

制冷剂 R1233zd(E) 高压液相密度测量及分析

刘壮¹, 马玉田¹, 康凯², 王晓坡¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 长安大学建筑工程学院, 710061, 西安)

摘要: 为了进一步拓宽新型环保烯烃类制冷剂反式-1-氯-3,3,3-三氟丙烯(R1233zd(E))液相密度的测量范围,为建立其高精度的状态方程提供可靠的数据,采用振动管密度计测量了 R1233zd(E) 的高压液相密度,研究的温度范围为 283.15~363.15 K,压力范围为 1~60 MPa。经计算,密度测量的扩展不确定度小于 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (95% 置信区间)。将测量得到的实验数据拟合成 Tait 型关联式,分析结果显示,方程密度计算值与实验数据的平均绝对偏差为 0.02%,最大绝对偏差为 0.05%。此外,计算得到了 R1233zd(E) 的等温压缩率、体膨胀系数、内压等导出热力学性质。结果表明,随着压力升高或温度降低,等温压缩率和体膨胀系数逐渐降低,而内压则逐渐增加。所得结论可为 R1233zd(E) 的进一步工程应用提供基础的物性数据。

关键词: 振动管密度计; R1233zd(E); Tait 方程; 导出热力学性质

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202212020 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0192-07

Experimental Measurement and Analysis of High-Pressure Liquid Densities of Refrigerant R1233zd(E)

LIU Zhuang¹, MA Yutian¹, KANG Kai², WANG Xiaopo¹

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

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To further expand the measurement range of the liquid density of trans-1-chloro-3,3,3-trifluoroprop-1-ene [R1233zd(E)] which is a new environmentally-friendly olefin refrigerant, and to provide the reliable data for the establishment of the high-accuracy equation of state, high-pressure liquid density of R1233zd(E) was measured with a vibrating-tube densimeter within a temperature range of 283.15 K to 363.15 K and a pressure range of 1 MPa to 60 MPa. The expanded uncertainty for the present density measurement was less than $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ at a confidence level of 95%. The measured density was fitted with a Tait-type equation. The average absolute deviation and maximum absolute deviation between the measured density and the calculated density were 0.02% and 0.05%, respectively. In addition, the derived thermodynamic properties such as isothermal compressibility, isobaric thermal expansivity and internal pressure were obtained. As the pressure increases or the temperature decreases, the isothermal compressibility and isobaric thermal expansivity decrease and the internal pressure increases. The obtained results can provide the fundamental thermophysical property data for the further engineering application of R1233zd(E).

收稿日期: 2022-07-16。 作者简介: 刘壮(1997—),男,硕士生;王晓坡(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52006015,51936009)。

网络出版时间: 2022-09-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220905.1216.002.html>

Keywords: vibrating-tube densimeter; R1233zd(E); Tait equation; derived thermodynamic property

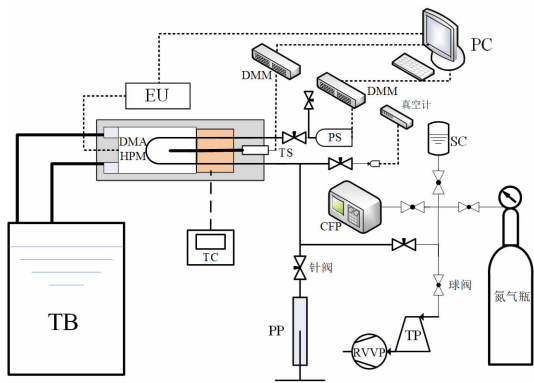
在制冷领域中,氢氯氟烃(HCFC)以及氢氟烃(HFC)等制冷工质的大量使用造成的环境问题越来越引起人们的关注^[1-2]。国际社会签署了包括基加利修正案在内的多份国际协议,以限制世界各国对高全球变暖潜值(GWP)和臭氧消耗潜值(ODP)制冷剂的使用。因此,寻找新型替代环保制冷工质迫在眉睫^[3-4]。R1233zd(E)(反式-1-氯-3,3,3-三氟丙烯,分子式:CF₃CH=CHCl,CAS:102687-65-0)是近年来提出的一种烯烃类环保制冷剂,其 ODP 约为 0、GWP 约等于 1,被认为是下一代离心式冷水机组、高温热泵、有机朗肯循环等的潜在工质^[5-7]。准确的热物理性质对于新型制冷剂的工程应用非常重要,国内外研究人员已对 R1233zd(E)的临界参数^[8]、饱和蒸气压^[9]、比热容^[10]、黏度^[11]、表面张力^[11]、声速^[12-13]及其与润滑油的相溶性^[14]等性质展开了大量的研究。

工质的 p - ρ - T 数据是研究其高精度状态方程的基础,进而可以计算焓、熵等热力学参数。文献调研显示,R1233zd(E)的液相 p - ρ - T 性质实验研究还比较欠缺。Mondéjar 等利用双浮子密度计测量了 R1233zd(E)压力范围为 0.48~24.08 MPa、温度范围为 215~444 K 内的液相密度^[13];Romeo 等^[15]和 Fedele 等^[16]利用振动管密度计测量了压力范围为 0.133~35 MPa、温度范围为 274~363 K 内的液相密度。此外,Akasaka 和 Lemmon^[17]建立了 R1233zd(E)的 Helmholtz 型的高精度状态方程,其适用的压力范围有限。

为了进一步扩展 R1233zd(E)液相密度的实验范围,本文基于课题组的振动法密度实验系统对其高压液相密度进行了实验研究,温度测量范围为 283.15~363.15 K,压力测量范围为 1~60 MPa。同时,计算得到了 R1233zd(E)的等温压缩率、体膨胀系数、内压等导出热力学性质。

1 实验系统及标定

R1233zd(E)由霍尼韦尔公司提供,其纯度(质量分数)高于 99.95%。在往实验系统充注前,采用液氮抽真空的方法对其含有的不凝性气体进行了处理。本文所用的高压振动法密度实验系统如图 1 所示^[18-19],主要包括振动管本体、温度和压力测量系统、温度和压力控制系统及真空系统。



PP—手动增压泵;TC—温度控制器;TS—电阻温度传感器;PS—压力传感器;CFP—平流泵;SC—样品瓶;TP—涡轮分子泵;RVVP—旋片式真空泵;TB—恒温槽;EU—MPDS-5 单元;DMM—数字万用表;PC—计算机。

图 1 高压振动管密度计实验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system of the high-pressure vibrating-tube densimeter

振动管本体为 Anton Paar 公司的 DMA HPM 高温高压模块,包含测量单元(U 型振动管)和接口模块(MPDS-5 单元)。待测液体在 U 型振动管中,接口模块用于激励振动管的振动并测量振动周期,同时利用 mPDS-5 单元中的数据处理器和工控机实现所测量的振动周期的输出,进而可以计算得到所测液体的密度。

测量时,为了保证振动管中的待测液体温度保持稳定,采用恒温槽(Fluke 7037)和外循环联合的方式,将循环管路包围在振动管四周,并采用保温层包裹。利用标定后的铂电阻温度计(Fluke 5608)来测量待测工质的温度,其测量精度优于 10 mK。经不确定度计算,实验系统的温度测量的扩展不确定度为 30 mK(包含因子为 2)。U 型管内待测工质的压力由 HIP 公司的高压手动泵来实现,其具体数值由 Paroscientific 公司的压力传感器(model:410K-101,精度等级为 0.01%)测量。压力测量的扩展不确定度为 0.04 MPa。

振动法测量流体密度属于间接测量法,需要通过参考物质对实验系统的仪器常数进行标定。Lagourette 等^[20]提出的标定方法仅需要一种参考物质,因此得到了广泛的应用。本文以纯水(电阻率为 $0.73 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)为参考物质,通过测量振动管中充满水和处于真空状态(管内绝对压力小于 5

Pa)时的振动周期对实验系统进行标定,具体标定结果见文献[21]。根据标定结果,所测工质的密度可以用下式计算得到

$$\rho(T,P)=\rho_{\text{H}_2\text{O}}(T,P)+\rho_{\text{H}_2\text{O}}(T,0.1\text{ MPa})\frac{\tau^2(T,P)-\tau_{\text{H}_2\text{O}}^2(T,P)}{\tau_{\text{H}_2\text{O}}^2(T,0.1\text{ MPa})-\tau_{\text{vacuum}}^2(T)}$$

(1)

式中 T 、 P 、 ρ 和 τ 分别表示温度、压力、密度和振动周期,下角标 H_2O 、vacuum 分别表示振动管中充满水以及振动管处于真空状态。其中,水的密度由 Wagner 和 Pruß 等^[22]提出的高精度状态方程计算得到。考虑 R1233zd(E)的纯度、标定时纯水的密度和振动周期、真空状态的振动周期以及温度和压力测量等的不确定度,根据不确定度传递规律^[23-24],可以得到本文所测量得到的 R1233zd(E)的密度扩展不确定度小于 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (包含因子为 2)。

2 结果与讨论

2.1 实验数据及分析

本文测量了 R1233zd(E)在温度为 $283.15\sim 363.15\text{ K}$ 、压力为 $1\sim 60\text{ MPa}$ 内的液相密度。沿着 9 条等温线和 12 条等压线共获得了 103 组数据点,实验结果如表 1 所示。可以看出,R1233zd(E)的液相密度随着压力的升高而增大,随着温度的上升而减小。

为了便于工程实际应用,将 R1233zd(E)密度实验结果拟合成 Tait 形式的方程,其表达式^[25]为

$$\rho=\frac{\rho_s}{1-\text{Cln}((\beta+p)/(\beta+p_s))}$$

$$p_s=p_c\exp\left(\frac{A_1\tau+A_2\tau^{1.5}+A_3\tau^{2.5}+A_4\tau^5}{1-\tau}\right)$$

$$\rho_s=\rho_c(1+B_1\tau^{1/3}+B_2\tau^{2/3}+B_3\tau+B_4\tau^{4/3})$$

$$\beta=p_c(-1+a\tau^{1/3}+b\tau^{2/3}+d\tau+e\tau^{4/3})$$

$$\tau=1-T/T_c$$

式中: p_s 和 ρ_s 分别表示饱和蒸气压及饱和液相密度,其数值取自文献[13]和文献[16]; T_c 、 p_c 和 ρ_c 表示 R1233zd(E)的临界温度、临界压力和临界密度,其值取自软件 REFPROP 10.0; $A_1\sim A_4$ 、 $B_1\sim B_4$ 、 a 、 b 、 C 、 d 、 e 为方程的参数,通过实验数据回归得到,结果如表 2 所示。

表 2 同时给出了用上述方程计算得到的密度与实验数据的绝对平均偏差(δ_{AAD})、最大偏差(δ_{MAD})、平均偏差(δ_{bias})及标准偏差(σ),计算式分别为

$$\delta_{\text{AAD}}=\frac{100}{N}\sum_{i=1}^N\left|\frac{\rho_i^{\text{exp}}-\rho_i^{\text{cal}}}{\rho_i^{\text{exp}}}\right|$$

(7)

$$\left\{\begin{aligned}\delta_{\text{MAD}}&=\max\left(100\left|\frac{\rho_i^{\text{exp}}-\rho_i^{\text{cal}}}{\rho_i^{\text{exp}}}\right|\right)\\i&=1,\cdots,N\end{aligned}\right.$$

(8)

$$\delta_{\text{bias}}=\frac{100}{N}\sum_{i=1}^N\frac{\rho_i^{\text{exp}}-\rho_i^{\text{cal}}}{\rho_i^{\text{exp}}}$$

(9)

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(\rho_i^{\text{exp}}-\rho_i^{\text{cal}})^2}{N-m}}$$

(10)

式中: $N=103$ 是实验数据量; $m=9$ 是待拟合参数量。

表 1 R1233zd(E)液相密度实验数据

Table 1 Experimental density data of liquid R1233zd(E)

p/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$								
	283.15 K	293.15 K	303.15 K	313.15 K	323.15 K	333.15 K	343.15 K	353.15 K	363.15 K
1.0	1 300.4	1 276.6	1 252.8	1 227.8	1 202.3				
3.0	1 305.6	1 282.3	1 258.9	1 235.1	1 209.7	1 183.8	1 156.7	1 128.7	
5.0	1 310.3	1 287.6	1 264.8	1 241.8	1 216.9	1 192.1	1 166.4	1 139.4	1 111.7
10.0	1 321.5	1 299.8	1 278.4	1 256.4	1 233.6	1 210.6	1 187.0	1 163.0	1 138.3
15.0	1 331.9	1 311.1	1 290.6	1 269.8	1 248.2	1 226.9	1 204.7	1 182.4	1 160.3
20.0	1 341.5	1 321.5	1 301.9	1 282.2	1 262.0	1 241.3	1 220.6	1 199.6	1 179.0
25.0	1 350.6	1 331.2	1 312.4	1 293.4	1 274.1	1 254.6	1 234.6	1 215.3	1 195.4
30.0	1 359.3	1 340.7	1 322.3	1 304.3	1 285.3	1 266.6	1 247.6	1 229.1	1 210.2
35.0	1 367.6	1 349.4	1 331.5	1 314.3	1 295.7	1 277.7	1 259.6	1 242.1	1 223.8
40.0	1 375.4	1 357.5	1 340.2	1 323.0	1 305.3	1 288.2	1 270.2	1 253.5	1 236.3
50.0	1 389.6	1 372.9	1 356.4	1 340.1	1 323.4	1 307.1	1 290.5	1 274.8	1 258.6
60.0	1 403.0	1 386.5	1 371.1	1 355.1	1 339.8	1 324.1	1 308.1	1 293.4	1 278.5

表 2 R1233zd(E)的 Tait 方程参数与偏差
Table 2 The regressed coefficients in Tait equation for R1233zd(E) and the deviations

参数	数值	参数	数值
T_c/K	439.60	B_4	-9.619 6
p_c/MPa	3.623 7	C	0.087 9
$\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	480.23	a	-15.023 7
A_1	-7.878 5	b	133.587 8
A_2	3.082 5	d	-332.710 7
A_3	-5.207 1	e	298.409 9
A_4	-7.006 2	$\delta_{\text{AAD}}/\%$	0.02
B_1	4.661 8	$\delta_{\text{MAD}}/\%$	0.05
B_2	-12.277 5	$\delta_{\text{bias}}/\%$	0.002
B_3	19.642 4	$\sigma/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.27

图 2 给出了 Tait 方程的计算值与本文实验数据的偏差分布。为了比较,图 2 同时也给出了 Tait 方程计算值与文献实验数据的偏差分布。图中, ρ_{exp} 表示本文或文献的密度实验值, ρ_{cal} 表示在实验数据工况下 Tait 方程的密度计算值。

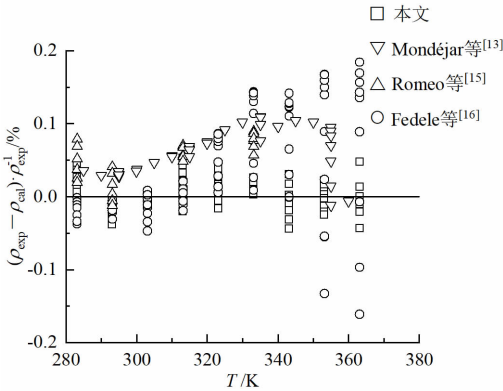


图 2 R1233zd(E)液相密度数据与 Tait 方程计算值的偏差
Fig. 2 Deviations between the experimental liquid densities of the R1233zd(E) and the calculated values from Tait equation

从图 2 可以看出,本文结果与 Mondéjar 等^[13]、Romeo 等^[15]及 Fedele 等^[16]文献值的最大绝对偏差均在 0.2% 以内,平均绝对偏差分别为 0.05%、0.06% 及 0.06%,说明本文所得结果与文献数据具有较好的一致性。此外,如前所述,Akasaka 和 Lemmon 建立了一个 R1233zd(E)的 Helmholtz 型高精度状态方程,其压力适用的范围最大为 35 MPa^[17]。将该方程的计算值与本文的实验数据进行对比,偏差如图 3 所示。可以看出,本文实验值

与该方程的计算值在 35 MPa 以内吻合较好,偏差几乎都在 0.1% 以内。超过 35 MPa 以后,偏差有增大的趋势,最大偏差为 0.16%。

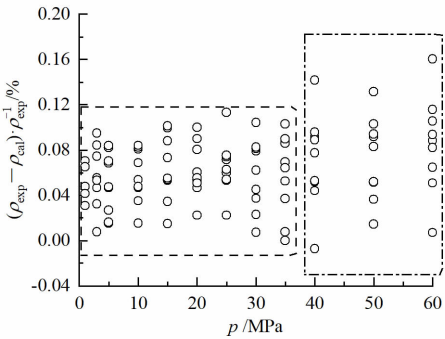


图 3 R1233zd(E)液相密度数据与 Akasaka 方程计算值^[17]的比较
Fig. 3 Comparison between the experimental liquid densities of the R1233zd(E) and Akasaka equation^[17]

2.2 导出热力学性质

通过工质的密度数据可以计算导出热力学性质,如等温压缩率 κ_T 、体膨胀系数 α_p 、内压 π 、比热容差 $c_p - c_v$,计算式分别为

$$\kappa_T = \left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \tag{11}$$

$$\alpha_p = -\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \tag{12}$$

$$\pi = \left(\frac{U_m}{V_m}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{V_m} - p = \frac{T\alpha_p}{\kappa_T} - p \tag{13}$$

$$c_p - c_v = \frac{T\alpha_p^2}{\rho\kappa_T} \tag{14}$$

图 4~7 分别给出了 R1233zd(E)的等温压缩率、体膨胀系数、内压和比热容差随温度和压力的变化规律。可以看出,R1233zd(E)的等温压缩率和体

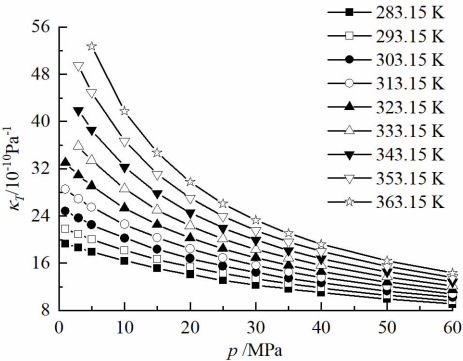


图 4 R1233zd(E)的等温压缩率随温度和压力的变化
Fig. 4 Variation of the isothermal compressibility of R1233zd(E) with temperature and pressure

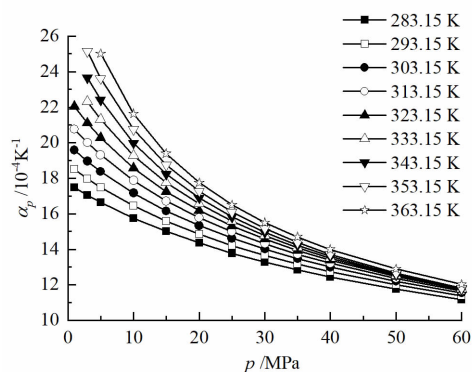


图5 R1233zd(E)的体膨胀系数随温度和压力的变化

Fig. 5 Variation of the isobaric thermal expansivity of R1233zd(E) with temperature and pressure

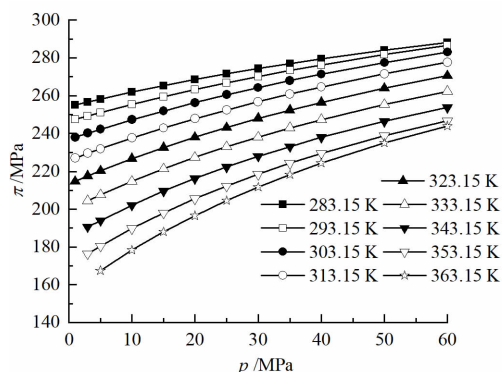


图6 R1233zd(E)的内压随温度和压力的变化

Fig. 6 Variation of internal pressure of R1233zd(E) with temperature and pressure

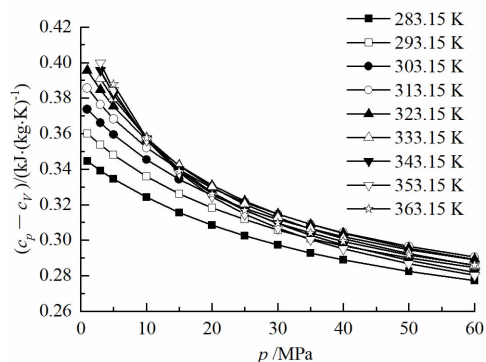


图7 R1233zd(E)的比热容差随温度和压力的变化

Fig. 7 Variation of difference between c_p and c_v of R1233zd(E) with temperature and pressure

膨胀系数的变化趋势基本一致,均随着压力的升高而降低,随着温度的升高而增大。R1233zd(E)的内压随温度的增加而降低,随着压力的增加而增加。内压通常视为引力项和斥力项的和,温度的增加使得工质分子热运动增强,导致内压斥力贡献项增大,

从而使得内压减小。比热容差随着压力的增加而降低,但随温度变化规律性不明显。由于实验中比定容热容难以测量,因此根据比热容差以及比定压热容实验数据可以计算得到对应的比定容热容。

3 结论

利用高压振动管密度计实验系统对温度为283.15~363.15 K、压力为1~60 MPa工况范围的R1233zd(E)的液相密度进行了实验研究,共获得了103组密度实验数据点。利用Tait型方程对实验数据进行了关联,并与文献值进行了对比,结果表明最大绝对偏差不超过0.2%,本文所得数据与文献值吻合良好。本文进一步拓宽了R1233zd(E)液相密度的测量范围,为建立其高精度宽范围的状态方程提供了可靠的数据。同时,根据实验数据获得了R1233zd(E)的等温压缩率、体膨胀系数、内压和比热容差随温度和压力的变化规律。R1233zd(E)的等温压缩率和体膨胀系数随着压力的升高而降低,随着温度的升高而增大,而其内压随着温度的增加而降低、随着压力的增加而增加。

参考文献:

- [1] 刘志刚, 吴江涛, 陈圣坤. 冰箱空调替代制冷剂的研究进展(上) [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 661-665.
LIU Zhigang, WU Jiangtao, CHEN Shengkun. Recent progress on alternatives to CFC12 and HCFC22; part 1 [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(7): 661-665.
- [2] 刘志刚, 吴江涛, 陈圣坤. 冰箱空调替代制冷剂的研究进展(下) [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 666-669.
LIU Zhigang, WU Jiangtao, CHEN Shengkun. Recent progress on alternatives to CFC12 and HCFC22; part 2 [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(7): 666-669.
- [3] BOBBO S, NICOLA G D, ZILIO C, et al. Low GWP halocarbon refrigerants; a review of thermophysical properties [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 90: 181-201.
- [4] 许晨怡, 郭智恺, 史婉君, 等. HFOs 制冷剂在制冷空调领域的替代研究综述 [J]. 制冷与空调, 2019, 19(8): 1-13.
XU Chenyi, GUO Zhikai, SHI Wanjun, et al. Substitution research summary of HFO refrigerants in refrigeration and air-conditioning field [J]. Refrigeration

- and Air-Conditioning, 2019, 19(8): 1-13.
- [5] 杨文娟, 张华, 郝文洋. 新型环保工质 R1233zd(E) 的研究进展 [J]. 制冷技术, 2021, 41(6): 79-86.
YANG Wenjuan, ZHANG Hua, HAO Wenyang. Research progress of new environmentally friendly working fluid R1233zd(E) [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2021, 41(6): 79-86.
- [6] WU Linli, CHEN Jun, WANG Shuangfeng. Experimental study on thermal performance of a pulsating heat pipe using R1233zd(E) as working fluid [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 135: 106152.
- [7] 姜佳彤, 胡斌, 王如竹, 等. R1233zd(E) 高温热泵用卧式冷凝器的换热动态模拟 [J]. 化工学报, 2021, 72(Z1): 98-105.
JIANG Jiatong, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. Dynamic simulation of horizontal condenser of R1233zd(E) high temperature heat pump [J]. CIESC Journal, 2021, 72(Z1): 98-105.
- [8] TANAKA K, AKASAKA R. Experimental determination of the critical parameters for trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoroprop-1-ene [R1233zd(E)] and cis-1-chloro-2, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene [R1224yd(Z)] [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 61-67.
- [9] YIN Jianguo, KE Jinjun, ZHAO Guanjia, et al. Experimental vapor pressures and gaseous PvT properties of trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoropropene (R1233zd(E)) [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 121: 253-257.
- [10] LIU Yu, ZHAO Xiaoming. Measurement of the heat capacity of R1233zd(E) [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 86: 127-132.
- [11] ZHAO Guanjia, YUAN Zemin, ZHANG Xing, et al. Saturated liquid kinematic viscosity, surface tension and thermal diffusivity of two low-GWP refrigerants 3, 3, 3-trifluoropropene (R1243zf) and trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoro-1-propene (R1233zd(E)) by light scattering method [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 127: 194-202.
- [12] PENG Xiayao, LIU Hangtao, XU Liu, et al. Experimental speed of sound for trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoroprop-1-ene (R1233zd(E)) and trans-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluorobut-2-ene (R1336 mzz(E)) in gaseous phase [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2022, 171: 106808.
- [13] MONDÉJAR M E, MCLINDEN M O, LEMMON E W. Thermodynamic properties of trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoropropene (R1233zd(E)): vapor pressure, (p , ρ , T) behavior, and speed of sound measurements, and equation of state [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2015, 60(8): 2477-2489.
- [14] 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, 70.
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, 70.
- [15] ROMEO R, GIULIANO ALBO P A, LAGO S, et al. Experimental liquid densities of cis-1, 3, 3, 3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234ze(Z)) and trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoropropene (R1233zd(E)) [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 79: 176-182.
- [16] FEDELE L, PIERANTOZZI M, DI NICOLA G, et al. Compressed liquid density and vapor phase PvT measurements of trans-1-Chloro-3, 3, 3-trifluoroprop-1-ene [R1233zd(E)] [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2018, 63(1): 225-232.
- [17] AKASAKA R, LEMMON E W. An international standard formulation for trans-1-chloro-3, 3, 3-trifluoroprop-1-ene [R1233zd(E)] covering temperatures from the triple-point temperature to 450 K and pressures up to 100 MPa [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2022, 51(2): 023101.
- [18] KANG Kai, WANG Xiaopo, YANG Fuxin, et al. Densities of diethylene glycol, monobutyl ether, diethylene glycol dibutyl ether, and ethylene glycol monobutyl ether from (283.15 to 363.15) K at pressures up to 60 MPa [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61(8): 2851-2858.
- [19] WANG Xiaopo, KANG Kai, LANG Hanxiao. High-pressure liquid densities and derived thermodynamic properties for methyl laurate and ethyl laurate [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2016, 103: 310-315.
- [20] LAGOURETTE B, BONED C, SAINT-GUIRONS H, et al. Densimeter calibration method versus temperature and pressure [J]. Measurement Science and Technology, 1992, 3(8): 699-703.
- [21] 康凯. 流体高压 PvT x 实验测量及基于 SAFT 模型的热力学性质研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2019.
- [22] WAGNER W, PRÜß A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2002, 31

- (2): 387-535.
- [23] CHIRICO R D, FRENKEL M, MAGEE J W, et al. Improvement of quality in publication of experimental thermophysical property data: challenges, assessment tools, global implementation, and online support [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2013, 58 (10): 2699-2716.
- [24] International Organization for Standardization. Uncertainty of measurement; part 3 guide to the expression of uncertainty in measurement; ISO/IEC Guide 98-3: 2008 [S]. Vernier, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008.
- [25] DI NICOLA G, STEVEN BROWN J, FEDELE L, et al. Subcooled liquid density measurements and PvT measurements in the vapor phase for 3,3,3-trifluoroprop-1-ene (R1243zf) [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(8): 2209-2215.

(编辑 陶晴 亢列梅)