

R1336mzz(Z)及其与多元醇酯类润滑油 混合物表面张力实验测量

豆文博, 张钰婧, 王晓坡

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为补充新型烯烃类环保制冷工质的表面张力实验数据, 为其相变换热及两相流动计算提供可靠的基础物性数据, 采用毛细管上升法测量了顺式-1, 1, 1, 4, 4, 4-六氟-2-丁烯(R1336mzz(Z))纯质及其与 POE 润滑油(型号 SL-32S)组成的混合物的表面张力。所研究的润滑油质量分数分别为 0.130%, 0.536%, 1.040%, 测量的温度范围为 243~363 K, 表面张力的测量标准不确定度小于 $0.16 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。结果表明: 润滑油含量越高, 混合物表面张力越大; 与纯质表面张力相比, 随着温度升高, 混合物表面张力增幅逐渐减小。采用经验方程对实验数据进行拟合, 结果发现, R1336mzz(Z)及 R1336mzz(Z)/SL-32S 混合物的表面张力计算值和实验数据的平均绝对偏差分别为 $0.07 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。所得结论可为 R1336mzz(Z)应用于各类制冷/热泵系统提供基础的物性数据。

关键词: 制冷剂 R1336mzz(Z); 表面张力; 多元醇酯类润滑油

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtxb202308009 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0086-06

Experimental Measurement of Surface Tension of R1336mzz(Z) and Its Mixtures with Polyolester Lubricant

DOU Wenbo, ZHANG Yujing, WANG Xiaopo

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To complement the experimental data of the surface tension of new environmentally-friendly olefin refrigerant, and to provide the reliable data for the calculation of phase change heat transfer and two-phase flow, the surface tension of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (R1336mzz(Z)) and the mixtures with POE lubricant (type: SL-32S) was measured using the differential capillary rise method. The mass fractions of the studied lubricant for the mixtures are 0.130%, 0.536%, and 1.040%, respectively. The measuring temperature was from 243 K to 363 K, and the measurement standard uncertainty for the surface tension was less than $0.16 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. Results show that the surface tension of the mixtures increases with the lubricant concentration. Moreover, the surface tension of the mixtures shows a reduced increase amplitude as the temperature rises, compared with that of pure R1336mzz(Z). The experimental surface tension was correlated as the empirical expression, and the average absolute deviations between the experimental data and the calculated values for the pure R1336mzz(Z) and R1336mzz(Z)/SL-32S mixtures were $0.07 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ and $0.14 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, respectively. The obtained results can provide the es-

sential surface tension data for the further application of R1336mzz(Z) to various types of refrigeration/heat pump systems.

Keywords: refrigerant R1336mzz(Z); surface tension; polyolester lubricant

氢氯氟烃(HCFC)和氢氟烃(HFC)等工质在制冷领域的广泛使用给环境带来了诸多问题。为了保护的要求,国际社会签署了多项公约,HCFC或 HFC 类制冷工质正在被逐渐禁用或替代。近年来,氢氟烯烃(HFOs)类制冷工质因具有良好的环保和热力性能,被认为是一类理想的新型替代工质^[1]。目前,被广泛研究的 HFO 类制冷工质包括 R1234yf、R1234ze(E)、R1233zd(E)、R1336mzz(Z)等^[2]。其中,R1336mzz(Z)的臭氧消耗潜能值为 0,全球变暖潜能值仅为 2,不可燃,与常用的润滑油有良好的相容性^[3-4]。研究表明,R1336mzz(Z)可以作为热泵、有机朗肯循环等的替代工质^[5-7]。

众所周知,工质的热物理性质是其工程应用的前提。在制冷/热泵系统中,压缩机中的润滑油不可避免要与制冷剂接触,混入润滑油的制冷工质的热物理性质会发生明显变化,进而影响系统的性能^[8-9]。因此,开展制冷工质/润滑油混合物的热物理性研究对于系统的优化设计具有重要价值。目前,国内外研究人员已经对 R1336mzz(Z)的临界参数^[10-11]、饱和蒸气压^[11-13]、密度^[12-14]、声速^[13]、黏度^[14-15]、热导率^[16-17]等物性展开了深入的研究。关于 R1336mzz(Z)与润滑油的性质研究方面,仅有 Brocus 等报道了其 与 4 种不同型号多元醇酯类(POE)润滑油的相平衡性质^[18]。

表面张力是流体的一个重要热物理性质,在制冷系统中工质的相变换热及两相流动的计算都需要用到表面张力。文献调研显示,制冷工质 R1336mzz(Z)及其与润滑油混合物的表面张力还未见报道。因此,本文采用毛细管上升法测量了纯质 R1336mzz(Z)及其与 POE 润滑油 SL-32S 混合物的表面张力,温度测量范围为 243~363 K。所得结论可为 R1336mzz(Z)在实际制冷热泵等系统中的应用及优化设计提供基础的物性数据。

1 实验系统

R1336mzz(Z) (CAS: 692-49-9)由杜邦(科慕)公司提供,纯度(质量分数)为 99.92%。SL-32S(日本 Sunice)是一种 POE 合成冷冻油,具有良好的润滑性、化学稳定性、流动性等,与 R1336mzz(Z)具有

良好的互溶性,被广泛用于各种冷冻、空调等机组中。因此,本文对润滑油 SL-32S 与 R1336mzz(Z)组成的混合物的表面张力展开研究。

表面张力采用毛细管上升法进行测量,实验系统如图 1 所示。毛细上升法测量表面张力的原理^[19-20]如下:将两个不同内径的毛细管竖直立于液体中时,在毛细作用下液体在毛细管内液面上升。由于毛细管内径不同,液面上升高度也不同。通过测量液面在毛细管内的高度差 Δh 可以计算得到液体的表面张力

$$\sigma = \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{2(1/r_1 - 1/r_2)\cos\theta} \left(\Delta h + \frac{r_1}{3} - \frac{r_2}{3} \right) \quad (1)$$

式中: σ 是表面张力; g 是当地重力加速度(本文取 $9.799\,6\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); ρ_l 和 ρ_g 分别是待测流体饱和和饱和气相密度; Δh 是两个毛细管中液体凹面底部的高度差; θ 为待测液体与毛细管壁面所形成的接触角(本文取 0); r_1 和 r_2 分别是两个毛细管的内径。在本实验装置中,经标定的两个毛细管的内径分别为 $r_1 = (0.498\,3 \pm 0.000\,6)\,\text{mm}$ 和 $r_2 = (0.718\,5 \pm 0.000\,6)\,\text{mm}$ 。

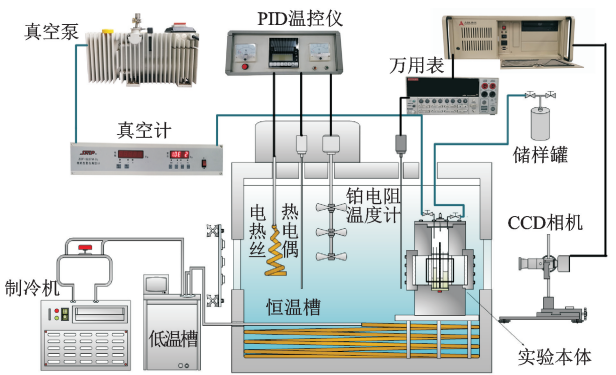


图 1 表面张力实验系统

Fig. 1 Experimental system of the surface tension

在实验中,为了保证恒温槽温度稳定,在测量温度低于环境温度时,采用低温酒精槽给恒温槽供冷量。测量过程中,待恒温槽温度稳定 1 h 后,利用数字万用表(Keithley 2 400)和 100 Ω 铂电阻温度计测量装置的温度,温度测量不确定度小于 30 mK。利用 CMOS 相机拍摄毛细管中液体凹液面并利用图像处理技术确定高度差,高度差的不确定度主要由

毛细管液柱凹液面最底部像素点决定,经评估其小于 0.012 mm。高度差的具体确定方法可参考文献[20]。

在实验之前,采用称量法配置了 3 种不同比例的 R1336mzz(Z)/润滑油 SL-32S 的混合物,润滑油质量分数(w)分别为 0.130%、0.536%、1.040%。配置过程中,制冷工质和润滑油的质量由日本 Shimadzu 公司的电子天平确定,其最大量程为 4 200 g,精度为 0.01 g。所配置的混合物的质量分数不确定度小于 0.000 2。

需要说明的是,由于润滑油和制冷工质的饱和蒸气压差异很大,混合物充入实验本体后,液相混合物的比例会发生变化,且温度不同混合物比例也不相同。基于此,本文提出了一种计算实验本体中制冷工质/润滑油混合物实际比例的方法。根据实验本体的体积、充入本体的制冷工质和润滑油的质量及密度计算得到润滑油的实际质量分数(w_0)。文献研究表明,润滑油的饱和蒸气压非常低^[21],因此可以认为实验本体中气相部分仅为制冷工质 R1336mzz(Z)。根据实验本体中的气、液相物质质量和体积守恒,有

$$\rho_g V_g + \rho_{l, \text{mix}} V_{l, \text{mix}} = m_t$$

(2)

$$V_{l, \text{mix}} + V_g = V_t$$

(3)

式中: ρ_g 和 $\rho_{l, \text{mix}}$ 分别表示实验本体中 R1336mzz(Z) 气相密度和液相混合物的密度; V_g 和 $V_{l, \text{mix}}$ 分别为实验本体中 R1336mzz(Z) 气相体积和液相混合物体积; m_t 和 V_t 表示本体中工质的总质量和实验本体的总体积。经标定后的实验本体的体积为 $(106.5 \pm 0.2) \text{ cm}^3$ 。

合并式(2)、(3),可以得到实验本体中气相 R1336mzz(Z)的体积

$$V_g = \frac{\rho_{l, \text{mix}} V_t - m_t}{\rho_{l, \text{mix}} - \rho_g}$$

(4)

混合物中润滑油的实际质量分数 w_0 为

$$w_0 = \frac{m_0}{m_0 + (m_r - \rho_g V_g)}$$

(5)

式中 m_0 和 m_r 分别表示充入实验本体的润滑油的质量和 R1336mzz(Z)的质量。同时,混合物液相的密度^[22-24]计算式为

$$\frac{1}{\rho_{l, \text{mix}}} = \frac{w_0}{\rho_0} + \frac{1 - w_0}{\rho_l}$$

(6)

式中 ρ_l 和 ρ_0 表示 R1336mzz(Z)的液相密度和润滑油的密度。通过迭代式(4)~(6),可以计算得到在实验本体中液相混合物的实际质量分数 w_0 。

润滑油 SL-32S 的密度采用 Anton Paar 密度计 (DMA 5000M) 测量得到,测量的温度范围为 283.15~363.15 K。为了便于应用,将测量得到的密度拟合成温度的多项式

$$\rho = a + bT + cT^2$$

(7)

式中,拟合的到的系数 a 、 b 、 c 分别为 1 157、-74.14、 5.712×10^{-5} 。密度计算值与实验值的绝对平均偏差为 0.001%,表明式(7)具有较高的计算精度,可以用于后续表面张力的计算。

2 结果与讨论

本文首先测量了纯质 R1336mzz(Z)的表面张力,测量温度范围为 243.62~363.13 K。R1336mzz(Z)的液相和气相密度数据来源于 REFPROP 10.0^[25],实验结果见表 1。考虑毛细管内径、测量高度差、所测工质密度、混合物质量分数等因素,根据不确定度传递公式,获得本文表面张力测量的标准不确定度小于 $0.16 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 1 R1336mzz(Z)表面张力测量值
Table 1 Experimental surface tension data of R1336mzz(Z)

T/K	$\sigma_r/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	T/K	$\sigma_r/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
243.62	19.43	306.04	12.27
246.03	19.09	309.04	11.93
249.58	18.64	312.04	11.55
252.15	18.56	315.04	11.13
255.59	18.28	318.04	10.77
257.38	17.87	321.05	10.42
260.68	17.41	324.06	9.99
264.13	17.05	326.99	9.81
267.09	16.78	329.96	9.51
269.98	16.35	333.11	9.16
272.63	16.01	336.15	8.90
275.99	15.70	339.28	8.47
279.03	15.24	342.39	8.19
282.22	14.98	345.65	8.02
285.21	14.57	348.39	7.63
288.22	14.14	351.44	7.31
291.09	13.81	354.28	6.96
293.84	13.37	357.09	6.74
296.66	13.14	360.09	6.40
300.06	12.84	363.13	6.06
303.05	12.42		

为了方便工程应用,将 R1336mzz(Z)的表面张力实验值拟合成 Van Der Waals 方程^[26]形式

$$\sigma_r = \sigma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^a \tag{8}$$

式中 $T_c=444.45\text{ K}$ 为 R1336mzz(Z)的临界温度。拟合得到的结果如下: $\sigma_0 = 54.047\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $a = 1.280$ 。式(8)中 R1336mzz(Z)表面张力计算值与实验值的绝对偏差分布如图 2 所示,平均绝对偏差和最大绝对偏差分别为 $0.07\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $0.21\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

R1336mzz(Z)与润滑油 SL-32S 混合物表面张力测量结果列于表 2。需要说明的是,表中分别给出了配置的润滑油质量分数 w 和充入实验本体后的实际质量分数 w_0 。

表 2 R1336mzz(Z)/SL-32S 混合物表面张力
Table 2 Surface tension of R1336mzz(Z)/SL-32S mixtures

$w(\text{SL-32S})=0.130\%$			$w(\text{SL-32S})=0.536\%$			$w(\text{SL-32S})=1.040\%$		
T/K	$w_0/\%$	$\sigma_{\text{mix}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	T/K	$w_0/\%$	$\sigma_{\text{mix}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	T/K	$w_0/\%$	$\sigma_{\text{mix}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
285.73	0.129	14.72	280.12	0.535	15.49	268.19	1.039	17.60
290.32	0.129	14.08	285.14	0.535	14.97	273.11	1.038	17.10
295.31	0.129	13.64	290.46	0.535	14.18	277.98	1.038	16.53
300.30	0.129	13.06	295.32	0.534	13.84	283.21	1.038	15.94
305.28	0.129	12.50	300.30	0.534	13.30	288.21	1.037	15.34
310.28	0.129	11.85	305.29	0.533	12.81	293.20	1.036	14.63
315.25	0.129	11.26	310.27	0.533	11.92	298.27	1.036	14.17
320.24	0.129	10.78	315.24	0.532	11.36	303.19	1.035	13.60
325.20	0.129	10.08	320.21	0.532	10.84	307.87	1.034	12.94
330.14	0.128	9.56	325.17	0.531	10.11	313.27	1.033	12.17
335.08	0.128	9.18	330.22	0.530	9.61	318.51	1.032	11.51
340.03	0.128	8.65	335.16	0.529	9.35	323.32	1.030	10.92
344.96	0.127	8.11	340.11	0.528	8.71	327.99	1.029	10.23
349.98	0.127	7.57	345.03	0.526	7.90	333.29	1.027	9.68
355.27	0.127	6.96	349.94	0.525	7.75			
360.16	0.126	6.56	355.04	0.523	7.10			
			359.94	0.521	6.71			

不同质量分数的混合物表面张力随温度的变化如图 3 所示。可以看出,相同温度下,润滑油质量分数越大,混合物表面张力就越大。随着温度升高,混合物的表面张力和纯质的表面张力逐渐接近,其差值逐渐减小。

为了方便工程应用,本文将混合物的表面张力关联为温度和润滑油质量分数的经验表达式

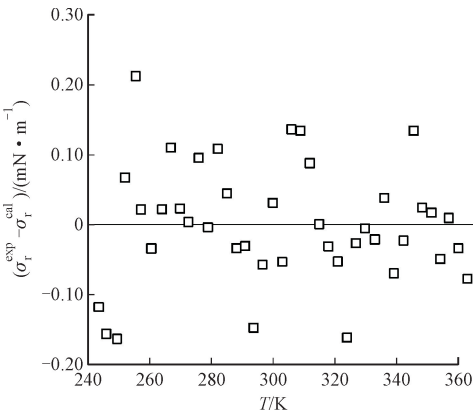


图 2 R1336mzz(Z)表面张力实验值与计算值的偏差
Fig. 2 Deviations for the surface tension of R1336mzz(Z) between the experimental data and calculated values

$$\sigma_{\text{mix}} = (C + DT + ET^2 + FT^3)w_0^G \tag{9}$$

式中 $C、D、E、F$ 为拟合系数。根据实验数据拟合出的 $C、D、E、F$ 分别为 $-19.755、0.633、-2.59\times 10^{-3}、2.896\times 10^{-6}、2.449\times 10^{-2}$ 。

图 4 给出了 R1336mzz(Z)/SL-32S 混合物表面张力的实验值与式(9)计算值之间的偏差分布,平均绝对偏差和最大偏差分别为 $0.14\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $0.44\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

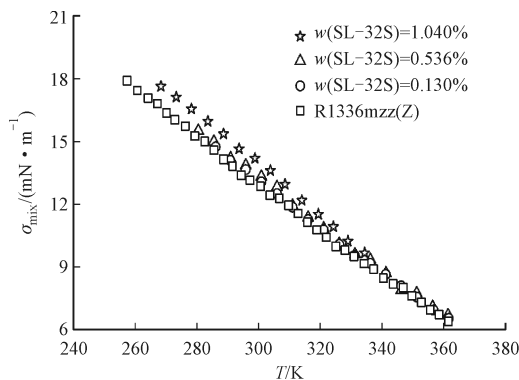


图 3 R1336mzz(Z)/SL-32S 混合物表面张力

Fig. 3 Surface tension of R1336mzz(Z)/SL-32S mixtures

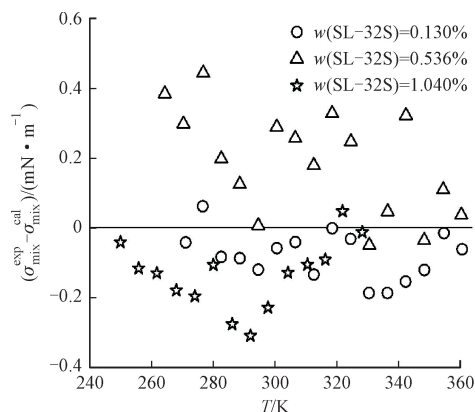


图 4 混合物表面张力的实验数据与计算值的偏差

Fig. 4 Deviations for the surface tension of mixtures between the experimental data and calculated values

3 结 论

(1)用毛细管上升法测量了纯质 R1336mzz(Z) 以及 R1336mzz(Z)/SL-32S 混合物的表面张力, 获得了高精度的实验数据。

(2)将混合物的表面张力与纯质数据进行对比, 发现加入润滑油 SL-32S 可使 R1336mzz(Z) 表面张力增大, 并且润滑油的质量分数越大, 表面张力也越大。同时, 随着温度升高, 润滑油对 R1336mzz(Z) 表面张力的影响逐渐减弱。

(3)对纯质和混合物的表面张力分别进行了拟合, 形成了计算方程。本文测得, 纯质表面张力的拟合值与实验值的平均绝对偏差和最大绝对偏差分别为 $0.07 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, 混合物表面张力的平均绝对偏差和最大绝对偏差分别为 $0.21 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.44 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] MCLINDEN M O, SEETON C J, PEARSON A. New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration [J]. Science, 2020, 370 (6518): 791-796.
- [2] NAIR V. HFO refrigerants: a review of present status and future prospects [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 156-170.
- [3] 杨梦, 张华, 孟照峰, 等. 新型环保高温工质 HFO-1336mzz(Z)的研究进展 [J]. 制冷学报, 2019, 40(6): 46-52, 110.
YANG Meng, ZHANG Hua, MENG Zhaofeng, et al. Research progress of the new environmentally friendly high temperature refrigerant HFO-1336mzz(Z) [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(6): 46-52, 110.
- [4] HUO Erguang, LIU Chao, XIN Liyong, et al. Thermal stability and decomposition mechanism of HFO-1336mzz(Z) as an environmental friendly working fluid: experimental and theoretical study [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(9): 4630-4643.
- [5] 黄洁, 张华, 杨梦. 环保工质 HFO-1336mzz(Z)/HCFO-1224yd(Z)高温热泵的特性分析 [J]. 制冷技术, 2022, 42(5): 1-6.
HUANG Jie, ZHANG Hua, YANG Meng. Characteristic analysis on high temperature heat pump with environmental protection refrigerant of HFO-1336mzz(Z)/HCFO-1224yd(Z) [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2022, 42(5): 1-6.
- [6] 韩盼, 李征涛, 廖李平. HFO-1336mzz(Z)在有机朗肯循环系统中的研究进展 [J]. 真空与低温, 2021, 27(2): 171-177.
HAN Pan, LI Zhengtao, LIAO Liping. Research progress of HFO-1336mzz(Z) in organic Rankine cycle system [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(2): 171-177.
- [7] WANG Shikuan, GUO Zhikai, HAN Xiaohong, et al. Experimental evaluation on low global warming potential HFO-1336mzz-Z as an alternative to HCFC-123 and HFC-245fa [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2019, 11(3): 031009.
- [8] 吴建华, 雷博雯, 陈振华, 等. 丙烷旋转压缩机油池中矿物油和丙烷混合物的黏度测量与溶解度推算 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 81-85, 92.
WU Jianhua, LEI Bowen, CHEN Zhenhua, et al. Viscosity measurement and solubility calculation of mineral oil and propane (R290) mixture in oil sump of R290 rotary compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 81-85, 92.

- [9] 张兴群, 张小艳, 袁秀玲. 混合制冷剂 R134a/R600a 与矿物油互溶性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 5-8, 85.
ZHANG Xingqun, ZHANG Xiaoyan, YUAN Xiuling. Experimental study on miscibility of R134a/R600a refrigerant and mineral oil mixture [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 5-8, 85.
- [10] TANAKA K, AKASAKA R, SAKAUE E, et al. Measurements of the critical parameters for cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2017, 62(3): 1135-1138.
- [11] LI Shuhao, XU Liu, LIU Hangtao, et al. Vapor pressure measurements and correlation for cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz(Z)) [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, 65(9): 4223-4229.
- [12] TANAKA K, AKASAKA R, SAKAUE E, et al. Thermodynamic properties of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz(Z)): measurements of the $p\rho T$ property and determinations of vapor pressures, saturated liquid and vapor densities, and critical parameters [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61(7): 2467-2473.
- [13] MCLINDEN M O, AKASAKA R. Thermodynamic properties of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: vapor pressure, (p, ρ, T) behavior, and speed of sound measurements and equation of state [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, 65(9): 4201-4214.
- [14] SUN Yukun, LI Xiaojing, MENG Xianyang, et al. Measurement and correlation of the liquid density and viscosity of HFO-1336mzz(Z) (cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene) at high pressure [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2019, 64(2): 395-403.
- [15] ALAM M J, MIYARA A, KARIYA K, et al. Measurement of viscosity of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (R-1336mzz(Z)) by tandem capillary tubes method [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2018, 63(5): 1706-1712.
- [16] PERKINS R A, HUBER M L. Measurement and correlation of the thermal conductivity of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene [J]. International Journal of Thermophysics, 2020, 41(7): 103.
- [17] ALAM M J, ISLAM M A, KARIYA K, et al. Measurement of thermal conductivity of cis-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene (R-1336mzz(Z)) by the transient hot-wire method [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 84: 220-227.
- [18] BROCUS J, VALTZ A, COQUELET C, et al. Solubility measurements of refrigerants in polyolesters lubricants at temperature from 323 K to 383 K [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 134: 278-292.
- [19] 林鸿, 段远源. 氢氟烃(HFC)二元混合物表面张力测量 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(12): 1672-1675.
LIN Hong, DUAN Yuanyuan. Surface tension measurements of binary hydrofluorocarbon mixtures [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(12): 1672-1675.
- [20] DUAN Wenhao, ZHAO Xiaoming, ZENG Xiaoyang, et al. Surface tension of HFC-161 and compressor oil mixtures [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 85: 191-199.
- [21] EMELIANOV V V, KRASNYYKH E L, PORTNOVA S V, et al. Synthetic oils based on pentaerythritol esters: vapor pressure and enthalpy of vaporization [J]. Fuel, 2022, 312: 122908.
- [22] MERMOND Y, FEIDT M, MARVILLET C. Thermodynamic and physical properties of mixtures of refrigerants and oils [J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(7): 569-579.
- [23] LOTTIN O, GUILLEMET P, LEBRETON J M. Effects of synthetic oil in a compression refrigeration system using R410A: Part I modelling of the whole system and analysis of its response to an increase in the amount of circulating oil [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(7): 772-782.
- [24] 魏文建, 丁国良, 胡海涛, 等. R410A 制冷剂和 POE VG 68 润滑油混合物热物性模型 [J]. 制冷学报, 2007, 28(1): 37-44.
WEI Wenjian, DING Guoliang, HU Haitao, et al. Models of thermodynamic and transport properties of POE VG68 and R410A/POE VG68 mixture [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(1): 37-44.
- [25] LEMMON E W, BELL I H, HUBER M L, et al. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 10.0 [EB/OL]. [2023-01-01]. <https://doi.org/10.18434/T4/1502528>.
- [26] MIQUEU C, BROSETA D, SATHERLEY J, et al. An extended scaled equation for the temperature dependence of the surface tension of pure compounds inferred from an analysis of experimental data [J]. Fluid Phase Equilibria, 2000, 172(2): 169-182.

(编辑 陶晴)