

文章编号:0253-4339(2020)05-0035-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.035

R1234ze(E) 在多元醇脂油中溶解度的实验研究

赵文仲 杨昭 翟瑞 冯彪 吕子建 陈裕博 葛滢滢 陈思亦

(天津大学 中低热能高效利用教育部重点实验室 天津 300072)

摘 要 R1234ze(E)(1,1,1,3-四氟丙烯)是当下具有较强替代潜能的环保制冷剂之一。本文搭建了溶解度测试实验系统,对 R1234ze(E)在两种多元醇脂油中的溶解度进行测试,测试的温度范围为 40~80 ℃,压力范围为 0.123~0.360 MPa。采用 PR 状态方程和 MHV2 混合规则及 NRTL 活度系数模型对实验结果进行关联计算,得到不同温度下的交互系数及计算值与实验值的平均相对误差。结果表明:R1234ze(E)在两种多元醇脂油中的溶解度均随着温度的升高而降低,且 R1234ze(E)在两种多元醇脂油中的平衡压力与溶解度之间存在立方函数关系。在两种多元醇酯油中,计算值与实验值的平均相对误差分别为 1.68%和 1.11%,可较好的描述 R1234ze(E)在两种多元醇酯油中的相平衡行为。

关键词 R1234ze(E);溶解度;非共沸混合物;全球变暖潜值;臭氧损耗潜值

中图分类号: TB61⁺2;TB64 **文献标识码:** A

Experimental Study on the Solubility of R1234ze(E) in Polyol Ester Oils

Zhao Wenzhong Yang Zhao Zhai Rui Feng Biao Lü Zijian Chen Yubo
Ge Yingying Chen Siyi

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin, 300072, China)

Abstract R1234ze(E)(1,1,1,3-tetrafluoropropene) is extremely environmental-friendly and is currently considered as one of the alternative refrigerants. In this paper, the solubility of R1234ze(E) in two polyol ester oils was measured at temperatures ranging from 40 ℃ to 80 ℃ and pressures ranging from 0.123 MPa to 0.360 MPa. Additionally, the experimental data was correlated using the PR equation of state with MHV2 mixing rules and the NRTL activity coefficient model to calculate the interaction coefficient at different temperatures. Furthermore, the average absolute relative deviation between calculated value and experimental data was calculated. The results indicated that the solubility of R1234ze(E) in two polyol ester oils decreased as temperature increased. Additionally, a numerical calculation model for the equilibrium pressure and solubility was proposed using a cubic function with acceptable accuracy. In the two polyol ester oils, the deviations between calculated value and experimental data were 1.68% and 1.11% respectively. Thus, the results can better describe the phase equilibrium behavior of R1234ze(E) in the two polyol ester oils.

Keywords R1234ze(E); solubility; zeotropic mixture; GWP; ODP

近年来,极端天气频发,传统制冷剂大量使用引起的温室效应是全球变暖的主要因素之一。国际社会陆续签署《巴黎协定》和《蒙特利尔议定书》及其修正案以限制具有高温室效应(GWP)和臭氧破坏潜能(ODP)制冷剂的使用,因此,制冷剂替代技术的研究意义重大。李连生^[1]提出,制冷剂替代技术的发展过程中,更高能效和更加环境友好的要求缺一不可。马一太等^[2]提出人类最终使用的制冷剂应该是零 ODP、零(低)GWP 的人工合成制冷

剂和自然工质。综合考虑,HFO 类制冷剂被视为最有潜力的替代制冷剂之一,对环境十分友好,且在一些领域,HFO 类制冷剂是实现 80%削减任务的首选推荐^[3],而在新型制冷剂的开发过程中,制冷剂与冷冻机油间的溶解特性是关键问题。冷冻机油会从压缩机中随制冷剂一起排出,并与制冷剂一起在制冷系统中循环,如果制冷剂和冷冻机油不能混溶,冷冻机油会积聚在热交换器的热交换管表面,造成系统传热效率大幅下降。因此,研究制冷剂与

基金项目:国家自然科学基金(51936007)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51936007).)

收稿日期:2020-04-08;修回日期:2020-05-27

冷冻机油之间的溶解特性,对于选择适合的冷冻机油非常重要。目前使用的冷冻机油种类很多,应用最广泛的是多元醇酯(POE)油和聚乙烯基醚(PVE)油。关于制冷剂与冷冻机油溶解特性的研究已取得一定成果。王晓坡等^[4]搭建了一套基于等体积饱和法的制冷剂与冷冻机油溶解度测试实验系统,并测量了 10℃ 工况下二甲醚在 PEC7 和 PEC9 油中的溶解度。杨斌等^[5]利用分子聚集理论对状态方程进行了修正,并采用相应的混合规则,建立了 CO₂ 在烷基萘冷冻机油中溶解度计算的理论模型。田田等^[6]通过实验对 RE170 和矿物油的互溶性进行了研究,当含油率为 10%~60%,温度在 -50℃ 时,含有 RE170 的矿物油溶液没有出现分层或絮状物现象,二者互溶性非常好。杨瑞杰等^[7]测试了制冷剂 R290 与 5 种常用冷冻机油的相溶性,结果表明,R290 在 5 种冷冻机油中的溶解质量排序为:烷基苯油>环烷基矿物油>烷基矿物油>多元醇酯油>聚乙二醇油。

S. Bobbo 等^[8]在 10℃ 下测量 CO₂ 在 3 种不同冷冻机油(PEBM5、PEBM6、PEBM7)中的溶解度。当 CO₂ 摩尔分数低于 0.9 时,溶解度随摩尔质量的增加而增大;而当 CO₂ 摩尔分数大于 0.9 时,溶解度随摩尔质量的增加而减小。此外,S. Bobbo 等^[9]还测量了 CO₂ 在季戊四醇四-2-甲基己酸酯中的溶解度,测试条件为 -30~70℃,并将得到的实验数据采用 PR 状态方程结合 HV 混合规则进行回归。B. M. Lee 等^[10]在 -35~80℃ 之间测量了 R1234ze(E) 与 POE68 和 PVE68 油的混溶性,实验结果表明,POE68 的混溶效果优于 PVE68。W. A. Fouad 等^[11]使用统计缔合流体理论(PC-SAFT)的扰动链形式研究了低 GWP 制冷剂在线性链式 PEC 中的溶解度。结果表明,HFO 类制冷剂的溶解度对 PEC 分子结构的依赖性较小。O. Fandiño 等^[12]对 CO₂ 在 PEC7 和 PEC9 中的溶解度进行了实验测试,实验条件为 10~75℃。实验表明,在分析范围内,CO₂ 在两种油中的溶解度很高,且溶解度数据非常相似。

R1234ze(E) 的 ODP 为 0,GWP 小于 1,大气寿命较短,具有十分优越的环保性能及轻微的可燃性,且在冷凝压力和排气温度方面有很大优势^[13]。前人虽对较多制冷剂与部分冷冻机油的溶解度进行了测量,但对于 R1234ze(E) 与不同 POE 油的溶解度测试较少。本文搭建了实验系统测试 R1234ze(E) 在 POE32 和 POE68 中的溶解度,并将实验数据代入 PR 状态方程中,结合 MHV2 混合规则及 NRTL 活度系数模型进行计算,得到不同温度下的交互系数以及计算

值与实验值的偏差,为 R1234ze(E) 与 POE 油的气液相平衡研究提供基础。

1 实验装置及方法

1.1 物料

R1234ze(E) (CHF = CHCF₃, CAS No.29118-24-9) 由霍尼韦尔公司提供,纯度为 99.9%,不需要进一步纯化可直接使用。实验中使用的两种冷冻机油的性质如表 1 所示。

表 1 两种冷冻机油的性质^[14-15]
Tab.1 The properties of the two lubricant oils

项目	RL32H	RL68H
黏度/(mm ² /s) @ 40℃	31.6	65.5
黏度/(mm ² /s) @ 100℃	5.8	9.3
倾点/℃	-55	-39
闪点/℃	258	270
密度/(g/cm ³) @ 20℃	0.20	0.98
酸值/(mg KOH/g)	0.02	0.02

1.2 仪器和装置

实验装置如图 1 所示,主要由带有可视玻璃窗的耐高压反应釜、恒温槽及温度压力测量系统、制冷剂充注系统构成。高压反应釜采用 316L 不锈钢材料,耐高压可达 10 MPa,底边有刻度线,两侧加工有玻璃视窗,以便于观察实验过程中反应釜内发生的变化,此外,反应釜通过定制的管路与压力测量系统相连,以保证测量的精度,压力变送器型号为罗斯蒙特 3051S,测量压力时,通过 HART 转换器将压力数据上传到计算机。高温恒温槽温度范围为 30~250℃,内部导热介质采用道康宁导热硅油,配有内循环系统以保证恒温槽内部温度均匀。

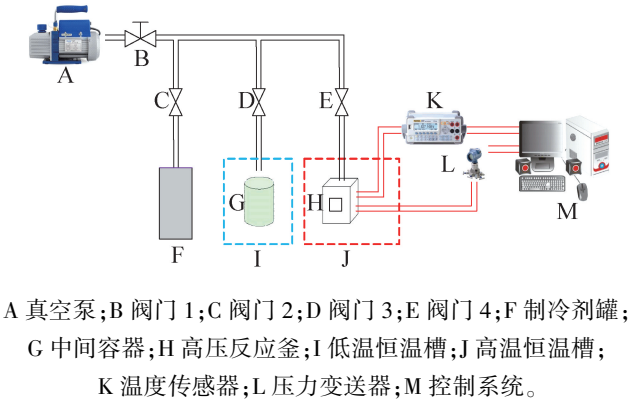


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental device

1.3 实验步骤

实验前,对反应釜体积进行标定,以便对实验数据进行计算整理。本文采用称重法对高压反应釜的体积进行标定,称重用的天平精确度为 0.01 g。经计算,高压反应釜容积为 175 cm³。本实验中,温度的不确定度主要来源于温度传感器和恒温槽,压力不确定度主要来源于压力变送器。温度和压力测量值的不确定度可以通过式(1)计算。

$$U = k u_c = k \sqrt{\sum u_i^2} \tag{1}$$

式中: u_i 为各影响因素的相对标准不确定度; u_c 为合成标准不确定度; k 为置信因子,本文取置信概率 95%,此时 $k = 2$ 。实验过程中,Pt100 的不确定度小于±0.1 ℃,恒温槽的波动度小于 0.01 ℃/30 min,压力变送器的量程为 0~10 MPa,精确度为 0.04%,测量不确定度小于 4 kPa,即温度和压力的不确定度分别为±0.2 ℃和±8 kPa。

实验过程中,通过注射器向反应釜内加入定量的冷冻机油(冰熊 RL32/68H),并利用真空泵抽真空。利用制冷剂充注系统将 R1234ze(E) 充注到已知容积的中间容器中,中间容器需进行提前预冷,以保证充注过程的顺利进行。充注完成后,记下此时中间容器及内部制冷剂的总质量,然后将中间容器与高压反应釜相连接,高压反应釜预先已完成抽真空,利用压差将制冷剂充入高压反应釜中,再次称量中间容器及其中剩余制冷剂的总质量。开启恒温槽,将高压反应釜浸入其中,待高压反应釜中的温度压力稳定后,记录此时数据。实验步骤流程图如图 2 所示。

1.4 溶解度计算方法

采用等体积饱和法测量制冷剂与冷冻机油的溶解度。基本原理如下:当气体与液体混合时,气体会有一部分溶解到液体中,直至达到气液两相平衡状态。同理应用于测量制冷剂与冷冻机油的溶解度中。通过 $S = m_1 / (m_1 + m_2)$ 来计算冷冻机油中溶解气体的质量分数,即制冷剂在冷冻机油中的溶解度,其中, m_1 为冷冻机油中溶解制冷剂的质量,g; m_2 为冷冻机油的质量,g。 m_1 的计算过程如下:

$$m_1 = \frac{m_3 v_e - M V_r + M V_2}{v_e - v_1} \tag{2}$$

式中: m_3 为反应容器中制冷剂的总质量,g; v_e 为平衡气体的摩尔体积,m³/mol; M 为制冷剂的相对分子质量,g/mol; V_r 和 V_2 为反应容器和冷冻机油的体积,m³; v_1 为摩尔体积溶解的制冷剂气体的体积,m³/mol,等于相同温度下的饱和液体摩尔体积。测得溶解度数据的总不确定度小于 3.0%。

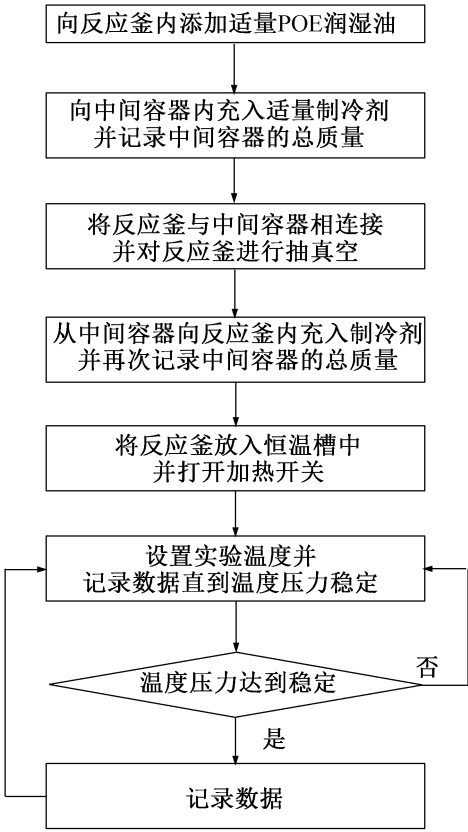


图 2 实验流程图
Fig.2 Flow diagram of the experiments

2 结果与讨论

2.1 实验数据

按照上述实验方法,得到 R1234ze(E) 在 40~80 ℃ 温度区间内在 POE32 和 POE68 冷冻机油中的溶解度数据,分别如表 2 和表 3 所示。

实验结果表明,随着温度的逐渐升高,R1234ze(E) 在 POE32 和 POE68 冷冻机油中的平衡压力逐渐升高,溶解度逐渐降低。主要是由于随着温度逐渐升高,溶解在冷冻机油中的制冷剂分子的运动速率加快,使其较易逸出。

表 2 和表 3 仅能够表现出若干个离散的实验数据,不能直观地表现出过程变化的特性,因此,对表中数据进行最小二乘拟合,以直观地观察过程变化特性。

图 3 所示为不同温度下 R1234ze(E) 在 POE32 油中的溶解度。

由图 3 可知,溶解度较低时,系统压力随着 R1234ze(E) 在 POE32 中溶解度的升高而增大,且增大速率较快,随着溶解度的持续升高,系统压力增大的速率逐渐放缓,甚至有下降的趋势。

图 4 所示为不同温度下 R1234ze(E) 在 POE68 油中的溶解度。

表 2 R1234ze(E) 在 POE32 中的溶解度
Tab.2 The solubility of R1234ze(E) in POE32

<i>S</i>	<i>p</i> /MPa	<i>S</i>	<i>p</i> /MPa	<i>S</i>	<i>p</i> /MPa
<i>t</i> =40℃		<i>t</i> =45℃		<i>t</i> =50℃	
0.054 2	0.123	0.050 7	0.131	0.047 3	0.138
0.065 4	0.147	0.060 8	0.157	0.057 0	0.165
0.081 0	0.176	0.075 8	0.187	0.071 0	0.198
0.097 4	0.207	0.091 4	0.220	0.085 2	0.234
0.141 7	0.242	0.134 8	0.258	0.127 7	0.275
<i>t</i> =55℃		<i>t</i> =60℃		<i>t</i> =65℃	
0.044 1	0.145	0.041 0	0.152	0.0387	0.159
0.053 5	0.174	0.049 6	0.182	0.0464	0.191
0.066 0	0.209	0.061 7	0.219	0.0576	0.229
0.079 5	0.247	0.074 6	0.259	0.0697	0.271
0.121 0	0.291	0.115 8	0.305	0.1106	0.320
<i>t</i> =70℃		<i>t</i> =75℃		<i>t</i> =80℃	
0.035 9	0.165	0.033 8	0.171	0.0316	0.177
0.043 7	0.198	0.040 8	0.206	0.0378	0.214
0.053 8	0.239	0.050 5	0.248	0.0471	0.257
0.064 9	0.283	0.060 8	0.294	0.0574	0.305
0.106 4	0.332	0.101 8	0.346	0.0969	0.360

表 3 R1234ze(E) 在 POE68 中的溶解度
Tab.3 The solubility of R1234ze(E) in POE68

<i>S</i>	<i>p</i> /MPa	<i>S</i>	<i>p</i> /MPa	<i>S</i>	<i>p</i> /MPa
<i>t</i> =40℃		<i>t</i> =45℃		<i>t</i> =50℃	
0.055 8	0.125	0.051 9	0.133	0.048 8	0.140
0.067 5	0.151	0.063 5	0.159	0.059 3	0.169
0.081 7	0.165	0.077 3	0.175	0.073 3	0.185
0.101 1	0.206	0.094 5	0.220	0.088 7	0.233
0.143 9	0.239	0.137 1	0.255	0.130 4	0.272
<i>t</i> =55℃		<i>t</i> =60℃		<i>t</i> =65℃	
0.045 4	0.147	0.042 5	0.154	0.039 8	0.161
0.055 8	0.177	0.052 2	0.185	0.048 7	0.194
0.069 1	0.194	0.065 3	0.204	0.061 5	0.213
0.082 8	0.247	0.077 6	0.259	0.072 9	0.271
0.124 4	0.287	0.118 1	0.303	0.112 7	0.317
<i>t</i> =70℃		<i>t</i> =75℃		<i>t</i> =80℃	
0.037 6	0.167	0.035 3	0.173	0.033 0	0.180
0.045 8	0.202	0.042 7	0.210	0.039 6	0.218
0.057 7	0.223	0.053 7	0.233	0.050 0	0.242
0.068 0	0.284	0.063 3	0.296	0.059 2	0.308
0.107 9	0.331	0.103 6	0.344	0.098 7	0.358

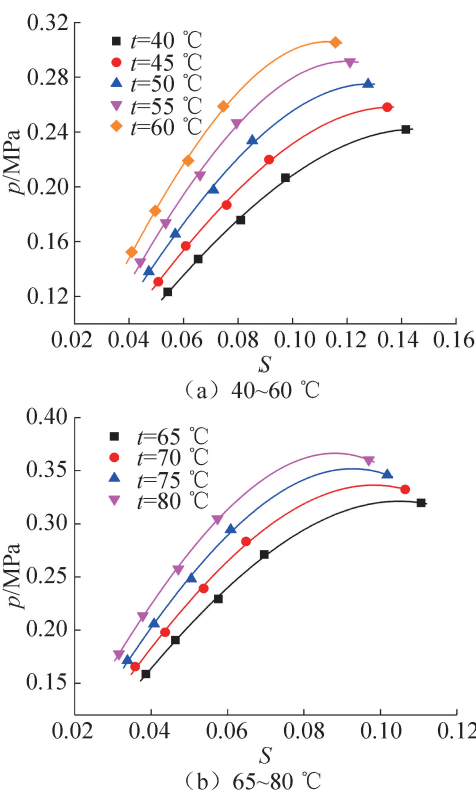


图 3 不同温度下 R1234ze(E) 在 POE32 中的溶解度
Fig.3 The solubility of R1234ze(E) in POE32 at different temperature

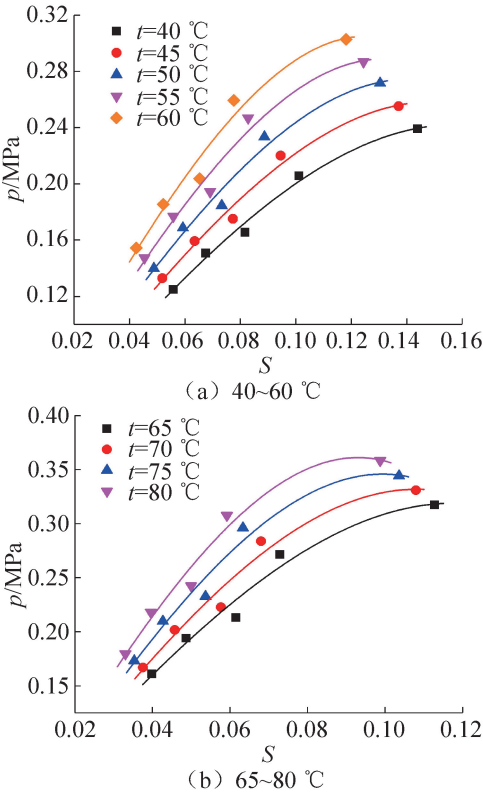


图 4 不同温度下 R1234ze(E) 在 POE68 中的溶解度
Fig.4 The solubility of R1234ze(E) in POE 68 at different temperature

同样,溶解度较低时,系统压力随着 R1234ze(E) 在 POE68 油中溶解度的升高而增大,且增大速率较快,随着溶解度的持续升高,系统压力增大的速率逐渐放缓,也出现了下降的趋势。这是因为,相同温度下,制冷剂充注量的增加伴随压力增大的同时导致溶解度的不断增加,即单位溶剂溶解制冷剂气体不断增加,压力减小。且温度升高会促进上述过程,因此高温区的下降趋势较为显著。此外,经过进一步计算发现系统压力与 R1234ze(E) 在 POE32、POE68 中的溶解度之间存在立方关系,即压力-溶解度曲线为三次函数曲线,且拟合度很高。同时,表达式中二次项的系数均为 0。

2.2 数据关联

对实验数据运用 PR 状态方程结合 MHV2 混合规则及 NRTL 活度系数模型进行关联计算。

MHV2 混合规则^[16]的表达式:

$$q_1(\alpha_m - \sum x_i \alpha_{ii}) + q_2(\alpha_m^2 - \sum x_i \alpha_{ii}^2) = \frac{G^E}{RT} + \sum x_i \ln(\frac{b_m}{b_{ii}})$$

(3)

式中: $b_m = \sum x_i b_{ii}$, $\alpha_{ii} = a_{ii}/(b_{ii}RT)$, $\alpha_m = a_m/(b_mRT)$, a 、 b 为 PR 状态方程参数; q_1 、 q_2 为常数; α 为温度函数; x 为组分的摩尔分数; R 为摩尔气体常数, J/(mol·K); T 为热力学温度, K。

NRTL 模型^[17]的表达式:

$$\frac{G^E}{RT} = x_1 x_2 (\frac{G_{21} \tau_{21}}{x_1 + G_{21} x_2} + \frac{G_{12} \tau_{12}}{x_2 + G_{12} x_1})$$

(4)

式中: G^E 为超额 Gibbs 自由能, J/mol; G 为模型参数, 下标表示组分。

交互系数 τ_{12} 和 τ_{21} ^[17] 表达式:

$$\tau_{21} = \frac{g_{21} - g_{11}}{RT}$$

(5)

$$\tau_{12} = \frac{g_{12} - g_{22}}{RT}$$

(6)

式中: g 为分子间相互作用能, J/mol; τ 为 NRTL 模型参数。交互系数的数值通过模型计算值和实验值平均相对误差 (average absolute relative deviation, AARD) 的最小值来求出最优值, 即得到每个温度下系数 τ_{12} 和 τ_{21} 的值, 关联结果如表 4 和表 5 所示。

$$AARD = \frac{\sum_N \left| \frac{p_{i,cal} - p_{i,exp}}{p_{i,exp}} \right|}{N} \times 100$$

(7)

式中: N 为测量的实验数据个数; $p_{i,cal}$ 和 $p_{i,exp}$ 分

别为模型计算值和实验值。

表 4 R1234ze(E) 在 POE32 中溶解度数据的关联结果
Tab.4 The correlation results of solubility of R1234ze(E) in POE32 oil

$t/^\circ\text{C}$	τ_{12}	τ_{21}	AARD/%
40	3.267	-4.532	3.36
45	2.650	-4.623	2.61
50	4.786	-5.650	1.02
55	3.663	-4.952	0.18
60	4.684	-5.136	1.34
65	3.140	-4.947	1.44
70	3.179	-4.967	1.56
75	3.339	-4.995	1.71
80	3.595	-5.026	1.91

表 5 R1234ze(E) 在 POE68 中溶解度数据的关联结果
Tab.5 The correlation results of solubility of R1234ze(E) in POE68 oil

$t/^\circ\text{C}$	τ_{12}	τ_{21}	AARD/%
40	-2.152	1.669	0.62
45	-2.129	1.661	0.75
50	-2.120	1.669	0.87
55	-2.101	1.676	0.98
60	-2.078	1.663	1.08
65	-2.063	1.666	1.19
70	-2.045	1.663	1.28
75	-2.020	1.664	1.50
80	-1.976	1.624	1.69

由表中数据计算可知,该模型的计算值与实验值之间的平均相对偏差分别为 1.68% 和 1.11%, 均低于 2%。

图 5 所示为 R1234ze(E) 在 POE 32 和 POE 68 中溶解度数据的计算值与实验值的偏差。

由图 5 可知,该模型的计算值与实验值之间的相对误差较小,说明该模型能够较好的计算 R1234ze(E) 与 POE32 和 POE68 的相平衡性质。

3 结论

本文搭建了溶解度测试实验装置,采用等体积饱和法测试了在 40~80 °C 温度范围和 0.123~0.360

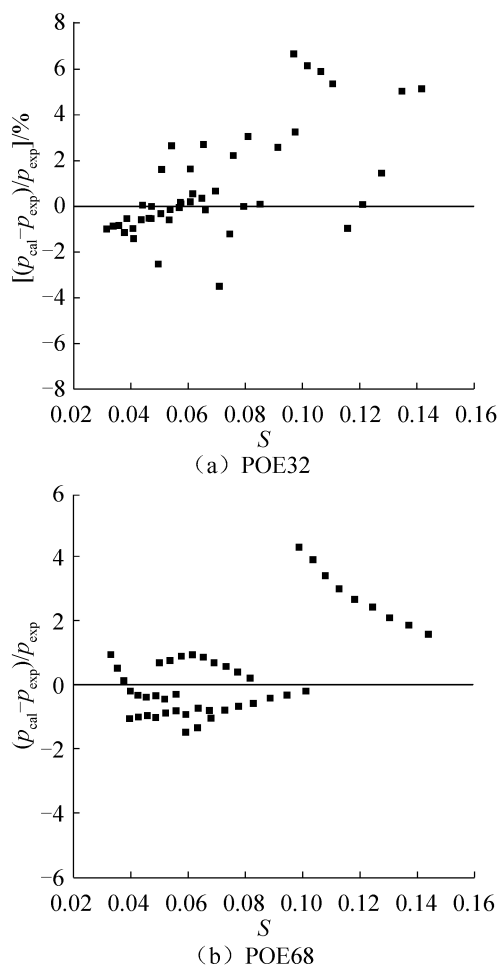


图 5 R1234ze(E) 在 POE32/POE68 中的计算值与实验值偏差

Fig.5 The deviation between calculated values and experimental data of R1234ze(E) in POE32/POE68

MPa 压力范围内,R1234ze(E)在 POE32 和 POE68 冷冻机油中的溶解度,得到如下结论:

1)随着温度的逐渐升高,R1234ze(E)在 POE32 和 POE68 冷冻机油中的平衡压力逐渐升高,溶解度逐渐降低。溶解度较低时,系统压力随着制冷剂在两种油中溶解度的升高而增大,且增大速率较快;随着溶解度的持续升高,系统压力增大的速率逐渐放缓,甚至出现下降趋势。

2)采用 PR 状态方程结合 MHV2 混合规则及 NRTL 活度系数模型对所得到的实验数据进行关联计算,得到交互系数以及计算值与实验值的偏差,偏差均在 2% 以内,说明该模型对 R1234ze(E) 与所测 POE 冷冻机油的相平衡计算较为准确。

参考文献

[1] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2011, 32(6):53-58. (LI Liansheng. Research

progress on alternative refrigerants and their development trend[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(6):53-58.)

[2] 马一太, 王伟. 制冷剂的替代与延续技术[J]. 制冷学报, 2010, 31(5):11-17,23. (MA Yitai, WANG Wei. Substitution and postponable technology of refrigerants[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5):11-17,23.)

[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] 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(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(5):937-940.)

[5] 杨斌, 李力, 彭学院, 等. 二氧化碳制冷剂在烷基萘润滑油中的溶解度研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12):103-108. (YANG Bin, LI Li, PENG Xueyuan, et al. Solubility of carbon dioxide refrigerant in alkyl naphthalene lubricating oil[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12):103-108.)

[6] 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]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(6):2005-2010.)

[7] 杨瑞杰, 杨忠学, 孙蓉, 等. 自然制冷剂 R290 与冷冻机油的相溶性研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(5):23-27. (YANG Ruijie, YANG Zhongxue, SUN Rong, et al. Investigation on the miscibility of lubricants with natural refrigerant R290[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5):23-27.)

[8] BOBBO S, FEDELE L, SCATTOLINI M, et al. Solubility of carbon dioxide in 2-methylbutyric, 2-methylvaleric and 2-methylhexanoic ester oils[J]. Fluid Phase Equilibria, 2007, 256(1/2):81-85.

[9] BOBBO S, FEDELE L, PERNECHELE F, et al. Solubility measurements and correlation of carbon dioxide in pentaerythritol tetra-2-methylhexanoate. Comparison with other pentaerythritol esters[J]. Fluid Phase Equilibria, 2010, 290(1/2):115-120.

[10] LEE B M, KWON J W, KIM M H. Miscibility of POE and PVE oils with low-GWP refrigerant R-1234ze(E)[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2016, 22(8):1263-1269.

[11] FOUAD W A, VEGA L F. Molecular modeling of the solubility of low global warming potential refrigerants in polyol ester lubricants[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 103:145–154.

[12] FANDIÑO O, LÓPEZ E R, LUGO L, et al. Solubility of carbon dioxide in pentaerythritol ester oils. New data and modeling using the PC-SAFT model[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2010, 55(1):62–70.

[13] 张雷, 王芳, 王珂, 等. 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. (ZHANG Lei, WANG Fang, WANG Ke, et al. Research on HFO-1234ze replacing R417A and R22 used in HPWH[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(3):102–108.)

[14] Guangzhou CRR Trade Co., Ltd. Emkarate RL32H [EB/OL]. (2019-07-28) [2019-10-22]. <http://www.crrchina.com/product/rl32h.html>.

[15] Guangzhou CRR Trade Co., Ltd. Emkarate RL68H [EB/OL]. (2019-02-28) [2019-10-22]. <http://www.crrchina.com/product/rl68h.html>.

[16] WANG Wenchuan, QU Yixin, TWU C H, et al. Comprehensive comparison and evaluation of the mixing rules of WS, MHV2, and Twu et al[J]. Fluid Phase Equilibria, 1996, 116(1/2):488–494.

[17] 童景山. 流体热物性学——基本理论与计算[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008. (TONG Jingshan. Fluid thermodynamics——base theory and compute[M]. Beijing: Chinese Petrochemistry Press, 2008.)

通信作者简介

杨昭,女,教授,博士生导师,天津大学机械工程学院,(022) 87894028,E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn。研究方向:新型工质热物性,制冷剂阻燃技术。

About the corresponding author

Yang Zhao, female, professor, Ph. D. supervisor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 22-87894028, E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn. Research fields: the thermophysical properties of new refrigerant and flame retardant technology of refrigerant.

(上接第 28 页)

[10] 荆亮, 徐玢花, 杜艳, 等. 上海 PM10 质量浓度的空间分布及影响因素分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21(4):481–489. (JING Liang, XU Binhua, DU Yan, et al. Spatial distribution of PM10 in shanghai and the influencing factors[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2015, 21(4):481–489.)

[11] ZHAN Feilong, TANG Jiajun, DING Guoliang, et al. Experimental investigation on particle deposition characteristics of wavy fin-and-tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99:1039–1047.

[12] HE Gaofa, ZHOU Chuande, LI Zelun. Review of self-cleaning method for solar cell array[J]. Procedia Engineering, 2011, 16:640–645.

[13] LIANG C H, WANG F, LU Y, et al. Experimental study of the effects of fin surface characteristics on defrosting behavior[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:86–92.

[14] 唐家俊, 詹飞龙, 胡海涛, 等. 翅片结构对翅片管换热器积灰与压降影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(1):1–8. (TANG Jiajun, ZHAN Feilong, HU Haitao, et al. Experimental investigation on influence of fin structures on particle deposition and pressure drop of fin-and-tube heat exchangers[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1):1–8.)

[15] ZHAO Yugang, YANG Chun. Retarded condensate freezing propagation on superhydrophobic surfaces patterned with micropillars[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(6):061605.

[16] CHU F, WEN D, WU X. Frost self-removal mechanism during defrosting on vertical superhydrophobic surfaces: peeling off or jumping off[J]. Langmuir, 2018, 34(48):14562–14569.

通信作者简介

丁国良,男,教授,博士生导师,上海交通大学机械与动力工程学院,(021)34206378,E-mail: glding@sjtu.edu.cn。研究方向:制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the corresponding author

Ding Guoliang, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.