

热力学可逆过程功热转换的讨论式教学与实践

许 海*

(吉林大学化学学院, 长春 130021)

摘要: 将讨论式教学法的基本思想应用到物理化学课程的课堂教学中, 对以往容易混淆和概念不清的关键问题——热力学可逆循环过程功、热转换关系进行深入的讨论, 最终总结出重要的结论并进行了拓展性分析。通过讨论式教学的实践过程, 使学生对热力学可逆过程的本质特征有了更加深入的理解, 这给后续课程的学习打下了良好的基础。

关键词: 讨论式教学; 教学改革与实践; 热力学; 可逆过程; 功热转换
中图分类号: O642; G64

Practice of Discussion-Based Teaching on Work-Heat Transfer in Thermodynamic Reversible Process

XU Hai*

(College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130021, P. R. China)

Abstract: The discussion-based teaching method is applied to the physical chemistry course for insightful understanding of the work-heat transfer in thermodynamic reversible process. By means of the discussion-based teaching, students can have a good command of essential characteristics of thermodynamic reversible process, which lays a solid foundation for subsequent learning contents.

Key Words: Discussion-based teaching; Teaching reform and practice; Thermodynamics; Reversible process; Work-heat transfer

讨论式教学法是一种比较传统却也非常有效的课堂教学方法, 很多教育工作者对其进行了比较深入的研究^[1-3]。所谓讨论式教学法, 通常是指由教师提出讨论命题, 并指导学生分组讨论, 同学之间相互交流看法, 各抒己见, 相互启发, 彼此补充, 得到初步解决问题的观点, 最终再由教师进行总结, 确认结论的课堂教学模式。以往, 讨论式教学法更多地被应用在偏重文科的课堂教学体系中, 但近年来, 这种教学方法也越来越多地被引入到了大学理科教育中^[4-6]。这里, 我们结合具体实例分析将讨论式教学法应用到物理化学课程的教学实践过程。

1 开展讨论式教学的课程背景与意义

物理化学的主要研究内容包括化学热力学、化学动力学和结构化学三大部分。其中, 化学热力学占有相当大的比重, 基本涵盖了热化学、化学平衡、相平衡、电化学、表面化学与胶体化学等多个章节。而热力学第一定律、第二定律及其应用是化学热力学的重要理论基础, 这部分内容学习的效果如何对后续课程的理解与掌握起着至关重要的作用。相对来说, 热力学第二定律不但是整个课程的教学

*通讯作者, Email: xuhai@jlu.edu.cn

重点,同时也是教学难点,很多学生学到这部分内容时都感觉很抽象,不好理解。这是由于热力学第二定律与热力学第一定律相比,状态函数的求算过程更为复杂,造成这个结果的原因之一是由于热力学第二定律的数学表达式(克劳修斯不等式)并非是一个等式,而等号只有在可逆过程中才适用。因此,在实际的计算中,往往要先确立变化过程的始、终态,再设计由始态到终态的可逆过程,进而根据可逆过程的性质计算出状态函数变化量。

然而,我们在多年的物理化学教学过程中发现,在开始学习热力学第二定律之前,使学生加深对可逆过程概念的理解,特别是对可逆过程功热转换关系的掌握是非常必要的。为此,我们在实际的教学过程中,在讲完热力学第一定律及其应用这一章时,通常要利用1学时左右的时间进行一次关于热力学可逆过程功、热转换关系问题的讨论。讨论中,由教师提出问题,让学生进行推导和论证,再由教师进行最后的总结和拓展。经过这次讨论,学生深刻理解了可逆过程的本质特征,熟练掌握了相关计算,这为后续课程的学习做了良好的知识储备和思维铺垫。

2 讨论式教学过程的具体实施

2.1 讨论命题的提出

热力学可逆过程的特征之一:若循着与过程原途径相反方向进行,可使系统和环境同时完全复原,整个过程系统和环境均无任何功和热的损耗。很多学生将这条结论理解为:只要系统经过一个可逆的循环过程,总的功和热都为零,因为系统和环境都完全复原了。而事实确实如此吗?当然不是!应当指出,此时我们尚没有讲到卡诺循环,以及由此引出的熵函数和克劳修斯不等式,因此我们需要设计一系列可逆过程组成可逆循环,通过实际的推演求算来证实结论的正确性,同时也要进一步熟悉各类可逆过程功、热和状态函数的计算过程。另外,通常涉及到的热力学可逆过程主要包括恒温可逆过程、恒压可逆过程、恒容可逆过程和绝热可逆过程,所以我们在设计讨论命题时应尽可能全面地涵盖这些内容,为此我们设计的讨论命题如下:

试分析下列理想气体的可逆循环过程各步和整个过程的 Q 、 W 、 ΔU 、 ΔH 是大于零、小于零,还是等于零?

可逆循环过程I:系统从状态1(p_1, V_1, T_1)经恒压可逆升温过程到达状态2(p_1, V_2, T_2),再经恒温可逆压缩过程到达状态3(p_2, V_1, T_2),最后经恒容可逆降温过程回到状态1(p_1, V_1, T_1);

可逆循环过程II:系统从状态4(p_4, V_4, T_4)经绝热可逆压缩过程到达状态5(p_5, V_5, T_5),再经恒温可逆膨胀过程到达状态6(p_4, V_6, T_5),最后经恒压可逆降温过程回到状态4(p_4, V_4, T_4)。

2.2 学生的讨论过程分析

首先,我们按每4-6名学生一组,将学生分成若干小组,分别进行小组内的讨论。要求学生对上述问题进行严密的推演论证,小组内的同学之间可以畅所欲言,但最终每个小组必须要形成统一的最终结论,并且要准确地回答以下问题:“系统经过一个可逆的循环过程,总的功和热是否为零?系统和环境是否都完全复原了?”

下面详细分析这两个可逆循环过程功、热和状态函数的变化情况。两个可逆循环过程的具体途径如图1所示。

2.2.1 可逆循环过程I

由于 $T_2 > T_1$,因此:

(1) 恒压可逆升温过程:

$$W_1 = -p_c(V_2 - V_1) = -p_1(V_2 - V_1) = -nR(T_2 - T_1) < 0$$

$$Q_1 = \Delta H_1 = nC_{p,m}(T_2 - T_1) > 0$$

$$\Delta U_1 = nC_{V,m}(T_2 - T_1) > 0$$

其中, $C_{p,m}$ 为摩尔恒压热容, $C_{V,m}$ 为摩尔恒容热容,对理想气体, $C_{p,m}$ 与 $C_{V,m}$ 都为常数,且 $C_{p,m} - C_{V,m} = R$ 。

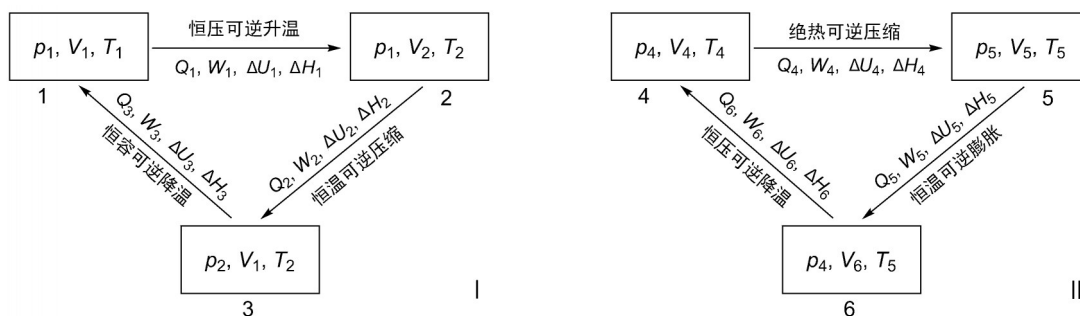


图1 可逆循环过程示意图

(2) 恒温可逆压缩过程:

$$\Delta U_2 = \Delta H_2 = 0$$

$$W_2 = -nRT_2 \ln \frac{V_1}{V_2} = -nRT_2 \ln \frac{p_1}{p_2} = -nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} > 0$$

$$Q_2 = \Delta U_2 - W_2 = -W_2 = nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} < 0$$

(3) 恒容可逆升温过程:

$$W_3 = -\int p_e dV = 0$$

$$Q_3 = \Delta U_3 = nC_{V,m}(T_1 - T_2) < 0$$

$$\Delta H_3 = nC_{p,m}(T_1 - T_2) < 0$$

(4) 整个可逆循环过程I:

$$\Delta U_1 = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 0$$

$$\Delta H_1 = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = 0$$

很明显, 对于循环过程, 系统的状态恢复到始态, 状态函数的改变值 ΔU 、 ΔH 都为零。下面我们接着讨论 Q 和 W 的情况:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_1 + Q_2 + Q_3 = nC_{p,m}(T_2 - T_1) + nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} + nC_{V,m}(T_1 - T_2) \\ &= n(C_{p,m} - C_{V,m})(T_2 - T_1) + nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} = nR(T_2 - T_1) + nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} \\ &= nR(T_2 - T_1 + T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}) \end{aligned}$$

令 $\frac{T_1}{T_2} = x$, 显然: $0 < x < 1$, $T_1 = xT_2$, 于是:

$$Q_1 = nR(T_2 - xT_2 + T_2 \ln x) = nRT_2(1 - x + \ln x)$$

又由于当 $x \neq 1$ 时, $\ln x < x - 1$, 因此:

$$Q_1 = nRT_2(1 - x + \ln x) < nRT_2(1 - x + x - 1) = 0$$

类似地, 可以证明:

$$W_1 = W_1 + W_2 + W_3 = -nR(T_2 - T_1) - nRT_2 \ln \frac{T_1}{T_2} + 0 = -nR(T_2 - T_1 + T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}) > 0$$

推演计算的结果表明, 对于可逆循环过程I, 系统对环境放出了热量($Q_1 < 0$), 环境对系统做了功($W_1 > 0$)。可见, 尽管系统完全复原了, 但环境并没有复原。另外, 由计算结果还得到 $Q_1 = -W_1$, 这也符合热力学第一定律的关系: $\Delta U_1 = Q_1 + W_1 = 0$ 。

2.2.2 可逆循环过程II

由于 $T_5 > T_4$, 因此:

(1) 绝热可逆压缩过程：

$$Q_4 = 0$$

$$W_4 = \Delta U_4 = nC_{V,m}(T_5 - T_4) > 0$$

$$\Delta H_4 = nC_{p,m}(T_5 - T_4) > 0$$

(2) 恒温可逆膨胀过程：

$$\Delta U_5 = \Delta H_5 = 0$$

$$W_5 = -nRT_5 \ln \frac{p_5}{p_4}$$

由于状态4到状态5为绝热可逆过程，因此根据绝热可逆过程方程得：

$$T_4^\gamma p_4^{1-\gamma} = T_5^\gamma p_5^{1-\gamma}$$

其中， $\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}$ ，称为热容商，并且 $\gamma > 1$ ，于是：

$$W_5 = -nRT_5 \ln \frac{p_5}{p_4} = -nRT_5 \ln \left(\frac{T_4}{T_5} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} < 0$$

$$Q_5 = \Delta U_5 - W_5 = -W_5 = \frac{\gamma}{1-\gamma} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} > 0$$

(3) 恒压可逆降温过程：

$$W_6 = -p_c(V_4 - V_6) = -p_4(V_4 - V_6) = -nR(T_4 - T_5) > 0$$

$$Q_6 = \Delta H_6 = nC_{p,m}(T_4 - T_5) < 0$$

$$\Delta U_6 = nC_{V,m}(T_4 - T_5) < 0$$

(4) 整个可逆循环过程II：

$$\Delta U_{II} = \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_6 = 0$$

$$\Delta H_{II} = \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6 = 0$$

同样，对于循环过程，状态函数的改变值 ΔU 、 ΔH 都为零。

$$\begin{aligned} W_{II} &= W_4 + W_5 + W_6 = nC_{V,m}(T_5 - T_4) + \frac{\gamma}{\gamma-1} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} - nR(T_4 - T_5) \\ &= n(C_{V,m} + R)(T_5 - T_4) + \frac{\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}}{\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} - 1} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} = nC_{p,m}(T_5 - T_4) + \frac{C_{p,m}}{C_{p,m} - C_{V,m}} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} \\ &= nC_{p,m}(T_5 - T_4) + nC_{p,m}T_5 \ln \frac{T_4}{T_5} = nC_{p,m}(T_5 - T_4 + T_5 \ln \frac{T_4}{T_5}) < 0 \\ Q_{II} &= Q_4 + Q_5 + Q_6 = 0 + \frac{\gamma}{1-\gamma} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} + nC_{p,m}(T_4 - T_5) \\ &= \frac{\frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}}{1 - \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} + nC_{p,m}(T_4 - T_5) = -\frac{C_{p,m}}{C_{p,m} - C_{V,m}} nRT_5 \ln \frac{T_4}{T_5} - nC_{p,m}(T_5 - T_4) \\ &= -nC_{p,m}T_5 \ln \frac{T_4}{T_5} - nC_{p,m}(T_5 - T_4) = -nC_{p,m}(T_5 - T_4 + T_5 \ln \frac{T_4}{T_5}) > 0 \end{aligned}$$

推演计算的结果表明，对于可逆循环过程II，系统从环境吸收了热量($Q_{II} > 0$)，并且对环境做了功($W_{II} < 0$)。与可逆循环过程I类似，系统复原的同时，环境并没有复原。同样，计算结果也证实了 $Q_{II} = -W_{II}$ ，符合热力学第一定律的关系： $\Delta U_{II} = Q_{II} + W_{II} = 0$ 。所不同的是，可逆循环过程I中环境对系统做了功，同时获得了热，而可逆循环过程II中却是系统吸收了环境的热，而对环境做了功。也就是说可逆循环过程I实现了功转换为热，而可逆循环过程II则实现了热转换为功。

2.3 教师的总结与拓展

在学生讨论结束后,教师根据学生的讨论结果进行分析和总结,给出确切的结论,并针对具体问题适当的拓展。

经过上面两个循环过程功、热和状态函数变化的推演,最终学生明确了两点:(1)即便是可逆循环过程,如果不沿着与原途径完全相反的可逆过程回到始态,功和热也不一定为零,系统完全复原的同时,环境没有完全复原;(2)经过循环过程,既可以实现功转变为热的转换过程,也可以实现热转变为功的转换过程。事实上,若循着与原途径完全相反的逆途径完成可逆循环过程,则功热的相互转变关系也正好相反。能够实现将热能转换为机械功的装置,实际上就是热机。对于上述的可逆循环过程,如果完成了热转换为功,其实这就是一种可逆热机。由可逆热机和可逆热机效率等相关内容,我们将引出一个新的状态函数——熵,并由此进一步推演出热力学第二定律的数学表达式——克劳修斯不等式。关于这部分内容,我们将在热力学第二定律一章进行详细的论述。

另外,在研究问题的方法上,我们也强调了使用图解法分析问题会更为直观和简单。例如对上面的可逆循环过程I和可逆循环过程II,可以在 p - V 图上清晰地看出系统做功的正负关系,如图2所示。在 p - V 图中,每个过程线下面覆盖的面积就是该过程的体积功。在横坐标方向(V 方向)从左向右进行的过程(体积增加的过程),为系统对外做功的过程, $W < 0$;相反,从右向左进行的过程为环境对系统做功的过程, $W > 0$ 。经过3个可逆过程以后,被3条过程线包围的部分即为总功,同样可以分析出可逆循环过程I的总功小于零,而可逆循环过程II的总功大于零。

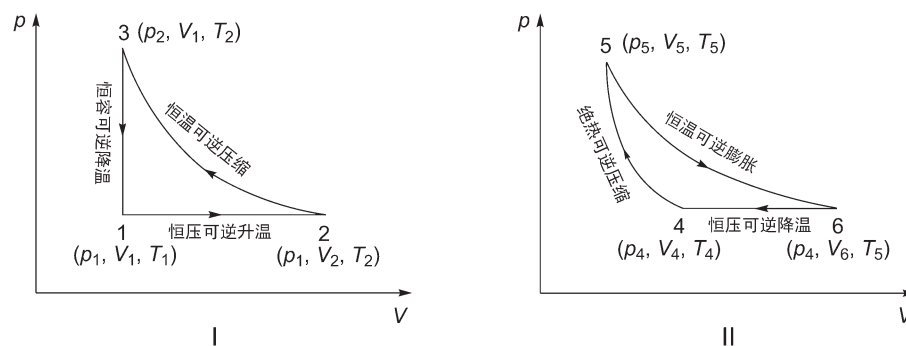


图2 可逆循环过程的 p - V 图

3 结 论

通过近两年所进行的讨论式教学法的实践,我们发现学生对热力学可逆过程本质的理解程度较以往明显提高,不但熟练掌握了可逆过程中关于功、热和状态函数的基本计算,同时也学会了使用 p - V 图分析状态变化过程,这对即将学习卡诺循环过程,进而理解卡诺定理、可逆过程热温商和熵函数,掌握克劳修斯不等式和热力学第二定律的应用等等做了非常有益的知识积累和方法铺垫,教学效果明显提高。

参 考 文 献

- [1] 张金学, 张宝歌. 中国高等教育, 2011, No. 23, 32.
- [2] 梁中贤. 中国高等教育, 2011, No. 15-16, 45.
- [3] 程勇翔. 课程教育研究, 2015, No. 4, 239.
- [4] 王美文, 白无暇. 化学教育, 2000, No. 7-8, 21.
- [5] 魏樟庆. 化学教育, 2003, No. 7-8, 33.
- [6] 王婧姝. 课程教育研究, 2014, No. 34, 147.