



绿色环保制冷剂

HFC-134a

热物理性质

朱明善 韩礼钟 李立 等著

科学出版社

内 容 简 介

本书是为适应《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》有关禁用对大气臭氧层有严重破坏作用的 CFC-12 的规定而专门撰写的有关 CFC-12 替代物 HFC-134a 热物理性质的专著。

HFC-134a 被公认为 CFC-12 最有希望的替代物,并已进入商业化生产与实际应用阶段。作为应用研究的基础,其热物性研究有着十分重要的意义。本书作者在综合国外学者及自己研究成果的基础上,专门编著了此书。书中介绍了 HFC-134a P, v, T 性质、临界参数、饱和蒸气压、声速、表面张力、导热系数与粘度等各种热物性的测试原理与方法,并系统地给出了这些热物性的试验结果、计算公式及工程实用的热力性质图表,包括 HFC-134a 的饱和蒸气与过热蒸气及压缩液的热力性质表、定压比热与定容比热表、声速、表面张力、粘度与导热系数表以及压-焓图、焓-焓图、比热和声速图等。这些图表与公式精度高、适用范围广,而且具有覆盖面宽、内涵丰富、分度间隔小、便于使用等特点。

本书取材广泛,内容丰富,论述严谨,联系实际,面向用户。它可供冰箱、汽车空调、商业制冷、化工、工程热物理与热能工程等领域的研究、设计、管理等工程技术人员和高校师生使用。

绿色环保制冷剂

HFC-134a 热物理性质

朱明善 韩礼钟 李 立 等著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年5月第一版 开本: 787×1092/16

1995年5月第一次印刷 印张: 10 插页: 2

印数: 1-800 字数: 280000

ISBN 7-03-004543-2/TK·14

定价: 28.80 元

前 言

作为冰箱、冰柜、汽车空调等装置的制冷剂,CFC-12 以其优异的性能长期以来被广泛使用.但从 1974 年发现 CFC 类物质对大气臭氧层有严重破坏作用以来,CFC 的影响引起了国际上日益广泛的重视.1987 年 9 月 16 日一些国家签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》,规定了对臭氧层有破坏作用的 CFC 等受控物质的削减与禁用时间表.此后,几经修改,禁用期限不断提前.1992 年 11 月的哥本哈根会议确定,发达国家从 1996 年 1 月 1 日起禁止使用 CFC 等类物质.我国也已于 1991 年正式批准参加该议定书(修订本),成为该议定书的缔约国.因而 CFC 的替代任务十分紧迫,对制冷、汽车空调等行业无疑是一次重大挑战.

目前,HFC-134a 被认为是 CFC-12 的最有希望的替代物,并且已进入实用阶段.作为应用研究的基础,热物性研究有其十分重要的意义.国外许多研究人员近年来开展了有关 HFC-134a 热物性的大量研究工作,测得了一批 HFC-134a 的热物理性质基础数据.

清华大学热能工程系 CFC 及 HCFC 替代物研究组自 1988 年以来,在朱明善教授的领导下,对 CFC 与 HCFC 的替代物进行了研究,特别对 HFC-134a 作了大量的热物性与应用方面的研究工作,主要包括 P, v, T 、饱和蒸气压、声速、表面张力、导热系数与粘度等性质的测试研究以及状态方程、饱和蒸气压方程等方程的拟合与关联,其中“氯氟烃 CFC-12 替代物 HFC-134a 的热力学物性研究”获 1994 年度国家教委科技进步一等奖.此外还对冰箱与汽车空调中应用 HFC-134a 开展了模拟与试验研究工作,其中与北京雪花电器集团公司合作进行的“采用氯氟烃替代物的新型电冰箱的研究”取得了突破性进展,并于 1994 年 11 月通过了北京市组织的鉴定.这些研究成果得到了国内外学者的很好评价.同时,通过广泛的国际交流,还搜集了大量国外有关 HFC-134a 热物性资料.为了便于广大学者与科技研究人员应用 HFC-134a,作者在综合国外学者及自己的研究成果的基础上,专门撰写了这本书.

本书系统地介绍了热物理性质试验研究的有关原理、方法及试验装置,并给出了 HFC-134a 各种热物理性质的计算公式及其图、表.其中,状态方程、饱和蒸气压方程等热物性计算公式精度很高、适用范围很广.图、表具有覆盖面广、内容丰富、间隔小的特点,完全可供家用冰箱、汽车空调、商业制冷、化工、工程热物理、热能工程等领域的研究、设计、管理等工程技术人员和高校师生使用.

本研究组内参与 HFC-134a 热物性研究工作的,有朱明善、韩礼钟、李立(状态方程)、傅屹东(P, v, T 与蒸气压测试)、吴江(蒸气压方程)、张克忠(声速、理想气体比热的测试与关联式)、吕春晓(表面张力的测试与关联式)、李雪燕(粘度的测试与关联式)与刘明福(导热系数的测试与关联式)等人.由于我们水平有限,难免有疏漏、错误之处,欢迎广大用户批评、指正.

最后,谨向几年来给予作者大力支持的国家计委、国家科委、国家环保局、北京市科

委、国家与北京市自然科学基金会、中国科学院、上海有机化学所、浙江化工研究院、美国环保局、Du Pont 公司、I. C. I 公司、布鲁斯公司等单位以及国内外同行表示衷心的感谢!

此书的出版,得到了中国科学院科学出版基金的资助,并经科学出版社陈文芳同志精心编辑加工,特此致谢!

清华大学热能工程系
CFC 及 HCFC 替代物研究组
1994. 12. 28

主要符号表

拉丁字母符号

a	热扩散系数, mm^2/s
C	声速, m/s
C_p	定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_v	定容比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	相对偏差, %
e	焓, kJ/kg
f	逸度; 频率, Hz
G	Gibbs 函数
g	重力加速度, m/s^2
h	焓, kJ/kg
M	摩尔质量, kg/kmol
n	摩尔数, mol
P	压力, Pa
R	HFC-134a 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
R_m	普适气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
s	熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
T	温度, K
t	温度, $^{\circ}\text{C}$
V	容积, m^3 或 ml
v	比容, m^3/kg
Z	压缩因子

希腊字母符号

η	粘度, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$
λ	导热系数, $\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 波长, m
ρ	密度, kg/m^3
σ	表面张力, mN/m
ν	动力粘度, mm^2/s

上角标

"	饱和液体
'	饱和气体
0	理想气体

下角标

c	临界参数
cal	计算值
exp	试验值
r	对比参数
s	饱和参数

HFC-134a 基本物性表

分子式	$\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$
分子量	102.031
沸点(1atm)	-26.18℃
凝固点(1atm)	-101.15℃
临界温度	101.15℃
临界压力	4.064MPa
临界比容	0.00197m ³ /kg
临界密度	508kg/m ³
气化潜热(25℃)	177.33kJ/kg
折射率(饱和液体)	1.200
相对绝缘能力	
蒸气(20℃,1atm)	0.8—1.1
介电常数	
蒸气(25℃,1atm)	1.025
颜 色	无色
气 味	轻微芳香味

目 录

前言	
主要符号表	vii
HFC-134a 基本物性表	viii
第一章 P, v, T 性质	1
§ 1.1 试验方法简介	1
§ 1.2 Burnett 方法的原理	4
§ 1.3 Burnett 法试验装置	5
§ 1.4 试验结果	8
第二章 临界参数	10
§ 2.1 试验原理	10
§ 2.2 试验装置与方法	11
§ 2.3 试验结果	12
第三章 状态方程	13
§ 3.1 建立状态方程的原则	13
§ 3.2 HFC-134a 专用状态方程	14
第四章 声速及理想气体定压比热	16
§ 4.1 试验装置与方法	16
§ 4.2 试验结果与分析	17
§ 4.3 理想气体定压比热方程	19
第五章 蒸气压	20
§ 5.1 试验方法与装置	20
§ 5.2 试验结果与分析	20
§ 5.3 蒸气压方程	21
第六章 逸度、焓、熵、焈、比热、声速的计算	22
§ 6.1 逸度	22
§ 6.2 焓	22
§ 6.3 熵	23
§ 6.4 焈	23

§ 6.5 比热	23
§ 6.6 声速	24
第七章 表面张力	25
§ 7.1 试验方法与装置	25
§ 7.2 试验结果与分析	25
§ 7.3 表面张力关系式	27
第八章 输运性质	28
§ 8.1 粘度	28
1. 试验方法与装置	28
2. 试验结果与分析	29
3. 国外有关 HFC-134a 的粘度公式	30
4. 动力粘度	31
§ 8.2 导热系数	31
1. 试验方法与装置	31
2. 试验结果与分析	32
3. 国外有关 HFC-134a 的导热系数关系式	33
§ 8.3 热扩散系数	34
第九章 热物性表	35
表 9.1 HFC-134a 饱和性质表(温度基准)	36
表 9.2 HFC-134a 饱和性质表(压力基准)	39
表 9.3 HFC-134a 压缩液及过热蒸气的热力性质表	42
表 9.4 HFC-134a 饱和气及饱和液定压比热表	99
表 9.5 HFC-134a 压缩液及过热蒸气定压比热 $C_p, \text{kJ}(\text{kg} \cdot \text{K})$	100
表 9.6 HFC-134a 饱和气及饱和液定容比热表	108
表 9.7 HFC-134a 压缩液及过热蒸气定容比热 $C_v, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	109
表 9.8 HFC-134a 饱和气及饱和液声速表	117
表 9.9 HFC-134a 压缩液及过热蒸气声速 $C, \text{m/s}$	118
表 9.10 HFC-134a 表面张力表	126
表 9.11 HFC-134a 饱和液粘度表	127
表 9.12 HFC-134a 饱和液动力粘度表	127
表 9.13 常压下(1atm)HFC-134a 蒸气粘度表	128
表 9.14 常压下(1atm)HFC-134a 蒸气动力粘度表	128
表 9.15 HFC-134a 过热蒸气粘度表 $\eta, \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	129
表 9.16 HFC-134a 过热蒸气动力粘度表 $\nu, \text{mm}^2/\text{s}$	131
表 9.17 HFC-134a 饱和蒸气及饱和液导热系数表	133
表 9.18 HFC-134a 压缩液导热系数 $\lambda, \text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$	133

表 9.19	HFC-134a 过热蒸气导热系数 $\lambda, \text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$	134
表 9.20	HFC-134a 饱和蒸气及饱和液热扩散系数表	134
表 9.21	HFC-134a 压缩液热扩散系数 $\alpha, \text{mm}^2/\text{s}$	135
表 9.22	HFC-134a 过热蒸气热扩散系数 $\alpha, \text{mm}^2/\text{s}$	136
第十章	热力性质图	137
图 10.1	HFC-134a 压-焓图	138
图 10.2	HFC-134a 焓-焓图(不含等容线)	139
图 10.3	HFC-134a 焓-焓图(不含等压线)	140
图 10.4	HFC-134a 定压比热-压力图	141
图 10.5	HFC-134a 定容比热-压力图	142
图 10.6	HFC-134a 声速-压力图	143
参考文献		144

第一章 P, v, T 性质

§ 1.1 试验方法简介

流体的 P, v, T 性质以及理想气体定压比热 C_p 是流体平衡物性中最基本的物性, 其它热力学参数如焓、熵、自由能、内能、逸度等均可由此导出. 精确的 P, v, T 性质是确定分子间相互作用微观特性的重要数据. 因此, P, v, T 性质的研究在流体热物性研究中占有特别重要的地位.

随着科学技术的不断发展, P, v, T 性质的研究手段也不断丰富, 试验方法不断完善, 测量精度也在不断提高. 先进的测量仪器和测量手段为 P, v, T 性质的高精度测量提供了条件.

在流体 P, v, T 的测量中; 比容的测量是难点和关键, 因此, 在常规的 P, v, T 性质测量中, 往往以比容的测试方法来进行分类. 一般把 P, v, T 的测量方法分为三类, 即等容法、变容法和等温膨胀法^[1,2].

1. 等容法

等容法是一种直接的比容测量方法.

试验时, 首先精确地标定容器的内部容积, 然后充入一定量的流体, 称量其质量, 便可确定容器内流体的比容. 改变流体的温度, 其压力也随之改变. 测量不同温度下相应的压力值, 便得到一组等比容的 P, v, T 数据. 改变容器内流体的质量, 重复进行测量, 便可得到多组不同比容下的 P, v, T 数据. 这种方法可用于测量气相、液相及两相区的 P, v, T 性质. 由于其测量范围大且较为简单, 而被许多研究人员所采用, 并不断得到完善和发展.

等容法的特点是难以精确标定容器的容积, 而且标定结果受温度、压力、容器本身结构等许多因素影响. 由于容器本身质量较大, 使容器内部流体质量的测量比较困难, 特别是在流体比容较大时, 测量误差较大. 此外, 由于需要反复称重, 使等容法测量工作量大, 较为费时.

2. 变容法

这是一种等温测量方法^[3]. 测量时将一定质量的流体充入容器内, 在等温条件下, 改变容器的容积, 记录流体压力随容积的变化, 即可得出一条等温线上的 P, v, T 性质. 改变温度, 即可得出不同温度下的流体 P, v, T 性质. 这种方法试样消耗少, 测量效率比等容法高, 因而也被许多研究者采用, 并在改变容器容积的方法上进行了许多改进. 然而变容法仍未能避开需精确标定容器容积这一难题, 而且一般来讲, 其比容测量精度要低于等容法.

3. 等温膨胀法

这种方法最初由美国工程师 Burnett 于 1936 年提出^[4], 因此也被称作 Burnett 法. 这种方法完全避免了等容法及等温法需精确测定容器容积及流体质量的困难, 同时兼有变容法的优点, 测量速度较快. 精确地测量压力要比测量容积容易, Burnett 法正是充分发挥了压力易精确测量的优势. 实验过程中只需精确地测定各次膨胀前后的压力, 便可得到精确的 P, v, T 数据. 这种方法容易获得较高的精度, 目前已得到了较多的应用和发展.

Burnett 法也有其局限性, 它一般只限于测量气相区的 P, v, T 性质, 而且试样消耗较多. 要想准确地测出整个热力学面上的 P, v, T 性质, 其方法是把等容法与膨胀法结合起来, 这便是近几年发展起来的等容-膨胀法.

4. 等容-膨胀法

这种方法既有 Burnett 法不需测定容器容积和流体质量又有测量速度快的优点, 并可扩大测量范围. 这种方法在具体应用中有不同的变化.

图 1.1 是一种等容-膨胀法试验方案. 向试验容器内充入样品, 使容器中的气体处于 $P-T$ 图上的 ρ_0^1 点, 在定容条件下改变温度, 记录压力随温度的变化, 便可测出一条等密度 (等容) 线 $\rho_0^1-\rho_0^2$; 继续降低温度, 使流体进入两相区, 可测出饱和线上的 $P-T$ 关系. 重新升温, 使流体回到 ρ_0^1 点, 在温度 T^1 下进行第一次膨胀至 ρ_1^1 , 再沿等密度线 $\rho_1^1-\rho_1^2-\rho_1^3$ 进行等容

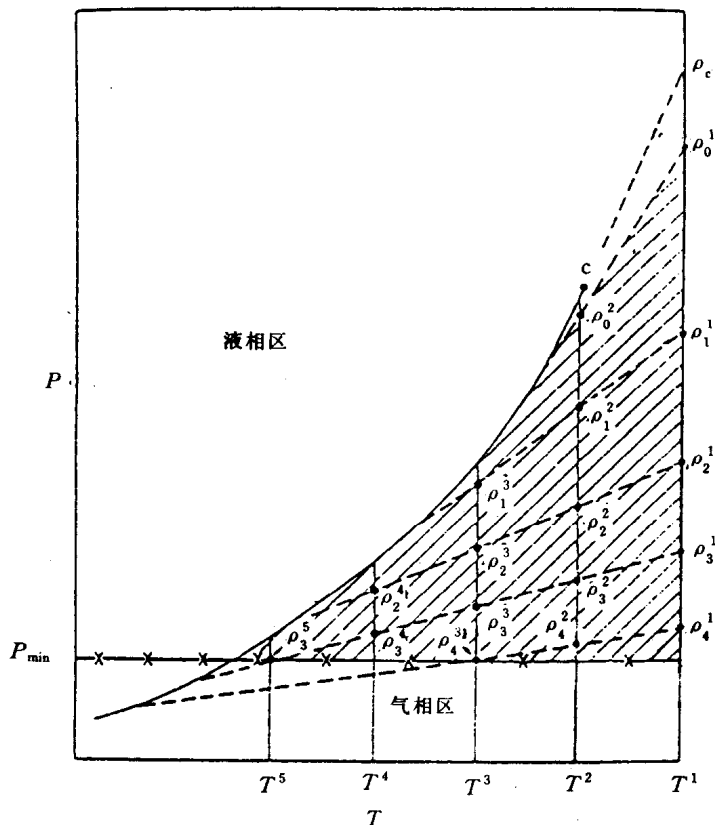


图 1.1 等容-膨胀法试验方案

测量,直至两相区为止.再回到 ρ_1^1 点,在 T^1 温度下进行第二次膨胀至 ρ_2^1 点.如此反复,便可获得几条等温线、等容线以及饱和线. $\rho_0^1, \rho_1^1, \rho_2^1$ 等密度值可通过 Burnett 膨胀法原理计算得出(详见下节).这种方法试验周期较长,对系统的密封性、稳定性和可靠性等均有很高要求.试验中还应注意密度的温度和压力修正等问题.

等容-膨胀法的另一种实现方法与上述方法类似.在容器中充入一定量的流体,使其处于 P - T 图上的 ρ_0^1 点,此时压力为 P_0 ,温度为 T^1 ,然后在 T^1 温度下,按 Burnett 膨胀方法进行一系列膨胀,得到 $\rho_1^1, \rho_2^1, \rho_3^1 \dots$,相应的压力分别为 $P_1, P_2, P_3 \dots$,根据各点的压力值,按 Burnett 原理计算出相应的 $\rho_0^1, \rho_1^1, \rho_2^1 \dots$.重新向容器内充入流体,保持流体温度仍为 T^1 ,调整流体充入量使其压力为 P_0 ,此时便可认为容器内流体密度为 ρ_0^1 .然后在等容条件下改变温度,记录相应的压力变化,使可得到一条等容线 ρ_0^1 - ρ_0^2 .重新调整温度到初始温度 T^1 ,调整流体充入量,使其压力为 P_1 ,此时流体密度便是 ρ_1^1 ,按等容方法测量可得等容线 ρ_1^1 - ρ_1^2 - ρ_1^3 .反复数次,即可得到各条等容线.试验中同样要注意比容的温度、压力修正.这种方法和前一种方法的区别在于,前一种方法是先等容测量,后膨胀,整个过程需一气呵成.由于测量点多,试验时间较长,因而对设备可靠性要求很高,同时试验人员的工作强度也较大.后一种方法是先膨胀,后进行等容测量,试验可分次进行,在相同设备条件下测量精度容易保证,试验过程便于控制,易于操作,工作强度较低.这种方法被美国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 所采用^[5].

另一种等容膨胀方法为日本庆应大学所采用,它并不依据 Burnett 法的原理,因此更类似于变容法. A, B 两容器通过阀门相连接, A 容器较大,作为主容器, B 容器较小,作为膨胀容器.试验前, A, B 两容器的容积均经过标定,并在 A 容器中充入已知量的流体,沿等容线测量 A 容器中流体的温度-压力关系.测量完毕后,打开连接 A, B 容器的阀门,使 A 容器中的流体向 B 容器膨胀,平衡后关闭阀门, A 容器中的流体达到一新的密度值,该密度值可由下式确定:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 V_A}{V_A + V_B} \quad (1.1)$$

式中, ρ_1 为流体膨胀前的密度, ρ_2 为膨胀后的密度; V_A, V_B 分别为 A, B 两容器的容积.在新的密度值下进行等容测量,得到第二条等容线.这样反复数次,便可得到多条等容线.再次膨胀前都要对 B 容器抽真空,但 B 容器内难免会残留微量气体,这样数次膨胀后,会给密度的确定带来累积误差.因此,膨胀次数不得超过三四次.这种方法对气、液相区均适用.只需先测定容器容积,一次称量流体质量,便可得到多条等容线^[6].

5. 非常规方法

常规测量方法原理简单,易于实现,因而得到了广泛应用.随着科学技术的不断发展,一些非常规测量方法开始被引入到流体的热物性测量中.

非常规测量方法往往是找到一些与密度有关的物理量,通过对这些物理量的测量间接地导出密度值,进而确定出流体的 P, v, T 性质.在非常规测量方法中,较为常用的有光学密度计法、电磁悬浮密度计法、振动密度计法等.这些方法的共同点是避开了试验容器容积标定、流体称重以及试验容器对流体的吸附等问题,而且易于实现自动测量.但与常规方法相比,测试系统复杂,对设备要求较高.

§ 1.2 Burnett 方法的原理

Burnett 法试验装置(本体)如图 1.2 所示. 它由两个容器组成, 其体积分别为 V_1 和 V_2 . 两容器间由一阀门连接, 整个装置处于同一恒温环境内, 并且试验过程中要始终保持温度的恒定. 试验前将两容器均抽成真空. 关闭两容器间的膨胀阀门, 向容器 1 内充入适量的工质, 待温度稳定后测量工质的压力 P_0 , 此时的压缩因子为

$$Z_0 = P_0 / n_0 R_m T \quad (1.2)$$

打开膨胀阀门, 使气体从容器 1 膨胀至容器 2, 进行第一次膨胀, 待温度和压力均达到平衡后, 测量容器 1 中的工质的压力 P_1 , 经过第一次膨胀后压缩因子 Z_1 为

$$Z_1 = P_1 (V_1 + V_2) / n_0 R_m T \quad (1.3)$$

关闭膨胀阀, 将容器 2 抽真空后, 再打开膨胀阀, 进行第二次膨胀, 测出第二次膨胀后的压力 P_2 . 重复这一过程, 一直进行到无法精确测量容器内工质的压力为止, 此时便得到了恒温条件下的一系列压力值 $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$. P_n 为第 n 次膨胀后的压力.

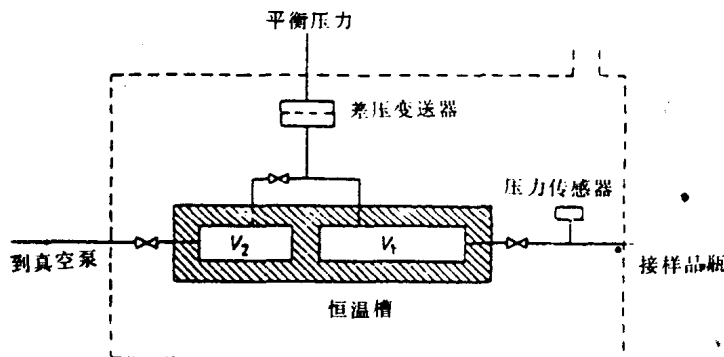


图 1.2 Burnett 法试验装置原理示意图

式(1.2)与(1.3)相除可得

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{V_1 + V_2}{V_1} \frac{P_1}{P_0} \quad (1.4)$$

令

$$N(T, P) = \frac{V_1 + V_2}{V_1} \quad (1.5)$$

$N(T, P)$ 称为容积常数. 对于本书所介绍的 Burnett 本体, 容积常数 N 不随温度、压力而变化, 因此 $N(T, P)$ 可简化为 N . 所以

$$Z_1 = NP_1 Z_0 / P_0$$

$$Z_2 = NP_2 Z_1 / P_1$$

⋮

$$Z_i = NP_i Z_{i-1} / P_{i-1} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.6)$$

综合上述各式,可得第 i 次膨胀后气体的压缩因子表达式

$$Z_i = N P_i Z_0 / P_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.7)$$

再令

$$A = Z_0 / P_0 \quad (1.8)$$

A 称为充气常数. 在一定温度下, 对于待定气体, A 值只取决于初压 P_0 . 式(1.7)可写为

$$Z_i = N P_i A \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.9)$$

这样, 只需知道试验本体的容积常数 N 及每次试验的充气常数 A , 即可由式(1.9)确定相应温度、压力下的压缩因子. 剩下的问题便集中到 N 值与 A 值的确定.

由式(1.6)可得

$$N = \frac{P_{i-1}}{P_i} \frac{Z_i}{Z_{i-1}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.10)$$

当气体压力趋于零时, 可按理想气体处理, 即压缩因子等于 1. 所以有

$$N = \lim_{\substack{P_{i-1} \rightarrow 0 \\ P_i \rightarrow 0}} \frac{P_{i-1}}{P_i} \quad (1.11)$$

可将 P_{i-1}/P_i 的关系写成一多项展开式, 即

$$P_{i-1}/P_i = a_0 + a_1 P_{i-1} + a_2 P_{i-1}^2 + \dots + a_m P_{i-1}^m \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.12)$$

根据实测的 P_i, P_{i-1} 的值, 应用数据拟合的方法回归出式(1.12)中的各系数 a_j ($j=1, 2, \dots, m$), 则 a_0 即为所求的容积常数 N .

有了容积常数后, 即可进一步确定 A 值, 方法与 N 值的确定类似. 由式(1.9)可得

$$1/A = N P_i / Z_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.13)$$

再次利用理想气体的性质, 即当 $P_i \rightarrow 0$ 时 $Z_i \rightarrow 1$. 有

$$1/A = \lim_{P_i \rightarrow 0} N P_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.14)$$

$P_i N - P_i$ 的关系亦可用一多项式表示:

$$P_i N = b_0 + b_1 P_i + b_2 P_i^2 + \dots + b_m P_i^m \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.15)$$

用数据拟合方法回归出式(1.15)中的各系数 b_j ($j=0, 1, 2, \dots, m$), 则 $1/b_0$ 即为所求的 A 值. 有了 N 值和 A 值, 即可得到各温度、压力下的压缩因子, 进一步求得比容.

§ 1.3 Burnett 法试验装置

清华大学所采用的 Burnett 法试验装置, 包括恒温系统、温度测量系统、压力测量及控制系统、真空配气系统及试验本体等几大部分. 图 1.3 为试验装置示意图.

1. 恒温系统

对于流体的 P, v, T 、饱和蒸气压等这类平衡物性的测量来讲, 恒温装置是整个测量装置的核心部分, 恒温装置的好坏直接影响测量系统的精度.

目前国内外同类型的试验装置, 其恒温槽都是采用单级整体式恒温槽, 即工作空间与

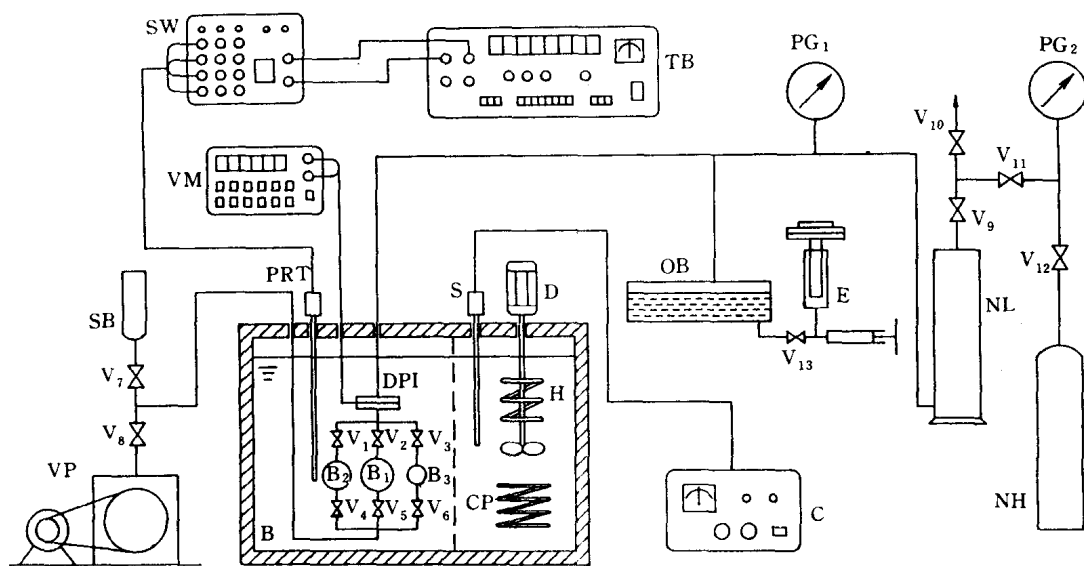


图 1.3 Burnett 法 P, ρ, T 试验装置

B——恒温槽, B_1 ——试验容器(1000ml), B_2 ——试验容器(600ml), B_3 ——试验容器(200ml), C——控制器,
 CP——冷却管, D——电动机及搅拌器, DPI——差压变送器, E——活塞压力计, H——加热器,
 NH——高压氮气瓶, NL——稳压瓶, OB——油气分离器, PG_1, PG_2 ——压力表, PRT——铂电阻温度计,
 S——热敏电阻, SB——样品瓶, SW——选择开关, TB——测温电桥, $V_1 \sim V_{13}$ ——阀门,
 VM——数字电压表, VP——真空泵

调温空间集中在一个槽内, 保温性能好, 温度范围易于向高低温两侧扩展, 易于操作与控制, 尺寸也可以做得较大。装置的温度波动一般都在 $\pm 5\text{mK}$ 以内。

清华大学试验装置采用的恒温系统, 采用两套高精度、大容量的恒温槽, 分别用于高温和低温测量。图 1.4 为其内部结构示意图。

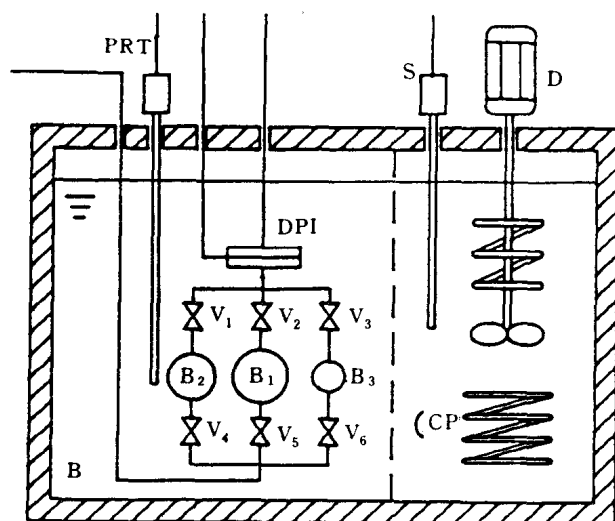


图 1.4 恒温槽内部结构示意图

在有效工作空间的中部、恒温槽前后两侧壁上各开有一个石英玻璃观察孔,用于对恒温槽内试验本体进行观察和拍照.在低温槽的观察窗上还装有防露装置,以防止低温时观察窗结露有碍观察.高温槽内装有电加热器,通过开关选择其不同的组合,从而得到不同的加热功率.在交流供电回路中装有固态调压器,使控制功率适应不同热负荷的需要.为了使温度场均匀,采用了单轴双叶片搅拌方式.设有输出泵,可把槽内恒温介质输出槽外使用.

低温槽的结构与高温槽类似,其加热系统、搅拌器、输出泵等均与高温槽相同,不同之处在于增加了一套制冷系统.为了达到较低的使用温度,低温槽采用了复叠式两级压缩制冷系统.两台压缩机的进出口均装有压力表,以显示系统的工作状态.两级压缩回路中均装有独立可调的膨胀阀,可分别独立调节两级的制冷量,使两级之间达到最佳匹配;同时也可用于调节整个系统的制冷量,以适应不同温度下热负荷不同的需要.

两台恒温槽均采用专门设计的控制器进行控制,感温元件为半导体热敏电阻,温度设定采用两支特殊结构的多圈电位器.

2. 温度测量系统

温度测量系统包括铂电阻温度计、温度计选择开关、自动测温电桥、计算机等组成.温度计选择开关用于从多支温度计中选择一个送到电桥进行测量.自动测温电桥可自动测量铂电阻温度计的电阻值,量程与测量电流均有多档选择,并有内外标准电阻可供选择.电桥配有标准的智能仪表接口,通过一专用电缆与一台微型计算机相连,电桥测出的电阻值经接口传送到计算机内,由计算机把电阻值转换成相应的温度值,并在显示器上显示出来.电桥的全部操作都可由微机通过接口进行控制,从而实现温度的自动测量.

温度测量误差主要来自温度计的测温不确定度、测温电桥不确定度、测温用标准电阻不确定度、恒温槽波动及不均匀性.综合结果温度测量不确定度 $\leq \pm 10\text{mK}$.

3. 压力测量系统

压力测量系统包括差压变送器、油气分离器、活塞压力计、氮气瓶、稳压瓶、压力表以及高压管路、阀门等.

本体内工质的压力并不是直接测量的,而是通过测量平衡氮气的压力间接测量.工质与氮气之间由一台浸在恒温槽内的压力变送器隔开,调节氮气的压力,使差压变送器两侧的压差为零,此时氮气的压力即为工质的压力.氮气压力经过一个油气分离器传递给活塞压力计,由活塞压力计测出氮气的压力,再加上当时的大气压,即可得工质的绝对压力.

活塞压力计出厂时按用户当地的重力加速度及空气浮力进行了修正,只要在其工作温度范围内使用,就无需对测量值进行修正.

差压变送器输出直流电流信号,电流大小正比于变送器两侧的压力差.该电流信号由数字电压表直接测量.

装置采用大面积的油槽作为油气分离器,使系统不含水银,避免了水银带来的许多问题.同时,大面积油槽可保持油面在试验过程中的稳定,试验时只需事先调整好活塞压力计的位置,使活塞底面与油面在同一水平面上,即可避免管路中油造成的附加压力,从而简化了测压系统,操作方便,数据处理简单.

测压系统中的高压氮气瓶为系统提供测压所需氮气压力,稳压瓶用于氮气稳压,衰减氮气充放时系统氮气压力的波动.压力表粗略显示系统压力,以便测压时选择合适的砝码.

压力测量误差主要来自于活塞压力计、差压变送器及大气压力计等仪器的系统误差,以及传压管路中氮气和油与各仪器的高度不同所附加的压力.本装置压力测量不确定度为 $\pm 500\text{Pa}$.

4. 真空配气系统

真空配气系统由真空泵、样品瓶及真空计组成.

真空机组带有扩散泵,系统真空度由真空计测量,试样由样品瓶提供.

5. 试验本体

试验装置的 Burnett 本体有三个试验容器.实际使用时,可根据所测压力范围、工质性质等,灵活选择使用不同的容器组合,便可获得数据间隔均匀的等温线.

§ 1.4 试验结果

采用上述装置,对 HFC-134a 进行 P, v, T 性质测试.表 1.1 列出了所测得的 42 组数据.

表 1.1 HFC-134a 气相 P, v, T 试验数据^[7]

T, K	P, MPa	$v, \text{m}^3/\text{kg}$	T, K	P, MPa	$v, \text{m}^3/\text{kg}$
283.15	0.4107	0.050027	325.16	0.3417	0.073034
283.15	0.2435	0.088837	325.16	0.2242	0.113528
283.15	0.1848	0.118383	325.16	0.1466	0.176473
283.15	0.1408	0.157754	333.16	1.1637	0.019277
293.15	0.4313	0.050301	333.16	0.7993	0.029965
293.15	0.3292	0.067030	333.16	0.5364	0.046579
293.15	0.2538	0.089322	333.16	0.3546	0.072404
293.15	0.1934	0.119029	333.16	0.2326	0.112549
293.15	0.1451	0.158616	333.16	0.1519	0.174952
303.15	0.4509	0.049959	343.16	1.2180	0.019271
303.15	0.3450	0.066575	343.16	0.8320	0.029956
303.15	0.2642	0.088716	343.16	0.5561	0.046565
303.15	0.2018	0.118222	343.16	0.3670	0.072384
303.15	0.1515	0.157540	343.16	0.2403	0.112517
313.15	0.4701	0.049974	343.16	0.1570	0.174902
313.15	0.2738	0.088742	353.16	1.2705	0.019236
313.15	0.2093	0.118256	353.16	0.8643	0.029902
313.15	0.1573	0.157586	353.16	0.5757	0.046480
325.16	1.1077	0.019444	353.16	0.3795	0.072252
325.16	0.7663	0.030225	353.16	0.2483	0.112312
325.16	0.5162	0.046984	353.16	0.1623	0.174583