

文章编号:0253-4339(2026)03-0118-07
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250409001

R474A 和 R479A 与冷冻机油的溶解特性实验研究

刘健琛¹ 王天浩¹ 金 霄² 徐东伟² 聂 昊² 山本慧² 戴晓业¹ 史 琳¹

(1 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084; 2 大金氟化工(中国)有限公司 常熟 215522)

摘 要 新型车用空调制冷剂 R474A 与 R479A 在环保性、安全性、热力学性能等方面表现突出,但其与冷冻机油的溶解度特性尚未见相关研究。本文研究了 R474A 和 R479A 与冷冻机油 RB68 和 RB100EV 的溶解特性,在 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,测试了 R474A 和 R479A 与 RB68 和 RB100EV 的临界互溶温度。在实验温度范围内,R474A 与 RB68 和 RB100EV 溶液在不同含油率下始终互溶,临界互溶温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。R479A 与 2 种冷冻机油均保持均相透明状态,临界互溶温度均在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。表明 2 种车用制冷剂与冷冻机油在低温环境下仍有很好的互溶性,验证了作为严寒地区车用空调替代工质的适用性。基于等体积饱和法,在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测试了 R474A 与 R479A 在 RB68、RB100EV 中的溶解度,实验结果表明:2 种新型制冷剂在 RB68、RB100EV 这 2 款冷冻机油中的溶解度随着压力的升高而增大,随着温度的升高而减小。在 $-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,随着压力的升高,压力对溶解度的增强效应显著提升。

关键词 R474A; R479A; 冷冻机油; 互溶性; 溶解度

中图分类号: TB61⁺2; TB64

文献标识码: A

Experimental Research on the Dissolution Characteristics of R474A and R479A in Lubrication Oils

Liu Jianchen¹ Wang Tianhao¹ Jin Xiao² Xu Dongwei² Nie Hao² Kei Yamamoto²
Dai Xiaoye¹ Shi Lin¹

(1. Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Daikin Fluorochemicals (China) Co., Ltd., Changshu, 215522, China)

Abstract The novel refrigerants R474A and R479A have demonstrated superior performance in terms of environmental friendliness, safety, and thermodynamic properties. However, their solubility in refrigeration oils remains unknown. This study investigates the miscibility and solubility of R474A and R479A in the lubrication oils RB68 and RB100EV. The critical miscibility temperatures of R474A and R479A in RB68 and RB100EV were tested within a temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The findings reveal that within the experimental temperature range, R474A is miscible in RB68 and RB100EV solutions at different oil contents, and the critical miscibility temperature is lower than $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. R479A maintains a homogeneous transparent state in both refrigeration oils, with critical miscibility temperatures below $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Based on the isochoric saturation method, the solubility of R474A and R479A in RB68 and RB100EV was tested within a temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The solubility of both novel refrigerants in RB68 and RB100EV increased with pressure and decreased with temperature. Based on these findings, for a given temperature range, the enhancing effect of pressure on solubility increases significantly as the pressure increases.

Keywords R474A; R479A; lubrication oils; miscibility; solubility

基于《〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉基加利修正案》,中国正积极推进 HFC 类制冷剂的削减与淘汰。汽车空调中使用的制冷剂如 R134a 等因较高的 GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)在一定年限内面临淘汰^[1],寻找新型环保车用空调制冷剂成为制冷领域的研究热点^[2]。当前对

制冷剂的筛选和评价需要考虑包括安全性、环保性、热力学性能与经济性的多重因素^[3]。现有的常见替代制冷剂有 R1234yf、R290 和 R744 等。R1234yf 的换热能力与 R134a 相比有一定的降低,但仍然可以满足日常商业环境的使用要求^[4],安全性均满足要求^[5],但价格昂贵。R290 与 R744 均在《中国消耗臭

基金项目:国家自然科学基金(52176011, 52236003)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176011 & No. 52236003).)

收稿日期:2025-04-09;修回日期:2025-04-25;录用日期:2025-05-13

氧层物质替代品推荐名录》中,但 R290 具有强可燃性^[6],R744 与 R134a 物性差异大,替代成本高,且 R744 工作压力高,存在泄漏风险,所以仍不能完全满足替代需求^[7]。

R474A 和 R479A 是日本大金公司设计的 2 种新型汽车空调制冷剂。R474A 由 R1132(E)和 R1234yf 组成,二者的质量比例为 23:77,R479A 由 R1132(E)、R1234yf 和 R32 这 3 种制冷剂组成,质量比例为 28.0:50.5:21.5。2 种新型制冷剂的相关性质如表 1 所示。由表 1 可知,2 种制冷剂的 GWP<150,安全性较好,沸点低,而且单位容积的制冷及制热性能好,具有一定的替代优势。但制冷剂替代还需要考虑制冷剂在制冷系统中与冷冻机油的互溶性。制冷系统运行过程中,良好的油溶性可以保证制冷剂带动冷冻机油流经整个系统,起到润滑作用;不良的油溶性可能导致冷冻机油无法在系统中有效流动,导致压缩机缺油,使润滑效果下降;制冷剂与冷冻机油的溶解度过高则会使冷冻机油被制冷剂稀释,既降低冷冻机油的润滑作用,也影响制冷剂的蒸发吸热过程,直接造成制冷量下降^[8-9]。

表 1 R474A 与 R479A 的性质
Tab.1 Properties of R474A and R479A

制冷剂	GWP	安全等级	组分	沸点/℃
R474A	<1	A2L	R1132(E)/R1234yf	-43.4
R479A	<150	A2L	R32/R1132(E)/R1234yf	-50.4

制冷剂的油溶性实验研究主要包括 2 部分:一是通过可视化互溶性实验台测量制冷剂与冷冻机油的临界互溶温度,二是测量制冷剂与冷冻机油的溶解度^[10-11]。许晨怡^[12]测量了 R1234ze(Z)与高黏度 POE 润滑油在 313.15~343.15 K 不同组分混合物的溶解度,结果表明,R1234ze(Z)与高黏度 POE 润滑油在不同比例下都是互溶的。陈裕博等^[13]测量了 R1233zd(E)与矿物油、POE 油、PVE 油的临界互溶温度,并基于互溶性实验结果测量了 R1233zd(E)在 POE 油中的溶解度。M. A. Marcelino Neto 等^[14]研究了 R1234yf 在 POE ISO VG 10 中的溶解特性,发现 R1234yf 比 R134a 在该润滑油中的溶解度更高。Sun Yanjun 等^[15]进一步探索了 R1234yf 与 POE 油的前驱体同系物 PEC6、PEC7、PEC8 的相平衡,测量了对应的溶解度。综上所述,虽然现有研究已对多种新型环保制冷剂的油溶性特性进行了广泛探讨,但针对新型混合制冷剂 R474A 和 R479A 与冷冻机油的互溶性及溶解度特性的系统性研究仍未见报道。深入研究

R474A 和 R479A 与冷冻机油的互溶性对新型环保制冷剂的推广使用具有重要意义。

本研究基于行业标准 NB/SH/T 0699—2023^[16],搭建了制冷剂与冷冻机油互溶性实验台,在-20~20℃,测量了 R474A 和 R479A 在 RB68、RB100EV 这 2 种冷冻机油中的临界互溶温度。在-20~60℃,基于等体积饱和法测量了 R474A 和 R479A 在 RB68、RB100EV 中的溶解度,得到了新型制冷剂 R474A 和 R479A 在 2 种冷冻机油中的溶解特性。

1 实验系统和方法

1.1 实验材料

实验所用的混合制冷剂为 R474A 和 R479A,2 款混合制冷剂均由大金公司提供;实验采用的冷冻机油为 Ze-GLES RB68 和 Ze-GLES RB100EV,二者均为汽车空调中常见的 POE 冷冻机油,由引能仕公司生产。

1.2 实验装置与步骤

制冷剂和冷冻机油的互溶性实验装置如图 1 所示,主要由真空泵、数据收集系统、压力传感器、热电偶、玻璃反应釜和恒温槽组成。玻璃反应釜可以观察制冷剂和冷冻机油在不同压力、温度条件下的混合状态。制冷剂与冷冻机油溶解度测试系统的实验装置如图 2 所示。该系统的整体结构与互溶性实验装置基本相同,主要差异在于将恒温槽中的玻璃反应釜更换为采用 316L 不锈钢制造的高压反应釜,其设计承压能力可达 5 MPa。上述 2 个系统的其他设备参数如下:恒温槽的温度区间为-20~200℃,精度为 0.01℃;压力传感器最大量程为 5 MPa,精度为 5 kPa;热电阻为 Pt100,精度为 0.1 K。中间容器由 316L 不锈钢材料制成,用于使用差值法测量充注制冷剂的质量。高压不锈钢反应釜的体积需要标定,参考天津大学赵文仲等^[9]的实验,采用称重法对体积进行标定,称重所用的天平精确度为 0.01 g。经计算,高压反应釜的体积为 203 cm³。

1.3 实验方法与步骤

制冷剂和冷冻机油的互溶性实验方法参考行业标准 NB/SH/T 0699—2023^[16]中所述的实验方法进行设计。考虑到汽车的实际运行环境,本实验将工作温度区间设定为-20~20℃,设定不同含油率进行实验,含油率由式(1)计算。

$$\eta = \frac{m_{\text{油}}}{m_{\text{油}} + m_{\text{制冷剂}}} \quad (1)$$

式中: η 为含油率; $m_{\text{油}}$ 为冷冻机油的质量,g; $m_{\text{制冷剂}}$ 为

制冷剂的质量, g。

互溶性实验步骤如下:

1) 用针筒向玻璃反应釜内充注 5 g 冷冻机油, 根据含油率计算得到相应的制冷剂质量;

2) 向中间容器内充注制冷剂, 称量质量后将中间容器连接抽至真空的玻璃反应釜上, 打开阀门灌注制冷剂, 称量灌注后的中间容器质量, 得到实际的制冷剂充注质量;

3) 将玻璃反应釜放入恒温槽中, 升温使冷冻机油和制冷剂形成均一溶液, 随后降温冷却反应釜, 直至溶液分层或形成絮状物, 且轻微震荡不会消失, 记录此时的温度即为临界互溶温度;

4) 改变含油率, 重复上述步骤。

制冷剂和冷冻机油的溶解度实验采用等体积饱和法计算溶解度。在实验的压力和温度范围内, 由于冷冻机油的饱和蒸气压低, 所以忽略冷冻机油的气相部分。通过式(2)和式(3)可计算得到制冷剂在冷冻机油中的溶解度。

$$S = \frac{m'_{\text{制冷剂}}}{m'_{\text{制冷剂}} + m_{\text{油}}} \quad (2)$$

$$m'_{\text{制冷剂}} = \frac{\Delta m - (V_1 - V_2)\rho_v}{1 - \rho_v/\rho_l} \quad (3)$$

式中: S 为溶解度; $m'_{\text{制冷剂}}$ 为制冷剂溶解在冷冻机油中的质量, g; Δm 为反应釜中充注的制冷剂的总质量, g; V_1 为高压反应釜的体积, cm^3 ; V_2 为充注的冷冻机油的体积, cm^3 ; ρ_v 为待测制冷剂平衡状态下的气相密度, g/cm^3 ; ρ_l 为待测制冷剂在测试温度下的饱和液相密度, g/cm^3 。

溶解度实验步骤如下:

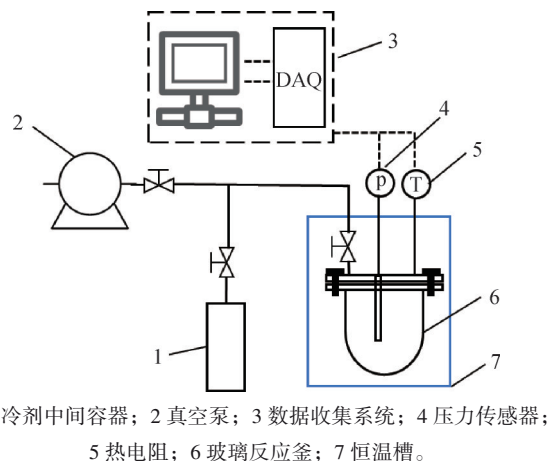
1) 用针筒向高压反应釜充注 20 mL 冷冻机油, 根据充注前后的质量差计算充注的实际质量;

2) 向中间容器充注制冷剂, 称量质量后将中间容器连接抽至真空的高压反应釜上, 打开阀门, 将制冷剂充注入高压反应釜中, 称量灌注后的中间容器质量, 前后质量差为充注的制冷剂质量;

3) 将恒温槽降温至 -20°C , 随后将高压反应釜放入恒温槽中, 待高压反应釜内部温度到达 -20°C 且内部压强 15 min 内不发生变化, 可以认为高压反应釜内部达到稳定, 记录此时高压反应釜内部的温度和压力;

4) 将恒温槽按照每 10°C 为梯度升高温度, 重复 3) 中步骤, 直至温度升至 60°C 并完成各组数据记录后停止实验;

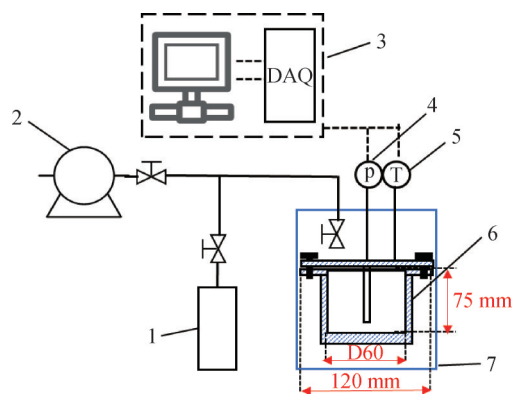
5) 开启并清洗高压反应釜, 更改充注入高压反应釜内的制冷剂质量, 重复步骤 1)~4)。



1 制冷剂中间容器; 2 真空泵; 3 数据收集系统; 4 压力传感器;
5 热电阻; 6 玻璃反应釜; 7 恒温槽。

图 1 互溶性实验系统

Fig.1 Miscibility experiment system



1 制冷剂中间容器; 2 真空泵; 3 数据收集系统; 4 压力传感器;
5 热电阻; 6 高压不锈钢反应釜; 7 恒温槽。

图 2 溶解度实验系统

Fig.2 Solubility experiment system

2 实验结果和分析

2.1 互溶性实验

通过互溶性实验台测试了新型环保制冷剂 R474A 和 R479A 与汽车空调常用冷冻机油 RB68 与 RB100EV 的互溶性情况, 测量了制冷剂和冷冻机油的临界互溶温度。实验温度为 $-20\sim 20^\circ\text{C}$, 含油率为 $10\%\sim 50\%$ 。

R474A 与冷冻机油 RB68 和 RB100EV 的互溶性测试结果如表 2 所示。由表 2 可知, 在不同含油率工况条件下, R474A 与 RB68 的临界互溶温度均低于 -20°C 。 -20°C 下不同含油率的 R474A/RB68 溶液的状态变化如图 3 所示, 低含油率(图 3(a))、中含油率(图 3(b))和高含油率(图 3(c))3 种典型含油率条件下, R474A 和冷冻机油 RB68 在 -20°C 下均保持为透明均一的溶液, 未出现絮状物或浑浊溶液, 所以 R474A 和冷冻机油 RB68 有着良好的互溶性。R474A 与冷冻机油 RB100EV 在含油率为 18.9%、25.2%、

30.1% 和 40.1% 的条件下,随着温度从 20 ℃逐渐降至-20 ℃,溶液由均一透明的状态逐渐转变为淡乳白色的溶液,但无明显的絮状物或沉淀。所以,在实验温度范围内,二者并没有明显的临界互溶温度,临界互溶温度小于-20 ℃,互溶性较好。

表 2 R474A 与 RB68 和 RB100EV 的互溶性测试结果
Tab.2 Miscibility results of R474A with RB68 and RB100EV

含油率/%	RB68 临界互溶温度/℃	含油率/%	RB100EV 临界互溶温度/℃
17.67	<-20	18.90	<-20
25.41	<-20	25.20	<-20
31.60	<-20	30.10	<-20
47.57	<-20	40.10	<-20

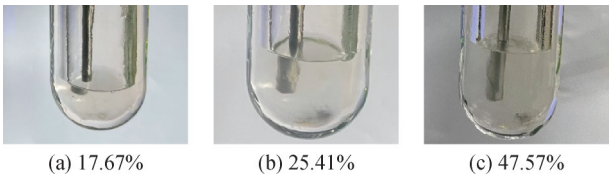


图 3 -20 ℃下不同含油率的 R474/RB68 溶液的状态变化
Fig.3 State changes of R474/RB68 solutions with different oil contents at -20 ℃

R479A 与冷冻机油 RB68 和 RB100EV 的互溶性实验结果如表 3 所示。在实验温度范围内,R479A 与 2 种冷冻机油均表现出优异的互溶性能。实验结果表明,在不同含油率和温度条件下,溶液始终保持均相透明状态。由此可知,R479A 与 2 种冷冻机油的临界互溶温度均低于-20 ℃。

表 3 R479A 与 RB68 和 RB100EV 的互溶性测试结果
Tab.3 Miscibility results of R474A with RB68 and RB100EV

含油率/%	RB68 临界互溶温度/℃	含油率/%	RB100EV 临界互溶温度/℃
10.31	<-20	10.54	<-20
18.81	<-20	17.51	<-20
26.74	<-20	29.09	<-20
32.74	<-20	36.52	<-20
48.64	<-20	49.31	<-20

2.2 溶解度实验

通过溶解度实验台测量新型环保制冷剂 R474A、R479A 与 2 种汽车用冷冻机油 RB68 和 RB100EV 在不同温度与压强下的溶解度,温度区间为-20~60 ℃,通过改变充注制冷剂的质量改变高压反应釜内的压强。

R474A 与 RB68 和 RB100EV 的溶解度实验测量

结果分别如表 4 和表 5 所示。图 4 所示为不同温度下 R474A 在 2 种冷冻机油中的溶解度。由图 4 可知,在-20~60 ℃测试温度内,温度保持不变时,R474A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度随压力的增大而增大;注入相同质量的制冷剂与冷冻机油时,R474A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度随温度的上升而下降。且低溶解度区域压力随溶解度变化的斜率基本大于高溶解度区域,说明随着压力的增大,溶解度受压力的影响会越来越来大。

表 4 R474A 在 RB68 中的溶解度测试结果
Tab.4 Solubility of R474A in RB68

温度/℃	溶解度	压强/MPa	温度/℃	溶解度	压强/MPa
-20	0.101	0.141	30	0.066	0.279
	0.239	0.172		0.147	0.561
	0.346	0.202		0.252	0.709
	0.516	0.227		0.464	0.959
-10	0.097	0.156	40	0.059	0.310
	0.227	0.225		0.139	0.609
	0.336	0.265		0.229	0.830
	0.514	0.316		0.431	1.215
0	0.092	0.178	50	0.042	0.373
	0.211	0.292		0.114	0.714
	0.322	0.346		0.206	0.951
	0.509	0.432		0.399	1.453
10	0.076	0.232	60	0.002	0.499
	0.194	0.368		0.079	0.845
	0.297	0.475		0.174	1.101
	0.504	0.578		0.360	1.712
20	0.072	0.253			
	0.172	0.458			
	0.274	0.596			
	0.485	0.763			

R479A 与 RB68 和 RB100EV 的溶解度实验测量结果如表 6 和表 7 所示。图 5 所示为不同温度下 R479A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度。如图 5 可知,在-20~60 ℃测试温度范围内,温度保持不变时,R479A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度随压力的升高而增大;注入相同质量的制冷剂与冷冻机油时,R479A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度随温度的上升而减小。R479A 和 RB68 互溶时,低溶解度区域压力随溶解度变化的斜率大于高溶解度区域,随着压力的增大,溶解度受到压力的影响会越来越来大。而

表 5 R474A 在 RB100EV 中的溶解度测试结果

Tab.5 Solubility of R474A in RB100EV					
温度/℃	溶解度	压强/MPa	温度/℃	溶解度	压强/MPa
-20	0.091	0.134	30	0.045	0.299
	0.181	0.153		0.099	0.472
	0.274	0.182		0.187	0.595
	0.361	0.199		0.257	0.700
	0.537	0.225		0.461	0.957
-10	0.084	0.159	40	0.038	0.332
	0.167	0.206		0.080	0.547
	0.259	0.251		0.145	0.760
	0.350	0.268		0.203	0.899
	0.529	0.313		0.430	1.175
0	0.073	0.195	50	0.029	0.368
	0.151	0.265		0.056	0.637
	0.239	0.344		0.121	0.867
	0.326	0.374		0.170	1.005
	0.519	0.424		0.390	1.409
10	0.064	0.228	60	0.021	0.404
	0.136	0.255		0.033	0.728
	0.220	0.431		0.086	1.007
	0.300	0.508		0.120	1.145
	0.506	0.567		0.371	1.619
20	0.054	0.264			
	0.120	0.389			
	0.201	0.520			
	0.279	0.606			
	0.485	0.759			

R479A 和 RB100EV 互溶时,当温度低于 50 ℃时,随着压力的增大,溶解度受到压力的影响也会越来越大。

表 6 R479A 在 RB68 中的溶解度测试结果

Tab.6 Solubility of R479A in RB68					
温度/℃	溶解度	压强/MPa	温度/℃	溶解度	压强/MPa
-20	0.079	0.148	30	0.042	0.257
	0.196	0.259		0.100	0.715
	0.294	0.338		0.179	1.065
	0.475	0.371		0.345	1.437
-10	0.070	0.151	40	0.040	0.310
	0.180	0.332		0.084	0.801
	0.287	0.441		0.149	1.223
	0.463	0.507		0.300	1.719
0	0.058	0.185	50	0.034	0.352
	0.160	0.425		0.070	0.885
	0.270	0.581		0.123	1.371
	0.444	0.690		0.253	1.997
10	0.053	0.205	60	0.032	0.367
	0.139	0.525		0.061	0.951
	0.241	0.739		0.109	1.481
	0.420	0.907		0.221	2.221
20	0.046	0.216			
	0.117	0.629			
	0.210	0.902			
	0.388	1.158			

表 7 R479A 在 RB100EV 中的溶解度测试结果

Tab.7 Solubility of R479A in RB100EV					
温度/℃	溶解度	压强/MPa	温度/℃	溶解度	压强/MPa
-20	0.047	0.119	30	0.030	0.205
	0.194	0.232		0.115	0.62
	0.358	0.330		0.235	1.097
	0.476	0.371		0.348	1.411
-10	0.038	0.150	40	0.023	0.238
	0.179	0.303		0.100	0.701
	0.341	0.450		0.206	1.262
	0.463	0.510		0.306	1.681
0	0.034	0.170	50	0.019	0.258
	0.168	0.360		0.088	0.770
	0.318	0.593		0.182	1.415
	0.444	0.690		0.262	1.946
10	0.032	0.182	60	0.017	0.273
	0.144	0.467		0.079	0.835
	0.293	0.751		0.167	1.540
	0.420	0.898		0.214	2.216
20	0.031	0.194			
	0.128	0.548			
	0.271	0.895			
	0.387	1.149			

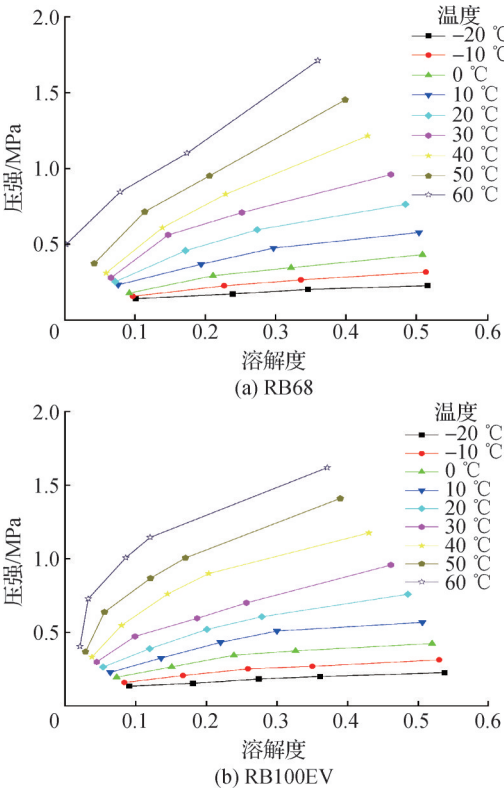


图 4 不同温度下 R474A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度
Fig.4 Solubility of R474A in RB68 and RB100EV at different temperatures

3 结论

本文基于互溶性实验台和溶解度实验台,在

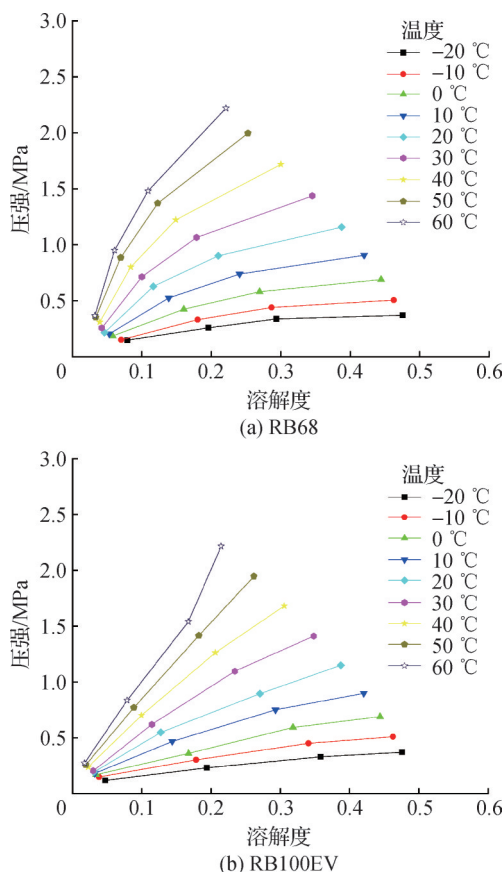


图 5 不同温度下 R479A 在 RB68 和 RB100EV 中的溶解度
Fig.5 Solubility of R479A in RB68 and RB100EV at different temperatures

-20~20 °C 测试了 R474A 和 R479A 在 RB68 和 RB100EV 这 2 种冷冻机油中的临界互溶温度;在 -20~60 °C,采用等体积饱和法测试计算了 R474A 和 R479A 在 2 种冷冻机油中的溶解度,得到如下结论:

1) 在 -20~20 °C, R474A 与 RB68 和 RB100EV 这 2 种冷冻机油在实验温度范围内均能互溶,临界互溶温度小于 -20 °C。

2) 在 -20~20 °C, R479A 与 RB68 和 RB100EV 这 2 种冷冻机油均有很好的互溶性,在测试的含油率范围内,溶液始终保持均一透明状态,临界互溶温度小于 -20 °C。

3) 在 -20~60 °C, R474A 与 R479A 在 RB68 和 RB100EV 这 2 种冷冻机油的溶解度均随着压力的升高而增大,随温度的升高而减小。且在 -20~50 °C,随着压力的升高,溶解度受到压力的增强效应增大。

4) 通过 R474A 和 R479A 与冷冻机油 RB68 和 RB100EV 的溶解特性实验,揭示了 2 种低 GWP 制冷剂在不同温度条件下的溶解特性。结果表明,在模拟 -20 °C 极端低温工况下,验证了 R474A 和 R479A 作为严寒地区车用空调替代工质的适用性。同时基于实验计算得到 2 种制冷剂在冷冻机油中的溶解度数

据。为低 GWP 制冷剂在汽车空调系统中的工程应用提供了重要的热力学基础数据,对于推广新型环保制冷剂的使用具有重要意义。

本文受山西省重点研发计划项目(202302090301005)资助。(The project was supported by Key Research and Development Program of Shanxi Province (No. 202302090301005).)

参考文献

- [1] YUAN Zhiyi, OU Xunmin, PENG Tianduo, et al. Development and application of a life cycle greenhouse gas emission analysis model for mobile air conditioning systems [J]. Applied Energy, 2018, 221: 161-179.
- [2] MCLINDEN M O, SEETON C J, PEARSON A. New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration[J]. Science, 2020, 370(6518): 791-796.
- [3] 史琳, 安青松. 基加利修正案生效后替代制冷剂的选择与对策思考[J]. 制冷与空调(北京), 2019, 19(9): 50-58.(SHI Lin, AN Qingsong. Low GWP refrigerants options and countermeasures discussion after the entry into force of Kigali Amendment [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(9): 50-58.)
- [4] 宋明浩, 张铁臣, 汪琳琳. 制冷剂 R1234yf 物性及应用发展研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(12): 178-181.(SONG Minghao, ZHANG Tiechen, WANG Linlin. Research on the physical properties and application development of refrigerant R1234yf [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(12): 178-181.)
- [5] POLLAK G. Summary of SAE CRP1234 refrigerant evaluation and risk assessment [EB/OL]. (2010-07-15) [2018-09-25]. <http://www.Sae.org/events/aars/presentations/2010/T8>.
- [6] 王泽斌, 薛雯, 李梦佳, 等. R290、R454C 替代 R404A 在商用冰箱中的应用性能对比研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(4): 36-42.(WANG Zebin, XUE Wen, LI Mengjia, et al. Comparative study on the performance of R404A commercial refrigerator retrofitted with R290 and R454C [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(4): 36-42.)
- [7] 周晓芳, 肖学智, 徐浩洋, 等. 汽车空调中低 GWP 替代制冷剂的研究现状[J]. 制冷技术, 2014, 34(5): 39-44.(ZHOU Xiaofang, XIAO Xuezh, XU Haoyang, et al. Research status of low GWP alternatives in mobile air conditioning system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(5): 39-44.)
- [8] 毕胜山, 韦俊, 刘志刚, 等. DME、DME/R125 与润滑油互溶性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11): 1836-1838.(BI Shengshan, WEI Jun, LIU Zhigang, et al. The miscibility of DME and DME/R125 and lubricant oil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33

- (11): 1836–1838.)
- [9] 赵文仲, 杨昭, 翟瑞, 等. R1234ze(E)在多元醇脂油中溶解度的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(5): 35–41. (ZHAO Wenzhong, YANG Zhao, ZHAI Rui, et al. Experimental study on the solubility of R1234ze(E) in polyol ester oils [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(5): 35–41.)
- [10] 王晓坡, 孙艳军, 龚娜, 等. DME与POE基础油溶解度的实验与理论研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 937–940. (WANG Xiaopo, SUN Yanjun, GONG Na, et al. Measurement and theoretical research of solubility of DME in POE oil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 937–940.)
- [11] 田田, 杨昭, 吴曦, 等. RE170、RE170/R227ea与矿物油的互溶性评价[J]. 化工学报, 2015, 66(6): 2005–2010. (TIAN Tian, YANG Zhao, WU Xi, et al. Miscibility evaluation of RE170 and RE170/R227ea with a mineral oil [J]. CIESC Journal, 2015, 66(6): 2005–2010.)
- [12] 许晨怡. HFO类制冷剂与润滑油相溶性及黏度的理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (XU Chenyi. Theoretical and experimental study on compatibility and viscosity of HFO refrigerant with lubricating oil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.)
- [13] 陈裕博, 杨昭, 武晓昆, 等. R1233zd(E)与冷冻机油的溶解特性研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(3): 57–61. (CHEN Yubo, YANG Zhao, WU Xiaokun, et al. Research on the dissolution characteristics of R1233zd(E) using lubricating oils [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(3): 57–61.)
- [14] MARCELINO NETO M A, FRANÇA R M, BARBOSA J R. Convection-driven absorption of R-1234yf in lubricating oil [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 151–160.
- [15] SUN Yanjun, WANG Xiaopo, WANG Dongbo, et al. Measurement and correlation for phase equilibrium of HFO1234yf with three pentaerythritol esters from 293.15 K to 348.15 K [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2017, 112: 122–128.
- [16] 冷冻机油与制冷剂相溶性试验法: NB/SH/T 0699—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. (Test method for miscibility of refrigerator oils with refrigerants: NB/SH/T 0699—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.)

通信作者简介

戴晓业, 男, 助理研究员, 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 010-62794535, E-mail: daixy@mail.tsinghua.edu.cn. 研究方向: 制冷剂替代与物性测量。

About the corresponding author

Dai Xiaoye, male, assistant researcher, Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, 86-10-62794535, E-mail: daixy@mail.tsinghua.edu.cn, Research fields: refrigerant substitution and thermophysical property measurement.