

含油制冷剂 R134a 饱和液相运动黏度 及表面张力实验测量

何茂刚¹, 张颖¹, 费继友², 钟秋¹, 薛榕¹, 刘志刚¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 大连交通大学机械工程学院, 116028, 辽宁大连)

摘要: 以制冷剂 R134a 与润滑油的均匀混合物为研究对象, 对其饱和液体的运动黏度、表面张力进行了实验测量, 其中实验温度范围为 273.15~293.15 K, 润滑油牌号为 Solest120 且其质量分数分别为 20×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 100×10^{-6} 。实验数据显示, 随着含油量的增加, 含油 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力呈明显的递增趋势, 且润滑油对 R134a 饱和液体运动黏度的影响随温度的升高逐渐减弱, 对其表面张力的影响则随温度的升高逐渐增强。同时, 依据实验数据, 采用数学中常用的非线性回归法建立了含油 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力与温度、含油量之间的函数关系式, 其中运动黏度关系式的相对偏差绝对平均值为 2.22%, 表面张力关系式的相对偏差绝对平均值为 0.43%。

关键词: 含油 R134a; 实验测量; 运动黏度; 表面张力

中图分类号: TK121; TB61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1065-05

Kinematic Viscosity and Surface Tension of R134a Refrigerant-Oil Mixtures in Saturated Liquid Phase from 273.15 K to 293.15 K

HE Maogang¹, ZHANG Ying¹, FEI Jiyu², ZHONG Qiu¹, XUE Rong¹, LIU Zhigang¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: The kinematic viscosity and the surface tension of R134a and oil mixtures in saturated liquid phase from 273.15 K to 293.15 K are measured, the brand of the lubricant is Solest120 and its mass fractions are 20×10^{-6} , 50×10^{-6} , 80×10^{-6} and 100×10^{-6} , respectively. These experimental results indicate that at the same temperature, with the increase in mass fraction of lubricant, the kinematic viscosity and the surface tension of R134a refrigerant-oil mixtures in saturated liquid phase are enhanced significantly, the impact of lubrication on kinematic viscosity gradually decreases with the rising temperature and the impact of lubrication on surface tension gradually increases with the rising temperature. According to the experimental results, the principle of nonlinear regression is chosen to construct the relational expressions describing the relation between the kinematic viscosity, the surface tension and variation of temperature and mass fraction of lubricant, and their absolute averages of relative deviations reach to respectively 2.22% and 0.43% compared with the experimental results.

Keywords: R134a refrigerant-oil mixtures; experimental measurement; kinematic viscosity; surface tension

制冷剂 R134a 作为一种当前应用非常广泛的制冷工质,其热物理性质的实验及理论研究可追溯至 20 世纪 90 年代初期,主要包括:PV T_x 性质、临界性质、比热容、表面张力、黏度等^[1-4],这些热物理性质数据被广泛用作设计制冷循环的基础物性数据.然而,在实际制冷系统中,由于压缩机润滑油的加入,使得 R134a 的热物理性质偏离了其纯质的热物理性质,从而导致系统实际运行性能参数偏离设计性能参数.因此,有必要对含油 R134a 的热物理性质进行有针对性的研究,为设计新型制冷循环及其组成部件、改善现有制冷循环工作性能等研究方向提供含油 R134a 的热物理性质数据.

目前,对含油 R134a 的研究多集中在小尺寸管道内的流动特性及在不同换热模型中的换热特性等方面^[5-8],对其热物理性质的实验研究鲜有报道,仅有少量文献对含油制冷剂热物理性质的理论推算方法进行了报道,其中对含油 R134a 略有涉及^[9-12].

通过实验研究发现,润滑油对 R134a 的黏度及表面张力有较为明显的影响.因此,本文选用与 R134a 匹配良好的且较为常用的牌号为 Solest120 的润滑油,对含油量(质量分数 w)分别为 20×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 100×10^{-6} 的 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力进行了测量,测量温度范围为 273.15~293.15 K.依据实验数据,建立了 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力与温度、含油量之间的函数关系式,分析了随含油量的变化,上述两种物性参数的变化趋势.本文工作中,R134a 由中化近代环保化工(西安)有限公司生产,纯度(质量分数)为 99%,Solest 系列润滑油为美国 CPI 公司生产的专为环保制冷剂(HFC)压缩机服务的多元醇酯类(POE)合成润滑油,Solest120 润滑油的相关物理性质列于表 1.

表 1 Solest120 润滑油的物理性质

黏度(313.15 K)/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	12.77
黏度(373.15 K)/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1.27
黏度指数	90
密度/ $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$	9.41×10^{-4}
倾点/K	240.15
闪点/K	524.15
燃点/K	544.15

1 实验装置及测量不确定度分析

1.1 实验装置

本文采用倾斜管式黏度测量方法对含油 R134a

饱和液体的运动黏度进行测量,其测量原理详见文献[13].该方法通过测量倾斜管内一段液柱的匀速流动参数,得到不同温度和压力下液体的黏度,测量公式为

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= k_1 \sin \alpha + k_2 \\ k_1 &= \rho g R^2 / 8 \eta \\ k_2 &= 2 R \gamma (\cos \theta_{c,b} - \cos \theta_{c,f}) / 8 \eta l \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: η 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ν 为运动黏度, $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; α 为细管道与水平方向的夹角(简称细管道倾角), ($^\circ$); R 为细管道内径, mm ; γ 为表面张力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$; $\theta_{c,b}$ 为液柱后端面接触角, ($^\circ$); $\theta_{c,f}$ 为液柱前端面接触角, ($^\circ$); l 为液柱长度, mm ; τ 为剪切应力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; u_0 为液柱匀速运动时宏观匀速运动速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

本文采用毛细上升法测量含油 R134a 液体的表面张力,其测量原理详见文献[14].为避免液体在容器内的毛细上升的影响,消除液面不清晰带来的误差,本实验采用示差法.

毛细上升示差法测量表面张力采用的公式为

$$\gamma = g(\rho' - \rho'') \Delta h / 2(1/r_1 - 1/r_2) = \frac{1}{2} g a^2 (\rho' - \rho'') \quad (2)$$

式中: ρ' 为饱和液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ'' 为饱和气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Δh 为高度差; r_1 、 r_2 分别为两根毛细管的内径, mm ; a 为毛细常数, mm .

1.2 测量不确定度分析

根据国际标准组织对实验不确定度的规定,本实验中测量值的合成不确定度为

$$U = k u_c = k \left(\sum (u_i)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: u_i 为各误差来源的标准差; u_c 为各误差合成的标准差; k 为置信系数,通常取 2 或 3.当 $k=2$ 时,置信度为 95%;当 $k=3$ 时,置信度为 99%.本实验取 $k=2$,所采用的黏度及表面张力测量系统的不确定度见表 2.

表 2 黏度、表面张力测量系统的不确定度

测量系统	不确定度	数值
黏度	温度/mK	± 20.6
	压力/kPa	± 3.72
	黏度/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	± 0.0013
表面张力	温度/mK	± 10
	压力/kPa	± 3.72
	表面张力/ $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	± 0.2

2 实验结果及分析

2.1 含油 R134a 的运动黏度

表 3 给出了含油量分别为 20×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 100×10^{-6} 时,含油 R134a 饱和液体在温度 273.15~293.15 K 范围内的运动黏度.图 1 给出了 4 种含油量下,含油 R134a 饱和液体的运动黏度随温度的变化曲线.

上述实验数据显示,同一温度下,随着含油量的增加,含油 R134a 饱和液体的运动黏度呈明显的递增趋势.润滑油对 R134a 饱和液体运动黏度的影响随温度的升高逐渐减弱,即在低温区域内,随含油量的增加,R134a 饱和液体的运动黏度增加明显,在高温区域内,随含油量的增加,R134a 饱和液体的运动黏度增加不显著.

基于上述实验数据,采用非线性回归法建立含油 R134a 的运动黏度与温度、含油量之间的函数关系式如下

$$\nu = (1 - 0.002\,38T + 1.147\,39 \times 10^{-5}T^2 - 2.991\,56 \times 10^{-8}T^3)(\omega \times 10^6)^{0.028\,91} \quad (4)$$

图 2 给出了式(4)的计算值与实验值之间的偏差.如图所示,计算数据的相对偏差处于-10.76%~3.51%之间,相对偏差绝对平均值为 2.22%.

2.2 含油 R134a 的表面张力

表 4 给出了含油量分别为 20×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 100×10^{-6} 时,含油 R134a 饱和液体在温度 273.15~293.15 K 范围内的表面张力.图 3 给出了 4 种含油量下,含油 R134a 饱和液体表面张力随温度的变化曲线.

上述实验数据显示,同一温度下,随着含油量的增加,含油 R134a 饱和液体的表面张力呈明显的递增趋势.润滑油对 R134a 饱和液体表面张力的影响随温度的升高逐渐增强,即在低温区域内,随含油量的增加,R134a 饱和液体的表面张力增加不显著,在高温区域内,随含油量的增加,R134a 饱和液体的表面张力增加显著.

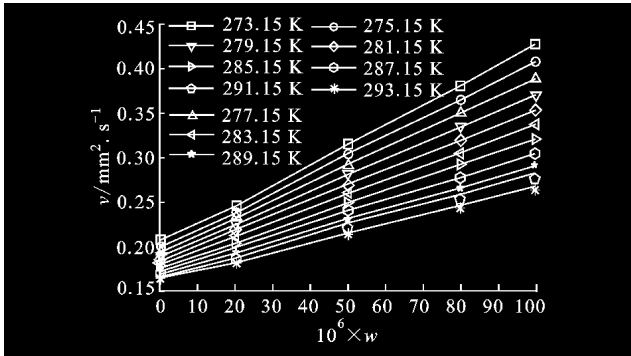


图 1 含油 R134a 饱和液体的运动黏度随含油量的变化

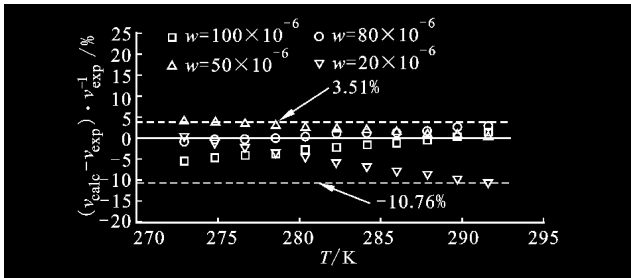


图 2 黏度计算值与测量值之间的偏差

表 3 含油 R134a 饱和液体的运动黏度

T/K	$\nu/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$				
	$\omega=0$	$\omega=20 \times 10^{-6}$	$\omega=50 \times 10^{-6}$	$\omega=80 \times 10^{-6}$	$\omega=100 \times 10^{-6}$
273.15	0.205 9	0.245 3	0.309 3	0.369 8	0.412 1
275.15	0.201 7	0.238 8	0.298 6	0.354 9	0.394 3
277.15	0.197 7	0.232 4	0.288 2	0.340 4	0.377 2
279.15	0.193 8	0.226 2	0.278 0	0.326 4	0.360 6
281.15	0.190 0	0.220 1	0.268 2	0.312 9	0.344 6
283.15	0.186 3	0.214 0	0.258 7	0.299 8	0.329 2
285.15	0.182 7	0.208 1	0.249 5	0.287 2	0.314 3
287.15	0.179 2	0.202 4	0.240 5	0.275 1	0.300 1
289.15	0.175 8	0.196 7	0.231 9	0.263 4	0.286 5
291.15	0.172 5	0.191 1	0.223 5	0.252 2	0.273 4
293.15	0.169 2	0.185 7	0.215 4	0.241 4	0.260 9

注:纯质 R134a 的数据来源于 NIST-REFPROP7.0 标准数据.

表4 含油 R134a 饱和液体的表面张力

T/K	$\gamma/\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$				
	$w=0$	$w=20 \times 10^{-6}$	$w=50 \times 10^{-6}$	$w=80 \times 10^{-6}$	$w=100 \times 10^{-6}$
273.15	11.84	11.88	11.94	12.00	12.04
275.15	11.50	11.55	11.62	11.69	11.74
277.15	11.15	11.21	11.30	11.39	11.45
279.15	10.82	10.88	10.99	11.09	11.15
281.15	10.47	10.55	10.67	10.78	10.86
283.15	10.12	10.21	10.34	10.48	10.57
285.15	9.78	9.88	10.02	10.17	10.27
287.15	9.44	9.54	9.71	9.87	9.97
289.15	9.09	9.21	9.39	9.56	9.68
291.15	8.75	8.88	9.07	9.26	9.39
293.15	8.41	8.54	8.75	8.95	9.09

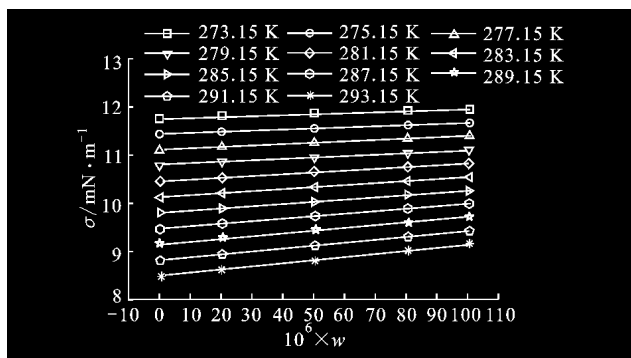


图3 含油 R134a 饱和液体的表面张力随含油量的变化

基于上述实验数据,采用非线性回归法建立含油 R134a 表面张力与温度、含油量之间的函数关系式如下

$$\gamma = (1 + 0.377\,53T - 1.833\,45 \times 10^{-3}T^2 + 2.144\,33 \times 10^{-6}T^3)(w \times 10^6)^{0.430\,38} \quad (5)$$

图4给出了式(5)的计算值与实验值之间的偏差.如图所示,计算数据的相对偏差处于 -1.76% ~ 1.21% 之间,相对偏差绝对平均值为 0.43% .

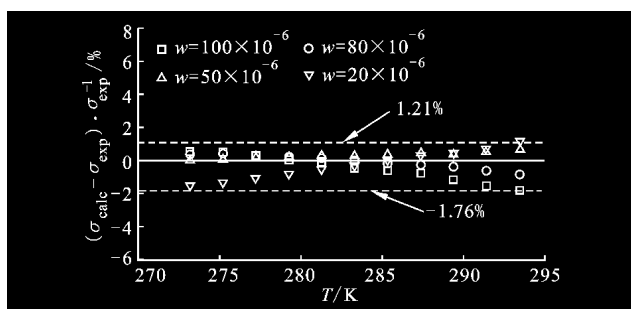


图4 表面张力计算值与测量值之间的偏差

3 结 论

本文对温度范围为 $273.15 \sim 293.15$ K、含油量分别为 20×10^{-6} 、 50×10^{-6} 、 80×10^{-6} 、 100×10^{-6} 的含油 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力进行了测量,得出了以下主要结论.

(1)润滑油对 R134a 饱和液体的运动黏度有明显影响,随着含油量的增加,其运动黏度增大且润滑油对 R134a 饱和液体运动黏度的影响随温度的升高逐渐减弱.

(2)润滑油对 R134a 饱和液体的表面张力有明显影响,随着含油量的增加,其表面张力增大,润滑油对 R134a 饱和液体表面张力的影响随着温度的升高逐渐增强.

(3)文中给出了含油 R134a 饱和液体的运动黏度、表面张力随温度、含油量的变化关系式,适用范围为:温度 $273.15 \sim 293.15$ K;含油量 $0 \sim 100 \times 10^{-6}$.

在选用 R134a 作为制冷工质的制冷系统的设计计算中,需考虑润滑油对制冷剂 R134a 的黏度、表面张力的影响.

参考文献:

- [1] Chiaki Y, Shinji T. Saturated liquid densities of 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane (HCFC-123), 1,2-dichloro-1,2,2-trifluoroethane (HCFC-123a), 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) and 1,1,1-trifluoroethane (HFC-143a) [J]. Fluid Phase Equilibria, 1991, 67(1): 227-240.

- [2] ROTH R T, BAEHR H D. Burnett measurements and correlation of gas-phase (P , ρ , T) of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) and of 1, 1-difluoroethane (R152a) [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 1992, 24(4): 413-424.
- [3] ZHU Mingshan, FU Yidong, HAN Lizhong. An experimental study of PVT properties of CFC alternative HFC-134a [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1992, 80(1): 149-156.
- [4] ZHU Mingshan, HAN Lizhong, LU Chunxiao. Surface tension of HFC-134a [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1993, 86(1): 363-367.
- [5] SHAO D W, GRANRYD E. Heat transfer and pressure drop of HFC134a-oil mixtures in a horizontal condensing tube [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(8): 524-533.
- [6] HAMBRAEUS K. Heat transfer of oil-contaminated HFC134a in a horizontal evaporator [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(2): 87-99.
- [7] HAJERI M H A, KOLUUB A M, MOSAAD M, et al. Heat transfer performance during condensation of R-134a inside helicoidal tubes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(8): 2309-2315.
- [8] LIU Zhongliang, ZHANG Xinghua, WANG Hongyan, et al. Influence of lubricant oil on heat transfer performance of refrigerant flow boiling inside small diameter tubes, part I: experimental study [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31(7): 789-794.
- [9] 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.
- [10] MARSH K N, KANDIL M E. Review of thermodynamic properties of refrigerants + lubricant oils [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2002, 199(1/2): 319-334.
- [11] ASSAEL M J, OLIVEIRA C M B P, WAKEHAM W A. Towards the viscosity of refrigerant/oil mixtures [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2003, 210(1): 5-19.
- [12] MEDVEDEV O O, ZHELEZNY P V, ZHELEZNY V P. Prediction of phase equilibria and thermodynamic properties of refrigerant/oil solutions [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2004, 215(1): 29-38.
- [13] 何茂刚, 张颖, 王小飞, 等. 倾斜管式液体黏度测量方法理论及实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(3): 382-384.
HE Maogang, ZHANG Ying, WANG Xiaofei, et al. A method for liquid viscosity coefficient measurement using inclined tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(3): 382-384.
- [14] WU Jiangtao, LIU Zhigang, WANG Fengkun, et al. Surface tension of dimethyl ether from (213 to 368)K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2003, 48(6): 1571-1573.

(编辑 荆树蓉)

[文摘预登]

一种新的流体质扩散激光全息干涉图像处理方法

何茂刚,郭盈,钟秋,张颖

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

将基于傅里叶变换的相位检测原理应用于流体质扩散系数测量中的图像数据处理,提出了一种新的流体质扩散激光全息干涉条纹图像的处理方法.该方法由小波变换去噪、频域窗口滤波、全息图物像再现及最小二乘法相位展开等步骤组成.采用该方法对实验中采集的标准体系 0.33 mol/L KCl 溶液在 298.15 K 下与水的质扩散干涉条纹图像,以及在不同温度下 0.1 mol/L 蔗糖水溶液-水扩散系的扩散干涉条纹图像进行了处理,并通过与文献值的比较验证了该方法的准确性.该方法充分利用了全息图的相位信息,从而进一步提高了实验数据的处理精度,通过误差分析可知其理论精度可以达到 1%,为激光全息干涉法测量流体质扩散系数实验提供了新的手段.