文章编号:0253-4339(2020) 05-0042-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.042

制冷剂/润滑油气液相平衡实验系统的研制与验证

张朝仕　黄展枫　黄钗宜　李廷勋

(中山大学智能工程学院　广州　510006)

摘　要　针对制冷剂/润滑油相平衡测量,本文研制了一套基于循环法的高精度制冷剂/润滑油气液相平衡实验系统。该实验系统在循环系统中安装了可拆卸的样品罐,将循环法与称重分析法结合,避免了等体积饱和法由于理想假设而产生的系统误差,可适用于温度范围为 263.15~373.15 K 的制冷剂/润滑油气液相平衡的测量。测量了温度为 293.35~323.33 K 的 R290 的饱和蒸气压,与 NIST 数据库相比,最大相对误差为-0.18%;测量了温度为 303.35 K 的 R290 和角鲨烷的相平衡,并使用 Aspen Plus 中的 PR 方程结合单流体的 van der Waals 混合规则对实验结果及文献值进行了关联,最大相对误差分别为-0.37%和-0.76%。

关键词　制冷剂;润滑油;气液相平衡;循环法

中图分类号:TB61+2;TB64;O642.4+2　　**文献标识码**: A

Development and Verification of a Vapor-liquid Equilibrium Experimental System for Refrigerants/Lubricants

Zhang Chaoshi　Huang Zhanfeng　Huang Chaiyi　Li Tingxun

(School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510006, China)

Abstract　To measure the vapor-liquid equilibrium (VLE) of refrigerants/lubricants, a refrigerants/lubricants VLE experimental system with high precision was developed based on the cycle method. The circulation system was equipped with a detachable sample tank. It combined the cycle method and weighing method and eliminated systematic error of the isochoric saturation method due to the assumption. Furthermore, it could measure the VLE of refrigerants/lubricants at a temperature range of 263.15 K to 373.15 K. The saturated vapor pressure of R290 was measured from 293.35 K to 323.33 K. The relative deviation of the pressure was less than -0.18% when compared to NIST REFPROP9.1. Additionally, the phase equilibrium values of R290 and squalane were measured at 303.35 K. The experimental data and literature data were correlated with the Peng-Robinson (PR) equation of state and one-fluid van der Waals mixing rules in Aspen Plus, and the results indicated maximum relative deviation of pressure of -0.37% and0.76%, respectively.

Keywords　refrigerant; lubricant; vapor-liquid equilibrium; cycle method

《蒙特利尔协定书》基加利修正案在 2019 年 1 月 1 日正式生效,进一步加快了替代制冷剂的商业化进程。然而,诸多技术问题限制了新型低 GWP 替代制冷剂在制冷系统中的规模化、商业化应用,其中之一就是制冷剂/润滑油混合物的气液相平衡(vapor-liquid equilibrium,VLE)性质。因为在家用空调系统中,润滑油会随着制冷剂从压缩机内迁移到其他部位,而制冷剂中的含油量将会影响蒸发器和冷凝器的换热[1-2]。

目前,国内外研究制冷剂/润滑油 VLE 性质的方法主要有两种:静态法和动态法。静态法又可细分为等体积饱和法、高差计法、刻度法、取样分析法等;动态法可细分为单一相循环法、气液双循环法等。表 1 所示为国内外制冷剂/润滑油 VLE 的研究现状。由表 1 可知,使用等体积饱和法和单一相循环法占大多数。相比于循环法,虽然等体积饱和法的实验系统简单、操作方便,但在计算制冷剂在润滑油中的溶解度时,需进行如下假设:若溶解到润滑油中的制冷剂为液相,则需假设液相制冷剂与润滑油为理想混合[3];若溶解到润滑油中的制冷剂为气相,则需假设溶解到润滑油中制冷剂的摩尔体积为在无限稀释情况下的偏摩尔体积[4]。此外,等体积饱和法还需要标定实验系统的容积,由于平衡釜存在死体积,且大多数实验装置使用不锈钢加工而成,对气体存在吸附作用。无论使用水还是气体作为标定介质,特别是对于小容积的平衡釜,标定精度较难控制。

在前人工作的基础上[5-6],本文研制了一套基于单一相循环法的可视化 VLE 实验台,可以通过称重

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2020-01-16

分析的方法计算制冷剂在润滑油的溶解度,避免了等体积饱和法的系统误差。

表 1 国内外制冷剂/润滑油 VLE 的研究现状

Tab.1 Research status on the vapor-liquid equilibrium of refrigerants/lubricants at domestic and international

实验方法	作者	制冷剂/润滑油	年份
等体积饱和法	Å. Wahlström 等[7]	R125、R134a、R143a、R152a/正二十烷、正十六烷、正十三烷、2,6,10,14-四甲基十五烷	1997
	Å. Wahlström 等[8]	R32、R125、R134a、R143a、R152a/PEC5	1999
	O. Fandiño 等[4]	R744/PEC5、PEBE8	2008
	Sun Yanjun 等[9]	R1234ze(E)/PEC5	2014
	Sun Yanjun 等[10]	R600a/PEC4、PEC6、PEC8	2017
	Zhang Yao 等[11]	R1234yf/[Bmim][PF_6]、[Hmim][PF_6]、[Omim][PF_6]	2018
高差计法	P. V. Zhelezny 等[12]	R600a/Azmol(MO)	2007
	S. Bobbo 等[13]	R744/PEBM5、PEBM6、PEBM7	2007
	S. Bobbo 等[14]	R1234yf/PAG、DC-PAG	2014
刻度法	杨瑞杰等[15]	R290/AB、PAG、POE、MO	2013
	T. Matsumoto 等[16]	R404A/PVE32A、R1234yf/PVE32B、R449A/PVE32B、R452A/PVE32B	2017
取样分析法	K. Takigawa 等[17]	R125、R134a、R143a、R32/AB	2002
单一相循环法	C. Burton 等[18]	R32、R410A/POE	1999
	T. Tsuji 等[19]	R744/正十烷、PAG-1	2004
	Hong Hui 等[20]	R134a、R290/角鲨烷	2006
	M. A. M. Neto 等[6]	R600a/POE ISO 7	2008
	M. A. M. Neto 等[21]	R600a/LAB ISO 5	2010
	Han Xiaohong 等[22]	R161/POE	2010
	Fang Lingyun 等[23]	R161/AB	2014

1 相平衡实验系统的研制

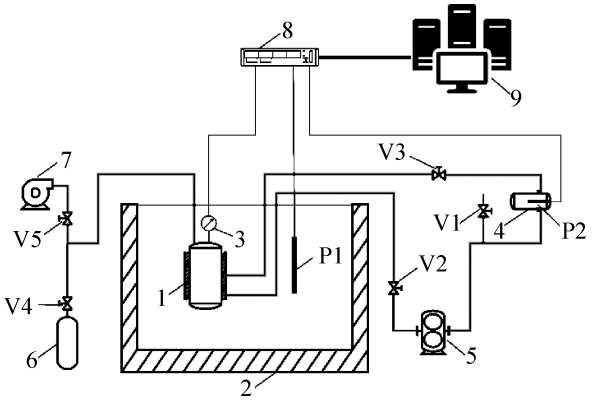
1.1 实验原理

VLE 数据一般包括相平衡状态下的压力(p)、温度(T)、气相组成(y_i)及液相组成(x_i)等参数。对于制冷剂/润滑油混合物的 VLE 数据,由于润滑油的蒸气压较低,可以认为在气相中只包含制冷剂[10,20],通常采用溶解度来表示液相的组成,因此制冷剂/润滑油的 VLE 数据包含相平衡状态下的压力(p)、温度(T)和溶解度(x_r)。

实验原理:充注制冷剂和润滑油到平衡釜中,随着齿轮泵的运行,制冷剂不断溶解到润滑油中,当温度和压力达到平衡后,则达到热力学平衡,取下样品罐,通过称重分析法即可计算制冷剂在润滑油的溶解度。

1.2 实验系统

研制的气液相平衡实验系统如图 1 所示,该系统由循环系统、恒温槽、温度测量系统、压力测量系统及真空系统组成。表 2 所示为系统所用实验装置。P2



1 可视化平衡釜;2 恒温槽;3 绝压变送器;4 样品罐;5 齿轮泵;6 制冷剂瓶;7 真空泵;8 多通道测温仪;9 电脑;P1-P2 铂电阻;V1-V5 阀门。

图 1 气液相平衡实验系统

Fig.1 The vapor-liquid equilibrium experimental system

铂电阻的作用是为了检验循环系统温度的均匀性。暴露在空气中的实验装置均使用保温管和保温棉进行绝热处理。

表 2 实验装置

Tab.2 Experimental device

实验装置	型号/材质	使用范围	标准不确定度	品牌
平衡釜	316L	0~10 MPa、263.15~373.15 K	—	
样品罐	TC4	0~5 MPa	—	南通市飞宇石油科技开发有限公司
油气分离器	TC4	0~5 MPa	—	
恒温槽	7040-25-7	233.15~373.15 K	4 mK	FLUKE
二等标准铂电阻(P1)	5626	73.15~934.15 K	10 mK	FLUKE
385 铂电阻(P2)	1/10DIN	173.15~673.15 K	100 mK	OMEGA
多通道测温仪	1586A	—	—	FLUKE
齿轮泵	GJ-N21	500~6 000 r/min	—	MICROPUMP
绝压变送器	UNIK5000	0~5.1 MPa	2.4 kPa	Druck
真空泵	75D NW40	$<5\times10^{-9}$ kPa	—	Edwards
分析天平	MSE623S-1CE-DE	0~620 g	0.3 mg	Sartorius

1.3 实验步骤

1)向平衡釜中加入适量的润滑油,在此过程中要尽量防止润滑油暴露在空气中。充注完毕后,对实验系统抽真空到润滑油的蒸气压以下。

2)充注适量的制冷剂。

3)设定恒温槽的温度为一组实验温度,并开启齿轮泵。当 P1 铂电阻和 P2 铂电阻温度趋于一致,且温度及压力长时间(30 min 以上)保持在不确定度以内波动,即可认为系统达到平衡状态,记录温度、压力数据。

4)取下样品罐称重,记录总质量(m_{s1},g)后,连接油气分离器并进行抽真空,抽到接近润滑油的蒸气压,此时认为样品罐中只含有润滑油,或者残留的微量制冷剂对实验结果无影响[6,17],需特别注意不能把润滑油抽出。分别记录样品罐的质量(m_{s2},g)和油气分离器的质量(m_{o1},g)。

5)安装样品罐,对在 4)操作过程中暴露在空气中的部分实验系统抽真空至润滑油的蒸气压以下。重复步骤 3)~5)。

1.4 溶解度的计算

溶解度可由式(1)~式(4)联立计算得出:

$$x_r = \frac{m_r/M_r}{m_r/M_r + m_l/M_l} \tag{1}$$

$$m_r = m_{s1} - m_{s2} - m_{o2} \tag{2}$$

$$m_l = m_{s2} + m_{o2} - m_s \tag{3}$$

$$m_{o2} = m_{o1} - m_o \tag{4}$$

式中:x_r 为制冷剂在润滑油中的溶解度,mol/mol;m_r、m_l、m_s 分别为制冷剂的质量、润滑油的质量及样品罐中的净重,g;m_{o2}、m_o 分别为油气分离器中残留润滑油的质量及其净重,g;M_r 为制冷剂的摩尔质量,g/mol;M_l 为润滑油的摩尔质量,g/mol。

2 实验系统的可靠性验证

2.1 样品的来源

实验采用的 R290 由广州市卓正气体有限公司提供,摩尔浓度为 99.99%(mol/mol),分子式为 C_3H_8,摩尔质量为 44.096 g/mol;角鲨烷(CAS 号:111-01-3)由梯希爱(上海)化成工业发展有限公司提供,纯度高于 98.0%(kg/kg),分子式为 $C_{30}H_{62}$,摩尔质量为 422.83 g/mol。所有试剂在实验前没有进一步的提纯。

2.2 R290 饱和蒸气压的测量

测量了温度范围在 293.35~323.33 K 的 R290 饱和蒸气压,如表 3 所示。

与 NIST 数据库相比,最大相对误差为 -0.18%[24],证明了实验系统的漏热及齿轮泵运行时产生的压力波动对实验结果无影响。

2.3 R290/角鲨烷相平衡的测量

测量了温度为 303.35 K 的 R290 和角鲨烷的相平衡,并使用 Aspen plus 中的 PR 方程结合单流体的

van der Waals 混合规则对本文的实验结果及 D. E. Nanu 等[25]的实验数据进行关联,如表 4 所示。本实验结果的最大相对误差为-0.37%,D. E. Nanu 等[25]的实验结果的最大相对误差为-0.76%,验证了实验系统的可靠性。

表 3 R290 饱和蒸气压

Tab.3 Saturated vapor pressures of R290

T/K	p_{exp}/kPa	p_{cal}/kPa	Δp/kPa	δ_p
293.35	839.4	840.9	-1.5	-0.18%
298.36	957.8	957.2	0.6	0.06%
303.35	1 084.4	1 084.3	0.1	0.01%
308.34	1 222.7	1 223.4	-0.7	-0.06%
313.35	1 376.0	1 375.8	0.2	0.01%
318.33	1 540.4	1 540.5	-0.1	-0.01%
323.33	1 720.9	1 720.0	0.9	0.05%

注:1) T 为 P1 铂电阻测得的温度,p_{exp} 为实验测得的压力,p_{cal} 为 NIST REFPROP 9.1 中查出的压力;2) $\delta_p = \Delta p/p \times 100\% = (p_{exp} - p_{cal})/p_{exp} \times 100\%$。

2.4 不确定度评定

关于不确定度评定,实验中被测量的物理量为压力、温度和溶解度。

1)压力测量不确定度。压力测量受到绝压变送器和 1586A 测温仪两部分的影响。本课题组委托中国赛宝检定了在室温下绝对压力变送器和 1586A 测温仪,其总的示值误差为 0.08%FS(读数)。压力的最大偏差为:

$$p = 5.1 \times 10^3 \times 0.08\% = 4.1\ \text{kPa} \tag{5}$$

按均匀分布考虑,压力的合成标准不确定度为:

$$u(p) = \frac{4.1}{\sqrt{3}} = 2.4\ \text{kPa} \tag{6}$$

2)温度测量不确定度。温度测量会受到铂电阻温度计、1586A 测温仪和恒温槽波动的影响。本课题组委托华南国家计量测试中心标定了二等标准铂电阻温度计(P1)和 1586A 测温仪的不确定度,其扩展不确定度(U)为 0.018 ℃,k 为包含因子,k=2。

表 4 R290 和角鲨烷的相平衡实验数据

Tab.4 Experimental data of phase equilibrium between R290 and squalane

T/K	x_1/(mol/mol)	p_{exp}/kPa	p_{cal}/kPa	Δp/kPa	δ_p
本文数据					
303.35	40.07%	356.3	356.3	0	0
	49.25%	387.9	388.0	-0.1	-0.03%
	51.49%	428.4	428.3	0.1	0.03%
	72.63%	700.9	702.0	-1.1	-0.16%
	76.18%	749.3	748.4	0.9	0.12%
	81.60%	834.5	831.8	2.7	0.32%
	85.24%	874.4	877.6	-3.2	-0.37%
	86.85%	916.8	916.4	0.4	0.04%
D. E. Nanu 数据					
303.40	60.12%	530	530	0	0
303.40	90.00%	987	987	0	0
303.40	96.00%	1 047	1 043	4.0	0.35%
303.39	97.01%	1 047	1 055	-8.0	-0.76%
303.40	98.03%	1 069	1 069	0	0.02%

注:1) T 为 P1 铂电阻测得的温度,p_{exp} 为实验测得的压力,p_{cal} 为模型计算出的压力;2) $\delta_p = \Delta p/p \times 100\% = (p_{exp} - p_{cal})/p_{exp} \times 100\%$。

P1 和 1586A 测温仪的合成不确定度为:

$$u(T_1) = \frac{U}{k} = 9\ \text{mK} \tag{7}$$

恒温槽的不确定度 $u(T_2)$ 为 4 mK,温度的合成标准不确定度为:

$$u(T) = \sqrt{u^2(T_1) + u^2(T_2)} \approx 10\ \text{mK} \tag{8}$$

P2 铂电阻由 P1 铂电阻标定,如表 5 所示。

3)溶解度不确定度。由式(1)结合不确定度传播律公式,则溶解度的相对标准不确定度为:

$$\frac{u(x_r)}{x_r} = \frac{u(a)}{m_r(10m_r + m_l)}\sqrt{4m_r^2 + 4m_l^2 + 6m_r m_l} \tag{9}$$

表 5 P2 铂电阻标定

Tab.5 Calibration of P2 platinum resistance thermometer

铂电阻	温度/K						
P1	293.35	298.36	303.35	308.34	313.35	318.33	323.34
P2	293.30	298.30	303.30	308.20	313.20	318.20	323.20

式中：$u(a)$ 为分析天平的不确定度，0.3 mg。

由式(2)和式(3)计算得到的制冷剂和润滑油的质量，代入式(8)即可计算溶解度的相对不确定度。在本实验中，溶解度的相对标准不确定度计算结果为 0.014%，取 0.02%。

3 结论

1)通过分析国内外制冷剂/润滑油 VLE 的研究现状，本文提出了基于单一相循环法的制冷剂/润滑油 VLE 实验系统，温度和压力的合成标准不确定度分别为 10 mK、2.4 kPa，溶解度的相对标准不确定度为 0.02%。该实验系统将循环法与称重分析法结合，避免了等体积饱和法由于理想假设而产生的系统误差，可适用于温度范围为 263.15～373.15 K 的制冷剂/润滑油 VLE 的测量。

2)测量了温度为 293.35～323.33 K 的 R290 的饱和蒸气压，与 NIST 数据库相比，最大相对误差为 -0.18%，证明了系统漏热及齿轮泵运行时引起压力的波动对实验结果无影响。

3)测量了温度为 303.35 K 的 R290 和角鲨烷的相平衡，并使用 Aspen plus 中的 PR 方程结合单流体的 van der Waals 混合规则对本文的实验结果及 D. E. Nanu 等[25]的实验数据进行关联，本实验结果的最大相对误差为 -0.37%，D. E. Nanu 等[25]的实验结果的最大相对误差为 -0.76%，验证了实验系统的可靠性。

本文受佛山市海内外重点招标课题(No. 2013AH100023)资助。(The project was supported by Foshan Major Biding Research Program for Domestic and Abroad (No. 2013AH100023).)

参考文献

[1] 张绍志，季益华，陈光明. 替代制冷剂管内冷凝换热研究进展[J]. 制冷学报，2000(3)：7-13. (ZHANG Shaozhi, JI Yihua, CHEN Guangming. Recent research on in-tube condensation heat transfer of alternative refrigerants [J]. Journal of Refrigeration, 2000(3)：7-13.)

[2] 马虎根. 制冷剂混合物水平微翅管内流动沸腾研究综述[J]. 制冷学报，2001(4)：29-34. (MA Hugen. Review of experimental investigations on flow boiling with refrigerantmixtures in horizontal microfin tubes[J]. Journal of Refrigeration, 2001(4)：29-34.)

[3] GINIES P, DEWITTE P, TERRIER M F, et al. Low GWP refrigerant and partial miscible lubricant[C]//International Refigeration and Air Conditioning Conference. USA: Purdue University, 2014：1559.

[4] FANDINÑO O, LÒPEZ E R, LUGO L, et al. Solubility of carbon dioxide in two pentaerythritol ester oils between (283 and 333) K [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2008, 53(8)：1854-1861.

[5] WANG Jian, LU Yuan, ZHANG Chaoshi, et al. Gaseous PVTx measurements for propane (R290) + trifluoroiodomethane (R13I1) system [J]. Fluid Phase Equilibria, 2019, 494：135-142.

[6] NETO M A M, BARBOSAJ R. Solubility, density and viscosity of a mixture of R-600a and polyol ester oil[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(1)：34-44.

[7] WAHLSTRÖM Å, VAMLING L. The solubility of HFC125, HFC134a, HFC143a and HFC152a in n-Eicosane, n-Hexadecane, n-Tridecane and 2,6,10,14-Tetramethylpentadecane[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1997, 75(3)：544-50.

[8] WAHLSTRÖM Å, VAMLING L. Solubility of HFC32, HFC125, HFC134a, HFC143a, and HFC152a in a pentaerythritol tetrapentanoate ester[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1999, 44(4)：823-828.

[9] SUN Yanjun, WANG Xiaopo, GONG Na, et al. Solubility of trans-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234ze(E)) in pentaerythritol tetrapentanoate (PEC5) in the temperature range from 283.15 to 353.15 K[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 48：114-120.

[10] SUN Yanjun, WANG Xiaopo, WANG Dongbo, et al. Absorption of isobutane in three linear chained pentaerythritol esters between 293.15 and 348.15 K[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 76：118-125.

[11] ZHANG Yao, YIN Jiajia, WANG Xiaopo. Vapor-liquid equilibrium of 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene with 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate, 1-hexyl-3-methyl imidazolium hexafluorophosphate, and 1-octyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 260：203-208.

[12] ZHELEZNY P V, ZHELEZNY V P, PROCENKO D A, et al. An experimental investigation and modelling of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions: some aspects of experimental methodology[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(3)：433-445.

[13] 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.

[14] BOBBO S, ZILIO C, SCATTOLINI M, et al. R1234yf as a substitute of R134a in automotive air conditioning. Solubility measurements in two commercial PAG oils[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 40：302-308.

[15] 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.)

[16] MATSUMOTO T, KANEKO M, KAWAGUCHI Y. Evaluations of PVE lubricants for refrigeration and air conditioning system with thelow GWP refrigerants[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017, 232(1):012091.

[17] TAKIGAWA K, SANDLER S I, YOKOZEKI A. Solubility and viscosity of refrigerant/lubricant mixtures: hydrofluorocarbon/alkylbenzene systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8):1014-1024.

[18] BURTON C, JACOBI A M, MEHENDALE S S. Vapor-liquid equilibrium for R-32 and R-410A mixed with a polyol ester: non-ideality and local composition modeling[J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(6):458-471.

[19] TSUJI T, TANAKA S, HIAKI T, et al. Measurements of bubble point pressure for CO_2+decane and CO_2+lubricating oil[J]. Fluid Phase Equilibria, 2004, 219(1): 87-92.

[20] HONG Hui, GONG Maoqiong, WU Jianfeng. Solubility measurements of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) and of propane in squalane at temperatures from (325 to 400) K and pressures from (0.1 to 1) MPa[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2006, 51(6):2270-2273.

[21] NETO M A M, BARBOSA J R. Solubility, density and viscosity of mixtures of isobutane (R-600a) and a linear alkylbenzene lubricant oil[J]. Fluid Phase Equilibria, 2010, 292(1/2):7-12.

[22] HAN Xiaohong, ZHU Zhiwei, CHEN Fusheng, et al. Solubility and miscibility for the mixture of (ethyl fluoride + polyol ester oil)[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2010, 55(9):3200-3207.

[23] FANG Lingyun, GAO Zanjun, WANG Xiaoyu, et al. Solubility and miscibility for the mixture of (ethyl fluoride + alkylbenzene oil)[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2014, 59(5):1636-1642.

[24] LEMMON E W, MCLINDEN M O, WAGNER W. Thermodynamic properties of propane. III. A reference equation of state for temperatures from the melting line to 650 K and pressures up to 1 000 MPa[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2009, 54(12):3141-3180.

[25] NANU D E, POOT W, GEANA D, et al. Fluid phase equilibria of binary n-alkane + squalane systems[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2003, 48(3):571-575.

通信作者简介

李廷勋,男,副教授,中山大学智能工程学院,(020)39333115,E-mail: litx@hotmail.com。研究方向:新型替代制冷剂技术、制冷空调系统仿真与优化、流体热物性等。

About the corresponding author

Li Tingxun, male, associate professor, School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, +86 20-39333115, E-mail: litx@hotmail.com. Research fields: alternative refrigerants research, simulation and optimization of refrigeration and air-conditioning system, thermal properties of fluid, etc.