

振动盘黏度计的改进及 R152a 气相黏度实验研究

王晓坡, 吴江涛, 刘志刚

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在对已有的振动盘黏度计改进的基础上, 利用高纯氩气对改进后的实验装置进行了标定. 为了检验装置的可靠性, 测量了温度为 300 K、压力为 0.1~4.5 MPa 时的氩气黏度, 实验结果与标准值的最大偏差为 0.87%, 平均偏差为 0.37%. 用此装置对制冷剂 R152a 在温度范围为 300~346 K、压力范围为 0.1~1.0 MPa 时的气相黏度进行了实验研究, 并利用所得实验数据拟合得到了 R152a 的气相黏度方程, 方程计算值与实验数据的最大偏差为 0.37%, 平均偏差为 0.11%, 可以满足其他研究和工程应用的需要.

关键词: 振动盘黏度计; 气相黏度; 氩气; R152a

中图分类号: O551.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1424-05

Improvement of the Oscillating-Disk Viscometer and Measurement of Gaseous Viscosity of R152a

WANG Xiaopo, WU Jiangtao, LIU Zhigang

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

Abstract: The oscillating-disk viscometer in our laboratory was improved and calibrated with nitrogen at room temperature. In order to check the reliability and accuracy of the viscometer, the gaseous viscosity of argon was measured at 300 K and pressures up to 4.5 MPa, and the mean absolute deviation was 0.37% and the maximum deviation was 0.87% compared with the reference data. In addition, the gaseous viscosity of R152a was measured at temperatures from 300 K to 346 K and pressures up to 1.0 MPa using the oscillating-disk viscometer. The correlation of the gaseous viscosity of R152a was presented, and comparison was performed with various sets of result in literature. The mean absolute deviation and the maximum deviation of the measured data from the equation was 0.11% and 0.37%, respectively.

Keywords: oscillating-disk viscometer; gaseous viscosity; argon; R152a

黏度是流体重要的迁移性质之一, 广泛应用于能源化工领域, 是科学研究和工程设计不可或缺的基础数据. 流体的气相黏度测量方法有很多, 如毛细管法、落体法、振动法等. 其中, 振动盘黏度计不仅具有比较完善的测量理论, 而且测量精度高, 国际上一般把利用振动盘黏度计测量得到的结果作为气相黏度的标准. 美国 Brown 大学的 Kestin 等人^[1]首先对采用振动盘黏度计测量气相黏度进行了深入系统的研究, 提出了一套具有较高精度的测试理论和方法.

随后, 日本 Tohoku 大学的 Takahashi 等^[2]、德国 Rostock 大学的 Vogel 等^[3]、美国 Maryland 大学的 Sengers 等^[4]也分别建立了振动盘黏度计实验台.

作者所在课题组在 1997 年也建立了一套振动盘黏度计实验台^[5], 由于当时条件有限, 测量结果的精度和自动化程度都不高^[6], 已不能满足现有的热物性测试要求. 为了能够获取高精度的流体气相黏度数据, 本文对原有的振动盘黏度计进行了改进, 利用改进后的实验系统对 R152a 的气相黏度进行了

实验研究.

1 振动盘黏度计的工作原理

振动盘黏度计的测量原理是:当扭丝悬挂一个轴对称的物体(振动盘)在流体中做逐渐衰减的扭转振动时,物体的振动周期和衰减率与物体所处流体的密度和黏度有关.因此,可以通过振动体和流体的运动方程之间的关系,在测量得到物体的振动周期和衰减率后计算流体的黏度.由振动盘的振动方程、流体力学中的 Navier-Stokes 方程并考虑边界的修正等,可得到振动盘黏度计的工作方程,其详细的推导过程见文献[5].在这里仅给出其工作方程

$$2\theta(\Delta\theta - \Delta_0) = \frac{\pi d R^4 \delta C}{I} \cdot$$

$$\left\{ H_1 K_2 + H_2 K_1 + \frac{2d}{R} \left[H_1 + \frac{3\delta}{2R} + \frac{3\delta^2 \theta}{16R^2 x} \right] \right\}$$

(1)

$$x = \left\{ \frac{\theta}{2} [(\Delta^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - \Delta] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(2)

$$H_1 = \frac{3x}{2\theta} - \frac{1}{8x^3 \theta^3}$$

(3)

$$H_2 = \frac{3}{4x\theta^2} - x^3$$

(4)

$$K_1 = \frac{\sin Y}{\cosh X - \cos Y}$$

(5)

$$K_2 = \frac{\sinh X}{\cosh X - \cos Y}$$

(6)

$$X = 2\beta x$$

(7)

$$Y = \beta / (\chi \theta)$$

(8)

$$\theta = T_0 / T$$

(9)

式中: T_0 和 T 分别表示振动盘在真空和待测流体中的振动周期; Δ_0 和 Δ 分别表示振动盘在真空和待测流体中振动的对数衰减率; R 为振动盘的半径; d 为振动盘的厚度; β 为振动盘到上(下)固定盘的距离; I 为悬挂系统的转动惯量; δ 为振动盘做扭转振动时流体的边界层厚度; C 为振动盘黏度计的修正项,需要经过已知黏度的流体标定得到,在后文中会详细论述.如果式(1)中其他参数已知,流体的边界层厚度 δ 可以经过迭代计算得出,进而流体的气相黏度 η 可利用下式计算得到

$$\eta = \rho 2\pi \delta^2 / T_0$$

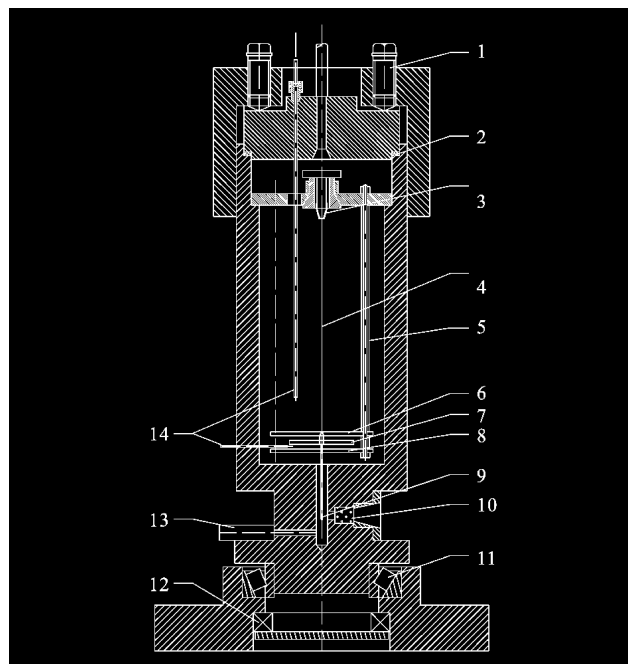
(10)

式中: ρ 为待测流体的气相密度.

2 振动盘黏度计的改进

振动盘黏度计主要由不锈钢腔体、扭丝、振动

盘、固定盘以及相关的连接部件组成,其装置结构如图1所示.



1:螺栓; 2:密封垫; 3:夹具; 4:扭丝; 5:玻璃套管; 6:上固定盘; 7:振动盘; 8:下固定盘; 9:反射镜; 10:观察窗; 11:滚子轴承; 12:球轴承; 13:外接管路; 14:铂电阻

图1 振动盘黏度计内部结构图

悬挂系统由扭丝、振动盘、固定盘以及相关连接部件组成,这是整个实验装置的核心.原有实验装置的悬挂系统中扭丝采用钛镍合金丝,振动盘的材料为不锈钢,测量得到的流体气相黏度数据与文献值的最大偏差超过了10%^[5-6],这主要是由于原有装置悬挂系统设计不合理造成的.因此,本文重新研制了一套悬挂系统,其中扭丝的材料为铂钨合金丝(Pt92W8, Goodfellow 公司),丝的名义直径为0.05 mm,长度为23 mm.为了去除铂钨合金丝的内应力,在使用之前对其进行了真空退火.振动盘的材料为石英玻璃,盘的半径为35 mm,厚度为1.12 mm,同时要求石英玻璃盘的两面抛光且平行,平行度为 $\pm 15''$.振动盘与上、下两个固定盘的距离均为3.43 mm.不锈钢柱的一端连接振动盘和铂钨合金丝,另一端安装一个尺寸为4 mm $\times$ 4 mm的小镜子,用以反射外来的激光.用两个自制的微型小夹子连接扭丝和振动盘.本文研制的悬挂系统的转动惯量 I 为58.534 7 g $\cdot$ cm².振动盘在真空中的振动周期 T_0 和振动衰减率 Δ_0 分别为27.746 s和0.000 05.

在整个黏度测量过程中,还有一些相应的测量系统,其中包括温度控制测量系统、压力测量系统、信号采集系统等.为了进一步提高测量结果的精度,

作者结合最新的测试技术和仪器对这些系统也进行了改进。

为了保证实验本体内部温度均匀,本文将加热区分为两部分,一部分用带有绝缘层的电加热带缠绕在实验本体上进行加热,另一部分在实验本体底座下布置了一个云母加热器,以补偿底座的散热。同时,作者将两组铜-康铜热电偶分别布置在这两个加热器上。两个PID温控器通过这两组热电偶的温度信号分别对两个加热器的功率进行控制,进而达到控制温度的目的。温度测量系统由Pt100铂电阻和计算机数据采集系统组成。Pt100铂电阻在使用之前进行了标定,精度为0.05 K。数据采集系统由Keithley2010(7位半)通过GPIB接口与计算机实现连接。为了实现温度测量的自动化,作者开发了基于LabView的温度测量软件。

压力测量系统由压力变送器和数据采集系统组成。压力变送器由福建上润精密仪器有限公司生产,型号为WIDEPLUS-8,量程为0~6 MPa,精度为0.1级。在使用之前,对压力变送器进行了校准和标定。压力变送器产生的信号通过Keithley2000数字万用表送入计算机,经自行编制的LabView压力测量软件处理后测量得到压力值。

实验时振动盘黏度计本体外安放了两个光电二极管,本体内部的小镜子反射外来的激光,通过记录、分析反射光扫过两个成一定角度的光电二极管的时间,可得到振动盘扭转振动的对数衰减率和振动周期。文献[7]详细介绍了原有实验系统利用单片机实现信号采集的系统,原有的数据采集系统是在DOS环境下开发出来的,测量采集系统使用复杂。为适应当前自动化测试的要求,本文对原有采集系统进行了改造,新的采集系统以NI4451(采集速率为 10^4 s^{-1})为核心。同时,还利用Microsoft Visual C++开发了Windows环境下的采集软件,使得信号采集系统简单、采集速度快,精度也得以大大提高。

3 振动盘黏度计的标定和检验

由于振动盘黏度计采用的是相对法测量气相黏度,因此在实验之前需要用已知可靠黏度数据的工质对黏度计进行标定。本文采用由梅塞尔公司提供的高纯氮气对装置进行标定,氮气的纯度(质量分数)为99.999%,其气相黏度数据取自文献[8]。式(1)中,修正项 C 是边界层厚度 δ 的函数,标定得到的 C 与 δ 的关系如图2所示,其拟合关系式为

$$C = 1.226\ 019\ 2(1 - e^{-2.032\ 234\ 7\delta}) \quad (11)$$

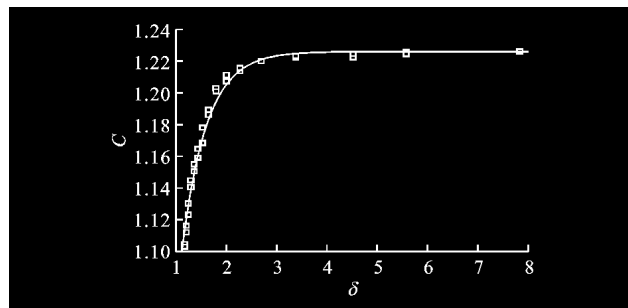


图2 边界层厚度与修正项的关系

为了检验改进后实验装置的可靠性,本文对温度为300 K、压力为0.1~4.5 MPa时的氩气黏度进行了实验研究。氩气由梅塞尔公司提供,纯度(质量分数)为99.99%。实验结果及其与文献值的偏差见表1。实验数据与文献值的最大偏差为0.87%,平均偏差为0.37%,说明改进后实验装置的测量结果具有较高的精度,可进行其他工质的气相黏度测量。

4 R152a 气相黏度的实验研究

由于R152a是目前环保混合制冷剂中的常用组分,且文献中发表的气相黏度数据较少,只有Takahashi等^[9]和Assael等^[10]对R152a的气相黏度进行过测量,因此本文对R152a的气相黏度进行了实验研究。R152a由浙江氟化工研究院提供,经气相色谱仪分析其纯度(质量分数)高于99.95%,实验的温度范围为300~346 K、压力范围为0.1~1.0 MPa。实验测得的R152a的气相黏度数据见表2。

为了便于工程应用,利用表2的实验数据,本文拟合得到了R152a的气相黏度计算方程

$$\eta = b_0 + b_1\rho + b_2\rho^2 + b_3\rho^3 \quad (12)$$

$$b_0 = b_{01}T + b_{02}T^2 + b_{03}T^3 \quad (13)$$

$$b_1 = b_{10} + b_{11}T + b_{12}T^2 + b_{13}T^3 \quad (14)$$

$$b_2 = b_{20} + b_{21}T + b_{22}T^2 + b_{23}T^3 \quad (15)$$

$$b_3 = b_{30} + b_{31}T \quad (16)$$

方程中各系数的值见表3。

R152a的气相黏度实验数据与方程(12)的计算结果的偏差分布如图3所示。同时,图中也给出了本文拟合得到的关联式的计算值与文献中已发表的R152a气相黏度实验数据的偏差。本文实验数据与方程(12)计算结果的最大偏差为0.37%,平均偏差为0.11%,可以满足其他研究和工程应用的需要。

5 结 论

本文在对已有振动盘黏度计改进的基础上,利

表 1 氙气黏度测量结果

T/K	p/MPa	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\eta_{\text{exp}}/\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\eta_{\text{ref}}/\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$(\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{ref}}) \cdot \eta_{\text{ref}}^{-1} / \%$
300.58	4.503	73.758	23.833	23.744	0.372
300.56	4.050	66.187	23.640	23.622	0.078
300.70	3.729	60.824	23.510	23.547	-0.160
300.63	3.427	55.827	23.433	23.468	-0.148
300.54	3.089	50.255	23.473	23.380	0.396
300.66	2.759	44.784	23.385	23.310	0.323
300.72	2.458	39.822	23.376	23.246	0.561
300.49	2.082	33.698	23.351	23.149	0.871
300.76	1.775	28.641	23.247	23.101	0.631
300.68	1.446	23.308	23.126	23.030	0.418
300.89	1.117	17.948	22.932	22.979	-0.204
300.32	0.832	13.375	22.861	22.889	-0.123
300.38	0.616	9.882	22.801	22.854	-0.235
300.11	0.400	6.426	22.715	22.799	-0.370
300.25	0.302	4.838	22.651	22.791	-0.615
300.19	0.199	3.196	22.646	22.770	-0.545
300.17	0.103	1.643	22.788	22.752	0.157

注: η_{ref} 为文献[8]的结果.

表 2 R152a 的气相黏度测量结果

T/K	p/MPa	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\eta/\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$
299.74	0.434	12.736	10.221
300.00	0.347	9.935	10.186
300.22	0.226	6.266	10.285
299.90	0.115	3.132	10.419
323.27	0.937	27.620	11.081
323.38	0.828	23.743	11.060
322.83	0.726	20.416	11.022
323.06	0.630	17.328	11.065
323.11	0.529	14.256	11.041
322.95	0.457	12.162	11.045
323.05	0.405	10.655	11.043
323.05	0.352	9.180	11.126
322.96	0.188	4.774	11.165
323.20	0.098	2.454	11.246
346.55	0.985	25.998	12.124
346.69	0.835	21.478	11.995
346.73	0.698	17.566	12.023
346.86	0.540	13.279	11.972
346.76	0.460	11.184	11.983
346.86	0.360	8.635	12.030
347.05	0.197	4.612	12.052
346.61	0.106	2.471	12.090

表3 方程中各系数的值

b_{01}	$7.864\ 74 \times 10^{-2}$	b_{20}	$-9.337\ 86 \times 10^0$
b_{02}	$-2.567\ 79 \times 10^{-4}$	b_{21}	$8.779\ 71 \times 10^{-2}$
b_{03}	$3.770\ 47 \times 10^{-7}$	b_{22}	$-2.742\ 34 \times 10^{-4}$
b_{10}	$3.137\ 23 \times 10^2$	b_{23}	$2.846\ 31 \times 10^{-7}$
b_{11}	$-2.934\ 4 \times 10^0$	b_{30}	$-6.189\ 53 \times 10^{-4}$
b_{12}	$9.126\ 01 \times 10^{-3}$	b_{31}	$1.856\ 6 \times 10^{-6}$
b_{13}	$-9.438\ 42 \times 10^{-6}$		

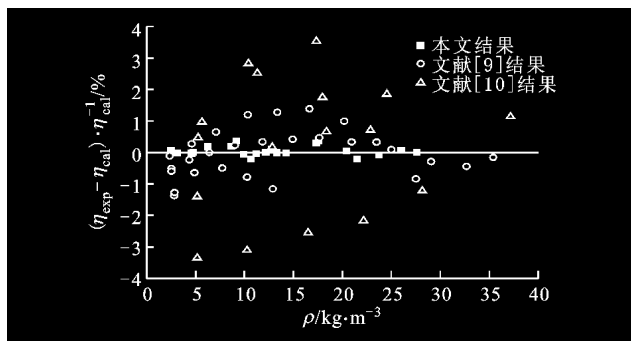


图3 实验数据与方程(12)计算结果的偏差

用高纯氮气对其进行了标定,得到了实验装置修正项与边界层厚度的关系.利用该装置对温度为 300 K、压力为 0.1~4.5 MPa 时的氩气黏度进行了测量,测得的黏度数据和文献值的最大偏差为 0.87%,平均偏差为 0.37%,说明改进后的实验装置对气相黏度的测量准确可靠.综合分析后,可得整个装置的测量不确定度小于 $\pm 2\%$.同时,利用改进后的实验装置对 R152a 在温度为 300~346 K、压力为 0.1~1.0 MPa 时的气相黏度进行了测量,并拟合得到了在实验范围内的气相黏度方程,方程计算值与实验数据的最大偏差为 0.37%,平均偏差为 0.11%,为其他研究和设计人员提供了参考依据.

参考文献:

- [1] KESTIN J, WHITELAW J H. A relative determination of the viscosity of several gases by the oscillating disk method [J]. Physica, 1963, 29: 335-356.
- [2] TAKAHASHI M, YOKOYAMA C, TAKAHASHI S. Gas viscosities of azeotropic mixtures of the halogenated hydrocarbons R500, R502, and R503 [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1988, 33(3): 267-274.
- [3] VOGEL E. Konstruktion eines quarzglas-schwingsscheibenviskosimeters und messungen an stickstoff und argon [J]. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, 1972, 21(M2): 169-179.
- [4] KRALL A H, SENGERS J V. Simultaneous measurement of viscosity and density with an oscillating-disk instrument; the effect of fixed plates [J]. International Journal of Thermophysics, 2003, 24(2): 337-359.
- [5] 王文. 振动盘黏度计的研制及流体黏度的分子动力学模拟研究 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 1997.
- [6] 王文, 李刚, 何昭睿, 等. 气体黏度的低频振动法研究 [J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(5): 10-14.
WANG Wen, LI Gang, HE Zhaorui, et al. Experimental study for gaseous viscosities with oscillating disk viscometer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(5): 10-14.
- [7] 王文, 李刚, 刘志刚. 低频振动黏度计信号采集系统的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 1996(11): 23-25.
WANG Wen, LI Gang, LIU Zhigang. Development of a signal acquisition system for oscillating disk viscometers [J]. Instrument Technique and Sensor, 1996 (11): 23-25.
- [8] LEMMON E W, JACOBSEN R T. Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air [J]. International Journal of Thermophysics, 2004, 25(1): 21-69.
- [9] TAKAHASHI M, YOKOYAMA C, TAKAHASHI S. Viscosities of gaseous R13B1, R142b, and R152a [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1987, 32(1): 98-103.
- [10] ASSAEL M J, POLIMATIDOU S K. Measurements of the viscosity of refrigerants in the vapor phase [J]. International Journal of Thermophysics, 1997, 18(2): 353-366.

(编辑 荆树蓉)