排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 2 月 Feb. 2017 | 第 35 卷 第 2 期 Vol. 35 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0033

气体黏度与温度和压力关系的拟合表达式

邓强国

邓强国[1,2]，宋鹏云[1]，毛文元[1]，许恒杰[1]
（1.昆明理工大学化学工程学院，云南 昆明 650500；2.昆明理工大学机电工程学院，云南 昆明 650500）

摘要：为了了解气体黏度对干气密封等气体润滑机构性能的影响，在高压条件下，气体黏度与气体温度和压力均有关系. 文中以氮气作为研究对象，以 AP1700 物质物性平台数据库作为数据源，采用数学软件用最小二乘法拟合出黏－温、黏－压、黏－温－压 3 种关系式. 将拟合关系式与美国国家标准与技术研究院(NIST)数据库、中国国家标准《热交换器》(GB/T 151—2014)附录中给出的气体黏度值、BOOSER 编著的《摩擦数据手册》中提供的气体黏度计算值和 Lucas 经典方程计算数据进行对比. 结果发现：文中拟合得到的关系式具有较高精确度，可以作为气体黏度与温度和压力变化规律的一种表达式，用于涉及黏－温、黏－压、黏－温－压的黏度计算.

关键词：气体黏度；温度；压力；拟合关系式
中图分类号：S277.9；TH136　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674－8530(2017)02－0144－08

邓强国，宋鹏云，毛文元，等. 气体黏度与温度和压力关系的拟合表达式[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(2):144－151.

DENG Qiangguo, SONG Pengyun, MAO Wenyuan, et al. Fitting expression of relationship between gas viscosity, and temperature and/or pressure[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2017,35(2):144－151.(in Chinese)

Fitting expression of relationship between gas viscosity, and temperature and/or pressure

DENG Qiangguo[1,2], *SONG Pengyun*[1], *MAO Wenyuan*[1], *XU Hengjie*[1]
(1. Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Gas viscosity is an important parameter for the performance of gas lubrication mechanism such as dry gas seal. The gas viscosity is related to temperature and pressure under the condition of high pressure, but there are few researches about the detailed relations between viscosity, temperature and pressure. Nitrogen (N_2) is taken as the study object, and the viscosity－temperature fitting expression and the viscosity－pressure fitting expression, the viscosity－temperature－pressure fitting expression have been obtained based on the AP1700 material physical platform using the least square method by a mathematic software. The calculated results by the fitting expressions have enough accuracy compared with the viscosity values offered by the National Institute of Standards and Technology (NIST) Chemistry WebBooks, China National Standard Heat Exchangers (GB/T 151－2014), calculated values in BOOSER's publication Tribology Data Handbook and calculated values by the Lucas equation. The results show that the fitting expressions can be used to express the changing laws of gas viscosity with temperature and pressure and to calculate the viscosity concerning the temperature and/or the pressure.

收稿日期：2016－02－05；**网络出版时间**：2017－01－13
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170113.1645.014.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51465026)
作者简介：邓强国(1983—)，男，四川仪陇人，博士研究生(971659256@qq.com)，主要从事机械密封研究.
宋鹏云(1963—)，男，云南石屏人，教授，博士生导师(通信作者，songpengyunkm@sina.com)，主要从事流体密封技术研究.

Key words: gas viscosity; temperature; pressure; fitting expression

气体黏滞性是气体内部抵抗相对运动的一种物理性质[1]，是气体润滑需要考虑的一个重要参数. 在干气密封等气体润滑机构的性能分析过程中，一般假定气体黏度为常数[2]. 但在高压环境下，气体黏度为温度和压力相关的函数. 目前大部分工程师和研究者采用曲线图、表格或数据库来表达和查询黏度与温度和压力的关系[3-6]. 但在求解气体润滑方程时，往往需要气体黏度与温度和压力的显函数[7]，以准确确定干气密封的开启力和泄漏率等密封性能[8].

鉴于此，文中基于 AP1700 物质物性平台，分析气体黏度随温度和压力变化的规律，拟合一种函数关系表达式，并与中国、美国国家标准及相关数据库和经验公式进行比对.

1　气体黏度 - 温度 - 压力关系式

在气体黏度 - 温度 - 压力关系式中，气体黏度受温度的影响十分明显. 在压力不高的情况下，当温度升高时，气体分子运动加剧，分子碰撞机会增大，黏度增大[9]. 当气体所受压力增大时，分子之间的距离减小而分子间的作用力增大，因而黏度增大. 但在高压情况下，气体黏性表现出液体特征，即随温度的升高而降低. 目前，针对润滑油、饱和烃类和天然气等的黏 - 温、黏 - 压、黏 - 温 - 压特性已进行了大量的研究[10-12]，并提出了许多由经验数据总结或者气体流动模型分析得到的关系式. 但对于单一气体，覆盖低压和高压范围的黏 - 温 - 压关系式不多[13].

1.1　基于 AP1700 平台拟合黏 - 温关系式

AP1700 是一个适用于工业领域基础数据物性参数查询的平台[14]，其模型的计算结果，选取了超过 1 000 000 个数据与美国国家标准与技术研究院[15]（National Institute of Standards and Technology，NIST）发布的数据进行对比测试，其结果与 NIST 的数据几乎完全一致，但其计算模型没有公开. 在干气密封中常遇到的气体是 N_2，H_2 和 CO_2 等[16]，其中以氮气最为常见. 故选择氮气为研究对象来分析气体黏度与温度和压力的变化关系. 因 NIST 数据库数据的取值很难满足任意温度和压力下气体黏度，故选择 AP1700 物质物性查询平台作为拟合关系式的数据源.

表 1 为氮气在 10 ~ 180 ℃，4.0 ~ 20.0 MPa 内，从 AP1700 物质物性查询平台和 NIST 数据库选取的若干个温度 t 和压力对应的黏度值及其黏度偏差值 $\Delta\eta$. 黏度偏差和黏度偏差率分别为同一气体在相同温度和压力条件下依不同方法得到的动力黏度值之差和黏度偏差相对于黏度 1 值变化的百分率，即

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2, \tag{1}$$

$$\text{偏差率} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \times 100\% = \frac{\Delta\eta}{\eta_1} \times 100\%, \tag{2}$$

式中：η_1 为黏度值比较时首先出现的黏度；η_2 为黏度值比较时后出现的黏度.

从表 1 可以看出，AP1700 平台数据与 NIST 数据库的黏度偏差值非常小，都在 10^{-15} Pa·s 范围内. 可以认为 AP1700 物质物性查询平台内的物性参数计算准确，可以作为介质参数计算的依据.

表 1　AP1700 平台与 NIST 数据库的氮气黏度及其偏差

Tab. 1　Nitrogen viscosity from AP1700 and NIST, and their errors

t/℃	4.0 MPa			12.0 MPa			20.0 MPa		
	AP1700 黏度	NIST 黏度	偏差 $\Delta\eta$	AP1700 黏度	NIST 黏度	偏差 $\Delta\eta$	AP1700 黏度	NIST 黏度	偏差 $\Delta\eta$
10	1.78	1.779	1.887	2.00	2.004	-2.781	2.30	2.300	1.459
50	1.95	1.950	2.457	2.13	2.127	1.921	2.36	2.356	-3.146
100	2.16	2.156	2.454	2.29	2.294	4.305	2.47	2.472	3.274
150	2.35	2.352	-0.026	2.46	2.464	-4.407	2.61	2.609	3.518
180	2.47	2.465	3.098	2.57	2.566	-1.811	2.70	2.695	0.439

图 1 为氮气在 0 ~ 300 ℃，0 ~ 50.0 MPa 内的一些典型黏 - 温 - 压曲线. 从图中可以看出：① 在 0.1 ~ 5.0 MPa 压力下，即较低压力范围内，气体压力对黏度的影响不大，其黏 - 温线几乎重合，且黏度随温度的增大而增大，近似为线性关系. ② 在 5.0 ~ 30.0 MPa 压力时，气体压力对黏度已有明显的影响，随着压力的增大，同一温度下气体的黏度明显增大；气体黏度随温度的关系出现阶段性，当温度小于大约 50 ℃时，同一压力下，气体黏性受温度的影响不明显，变化缓慢，压力较高时更是如此. 当温度高于

50 ℃时,黏－温关系表现出类似低压气体的关系,即黏度随温度线性增加.③ 在30.0～50.0 MPa内,气体压力对黏度的影响更为明显,随着压力的升高,黏度的增加更为明显.同一压力下,黏度与温度的关系表现出相反的关系.当温度小于100 ℃时,黏度随温度的增大而减小,表现出类似液体的黏性特征,但不是线性关系.随着温度的增大,下降速度减小.而当温度大于100 ℃时,气体黏度仍随温度的增大而增大,但增长趋势变缓,即斜率变小.较高温度下,仍表现出黏度随温度线性增加的特性.

值得注意的是,分界值50,100 ℃是从图上读出的大致数值,其精确的分界值需要根据不同压力下的黏温方程式计算得出.

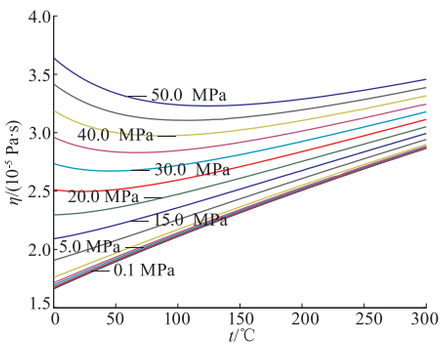

图1 氮气不同压力下黏－温曲线

Fig. 1 Viscosity－temperature curves of nitrogen under different pressures

同一压力下的黏温方程,可以通过AP1700物质物性查询平台或NIST数据库查取数据,经最小二乘法数据拟合获得多项式表达式,该例中拟合为四次多项式,黏度计算精度已足够高,即

$$\eta = f(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 t^4, \quad (3)$$

式中:a_1,a_2,a_3,a_4,a_5为多项式系数,不同压力有不同的数值.文中拟合计算了几种典型压力下的黏温关系,其对应的多项式系数见表2.

表2 氮气黏－温关系式系数

Tab. 2 Coefficients of viscosity－temperature fitting expression of nitrogen

系数	0.1 MPa	4.0 MPa	12.0 MPa	20.0 MPa
a_1	1.660×10^{-5}	1.730×10^{-5}	1.97×10^{-5}	2.290×10^{-5}
a_2	4.820×10^{-8}	4.380×10^{-8}	2.68×10^{-8}	2.930×10^{-9}
a_3	-3.655×10^{-11}	-1.732×10^{-11}	8.15×10^{-11}	2.290×10^{-10}
a_4	3.620×10^{-14}	-1.769×10^{-14}	-4.00×10^{-13}	-1.002×10^{-12}
a_5	-1.700×10^{-17}	5.920×10^{-17}	7.25×10^{-16}	1.790×10^{-15}

1.2 基于AP1700平台拟合黏－压关系式

为了考察同一温度下,气体压力对气体黏度的影响,依据AP1700物质物性平台,得到氮气在0～300 ℃,0～50.0 MPa内的一些黏－压关系曲线,如图2所示.可以看出,同一温度下,气体黏度随压力的增大而增大.温度越低,黏压关系变化越明显.类似于同一压力下的黏－温关系,同一温度下的黏压关系,也可以用最小二乘法数据拟合获得多项式表达式,该例中拟合为五次多项式,黏度计算精度较高,即

$$\eta = f(p) = b_1 + b_2 p + b_3 p^2 + b_4 p^3 + b_5 p^4 + b_6 p^5, \quad (4)$$

式中:多项式系数b_1,b_2,b_3,b_4,b_5,b_6为不同温度对应系数.文中拟合的几种典型温度下的黏压关系对应的多项式系数见表3.

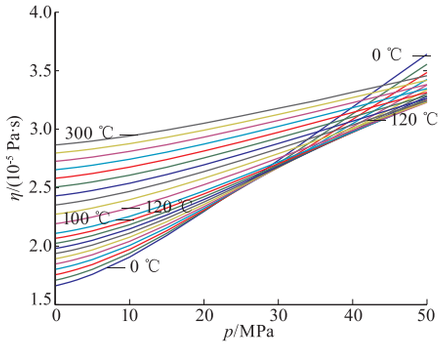

图2 氮气不同温度下黏－压曲线

Fig. 2 Viscosity－pressure curves of nitrogen under different temperatures

表3 氮气黏－压关系式系数

Tab. 3 Coefficients of viscosity－pressure fitting expression of nitrogen

参数	0 ℃	27 ℃	50 ℃	120 ℃	200 ℃	300 ℃
b_1	1.660×10^{-5}	1.780×10^{-5}	1.890×10^{-5}	2.190×10^{-5}	2.500×10^{-5}	2.860×10^{-5}
b_2	1.270×10^{-7}	1.200×10^{-7}	1.060×10^{-7}	8.670×10^{-8}	7.040×10^{-8}	5.160×10^{-8}
b_3	1.490×10^{-8}	1.070×10^{-8}	9.680×10^{-8}	5.000×10^{-9}	3.390×10^{-9}	2.990×10^{-9}
b_4	-3.575×10^{-10}	-2.187×10^{-10}	-2.100×10^{-10}	-9.845×10^{-11}	-3.314×10^{-11}	-6.375×10^{-11}
b_5	4.500×10^{-12}	2.220×10^{-12}	2.450×10^{-12}	6.540×10^{-13}	-2.411×10^{-13}	9.000×10^{-13}
b_6	-2.411×10^{-14}	-9.000×10^{-15}	-1.066×10^{-14}	1.680×10^{-17}	4.660×10^{-15}	-5.842×10^{-15}

1.3 基于AP1700平台拟合黏－温－压关系式

由于黏－温关系是针对特定的压力、黏－压关系是针对特定的温度,为了更好地表达气体黏度与温度和压力的关系,需要建立黏－温－压关系式.

根据AP1700物质物性平台,得到氮气黏度与温度和压力变化关系,图3为0～300 ℃,0～50.0

MPa 黏－温－压关系曲面图；图 4 为 －150 ～0 ℃，0 ～50.0 MPa 黏－温－压关系曲面图.

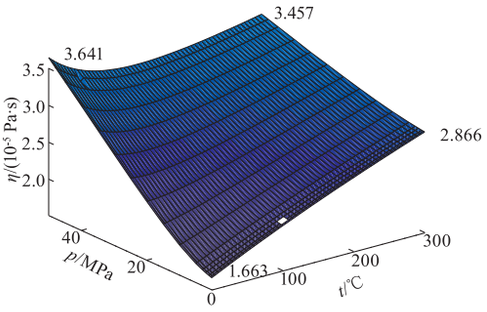

图 3　基于 AP1700 平台的氮气 0 ～300 ℃黏－温－压关系曲面

Fig. 3　Viscosity－temperature－pressure surface of nitrogen at 0－300 ℃ based on AP1700

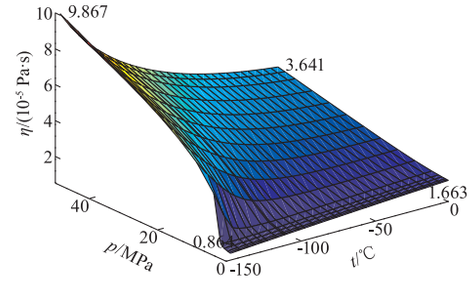

图 4　基于 AP1700 平台的氮气 －150 ～0 ℃黏－温－压关系曲面

Fig. 4　Viscosity－temperature－pressure surface of nitrogen at －150－0 ℃ based on AP1700

依据 AP1700 物质物性平台，查取氮气随压力和温度变化的黏度值. 采用双变量多项式，利用数据处理软件进行数据拟合. 从图中看出气体黏度值在 0 ℃上下 2 个区域黏度变化趋势不同，故将拟合关系式分为 0 ～300 ℃，0 ～50.0 MPa 和 －150 ～0 ℃，0 ～50.0 MPa 两段分别得到氮气的黏－温－压关系式. 均拟合为五次多项式，黏度计算精度较高，即

$$\begin{aligned}\eta &= f(t,p) = \\ &c_1 + c_2 t + c_3 p + c_4 t^2 + c_5 tp + c_6 p^2 + c_7 t^3 + \\ &c_8 t^2 p + c_9 tp^2 + c_{10} p^3 + c_{11} t^4 + c_{12} t^3 p + \\ &c_{13} t^2 p^2 + c_{14} tp^3 + c_{15} p^4 + c_{16} t^5 + c_{17} t^4 p + \\ &c_{18} t^3 p^2 + c_{19} t^2 p^3 + c_{20} tp^4 + c_{21} p^5, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\eta &= f(t,p) = \\ &d_1 + d_2 t + d_3 p + d_4 t^2 + d_5 tp + d_6 p^2 + d_7 t^3 + \\ &d_8 t^2 p + d_9 tp^2 + d_{10} p^3 + d_{11} t^4 + d_{12} t^3 p + \\ &d_{13} t^2 p^2 + d_{14} tp^3 + d_{15} p^4 + d_{16} t^5 + d_{17} t^4 p + \\ &d_{18} t^3 p^2 + d_{19} t^2 p^3 + d_{20} tp^4 + d_{21} p^5. \end{aligned} \tag{6}$$

其对应的多项式系数见表 4，5.

表 4　氮气黏－温－压关系式系数 c

Tab. 4　c coefficients of viscosity－temperature－pressure fitting expression of nitrogen

系数	值	系数	值	系数	值
c_1	1.660×10^{-5}	c_8	9.659×10^{-12}	c_{15}	1.262×10^{-12}
c_2	4.691×10^{-8}	c_9	-5.121×10^{-11}	c_{16}	-2.303×10^{-18}
c_3	1.656×10^{-7}	c_{10}	-1.883×10^{-10}	c_{17}	4.086×10^{-17}
c_4	4.983×10^{-12}	c_{11}	1.640×10^{-15}	c_{18}	-8.316×10^{-17}
c_5	-1.453×10^{-9}	c_{12}	-3.227×10^{-14}	c_{19}	-5.593×10^{-16}
c_6	1.088×10^{-8}	c_{13}	9.812×10^{-14}	c_{20}	-4.244×10^{-15}
c_7	-3.774×10^{-13}	c_{14}	7.385×10^{-13}	c_{21}	-1.613×10^{-16}

表 5　氮气黏－温－压关系式系数 d

Tab. 5　d coefficients of viscosity－temperciture－pressure fitting expression of nitrogen

系数	值	系数	值	系数	值
d_1	1.634×10^{-5}	d_8	3.952×10^{-11}	d_{15}	2.293×10^{-11}
d_2	2.200×10^{-8}	d_9	-1.171×10^{-9}	d_{16}	-2.941×10^{-16}
d_3	2.820×10^{-7}	d_{10}	-7.525×10^{-10}	d_{17}	2.224×10^{-15}
d_4	-5.770×10^{-10}	d_{11}	-8.679×10^{-14}	d_{18}	1.807×10^{-14}
d_5	1.212×10^{-8}	d_{12}	-6.052×10^{-13}	d_{19}	4.454×10^{-14}
d_6	1.005×10^{-8}	d_{13}	-2.077×10^{-12}	d_{20}	-2.237×10^{-13}
d_7	-8.605×10^{-12}	d_{14}	2.911×10^{-11}	d_{21}	-2.190×10^{-13}

2　拟合黏－温－压关系式数据对比

目前气体黏－温－压的关系除 AP1700 物质物性查询平台或数据库外，一般以图表、曲线、公式给出，但大多不够完整，并且数据来源多种多样. 文中用拟合关系式与常见的几种数据来源进行分析、对比，以验证拟合关系式的可行性.

2.1　拟合关系式与《摩擦数据手册》数据对比

文献[17]给出了气体黏度与温度和压力的关系曲线，指出气体黏度在低压时，黏度变化很小；在高压时，变化显著. 计算氮气黏－温关系时，常采用准确度较高的 Sutherland 方程[18]，即

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right)\left(\frac{T}{T_0}\right), \tag{7}$$

式中：η_0 为 $p = 0.1$ MPa，$T_0 = 300$ K 对应的黏度值；C 为分子间相互作用势能的函数，Sutherland 认为不随温度变化，氮气为常数 61. 文献[17]中表 16.1 和表 16.2 仅给出了氮气几个典型温度在 $p = 0.1$ MPa 时的黏度值[19]. 图 5 给出了压力为 0.1 MPa 时黏－温方程计算值与黏－温拟合关系的黏度对比曲线，最大偏差为 4.1×10^{-8} Pa·s. 可知，式(1)黏度计算值非常接近 Sutherland 方程黏度计算值.

文献[17]中计算黏－温－压关系式为

$$\eta = \eta_r \eta_{cr}, \tag{8}$$

$$\eta_{cr} = 7.70\times10^{-7} M^{0.5} p_{cr}^{0.667} T_{cr}^{-0.167}, \tag{9}$$

式中：对于氮气 $p_{cr} = p/p_r = 3.4$，分子量 $M = 28.02$

g/mol，$T_{cr}=T/T_r=126.3$，在文献[17]中表16.3可查得，η_r可由文献[17]中图16.4曲线图查得，p，T分别为计算所选取绝对压力和开氏温度值[20]. 文献[17]中给出了压力为0～35.0 MPa，温度在－100～150 ℃内的黏度值，图6为拟合关系式(5)－(6)黏度计算值相对摩擦数据手册式(8)所给黏度数据的黏度偏差曲线.

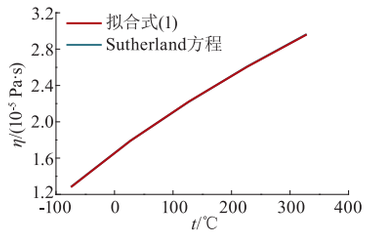

图5 氮气Sutherland方程与拟合关系式黏度对比

Fig. 5 Viscosity of nitrogen between fitting expression and Sutherland equation

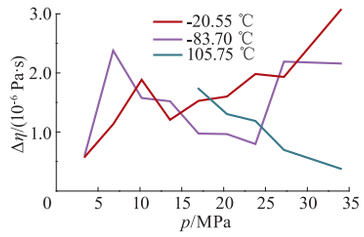

图6 氮气拟合关系式与摩擦数据手册偏差曲线

Fig. 6 Error curves of nitrogen between fitting expression and Tribology Data Handbook

从图6可以看出，两者黏度偏差非常小，最大偏差为3.069×10^{-6} Pa·s，最大偏差率为9.2%，出现在温度为－20.55 ℃，压力为34.0 MPa处. 因此，可以认为拟合关系式(5)－(6)与摩擦数据手册计算黏度非常接近，可以作为黏度与温度和压力变化关系的计算公式.

2.2 拟合关系式与国家标准附录数据对比

国家标准GB/T151—2014附录表9[21]给出了氮气黏度坐标值，结合图D.27(一个大气压气体黏度)和D.28(高压气体黏度)得到黏度与温度和压力关系值，文献[21]中给出了压力为0～35 MPa，温度在－150～0 ℃范围内的黏度值，图7为拟合关系式(6)相对国家标准GB/T151给出的黏度偏差曲线.

图7选取6个典型温度对应的黏度偏差曲线，从偏差值看出，两者黏度偏差非常小，最大偏差为5.786×10^{-6} Pa·s，最大偏差率为8.9%，出现在温度为－134.22 ℃，压力为10.2 MPa处. 因此，可以认为拟合关系式(6)与国家标准GB/T 151计算黏度非常接近，可以作为黏度与温度和压力变化关系的计算公式.

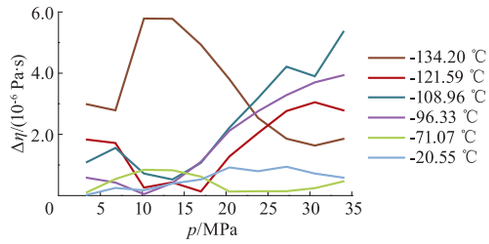

图7 氮气拟合关系式与GB/T151偏差曲线

Fig. 7 Error curves of nitrogen between fitting expression and GB/T151

2.3 拟合关系式与AP1700物质物性平台对比

将黏－温－压拟合关系式(5)－(6)与AP1700物质物性查询平台的黏度数据进行对比，得到黏度偏差曲线如图8所示. 图中选取4个压力值对应的偏差曲线，从偏差值看出，两者黏度偏差非常小，最大偏差为4.238×10^{-6} Pa·s，最大偏差率为6.4%. 出现在压力为20.0 MPa，温度为－146.85 ℃处. 当温度大于0 ℃时，黏度偏差基本在10^{-9}范围内，偏差率小于0.06%. 因此，可以认为拟合关系式(5)－(6)与AP1700物质物性查询平台查得黏度非常接近，可以作为黏度与温度和压力变化关系的计算公式.

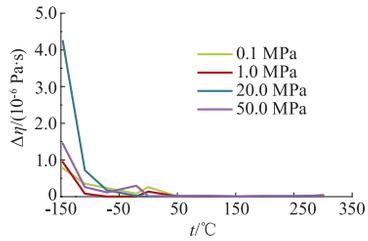

图8 氮气拟合关系式与AP1700偏差曲线

Fig. 8 Error curves of nitrogen between fitting expression and AP1700

2.4 拟合关系式与NIST数据库对比

将黏－温－压拟合关系式(5)与美国国家标准与技术研究院(NIST)数据库给出的几组的黏度数据进行对比，得到黏度偏差曲线如图9所示. 图中选取3个压力值对应的黏度偏差曲线，从偏差值看出，两者黏度偏差非常小，最大偏差为5.269×10^{-8} Pa·s，最大偏差率为0.26%，出现在压力为8.0 MPa，温度为10 ℃处. 因此，可以认为拟合关系式(5)与NIST查得黏度非常接近，可以作为黏度与温度和压力变化关系的计算公式.

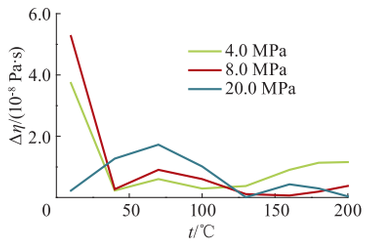

图 9　氮气拟合关系式与 NIST 偏差曲线

Fig. 9　Error curves of nitrogen between fitting expression and NIST

2.5　拟合关系式与 Lucas 气体黏度方程对比

考虑高压和温度变化较大的气体润滑时，必须考虑气体黏度与温度和压力的关系，Lucas 给出了求解气体黏度的表达式[22]为

$$\eta=\left(1+\frac{a_1 p_r^{1.3088}}{a_2 p_r^{a_5}+(1+a_3 p_r^{a_4})^{-1}}\right)\eta^0 F_P F_Q, \qquad (10)$$

式中：

$$a_1=\frac{(1.245\times10^{-3})\exp(5.1726 T_r^{-0.3286})}{T_r},$$

$$a_2=A_1(1.6553 T_r-1.2723),$$

$$a_3=\frac{0.4489\exp(3.0578 T_r^{-37.7332})}{T_r},$$

$$a_4=\frac{1.7368\exp(2.2310 T_r^{-7.6351})}{T_r},$$

$$a_5=0.9425\exp(-0.1853 T_r^{0.4489}),$$

$$F_P=\frac{1+(F_P^0-1)Y^{-3}}{F_P^0},$$

$$F_Q=\frac{1+(F_Q^0-1)[Y^{-1}-0.007(\ln Y)^4]}{F_Q^0},$$

定义：$Y=Z_1/Z_2$，则

$$Z_1=\eta^0\xi=[0.807T_r^{0.618}-0.357\exp(-0.449T_r)+0.340\exp(-4.058T_r)+0.018]F_P^0F_Q^0,$$

如果 $T_r\leqslant1$ 和 $p_r<(p_{vp}/p_c)$，则

$$Z_2=0.6+0.76p_r^{\alpha}+(6.99p_r^{\beta}-0.6)(1-T_r),$$

其中：$\alpha=3.262+14.98p_r^{5.508}$，$\beta=1.39+5.746p_r$.

如果 $1<T_r<40$ 和 $0<p_r<100$，则

$$Z_2=\eta^0\xi\left[1+\frac{a_1 p_r^{1.3088}}{a_2 p_r^{a_5}+(1+a_3 p_r^{a_4})^{-1}}\right],$$

$$\xi=0.176[T_c/(M^3p_c^4)]^{1/6},$$

$$\mu_r=52.46\mu^2p_c/T_c^2,$$

其中：$0\leqslant\mu_r<0.022$ 时，$F_P^0=1$；

$0.022\leqslant\mu_r<0.075$ 时，

$$F_P^0=1+30.55(0.292-Z_c)^{1.72};$$

$0.075\leqslant\mu_r$ 时，

$$F_P^0=1+30.55(0.292-Z_c)^{1.72}|0.96+0.1(T_r-0.7)|.$$

查询文献[22]附录 A 和 B 可得，$\mu=0$，$M=28.014$，$T_c=126.192$K，$p_c=3.398$ MPa，$F_Q^0=1$，$T_r=T/T_c$，$p_r=p/p_c$，文献[22]中针对氮气，Lucas 选取的环境温度为 $T_0=300$ K，环境压力为 $p_0=0.1$ MPa，该温度和压力下初始黏度为 $\eta_0=1.79\times10^{-5}$ P·s.

由式(10)系列公式计算，可得到 Lucas 气体黏度与温度和压力关系值. 图 10 为黏－温－压拟合关系式(5)－(6)的黏度计算值相对于 Lucas 气体黏度方程的黏度偏差曲线. 图中选取了 4 个压力值对应的黏度偏差曲线，从偏差值看出，两者最大偏差为 3.066×10^{-6} Pa·s，最大偏差率为 5%，出现在压力为 20.0 MPa，温度为 －146.85 ℃处.

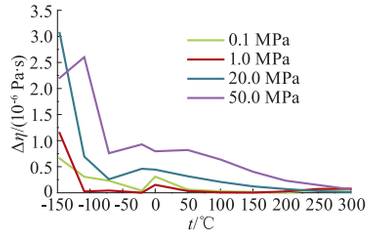

图 10　氮气拟合关系式与 Lucas 方程偏差曲线

Fig. 10　Error curves of nitrogen between fitting expression and Lucas equation

图 11 为 Lucas 气体黏度方程与美国国家标准与技术研究院(NIST)数据库的黏度数据对比偏差曲线图. 图中选取了 3 个压力值对应的偏差曲线，最大偏差为 4.150×10^{-7} Pa·s，最大偏差率为 1.8%，出现在压力为 20.0 MPa，温度为 10 ℃处.

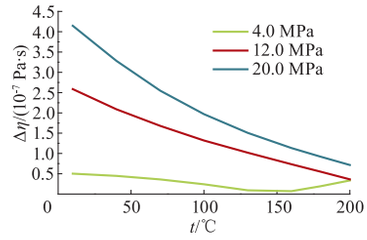

图 11　氮气 Lucas 方程与 NIST 偏差曲线

Fig. 11　Error curves of nitrogen between Lucas equation and NIST

图 12 为 Lucas 气体黏度方程与摩擦数据手册数据库的黏度数据对比偏差曲线图. 图中选取了 3 个温度值对应的偏差曲线，最大偏差为 3.120×10^{-6} Pa·s，最大偏差率为 8.9%，出现在压力为 27.2 MPa，温度为 －83.70 ℃处. 图 13 为 Lucas 气体

黏度方程与国家标准 GB/T151—2014 数据库的黏度数据对比偏差曲线图. 图中选取 6 个温度值对应的偏差曲线,最大偏差为 1.0×10^{-5} Pa·s,最大偏差率为 15.5%,出现在压力为 13.6 MPa,温度为 -146.85 ℃处.

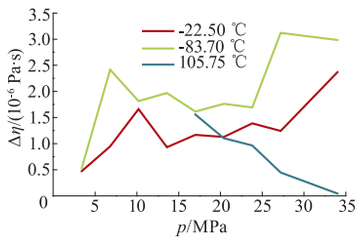

图 12 氮气 Lucas 方程与摩擦数据手册偏差曲线

Fig. 12 Error curves of nitrogen between Lucas equation and Tribology Data Handbook

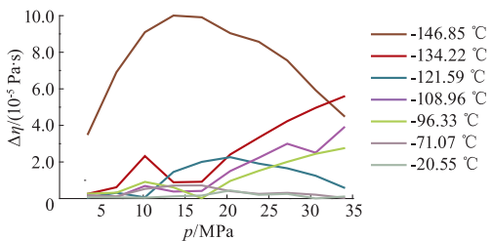

图 13 氮气 Lucas 方程与 GB/T151 偏差曲线

Fig. 13 Error curves of nitrogen between Lucas equation and GB/T151

从图 10 - 13 黏度偏差曲线可得到 Lucas 气体黏度方程相对于文中选取的几个数据来源的黏度偏差和偏差率,文中拟合关系式与这几个数据来源的黏度偏差:在 -150 ~ 0 ℃范围时,最大偏差为 5.786×10^{-6} Pa·s,当温度在 0 ~ 300 ℃时,偏差基本在 10^{-9} 内. 从偏差值对比可知,文中拟合黏 - 温 - 压关系式比 Lucas 气体黏度方程计算黏度与温度和压力的关系精度更高.

3 结 论

文中拟合关系式采用基于 AP1700 物质物性查询平台拟合黏度与温度和压力之间的关系,并分别与多个数据源进行对比,验证其计算精确度. 主要结论如下:

1)气体的黏 - 温关系、黏 - 压关系和黏 - 温 - 压关系可用拟合多项式进行表达.

2)拟合黏 - 温关系式、黏 - 压关系式、黏 - 温 - 压关系式分别与 NIST,GB/T151 数据库和摩擦数据手册数据对比,当温度在 0 ~ 300 ℃时,偏差基本在 10^{-9} 范围内,偏差率 <0.6%;在 -150 ~ 0 ℃范围时,最大偏差为 5.786×10^{-6} Pa·s,最大偏差率为 8.9%. 同时,小于根据 Lucas 气体黏度方程与上述几个数据源对比的黏度偏差值.

参考文献(References)

[1] 温诗铸,杨沛然. 弹性流体动力润滑[M]. 北京:清华大学出版社,1992:1 - 12.

[2] 宋鹏云. 螺旋槽干气密封端面气膜压力计算方法讨论[J]. 润滑与密封,2009,34(7):7 - 9.
SONG Pengyun. Discussion about the calculation methods of the gas film pressure of the spiral groove dry gas seals [J]. Lubrication engineering, 2009, 34(7):7 - 9. (in Chinese)

[3] HEIDARYAN E, MOGHADASI J, SALARABADI A. A new and reliable model for predicting methane viscosity at high pressures and high temperatures[J]. Journal of natural gas chemistry, 2010, 19(5):552 - 556.

[4] DAVANI E, FALCONE G, TEODORIU C, et al. HPHT viscosities measurements of mixtures of methane/nitrogen and methane/carbon dioxide[J]. Journal of natural gas science & engineering, 2013, 12(5):43 - 55.

[5] SCHÄFER M, RICHTER M, SPAN R. Measurements of the viscosity of carbon dioxide at temperatures from (253.15 to 473.15) K with pressures up to 1.2 MPa [J]. Journal of chemical thermodynamics, 2015, 89:7 - 15.

[6] HEIDARYAN E, HATAMI T, RAHIMI M, et al. Viscosity of pure carbon dioxide at supercritical region: measurement and correlation approach[J]. Journal of supercritical fluids, 2011, 56(2):144 - 151.

[7] 宋鹏云. 螺旋槽流体动压机械密封端面间液膜特性研究[D]. 成都: 四川大学,1999.

[8] 许静,彭旭东,白少先,等. 端面微尺度效应和热黏效应对干气密封性能的影响[J]. 化工学报,2013, 64(9): 3291 - 3300.
XU Jing, PENG Xudong, BAI Shaoxian, et al. Effects of surface micro-scale and thermal viscosity on sealing performance of spiral-grooved dry gas seal[J]. CIESC journal, 2013,64(9): 3291 - 3300. (in Chinese)

[9] 周桂如. 流体润滑理论[M]. 杭州:浙江大学出版社,1990: 9 - 21.

[10] 罗光熹,刘学龙. 高压天然气粘度的计算[J]. 天然气工业, 1989,9(4):58 - 62.
LUO Guangxi, LIU Xuelong. Calculation of the viscosity of high pressure gas [J]. Natural gas industry, 1989,9

(4):58 – 62. (in Chinese)

[11] JARRAHIAN A, HEIDARYAN E. A simple correlation to estimate natural gas viscosity[J]. Journal of natural gas science & engineering, 2014, 20(20):50 – 57.

[12] HEIDARYAN E, MOGHADASI J, RAHIMI M. New correlations to predict natural gas viscosity and compressibility factor[J]. Journal of petroleum science & engineering, 2010, 73(1/2):67 – 72.

[13] 田立楠. 纯气体、混合气体及液体粘度的计算[J]. 化肥设计, 1997, 35(6): 9 – 13.
TIAN Linan. Viscosity calculation of gas, gas mixture and liquid [J]. Chemical fertilizer design, 1997, 35(6): 9 – 13. (in Chinese)

[14] AP1700 物质物性计算查询平台[EB/OL]. [2016 – 02 – 05]. http://www.ap1700.com.

[15] NIST. Nist chemistry webbook [EB/OL]. [2015 – 2 – 9]. http://webbook.nist.gov/chemistry.

[16] 宋鹏云，产文，毛文元，等. 实际气体效应对螺旋槽干气密封性能影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(10): 874 – 881.
SONG Pengyun, CHAN Wen, MAO Wenyuan, et al. Numerical analysis on effect of real gas on spiral groove dry gas seal performance[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015, 33(10): 874 – 881. (in Chinese)

[17] BOOSER E R. Tribology data handbook [M]. New York: CRC Press, 1997:169 – 176.

[18] 马沛生，江碧云，张建侯. 气体常压粘度数据的评定和对温度的关联[J]. 化工学报，1981，32(3):193 – 205.
MA Peisheng, JIANG Biyun, ZHANG Jianhou. Critical assessment of viscosity and its correlation with temperature for gaseous substances under normal pressure [J]. Journal of chemical industry and engineering, 1981, 32(3):193 – 205. (in Chinese)

[19] LIDE D R. CRC Handbook of chemistry and physics [M]. CRC Press, 2001:1438.

[20] HOUGEN O A, WATSON K M, RAGATZ R A. Chemical process principles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1960.

[21] 中国国家标准化管理委员会. 热交换器:GB/T 151—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[22] POLING B E, PRAUSNITZ J M, O′CONNELL J P. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw – Hill, 2001:467 – 543.

(责任编辑　谈国鹏)

(上接第 143 页)

[7] 梁兴，刘梅清，张进国，等. 空气罐对输水管道水锤的防护研究[J]. 排灌机械，2005，23(6):16 – 18.
LIANG Xing, LIU Meiqing, ZHANG Jinguo, et al. Protection study on water hammer of pipelines by air vessel [J]. Drainage and irrigation machinery, 2005, 23(6): 16 – 18. (in Chinese)

[8] 张健，苗帝，黎东洲，等. 长距离供水工程空气罐水锤防护方案研究[C]//第二十七届全国水动力学研讨会文集(下册). 南京:河海大学水利水电学院，2015，1228 – 1237.

[9] 龚娟，张健，俞晓东. 高扬程输水系统空气罐阻抗孔尺寸优化[J]. 水电能源科学，2013，31(5):166 – 169.
GONG Juan, ZHANG Jian, YU Xiaodong. Optimization of impedance orifice of air vessel in high-lift water supply system[J]. Water resources and power, 2013, 31(5): 166 – 169. (in Chinese)

[10] 杨立信. 国外调水工程[M]. 北京:中国水利水电出版社，2003.

[11] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Lisheng. Fluid transient in systems[M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1993:61 – 65.

[12] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京:中国水利水电出版社，2000.

(责任编辑　张文涛)