

# 浅析如何引导学生变换思维 学习《热学》中的热容

韩文娟, 强 睿, 张续文, 刘 海

六盘水师范学院, 物理与电气工程学院, 贵州 六盘水

收稿日期: 2021年8月9日; 录用日期: 2021年10月4日; 发布日期: 2021年10月11日

---

## 摘 要

本文结合学生学习《热学》中热容时的知识惑点引导学生使用多种思维变换方式理解热容, 让学生更好、更深入地理解热容从而能正确分析热容的相关问题, 并培养学生相应的思维能力。

## 关键词

引导, 热容, 分析, 变换思维

---

# The Analysis How to Guide Students to Learn the Heat Capacity in Thermology Using a Variety of Ways of Thinking

Wenjuan Han, Rui Qiang, Xuwen Zhang, Hai Liu

School of Physics and Electrical Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui Guizhou

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 4<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 11<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

If the heat capacity is understood better and more deeply, student can analyze correctly the relevant problems of heat capacity using a variety of ways of thinking to guide students to understand heat capacity combining with the puzzlement of knowledge of the heat capacity in Thermology. The students' corresponding thinking ability is cultivated.

## Keywords

Guide, Heat Capacity, Analysis, Varied Thinking

---

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

热容是一个重要概念,《热学》中很多内容都涉及热容,如焓、内能等……;关于热容的研究很多,如非平衡凝固与固态相变的一体化研究[1]、两相流中非平衡相变与平衡相变比定压热容差异的研究[2]、热容测量方法研究[3]等……在《热学》教学中发现,学生对热容理解得不够清晰、深入。鉴于此,本文结合学生的知识惑点引导学生使用多种思维变换方式理解热容,以让学生更好、更深入地学习理解热容从而能正确分析热容的相关问题,并培养学生相应的思维能力。

## 2. 引导学生变换思维学习热容知识

### 2.1. 引导学生由浅入深学习理解热容知识

教学时可以将热容定义、性质、固体液体热容等内容形成知识框体,如同剥玉米,由表及里、由浅入深,层层展开,循序渐进地让学生对热容知识加深理解。

#### 2.1.1. 热容定义

物体温度由  $T_1$  (K) 升高至  $T_2$  (K) 时吸热为  $Q$ , 则  $Q/(T_2-T_1)$  称为  $T_1$  至  $T_2$  温度间隔内的平均热容, 当温度变化时, 平均热容很难反映系统的真实状态, 热容的定义为  $C = \lim_{(T_2-T_1) \rightarrow 0} \left( \frac{Q}{T_2-T_1} \right) = \frac{\delta Q}{dT}$  [4], 引导学生学习时注意: 1、热容定义是平均热容的极限; 2、热容定义中温度单位是 K, 虽然计算时温差值不影响计算结果, 但单位易出现问题。

#### 2.1.2. 比热容性质

教学中发现不少学生纠结比热容是物质属性还是特性问题, 对学生做引导认识物质属性是所有物质的共有性质, 如所有物体都有质量, 不同物质组成的物体质量可以相同, 如一桶水和一块铁质量都可以是 5 千克, 无法从质量大小区分物质的不同, 而特性是一种物质区别于其他物质的特有性质, 如水密度是  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 是水特有的, 反之, 如果有一种物质(纯净物)密度是  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 它就是水。所以比热容是物质的一种特性, 用它可以鉴别物质。

#### 2.1.3. 同物质固体与液体比热容情况

##### (1) 使用类比法解释固体比热容

引导学生认识固体热振动在形式上与多原子分子中原子振动十分类似, 可把固体类比为  $N$  个“原子”所组成的“大分子”, 在所有自由度都做贡献的情况下,  $N_A$  个原子所组成的多原子分子气体的摩尔内能为  $U_m = [3+3+(3N_A-6) \times 2] \frac{k}{2} T$ , 其中  $T$  为该分子气体温度, 使用能量均分定理讨论固体热容时, 固体处于静止状态, 平动与转动不考虑,  $3N_A$  个自由度全是振动自由度, 固体的摩尔内能为  $U_m = 3N_A \cdot 2 \cdot \frac{k}{2} T = 3RT$ , 固体膨胀系数很小, 温度变化时体积膨胀功很小, 系统视为等体过程  $dQ_m = dU_m + PdV_m \Rightarrow C_m = \frac{dQ_m}{dT} = \frac{dU_m}{dT} = \frac{d(3RT)}{dT} = 3R \approx 25 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 所以晶体摩尔热容不变。因为固体对外膨胀做功很小, 系统在等压和等体过程中所吸热相差很少, 因而  $C_{P,m} \approx C_{V,m}$ , 此时不须区分定

压和定容热容。

### (2) 同物质液体比固体的比热容大的原因

引导学生认识固体分子位置很紧凑，可移动位置很小，当吸收热量时，大部分转化为动能，由于液体分子更容易运动，液体分子移动越剧烈，就能携带更多的能量，有较多的能量转化为势能，液体升温慢， $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ ，初温相同时， $\Delta T$  越小， $C$  越大，故与相应固体比热容相比较。但需注意同物质液体的比热容不一定都比固体比热容大，如煤油和冰的比热容都是  $2.1 \times 10^3$  焦耳每千克摄氏度。

## 2.1.4. 热容与温度关系[5]

### (1) 理想气体热容与温度关系

理想气体内能和焓是温度的单值函数，如其定容比热容  $c_v = \frac{du}{dT} = f(t)$ ，定压比热容  $c_p = \frac{dh}{dT} = \frac{d(u+pv)}{dT} = \frac{du+d(vRT)}{dT} = \phi(t)$ ，理想气体比热容与温度的函数关系式为  $c = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots$ ，式中气体系数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  可查阅有关手册。便于学生理解用，将理想气体热容与温度的关系进行归类罗列见表 1。

**Table 1.** The general treatment method of heat capacity of ideal gases

**表 1.** 理想气体热容的通常处理方法

平均比热容 定义法	工程上为了避免积分的麻烦，同时又不影响计算进度，常使用真实比热容的积分平均值， $c_{li}^{t_2} = \frac{c_{0c}^{t_2} t_2 - c_{0c}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$ 即一定温度范围内 ( $t_1$ 和 $t_2$ ) 之间内真实比热容的积分平均值， $c_{0c}^{t_1}$ 、 $c_{0c}^{t_2}$ 可在有关热工手册中查取，若步长不在其中，则使用内差法进行完成。
平均比热容 直线关系法	平均比热容的直线关系式 $c_{li}^{t_2} = a + b(t_1 + t_2)$ ，式中 $a$ 和 $b$ 可在有关热工手册中查取。
定值比热容	精度要求不高或温度变化不大的计算及理论分析中，常使用定值比热容，据分子运动论观点，利用迈耶公式和 $c_v = \frac{i}{2}R$ ， $i$ 为分子自由度，据自由度冻结原理 $i$ 与温度有关。

### (2) 实际气体热容与温度关系

工程实际气体的内能和焓一般是温度和体积的函数，所以其热容也是温度的函数。许多科学家用实验方法精确测定了各种物质在各个温度下的热容值并给出相应的经验表达式，如  $C_{pm} = a + bT + cT^2$ ，式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为经验常数，随物质不同及温度变化范围的不同而异，具体可参看有关书籍。

## 2.2. 引导学生突破固式思维理解热容

学生在中学时对物质比热(即比热容)已有接触，中学物理中某物质比热通常以常数出现，不少学生惯式思维认为物质比热容不变且应是状态量，对热容为什么是过程量、也可以为负值不理解？这时需引导学生突破固式思维理解热容。

### (1) 热容是过程量

热容定义中热容是物质升高(或降低)单位温度时，吸收(或放出)的热量，热量是过程量，所以热容应是过程量，若系统初、末态确定，升高相同温度沿不同过程进行时，吸热各不相同，热容则不同。中学时热容不变通常是指前提条件(如压强或体积)不变或状态变化范围较小时的热容可视为常数。另外还需引导学生应突破固式思维认识各种热容，不再仅仅局限于中学时的比热容。

**(2) 热容可为负值[6]**

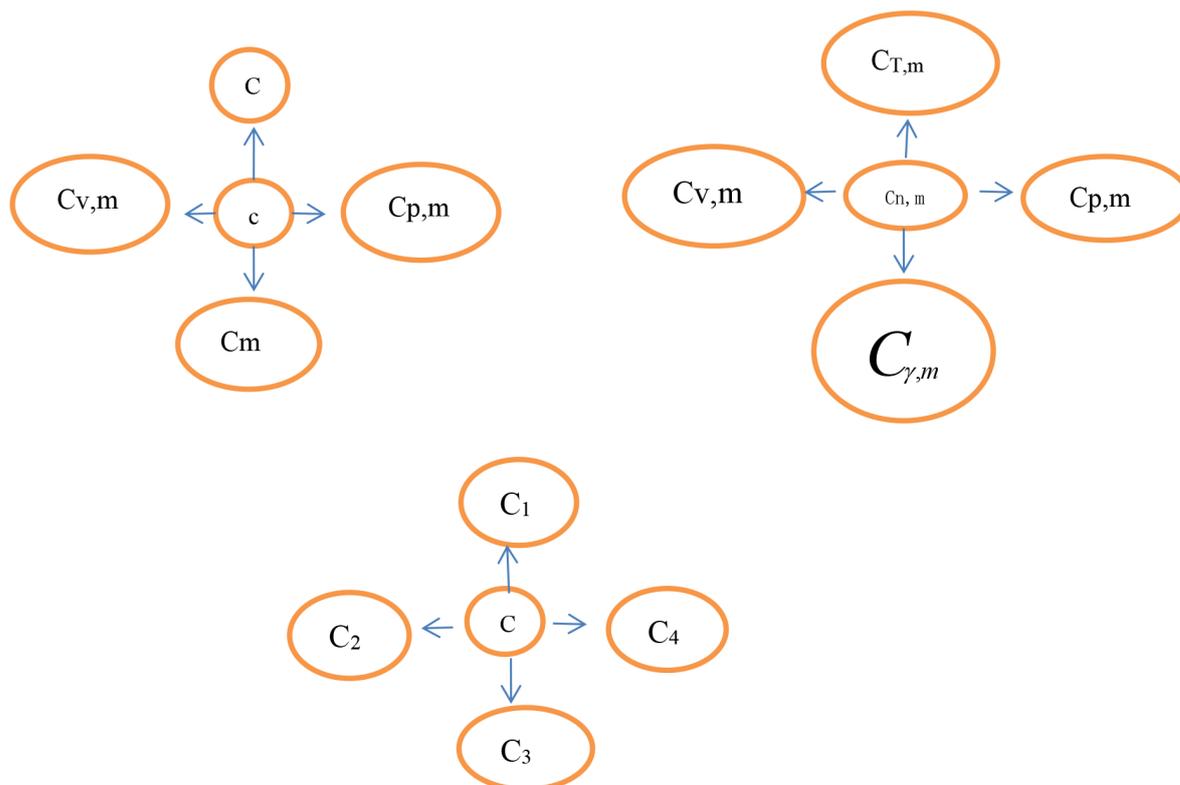
中学物理中学生接受的热容通常为正值，但《热学》中多方热容  $C_{n,m} = C_{v,m} \cdot \frac{\gamma - n}{1 - n}$ ，当  $1 < n < \gamma$  时， $C_{n,m} < 0$  为负，学生不理解热容为何为负，热容  $C_{n,m} = \frac{dQ}{dT} < 0$ ， $dQ$ 、 $dT$  互为异号，若  $dQ < 0$ ， $dT > 0$ ，说明系统放出热量，温度反而升高了，但从热容定义及去理解，容易进死胡同，对此引导学生需考虑内能变化并结合热力学第一定律进行分析。由热一定律  $dQ = dU + dA$ ， $dA < 0$ ， $dQ < 0$ ， $|dA| > |dQ|$ ， $dU > 0$ ， $dT > 0$ ， $\frac{dQ}{dT} < 0$ ， $C_{n,m} = \frac{dQ}{dT} < 0$ ，即若是系统被压缩时，外界对它所做的功大于它所放出的热量，还有一部分外功转化成系统能量，系统内能增加，从而热容为负。举例 1：如气体在气缸中被压缩的时候，若外界对气体做功的一部分用来增加温度，另一部分向外放热，热容为负；举例 2：恒星演化过程中，万有引力使恒星收缩，引力势能降低，所降低的引力势能的一部分以热辐射形式向外界放热，另一部分能量使自身温度升高，热容为负。

**(3) 利用等容热容求解系统内能变化适用于任何过程**

学生不太理解用定容热容求解非等体过程系统内能变化，教学时要引导学生认识内能是状态量，比如理想气体系统确定，系统自由度  $i$  和始末温度  $T_1, T_2$  确定，热容  $C_{v,m} = \frac{i}{2}R$  确定，系统内差  $\Delta U = \nu C_{v,m} (T_2 - T_1)$  就随之而定，所以无论任何热力过程都可利用定容热容来求解系统内能变化  $\Delta U$ 。

**(4) 建立“一展多”模型**

引导学生建立同物质各种热容间“一展多”模型便于理解记忆。如图 1 所示。举例 1：用比热容  $C$  建立“一



**Figure 1.** The “spread-out” radiation model of heat capacity  
**图 1.** 热容“一展多”辐射模型

展多”模型，摩尔热容  $C_m$ 、系统热容  $C$  可写为  $C = mc$ ， $C_m = Mc$ ， $C = \nu C_m$  等，可进行知一求多；举例 2：用多方热容建立“一展多”模型，由多方热容  $C_{n,m} = C_{V,m} \cdot \frac{\gamma - n}{1 - n}$  出发( $C_{n,m}$  为多方热容、 $C_{V,m}$  为定容摩尔热容， $n$  为多方系数， $\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}$  为绝热压缩比，以下同)可得出：等体过程  $C_{V,m} = \frac{R}{\gamma - 1}$ ；等压过程  $C_{p,m} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ ；等温过程  $C_T$  为  $\infty$  ( $\because C = \frac{\delta Q}{dT}$ ， $dT = 0$ ， $\therefore C$  为  $\infty$ )；绝热过程  $C$  为  $0$  ( $\because C = \frac{\delta Q}{dT}$ ， $dT = 0$ ， $\therefore C$  为  $0$ )……等；举例 3：同物质不同的相有不同的比热容，混合物比热容为  $C = \sum C / \sum m = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots) / (m_1 + m_2 + \dots)$  其中  $c$ 、 $c_i$ 、 $m$ 、 $m_i$  分别为物质总热容、第  $i$  组分物质热容、物质总质量、第  $i$  组分物质质量。

### 2.3. 引导学生利用物理思想与理论推导理解特殊点处物质的热容，助培学生科研思维

同物质的不同相有不同热容(如水、冰、水蒸气的热容不同)，学生不甚理解物质发生相变时热容在相变点也有变化[7]，引导学生利用物理思想与理论推导理解特殊点处物质的热容很重要。

#### (1) 一级相变点处的热容

一级相变时热容随温度变化如图 2，图 2 中横轴为温度  $T$ ，纵轴为定压热容  $C_p$ 。设  $G_1$ 、 $G_2$  为系统的自由焓，相变时两相的自由焓相等，但自由焓的一阶偏导数不相等，即  $G_1 = G_2$ ，

$$\left(\frac{\partial G_1}{\partial T}\right)_p \neq \left(\frac{\partial G_2}{\partial T}\right)_p, \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S, \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = -\frac{1}{T} \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = -\frac{C_p}{T},$$

相变时，熵( $S$ )不连续变化即  $S_1 \neq S_2$ ， $C_{p1} \neq C_{p2}$ ，图 2 中那个断点为一级相变点，此处二相并存，温

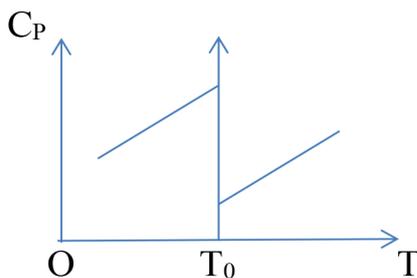


Figure 2. The change of the heat capacity along with the temperature in the first-order phase

图 2. 一级相变热容随温度变化情况

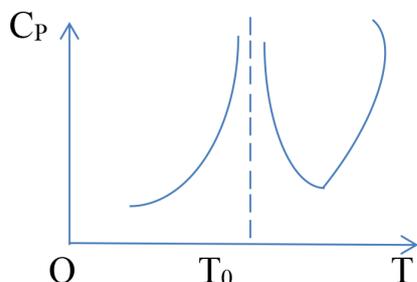


Figure 3. The change of the heat capacity along with the temperature in the second-order phase

图 3. 二级相变热容随温度变化情况

度不变,在该点两侧,热容不相等,且热容随温度均为同增同减变化趋势。随着一直被加热,所有分子热运动增加,在物质全部变为新相以前,混合相的组分变化,热容变化,完全变成新相以后,温度升高热容继续朝着增大的方向进行。

### (2) 二级相变点处的热容变化

二级相变时热容随温度变化如图3,图3中横轴为温度 $T$ ,纵轴为定压热容 $C_p$ 。二级相变时,两相的自由焓 $G$ 相等,其一阶导数也相等,但二阶导数不相等,即

$$G_1 = G_2, \quad \left(\frac{\partial G_1}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial G_2}{\partial T}\right)_p, \quad \left(\frac{\partial^2 G_1}{\partial T^2}\right)_p \neq \left(\frac{\partial^2 G_2}{\partial T^2}\right)_p$$

两相化学势 $G$ 和熵 $S$ (还包括体积 $V$ )相等,但热容( $C_p$ )却不相等。即

$$\therefore \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S, \quad \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = -\frac{1}{T}\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_p = -\frac{C_p}{T}, \quad G_1 = G_2, \quad G_1 = G_2, \quad C_{p1} \neq C_{p2}。$$

二级相变中有热容变化,这类相变中热容随温度变化在相变温度时趋于无穷大,因为此处两相共存时,系统温度没有变化 $\Delta T = 0$ ,但却吸收(或放出)潜热即 $\Delta Q \neq 0$ ,由公式 $C = \frac{\delta Q}{dT}$ , $C$ 应趋于无穷大。

### (3) 绝对零度处物质的比热容[8]

以定容热容为例,设 $A$ 、 $B$ 为绝热过程的初、末状态,记为 $A(T_1, v_1)$ 、 $B(T_2, v_2)$ , $T_1$ 、 $v_1$ 、 $T_2$ 、 $v_2$ 分别表示 $A$ 态和 $B$ 态的温度和比体积, $A$ 态和 $B$ 态的熵分别为, $S_B = S(T_2, v_2) = S(0, v_2) + \int_0^{T_2} c_{v2} \frac{dT}{T}$ ,设 $A$ 和 $B$ 为可逆过程联系的两个态,满足 $S_A = S_B$ ,即 $S(0, v_1) + \int_0^{T_1} c_{v1} \frac{dT}{T} = S(0, v_2) + \int_0^{T_2} c_{v2} \frac{dT}{T}$ ,若能斯特定理成立,则 $S(0, v_1) = S(0, v_2)$ ,所以有 $\int_0^{T_1} c_{v1} \frac{dT}{T} = \int_0^{T_2} c_{v2} \frac{dT}{T}$ (注意到 $C_V > 0$ , $C_V = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V > 0$ )式中的被积函数恒为正,只有 $\lim_{T \rightarrow 0} C_V(T) \rightarrow 0$ ,积分才不发散。所以 $T \rightarrow 0, C_V \rightarrow 0$ 。

## 3. 结论

总之,热容是一个非常重要的概念,教学中要针对学生在学习热容时的知识惑点进行整理并做针对性的教法调整,对学生进行思维变换学习引导,突破教学难点以让学生对热容有更清晰、深入的理解,以热容为点带面让学生学到更多知识,能为学生的后续学习(如热力学统计物理的学习等)打下良好基础,同时教师要在教学中突破教材局限,善于发现教学中的科研点与教研点,结合相关期刊论文思想,对学生做相关科研引导,深化教学,反过来助培学生科学思维,这十分有意义,但可能教学课时有限,课堂上不能很好地进行知识剖析讲解,教师可借用学习通等教学平台进行录屏播放或以讲座的形式进行讲解以最终达到对学生知识补充的学习目的。

## 基金项目

2019年教育部高等学校大学物理课程教学研究立项项目(DJZW201934xn);六盘水师范学院教学内容和课程体系改革研究项目(LPSSYjg-2021-20);六盘水师范学院一流课程《热学》课程建设项目(LPSSYylkc202105);六盘水师范学院科技创新团队项目(LPSSYKJTD201901);国家自然科学基金项目(12065016);关于混合式教学模式下的大学物理课程教学实践和应用(2018520116);六盘水师范学院硕士

学位培育点学科建设项目(LPSSYSSDYPY201704); 六盘水师范学院教学内容与课程体系改革项目(LPSSYjg201931)。

### 参考文献

- [1] 刘峰, 张旭. 非平衡凝固与固态相变的一体化研究[J]. 金属学报, 2018, 54(5): 702-715.
- [2] 蔡绍洪. 平衡与非平衡两类相变的临界联系[J]. 电子科技大学学报, 1997(26): 171-180.
- [3] 魏秀芳. 金属比热容与温度关系的实验研究[J]. 高教期刊, 2015(5): 53-56.
- [4] 李椿, 章立源, 钱尚武. 热学[M]. 第二版. 北京: 人民教育出版社, 2010: 168-183.
- [5] 付秦生. 工程热力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 66-71.
- [6] 张金锋, 代凯, 等. 基于理想气体多方过程的摩尔热容计算[J]. 廊坊师范学院学报, 2017(17): 51-56.
- [7] 汪志诚. 热力学·统计物理[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 168-183.
- [8] 秦允豪. 热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2018: 168-183.