# 第三章 2 热力学第一定律

## 问题？

汽缸内有一定质量的气体，压缩气体的同时给汽缸加热。那么，气体内能的变化会比单一方式（做功或传热）更明显。这是为什么呢？

*U*1

*U*2

*F*

## 热力学第一定律

焦耳的实验一方面表明，以不同的方式对系统做功时，只要系统始末两个状态是确定的，做功的数量就是确定的；另一方面也向我们表明，为了改变系统的状态，做功和传热这两种方法是等价的。也就是说，一定数量的功与确定数量的热相对应。

在焦耳之前，人们还没有认识到做功与传热在改变系统内能方面是等价的。焦耳做实验的本意是要探究两者的关系。

我们在上节课已经知道，单纯地对系统做功（热力学系统的绝热过程），内能的变化量与功的关系是

Δ*U* = *W*

单纯地对系统传热，则内能的变化量与传递热量的关系是

Δ*U* = *Q*

既然做功与传热对改变系统的内能是等价的，那么，当外界既对系统做功又对系统传热时，内能的变化量就应该是

Δ*U* = *Q* ＋ *W*

也就是说，**一个热力学系统的内能变化量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功的和**。这个关系叫作**热力学第一定律**（first law of thermodynamics）。

可见，“问题”栏目中的汽缸内气体内能的变化量等于活塞对气体所做的功与通过加热向汽缸内气体传递的热量之和。

若用公式求出*Q*为负值，说明系统向外界传递热量；若求出*W*为负值，说明系统对外界做功。

### 思考与讨论

一定质量的气体，膨胀过程中是外界对气体做功还是气体对外界做功？如果膨胀时气体对外做的功是 135 J，同时向外放热 85 J，气体内能的变化量是多少？内能是增加了还是减少了？请你通过这个例子总结功和热量取正、负值的物理意义。

## 热力学第一定律的应用

在运用热力学第一定律解决问题时，需要首先确定研究对象。对于公式Δ*U*=*Q*＋*W*，我们可以这样理解：外界对系统做功有助于系统内能的增加，因此，外界对系统做功时，*W* 取正值；而系统对外界做功时，*W*取负值。同理，外界对系统传递热量有助于系统内能的增加，因此，外界对系统传递的热量*Q* 取正值；而系统向外界传递的热量*Q*就取负值。

### 【例题】

如图3.2–1，一台四冲程内燃机，活塞在压缩冲程某段时间内移动的距离为0.1 m，这段过程活塞对气体的压力逐渐增大，其做的功相当于2×103 N的恒力使活塞移动相同距离所做的功（图3.2–2甲）。内燃机工作时汽缸温度高于环境温度，该过程中压缩气体传递给汽缸的热量为25 J。

图 3.2–1

0.1 m

*F*

图 3.2–2

乙 做功冲程

甲 压缩冲程

0

2

*F*/(103 N)

*F*/(103 N)

9

0.1

0.1

*l*/m

*l*/m

0

（1）求上述压缩过程中气体内能的变化量。

（2）燃烧后的高压气体对活塞做功，气体推动活塞移动 0.1 m，其做的功相当于9×103 N 的恒力使活塞移动相同距离所做的功（图 3.2–2 乙），该做功过程气体传递给汽缸的热量为 30 J，求此做功过程气体内能的变化量。

**分析** 以汽缸内气体为研究对象，在第（1）问中，活塞压缩气体的过程是外界对系统做功，则外界对气体所做的功 *W*1 为正值；在第（2）问中，气体膨胀推动活塞的过程是系统对外界做功，则外界对气体所做的功 *W*2 为负值。在两种情况下，气体都把热量传递给了汽缸，都属于放热，因此外界向气体传递的热量 *Q*1 、*Q*2 均为负值。

解 （1）在压缩过程中，外界对气体做功，有

*W*1 = *F*1*l*1 = 2×103 ×0.1 J = 200 J

根据热力学第一定律，气体内能的变化量

Δ*U*1 = *W*1 + *Q*1 = 200 J − 25 J = 175 J

（2）在膨胀过程中，气体对外界做功，有

*W*2 = *F*2*l*2 = − 9×103 ×0.1 J = − 900 J

根据热力学第一定律，气体内能的变化量

Δ*U*2 = *W*2 + *Q*2 = − 900 J − 30 J = − 930 J

汽缸内气体在压缩过程中内能增加了 175 J，在膨胀做功过程中气体内能减少了930 J。

## 科学漫步

**探索热的本质**

热质说和热动说 对于“热是什么”，历史上有两种不同的观点。一种是热的物质说（热质说），另一种是热的运动说（热动说）。

培根、玻意耳、笛卡儿、胡克、牛顿、伯努利、罗蒙诺索夫等人根据摩擦生热等现象，认为热是粒子运动的表现，物体由于粒子的剧烈运动而发热。但在他们的时代，这种观点缺乏足够的实验证据。

与此对立的另一种看法是热质说。热质说认为，热是一种流质，名为热质，可以渗入一切物体，不生不灭，没有质量。一个物体是冷还是热，取决于其中所含热质的多少。热质说可以解释当时观察到的大部分热学现象：物体温度的变化是因为吸收、放出了热质，传热是热质的流动与传播，热膨胀是由于热质粒子之间的排斥，等等。

但是，热质说无法解释伦福德的炮筒镗孔实验。

伦福德的实验 英国科学家本杰明·汤普森（又名伦福德）在德国慕尼黑的兵工厂为炮筒镗孔（图3.2–3）时，发现钻头与钢铁的摩擦能产生大量的热。按照热质说，钻头越锋利，铁屑切得越小，它们能保存住的热质就越少，释放的热质就越多，用来冷却的水沸腾得也就越快。然而，伦福德注意到，在钻头已经变钝时照旧要产生大量的热。不但如此，他发现在钻孔加工中热量似乎是取之不尽的。

图 3.2–3 伦福德的炮筒镗孔实验

伦福德进行了反复的观察和实验，终于在1798 年公布了他的研究成果。他明确指出：在这些实验中被激发出来的热，除了把它看作“运动”之外，似乎很难看作其他任何东西。

然而，事情并不简单。伦福德的实验无法进行定量测量，因此他的实验的说服力大打折扣。到了19 世纪40 年代，英国物理学家焦耳以定量的实验为热动说的胜利画上了句号。

与伦福德同时代的英国化学家戴维，也通过实验否定了热质说。

## 练习与应用

1．用活塞压缩汽缸里的空气，对空气做了900 J的功，同时汽缸向外散热210 J，汽缸里空气的内能改变了多少？

2．如图3.2–4，在汽缸内活塞左边封闭着一定量的空气，压强与大气压相同。把汽缸和活塞固定，使汽缸内空气升高一定的温度，空气吸收的热量为*Q*1。如果让活塞可以自由滑动（活塞与汽缸间无摩擦、不漏气），也使汽缸内空气温度升高相同温度，其吸收的热量为*Q*2。

图 3.2–4

（1）*Q*1 和*Q*2 哪个大些？

（2）气体在定容下的比热容与在定压下的比热容为什么会有不同？

3．某风景区有一处约20层楼高的瀑布，甚为壮观。请估计：瀑布上、下水潭的水温因瀑布的机械能转化成内能而相差多少？水的比热容*c*为4.2×103 J/（kg·℃）。

4．奶牛的心脏停止跳动后，大约在1 h内体温由37.0 ℃降低到33.5 ℃。请你由此估算，在这种环境下饲养奶牛，要维持一个体重400 kg奶牛的内能不变，每天喂养奶牛的食物至少要能为它提供多少热量？计算时，可以认为奶牛体内绝大部分是水。水的比热容*c*为4.2×103 J/（kg·℃）。

# 第 2 节 热力学第一定律 教学建议

## 1．教学目标

（1）能以系统为研究对象，用综合分析的方法推导出热力学第一定律。

（2）能运用热力学第一定律解释和计算能量的转化、转移问题。

## 2．教材分析与教学建议

焦耳的实验结果表明，在系统状态发生改变时，只要始末状态确定了，做功的数量或者传热的数量就是确定的。所以，当外界既对系统做功又对系统传热时，内能的变化量就应该满足 Δ*U* = *W* + *Q*，这就是热力学第一定律的数学表达式。教科书又通过实例对表达式中物理量取值正负的意义进行了讨论。

本节教学要注意两个重点：一是在前一节学习的基础上运用综合归纳的方法得出热力学第一定律，所以，要注重归纳推理的方法教育；二是关于热力学第一定律的三个物理量正、负符号选取的问题，明确各物理量正、负符号的物理含义，即应该从系统分析的角度来确定其正、负符号。

### （1）问题引入

我们知道，汽缸内一定质量的气体在加热的情况下，内能会增加；或者在外界对其压缩做功的情况下，内能也会增加。这是上节课学习的内容，在复习的基础上进一步提出问题：如果同时采用两种方式，则气体内能增加的情况与只采用单一方式时有区别吗？这个问题的用意是探索在既有做功又有传热的一般过程中，气体内能的变化规律，引出对热力学第一定律的探究任务。

### （2）热力学第一定律

上一节内容表明，要使系统的热运动状态发生变化，既可以通过做功的方式，也可以通过传热的方式。而自然界实际发生的热力学过程往往是上述两种基本过程的综合，即系统既经历做功的过程，又由于存在温度差而与外界交换热量，所以，我们有必要将单纯做功过程和单纯传热过程中系统内能变化的定量表达式推广到一般情况，也就是归纳出普遍适用的热力学第一定律。

**教学片段**

**热力学第一定律的推导过程**

问题提出 单纯绝热过程，*Q* = 0 时，Δ*U* = *W*；而单纯绝热过程，*W* = 0 时，Δ*U* = *Q*。那么，如果有这样一个过程，外界既对系统做功 *W*，又对系统传热 *Q*，则这个过程中系统内能的变化量 Δ*U* 会多大？

科学推理 在这个过程中，系统既有因外界对其做功而改变的内能 Δ*U*1 = *W*，又有因外界对其传热而改变的内能 Δ*U*2 = *Q*。由于做功与传热对改变系统的内能是等价的，则系统实际发生的内能的变化量应该是 Δ*U* = Δ*U*1 + Δ*U*2 = *W* + *Q*。这就是热力学第一定律。

归纳总结 热力学第一定律的推导过程是一种典型的归纳推理过程。

在热力学第一定律 Δ*U* = *W* + *Q* 中，Δ*U* 是内能的变化量，*W* 表示外界对系统所做的功，*Q* 表示系统从外界吸收的热量。对于气体，要求学生明确，压缩气体时，外界对气体做功；气体膨胀时，气体对外界做功。对于正、负符号的认识，教学时应结合实例引导学生自主归纳总结。

**教学片段**

**热力学第一定律中物理量的正、负符号**

任务 我们知道，外界对系统做功有助于内能增加；外界向系统传递热量也有助于系统内能增加。若 Δ*U* > 0，表示内能增加，根据以上理解，请你拟定热力学第一定律 Δ*U* = *W* + *Q* 中各物理量的符号规则。

分析 我们可以把上述任务分解成以下几个问题来处理。

* 外界对系统做功、外界向系统传递热量，如何选取 *W* 和 *Q* 的正负？
* 系统对外界做功、系统向外界传递热量，如何选取 *W* 和 *Q* 的正负？
* 如果系统对外界做功 *W* 的同时，系统又向外界传递热量 *Q*，那么系统的内能如何变化？

归纳总结 系统内能增加为正，即 Δ*U* > 0；反之为负，即 Δ*U* < 0。外界对系统做功为正，即 *W* > 0；反之为负，即 *W* < 0。系统从外界吸热为正，即 *Q* > 0；反之为负，即 *Q* < 0。具体的符号用法如下表所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 物理量 | 取正号（+）的意义 | 取负号（−）的意义 |
| 功 *W* | 外界对系统做功 | 系统对外界做功 |
| 热量 *Q* | 系统吸热 | 系统放热 |
| 内能的变化量 Δ*U* | 内能增加 | 内能减少 |

### （3）热力学第一定律的应用

应用热力学第一定律的关键在于从问题背景信息的分析中判断出 Δ*U*、*W* 和 *Q* 这三个物理量的正、负符号。而它们的符号规则可以概括成：凡是内能增加或有助于内能增加的，Δ*U*、*W* 和 *Q* 都是正的；反之，凡是内能减少或有助于内能减少的，Δ*U*、*W* 和 *Q* 都是负的。

在应用热力学第一定律解决实际问题的教学中，教师应通过实例分析，引导学生进一步认识热力学第一定律的内容和含义，并在确定研究对象的基础上，让学生学会判断 Δ*U*、*W* 和 *Q* 这三个物理量的正、负符号。本节例题就是一个很好的应用样例，教学中，要结合教科书对例题的分析进行讲解。

## 3．“练习与应用”参考答案与提示

本节共 4 道习题。它们都紧紧围绕做功与传热在改变物体内能上的等效性与综合性而展开，并要求辨析热力学第一定律中的正、负符号问题。第 1 题是练习运用热力学第一定律的基础题。第 2 题让学生通过定性的分析，正确理解并比较定容下的比热容与定压下的比热容的差异。第 3、4 题以真实问题为情境，通过联系实际的计算，以及对所研究问题的提炼和简化，加深学生对理论知识的认识，同时激发学习兴趣。

1．690 J

提示：Δ*U* = *W* + *Q* = 900 J +（− 210）J = 690 J，即汽缸里空气的内能增加了 690 J。

2．（1）*Q*2 > *Q*1

（2）根据第（1）问的分析可知，定容下的比热容小于定压下的比热容。

提示：活塞与汽缸都固定不动时，气体的体积不变，没有做功过程发生，气体吸收的热量 *Q*1 全部用于增加气体的内能，即有 *Q* = Δ*U*。如果活塞可以自由滑动，温度升高，气体膨胀，会推动活塞向外运动，对外做功，当气体升高相同温度时，气体内能的增加量与前一个过程是相同的，也是 *Q*1，根据热力学第一定律，Δ*U* = *W* + *Q*2，由于 *W* < 0，所以，*Q*2 > *Q*1。

3．0.14 ℃

提示：假设从 20 层楼高处落下的水的重力势能全部转化为水的内能，每层楼高约为 3 m，则有*mgh* = Δ*U* = *cm*Δ*t*，故 Δ*t* = = ℃ = 0.14 ℃。

4．1.41×108 J

提示：要维持奶牛的内能不变，每小时至少要为它提供的热量 *Q*0 = *cm*Δ*t* = 4.2×103×400×（37.0 – 33.5）J = 5.88×106 J。故每天要为奶牛提供的能量 *Q* = 24*Q*0 = 5.88×106×24 J = 1.41×108 J。