

乙烷 $p-v-t$ 性质测定实验

2.1 实验目的

- 1) 掌握乙烷 $p-v-t$ 关系测定的方法，学会用实验测定实际气体的状态变化规律。
- 2) 增加对工质凝结、气化、饱和状态，临界状态和临界参数等基本概念的理解。
- 3) 学会使用活塞式液压泵、恒温循环浴等热工仪器。

2.2 实验原理

2.2.1 实际流体 $p-v-t$ 性质测定

$p-v-t$ 性质是流体最基本的平衡物性之一，结合理想气体比热容，可以拟合出实际流体的状态方程 $f(p,v,t)=0$ ，从而导出其它热力学参数。

流体 $p-v-t$ 关系测定时，需要首先固定 p 、 v 、 t 三个参数中的一个，然后通过改变第二个参数，测量得到一系列与之所对应的第三个参数的值。由于流体 $p-v-t$ 测量中温度稳定需要的时间最长，因此测量时首先固定的参数为温度，测量得到 $t=t_1$ 时一系列 p 和 v 之间的关系：

$$f(p,v)\Big|_{t=t_1}=0$$

然后改变温度，测量得到其它温度下一系列 p 和 v 之间的关系

$$f(p,v)\Big|_{t=t_2}=0$$

$$f(p,v)\Big|_{t=t_3}=0$$

.....

不同的流体，其 $p-v-t$ 关系也各不相同，本实验所测量的流体为乙烷，图 2-1 是其标准的 $p-v-t$ 关系图形。

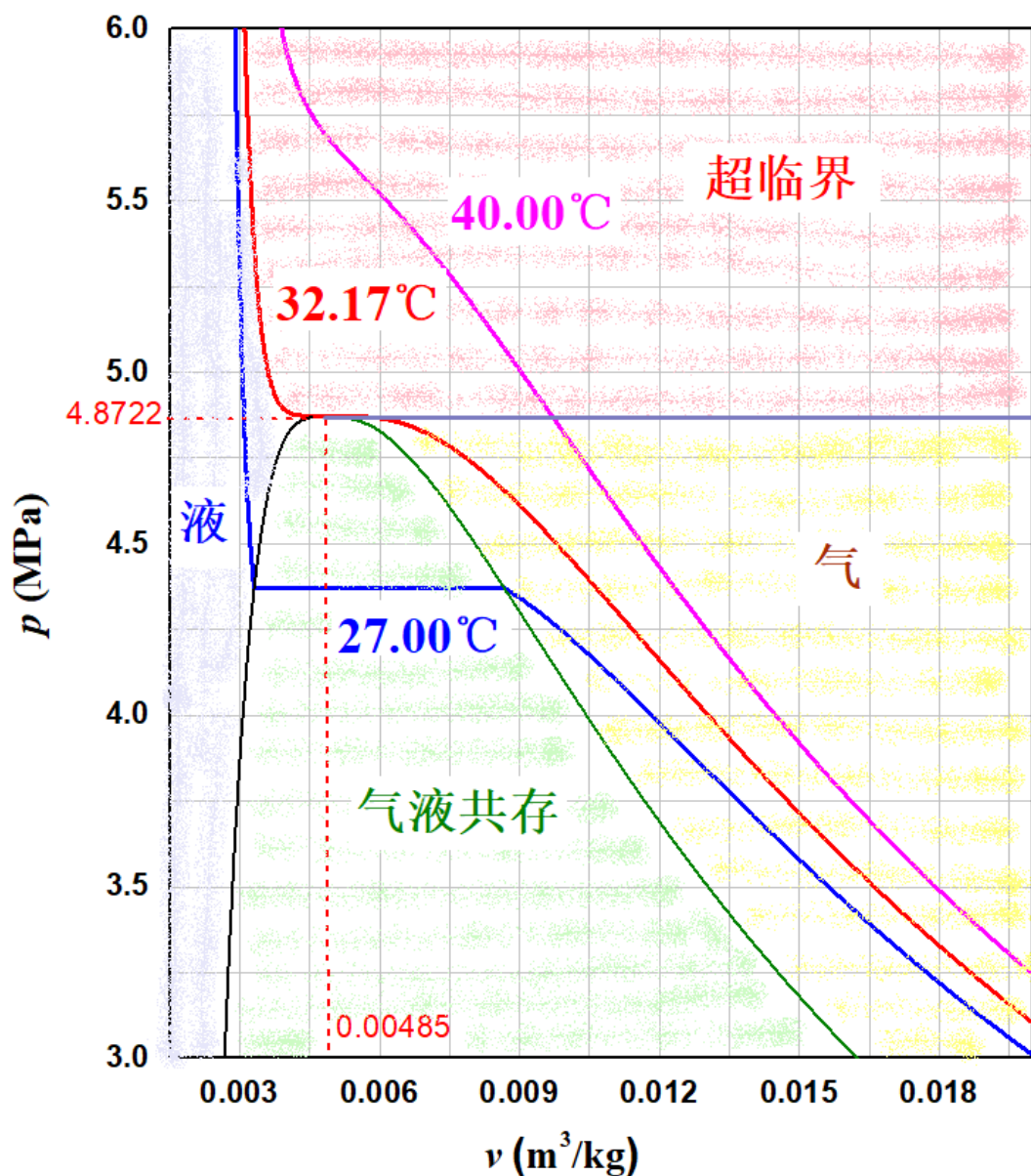


图 2-1 乙烷标准曲线图

2.2.2 临界性质的观测

纯物质的临界点表示气液二相平衡共存的最高温度点 t_c 和最高压力点 p_c 。超临界状态是并列于气、液、固态之外的一种状态。当物质的温度和压力均高于临界参数时，物质处于超临界状态；当物质的温度高于临界温度，压力低于临界压力时，物质为气态；当物质的压力高于临界压力，温度低于临界温度时，物质为液态。

本实验测量 $t < t_c$ ， $t = t_c$ 和 $t > t_c$ 三种温度条件下的等温线。其中 $t > t_c$ 等温线是较为光滑的一条曲线； $t = t_c$ 等温线在临界压力附近有一水平拐点，不能看见明显的

实验现象： $t < t_c$ 等温线分为三段，其中中间水平段为气液共存区，会出现气-液两相共存的现象。

1) 整体相变现象

当 $t < t_c$ 时，气-液的相互转变需要一定的时间，表现为渐变过程，会出现一段气液共存区域。在临界点处，由于气化潜热等于零，饱和蒸气线和饱和液体线合于一点，所以这时当压力稍作变化时，气-液相以突变的形式相互转化，此时由于不会出现气液共存区域，没有气-液界面的出现，因此不会出现明显的实验现象。

2) 超临界态到气-液两相的瞬态变化过程

处于临界点的乙烷的状态参数为 p_c , v_c , t_c ，此时如果说它是气体，则为接近液态的气体；如果说它是液体，又是接近气态的液体。在临界温度下，如果按等温过程使乙烷压缩或膨胀，将看不到气-液变化。如果按绝热过程进行，在压力等于 4.87 Mpa 附近突然降压，将乙烷沿绝热线降到气-液两相区，这时管内会出现明显的液面。随后乙烷受水套温度的加热，很快重新回到临界温度曲线，液面消失。

2.3 实验装置

2.3.1 实验装置结构

实验装置由活塞式液压泵、半导体恒温水浴和实验装置本体三部分组成（如图 2-2 所示）。



图 2-2 实验装置照片

实验台本体如图 2-3 所示。高压玻璃容器管内充乙烷，乙烷下方为红色水溶液，通过活塞式液压泵向实验装置本体内不断注入水溶液，从而将乙烷压缩至玻璃管上方，其压力大小通过液压泵上的活塞杆的进、退来调节。乙烷的温度通过恒温水套进行控制，恒温水套的温度由铂电阻温度计来读取。乙烷的压力由活塞式液压泵上的精密压力表读出（注意：绝对压力=表压+大气压）。

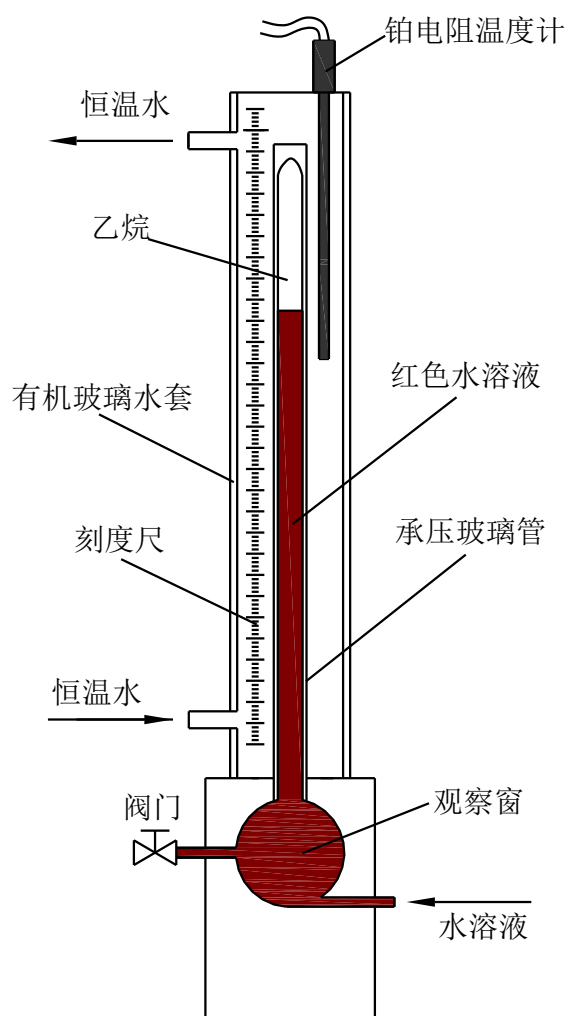


图 2-3 实验装置本体结构简图

2.3.2 半导体恒温水浴使用方法及注意事项。

(1) 按下电源按钮后，恒温浴通电，此时应**立即按下水泵开关**。否则，若温度设置较高时，将造成恒温浴机箱内局部过热，有可能损坏仪器。

(2) 制冷功能通过面板最右侧的扳动开关来实现。当开关位于最中间“停止”位置处时，半导体片不工作；将开关扳下至“制冷”位置处时，半导体片起制冷功能；将开关扳上至“加热”位置处时，半导体片起加热功能。

(3) 温度控制器调节方法：调节温度时，按第 2 个按键进行移位，然后按第

3 和第 4 个键设置温度，设置完成按第 1 个键确认即可。



(4) 当做完 27.00 °C 之后，有两种操作可供自由选择。

- a. 将温度设置为 32.17 °C 等待即可，约需要 10~15 分钟达到稳定。
- b. 将温度设置为 32.17 °C，将扳动开关由“制冷”扳动至“停止”，当温度上升至约 32 °C 时，将开关由“停止”扳回至“制冷”。约需要 5~10 分钟达到稳定。

(5) 当做完 32.17 °C 时，同样有两种操作可供自由选择。

- a. 将温度设置为 40.00 °C，然后将扳动开关由“制冷”扳动至“停止”等待即可，约需要 10~15 分钟达到稳定。
- b. 将温度设置为 40.00 °C，将扳动开关由“制冷”扳动至“加热”，当温度上升至约 39.00 °C 时，将开关由“加热”扳回至“停止”。约需要 5~10 分钟达到稳定。

(6) 关机时，首先保证扳动开关位于“停止”位置，然后按下电源按钮关机即可（关机时水泵开关打开和关闭均可）。

2.4 实验步骤

注意事项：在本实验中，任何时候都不允许使压力表显示的压力低于 1.50 MPa。

本实验中的当地大气压取为 0.10 MPa。

- 1) 打开半导体恒温水浴，调节恒温水到所要求的实验温度至 27.00 °C。
- 2) 测定低于临界温度的等温线 ($t=27.00^{\circ}\text{C}$)
 - (1) 逐渐增加压力至 3.00 MPa，开始读取相应水溶液上端液面刻度，记录第一个数据点。读取数据前，一定要有足够的平衡时间，确保温度、压力和水溶液柱高度恒定。
 - (2) 增加压力约 0.30 MPa，达到平衡时，读取相应水溶液柱上端液面刻度，记录第二个数据点。注意加压时应足够缓慢的摇进活塞杆，以保证定温条件，水溶液柱高度应稳定在一定数值，不发生波动时再读数（每个数据点大概等待 2 分钟左右）。

- (3) 按压力间隔 0.30 MPa 左右, 逐次提高压力, 测量第三、第四……数据点, 当出现第一小滴乙烷液体时, 适当降低压力, 平衡一段时间使乙烷温度和压力恒定, 以准确读出恰出现第一小液滴乙烷时的压力。
- (4) 在乙烷液化的阶段, 注意观测压力改变后乙烷状态的变化, 特别是测准出现第一小滴乙烷液体时的压力和对水溶液柱高度, 以及最后一个乙烷小气泡消失时的压力和对水溶液柱高度。此二点压力改变值很小, 在此期间, **按水溶液柱高度每变化 6 mm**, 记录其所对应的压力值。
- (5) 当乙烷全部液化后, 继续按压力间隔 0.30 MPa 左右升压, 直到压力达到 5.50 MPa 为止 (注意: 实验中最大压力不得超过 5.50 MPa)。

3) 测定临界等温线和临界参数, 观察临界现象。

- (1) 将恒温水套温度调至 $t = 32.17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 按上述 (3) 的方法和步骤测出临界等温线, 注意在曲线的拐点 ($p = 4.87\text{ MPa}$) 附近, 应缓慢调整压力 (按 **水溶液柱高度每变化 2~3 mm**, 记录其所对应的压力值), 以便较为准确的确定临界压力和临界比容, 较准确的描绘出临界等温线上的拐点。
- (2) 按 2.2.2 中介绍的原理, 观察临界点附近的实验现象。

4) 测定高于临界温度的等温线 ($t = 40.00\text{ }^{\circ}\text{C}$)

将恒温水套温度调至 $t = 40.00\text{ }^{\circ}\text{C}$, 按压力每间隔 0.30 MPa, 测量 3.00~5.50 MPa 区间内不同压力所对应的水溶液柱高度。

- 5) 做完实验后, 压力降至 2.00 MPa 左右, 完成实验。

2.5 实验数据整理

承压玻璃管内乙烷质量不便测量, 而玻璃管内径或截面积 (A) 又不易测准, 因而实验中采用间接办法来确定乙烷的比容。在温度为 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 $p\text{ MPa}$ 时乙烷的比容

$$v_{t,p} = \frac{V}{m} = \frac{\pi D^2 \Delta h}{4m}$$

式中 Δh 为温度为 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 $p\text{ MPa}$ 时水溶液至玻璃管最顶端的高度差。如图 2-4 所示, 由于玻璃管最顶端非平面, 因此需要估测玻璃管为平面时的高度。

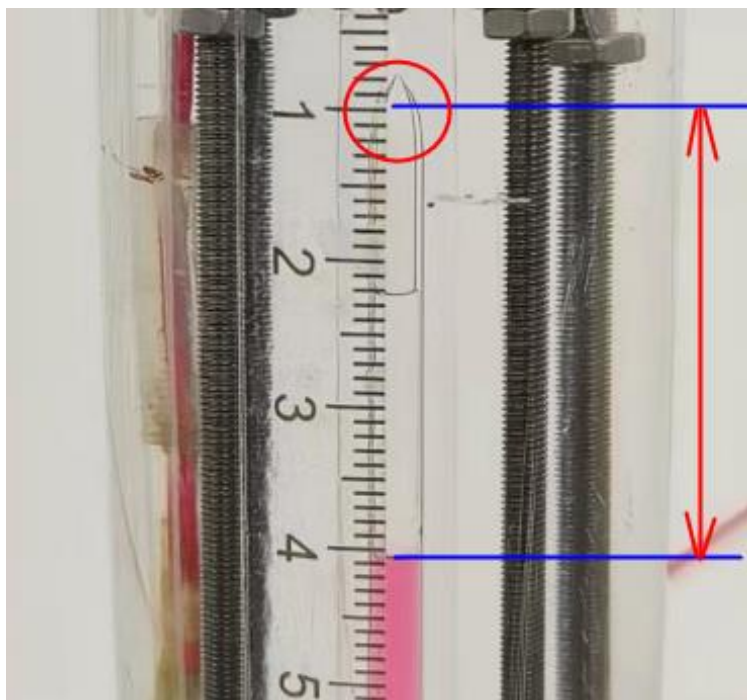


图 2-4 乙烷高度差 Δh 的测量方法

由于测量容器内乙烷的质量 m 是固定不变的，玻璃管内径 D 比较均匀，认为 D 也固定不变，任意两个状态下乙烷比容的比值

$$\frac{v_{t,p}}{v_{t_0,p_0}} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0}$$

因此只要知道一个任意温度 t_0 °C、压力为 p_0 MPa 时乙烷的标准比容值，即可根据

$$v_{t,p} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} v_{t_0,p_0}$$

计算得到任意温度和压力下乙烷的比容。已知乙烷液体在 27.00 °C，3.00 MPa 时的比容

$$v(27^\circ\text{C}, 3.00\text{MPa}) = 0.02010 \text{ m}^3/\text{kg}。$$

2.6 实验报告内容

- 1) 根据表 2-1 中的数据，参照图 2-1 在 p - v 坐标系中绘制出三条等温线。
- 2) 将实验获得的等温线与图 2-1 所示的标准等温线进行比较，分析其差异并说明原因。

表 2-1 实验数据及现象记录表

序号	$t = \quad \quad \quad ^\circ\text{C}$				$t = 32.17\text{ }^\circ\text{C}$ (临界温度)				$t = \quad \quad \quad ^\circ\text{C}$			
	p MPa	h mm	v m^3/kg	现象	p MPa	h mm	v m^3/kg	现象	p MPa	h mm	v m^3/kg	现象
1	3.00				3.00							
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

3) 将实验测定的临界比容 v_c 与理论计算值填入表 2-2, 分析其差异并说明原因。

表 2-2 临界比容值 $v_c(\text{m}^3/\text{kg})$

标准值	实验值	$v_c = \frac{R_g T_c}{p_c}$	$v_c = \frac{3R_g T_c}{8p_c}$
0.00485			

2.7 思考题

1) 实验工质乙烷的压力如何从外界送入?

2) 在实验得到的低于临界温度的曲线中, 饱和液体和饱和气体所对应的压力是否相等?

说明可能造成该区别的原因。

3) 本实验怎样能够提高比容测量的准确度? 请说出三种以上方法。

4) 加压时为什么要足够缓慢? 否则会出现什么问题?