

不同气体状态方程下吸放热行为的判据研究

阳 丽¹, 李雨泽¹, 周艳君², 白克钊^{1*}

¹广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林

²荔浦市第三中学, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月15日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月17日

摘 要

气体系统的热量交互行为是热力学中的重要机制。本文将“过程热容”这一经典概念, 从理想气体的特例推广到任意准静态热力学过程的统一分析工具。首先, 基于热力学第一定律与气体状态方程, 推导理想气体状态方程、维里方程和范德瓦尔斯方程所描述的若干个典型热力学过程中吸放热行为的热量微分表达式, 其次, 系统分析了吸放热的转折点, 通过热量表达式($dQ = CdT$), 并提出一个统一判据(过程热容为零)分析系统的吸放热行为。最后, 将判据应用于负斜率直线过程, 得到了和现有文献相同的结果。本研究有助于深化对热力学过程本质的理解, 提升复杂热力学系统的建模与分析能力。

关键词

理想气体, 真实气体, 范德瓦尔斯方程, 昂尼斯方程, 过程热容

Research on a Criterion for Heat Exchange Behavior under Different Gas State Equations

Li Yang¹, Yuze Li¹, Yanjun Zhou², Kezhao Bai^{1*}

¹College of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

²Lipu No.3 Middle School, Guilin Guangxi

Received: June 15, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

The heat interaction behavior of gas systems is a crucial mechanism in thermodynamics. This paper

*通讯作者。

文章引用: 阳丽, 李雨泽, 周艳君, 白克钊. 不同气体状态方程下吸放热行为的判据研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(7): 133-141. DOI: 10.12677/aam.2026.157309

extends the classical concept of “process heat capacity” from the special case of ideal gases to a unified analytical tool applicable to any quasi-static thermodynamic process. First, based on the first law of thermodynamics and the gas state equation, we derive differential expressions for heat transfer in several typical thermodynamic processes described by the ideal gas law, virial equation, and van der Waals equation. Secondly, it systematically analyzes the turning points of heat absorption and release, and summarizes the heat as an expression ($dQ = CdT$), and analyzes the heat absorption and release behavior of the system based on a unified criterion (process heat capacity is zero). Finally, the criterion is applied to the negative slope linear process, and the same results as those in existing literature are obtained. This study contributes to deepening the understanding of the essence of thermodynamic processes and enhancing the modeling and analysis capabilities of complex thermodynamic systems.

Keywords

Ideal Gas, Real Gas, Van Der Waals Equation, Onnes Equation of State (Virial Equation of State), Process Heat Capacity

Copyright © 2026 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

对气体系统的热量转换与传递方向分析热力学核心内容之一。由于不同的热力学过程中温度、焓、熵和自由能的变化呈现不同的规律，系统中的热量传递方向与具体的热力学过程紧密相关[1]。经典热力学基础公式看似简单易懂，但有其深刻的内涵，在不同气体系统的热力学分析中，存在值得深入探讨的差异与复杂性，仍存在许多理论认知与应用层面上的误区[2]。学习困难主要集中在概念抽象、数学公式的应用、理想系统的情景化分析和实验与理论割裂[3]-[12]等方面，尤其体现在理想气体与真实气体行为的不同建模过程中[13]-[16]。

例如，Rozier [3]和 van Roon [4]等人指出，在厘清能量转化的方向、方式与结果的过程中，研究者常认为物体“拥有”多少热量，温度等同于内能本身，同时在应用状态方程时易出现和压强定义式混淆。Meltzer [5][6]分析学生的做功、热量及热力学第一定律相关测验题的计算步骤以及解题思路，想看清他们是否理解热力学第一定律和第二定律的内涵，以及是怎样围绕传热与内能这两个独特的概念建立过程。Loverude [7]在针对热力学第一定律应用的研究中发现，即使非常熟悉每个物理量(做功、热量和内能)的含义，在将该定律应用于涉及多个连续过程或复杂路径系统的时候，还是不能直接联想到热力学第一定律的因果关系(即对系统做功导致内能变化)。难点主要体现在两个方面：其一，应用数学工具处理非理想气体演化过程中需要结合压强-体积曲线图像和代数推导，由于涉及多个参数的情景，积分过程中参数处理会出现理解偏差；其二，理想气体状态方程应用于实际气体时具有局限性，需要对压强和体积作适当的修正，但是怎么修正是一个复杂的问题，非理想气体复杂热力系统与理想气体系统割裂、脱节。许多学习者存在绝热过程温度不变的误区。史小波[8]认为寻找吸放热的转换点是判断理想气体准静态过程的吸放热情况的关键，他提出用图像法(画绝热线、画切线)、公式法(熵函数)辅助求解热机效率，Chang [9]指出功、内能及热量的正负符号混淆使用，热量和内能被误认为由状态参量决定。Brookes [10] [11]从概念物理内涵的角度分析了热量、温度与能量的区别，他探讨了研究者的思维方式如何影响热力学系统的推导分析。郑明阳[12]用微元法拟合无穷小微元过程和图像法(画绝热线)分析多方热力学整体过程中的吸放热情况，以此来帮助学习者准确计

算热机效率和制冷剂制冷系数。于是, Benjamin [13]专门探讨了状态量与过程量(如温度与热传递)在热力学分析中的区分和理解问题。改变物体内能的两种方式中, 很多研究者会误认为做功改变物体的内能, 需要吸收或者放出热量。针对学生只会机械地记忆压强 - 体积的正斜率直线热力学过程, 无法举一反三地理解负斜率过程曲线。郑小娟[14]微元思维方式计算压强 - 体积的负斜率直线热力学过程中吸放热区域。促进学生理解过程量的本质及(压强 - 体积闭合过程曲线)循环效率的计算。

综上所述, 真实气体热力学系统的吸放热过程分析中的难点有三: 热量基础公式的理解、热力学过程归类以及实际气体的分析应用[17]-[19]。在概念理解层面, 热量的微观物理本质没有被深入理解。学习者一般直接用比热容乘以温度变化的标准公式来计算热量, 他们认为这个标准公式适用于所有热力学过程。因此, 无法正确进行热性质和能量转换, 导致无法推导出热量的衍生公式。在过程归类方面, 实际气体在膨胀或压缩过程中的热力学行为既不是等温过程也不是等压过程, 而属于典型的变指数过程, 不能归类为典型的多方过程。即使熟悉微元思维积分方法, 实际气体系统的复杂性导致学习者无从入手, 造成的科学思维过程混论。在应用层面, 将理想气体模型推演到真实气体行为研究时, 适用范德瓦尔斯方程与昂尼斯方程[20]等修正气体状态方程, 这样的过程需借助更高阶状态方程来描述。因此, 深入探究理想气体、真实气体演化过程中的热量吸放机制[21]不仅破除理想模型与真实气体之间的思维壁垒, 也可提升复杂热力学系统的建模能力。同时, 深入分析热力学系统的热量传递行为在众多科学和工程领域有着广泛的应用, 包括动力循环系统[22]、生物质和煤的气化[23]、太阳能利用[24]、制冷技术[25]、余热回收[26]、蒸馏塔系统以及热流体流动分析[27]。

经典的热力学过程中的热量计算依赖于热力学第一定律和状态方程的具体形式, 不同的多方过程热容表达式不一样, 尤其是真实气体时, 热容量不为常数, 缺乏一个统一的分析框架。本文旨在将从理想气体的特例应用提升为适用于任意准静态过程的统一分析工具。首先, 基于热力学第一定律的微分形式和理想气体状态方程, 推导出了近似准静态过程中热量交换的一般微分表达式, 即无论过程方程以何种形式给出, 热容量定义为 $C_{\text{process}} = \delta Q/dT$ 。其次, 探讨了热交互行为以及确定其转变点的方法, 即引入两个辅助的判据 ϕ 与 θ , 采用热交换微分判据 dQ/dV 。建立 C_{process} 与 ϕ 与 θ 之间明确的数学关系, 推导了理想气体(不同的方程状态描述)和实际气体(采用维里方程和范德瓦尔斯方程的气体方程描述)系统的热量变化表达式之后, 将系统吸放热行为的转折点统一为: 过程热容为零, 从而清晰揭示不同约束条件下吸放热的内在特征。最后, 将判据应用于负斜率压强 - 体积直线热力学过程, 得到了和现有文献相同的表达式。经过这几个步骤深入地挖掘气体在不同热力学过程中的能量行为和规律, 整个推导过程清晰简明地完成从知识理解到分析能力的迁移。

2. 准静态过程中的热量

气体的内能 U 包括动能和势能, 分别与温度 T 和体积 V 有关, 可写为 $U = U(T, V)$ 。其对温度的全微分关系为:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (1)$$

将热力学第一定律关系式($dU = dQ + dW$), 准静态过程中元功公式($dW = -pdV$), 气体的摩尔定容热容定义式($C_V = \frac{1}{n} \left(\frac{dU}{dT} \right)_V$)和能态方程($\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p$)带入上式, 得到

$$dQ = nC_V dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V dV \quad (2)$$

其中, p 是压强, n 表示摩尔数, C_V 是定容比热容。引入核心物理量——过程热容 C_{process} , 对于任意系

统, 定义为 $C_{\text{process}} = \frac{dQ}{dT}$ 。当过程约束为等压时, $C_{\text{process}} = C_P$ 时; 当过程约束为等压时, $C_{\text{process}} = C_V$ 时。

当 $C_{\text{process}} > 0$ 时, 吸热; 当 $C_{\text{process}} < 0$ 时, 放热。吸放热的转折点判据统一为: $C_{\text{process}} = 0$ 。

过程热容可表示为:

$$C_{\text{process}} = nC_V^0 + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \frac{dV}{dT} \quad (3)$$

过程热容由两部分组成, 一项是定容热容项(温度贡献), 一项是与过程相关的压缩项(体积贡献), 后者体现了过程约束对热量分配的影响。

对于真实气体, 例如昂内斯物态方程描述(以体积展开)的气体系统

$$p = \frac{RT}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i(T)}{v_m^{i+1}} \quad (4)$$

其中, $A_i(T)$ 为昂内斯系数。摩尔体积为 $v_m = \frac{V}{n}$ 。根据(3)式, 得 $C_V(T, V) = C_V^0 + T \int_{V_0}^V \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_V dV$ 。对于真

实气体, 定容热容 $C_V(T, V)$ 一般不再是常数, 而是温度与体积的函数。 C_V^0 是理想气体极限下(体积趋于无穷)的定容热容, 仅仅与温度有关。

带入(4)式, 并取积分项中 $V_0 \rightarrow \infty$, 之后带入(2)式, 得

$$dQ = n \left[C_V^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{iv_m^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V ndv \quad (5)$$

第一项是温度贡献项, 第二项是体积修正项。当昂内斯系数等于零或者常数的时候, (5)式子退化为(3)式。

3. 过程方程为 $p = f(v)$ 时的系统的吸放热情况

假设过程方程可写为 $p = f(v)$, (3)式求导, 得

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \frac{R}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT} \quad (6)$$

将(6)式子带入(2)式子, 得:

$$dQ = \left\{ \left[C_V^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{iv_m^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] \frac{df(V)}{dV} n + \left[\frac{RT}{v_m^2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{i+1}{v_m^{i+2}} A_i(T) \right] \frac{R}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT} \right\} dV \quad (7)$$

令(7)式子中大括号部分记为 ϕ , 于是写为:

$$dQ = \phi dV \quad (8)$$

当气体膨胀时($dV > 0$), 存在三种情形: (1) $\phi > 0$ 时, $Q > 0$, 气体系统从环境吸热; (2) $\phi = 0$ 时, $Q = 0$, 出现转折点; (3) 当 $\phi < 0$ 时, $Q < 0$, 外界从系统吸收热量。

3.1. 理想气体

当昂内斯方程中的 $A_i(T) = 0$, 即为理想气体状态方程形式: $pV = nRT$, 其中 R 是普适气体常数。当 $n = 1 \text{ mol}$, 上式带入(7)式中, 得:

$$\phi = \frac{i}{2} V \frac{df(V)}{dV} + \left(\frac{i}{2} + 1 \right) P \quad (9)$$

3.1.1. 直线过程

压强表达式为 $p = aV + b$ ($a > 0$)。将压强求导并带入(9)式, 当 $\phi = 0$ 时, 在转折点 $C^*(p_{c^*}, V_{c^*})$ 处:

$$V_{c^*} = -\frac{i+2}{2i+2} \frac{b}{a} \quad (10)$$

$$p_{c^*} = \frac{i}{2i+2} b \quad (11)$$

说明, 对于 p - V 关系中正斜率过程, 沿着过程直线正方向, 靠近 C^* 点时恒吸热, 远离 C^* 点时恒放热。

3.1.2. 抛物线过程

压强表达式为 $p = a + b(V - V_0)^2$ 。将压强求导并带入(9)式, 当 $\phi = 0$ 时, 得

$$V = \frac{V_0}{\gamma+2} \left\{ \gamma+1 \pm \sqrt{1 - \frac{\gamma(\gamma+2)a}{bV_0^2}} \right\} \quad (12)$$

其中, 绝热系数 $\gamma = \frac{\frac{i}{2}+1}{\frac{i}{2}}$ 。同样, 对于气体膨胀过程。当 $bV_0^2 < \gamma(\gamma+2)a$, 系统吸热; 当 $bV_0^2 = \gamma(\gamma+2)a$

时, 除了 $V_C = \frac{\gamma+1}{\gamma+2} V_0$ 为绝热点之外, 其余各处都是吸热; 当 $bV_0^2 > \gamma(\gamma+2)a$ 时, 有两个吸放热的转折点,

分别为 $V_A = \frac{\gamma+1}{\gamma+2} V_0 - \frac{V_0}{\gamma+2} \sqrt{1 - \frac{\gamma(\gamma+2)a}{bV_0^2}}$, $V_B = \frac{\gamma+1}{\gamma+2} V_0 + \frac{V_0}{\gamma+2} \sqrt{1 - \frac{\gamma(\gamma+2)a}{bV_0^2}}$, 且 $V_A < V_B$ 。当 $V < V_A$ 时, 系统吸热, 当 $V > V_B$ 时, 系统吸热, 当 $V_A < V < V_B$ 时, 系统放热。

3.2. 范德瓦尔斯气体

其压强表达式为:

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad (13)$$

其中常数 a 与分子间的吸引力有关, b 与气体分子本身的体积有关。将范德华方程转化为类似维里方程 (Virial equation) 的形式, 采用泰勒级数展开:

$$p = \frac{RT}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} RTb^i - \frac{a}{v_m^2} \quad (14)$$

对比(3)式并对压强 $\frac{\partial p}{\partial v_m}$ 求导, 带入(8)式子, 得到

$$\phi = \frac{1}{R} \left\{ (v_m - b) C_v^0 \frac{df(V)}{dv_m} - \frac{2C_v^0 a}{v_m^3} (v_m - b) + (C_v^0 + R) f(V) + (C_v^0 + R) \frac{a}{v_m^2} \right\} \quad (15)$$

可以进一步对上式求导, 若 $\frac{d^2 S}{dv^2} > 0$, 则该点为熵的极小值, 系统状态从放热转变到吸热; 若 $\frac{d^2 S}{dv^2} < 0$, 则该点为熵的极大值, 系统状态从吸热转变到放热。将 15 式应用于具体的热力学过程, 可以直观地揭示范德瓦尔斯气体的吸放热行为。加入热力学过程压强不变, 则 $\frac{df(v)}{dv} = 0$ 。带入(15)式中, 设当 $\phi = 0$ 时吸放热转

折点的摩尔体积为 v_m^* ，可得 $v_m^* = \frac{2bC_v^0}{C_v^0 - R}$ ，对于多方过程，一般 $C_v^0 > R$ ，故 v_m^* 为正定值。 b 决定了体积转

折点的数值， b 越大， v_m^* 越大。这是由于分子固有体积效应在高密度区显著改变了系统的有效自由体积，从而延迟或提前了熵对体积响应的非线性行为。虽然 a 的影响没有直接体现，从(13)式看出， a 越大，分子间引力越强，温度越低，即在低温下也可以发生热转变。将 v_m^* 带入(13)式即可以得到温度临界值 T^* 。

将上述结果与理想气体相比较，理想气体等压过程中 $a=0$ ， $b=0$ ，公式(15)中 $\phi=0$ ，说明系统不存在吸放热转折点。范德瓦尔斯气体由于引入了分子间相互作用 a 和体积排斥效应 b ，在等压过程中出现了转折点。当系统摩尔体积 $v_m > v_m^*$ （稀薄气体区域），分子间作用力可忽略，系统行为趋近理想气体，始终表现为吸热主导；当系统摩尔体积 $v_m < v_m^*$ （稠密区域），分子间引力开始显著影响系统的热力学响应，系统由吸热状态过渡至放热状态。由此可见，范德瓦尔斯气体由分子体积效应决定的转折点体积大小，而分子间引力则调节该转折点发生的温度大小。

4. 过程方程为 $p = \phi(T)$ 的情形

对压强求导得到

$$dv_m = \frac{\frac{R}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT} - \frac{d\phi(T)}{dT}}{\frac{RT}{v_m^2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{-i-1}{v_m^{i+2}} A_i(T)} dT \quad (16)$$

代入(5)式，得

$$dQ = \left\{ n \left[C_v^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{iv_m^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] + T \left(\frac{\partial \phi(T)}{\partial T} \right)_v n \frac{\frac{R}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT} - \frac{d\phi(T)}{dT}}{\frac{RT}{v_m^2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{-i-1}{v_m^{i+2}} A_i(T)} \right\} dT \quad (17)$$

令 $\theta = n \left[C_v^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{iv_m^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] + nT \left(\frac{\partial \phi(T)}{\partial T} \right)_v \frac{\frac{R}{v_m} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{v_m^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT} - \frac{d\phi(T)}{dT}}{\frac{RT}{v_m^2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{-i-1}{v_m^{i+2}} A_i(T)}$ 。此时， $\theta = \theta(T)$ 仅与温度有

关。则 $dQ = \theta dT$ ，当 $\theta = 0$ 时，为系统吸放热的转折点。

5. 过程方程为 $V = \psi(T)$ 的情形

对体积求导和对压强求导，带入(5)式，得

$$dQ = \left\{ n \left[C_v^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i \left[\frac{\psi(T)}{n} \right]^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] + T \left[\frac{\frac{R}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT}}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]} \frac{d\psi(T)}{dT} \right] \right\} dT \quad (18)$$

则 $\alpha = n \left[C_v^0 - T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i \left[\frac{\psi(T)}{n} \right]^i} \frac{\partial^2 A_i(T)}{\partial T^2} \right] + T \left[\frac{\frac{R}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]^{i+1}} \frac{dA_i(T)}{dT}}{\left[\frac{\psi(T)}{n} \right]} \frac{d\psi(T)}{dT} \right]$ ，则有 $dQ = \alpha dT$ ，(α 仅

仅与 T 有关)。当 $\alpha = 0$ 时，为系统吸放热的转折点。

6. 小结

总之，不同的气体热力学过程可以得到相似的气体热量交换的表达式 $dQ = CdT$ ，其中 C 是过程热容 (具体写为 ϕ 或 θ 或 α)。过程热容的正负直接决定了热量交换的方向，归纳如表 1。

Table 1. Characteristics of heat absorption and release in different thermodynamic processes
表 1. 不同热力学过程的吸放热特征

过程方程	热量方程	热量传递情况	吸放热转折点
理想气体 $p = aV + b \ (a > 0)$		吸放热的转折点发生在	
$p = f(v)$ 理想气体 $p = a + b(V - V_0)^2$	$dQ = \phi dV$	$C_{process} = 0$ 处。当 $C_{process} > 0$ 时候，若 $dT > 0$ ，系统吸热，若 $dT < 0$ ，系统放热；当 $C_{process} < 0$ 时候，若 $dT > 0$ ，系统放热，若 $dT < 0$ ，系统吸热。	$C_{process} = \phi = 0$
范德瓦尔斯气体 $\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$			
$p = \phi(T)$	$dQ = \theta dT$		$C_{process} = \theta = 0$
$V = \psi(T)$	$dQ = \alpha dT$		$C_{process} = \alpha = 0$

需要说明的是，对于过程方程为 $p = f(v)$ 的情形，转折点在 $\phi = 0$ 处，而不是直接寻找过程曲线与等温线或绝热线切点关系。这与许多文献中[28]-[31]得到的判断方法“利用绝热线作为参考线来进行判断”不一致，这是因为这些文献中大多讨论的是负斜率直线过程($dp/dV < 0$)，由过程曲线与绝热线(或等温线)的相切点来确定热量的吸放转折点，而我们考虑的是正斜率过程($dp/dV > 0$)，过程曲线的斜率与绝热线、等温线的斜率正负号相反，只存在交点，而无切点，所以转折点可从表 1 中的条件求出。对于负斜率过程，采用本文的方法，例如 $p = -kV + b \ (k > 0, b > 0)$ ，将过程方程带入(9)式，得到 $V_c^* = \frac{i+2}{2i+2} \frac{b}{k}$ ， $p_c^* = -\frac{i}{2i+2}b = -kV_c^* + b$ ，这个 V_c^* 就是曲线与绝热线相切的切点坐标。判据 $\phi = 0$ 也可得到与绝热线相切条件相同的结果[32]，无需采用画图法辅助找出几何切点，因此，本方法是一个更具普适性的统一判据。

7. 结论

热力学过程中系统吸/放热的判断是物理化学与工程热力学分析中的关键问题。本研究通过“过程构建详解 - 判据归纳推演 - 应用举一反三”的递进式分析框架，将过程热容 $C_{process}$ 这个经典概念，从理想气体的特例推广到适用于任意准静态过程的分析工具。热量交换模式转变的判断均归结为对单一物理量——过程热容 $C_{process}$ 的符号分析，从而将不同气体模型、不同热力学过程的热交换行为统一在同一分析框架之下。根据热量普遍表达式($dQ = CdT$)，找到了一个统一判据($C_{process} = 0$)分析理想气体、范德瓦尔斯气体和昂尼斯气体系统的吸放热行为。最后，用负斜率 p - V 直线过程来验证判据的准确性，所得结果与现有文献完全一致，验证了本分析框架的可靠性与普适性。本研究为热力学理论与实际问题的衔接提供了一种清晰的分析路径，揭示了各类气体模型在热交换行为上的异同及其内在热力学机制。有助于深化对热力学概念的理解，提升复杂过程的抽象与建模能力。

基金项目

广西自然科学基金(2022GXNSFAA035487)、广西高等教育教学改革与建设项目(编号: 2025JGZ117)、广西师范大学教育教学改革项目(编号: 2024JGZ09)、广西学位与研究生教育改革项目(编号: JYC2025078)。

参考文献

- [1] Callen, H.B. (1985) *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. Wiley.
- [2] Bodner, G.M. and McMillen, S. (1987) Misconceptions about the Concept of Energy in Thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, **24**, 415-425.
- [3] Rozier, S. and Viennot, L. (1992) Students' Reasonings in Thermodynamics. *International Journal of Science Education*, **13**, 159-170. <https://doi.org/10.1080/0950069910130203>
- [4] van Roon, P.H., van Sprang, H.F. and Verdonk, A.H. (1994) 'Work' and 'Heat': On a Road towards Thermodynamics. *International Journal of Science Education*, **16**, 131-144. <https://doi.org/10.1080/0950069940160203>
- [5] Brundage, M.J., Meltzer, D.E. and Singh, C. (2024) Investigating Introductory and Advanced Students' Difficulties with Entropy and the Second Law of Thermodynamics Using a Validated Instrument. *Physical Review Physics Education Research*, **20**, Article ID: 020110. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.20.020110>
- [6] Meltzer, D.E. (2004) Investigation of Students' Reasoning Regarding Heat, Work, and the First Law of Thermodynamics in an Introductory Calculus-Based General Physics Course. *American Journal of Physics*, **72**, 1432-1446. <https://doi.org/10.1119/1.1789161>
- [7] Loverude, M.E., Kautz, C.H. and Heron, P.R.L. (2002) Student Understanding of the First Law of Thermodynamics: Relating Work to the Adiabatic Compression of an Ideal Gas. *American Journal of Physics*, **70**, 137-148. <https://doi.org/10.1119/1.1417532>
- [8] 史小波. 热力学吸放热过程及转折点的研究[J]. 科技传播, 2010(23): 135-136.
- [9] Chang, W. (2011) Teaching the First Law of Thermodynamics via Real-Life Examples. *The Physics Teacher*, **49**, 231-233. <https://doi.org/10.1119/1.3566034>
- [10] Brookes, D.T. (2012) Students' Conceptual Understanding of Heat, Temperature, and Energy in Thermodynamics. *Physics Education*, **47**, 147-153.
- [11] Brookes, D.T. and Etkina, E. (2015) The Importance of Language in Students' Reasoning about Heat in Thermodynamic Processes. *International Journal of Science Education*, **37**, 759-779. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025246>
- [12] 郑明阳, 王天为, 张国锋. 理想气体热力学过程吸放热情况的图像判断法[J]. 物理与工程, 2014, 24(3): 24-28.
- [13] Brown, B. and Singh, C. (2022) Student Understanding of Thermodynamic Processes, Variables and Systems. *European Journal of Physics*, **43**, Article ID: 055705. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac7af2>
- [14] 郑小娟, 潘江陵, 邹慧, 等. 用微元思想讨论热力学过程中的纯吸热和纯放热[J]. 物理通报, 2025(9): 31-34.
- [15] 张兰知, 岳红梅. 理想气体任意准静态过程吸放热研究[J]. 高师理科学刊, 2006, 26(2): 27-30.
- [16] 唐建辉, 沈抗存. 也谈直线过程的吸放热和循环效率的计算[J]. 大学物理, 2015, 34(5): 15-18.
- [17] Lindsey, B.A., Heron, P.R.L. and Shaffer, P.S. (2009) Student Ability to Apply the Concepts of Work and Energy to Extended Systems. *American Journal of Physics*, **77**, 999-1009. <https://doi.org/10.1119/1.3183889>
- [18] Safitri, I., Sinaga, P. and Suhendi, E. (2022) Problem-based Learning Integrated Reading and Writing in Work and Energy Phenomena: Its Effectiveness on Problem-Solving Skills and Reading-Writing Literacy. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, **11**, 219-230. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v11i2.13833>
- [19] Gönen, S. (2014) Application of the First Law of Thermodynamics to the Adiabatic Processes of an Ideal Gas: Physics Teacher Candidates' Opinions. *Science Education International*, **25**, 372-395.
- [20] Lüdtke, K.H. (2004) Thermodynamics of Real Gases. In: Lüdtke, K.H., Ed., *Process Centrifugal Compressors*, Springer, 47-70. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09449-5_2
- [21] 金明善, 杨树斌, 李庆忠. $p(Vm-b)=RT$ 实际气体在一些热力学过程中的应用[J]. 大学化学, 2021, 36(4): 272-278.
- [22] Emami Tabataba, L., Irfan, M.F., Wan Daud, W.A.M. and Chakrabarti, M.H. (2012) The Effect of Temperature on Various Parameters in Coal, Biomass and Co-Gasification: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 5584-5596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.015>
- [23] Reed, T.B. and Gaur, S. (2001) *An Atlas of Gasification: The Thermal and Chemical Conversion of Biomass to Gaseous Fuels*. Biomass Energy Foundation Press.
- [24] Anand, D.K., Lindler, K.W., Schweitzer, S. and Kennish, W.J. (1984) Second Law Analysis of Solar Powered Absorption Cooling Cycles and Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, **106**, 291-298. <https://doi.org/10.1115/1.3267598>
- [25] Aly, W.I.A., Abdo, M., Bedair, G. and Hassaneen, A.E. (2017) Thermal Performance of a Diffusion Absorption Refrigeration System Driven by Waste Heat from Diesel Engine Exhaust Gases. *Applied Thermal Engineering*, **114**, 621-630. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.019>

-
- [26] Rejl, F.J., Haidl, J., Valenz, L., Moucha, T. and Schultes, M. (2016) Analogy of Absorption and Distillation Processes. Wetted-Wall Column Study. *Chemical Engineering Science*, **153**, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.021>
 - [27] Zhao, B. (2021) Derivation of Unifying Formulae for Convective Heat Transfer in Compressible Flow Fields. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16762. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95810-0>
 - [28] 张良瑞, 刘运. 论理想气体 p - V 图中负斜率直线过程[J]. 物理与工程, 2003, 13(4): 30-32.
 - [29] 岑敏锐. 理想气体吸热和放热的讨论[J]. 物理与工程, 2006, 16(5): 28-30.
 - [30] 李鸿寅. 理想气体任意准静态过程吸放热研究[J]. 大学物理, 1987(1): 17-19.
 - [31] 朱曙华, 李科敏, 沈抗存. 关于理想气体在任意准静态过程中的吸放热和升降温等问题的讨论[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2006(2): 45-48.
 - [32] 陈寿谦. 对理想气体任意直线过程吸放热问题的讨论[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 1996(4): 107-109.