

DOI: 10.7652/xjtuxb201907011

气液饱和溶液黏度实验系统及其性能测试

张焱, 朱山杉, 孙艳军, 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: 针对目前国内外对气-液达到平衡状态时其饱和液相黏度实验研究非常少的现状, 将相平衡装置与双毛细管法黏度测量装置进行集成, 搭建了一套可以用于测量气液饱和溶液黏度的实验系统。通过对纯质乙醇、正庚烷以及离子液体[Hmim][Tf₂N]等的黏度进行测试并与文献值对比, 得到3种物质的实验值与文献值的绝对平均偏差分别为1.13%、0.89%和2.15%。在此基础上, 测量得到了温度为298.15、323.15和343.15 K时含饱和制冷剂R134a的离子液体[Hmim][Tf₂N]在不同压力、不同溶解度时的黏度实验数据, 并将实验数据拟合成温度和组分的多项式形式。通过与方程计算结果进行对比分析, 得到实验值与多项式计算值的绝对平均偏差为1.42%, 最大偏差为2.86%, 验证了文中搭建的气液饱和溶液黏度实验系统的可靠性, 可为进一步开展相关研究奠定基础。

关键词: 气液饱和溶液; 溶解度; 黏度; 双毛细管

中图分类号: TK123 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0072-06

Viscosity Measurement System of Vapor-Liquid Saturated Solutions and Property Test

ZHANG Yao, ZHU Shanshan, SUN Yanjun, WANG Xiaopo

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

Abstract: In the literature, the investigation on the viscosity of saturated liquid-fluids at the vapor-liquid equilibrium condition is very scarce. In this work, an experimental system to measure the vapor-liquid saturated solutions, which combined the vapor-liquid equilibrium equipment with the dual-capillary viscometer, was established. The liquid viscosities of pure ethanol, *n*-heptane and 1-hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) amide ([Hmim][Tf₂N]) were measured firstly to check the reliability of the dual-capillary viscometer. The average absolutely relative deviation between the experimental data and the calculated results in the literature are 1.13%, 0.89% and 2.15% for the three substances, respectively. In addition, the viscosities of [Hmim][Tf₂N] with saturated R134a were measured at temperatures of 298.15 K, 323.15 K and 343.15 K and different pressures and gas phase mole fractions. The viscosity data were correlated as a function of temperature and mole fraction. The experimental results were compared with the calculated values, the average absolutely relative deviation of experimental values and calculated values is 1.42% and the maximum deviation is 2.86%. All the results show that the established experimental system is reliable.

Keywords: saturated vapor-liquid mixture; solubility; viscosity; dual-capillary

收稿日期: 2019-01-18。 作者简介: 张焱(1989—), 男, 博士生; 王晓坡(通信作者), 男, 教授。

网络出版时间: 2019-04-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190403.1509.005.html>

流体的热物理性质一直是石油化工、制冷空调、航天航空等领域不可缺少的基本参数。流体的黏度作为一种重要的迁移性质,经过多年的发展,已有多种比较成熟的测试方法和手段,主要有毛细管法、振动法、落体法、旋转法以及光学法等。这些方法不仅可用于流体纯质气相或液相黏度的测量,还可用于流体混合物气相或液相黏度的测量。

随着各领域研究的不断深入,气体溶解到液体中达到饱和状态时溶液(本文简称气液饱和溶液)的黏度测试逐渐成为国内外研究的热点,如在制冷空调领域,近年来制冷剂/离子液体工质对被认为是一种非常有潜力的新型吸收式制冷工质对。为了评价工质对的性能,国内外许多研究人员已对制冷剂与离子液体的相平衡性质进行了深入的研究和分析^[1-6],而进一步将工质对应用到制冷循环中时,溶解到离子液体中的制冷剂与离子液体形成的饱和溶液的黏度则是必须已知的一个参数,它对于制冷循环的优化设计具有十分重要的作用。目前,国内外对这一类气液饱和溶液的黏度测试研究得非常少,仅有 Aghosseini 等研究了含饱和 R134a 的 [Hmim][Tf₂N] 溶液、含饱和 CO₂ 的 [Bmim][BF₄] 溶液等的黏度^[7-9]。

由于气液饱和溶液的特殊性,传统的流体黏度单一的测量方法就有一定的困难。为了深入开展气液饱和溶液黏度的研究工作,本文将相平衡装置与双毛细管法黏度实验装置进行集成,搭建了一套用于测量气液饱和溶液黏度的实验系统,并对该系统进行了详尽的性能测试。

1 气液饱和溶液黏度测量原理

由于双毛细管法相比单毛细管法,测试过程不需要知道毛细管长度、管径等结构参数,且不需要标定仪器常数^[10-13],因此本文采用双毛细管法。根据哈根-泊肃叶定律,牛顿流体在管道内保持层流状态时,流体黏度与体积流率、毛细管道内径和压力降之间有如下关系

$$Q = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8\eta L} \quad (1)$$

$$Z = \frac{8L}{\pi r^4} \quad (2)$$

式中: Q 表示流体的体积流率; r 和 L 分别表示毛细管的内径和长度; p_1 和 p_2 表示毛细管道前后端的压力。采用双毛细管测量流体黏度通常有两种方法,在本文实验工况下,毛细管膨胀造成的影响基本

可以忽略,因此选用标准流体测试法。标准流体法是一种基于相对法的黏度测量方法,通过已知黏度的标准流体进行标定。

基于标准流体在前后端毛细管的质量流量相等得到

$$\rho_{R,F} \frac{\Delta p_{R,F}}{\eta_{R,F} Z_{R,F}} = \rho_{R,B} \frac{\Delta p_{R,B}}{\eta_{R,B} Z_{R,B}} \quad (3)$$

式中: $\Delta p_{R,F}$ 和 $\Delta p_{R,B}$ 分别表示标准流体流经前后端毛细管的差压; $\eta_{R,F}$ 和 $\eta_{R,B}$ 分别表示标准流体流经前后端毛细管时的黏度; $\rho_{R,F}$ 和 $\rho_{R,B}$ 分别表示标准流体在前后端毛细管的密度; $Z_{R,F}$ 和 $Z_{R,B}$ 分别表示前后端毛细管的结构系数。

同理,在保持同一个恒流源的情况下,测试流体经过前后端毛细管的质量流量相等,即

$$\rho_{E,F} \frac{\Delta p_{E,F}}{\eta_{E,F} Z_{E,F}} = \rho_{E,B} \frac{\Delta p_{E,B}}{\eta_{E,B} Z_{E,B}} \quad (4)$$

式中: $\Delta p_{E,F}$ 和 $\Delta p_{E,B}$ 分别表示测试流体流经前后端毛细管的差压; $\eta_{E,F}$ 和 $\eta_{E,B}$ 分别表示测试流体流经前后端毛细管的黏度; $\rho_{E,F}$ 和 $\rho_{E,B}$ 分别表示测试流体在前后端毛细管的密度。两个毛细管采用相同规格且处于同一恒温水浴,因此结构系数在计算时可以消去。由式(3)、式(4)得到

$$\frac{\eta_{E,B} \eta_{R,F}}{\eta_{R,B} \eta_{E,F}} = \frac{\Delta p_{E,B} \Delta p_{R,F}}{\Delta p_{E,F} \Delta p_{R,B}} \frac{\rho_{E,B} \rho_{R,F}}{\rho_{E,F} \rho_{R,B}} \quad (5)$$

当标准流体和测试流体流经后端毛细管的差压相等时,可得到

$$\frac{\eta_{E,B}}{\eta_{R,B}} = \frac{Q_{R,B}}{Q_{E,B}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)并化简可得

$$\eta_{E,F} = \eta_{R,F} \frac{m_{R,B}}{m_{E,B}} \frac{\Delta p_{R,B}}{\Delta p_{R,F}} \frac{\Delta p_{E,F}}{\Delta p_{E,B}} \frac{\rho_{E,F}}{\rho_{R,F}} \quad (7)$$

式中 $m_{R,B}$ 和 $m_{E,B}$ 分别为标准流体和测试流体流经后端毛细管时的质量流量,且由于前后端质量流量相等($m_{E,B} = m_{E,F}$, $m_{R,B} = m_{R,F}$),可得到计算测试流体黏度的公式为

$$\eta_{E,F} = \eta_{R,F} \frac{Q_{R,F}}{Q_{E,F}} \frac{\Delta p_{R,B}}{\Delta p_{R,F}} \frac{\Delta p_{E,F}}{\Delta p_{E,B}} \quad (8)$$

2 气液饱和溶液黏度实验系统

2.1 实验系统的建立

基于双毛细管黏度计搭建的实验系统主要由黏度测量装置和平衡釜两部分组成,其中黏度测量部分由平流泵、恒温槽、毛细管、背压阀、温度测量系统、数据采集系统、真空系统等组成,具体如图1所示。

考虑到所测对象为气液饱和态,温度的变化会

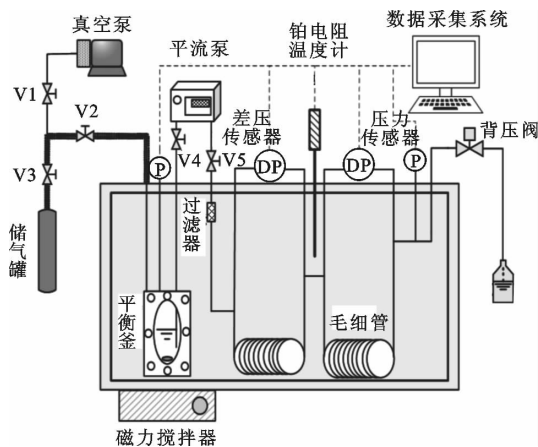


图1 流体黏度实验测量系统

造成其气液溶解度的变化,为了消除这一影响,区别于传统的双毛细管法,本文将两个毛细管以及平衡釜置于同一恒温水浴中。

为了测量不同黏度范围的流体,根据实验测试流体黏度范围分别选择直径为 0.25 mm(长度为 3 m)和直径为 1 mm(长度为 1.5 m)的两种毛细管。毛细管取压端前后有 0.15 m 的直管段,以保证流体经过差压传感器时流动状态稳定。毛细管压力测量采用美国 Omega 公司生产的 PX409 系列差压传感器,差压传感器量程为 0~345 kPa,测量精度为 0.08%。背压阀采用世伟洛克公司生产的 KPB 系列背压阀,最大压力为 13.7 MPa,通过调节背压阀控制流体在实验管道的压力。

气液饱和溶液在平衡釜内配置完成,平衡釜上方的压力传感器记录平衡压力。在温度、压力一定时,利用相平衡模型可以计算出此状态下饱和溶液的溶解度。待平衡釜内流体达到气液相平衡时,通过恒流泵将平衡釜内的气液饱和溶液在一定压力和流量下输送到毛细管黏度测试管路,整个过程持续时间很短,通常只需几秒钟,以保证流体在进入管道时气液饱和状态不变。在黏度测试过程中,需要实时调整背压阀控制流体在黏度测试管路的压力为气液平衡压力,通过计算可得到饱和溶液的黏度。需要特别说明的是,本文所搭建的系统主要用于测量气体溶解在液相达到饱和状态且液相饱和和蒸气压可忽略的流体的黏度。

恒流泵为神州微科 2PB-1040 系列,流量范围 0.01~10 mL/min。平衡釜采用 304 不锈钢腔体和不锈钢管路以及压力传感器组成,平衡釜腔体体积约为 500 cm³。黏度装置和平衡釜都放置在恒温槽中,恒温槽的温度波动度小于 0.01 K。测温时采用

的是 Pt100 铂电阻(Fluke 5608),其不确定度小于 0.03 K(置信因子 $k=2$)。压力传感器由北京远东罗斯蒙特仪表有限公司生产,型号 Rosemount 3051T,最大量程 5.5 MPa,传感器精度为 0.025%,不确定度为 2 kPa(置信因子 $k=2$)。

2.2 实验系统不确定度分析

根据国际组织对标准不确定度的规定,实验中测量值的合成不确定度可通过下式计算

$$U = ku_c = k \left(\sum u_i^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中: u_i 为各个误差的标准差; u_c 为合成标准差; k 为置信因子,本文取 $k=2$ (置信度为 95%)。气液饱和和流体黏度实验系统的不确定度由气液平衡系统的不确定度和双毛细管黏度测试的不确定度构成,具体不确定度分析如表 1 所示。

表1 黏度测试系统的不确定度

测量系统	仪器名称	不确定度
溶解度系统	压力传感器	2 kPa
	铂电阻温度计	0.03 K
	温度控制器	0.01 K
双毛细管黏度系统	差压传感器	0.3 kPa
	平流泵体积流量	0.01 mL · min ⁻¹
	压力传感器	2 kPa
参考流体黏度		1%
饱和溶液黏度		4%

3 黏度实验系统性能测试

为了验证双毛细管实验装置的可靠性,本文首先针对常规有机物的黏度进行性能测试。采用去离子水作为标准流体,对乙醇和正庚烷的黏度进行测试,得到了温度在 278.15~353.15 K 范围内的乙醇和正庚烷的常压黏度,并与 REFPROP 9.1^[14] 中的值进行对比,结果列于表 2 和 3。乙醇黏度的文献值与实验值的绝对平均偏差为 1.13%,最大偏差为 2.24%,正庚烷黏度的文献值与实验值的绝对平均偏差为 0.89%,最大偏差为 1.99%,测试结果验证了双毛细管测量装置的可靠性。

众所周知,离子液体的黏度比常规液体要高,因此为了保证实验过程中测量管路差压值的准确性和稳定性,本文选取直径为 1 mm 的管路并选用角鲨烷^[15-16] 作为标准流体进行测试,得到常压($p=0.1$ MPa)下温度在 283.15~353.15 K 范围内的离子液体[Hmim][Tf₂N]的黏度,结果如表 4 所示。离子

表 2 乙醇的黏度实验值与文献值^[14]的对比

T/K	$\eta_{\text{exp}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\eta_{\text{lit}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$(\eta_{\text{lit}}-\eta_{\text{exp}})\cdot\eta_{\text{lit}}^{-1}/\%$
278.15	1.603	1.635	1.96
283.15	1.505	1.472	-2.24
288.15	1.350	1.328	-1.66
293.15	1.204	1.202	-0.17
298.15	1.100	1.091	-0.82
303.15	1.003	0.992	-1.11
308.15	0.898	0.905	0.77
313.15	0.820	0.827	0.85
318.15	0.763	0.757	-0.79
323.15	0.701	0.695	-0.86
328.15	0.645	0.639	-0.94
333.15	0.586	0.589	0.51
338.15	0.551	0.544	-1.29
343.15	0.508	0.503	-0.99
348.15	0.474	0.466	-1.72
353.15	0.427	0.433	1.39

表 4 [Hmim][Tf₂N]的黏度实验值与文献值的对比

T/K	$\eta_{\text{exp}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\eta_{\text{lit}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$(\eta_{\text{lit}}-\eta_{\text{exp}})\cdot\eta_{\text{lit}}^{-1}/\%$
283.15	155.84	161.3 ^[17]	3.38
		153.3 ^[18]	-1.66
		148 ^[19]	-5.30
293.15	90.13	90.5 ^[17]	0.41
		86 ^[19]	-4.80
		89.54 ^[18]	-0.66
303.15	55.5	55.7 ^[17]	0.36
		57 ^[18]	2.63
		56.11 ^[19]	1.09
313.15	37.4	37 ^[19]	-1.08
		37.41 ^[18]	0.03
		36.2 ^[20]	-3.31
323.15	25.21	24.9 ^[21]	-1.24
		26 ^[19]	3.04
		26.25 ^[18]	3.96
333.15	19.2	18.6 ^[20]	-3.23
		18.8 ^[17]	-0.02
		19 ^[19]	-1.05
343.15	14.35	15 ^[20]	4.33
		14.1 ^[17]	-1.77
		14.58 ^[18]	1.58
353.15	11.35	10.7 ^[17]	-6.07
		11.38 ^[18]	0.26
		11.4 ^[20]	0.44

323.15 和 343.15 K 时制冷剂 R134a 与离子液体 [Hmim][Tf₂N]在不同溶解度下的气液饱和溶液的黏度,结果如表 5 所示。

图 2 给出了 R134a 与 [Hmim][Tf₂N]饱和溶液在 3 个温度下对应不同溶解度的黏度实验值与文献值的对比,从图中可以看出,3 个温度下 R134a 与 [Hmim][Tf₂N]饱和溶液的黏度实验值与文献值的变化趋势一致。

本文将测试得到的黏度实验值拟合成如下的多项式形式^[22]

$$\ln \frac{\eta_{\text{mix}}}{\eta_{\text{p}}} = [k_{10} + k_{11} T + k_{12} T^2]x + [k_{20} + k_{21} T + k_{22} T^2]x^2 \quad (10)$$

式中: η_{mix} 表示气液混合物的黏度; η_{p} 表示液相纯质的黏度; x 为气相摩尔分数; k_{ji} 通过混合物黏度实验数据拟合得到,具体取值如表 6 所示。图 3 给出了

表 3 正庚烷的黏度实验值与文献值^[14]的对比

T/K	$\eta_{\text{exp}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$\eta_{\text{lit}}/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$(\eta_{\text{lit}}-\eta_{\text{exp}})\cdot\eta_{\text{lit}}^{-1}/\%$
278.15	0.508	0.500	-1.60
283.15	0.472	0.469	-0.64
288.15	0.442	0.441	-0.23
293.15	0.417	0.416	-0.24
298.15	0.388	0.393	1.27
303.15	0.371	0.367	-1.09
308.15	0.354	0.352	-0.57
313.15	0.332	0.334	0.60
318.15	0.318	0.317	-0.32
323.15	0.308	0.302	-1.99
328.15	0.292	0.288	-1.39
333.15	0.279	0.274	-1.82
338.15	0.263	0.262	-0.38
343.15	0.251	0.250	-0.40
348.15	0.238	0.240	0.83
353.15	0.231	0.229	-0.87

液体 [Hmim][Tf₂N]的黏度文献值^[17-21]与实验值的绝对平均偏差为 2.15%,最大偏差为 6.07%。

在对双毛细管黏度实验装置评估的基础上,本文进一步验证了双毛细管和溶解度装置集成后的系统测量气液饱和和溶液黏度的可靠性。选用角鲨烷作为标准流体,实验研究了温度为 298.15、

表 5 R134a 与离子液体[Hmim][Tf₂N]的气液饱和溶液黏度实验数据

<i>T</i> /K	<i>p</i> /MPa	<i>x</i>	<i>η</i> /mPa · s
298.15	0.158	0.127	66.435
	0.213	0.235	61.398
	0.309	0.403	54.047
	0.405	0.545	45.692
323.15	0.348	0.256	21.823
	0.447	0.318	20.531
	0.484	0.341	19.645
	0.565	0.391	18.412
	0.591	0.407	17.654
	0.659	0.448	16.218
	0.706	0.476	15.403
	0.861	0.568	12.723
	0.946	0.617	11.559
	1.072	0.689	9.750
343.15	0.310	0.157	12.548
	0.406	0.192	12.412
	0.590	0.259	11.625
	0.719	0.306	11.123
	0.902	0.374	9.523
	1.049	0.429	9.030
	1.253	0.506	7.728
	1.480	0.593	6.426
	1.707	0.681	5.518
	1.930	0.768	4.301

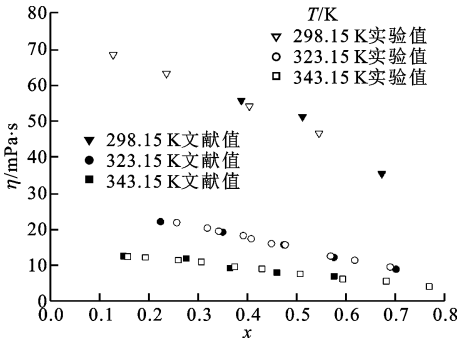


图 2 R134a 与[Hmim][Tf₂N]饱和溶液在不同溶解度下的黏度实验值与文献值^[8]的对比

本文实验值与方程(10)计算值的偏差分布,同时也给出了文献值^[8]与方程(10)计算值的偏差情况。本文实验值与计算值的绝对平均偏差为 1.42%,最大偏差为 2.86%;文献值与计算值的绝对平均偏差为 3.44%,最大偏差为 9.73%。

表 6 公式(10)中的参数取值

<i>k</i> ₁₀	<i>k</i> ₁₁	<i>k</i> ₁₂	<i>k</i> ₂₀	<i>k</i> ₂₁	<i>k</i> ₂₂
−76.344	0.479	−0.000 7	178.49	−1.112	0.001 7

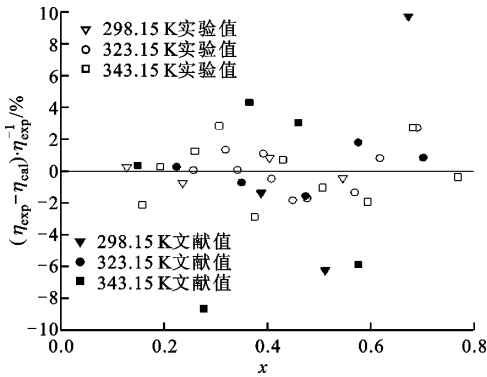


图 3 实验值和文献值^[8]与计算值的偏差分布

4 结 论

将相平衡装置与双毛细管黏度测量系统进行了集成,搭建了一套可以用于测量气液平衡状态时饱和液相流体黏度的实验系统,经评估,所搭建的实验系统黏度测量的不确定度在 4% 以内。采用不同管径的毛细管测试了乙醇、正庚烷、离子液体[Hmim][Tf₂N]的黏度,实验值与文献值的绝对平均偏差都小于 3%,证明了黏度测试系统的可靠性。当温度为 298.15、323.15 和 343.15 K 时,通过测量 R134a 气体在离子液体[Hmim][Tf₂N]中不同溶解度下对应的黏度,并与文献值对比,证明了所提出的气液平衡时饱和溶液黏度测量方法的可行性,为后续研究奠定了基础。

参考文献:

[1] REN W, SCURTO A M. Phase equilibria of imidazolium ionic liquids and the refrigerant gas, 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R-134a) [J]. Fluid Phase Equilibria, 2009, 286(1): 1-7.

[2] SHIFLETT M B, YOKOZEKI A. Vapor-liquid-liquid equilibria of hydrofluorocarbons+1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [J]. Journal of Chemical Engineering and Data, 2006, 51(5): 1931-1939.

[3] SHIFLETT M B, HARMER M A, JUNK C P, et al. Solubility and diffusivity of difluoromethane in room-temperature ionic liquids [J]. Journal of Chemical Engineering and Data, 2006, 51(2): 483-495.

[4] SHIFLETT M B, YOKOZEKI A. Binary vapor-liquid and vapor-liquid liquid equilibria of hydrofluorocarbons (HFC-125 and HFC-143a) and hydrofluoroethers (HFE-125 and HFC-143a) with ionic liquid

- [Emim][Tf₂N] [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2008, 53(2): 492-497.
- [5] KIM Y S, CHOI W Y, JANG J H, et al. Solubility measurement and prediction of carbon dioxide in ionic liquids [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2005, 228/229 (3): 439-445.
- [6] WANG X P, ZHANG Y, WANG D B, et al. Phase equilibrium of tran-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene with three imidazolium ionic liquids [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2017, 62(6): 1825-1831.
- [7] AHOSSEINI A, ORTEGA E, SENSENICH B, et al. Viscosity of n-alkyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) amide ionic liquids saturated with compressed CO₂ [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2009, 286(1): 62-68.
- [8] AHOSSEINI A, REN W, WEATHERLEY L R, et al. Viscosity and self-diffusivity of ionic liquids with compressed hydrofluorocarbons: 1-hexyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) amide and 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, 437(15): 34-42.
- [9] TOMIDA D, KUMAGAI A, QIAO K, et al. Viscosity of 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate plus CO₂ mixture [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2007, 52(5): 1638-1640.
- [10] YANG Z Q, LIU Z H, BI Q C, et al. Viscosity measurements of hydrocarbon fuel at temperatures from (303.2 to 513.2) K and pressures up to 5.1 MPa using a two-capillary viscometer [J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 617(10): 1-7.
- [11] LIU Z H, TRUSLER J P M, BI Q C. Viscosities of liquid cyclohexane and decane at temperatures between (303 and 598) K and pressures up to 4 MPa measured in a dual-capillary viscometer [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2015, 60(8): 2363-2370.
- [12] 杨竹强, 冯松, 潘辉, 等. 双毛细管式碳氢化合物黏度测量方法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 37-41.
- YANG Zhuqiang, FENG Song, PAN Hui, et al. Viscosity measurement of hydrocarbons using a two-capillary viscometer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 37-41.
- [13] 冯松, 毕勤成, 刘朝晖, 等. 采用双毛细管等流量法测量航空煤油 PR-3 的动力黏度 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(3): 48-53.
- FENG Song, BI Qincheng, LIU Zhaohui, et al. Viscosity measurement of hydrocarbons using a two-capillary viscometer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(3): 48-53.
- [14] LEMMON E W, HUBER M L. NIST reference fluid, thermodynamic and transport properties: REFPROP [CP]. version 9.1. Boulder, USA: National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [15] HARRIS R K. Temperature and pressure dependence of the viscosities of 2-ethylhexyl Benzoate, Bis (2-ethylhexyl) Phthalate, 2,6,10,15,19,23-Hexamethyltetracosane (Squalane), and diisodecyl phthalate [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2009, 54: 2729-2738.
- [16] COMUNAS M J. Reference correlation of the viscosity of squalane from 273 to 373 K at 0.1 MPa [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2013, 42(3): 1011-1016.
- [17] TOKUDA H, TSUZUKI S, SUSAN M A, et al. How ionic are room-temperature ionic liquids? an indicator of the physicochemical properties [J]. *Journal of Physical Chemistry: B*, 2006, 110(39): 19593-19600.
- [18] WIDEGREN J A, MAGEE J W. Density, viscosity, speed of sound, and electrolytic conductivity for the ionic liquid 1-hexyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide and its mixtures with water [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2007, 52(6): 2331-2338.
- [19] CROSTHWAITE J M, MULDOON M J, DIXON J K, et al. Phase transition and decomposition temperatures, heat capacities and viscosities of pyridinium ionic liquids [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2005, 37(6): 559-568.
- [20] KANDIL M E, MARSH K N, GOODWIN A R H. Measurement of the viscosity, density, and electrical conductivity of 1-hexyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide at temperatures between (288 and 433) K and pressures below 50 MPa [J]. *Journal of Chemical Engineering and Data*, 2007, 52(6): 2382-2387.
- [21] AHOSSEINI A, SCURTO A M. Viscosity of imidazolium-based ionic liquids at elevated pressures: cation and anion effects [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2008, 29(4): 1222-1243.
- [22] JALILI A H, SHOKOUHI M, SAMANI F, et al. Measuring the solubility of CO₂ and H₂S in sulfolane and the density and viscosity of saturated liquid binary mixtures of (sulfolane + CO₂) and (sulfolane + H₂S) [J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2015, 85: 13-25.

(编辑 荆树蓉)