

干涉法测量气体低压下声速的实验研究 *

张 昌

(武汉科技学院机械系 武汉 430073)

段远源 张重华 史 琳 朱明善 韩礼钟

(清华大学热能工程系 北京 100084)

2000 年 5 月 15 日收到

摘要 介绍了干涉法测量气体声速的试验原理和变程干涉声速测量的实验系统, 使用本套测量系统测得的气体声速的精度可达 5×10^{-4} 。根据热力学原理, 分析了气体声速与理想气体比定压热容之间的物理关系。在本套实验系统上测得了一批高精度的新环保制冷剂的气相声速数据, 并可进一步确定其理想气体比定压热容。

关键词 声速, 变程干涉仪, 理想气体比定压热容

Sound speed measurements in gases at low pressures

Zhang Chang

(Department of Mechanical Engineering, Wuhan Institute of Science and Technology, Wuhan 430073)

Duan Yuanyuan Zhang Chonghua Shi Lin Zhu Mingshan Han Lizhong

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The principle of measurements of speed of sound in gaseous phase is discussed and a cylindrical variable-path acoustic interferometer is described. The uncertainty of speed of sound data measured in the experimental apparatus is estimated to be within 5×10^{-4} . Based on thermodynamics, the relationship between the ideal-gas heat capacity at constant pressure and the speed of sound in the gaseous phase was analyzed. Speeds of sound for some new environmental friendly refrigerants were obtained and the corresponding ideal-gas heat capacities at constant pressure were also determined.

Key words Speed of sound, Variable-path acoustic interferometer, Ideal-gas heat capacity at constant pressure

1 引言

声速是描述携带能量的工作介质状态的一

个重要的物性参数。精确的声速数据不仅可直接应用于流体流动过程的计算中, 而且还可以导出物质许多重要的热力学参数。其中声速测

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 59906006)

量是获得理想气体比定压热容的重要的方法之一。由低压声速数据外推至压强趋近于零的状态, 可以通过热力学关系得到理想气体的比定压热容, 这是目前国际上公认的最准确的确定理想气体比热容的方法。所以, 精确的声速数据具有重要的热力学意义, 促使我们进一步深入研究。本文介绍我们使用超声变程干涉仪的测量气体声速实验。

2 声速测量原理

图 1 是变程干涉法测量气体声速原理简图。固定频率的声波由发射器 T 产生, 在媒质中传播一段距离后存在时间上的延迟, 到达接收器 R 时, 接收波与发射波之间将产生相位差。当发射器与接收器之间的距离是 $n\frac{\lambda}{2}$ 时, 声波经接收器垂直反射, 发射波与反射波干涉形成驻波场, 接收器上的转换电压达到极大值。当接收器在不同位置时, 转换电压的幅值也将不同, R 接收到的信号电压变化见图 1 下部。这样, 我们可以用相位计和示波器来确定声波的波长 λ 。当改变发射器与接收器之间的距离时, 可观察到相位差的周期变化和接收波幅值的周期变化。每改变半个波长的距离, 相位差就改变 180° , 接收波幅值就变化一轮。我们记录下例如 20 个接收器上声压极大值的位置, 再取平均值, 就可以测定出声波波长 λ 值。而声速可以用波长 λ 与频率 f 的乘积表示, 即

$$w = \lambda f \quad (1)$$

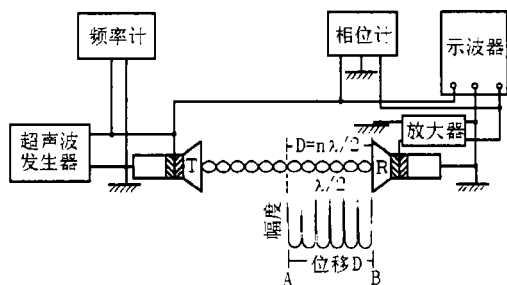


图 1 干涉法测量气体声速原理简图

3 气体声速测量的实验装置

3.1 实验装置

清华大学热能工程系从 1987 年起就开始了声速测量的研究^[1], 逐步建成高精度的变程干涉声速测量系统, 其设备示意图 2。2、10、13 组成恒温与温度测量系统, 12、16、17、18 组成气体压强测量系统, 14、15 为抽真空系统, 3、4 组成位移测量系统, 5、6、7、8、9 组成相位测量和幅值测量系统。由于压力不同时, 接收到的反射波幅值差别较大, 为了满足相位计在比较接收信号与发射信号的相位差时对信号幅值的要求, 由放大倍数在 10~500 倍之间可调的信号放大器 6 对接收信号进行放大处理。超声波发生器 5 采用石英晶振, 工作频率 $f = 156252\text{Hz}$, 精度为 1Hz。

由于电路本身的相移, 幅值的最大值并非出现在相位差为 0° 或 180° 时, 而有一定的偏移。但这是系统本身所固有的, 不随接收器的位移而变化, 因而并不影响波长的测量。只要以某一相位差值为基准, 连续测得足够多个波

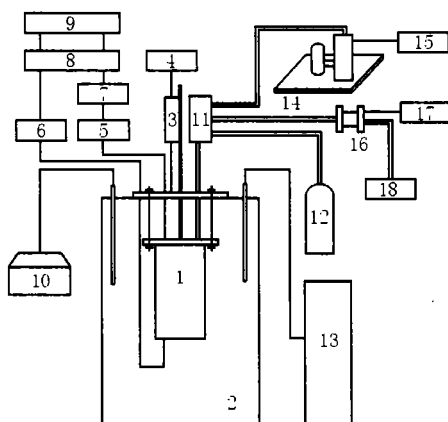


图 2 声速测量设备示意图

1- 本体, 2- 恒温槽, 3- 位移传感器, 4- 光栅数显表, 5- 超声波发生器, 6- 放大器, 7- 频率计, 8- 示波器, 9- 相位计, 10- 测温电桥, 11- 多通阀, 12- 气样瓶, 13- 温控器, 14- 真空泵, 15- 真空计, 16- 差压传感器, 17- 数显表, 18- 零级压强计

长, 就可以得到相应的声速值。

3.2 实验装置的标定

该实验装置自建成以来经多次改进, 测量精度不断提高。目前, 声波行程变化量采用 LG-40 型精密测微传感器和 GS8000 型光栅数显表, 精度可达 $\pm 2\mu\text{m}$; 发射波与接收波的相位差用两台数字相位计同时测量, 精度可达 0.5° 。只要测量 10 个波长的距离, 波长测量的再现性即可达到 10^{-4} 。温度测量使用 ITS-90 温标, 恒温 and 温度测量总的最大不确定度为 $\pm 10\text{mK}$ 。压强测量的最大不确定度为 $\pm 300\text{Pa}$ 。

最近, 我们又用高纯度的氮气和氩气对这套实验装置分别进行了标定。实验气体均由北京华源气体工程公司提供, 其中氮气的摩尔纯度为 99.999%, 杂质的浓度为: $\text{O}_2 \leq 2\text{ppm}$, $\text{H}_2 \leq 1\text{ppm}$, 总碳 $\leq 2\text{ppm}$, $\text{H}_2\text{O} \leq 2.6\text{ppm}$ 。氩气的摩尔纯度为: 99.999%, 杂质的浓度为: $\text{N}_2 \leq 5\text{ppm}$, $\text{O}_2 \leq 2\text{ppm}$, $\text{H}_2 \leq 1\text{ppm}$, $\text{CH}_4 \leq 2\text{ppm}$, $\text{H}_2\text{O} \leq 4\text{ppm}$ 。由本套实验装置测得的氮气声速值与国际理论和应用化学学会 (IUPAC) 推荐的标准方程 [2] 计算结果的比较情况见图 3, 图中 W_{exp} 表示我们的测量结果, $W_{[2]}$ 表示根据文献 [2] 方程计算得到的结果, 在使用文献 [2] 的结果时已将其温度值由 ITPS-68 温标转换成 ITS-90 温标。氩气的声速测定值见表 1。

普适气体常数 R_m 与理想气体比定压热容 c_p^0 的量纲相同, 因此, 我们可以用本套实验装置测得的氩气声速值来推算 R_m 值, 以检验实验装置的测量精度。氩气属单原子气体, 由分子运动论可知单原子气体的比热容比 $\gamma^0 = 5/3$ 是一精确值。拟合表 1 中高纯氩气的实验数据, 得到普适气体常数为 $8.31490 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}(T=293.15 \text{ K})$ 和 $8.31428 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}(T=303.15 \text{ K})$, 如果以美国国家标准局 M.R. Moldover 等于 1987 年公布的普适气体常数数据 $8.314471 \pm 0.000014 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为标准的话, 本文的测量偏差为

应用声学

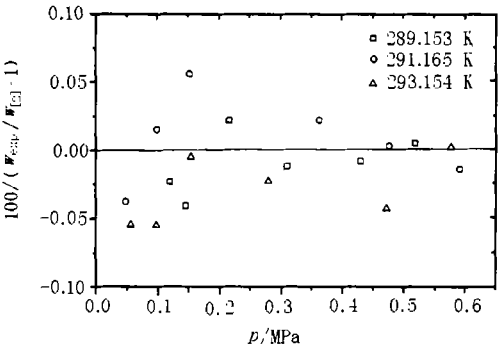


图 3 用氮气标定的精度情况

$0.00516\%(T=293.15 \text{ K})$ 和 $-0.0022\%(T=303.15 \text{ K})$ 。

根据误差理论分析和标定结果表明, 使用本套测量系统测得的声速的精度可达 $\pm 0.05\%$ 。

表 1 氩气的气相声速实验数据

温度 (K)	气体压强 (kPa)	声速 (m/s)
303.150	622.369	325.0530
303.150	551.438	325.1181
303.150	489.717	325.1311
303.150	436.126	324.6233
303.150	389.167	325.0237
303.150	337.880	324.7730
303.150	238.113	324.8447
303.150	177.900	324.5452
303.150	163.192	324.4280
303.150	113.761	324.3108
293.150	109.176	318.9312
293.150	144.534	319.3947
293.150	203.539	318.8908
293.150	232.745	319.0392
293.150	250.933	319.1525
293.150	278.049	319.3049
293.150	333.059	319.1042
293.150	382.974	319.4728
293.150	434.685	319.4576
293.150	482.565	319.3692

4 制冷剂的气相声速与理想气体的比定压热容

理想气体的比热容是与物质结构和种类密切相关的物理量, 只要知道了理想气体比定压

热容再加上状态方程, 其它热力学参数均可依次推出。理想气体是对实际气体的抽象, 因此理想气体比热容的数据只能间接得到, 中间要经过一个数据处理过程。采用热流卡量热法得到的理想气体比定压热容数据的精度一般为 1%, 采用光谱数据统计法得到的数据精度也只能达到 1%。而用声学法可大大地提高数据的精度, 精度可达 0.5%, 且数据处理过程简便。

声速是一种在连续介质中受到微弱扰动而产生的波动的传播速度。在气体介质中, 声音的传播可以认为是一个绝热过程, 其传播速度 w 可表示为

$$w^2 = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_s = \frac{\gamma_0 R_m T}{M} [1 + (\beta_a / R_m T) p + (\gamma_a / R_m T) p^2 + \cdots] \quad (2)$$

式中, R_m 为普适气体常数; M 为气体的分子量; $\gamma_0 = c_p^0 / c_v^0$ 是理想气体的比热容比, c_p^0 和 c_v^0 分别为理想气体的比定压热容和比定容热容; β_a 和 γ_a 分别为第二和第三声速维里系数。

如果沿等温线测量气体的压强和声速值, 并把声速的平方拟合成压强的多项式

$$w^2 = w_0 + w_1 p + w_2 p^2 + \cdots \quad (3)$$

比较 (1) 式和 (2) 式, 有

$$w_0 = \frac{\gamma_0 R_m T}{M} \quad (4)$$

由 (4) 式即可求出 γ_0 。由理想气体比定压热容和比定容热容之间的基本关系

$$c_p^0 / c_v^0 = \gamma_0 \quad (5)$$

$$c_p^0 - c_v^0 = R_m \quad (6)$$

从而可得到理想气体的比定压热容

$$c_p^0 = R_m \gamma_0 / (\gamma_0 - 1) \quad (7)$$

沿不同温度等温线测量气体声速和压强的关系, 使用上述方法即可确定理想气体比定压

热容与温度的函数关系。

清华大学 CFC 替代物研究组在筛选新制冷剂时, 利用图 2 所示的声速测量装置获得了一批高精度的制冷剂声速数据。1993 年在该实验系统上获得了国际上正式发表的 HFC-134a 的第二套声速数据, 由该套声速数据获得的 c_p^0 数据与国外数据之间的相对偏差为 10^{-3} 量级^[3]。1997 年在该实验系统上获得了国际上第二套 HFC-32 的气相声速数据, 精度与 HFC-134a 的测量结果相当, c_p^0 数据与国外数据之间的最大相对偏差小于 0.5%^[4]。同年又测得了国际上第一套 CF₃I 的气相声速数据^[5]。2000 年初, 我们在该声速测量台上获得了国际上第一套 HFC-227ea 声速数据。对于 CF₃I 和 HFC-227ea 目前国际上尚无其他相关测量结果可供比较, 但根据我们实验前后对实验台的标定情况和测量经验, 理想气体的比热容测量结果可保证 0.5% 以内的精度。

5 结语

清华大学热能系开发的变程干涉声速测量系统的精度已达到较理想的水平, 为在制冷剂热物性测试中应用超声波技术积累了经验并提供了实验手段。用声学法获得气体介质的理想气体比定压热容, 具有高的精度且数据处理简便。进一步拟合得出的理想气体的比定压热容方程能满足工程实际使用。

参 考 文 献

- 1 李敬茂, 朱明善, 邓小雪. 工程热物理学报, 1988, 9: 37-39.
- 2 IUPAC. International Thermodynamic Tables of The Fluid State-6 Nitrogen. London: Pergamon Press, 1979.
- 3 Zhu M S, Han L Z, Zhang K Z, et al. Int. J. Thermophys., 1993, 14: 1039-1050.
- 4 Sun L Q, Duan Y Y, Shi L, et al. J. Chem. Eng. Data, 1997, 42: 795-799.
- 5 Duan Y Y, Sun L Q, Shi L, et al. Fluid Phase Equilibria, 1997, 137: 121-131.