refrigerant mixture R290/R1234ze used in an ORC-EERC system for low temperature heat sources [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 229: 120635.
- [23] WANG Lele, LI Huixiong, WU Jiahuan, et al. Feasibility of using near-azeotropic refrigerant mixture R290/R1234ze(E) as substitute for R22 [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(3): e13574.
- [24] 王方, 袁秋艳, 王帅琪, 等. R1234ze/HCs非共沸混合工质热泵系统循环性能分析[J]. *制冷学报*, 2020, 41(1): 26-31. (WANG Fang, YUAN Qiuyan, WANG Shuaiqi, et al. Performance evaluation of heat pump system using non-azeotropic refrigerant blends R1234ze/HCs [J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(1): 26-31.)
- [25] LE CHATELIER H, BOUDOUARD O. Limits of flammability of gaseous mixtures [J]. *Bulletin de la Société Chimique de France (Paris)*, 1898, 19: 483-488.
- [26] ZHAO Zhen, LUO Jieli, ZOU Dexin, et al. Experimental investigation on the inhibition of flame retardants on the flammability of R1234ze(E) [J]. *Energy*, 2023, 263: 126149.
- [27] TAKAHASHI F, KATTA V R, LINTERIS G T, et al. Combustion inhibition and enhancement of cup-burner flames by CF_3Br , C_2HF_5 , $C_2HF_3Cl_2$, and $C_3H_2F_3Br$ [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2741-2748.
- [28] KONDO S, URANO Y, TOKUHASHI K, et al. Prediction of flammability of gases by using F-number analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 82(2): 113-128.

通信作者简介

钟权,男,高级工程师,珠海格力电器股份有限公司,0756-8587826, E-mail: zhongquan14@mails.ucas.ac.cn。研究方向: 环保制冷剂。

About the corresponding author

Zhong Quan, male, senior engineer, Gree Electric Appliances Inc. of Zhuhai, 86-756-8587826, E-mail: zhongquan14@mails.ucas.ac.cn. Research fields: environmentally friendly refrigerant.