

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

仲氢和标准氢的黏度与导热系数的研究综述

周辛梓¹, 谢锦涛¹, 季桓旭¹, 杨建², 孟现阳¹, 吴江涛¹(¹ 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; ² 西安交通大学化学学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 氢的热物理性质研究是其生产、储存和应用的基础。本研究调研了自1900年至今的仲氢和标准氢的黏度和导热系数研究, 梳理了测量技术、实验数据现状及模型开发进展。结果表明, 当前氢迁移性质研究存在早期实验技术不成熟、完整实验信息缺乏和测量不确定度被低估等问题。低温区不同研究结果差异显著。仲氢与标准氢的实际差别在某些温区难以与实验测量误差有效区分。受限于实验研究现状, 现有模型预测性能在低温区普遍降低。尽管近年来已有新的实验及模型研究报道, 但低温热氢物性的探索仍显不足。本研究工作剖析了目前氢黏度与导热系数研究中的关键问题, 为未来实验测量及模型开发提供参考。

关键词: 氢; 仲氢; 标准氢; 热力学性质; 黏度; 导热系数

中图分类号: TK 123

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-16

A survey of viscosity and thermal conductivity of parahydrogen and normal hydrogen

ZHOU Xinzi¹, XIE Jintao¹, JI Huanxu¹, YANG Jian², MENG Xianyang¹, WU Jiangtao¹

(¹ School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China; ² School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: The thermophysical properties of hydrogen have an impact on its production, storage, and utilization. A literature survey from 1900 has been conducted on the viscosity and thermal conductivity of hydrogen, encompassing the primary measurement method, experimental research status and model development progress. The results show several challenges in current research, including immature early experimental techniques, incomplete experimental information, and an underestimation of measurement uncertainties. The results of different studies in low-temperature regions vary significantly. The actual differences between parahydrogen and normal hydrogen are difficult to distinguish from measurement errors within specific temperature ranges. Constrained by the state of experimental research, the predictive performance of existing models generally decreases in low-temperature regions. Although novel experimental and modelling studies have been reported recently, research on the thermophysical properties of hydrogen at low temperatures remains inadequate. The present work analyzes the key issues in current research on hydrogen viscosity and thermal conductivity, providing a reference for future experimental measurements and model development.

Keywords: hydrogen; parahydrogen; normal hydrogen; thermodynamic properties; viscosity; thermal conductivity

收稿日期: 2026-02-12 修回日期: 2026-07-08

通信作者: 孟现阳(1978—), 男, 博士, 教授, xymeng@mail.xjtu.edu.cn

第一作者: 周辛梓(1996—), 男, 博士研究生, xinzizhou@stu.xjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51976164)

引用本文: 周辛梓, 谢锦涛, 季桓旭, 杨建, 孟现阳, 吴江涛. 仲氢和标准氢的黏度与导热系数的研究综述[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–16

Citation: ZHOU Xinzi, XIE Jintao, JI Huanxu, YANG Jian, MENG Xianyang, WU Jiangtao. A survey of viscosity and thermal conductivity of parahydrogen and normal hydrogen[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–16

引 言

在实现“双碳”目标的背景下,氢能的开发与利用正受到前所未有的重视。从表1中各个环节所涉及的温度和压力范围可以预计^[1],氢能产业发展的要求之一即是对极端工况下的系统性管理与优化。氢的热物理性质的研究一直是其生产、储存和应用的基础。氢能全产业链中各个环节关键技术优化的基础之一即为对热物理性质的全面研究。热力学性质通常决定工艺流程的可行性,而迁移性质则影响系统的经济性。随着能源、材料、原料和劳动力成本的不断提高,近年来,为探究迁移性质对工艺流程和产品设计优化的影响,已开展了大量理论和实验研究,迁移性质的准确性变得愈发重要^[2]。黏度和导热系数是重要的迁移性质,是工程应用中相关设备设计的关键参数,在压缩机、热交换器、流量计、泵等的设计或者在涉及热、质量或动量传递计算的任何置换过程中至关重要。

表1 氢能全产业链涉及的温度和压力^[1]Table 1 Temperature and pressure involved in the hydrogen industry chain^[1]

环节	技术	温度/K	压力/MPa
生产	碳氢化合物制氢;	923~1700;	0.3~10
	水制氢;	333~1173	0.1~25
	煤气化制氢;	393~723	2~3
	生物质制氢;	650~1000	0.1~0.5
储存	压缩氢气	室温	20
	液氢	20	常压
	有机液体/固体储氢	常温(放氢:523~573)	常压
交通	管道	常温	0.34~10
	液氢船运	20	常压
应用	车辆	233~313	35~70

氢通常是正氢与仲氢的混合物,二者随温度相互转化^[3]。若无催化剂或精馏等技术,正氢不能以纯态形式自然存在。因缺乏相关实验研究报道,目前正氢的热物理性质主要还依赖于转换为仲氢或标准氢的数据计算^[4]。因此,现阶段,仲氢和标准氢的热物理性质研究的可靠性至关重要。鉴于自Leachman等^[5]总结了1900年至2007年其黏度和导热系数的实验数据情况后,并未有研究者对此研究再发表过总结性的分析与展望,为了推进“氢经济”的系统设计,本文综述了1900至今仲氢和标准氢的黏度和导热系数的研究进展,总结了目前主要的实

验测量方法,给出实验数据现状,讨论了预测模型的进展,确定了未来氢黏度和导热系数性质研究的方向。

1 黏 度

1.1 主要实验方法及装置介绍

准确的黏度数据主要通过实验获取。扭转晶体法是目前唯一有公开数据发表,实现仲氢黏度测量的技术,对于标准氢的测量,毛细管法、振动盘法、蒸腾法则为使用较多的测量方法。蒸腾法的测量原理与毛细管法相同,最大区别仅在于驱动介质流动的力的形式(蒸腾法仅限于重力)。因此,仅对扭转晶体法、毛细管法及振动盘法予以介绍。

1.1.1 扭转晶体法黏度计 扭转晶体法是一种可在极端温度和高压环境下稳定工作的流体黏度测量技术。该方法的测量核心为一个压电驱动的石英圆柱体。该圆柱体被置于四个成对连接的电极中心,当对电极施加可变频率的交流电压时,由于交变电场的产生,圆柱体可通过逆压电效应扭转振动。圆柱体振动的共振频率、半峰宽及电导率受到周围流体的阻尼影响,通过测量相关信号即可获取流体黏度^[6]。Diller^[7]曾使用该装置开展了液态仲氢及饱和液态标准氢的黏度测量。如图1所示,该装置的核心为长度5 cm、直径0.3 cm、共振频率39.5 kHz的石英晶体。此外,Konareva和Rudenko^[8]也将该技术用于在温度14~32 K和压力0~1 MPa范围内液态标准氢黏度测量。虽然此方法适用范围广、装置结构紧凑、不需考虑流体的宏观流动,但该方法早期的工作方程仅是对圆柱体振动的近似描述,非严格的理论模型,实测数据通常比其他成熟测量技术得到的结果偏大^[9]。直到2021年,该技术所涉及的流体和固体动力学的理论分析才被Wakeham和Richardson^[10]完善。早期的测量结果有待使用理论完善的测量技术进行验证,如适用于极端工况下,可对气体和液体进行测量的振动弦技术^[2]。

1.1.2 毛细管法黏度计 毛细管法黏度计是目前最常用的黏度测量仪器^[11],该方法基于哈根—泊肃叶定律,对于流经一段圆柱管的牛顿流体,其黏度可通过测量毛细管两端的压降获取^[12]。针对气体测量,毛细管法并未有明显限制^[13],而针对液体测量,该技术通常只在常压或10 MPa下使用。因此,对于氢气,该类装置的使用温度和压力范围已分别覆盖

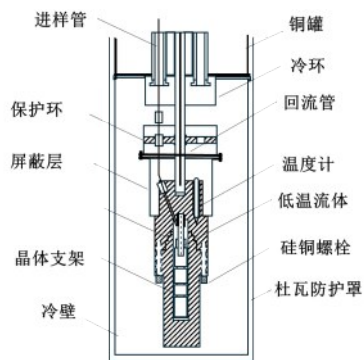


图1 扭转晶体法黏度计装置示意图^[7]

Fig.1 The experimental setup of torsional quartz-crystal viscometer^[7]

20~2152 K和0~200 MPa;针对液氢,仅Johns^[14](在温度范围14~21 K和压力范围0.15~0.28 MPa)和Rudenk和Konareva^[15](在温度范围15~20 K和压力范围0.01~0.1 MPa)使用该装置测量了标准氢黏度。图2为Owuna等^[16]开发的毛细管法黏度计的示意图。该装置的核心为长30 m、内径0.03 cm的毛细管。实际测量时,样品可被推拉注射泵注入设备并以恒定的流速流经毛细管,其进、出口的压力分别由两个压力传感器监测。该设备的使用温度和压力范围为213~324 K和0~31 MPa。值得注意的是,虽有该技术用于高压氢气黏度测量的报道^[16~21],但压降的高精度测量依旧制约着对其使用,特别是在极端工况,如该技术的使用温度低于213 K时,待测气态氢的压力未超过21 MPa,特别地,在77 K以下使用时,气态氢的最大压力仅为0.1 MPa。

1.1.3 振动盘法黏度计 振动盘法黏度计是振荡体法黏度计的一种,原理为:将一个轴对称物体悬挂于待测流体中,使其扭转一定角度后,通过测量其扭转振荡的衰减确定流体黏度^[11]。振动盘法黏度计通常只用于气体黏度的测量,其原理烦琐、装置结构复杂,对零部件的加工及安装要求极高,目前使用频次已有所下降。对于氢黏度测量,振动盘法黏度计测量的精度普遍较高,其所使用的温度和压力范围分别覆盖14~400 K和0~8.4 MPa。图3为

表2 氢黏度实验研究^a

Table 2 Experimental study of hydrogen viscosity^a

作者	年份	数据点	实验方法	温度/K	压力/MPa	纯度/%	宣称的不确定度/%
仲氢							
Diller ^[7]	1965	327	扭转晶体	14~100	0.65~34.5	NA	0.5
标准氢							
Breitenbach ^[23]	1901	5	毛细管法	253~575	0.1	NA	NA
Markowski ^[24]	1904	3	毛细管法	288~457	0.1	NA	NA

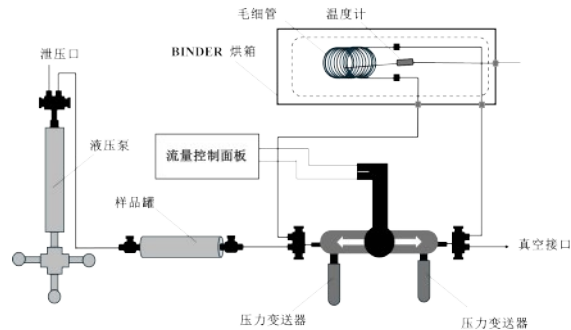


图2 毛细管法黏度计装置示意图^[16]

Fig.2 The experimental setup of capillary viscometer^[16]

Nabizadeh和Mayinger^[22]开发的振动盘法黏度计装置的示意图。其装置核心为悬挂于系统内、半径29.55 mm、厚度1.5 mm的圆盘。该装置可在温度296~399 K和压力0.1~5.8 MPa范围内实现氢和含氢混合物气体黏度的测量。

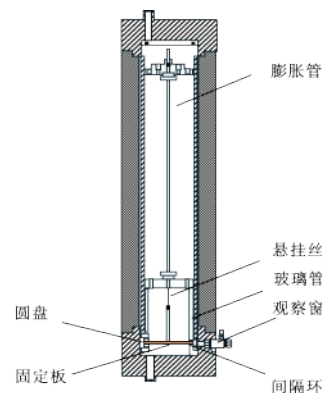


图3 振动盘法黏度计装置示意图^[22]

Fig.3 The experimental setup of oscillating disk viscometer^[22]

1.2 实验数据

表2汇总了公开发表的文献中仲氢和标准氢黏度实验研究的基本信息,包括实验年份、测量方法、温度范围、压力范围数据点数量、不确定度等。图4和图5展示了所有数据点在 p 、 T 平面上的分布情况,实验研究的温度、压力范围分别覆盖14~2100 K、0~217 MPa,共计1633个数据点。

续表

作者	年份	数据点	实验方法	温度/K	压力/MPa	纯度/%	宣称的不确定度/%
Schmitt ^[25]	1909	10	蒸腾法	78~458	0.1	NA	NA
Dorsman ^[26]	1913	17	毛细管法	20~294	0.03~0.06	NA	2
Vogel ^[27]	1914	7	振动盘法	21~273	0.02~0.1	NA	NA
Nicaise and Verschaffelt ^[28]	1917	1	未知	20	0.1	NA	1
Yen ^[29]	1919	1	旋转法	295	0.1	NA	NA
Ishida ^[30]	1920	1	油滴法	296	0.1	NA	0.3
Klemenc ^[31]	1924	1	蒸腾法	273	0.1	NA	NA
Trautz and Baumann ^[32]	1929	12	蒸腾法	195~523	0.1	NA	NA
Trautz and Ludewigs ^[33]	1929	20	蒸腾法	287~524	0.1	NA	NA
Trautz and Stauf ^[34]	1929	15	蒸腾法	192~525	0.1	NA	NA
Trautz and Binkele ^[35]	1930	6	蒸腾法	298~523	0.1	NA	NA
Trautz and Melster ^[36]	1930	8	蒸腾法	293~523	0.1	NA	NA
Trautz and Zink ^[37]	1930	8	蒸腾法	290~1099	0.1	NA	NA
Boyd ^[38]	1930	56	蒸腾法	303~343	7.2~19.4	NA	NA
Trautz and Kurz ^[39]	1931	12	蒸腾法	300~551	0.1	NA	NA
Trautz and Heberling ^[40]	1931	12	蒸腾法	295~523	0.1	NA	NA
Trautz and Sorg ^[41]	1931	12	蒸腾法	293~523	0.1	NA	NA
Sutherland and Maass ^[42]	1932	11	振动盘法	75~294	0.1	NA	0.4
Trautz and Hussein ^[43]	1934	4	蒸腾法	293~523	0.1	NA	NA
Trautz and Zimmermann ^[44]	1935	1	蒸腾法	90	0.1	NA	NA
Van Cleave and Maass ^[45]	1935	1	振动盘法	295	0.1	NA	0.2
Adzumi ^[46]	1937	9	毛细管法	293~373	0.1	NA	NA
Adzumi ^[47]	1937	1	毛细管法	293	0	NA	NA
van Itterbeek and Claes ^[48]	1938	4	振动盘法	14~19	饱和	NA	NA
van Itterbeek and Claes ^[49]	1938	11	振动盘法	14~293	0~0.01	NA	NA
Keesom and Macwood ^[50]	1938	14	振动盘法	15~20	0.01 0.1	NA	2
Johns ^[14]	1939	42	毛细管法	14~21	0.15~0.28	NA	1.1
van Itterbeek and Van Paemel ^[51]	1940	4	振动盘法	15~292	0.1	NA	NA
van Itterbeek and Van Paemel ^[52]	1940	34	振动盘法	15~293	0~0.1	NA	NA
Keesom and Keesom ^[53]	1940	20	振动盘法	14~21	0.01~0.1	NA	2
Johnston and McCloskey ^[54]	1940	7	振动盘法	300	0.02~0.1	NA	<0.3
van Itterbeek and van Paemel ^[55]	1941	5	落球法	15~20	0.1	NA	NA
Wobser and Müller ^[56]	1941	5	毛细管法	293~371	0.1	NA	NA
Buddenberg and Wilke ^[57]	1951	7	毛细管法	293~301	0.1	99.99	NA
Kuss ^[17]	1952	27	毛细管法	298~348	0.1~49	NA	2
Michels ^[18]	1953	95	毛细管法	298~398	2.6~186	NA	0.2
Kompaneets ^[58]	1953	7	振动盘法	284~873	0.1	NA	NA
Kestin and Pilarczyk ^[59]	1954	1	振动盘法	294	0.1	99.99	0.2
Rietveld and van Itterbeek ^[60]	1957	7	振动盘法	14~293	0~0.01	NA	NA
Kestin and Wang ^[61]	1958	10	振动盘法	298	0.1~7.1	99.992	0.2
Coremans ^[62]	1958	14	振动盘法	20~78	0.1	NA	2
Rietveld ^[63]	1959	14	振动盘法	14~293	0.001~0.01	NA	3
Kestin and Leidenfrost ^[64]	1959	9	毛细管法	293	0.4~8.4	99.974	0.05
Rudenk and Konareva ^[15]	1963	8	毛细管法	15~20	0.01~0.1	NA	1.3
Barua et al. ^[65]	1964	38	振动盘法	223~423	0.8~15	99.96	0.2
Kestin and Nagashima ^[66]	1964	13	振动盘法	293~303	0.1~0.6	99.999	0.2

续表

作者	年份	数据点	实验方法	温度/K	压力/MPa	纯度/%	宣称的不确定度/%
Menabde ^[67]	1965	11	扭转晶体法	77~300	0.006	NA	2
Diller ^[7]	1965	13	毛细管法	14~26	饱和	NA	0.5
Tsederberg ^[68]	1965	28	毛细管法	289~990	4.4~51	NA	3
Golubev and Shepeleva ^[19]	1966	96	扭转晶体法	77~273	0.9~49.1	99.99	1
Konareva and Rudenko ^[8]	1967	10	振动盘法	14~32	0~1	NA	1.5
Kestin and Yata ^[69]	1968	11	落球法	293~303	0~2.4	99.999	0.2
Rudenko and Sliusar ^[70]	1968	91	毛细管法	33~300	0.1~217	NA	1.5
Grackl ^[71]	1969	42	毛细管法	173~298	0.4~17.1	99.95	0.2
Guevara ^[72]	1969	24	振动盘法	283~2152	0.1	NA	2
Kestin ^[73]	1971	3	声共振法	295~308	0.1	99.9995	0.1
Carey ^[74]	1974	18	毛细管法	291~299	0.15~11	NA	0.1
Chuang ^[20]	1976	37	振动盘法	173~273	0.4~51	99.999	0.5
Clifford ^[75]	1981	2	毛细管法	298~308	0.1	99.9995	0.2
Lukin ^[76]	1983	23	振动盘法	77~293	0.1~5.8	NA	0.3
Nabizadeh and Mayinger ^[22]	1999	76	毛细管法	296~399	0.1~5.8	NA	0.5~1
Mal'tsev ^[77]	2004	3	毛细管法	500~1100	0.3	99.9	3
May ^[78]	2007	32	毛细管法	214~394	0~0.1	99.9999	0.08
Yusibani ^[21]	2010	17	振动弦法	294~400	4.6~99.3	99.999	2
Mhel ^[79]	2010	20	从头计算	20~2000	0	NA	0.08~10
Sakoda ^[80]	2015	20	毛细管法	296~573	0.1~0.7	99.999	1.4
Cheng ^[81]	2020	21	毛细管法	288~923	0.5~24	99.9999	0.05
Owuna ^[16]	2024	57	毛细管法	213~323	1.19~21	99.995	0.27~0.65
Betken ^[82]	2024	21	振动盘法	298~348	2.59~12	99.9999	0.65~2.7

注：“粗体”为参考方程^[83]开发所使用的数据

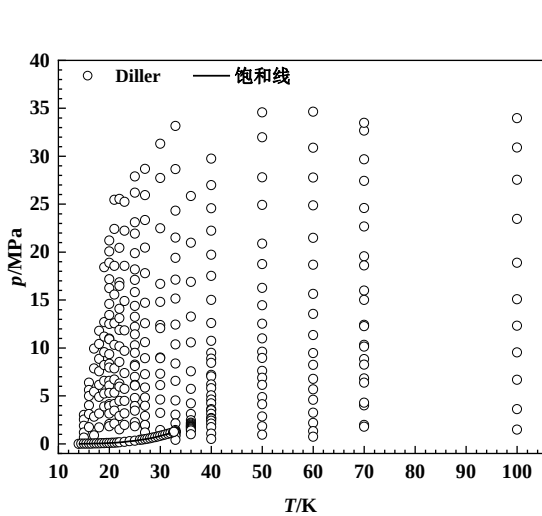


图4 仲氢黏度数据分布

Fig.4 The distribution of parahydrogen viscosity data

从表2和图4中可得,仲氢的黏度实验研究十分匮乏,仅一篇文献对其有过公开报道^[7]。该文献不仅未提供详细的氢气纯度信息,且无法判断是否正氢已完全转化。此外,由于实验开展早于测量技术理论方程完善的时间,因此,需要使用其他先进

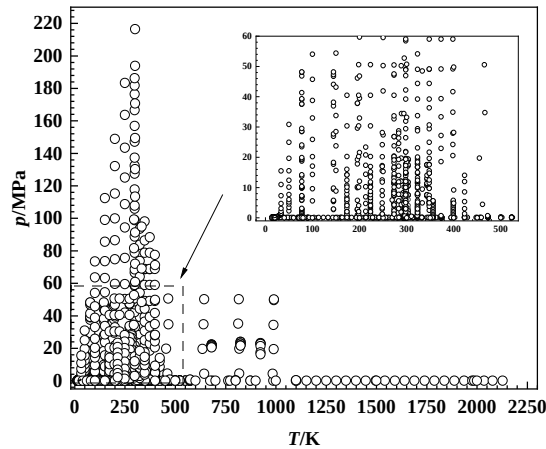


图5 标准氢黏度数据分布

Fig.5 The distribution of normal hydrogen viscosity data

物性技术对其测量结果进行验证。图6给出了仲氢黏度实验数据与Muzny等^[83]提出的多参数黏度参考方程计算值的相对偏差,结果表明二者的偏差多在2.5%以内,偏差较大的点主要位于近临界区域(32 K),最大可达60%。虽该方程的开发旨在标准氢黏度的计算,但因液态氢的数据稀少,其已通过使用

Leachman 等提出的状态方程^[4]将 Diller 的仲氢数据等效转化为标准氢的数据参与方程开发。因此,该方程可用于仲氢黏度的计算。现有的研究表明,标准氢和仲氢的黏度差异主要存在于液态。如图 7 所示,利用参考黏度方程^[83],对 Diller 的研究中测量状态点所对应的仲氢与标准氢黏度的差异进行了分析,结果表明,除临界区外,方程计算的仲氢与标准氢黏度相对偏差在 2% 以内。Diller^[7]报告的测量不确定度以及测量结果与方程的偏差都大于此值,考虑到方程的开发仅基于此数据,还需更多的实验判断数据的测量误差是否影响方程对仲氢与标准氢差异的分析。然而,后续未有研究者开展针对性实验以对此进行深入探讨。

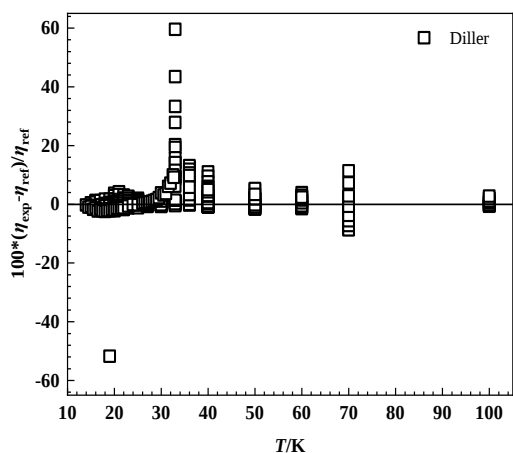


图6 仲氢黏度数据与参考方程计算值的偏差^[83]

Fig.6 Deviation of parahydrogen viscosity data from the reference correlation^[83]

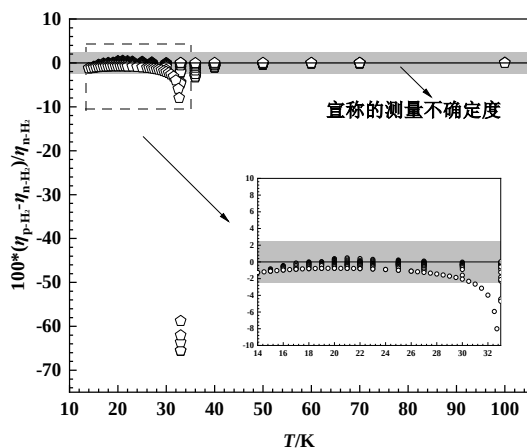


图7 仲氢与标准氢黏度的相对偏差^[83]

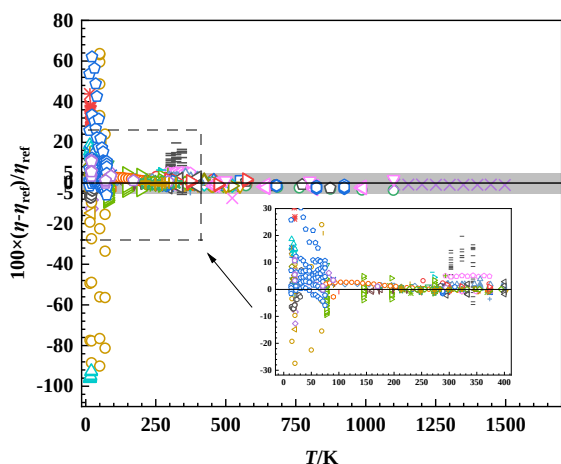
Fig.7 Relative deviation of viscosity of parahydrogen from normal hydrogen^[83]

如图 5 所示,标准氢的实验数据点众多,多数研究者仅在常压下开展研究,其中绝大部分作者未能

提供详细的实验信息(实验方法详述、样品纯度/成分、完整工作方程、不确定评价等),故大多数作者所声称的较低测量不确定度仍需评估。如图 8 所示,低温数据的显著差异导致方程的开发仅通过部分低温数据开发方程并不能与多数实验结果吻合,在 100~400 K 范围内,实验数据与方程的偏差在 5% 以内;而在 20~100 K 范围内,偏差多超过 10%,多个研究中待测物质的所处相态与方程计算不符,偏差最高可至 95%。同时,由于不同实验数据间的差异,远大于方程给出的仲氢与标准氢黏度相对偏差,因此难以准确判断二者在黏度上的真实差异。尽管自 2000 年以来有 8 项研究成果发表,但这些工作主要还集中于 200 K 以上温区,数据与方程的偏差也与早期研究结果相近(3% 以内),未涉及氢黏度研究的薄弱环节(低温区),尤其是液氢温区。因此,还需要进行额外的低温氢黏度测量以验证早期研究者数据集的可靠性,同时对现有方程进行改进。

1.3 模型

氢黏度模型主要为通过实验数据回归得到的半经验模型。多参数黏度方程是氢黏度模型中使用频次最高的模型之一,该模型由三项组成,表示在零密度极限时,仅发生两体分子相互作用对黏度的贡献 η_0 、表示黏度随密度和温度变化规律对黏度的贡献 $\Delta\eta$ 以及表示流体在临界点附近发生长程涨落对黏度的贡献 $\Delta\eta_c$ 。此类模型最早已在 Diller^[7]对仲氢黏度的测量中报道,该方程中, η_0 为只与温度相关的经验关联式, $\Delta\eta_c$ 被忽略为 0, $\Delta\eta$ 为与温度和密度相关的指数型复合函数。后续, McCarty 等^[84]又对该方程的 $\Delta\eta$ 项做了修改,调整了与密度相关的函数项,未改变方程的适用范围。Hanley 等^[85]曾试图以修正的 Enskog 理论来描述 $\Delta\eta$,然而,其模型在高密度区域并不适用,与实验数据的偏差多达 10%,后续也未有模型开发者采用此形式的 $\Delta\eta$ 。1996 年, Vargaftik 等^[86]曾报道过可在温度 14~1500 K, 压力 0~100 MPa 范围内计算标准氢和仲氢黏度的此类模型。该模型仅包含 η_0 和 $\Delta\eta$, η_0 为温度的函数, $\Delta\eta$ 为温度与密度的函数,为早期 REFPROP 软件^[87]装载的氢黏度参考方程。1999 年, Nabizadeh 和 Mayinger^[22]报道了用于气态氢黏度计算的该类方程,方程仅包含 η_0 和 $\Delta\eta$,前者可通过 Chapman-Enskog 的解来计算,后者为密度的函数。该方程的开发仅使用了其测量数据,计算值与实验值的偏差在 0.3%

图8 标准氢黏度数据与参考方程计算值的偏差^[83]Fig.8 Deviation of normal hydrogen viscosity data from the reference correlation^[83]

注: , Diller^[17]; ■, Breitenbach^[23]; △, Markowski^[24]; ▽, Schmitt^[25], Dorsman et al.^[26]; ◇, Vogel^[27]; ◁, Nicaise and Verschaffelt^[28], Yen^[29]; ☆, Ishida^[30]; ▷, Klemenc and Remi^[31]; ■, Trautz and Baumann^[32]; ■, Trautz and Ludewigs^[33]; ■, Trautz and Stauf^[34], Trautz and Binkele^[35], Trautz and Melster^[36]; ■, Trautz and Zink^[37], Boyd^[38]; ▽, Trautz and Kurz^[39]; △, Trautz and Heberling^[40]; ◇, Trautz and Sorg^[41]; ◁, Sutherland and Maass^[42]; ▷, Trautz and Hussein^[43], Trautz and Zimmermann^[44]; ☆, Van Cleave and Maass^[45], Adzumi^[46]; ■, Adzumi^[47]; ■, van Isterbeek and Claes^[48], van Isterbeek and Claes^[49]; ■, Keesom and Macwood^[50], Johns^[14], van Isterbeek and van Paemel^[51]; ■, van Isterbeek and van Paemel^[52]; △, Keesom and Keesom^[53]; ▽, Johnston and McCloskey^[54]; ◇, van Isterbeek and van Paemel^[55]; ◁, Wobser and Müller^[56]; ▷, Buddenberg and Wike^[57], Kuss^[17]; ☆, Michels et al.^[18], Kompaneets^[58]; ■, Kestin and Pilarczyk^[59]; ■, Rietveld and van Isterbeek^[60]; ■, Kestin and Wang^[61]; —, Coremans et al.^[62], Rietveld et al.^[63], Kestin and Leidenfrost^[64]; ■, Rudenko and Konareva^[15]; △, Barua et al.^[65]; ▽, Kestin and Nagashima^[66]; ◇, Menabde^[67]; ◁, Tseederberg et al.^[68]; ▷, Golubev and Shepeleva^[19], Konareva and Rudenko^[8]; ☆, Kestin and Yata^[69], Rudenko and Sliushar^[70]; ■, Gracki et al.^[71]; ■, Guevara et al.^[72]; ■, Kestin and Ro^[73]; —, Carey et al.^[74], Chuang et al.^[20], Clifford et al.^[75]; ■, Lukin et al.^[76]; △, Nabizadeh and Mayinger^[22]; ▽, Mal'tsev et al.^[77]; ◇, May et al.^[78]; ◁, Yusibani et al.^[21], Mhel et al.^[79]; ▷, Sakoda et al.^[80]; ☆, Cheng et al.^[81], Owuna et al.^[16]; ■, Betken et al.^[82]

以内。2010年,针对高温高压氢气的应用,Yusibani等^[88]开发了多参数黏度方程并在以下范围内适用:温度 40~2130 K(压力 0.1 MPa)和温度 100~990 K(压力 0.1~220 MPa),方程与实验数据的偏差在 4% 以内。Muzny 等^[83]于 2013 年提出了适用于从三相点至 1000 K 和压力高达 200 MPa 的多参数黏度方程(当前参考方程)。该方程中, $\Delta\eta_c$ 被忽略为 0, η_0 由 Vogel 提出的近似表达式^[89]计算, $\Delta\eta$ 为第二黏度维里系数与 η_0 的积,函数形式通过符号回归

得到。方程计算与实验数据的比较结果,前文已给出,后续的改进与优化有赖于实验数据的补充,特别是温度 100 K 以下的实验结果。2023 年,Wei 等^[90]也提出了氢的多参数黏度方程,其可在温度范围 100~2130 K(稀薄气体)和 14~1000 K(压力高达 220 MPa)内提供黏度预测。该模型忽略了临界增强对黏度的贡献,仅包含 η_0 和 $\Delta\eta$,该方程相较于以往的黏度方程有了部分改进,如方程与实验数据的平均绝对偏差(1.06%)低于 Muzny 等^[83](1.14%)和 Yusibani 等^[88]的结果(1.12%),又如改善了先前方程因压力增大而导致预测精度降低的问题。与 200 K 以上温区不同,该方程与 Muzny 等^[83]的方程在 100 K 以下的计算结果产生分歧,对于 Diller^[7]的实验值,Muzny 等方程计算结果^[83]呈正偏差,而 Wei 等^[90]方程的结果却呈负偏差,但对于相同测量温区 Johns^[14]的测量结果,二者的计算结果并未出现此类现象。二者开发的差异主要源于开发所采纳的中高温区域数据的选择以及 $\Delta\eta$ 的具体形式,为此,还应补充更多的数据,以有效评估各方程在低温区的表现,确定更合理的方程形式。

摩擦理论黏度模型也是氢的参考黏度方程之一。该模型由 Quinones-Cisneros 和 Deiters 于 2001 年提出,一直未发表,装载于 RERPROP 软件中^[87]。该模型可将剪切流与两个在剪应力下的滑动表面进行类比,通过温度相关的摩擦系数与法向应力将黏度关联。2001 年,Zeberg-Mikkelsen 等^[91]建立了氢的三参数摩擦理论模型,由于模型的开发源于天然气掺氢应用,故使用条件为温度 200 K 以上。在温度 296~399 K 和压力 1~5.8 MPa 的范围内,模型与 Nabizadeh 和 Mayinger^[22]的纯氢实验数据的偏差在 2% 以内,其与当前参考方程的预测性能相近。

近年来,剩余熵标度理论因出色的适用性、外推性,为氢黏度计算提供了新的途径。Yang 等^[92]曾结合 Helmholtz 状态方程开发了适用 124 种流体的剩余熵标度理论模型。其中,氢黏度的计算值与实验值的平均绝对偏差为 2.5%。虽然该值大于 Muzny 等^[83]提出的参考方程与实验值的平均绝对偏差,但其模型仅需单一自变量(熵),即可实现全流体范围内的黏度预测,大大简化了在实际工业生产过程中应用的操作量。

此外,2024 年,Heidaryan 和 Aryana^[93]提出了针对气态氢的经验方程。该方程为温度和压力的高阶多项式,涵盖温度 100 K 至 1100 K,压力 0.1 至

217 MPa,与实验数据的偏差与 Muzny 等的方程^[83]结果相近。目前所有模型预测精度较差的区域多集中在 100 K 以下,原因主要为:(1)可用于方程开发的高质量数据有限;(2)多数模型的开发需要耦合状态方程,而早期开发所选用的状态方程均无法描述氢的量子效应。因此,后续氢黏度模型还需通过高精度的实验数据以及耦合包含量子修正的状态方程作进一步优化。

2 导热系数

2.1 主要实验方法及装置介绍

氢导热系数数据的准确性是其工程应用的关键,早期多采用热线法对其测量,后期则逐渐被由热线法(稳态)演变而来的瞬态热线法(非稳态)所取代。考虑到二者的发展关系以及热线法目前已鲜有使用,本文仅对瞬态热线法进行介绍。

2.1.1 瞬态热线法 瞬态热线技术具有使用温度范围宽、工作方程完善、装置结构紧凑、测量时间短、自动化程度高等特点。在瞬态热线法中,介质的导热系数通过测量细金属丝在恒定的加热功率下温度随时间升高的速率来确定。该技术在氢导热系数的测量方面应用广泛,使用范围覆盖温度 78~772 K 以及压力 0~100 MPa。相较于其他测量技术,该方法成熟可靠,对测量介质状态和适用环境并无明显限制,优势在极端工况下尤为突出,建议后续研究对其广泛应用。图 9 为 Assael 和 Wakeham^[94]以及 Mustafa 和 Ross^[95]所使用的氢导热系

数实验装置示意图。该装置由两个核心测量腔室组成,除长度外,二者其他设计参数完全相同。腔室内,热线为直径 7 μm 的铂丝,其上端通过金焊料直接固定于位于腔室上端的铂钩,下端被固定在与腔室下端铂钩连接的金丝制弹簧上。该装置可在温度 300 K 以上开展实验测量。

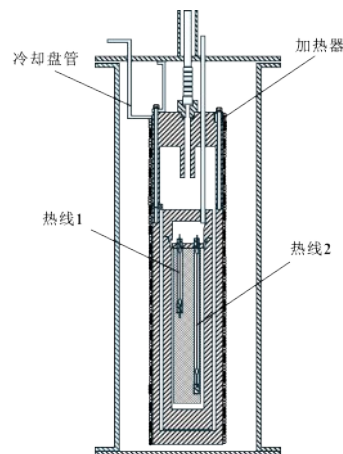


图9 瞬态热线法导热系数测试仪装置示意图^[94-95]

Fig.9 The experimental setup of transient hot-wire thermal conductivity meter^[94-95]

2.2 实验数据

表3汇总了公开文献中仲氢和标准氢导热系数实验研究的基本信息。图10和图11展示了所有数据点在 p 、 T 平面上的分布情况,实验研究的温度、压力范围分别覆盖 15~2000 K、0~100 MPa,共计 2971 个数据点。

表3 氢导热系数实验研究^a

Table 3 Experimental study of hydrogen thermal conductivity^a

作者	年份	数据点	实验方法	温度/K	压力/MPa	纯度/%	宣称不确定度/%
仲氢							
Power ^[96]	1954	7	平板法	15.1~21.4	0.1	NA	0.5
Dwyer ^[97]	1966	9	梯度测量	15~22	0.02~22	99	50.0
Roder and Diller ^[98]	1970	135	防护热板法	17~153	0.02~19	99.8	NA
Roder ^[99]	1984	510	瞬态热线法	99~274	0.9~13	NA	1.5
标准氢							
Eucken ^[100]	1911	4	热线法	273~373	0.1	NA	NA
Eucken ^[101]	1913	4	热线法	20.7~273.1	0.1	NA	NA
Weber ^[102]	1917	1	热线法	273	0.1	NA	NA
Gregory and Archer ^[103]	1926	43	热线法	275~277	0.02~0.1	NA	NA
Schuster ^[104]	1926	10	热线法	280.3~315	0.002~0.06	NA	1.0
Kannuluik and Martin ^[105]	1934	8	热线法	274	0.003~0.8	NA	0.5
Dickins ^[106]	1934	1	热线法	291.115	0.083	NA	0.4
Gregory ^[107]	1935	9	热线法	295~593	0.1	NA	NA

续表

作者	年份	数据点	实验方法	温度/K	压力/MPa	纯度/%	宣称不确定度/%
Nothdurft ^[108]	1937	1	热线法	273	0.1	NA	NA
Spencer-Gregory and Dock ^[109]	1938	11	热线法	95~280	0.09~0.1	NA	NA
Archer ^[110]	1938	1	热线法	273	0.01	NA	0.2
Ubbink and de Haas ^[111]	1943	4	平板法	19~273	0.003~0.1	NA	NA
Johnston and Grilly ^[112]	1946	19	热线法	84.7~374	0.1	99.99	0.5
Ubbink ^[113]	1948	13	平板法	15~274	0.1	NA	NA
Stolyarov ^[114]	1950	25	同轴圆柱体法	291~575	0.1~49	99	3
Lenoir ^[115]	1951	8	热线法	316	0.1~21	99.7	1.5~3.0
Keyes ^[116]	1954	10	温度梯度法	358~523	0.1~14.7	NA	NA
Power ^[96]	1954	12	平板法	16.8~22.72	0.1	NA	2.0
Salceanu and Bojin ^[117]	1956	1	热线法	303	0.1	NA	NA
Chaikin and Markevich ^[118]	1958	5	热线法	293~503	0.1	NA	5.0
Srivistava and Srivistava ^[119]	1959	1	热线法	311.15	0.1	NA	NA
Geier and Schafer ^[120]	1961	13	热线法	273~1473	0.1	NA	1.0~2.0
Golubev and Kalsina ^[121]	1964	195	圆柱比卡计	78~298	0.1~49	99.998	NA
Sheril ^[122]	1965	8	热线法	92~280	0.1	NA	NA
Hamrin and Thodos ^[123]	1966	58	同轴圆柱体法	275~348	0.1~67	NA	2.5
Mukhopadhyay ^[124]	1967	7	热线法	258~473	0.1	99.95	1.0
van Dael and Cauwenbergh ^[125]	1968	1	温度梯度法	297	0.1	99.5	NA
Timrot and Umanskii ^[126]	1969	17	热线法	400~2000	0.1	NA	NA
Saxena and Saxena ^[127]	1970	32	热线法	323~1273	0.02~0.05	99.95	2.0
Saxena and Gupta ^[128]	1970	3	热线法	313~366	0.1	99.95	2.0
Roder and Diller ^[98]	1970	112	防护热板法	17~153	0.02~11	99.8	NA
Saxena and Tondon ^[129]	1971	15	热线法	313~450	0.001~0.1	99.95	2.0
Le Neindre ^[130]	1972	28	同轴圆柱体法	273~873	0.1~80	NA	2.5
Carey ^[74]	1974	18	声学谐振器	295~299	0.15~11	NA	1.0
Clifford ^[131]	1975	2	瞬态热线法	78, 283	0.1	99.95	2.6
Clifford ^[132]	1980	30	瞬态热线法	299~301	2~36	99.995	0.2
Clifford ^[133]	1981	41	瞬态热线法	311~385	1.9~23.5	99.999	0.2
Assael and Wakeham ^[94]	1981	12	瞬态热线法	307~308	2~9	99.998	0.2
Roder ^[98]	1984	1176	瞬态热线法	103~300.8	0.6~69.7	NA	1.5
Mustafa and Ross ^[95]	1987	51	瞬态热线法	307~428	2.5~10	99.999	0.5
Hemminger ^[134]	1987	6	防护热板法	313~463	0.1	99.999	0.8
Charignon ^[135]	2008	19	保护板法	15~23	0.24~1	NA	1.8
Moroc ^[136]	2011	198	瞬态热线法	323~772	0.2~100	99.99	2.0
Liu ^[137]	2025	77	瞬态热线法	69~150	8~36	99.999	2.9

注:“粗体为参考方程^[138]开发所使用的数据

如图10所示,迄今为止,只有三个科研团队开展过仲氢导热系数实验研究,实验温度范围仅覆盖14~273 K。虽然数据点较多,但仅Roder^[98]对待测样品的正仲氢比例有过明确说明,且不同团队间的数据差异显著。图12展示了仲氢实验数据与Assael等^[138]开发的多参数导热系数参考方程的偏差。Power^[96]与Dwyer^[97]的结果与方程计算值的最大偏差

均超过70%。虽然Roder团队^[98-99]两次测量的实验值与方程的偏差相对较小(6%以内),但在温度120~150 K范围内,这两次测量结果均出现与方程的偏差陡增现象,偏差最大可达20%。仲氢参考方程的开发目前仅基于该团队的研究数据,在150 K附近,方程对仲氢与标准氢的计算结果(图13)也出现类似情况,二者的偏差接近上述实验值与方程的偏差。同黏度研究,后续还需开展更多的低温区测

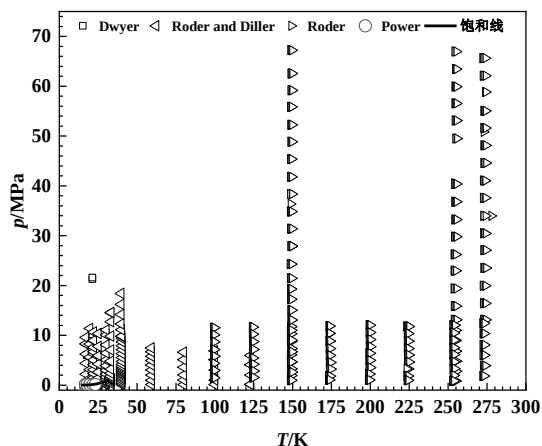


图10 仲氢导热系数数据分布

Fig.10 The distribution of parahydrogen thermal conductivity data

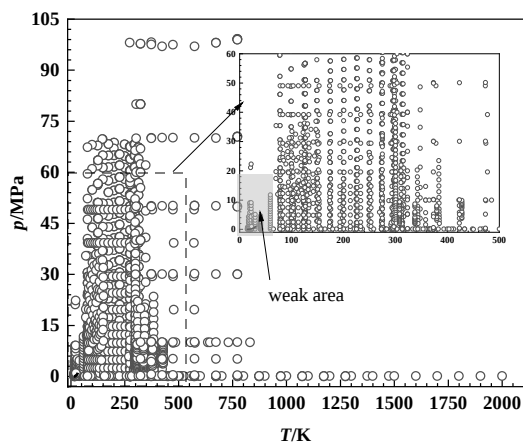
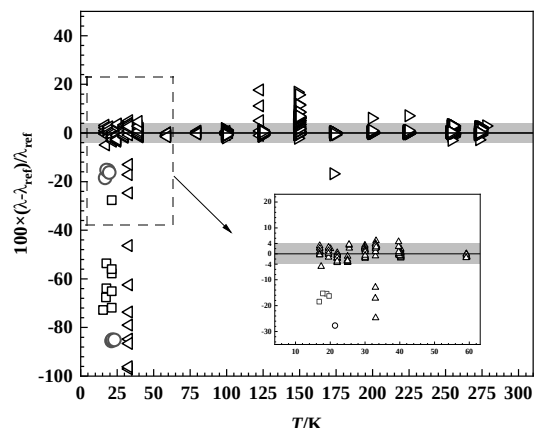


图11 标准氢导热系数数据分布

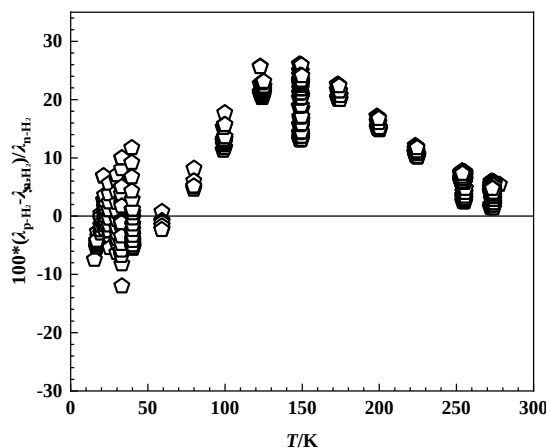
Fig.11 The distribution of normal hydrogen thermal conductivity data

量以准确区分仲氢与标准氢的实际差异并改进方程。

由表3和图11可知,标准氢导热系数的研究范围覆盖:温度14~2000 K和压力0~100 MPa。虽然实验数据繁多,但实验在77 K以下研究并不充分,仅7篇文献对此有过报道,其中仅有两项研究在高于大气压的条件下开展,最高压力仅为21 MPa。与黏度研究相同,多数作者未提供详细实验信息,研究仍存在不足。值得注意的是导热系数是确定正仲氢比例的重要手段之一,实验数据的准确性影响了对判断标准的制定,因此,后续完善该研究的意义重大。图14给出了标准氢导热系数实验值与参考方程计算值的相对偏差^[138]。特别地,当温度低于77 K时,方程与数据的偏差约为10%,此与方程计算的仲氢与标准氢导热系数值的偏差相近(图13),数据

图12 仲氢导热系数数据与参考方程计算值的偏差^[138]Fig.12 Deviation of parahydrogen thermal conductivity data from the reference correlation^[138]

注:■, Power et al.^[96]; △, Dwyer et al.^[97]; ◁, Roder and Diller^[98]; ▷, Roder^[99]

图13 仲氢与标准氢导热系数的相对偏差^[138]Fig.13 Relative deviation of thermal conductivity of parahydrogen from normal hydrogen^[138]

间的差异性阻碍了对仲氢与标准氢导热系数实际差异的界定。此外,在温度800 K以上,三个团队^[120,126-127]在不高于常压的条件下开展的实验结果一致性较好,但与方程的偏差均随温度的升高而增大。因此,参考方程在极端温区的表现仍有待改善。不同于黏度研究,自2000年至今的导热系数研究虽仅有3项,但其中2项都已针对低温区开展。具体地,Moroe等^[136]的研究温度和压力分别覆盖323~772 K和0.2~100 MPa,同多数作者一致,其数据与方程的偏差在3%以内。Charignon等^[135]的研究主要针对液氢,实验值与方程的偏差仅为5%,对应其研究温区,Roder和Diller^[98]的数据与方程的偏差却在1%以内(方程通过其拟合),二者有明显差异。Liu等^[137]的研究范围与早期多个研究重合,所得数

据与方程的偏差在4%以内,在Liu等的研究温区内,Roder^[99]的数据与方程的偏差整体随温度降低而增大,而Liu等^[137]未呈现此特征。新的低温测量数据集凸显了验证早期数据集以及改进方程的必要性。

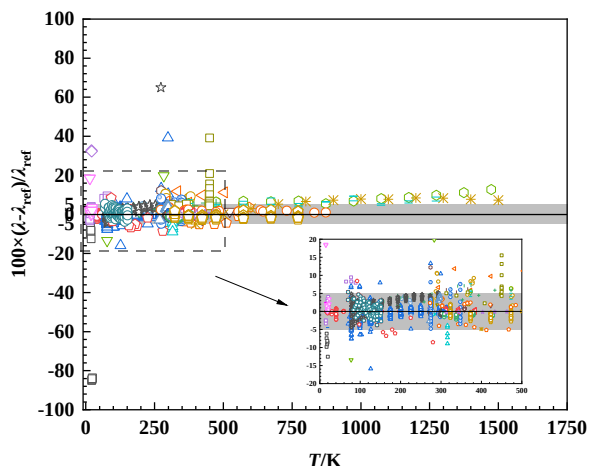


图14 标准氢导热系数数据与参考方程计算值的偏差^[138]

Fig.14 Deviation of normal hydrogen thermal conductivity data from the reference correlation^[138]

注: Power et al.^[96]; ■, Roder and Diller^[98]; △, Roder^[99]; ▽, Eucken^[100]; ◇, Eucken^[101]; ×, Webe^[102]; <, Gregory and Archer^[103]; ▷, Schuster^[104]; ■, Kannuluik^[105]; ☆, Dickins^[106]; ■, Gregory^[107]; ■, Nothdurft^[108]; ■, Spencer-Gregory and Dock^[109]; ■, Archer^[110]; —, Ubbink and de Haas^[111]; ■, Johnston and Grilly^[112]; ■, Ubbink^[113]; ■, Stolyarova^[114]; △, Lenior and Comings^[115]; ▽, Keyes^[116]; ◇, Salceanu and Bojin^[117]; <, Chaikin and Markevich^[118]; ▷, Srivastava and Srivastava^[119]; ■, Geier and Schafer^[120]; ☆, Golubev and Kalsina^[121]; ■, Sherif^[122]; ■, Hamrin and Thodos^[123]; ■, Mukhopadhyay et al.^[124]; ×, van Dael and Cauwenbergh^[125]; ■, Timrot and Umanski^[126]; —, Saxena and Saxena^[127]; ■, Saxena and Gupta^[128]; ■, Saxena and Tondon^[129]; ■, Le Neindre^[130]; △, Carey et al.^[74]; ▽, Clifford et al.^[131]; ◇, Clifford et al.^[132]; <, Clifford et al.^[133]; ▷, Assael and Wakeham^[94]; ■, Mustafa and Ross^[95]; ☆, Hemminger^[134]; ▽, Charignon et al.^[135]; ■, Moroe et al.^[136]; ■, Liu et al.^[137]

2.3 模型

导热系数模型多为半经验模型,多参数导热系数方程是所有模型中预测精度较高的模型之一。该方程中,导热系数由三个独立贡献组成,分别是描述稀薄气体极限导热系数贡献的 λ_0 、临界增强贡献的 $\Delta\lambda_c$ 以及所有其他效应对高密度流体导热系数贡献的 $\Delta\lambda$ 。Vargaftik等^[86]曾在1981年就报道过可在温度14~1500 K,压力0~100 MPa范围内计算标准氢、仲氢的多参数导热系数方程。该模型包含 λ_0 、 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda_c$ 三项,其中 λ_0 为温度的指数型函数, $\Delta\lambda$ 与其开发的多参数黏度模型具有相同的形式, $\Delta\lambda_c$ 为温度与密度的函数。1984年Roder^[139]用其测量数据拟

合了适用于温度78~423 K,压力0~70 MPa范围内的该类方程。在该方程中, λ_0 可通过Hanley等^[140]的理论计算表,结合修正因子计算。 $\Delta\lambda$ 的形式复杂,为与密度和温度有关的复合函数。 $\Delta\lambda_c$ 与Vargaftik等的方程^[86]主体形式一致,仅其中与密度有关的函数项有明显差别。该方程的计算结果与其他实验结果的偏差在-7%~4%之间。为了扩展Roder^[139]开发的方程的适用性,Moroe等^[136]于2011年提出过此类方程,计算值与实验数据的偏差范围为-10%~4%。该作者通过同Roder和Diller^[98]的实验结果对比,判断其方程不适用于温度78 K以下(偏差最大可至88%),但通过上节的数据比较可知,低温区本身实验结果差异明显,方程计算值可能与该温区导热系数真实值的差异并未至此,其适用性有待进一步验证。后续,Assael等^[138]也提出了仲氢和标准氢的多参数导热系数方程,其适用温度覆盖从三相点到1000 K,压力上限为100 MPa,现为氢导热系数参考方程。该方程由 λ_0 、 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda_c$ 组成,其中, λ_0 可通过稀薄气体实验值拟合的多项式计算, $\Delta\lambda$ 为与温度和密度相关的高阶多项式, $\Delta\lambda_c$ 可通过Olchoway和Sengers^[141]提出的简化交叉模型求解。方程与实验数据的偏差上文已给出,模型的优化有待于高精度数据的补充。

近年来,研究者们也开发了剩余熵标度理论氢导热系数模型。Li等^[142]基于Yang等^[143]的工作,开发了涵盖125种纯流体的导热系数模型,与1399个氢导热系数实验值的平均相对偏差为-0.7%。该模型中,导热系数被分为稀薄气体项、剩余项和临界增强项,其中,稀薄气体项由基于REFPROP软件^[87]计算结果拟合得到的多项式确定,剩余项为通过状态方程计算的无量纲剩余熵的函数,临界增强项可通过Olchoway和Sengers^[141]提出的简化交叉模型求解。2026年,Liu等^[137]利用此模型关联了其实验测量结果,由于测量温度远离临界点,模型开发中忽略了临界增强项。该模型计算值与其他研究者实验值的偏差在-6%~8%。

2024年,Heidaryan和Aryana^[93]提出了针对气态氢导热系数的经验方程,该方程为温度和压力的高阶多项式,涵盖100 K至1100 K,常压至217 MPa。在温度200 K以上,该方程的计算值与实验结果的偏差在5%以内,而在200 K以下,其与Roder和Diller^[98]以及Roder^[99]的偏差最高可达16%。综合考虑上述所有方程,目前氢导热系数方程与实验结果

的差异主要表现在低温区域,在200 K以上温区,多数方程与实验数据的偏差在5%以内,而在低温区,偏差激增超过10%,因此,后续方程的改进工作也应着力于低温区的修正。

3 结 论

可靠的热物理性质研究是工质系统设计的基础。本研究对近一个世纪以来氢黏度与热导率的进行了全面梳理。结果表明,尽管已有大量相关研究,但当前研究仍存在显著不足,表现为:

(1)早期部分测量所采用的实验技术尚不成熟,后续需借助更为可靠的测量技术对其测量结果进行验证与补充,特别是扭转晶体法对液氢黏度的测量。

(2)实验研究普遍缺乏完整的实验信息。低温区域数据差异显著,存在部分研究的实际相态与参考方程计算结果不匹配的现象,数据本身的测量误差可能已影响参考方程对仲氢与标准氢差异的计算。尽管2000年后有新的研究开展,但针对低温区的探索仍显不足,且新增低温数据与早期结果存在差异。

(3)受实验数据整体质量的影响,大多数氢黏度与导热系数模型的计算精度相近,模型在低温区普遍预测性能下降,不同方程间计算结果的差异也主要体现在低温区。后续需借助更多的高质量实验数据或耦合包含量子修正的状态方程,开展有针对性的模型改进工作。

展望未来,低温氢的热物理性质研究应受到更多的重视,包括开发新的低温热物性测量仪器、开展极端温区热物理性质测量和建立适用于全流体温范围内的热物理性质模型。此外,鉴于实验研究成本巨大,理论模型计算复杂、适用范围有限,人工智能也需在热物性研究中发挥更多作用。通过先进智能算法,以有限的实验数据为驱动,生成高保真虚拟数据,建立更全面、高质量的氢的热物理性质数据库,实现与氢能工业实际应用场景的快速对接,从而推动氢能产业链高效、安全与智能化发展。

参考文献

- [1] Li F Y, Ma W, Zhang X. Database of thermophysical properties of $H_2/CO_2/CO/CH_4/H_2O$ mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(44): 16923–16935.
- [2] Haynes W M, Diller D E, Roder H M. Transport properties of fluids of cryogenic interest[J]. *Cryogenics*, 1987, **27**(7): 348–360.
- [3] da Silva Falcão B, Jeong K, Al Ghafri S, et al. Ortho-to para-hydrogen catalytic conversion kinetics[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, **62**: 345–351.
- [4] Leachman J W, Jacobsen R T, Penoncello S G, et al. Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2009, **38**(3): 721–748.
- [5] Leachman J W, Jacobsen R T, Penoncello S G, et al. Current status of transport properties of hydrogen[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2007, **28**(3): 773–795.
- [6] Welber B, Quimby S L. Measurement of the product of viscosity and density of liquid helium with a torsional crystal[J]. *Physical Review*, 1957, **107**(3): 645.
- [7] Diller D E. Measurements of the viscosity of parahydrogen[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1965, **42**(6): 2089–2100.
- [8] Konareva V G, Rudenko N S. Measurement of the viscosity of hydrogen isotopes along a liquid-vapor equilibrium curve[J]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 1967, **41**(9): 2387–2388.
- [9] Kestin J, Wakeham W A. Transport Properties of Fluids: Thermal Conductivity, Viscosity and Diffusion Coefficient: thermal conductivity, viscosity & diffusion coefficient[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [10] Wakeham W A, Richardson S M. The torsional quartz-crystal viscometer[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2021, **42**(8): 120.
- [11] Wakeham W A, Nagashima A, Sengers J V. Measurement of the Transport Properties of Fluids[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991.
- [12] Poiseuille J L M. Recherches Expérimentales Sur Le Mouvement des Liquides Dans Les Tubes de Très-Petits Diamètres[M]. Paris: Imprimerie Royale de France, 1844: 1041–1048.
- [13] Berg R F. Simple flow meter and viscometer of high accuracy for gases[J]. *Metrologia*, 2005, **42**(1): 11–23.
- [14] Johns H E. The viscosity of liquid hydrogen[J]. *Canadian Journal of Research*, 1939, **17a**(12): 221–226.
- [15] Rudenko N S, Konareva V G. Viscosity of liquid hydrogen and deuterium[J]. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 1963, **37**(12): 1493–1496.
- [16] Owuna F J, Chapoy A, Ahmadi P, et al. Viscosity of hydrogen and methane blends: experimental and modelling investigations[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2024, **45**(8): 119.
- [17] Kuss E. High pressure research II : The viscosity of compressed gases[J]. *Zeitschrift für Angewandte Physik*, 1952, **4**(6): 203–207.
- [18] Michels A, Schipper A C J, Rintoul W H. The viscosity of hydrogen and deuterium at pressures up to 2000 atmospheres[J]. *Physica*, 1953, **19**(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12): 1011–1028.
- [19] Golubev I F, Shepeleva R I. Viscosity of hydrogen at low temperatures and high pressures[J]. *Gazovaya Promyshlennost*, 1966, **11**(4): 54–58.
- [20] Chuang S Y, Chapple P S, Kobayashi R. Viscosity of methane, hydrogen, and four mixtures of methane and hydrogen from -100. degree. C to 0. degree. C at high pressures[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1976, **21**(4): 403–411.
- [21] Yusibani E, Nagahama Y, Kohno M, et al. A capillary tube viscometer designed for measurements of hydrogen gas viscosity at high pressure and high temperature[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2011, **32**(6): 1111–1124.

- [22] Nabizadeh H, Mayinger F. Viscosity of binary mixtures of hydrogen and natural gas (hythane) in the gaseous phase[J]. High Temperatures-High Pressures, 1999, **31**(6): 601-612.
- [23] Breitenbach P. Ueber die innere Reibung der Gase und deren Aenderung mit der Temperatur[J]. Annalen der Physik, 1901, **310**(5): 166-169.
- [24] Markowski H. Die innere Reibung von Sauerstoff, Wasserstoff, chemischem und atmosphärischem Stickstoff und ihre Änderung mit der Temperatur[J]. Annalen der Physik, 1904, **319**(9): 742-755.
- [25] Schmitt K. Über die innere Reibung einiger Gase und Gasgemische bei verschiedenen Temperaturen[J]. Annalen der Physik, 1909, **335**(12): 393-410.
- [26] Dorsman C, Kamerlingh Onnes H, Weber S. Investigation on the viscosity of gases at low temperatures. I. Hydrogen[J]. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences, 1913, **15**: 1386-1396.
- [27] Vogel H. Über die Viskosität einiger Gase und ihre Temperaturabhängigkeit bei tiefen Temperaturen[J]. Annalen der Physik, 1914, **348**(8): 1235-1272.
- [28] Nicaise C, Verschaffelt J E. The viscosity of liquefied gases. IX. Preliminary determination of the viscosity of liquid hydrogen[J]. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences, 1917, **19**: 1084-1088.
- [29] Yen K L. LVIII. An absolute determination of the coefficients of viscosity of hydrogen, nitrogen, and oxygen[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1919, **38**(227): 582-596.
- [30] Ishida Y. Determination of viscosities and of the Stokes-Millikan law constant by the oil-drop method[J]. Physical Review, 1923, **21**(5): 550-563.
- [31] Klemenc A, Remi W. Experimentelle Untersuchung über die Koeffizienten der inneren Reibung von Stickoxyd und Propan und deren Mischungen mit Wasserstoff[J]. Monatshefte für Chemie und Verwandte Teile Anderer Wissenschaften, 1923, **44**(7): 307-316.
- [32] Trautz M, Baumann P B. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen. II. die reibung von H_2 - N_2 -und H_2 - CO -gemischen [J]. Annalen der Physik, 1929, **394**(6): 733-736.
- [33] Trautz M, Ludewigs W. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen VI. reibungsbestimmung an reinen gasen durch direkte messung und durch solche an ihren gemischen[J]. Annalen der Physik, 1929, **395**(3): 409-428.
- [34] Trautz M, Stauf F W. Die Reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen. III. die reibung von H_2 - C_2H_4 - gemischen[J]. Annalen der Physik, 1929, **394**(6): 737-742.
- [35] Trautz M, Binkle H E. Die Reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen. VIII. die reibung des H_2 , He, Ne, Ar und ihrer binären gemische[J]. Annalen der Physik, 1930, **397**(5): 561-580.
- [36] Trautz M, Melster A. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen XI. die reibung von H_2 , N_2 , CO , C_2H_4 , O_2 und ihren binären gemischen[J]. Annalen der Physik, 1930, **399**(4): 409-426.
- [37] Trautz M, Zink R. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen XII. gasreibung Bei höheren temperaturen[J]. Annalen der Physik, 1930, **399**(4): 427-452.
- [38] Boyd J H. The viscosity of compressed gases[J]. Physical Review, 1930, **35**(10): 1284-1297.
- [39] Trautz M, Kurz F. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen XV. die reibung von H_2 , N_2O , CO_2 und C_3H_8 und ihren binären gemischen[J]. Annalen der Physik, 1931, **401**(8): 981-1003.
- [40] Trautz M, Heberling R. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen XVII. die reibung von NH_3 und seinen gemischen mit H_2 , N_2 , O_2 , C_2H_4 [J]. Annalen der Physik, 1931, **402**(2): 155-177.
- [41] Trautz M, Sorg K G. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen XVI. die reibung von H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 und ihren binären gemischen[J]. Annalen der Physik, 1931, **402**(1): 81-96.
- [42] Sutherland B P, Maass O. Measurement of the viscosity of gases over a large temperature range[J]. Canadian Journal of Research, 1932, **6**(4): 428-443.
- [43] Trautz M, Hussein I. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion in gasmischungen. XXVI. die innere reibung von propylen und β -butylen und von ihren mischungen mit He oder H_2 [J]. Annalen der Physik, 1934, **412**(2): 121-126.
- [44] Trautz M, Zimmermann H. Die reibung, Wärmeleitung und diffusion von gasmischungen XXX. die innere reibung bei tiefen temperaturen von wasserstoff, helium und neon und binären gemischen davon bis 90, 0° abs. herab[J]. Annalen der Physik, 1935, **414**(2): 189-194.
- [45] Van Cleave A B, Maass O. The molecular diameter of deuterium as determined by viscosity measurements[J]. Canadian Journal of Research, 1935, **12**(1): 57-62.
- [46] Adzumi H. Studies on the flow of gaseous mixtures through capillaries. I the viscosity of binary gaseous mixtures[J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 1937, **12**(5): 199-226.
- [47] Adzumi H. Studies on the flow of gaseous mixtures through capillaries. III. the flow of gaseous mixtures at medium pressures [J]. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 1937, **12**(6): 292-303.
- [48] van Itterbeek A, Claes A. Viscosity of light hydrogen gas and deuterium between 293° K. and 14° K[J]. Nature, 1938, **142**(3600): 793-794.
- [49] van Itterbeek A, Claes A. Measurements on the viscosity of hydrogen-and deuterium gas between 293° k and 14° k[J]. Physica, 1938, **5**(10): 938-944.
- [50] Keesom W H, Macwood G E. The viscosity of hydrogen vapour[J]. Physica, 1938, **5**(8): 749-752.
- [51] van Itterbeek A, van Paemel O. Measurements on the viscosity of neon, hydrogen, deuterium and helium as a function of the temperature, between room temperature and liquid hydrogen temperatures[J]. Physica, 1940, **7**(3): 265-272.
- [52] van Itterbeek A, van Paemel O. Measurements on the viscosity of gases for low pressures at room temperature and at low temperatures[J]. Physica, 1940, **7**(3): 273-283.
- [53] Keesom W H, Keesom P H. The viscosity of hydrogen vapour[J]. Physica, 1940, **7**(1): 29-32.
- [54] Johnston H L, McCloskey K E. Viscosities of several common gases between 90° K. and room temperature[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1940, **44**(9): 1038-1058.
- [55] van Itterbeek A, van Paemel O. Bestimmung der inneren reibung vom flüssigen wasserstoff und deuterium[J]. Physica, 1941, **8**(1):

- 133–143.
- [56] Wobser R, Müller F. Die innere reibung von gasen und dämpfen und ihre messung im Höppler-viskosimeter[J]. Kolloid-Beihfte, 1941, **52**(6): 165.
- [57] Buddenberg J W, Wilke C R. Viscosities of some mixed gases[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1951, **55**(9): 1491–1498.
- [58] Kompaneets V Y. Experimental investigation of the viscosity of gases and gaseous mixtures at high temperatures[G]//Collection of Scientific Works. Leningrad: Leningrad Institute of Agricultural Mechanization, 1953, 9: 113.
- [59] Kestin J, Pilarczyk K. Measurement of the viscosity of five gases at elevated pressures by the oscillating-disk method[J]. Journal of Fluids Engineering, 1954, **76**(6): 987–997.
- [60] Rietveld A O, van Itterbeek A. Viscosity of mixtures of H₂ and HD between 300 and 14 ° K[J]. Physica, 1957, **23**(6/7/8/9/10): 838–842.
- [61] Kestin J, Wang H E. The viscosity of five gases: a re-evaluation [J]. Journal of Fluids Engineering, 1958, **80**(1): 11–17.
- [62] Coremans J M J, van Itterbeek A, Beenakker J J M, et al. The viscosity of gaseous He, Ne, H₂ and D₂ below 80° K[J]. Physica, 1958, **24**(6/7/8/9/10): 557–576.
- [63] Rietveld A O, van Itterbeek A, Velds C A. Viscosity of binary mixtures of hydrogen isotopes and mixtures of He and Ne[J]. Physica, 1959, **25**(1/2/3/4/5/6): 205–216.
- [64] Kestin J, Leidenfrost W. An absolute determination of the viscosity of eleven gases over a range of pressures[J]. Physica, 1959, **25**(7/8/9/10/11/12): 1033–1062.
- [65] Barua A K, Afzal M, Flynn G P, et al. Viscosity of hydrogen, deuterium, methane, and carbon monoxide from: 50° to 150° C below 200 atmospheres[J]. The Journal of Chemical Physics, 1964, **41**(2): 374–378.
- [66] Kestin J, Nagashima A. Viscosity of the isotopes of hydrogen and their intermolecular force potentials[J]. The Physics of Fluids, 1964, **7**(5): 730–734.
- [67] Menabde N E. Viscosity coefficient of hydrogen (H₂, D₂), neon (Ne²⁰, Ne²²) and helium (He³) isotopes in the temperature range –195 to +25° C[J]. Atomic Energy, 1965, **19**(5): 1421–1422.
- [68] Tsederberg N V, Popov V N, Andreev I I . Experimental investigation of the viscosity of hydrogen[J]. Teploenergetika, 1965, **12**(4): 84–85.
- [69] Kestin J, Yata J. Viscosity and diffusion coefficient of six binary mixtures[J]. The Journal of Chemical Physics, 1968, **49**(11): 4780–4791.
- [70] Rudenko N S, Sliusar V P. Viscosity of hydrogen at constant density in the temperature range from 16.6 to 300 K[J]. Ukrainian Journal of Physics, 1968, **13**(6): 917–922.
- [71] Gracki J A, Flynn G P, Ross J. Viscosity of nitrogen, helium, hydrogen, and argon from – 100 to 25°C up to 150 – 250 atm[J]. The Journal of Chemical Physics, 1969, **51**(9): 3856–3863.
- [72] Guevara F A, McInter B B, Wageman W E. High-temperature viscosity ratios for hydrogen, helium, argon, and nitrogen[J]. The Physics of Fluids, 1969, **12**(12): 2493–2505.
- [73] Kestin J, Ro S T, Wakeham W A. Reference values of the viscosity of twelve gases at 25°C[J]. Transactions of the Faraday Society, 1971, **67**: 2308–2313.
- [74] Carey C, Bradshaw J, Lin E, et al. Experimental determination of gas properties at high temperatures and/or pressure: AD77977[R]. Waltham, USA: Panametrics Inc., 1974.
- [75] Clifford A A, Kestin J, Wakeham W A. The viscosity of mixtures of hydrogen with three noble gases[J]. Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie, 1981, **85**(5): 385–388.
- [76] Lukin V I, Ivakin B A, Suetin P. E. Temperature dependence of the viscosity coefficients of some gases[J]. Soviet physics – Technical physics, 1983, **28**(5): 597.
- [77] Mal'tsev V A, Nerushev O A, Novopashin S A, et al. Viscosity of H₂ – CO₂ mixtures at (500, 800, and 1100) K[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2004, **49**(3): 684–687.
- [78] May E F, Berg R F, Moldover M R. Reference viscosities of H₂, CH₄, Ar, and Xe at low densities[J]. International Journal of Thermophysics, 2007, **28**(4): 1085–1110.
- [79] Mehl J B, Huber M L, Harvey A H. Ab initio transport coefficients of gaseous hydrogen[J]. International Journal of Thermophysics, 2010, **31**(4/5): 740–755.
- [80] Sakoda N, Hisatsugu T, Furusato K, et al. Viscosity measurements of hydrogen at high temperatures up to 573K by a curved vibrating wire method[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2015, **89**: 22–26.
- [81] Cheng S Y, Shang F, Ma W G, et al. Viscosity Measurements of the H₂ – CO₂, H₂ – CO₂ – CH₄, and H₂ – H₂O mixtures and the H₂ – CO₂ – CH₄ – CO – H₂O system at 280 – 924 K and 0.7 – 33.1 MPa with a capillary apparatus with a capillary apparatus[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2020, **65**(8): 3834–3847.
- [82] Betken B, Austegard A, Finotti F, et al. Measurements of the viscosity of hydrogen and a (hydrogen+ methane) mixture with a two-capillary viscometer[J]. International Journal of Thermophysics, 2024, **45**(4): 60.
- [83] Muzny C D, Huber M L, Kazakov A F. Correlation for the viscosity of normal hydrogen obtained from symbolic regression[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2013, **58**(4): 969–979.
- [84] McCarty R D, Weber L A. Thermophysical Properties of Parahydrogen from the Freezing Liquid Line to 5000 R for Pressures to 10,000 Psia[M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1972.
- [85] Hanley H J M, McCarty R D, Cohen E G D. Analysis of the transport coefficients for simple dense fluid: Application of the modified Enskog theory[J]. Physica, 1972, **60**(2): 322–356.
- [86] Vargaftik N B, Vinogradov Y K, Yargin V S. Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases[M]. New York: Begall house, inc., 1996.
- [87] Lemmon E W, Bell I H, Huber M L, et al. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0[DS/OL]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [88] Yusibani E, Woodfield P L, Shinzato K, et al. Prediction of hydrogen gas viscosity at high pressure and high temperature[J]. Netsu Bussei, 2010, **24**(1): 21–27.
- [89] Vogel E, Küchenmeister C, Bich E, et al. Reference correlation of the viscosity of propane[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1998, **27**(5): 947–970.
- [90] Wei C, Jafari Raad S M, Leonenko Y, et al. Correlations for prediction of hydrogen gas viscosity and density for production, transportation, storage, and utilization applications[J].

- International Journal of Hydrogen Energy, 2023, **48**(89): 34930–34944.
- [91] Zéberg-Mikkelsen C K, Quiñones-Cisneros S E, Stenby E H. Viscosity prediction of hydrogen+ natural gas mixtures (hythane) [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, **40**(13): 2966–2970.
- [92] Yang X X, Xiao X, Thol M, et al. Linking viscosity to equations of state using residual entropy scaling theory[J]. International Journal of Thermophysics, 2022, **43**(12): 183.
- [93] Heidaryan E, Aryana S A. Empirical correlations for density, viscosity, and thermal conductivity of pure gaseous hydrogen[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2024, **11**(1): 54–73.
- [94] Assael M J, Wakeham W A. Thermal conductivity of four polyatomic gases[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1981, **77**(3): 697–707.
- [95] Mustafa M, Ross M, Trengove R D, et al. Absolute measurement of the thermal conductivity of helium and hydrogen[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1987, **141**(1): 233–248.
- [96] Powers R W, Mattox R W, Johnston H L. Thermal conductivity of condensed gases. II. the thermal conductivities of liquid normal and of liquid parahydrogen from 15 to 27° K[J]. Journal of the American Chemical Society, 1954, **76**(23): 5972–5973.
- [97] Dwyer R F, Cook G A, Berwaldt O E. The thermal conductivity of solid and liquid parahydrogen[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1966, **11**(3): 351–353.
- [98] Roder H M, Diller D E. Thermal conductivity of gaseous and liquid hydrogen[J]. The Journal of Chemical Physics, 1970, **52** (11): 5928–5949.
- [99] Roder H M. Experimental thermal conductivity values for hydrogen, methane, ethane and propane: NBSIR 84–3006[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1984.
- [100] Eucken A. On the temperature dependence of the thermal conductivity of several gases[J]. Physikalische Zeitschrift, 1911, **12**: 1101–1107.
- [101] Eucken A. On the thermal conductivity, specific heat, and viscosity of gases[J]. Physikalische Zeitschrift, 1913, **14**: 324–332.
- [102] Weber S. Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit der gase. II [J]. Annalen der Physik, 1917, **359**(22): 437–462.
- [103] Gregory H, Archer C T. Experimental determination of the thermal conductivities of gases[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1926, **110**(753): 91–122.
- [104] Schuster F. Studien zur zustandstheorie der materie. VII. Das Siedevolumen[J]. Zeitschrift für Elektrochemie und Angewandte Physikalische Chemie, 1926, **32**(11): 550–552.
- [105] Kannuluik W G, Martin L H. The thermal conductivity of some gases at 0° C[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1934, **144**(853): 496–513.
- [106] Dickins B G. The effect of accommodation on heat conduction through gases[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1934, **143**(850): 517–540.
- [107] Gregory H S. The effect of temperature on the thermal conductivity and the accommodation coefficient of hydrogen[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1935, **149**(866): 35–56.
- [108] Nothdurft W. Zur absolutmessung des Wärmeleitvermögens von gasen[J]. Annalen der Physik, 1936, **420**(2): 137–156.
- [109] Spencer-Gregory H, Dock E H. VIII. The effect of temperature on the thermal conductivity and the accommodation coefficient of hydrogen below 0° C[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1938, **25**(166): 129–147.
- [110] Archer C T. Thermal conduction in hydrogen–deuterium mixtures [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1938, **165**(923): 474–485.
- [111] Ubbink J B, de Haas W J. An apparatus to measure the specific thermal conductivity of gases at low temperatures[J]. Physica, 1943, **10**(7): 451–464.
- [112] Johnston H L, Grilly E R. The thermal conductivities of eight common gases between 80° and 380° K[J]. The Journal of Chemical Physics, 1946, **14**(4): 233–238.
- [113] Ubbink J B. Thermal conductivity of gaseous hydrogen and of gaseous deuterium[J]. Physica, 1948, **14**(2/3): 165–174.
- [114] Stolyarova A, Ipatjer V V, Theodorowitsch V P. Determination of thermal conductivity coefficients of compressed gases (H₂, N₂, Air, CH₄ and CO₂) [J]. Zhurnal Fizicheskoi Khimii, 1950, **24**: 166–176.
- [115] Lenoir J M, Comings E W. Thermal conductivity of gases. Measurement at high pressure[J]. Chemical Engineering Progress, 1951, **47**(5): 223.
- [116] Keyes F G. Thermal conductivity of gases[J]. Journal of Fluids Engineering, 1954, **76**(5): 809–816.
- [117] Salceanu C.; Bojin S. On the thermal conductivity of gases and vapors[J]. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, 1956, **243**: 237.
- [118] Chaikin A M, Markevich A M. The determination of the thermal conductivity coefficients of gases and gaseous mixtures[J]. Zhurnal Fizicheskoi Khimii, 1958, **32**(1): 116–120.
- [119] Srivastava B N, Srivastava R C. Thermal conductivity and eucken correction for diatomic gases and binary gas mixtures[J]. The Journal of Chemical Physics, 1959, **30**(5): 1200–1205.
- [120] Geier H, Schafer K. Heat Conductivity of Pure Gases and Gas Mixtures at 0 and 1200 degrees C[J]. Allgemeine Wärmetechnik, 1961, **10**(4): 70.
- [121] Golubev I F, Kal'sina M V. Thermal conductivity of nitrogen and hydrogen at temperatures from 20 to–195 deg. C and pressures from 1 to 500 atmospheres[J]. Gazovaya Promyshlennaya, 1964, **9** (8): 41–43.
- [122] Sherif I I. The thermal conductivity of hydrogen between 90° and 280° K[J]. Applied Scientific Research, Section A, 1965, **14**(1): 353–360.
- [123] Hamrin C E, Thodos G. The thermal conductivity of hydrogen for pressures up to 660 atm and temperatures between 1.6 and 74.6°C [J]. Physica, 1966, **32**(5): 918–932.
- [124] Mukhopadhyay P, Das Gupta A, Barua A K. Thermal conductivity of hydrogen–nitrogen and hydrogen–carbon–dioxide gas mixtures [J]. British Journal of Applied Physics, 1967, **18**(9): 1301.
- [125] Van Dael W, Cauwenbergh H. Measurements of the thermal conductivity of gases: I. Experimental method. Data for pure gases [J]. Physica, 1968, **40**(2): 165–172.

- [126] Timrot D.L, Umanskii A S. Investigation of thermal conductivity of hydrogen and argon[J]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1966, **4** (2): 289–292.
- [127] Saxena S C, Saxena V K. Thermal conductivity data for hydrogen and deuterium in the range 100–1100 degrees C[J]. *Journal of Physics A: General Physics*, 1970, **3**(3): 309–320.
- [128] Saxena S C, Gupta G P. Experimental data and procedures for predicting thermal conductivity of multicomponent mixtures of nonpolar gases[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1970, **15**(1): 98–107.
- [129] Saxena S C, Tondon P K. Experimental data and procedures for predicting thermal conductivity of binary mixtures of nonpolar gases[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1971, **16**(2): 212–220.
- [130] Le Neindre B. Contribution a l'étude experimentale de la conductivite thermique de quelques fluides a haute temperature et a haute pression[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, **15**(1): 1–24.
- [131] Clifford A A, Colling L, Dickinson E, et al. Testing intermolecular potential functions using transport property data. Part 2: Thermal conductivities of mixtures of helium with the hydrogen isotopes[J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1975, **71**: 1962–1977.
- [132] Clifford A A, Kestin J, Wakeham W A. The Thermal conductivity of hydrogen, deuterium and their mixtures near room temperature within the pressure range 2–36 MPa[J]. *Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie*, 1980, **84**(1): 9–18.
- [133] Clifford A A, Gray P, Johns A I, et al. Thermal conductivities of argon, nitrogen and hydrogen between 300 and 400 K and up to 25 MPa[J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1981, **77**(11): 2679–2691.
- [134] Hemminger W. The thermal conductivity of gases: Incorrect results due to desorbed air[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1987, **8**(3): 317–333.
- [135] Charignon T, Celik D, Hemmati A, et al. Thermal Conductivity of Subcooled Liquid Hydrogen[C]//*Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC*, Vol. **52**, Chattanooga (Tennessee). AIP, 2008: 765–772.
- [136] Moroe S, Woodfield P L, Kimura K, et al. Measurements of hydrogen thermal conductivity at high pressure and high temperature[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2011, **32** (9): 1887.
- [137] Liu Y H, Wang X W, Sheng B W, et al. Measurements of Hydrogen Thermal Conductivity for Pressures up to 37 MPa and Temperatures Between 69 and 150 K[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2026, **71**(1): 63–71.
- [138] Assael M J, Assael J M, Huber M L, Perkins R A, et al. Correlation of the Thermal Conductivity of Normal and Parahydrogen from the Triple Point to 1000 K and up to 100 MPa [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2011, **40** (3): 033101.
- [139] Roder H M. Thermal conductivity of hydrogen for temperatures between 78 and 310 K with pressures to 70 MPa[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1984, **5**(4): 323–350.
- [140] Hanley H J M, McCarty R D, Intemann H. The viscosity and thermal conductivity of dilute gaseous hydrogen from 15 to 5000 K [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 1970, **74A**(3): 331.
- [141] Olchowy G A, Sengers J V. A simplified representation for the thermal conductivity of fluids in the critical region[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1989, **10**(2): 417–426.
- [142] Li Z, Duan Y Y, Yang X X. Linking Thermal Conductivity to Equations of State Using the Residual Entropy Scaling Theory[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, **63**(42): 18160–18175.
- [143] Yang X X, Kim D, May E F, et al. Entropy scaling of thermal conductivity: application to refrigerants and their mixtures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, **60**(35): 13052–13070.