

正丁醇 + 正庚烷二元系的音速和过量等熵压缩率

张恒飞 占涛涛 何茂刚 张颖

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要 正丁醇是潜在的新一代主流替代燃料。音速、密度等热物性参数对于燃料的喷射、雾化、燃烧具有重大影响,但目前相关研究还较为缺乏。本文以正丁醇 + 正庚烷混合物代替含醇燃料,利用瑞利-布里渊散射法,测量了其在温度 298.15~433.15 K 和压力 0.1、5.0 MPa 下的音速。结合文献密度数据计算了混合物的等熵压缩率 κ_s 和过量等熵压缩率 κ_s^E 。结果表明,混合物的音速随着正丁醇摩尔分数的增加而增加,而 κ_s^E 先增大后减小至负值,再增大。从分子间相互作用的角度进行了分析,并为该混合燃料的应用提供了参考建议。

关键词 音速; 瑞利-布里渊散射; 等熵压缩率; 过量性质

中图分类号: TK121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2023)04-0857-06

Speed of Sound and Excess Isentropic Compressibility of n-Butanol + n-Heptane Binary Mixtures

ZHANG Hengfei ZHAN Taotao HE Maogang ZHANG Ying

(Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract n-Butanol is expected to be the next generation alternative fuel. Thermal physical parameters such as speed of sound and density have great influence on fuel injection, atomization and combustion, however the relevant research is still lacking. In this work, the Rayleigh-Brillouin scattering method was applied to measure the speed of sound of n-butanol + n-heptane binary mixtures at 298.15~433.15 K under 0.1 and 5.0 MPa, as the fuel containing n-butanol. The isentropic compressibility (κ_s) and excess isentropic compressibility (κ_s^E) were calculated combined with density data from literatures. The results show that the speed of sound increases as the n-butanol molar fraction increases, while κ_s^E increases first, then decreases to negative values, and increases again. The intermolecular interactions are analyzed, moreover several suggestions are provided for this mixed fuel application.

Key words speed of sound; Rayleigh-Brillouin scattering; isentropic compressibility; excess property

0 引言

音速、密度是燃料的基本热物理性质,对燃料的喷射、雾化以及燃烧过程具有重大影响。正丁醇作为一种生物质燃料,具有燃烧效率高、热值高、污染排放低、与燃油混溶性好等优势;随着其生产工艺和技术的进步,有望成为继乙醇之后的下一代主流替代燃料^[1]。正庚烷具有与汽油相似的燃烧特性,因此在研究混合燃料的理化性能时,常将醇类与正庚烷的混合物作为含醇燃料的替代品。

由于分子间相互作用力的存在,混合溶液往往呈现出偏离相同温度、压力条件下理想混合物的热力学性质,这种偏差被称为过量性质。对于混合燃

料而言,音速及其相关过量性质的研究不仅有助于揭示混合物的分子间相互作用机理,建立准确的溶液热力学模型;且对燃料的优化配比研究以及燃烧装置的设计具有重要的指导作用^[2]。

燃料在喷射过程的压力通常在 3~5 MPa,温度高达 420 K。Sastry^[3]、Nath et al^[4,5] 测量了正丁醇和正庚烷混合物在 0.1 MPa 和 288.15~308.15 K 下的音速和密度,计算了过量摩尔体积和过量等熵压缩率。除此以外,未见有更高温度或压力范围内混合物的音速及其导出热力学性质数据。

为了填补混合燃料在实际应用条件下音速实验

收稿日期: 2022-08-25; 修订日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51721004)

作者简介: 张恒飞 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事流体热物性研究。

通信作者: 张颖, 教授, E-mail: zhangying@mail.xjtu.edu.cn。

数据的缺失, 本文利用瑞利-布里渊光散射法测量了正丁醇 + 正庚烷混合物在温度为 298.15~433.15 K 和压力为 0.1 MPa、5.0 MPa 下的液相音速。结合其他热物性数据计算了该混合物的等熵压缩率以及过量等熵压缩率, 并对结果进行了分析和讨论。

1 实验部分

1.1 实验材料

本文使用的正丁醇和正庚烷试剂均由上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供, 其纯度分别为 99.8% 和 99.4%。

1.2 实验方法

瑞利-布里渊散射法是一种先进的流体热物性测量方法, 其基本原理是: 当激光穿透流体时发生散射, 散射光受流体分子的电极化率的控制, 而电极化率的涨落是热力学变量的函数, 因此可利用光子计数器接收散射光的信号, 从其频谱图中获取音速、热扩散率等热物性的相关信息 [6]。

瑞利-布里渊散射频谱通常由三种特征峰组成, 分别为布里渊峰 (B)、中心瑞利峰 (R) 和反布里渊峰 (AB), 如图 1 所示。

瑞利峰与布里渊峰 (或反布里渊峰) 间的频率之差称为布里渊频移。根据多普勒效应, 流体的音速与布里渊频移具有如下关系:

$$c = 2\pi v_B / q \quad (1)$$

$$v_B = \frac{3}{4} \text{FSR} \frac{(t_{R1} - t_{B1}) + (t_{AB1} - t_{R1}) + (t_{R2} - t_{B2}) + (t_{AB2} - t_{R2})}{(t_{B2} - t_{B1}) + (t_{R2} - t_{R1}) + (t_{AB2} - t_{AB1})} \quad (4)$$

式中, t 为特征峰 B、R 或 AB 对应的时间, s。

本文所采用的实验装置已在文献 [7] 中有过详细介绍, 此处不再赘述。实验中温度、压力测量的不确定度分别小于 0.2 K 和 0.02 MPa, 音速测量的相对扩展不确定度为 0.98% (置信因子 $k = 2$)。

2 实验结果与分析

在 293.15~433.15 K 温度范围内和 0.1、5.0 MPa 压力下, 测量了正丁醇 + 正庚烷二元混合溶液的音速。实验结果如表 1 所示。

图 2 显示了正丁醇 + 正庚烷混合物的音速与温度、压力的关系, 其中正丁醇的摩尔分数 x_1 分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9。从图 2 中可以看出, 混合物的音速随着温度的升高呈线性减小, 随着压力的升高而增大; 而当温度、压力均相同时, 混合物的音速随着 x_1 的增加而增大。这与 Eyring 提出的硬球模型相符合 [7]——声波在分子内以无限速度传

式中, c 为音速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_B 为布里渊频移, Hz; q 为散射矢量的模, m^{-1} , 满足布拉格定律:

$$q = \frac{4n\pi}{\lambda_0} \sin \frac{\Theta_S}{2} \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \sin \Theta_{\text{Ex}} \quad (2)$$

式中, n 为流体的折射率; λ_0 为激光在真空中的波长, m; Θ_S 、 Θ_{Ex} 分别为散射角和入射角, ($^\circ$)。当入射角较小时 (11°), 可根据折射定律对式 (2) 采取近似处理, 再结合式 (1)、(2) 得到音速的测量表达式:

$$c = \frac{v_B \lambda_0}{\sin \Theta_{\text{Ex}}} \quad (3)$$

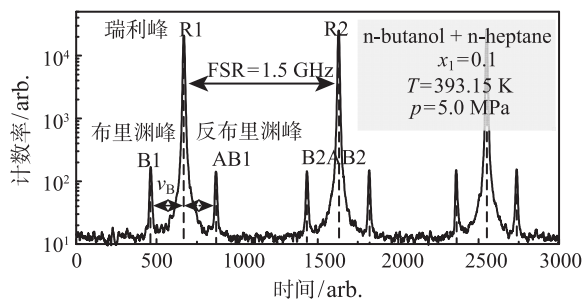


图 1 典型的瑞利-布里渊散射频谱
Fig. 1 Typical Rayleigh-Brillouin scattering spectrum

为了充分利用频谱图中信息, 通常使用多次算术平均值来计算布里渊频移:

播, 在分子间以气体动力学速度传播。当温度升高或压力降低时, 分子自由程增大, 音速随着分子半径与分子自由程之比的减小而减小。另外, 随着正丁醇摩尔分数 x_1 的增加, 两种分子间更多氢键的形成缩短了分子自由程, 促进了声波的传播, 音速增加 [9]。这也意味着正丁醇的加入会提高燃料在供给系统中的升压速度, 因此在发动机控制时需要增加一定的喷油延时, 通过延迟点火的方式使燃料与空气充分混合, 实现清洁高效的燃烧 [10]。

为了方便数据的使用, 将混合物的音速拟合不同丁醇摩尔分数 x_1 下关于温度 T 、压力 p 的计算关联式 [11]:

$$\frac{1}{c^2} = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + Bp + CTp \quad (5)$$

式中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 B 、 C 均为待拟合参数。

同时, 为了对拟合计算关联式以及实验数据的可靠性进行评估, 引入相对偏差 (RD)、平均相对偏

差 (ARD) 和最大偏差 (MD):

$$RD/\% = 100 \left(1 - \frac{y_{cal,i}}{y_{exp,i}} \right) \tag{6}$$

$$ARD/\% = \frac{100}{N} \sum_i \left| 1 - \frac{y_{cal,i}}{y_{exp,i}} \right| \tag{7}$$

$$MD/\% = 100 \text{Max} \left(\left| 1 - \frac{y_{cal,i}}{y_{exp,i}} \right| \right) \tag{8}$$

式中, $y_{cal,i}$ 是第 i 个计算值, $y_{exp,i}$ 是第 i 个实验值或文献值。

表 1 正丁醇 + 正庚烷混合物的音速测量结果
Table 1 Speed of sound of n-butanol + n-heptane mixtures

T/K	c/m·s ⁻¹				
	x ₁ = 0.1 ^a	x ₁ = 0.3	x ₁ = 0.5	x ₁ = 0.7	x ₁ = 0.9
p = 0.1 MPa					
298.15	1124.0	1135.7	1144.3	1176.5	1221.7
303.15	1101.4	1112.9	1131.7	1158.3	1200.6
313.15	1058.8	1072.7	1092.3	1119.6	1163.5
333.15	976.7	987.0	1005.6	1043.4	1094.7
353.15	893.8	909.0	929.3	967.5	1024.5
p = 5.0 MPa					
298.15	1156.4	1167.5	1179.0	1210.2	1245.8
303.15	1145.0	1145.7	1160.9	1190.9	1233.0
313.15	1096.8	1107.6	1123.4	1151.2	1193.0
333.15	1017.3	1028.5	1051.7	1080.5	1126.2
353.15	940.9	949.6	976.4	1014.9	1057.7
393.15	795.9	805.9	835.5	866.0	917.5
433.15	649.8	657.7	684.5	728.6	780.7

^a x₁ 表示混合物中正丁醇的摩尔分数。

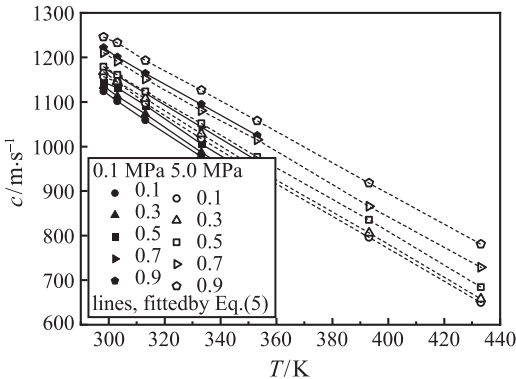


图 2 正丁醇 + 正庚烷混合物的音速随温度、压力的变化图
Fig. 2 Speed of sound of n-butanol + n-heptane mixtures

音速计算关联式 (5) 的拟合结果及计算偏差如表 2 和图 3 所示。其中, 平均相对偏差小于 1.5%, 最大偏差为 2.55%, 证明拟合效果良好。

图 4 展现了本文的音速实验值与文献 [3],[4] 数据的对比结果。其中最大偏差为 0.73%, 证明了本文测量的准确性。

表 2 音速计算关联式 (5) 的拟合参数及偏差
Table 2 Fitted parameters of Eq.(5) and deviations

	x ₁ = 0.1	x ₁ = 0.3	x ₁ = 0.5	x ₁ = 0.7	x ₁ = 0.9
A ₀ /10 ⁻⁶	5.313	5.279	4.936	3.673	2.963
A ₁ /10 ⁻⁸	-3.497	-3.451	-3.199	-2.355	-1.846
A ₂ /10 ⁻¹¹	6.654	6.519	6.038	4.585	3.619
B/10 ⁻⁷	1.065	0.979	1.100	0.6703	0.380
C/10 ⁻¹⁰	-3.834	-3.506	-3.883	-2.466	-1.457
ARD/%	0.91	0.66	0.66	1.45	1.05
MD/%	2.07	1.72	1.69	2.55	1.80

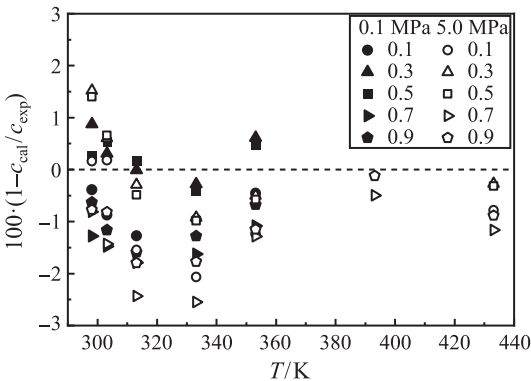


图 3 音速实验值与计算值的相对偏差
Fig. 3 Deviation of experimental values between experimental speed of sound and calculational value with Eq.(5)

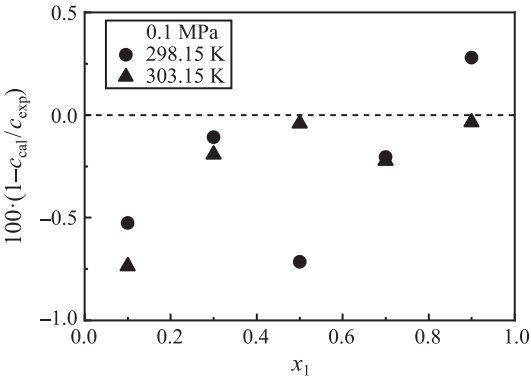


图 4 音速实验值与文献值的相对偏差
Fig. 4 Relative deviation of speed of sound between experimental and literature values

3 过量等熵压缩率的计算及分析

等熵压缩率 κ_s 表征了物质在等熵压缩 (或膨胀) 过程中体积的变化特性, 对于燃料的压缩-喷射

过程具有重大影响。 κ_s 可由音速和密度计算得到:

$$\kappa_s = 1/\rho c^2 \quad (9)$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; κ_s 为等熵压缩率, Pa^{-1} 。

过量等熵压缩率 κ_s^E 体现了混合物实际的可压缩性与理想混合状态之间的偏差,按照下式计算:

$$\kappa_s^E = \kappa_s - \kappa_s^{\text{id}} \quad (10)$$

$$\kappa_s^{\text{id}} = \sum \varphi_i \left\{ \kappa_{s,i} + T \frac{V_i \alpha_{p,i}^2}{C_{p,m,i}} \right\} - T \frac{\left(\sum x_i V_i \right) \left(\sum \varphi_i \alpha_{p,i} \right)^2}{\left(\sum x_i C_{p,m,i} \right)} \quad (11)$$

式中, 下标 i 表示纯组分的性质, $i=1, 2$ 。 $C_{p,m}$ 为摩尔定压热容, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。 α_p 为等温膨胀系数, K^{-1} ; φ 为体积分数; V_m 为摩尔体积, $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$; 分别定义为:

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

$$\varphi_i = \frac{x_i V_{m,i}}{\sum x_i V_{m,i}} \quad (13)$$

$$V_m = \frac{M}{\rho} \quad (14)$$

式中, x_i 为摩尔分数; M 为摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

表 3 热物理性质数据来源

Table 3 Data source of thermophysical property

	音速	密度	摩尔定压热容
正丁醇	Neruchev et al. ^[12] Plantier et al. ^[13]	Golubev et al. ^[14]	Naziev et al. ^[15]
正庚烷 混合物	NIST ^[16] Westwood et al. ^[17]		

计算过程中所用到的热物性数据来源见表 3。其中, 为获得等温膨胀系数 α_p , 将密度数据拟合成等压条件下关于温度的函数:

$$\rho = R_0 + R_1 x_1 + R_2 x_1^2 \quad (15)$$

式中, R_0 、 R_1 、 R_2 为: $R_0 = r_1 + r_2 T + r_3 T^2$, $R_1 = r_4 + r_5 T + r_6 T^2$, $R_2 = r_7 + r_8 T + r_9 T^2$, r_i 为拟合参数。拟合的相关系数均大于 0.994。

表 4 给出正庚烷 + 正丁醇混合物的等熵压缩率 κ_s 和过量等熵压缩率 κ_s^E 的计算结果。运用最小二乘法将 κ_s^E 关联为 Redlich-Kister 型方程^[18]:

$$\kappa_s^E = x_1 \cdot (1 - x_1) \cdot \sum_{j=0}^n k_j (2x_1 - 1)^j \quad (16)$$

式中, k_j 为拟合参数, n 为多项式展开的次数。

关联结果的标准偏差用下式计算:

$$\delta(\kappa_s^E) = \sqrt{\frac{\sum (\kappa_{s,\text{exp}}^E - \kappa_{s,\text{cal}}^E)^2}{m - n}} \quad (17)$$

式中, m 为数据点个数 ($m=7$)。拟合参数和标准偏差均列于表 5。

图 5 展示了混合物的过量等熵压缩率 κ_s^E 随正丁醇摩尔分数 x_1 变化的规律以及 Redlich-Kister 方程的拟合曲线。从图中可以看出: 随着 x_1 的增加, κ_s^E 先增大后减小至负值、再增大; 最大偏差发生在较小的 x_1 下, 且随着温度的升高或压力的降低, 最大偏差趋向于对应更大的 x_1 。 κ_s^E 的变化是多种分子间相互作用的综合结果。结合文献所报道的该混合物的过量摩尔体积先增后减且均为正值的

表 4 等熵压缩率 κ_s 与过量等熵压缩率 κ_s^E

Table 4 Isentropic compressibility κ_s and excess isentropic compressibility κ_s^E

T/K	κ_s/TPa^{-1}					$\kappa_s^E/\text{TPa}^{-1}$				
	$x_1 = 0.1$	$x_1 = 0.3$	$x_1 = 0.5$	$x_1 = 0.7$	$x_1 = 0.9$	$x_1 = 0.1$	$x_1 = 0.3$	$x_1 = 0.5$	$x_1 = 0.7$	$x_1 = 0.9$
$p = 0.1 \text{ MPa}$										
298.15	1152.04	1100.57	1050.59	957.82	851.77	8.77	7.99	0.86	-6.93	-9.41
313.15	1323.42	1256.88	1173.90	1075.53	953.73	32.52	29.99	9.23	-1.85	-12.31
333.15	1597.68	1524.55	1420.60	1268.00	1100.63	44.55	39.22	16.45	-6.43	-16.16
353.15	1963.18	1848.41	1708.91	1512.24	1285.66	53.72	49.89	23.69	-7.88	-24.75
$p = 5.0 \text{ MPa}$										
298.15	1085.75	1039.27	987.96	903.57	817.48	8.12	6.06	1.76	-10.40	-17.26
313.15	1225.90	1172.30	1103.87	1012.15	902.44	31.92	21.95	5.56	-4.63	-18.52
333.15	1458.09	1390.53	1287.15	1172.56	1032.08	41.05	27.72	8.43	-5.21	-22.85
353.15	1749.08	1673.59	1530.58	1360.65	1195.67	48.52	37.11	12.50	-6.60	-29.07
393.15	2598.03	2470.41	2219.81	1978.30	1675.31	83.51	83.83	25.74	-10.35	-37.37
433.15	3245.66	3212.20	2958.45	2561.00	2154.38	197.41	261.56	144.98	57.97	17.09

表 5 Redlich-Kister 方程参数及标准偏差
Table 5 Redlich-Kister equation parameters and standard deviations

T/K	k_0	k_1	k_2	k_3	$\delta(\kappa_s^E)/\text{TPa}^{-1}$
$p = 0.1 \text{ MPa}$					
298.15	3.428	-76.294	-4.045	-78.111	0.325
313.15	42.487	-148.903	120.260	-253.840	1.319
333.15	60.491	-221.770	141.238	-312.155	1.255
353.15	89.156	-276.856	100.925	-418.866	1.324
$p = 5.0 \text{ MPa}$					
298.15	5.592	-71.847	-91.022	-163.194	0.343
313.15	25.182	-94.153	82.891	-400.271	0.698
333.15	35.222	-113.435	105.920	-516.107	0.353
353.15	54.025	-167.245	92.509	-580.574	0.956
393.15	119.641	-467.647	247.108	-580.998	3.949
433.15	593.767	-1198.394	961.990	-84.106	3.277

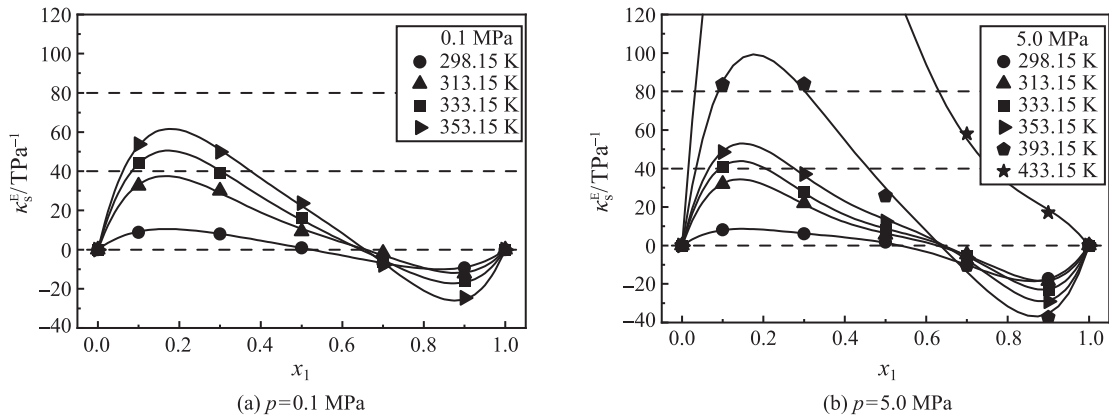


图 5 过量等熵压缩率 κ_s^E 随正丁醇摩尔分数 x_1 的变化图
Fig. 5 Excess isentropic compressibility κ_s^E (solid lines are fitted by Redlich-Kister equation)

结论 [5], 可以推测: 在较小的 x_1 下分子间氢键的断裂、较大的 x_1 下分子的有序排列和空隙适配, 是 κ_s^E 先增后减的主要原因; 尤其是当温度升高或压力降低时, 分子热运动加剧, 氢键弱化, 导致偏差进一步增大。同时, 这也意味着添加适量的正丁醇可以提高燃料的可压缩性, 这对于不同应用场景下 (如对发动机的压缩比、耐压性等有特殊要求的场合) 含醇燃料的配比选择具有实际的参考价值。

4 结 论

本文测量了正丁醇 + 正庚烷二元混合物在 298.15~433.15 K 温度和 0.1 MPa、5.0 MPa 压力下的液相音速, 其中正丁醇摩尔分数为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9。实验结果表明, 正丁醇的加入会增加正庚烷的音速, 这意味着压力波在燃油供给系统中传播速度更快, 因此在对发动机调控时要增加一定的喷油延时, 以避免燃料提前喷射导致的不完全燃烧。此外, 结合文献中的密度、摩尔定压热容数据计算

了混合物的等熵压缩率 κ_s 和过量等熵压缩率 κ_s^E , 并运用 Redlich-Kister 方程对 κ_s^E 进行了关联。计算结果表明, κ_s^E 随着正丁醇含量的增加而先增大后减小至负值, 再增大, 表明混合燃烧的可压缩性可通过含醇燃料的合理配比来进行适度调控, 这为不同场景下的应用提供了可量化的依据。

参 考 文 献

[1] ZHEN Xudong, WANG Yang, Liu Daming. Bio-butanol as a New Generation of Clean Alternative Fuel for SI (Spark Ignition) and CI (Compression Ignition) Engines [J]. Renewable Energy, 2020, 147(3): 2494–2521

[2] Dzida M, Marczak W. Thermodynamic and Acoustic Properties of Binary Mixtures of Alcohols and Alkanes. II. Density and Heat Capacity of (Ethanol + n-Heptane) under Elevated Pressures [J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2005, 37(8): 826–836

[3] Sastry N V, Valand M K. Densities, Speeds of Sound, Viscosities, and Relative Permittivities for 1-Propanol + and 1-Butanol + Heptane at 298.15 K and 308.15 K [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1996, 41(6): 1421–1425

- [4] Nath J. Speeds of Sound in and Isentropic Compressibilities of (n-Butanol + n-Pentane) at $T = 298.15$ K, and (n-Butanol + n-Hexane, or n-Heptane, or n-Octane, or 2,2,4-Trimethylpentane) at $T = 303.15$ K [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 1998, 30(7): 885–595
- [5] Nath J. Speeds of Sound in and Isentropic Compressibilities of (n-Butanol + n-Pentane, or n-Hexane, or n-Heptane, or 2,2,4-Trimethylpentane) at $T = 288.15$ K, (n-Hexanol + n-Pentane or n-Hexane) at $T = 298.15$ K, and (n-Hexanol + n-Heptane or n-Octane) at $T = 298.15$ K and $T = 303.15$ K [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2002, 34(11): 1857–1872
- [6] WANG Sheng, ZHANG Ying, HE Maogang, et al. Thermal Diffusivity and Speed of Sound of Saturated Pentane from Light Scattering [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(8): 1450–1464
- [7] ZHAN Taotao, ZHANG Ying, CHEN Junshuai, et al. Measurement of the Speed of Sound in Supercritical n-Hexane at Temperatures from (509.17–637.99) K and Pressures from (3.5–7.5) MPa [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2019, 497(10): 97–103
- [8] Kittel C. Ultrasonic Propagation in Liquids: II. Theoretical Study of the Free Volume Model of the Liquid State [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1946, 14(10): 614–624
- [9] ZHANG Ying, ZHAN Taotao, CHEN Junshuai, et al. Thermo-Acoustic Properties of (Ethanol + n-Heptane) Binary Mixtures from 293.35 to 433.89 K and up to 5.0 MPa [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2020, 65(8): 3893–3905
- [10] Kumar B R, Saravanan S. Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: A Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60(7): 84–115
- [11] Habrioux M, Nasri D, Daridon J L. Measurement of Speed of Sound, Density Compressibility and Viscosity in Liquid Methyl Laurate and Ethyl Laurate up to 200 MPa by Using Acoustic Wave Sensors [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2018, 120(5): 1–12
- [12] Neruchev Y A, Bolotnikov M F, Zotov V V. Investigation of Ultrasonic Velocity in Organic Liquids on the Saturation Curve [J]. *High Temperature*, 2005, 43(2): 266–309
- [13] Plantier F, Daridon J L, Lagourette B. Nonlinear Parameter (B/A) Measurements in Methanol, 1-Butanol and 1-Octanol for Different Pressures and Temperatures [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(10): 1063–1067
- [14] Golubev I F, Vasil'kovskaya T N, Zolin V S. Experimental Study of the Density of Aliphatic Alcohols at Various Temperatures and Pressures [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1980, 38(4): 399–401
- [15] Naziev Y M, Bashirov M M. Experimental Device for Measurement of Isobaric Specific Heat of Electrolytes at High State Parameters [J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1986, 51(5): 789–795
- [16] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1 [DB]. NIST NSRDS, 2010
- [17] Westwood B M, Kabadi V N. A Novel Pycnometer for Density Measurements of Liquids at Elevated Temperatures [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2003, 35(12): 1965–1974
- [18] Redlich O, Kister A T. Algebraic Representation of Thermodynamic Properties and the Classification of Solutions [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1948, 40(2): 341–345