

负能谱系统中“热”的自发传输规律 和“热-功”转化规律^①

邓 昭 镜

西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 具体分析了负能谱系统中“热”的自发传输规律和“热-功”转化规律. 负能谱中热的自发传输规律和“热-功”转化规律是与正能谱中“热”的自发传输规律、“热-功”转化规律彼此互补的, 例如: 在正能谱中的系统热量将自发地从高温流向低温, 而在负能谱中的系统热量将自发地由低温流向高温; 在正能谱中功可以无补偿地全部转化为热, 热不能无补偿地完全转化为功, 而在负能谱中热可以无补偿地完全转化为功, 功不能无补偿地全部转化为热.

关键词: 热的自发传输; 热-功转化; 负能谱系统

中图分类号: O414

文献标识码: A

在正能谱中“热”将自发地从高温热源流向低温热源, 功可以无补偿地全部转化为“热”, “热”不能无补偿地完全转化为功^[1]. 这些规律不仅是人们日常生活中十分熟悉的事实, 而且人们在正能谱热力学中从熵增加原理出发已严格地论证了这些规律. 然而在负能谱中“热”的自发传输和“热-功”转化规律却鲜为人知, 更谈不上如何从理论上去正确地认识这些规律. 为此, 本研究将详细地分析负能谱中“热”的传输规律与“热-功”转化规律.

1 负能谱中“热”的自发传输规律

在负能谱中“热”将自发地从低温流向高温. 设在负能谱中有一孤立系统由两个温度分别为 \tilde{T}_1, \tilde{T}_2 的“热”源组成, 并假定在这个孤立系统中当两“热”源彼此接触时, 有“热”量 $Q(Q > 0)$ 自发地从 \tilde{T}_1 热源流入 \tilde{T}_2 “热”源中, 现在证明: $\tilde{T}_1 < \tilde{T}_2$, 即热量 Q 从低温“热”源流向高温“热”源.

既然该孤立系统由 \tilde{T}_1, \tilde{T}_2 两“热”源组成, 根据负能谱中熵减原理的要求, 即孤立系统中的任何自发过程必将导致系统的总熵减少, 表示为^[2]

$$\Delta\tilde{S} = \Delta\tilde{S}_1 + \Delta\tilde{S}_2 < 0 \quad (1)$$

由于“热”量 Q 从 \tilde{T}_1 流出, 因此 \tilde{T}_1 “热”源的熵改变应表示为

$$\Delta\tilde{S}_1 = -\frac{Q}{\tilde{T}_1} \quad (2)$$

而 \tilde{T}_2 “热”源吸收“热”量 Q , 故 \tilde{T}_2 “热”源的熵改变应表示为

① 收稿日期: 2007-03-12

作者简介: 邓昭镜(1932-), 男, 湖北宜昌人, 教授, 主要从事凝聚态物理的研究.

$$\Delta\tilde{S}_2 = \frac{Q}{\tilde{T}_2} \quad (3)$$

于是由 \tilde{T}_1, \tilde{T}_2 两“热”源组成的孤立系统，其总熵减少应表示为

$$\Delta\tilde{S} = Q\left(\frac{1}{\tilde{T}_2} - \frac{1}{\tilde{T}_1}\right) < 0 \quad (4)$$

由此可得

$$\tilde{T}_1 < \tilde{T}_2, \text{ 即 } |\tilde{T}_1| > |\tilde{T}_2| \quad (5)$$

(5)式表明 \tilde{T}_2 是高温“热”源， \tilde{T}_1 是低温“热”源，热量 Q 从低温“热”源 \tilde{T}_1 自发地流向高温“热”源 \tilde{T}_2 。“热量自发地从低温‘热’源流向高温‘热’源”这个结论从负能谱中熵减少原理角度是易于证明的，但关键是如何从分子(或微粒)间相互作用的角度来具体认识负能谱中“热”的自发传输规律。

在负能谱中粒子处于负能态中，这时粒子的能量主要表现为负定的引力势能(其它能量，如简并能和各种无序动能都不能起支配作用)。粒子在负定的引力势能的作用下，对粒子必然要产生一种负定的引力张协强(即单位体积中平均的负定的引力势能密度)，或称为引力“负压”， $\tilde{P} \leq 0$ ^[3]。这个引力负压 \tilde{P} 和负温度都比例于粒子在负能态中的平均能量密度 $\langle \epsilon_i \rangle$ ($\langle \epsilon_i \rangle \leq 0$)，因此负温度 \tilde{T} 愈高，其负压强 \tilde{P} 也愈高。同时又因 \tilde{T}, \tilde{P} 都是负值，因此当 $\tilde{T}_2 > \tilde{T}_1, \tilde{P}_2 > \tilde{P}_1$ 时，必然有 $|\tilde{T}_2| < |\tilde{T}_1|, |\tilde{P}_2| < |\tilde{P}_1|$ 。这表明高温系统中粒子所受的引力负压的绝对值 $|\tilde{P}_2|$ 要小于低温系统中粒子所变的引力负压的绝对值 $|\tilde{P}_1|$ ，于是当高、低温系统通过可以自由移动的不可穿透的壁彼此接触时，在接触面两边压强差的作用下，接触壁必然要从高温区向低温区膨胀，令 ΔV 是高温区在接触处的体积增量， $(-\Delta V)$ 为低温区在接触处的体积增量(图1)。于是低、高温区因体积变更所作的功分别是

$$\tilde{P}_1(-\Delta V) = |\tilde{P}_1| \Delta V > 0 \quad (6)$$

$$\tilde{P}_2(\Delta V) = -|\tilde{P}_2| \Delta V \leq 0 \quad (6')$$

(6)式表明低温区引力负压作正功，消耗能量，故 $|\tilde{P}_1| \Delta V$ 表示低温区的输出功；(6')式表明高温区的引力负压 \tilde{P}_2 作负功，吸收能量， $-|\tilde{P}_2| \Delta V$ 则是高温区在膨胀过程中吸收的功。又由于 $|\tilde{P}_1| > |\tilde{P}_2|$ ，因此低温区引力负压除了克复高温区引力负压所必需消耗的功之外，还有一部分剩余功，即

$$(|\tilde{P}_1| - |\tilde{P}_2|) \Delta V > 0 \quad (7)$$

这部分剩余功恰是对除因体积膨胀所增加高温区的能量外还进一步用于改变高温区的宏观状态(如升高高温区的温度)所必需的能量，这种能量称为“热”，以 ΔQ 表示，即

$$\Delta Q = (|\tilde{P}_1| - |\tilde{P}_2|) \Delta V > 0 \quad (8)$$

注意这里由低温源输送到高温源的“热”是用于升高高温源的温度，也就是升高高温源的引力势能，因此由低温区向高温区输送能量的结果是提高高温区的有序化程度的“热”，故称为有序化“热”。

2 “热-功”转化规律

在负能谱中“热”可以无补偿地全部转化为功，功不能无补偿地完全转化为“热”。这个结论是负能谱中熵减少原理的必然结论^[4]。现在来证明这个结论，试考虑由高温热源 \tilde{T}_2 与低温热源 \tilde{T}_1 组成的热机。令热量 \tilde{Q}_2 从高温热源流出，同时令工作物质对外作功 \tilde{W} ，并将剩余的“热” \tilde{Q}_1 送入低温热源 \tilde{T}_1 中。另外高、低温热源又设计了直接接触机构，通过“热”传输方式将低温热源得到的“热”量 \tilde{Q}_1 重新送回高温热源中，这样一来热机循环的结果是高温热源只输出了热量 $\tilde{Q}'_2 = \tilde{Q}_2 - \tilde{Q}_1$ ，并将它全部转化为功 \tilde{W} ($\tilde{W} = \tilde{Q}'_2$)。因此

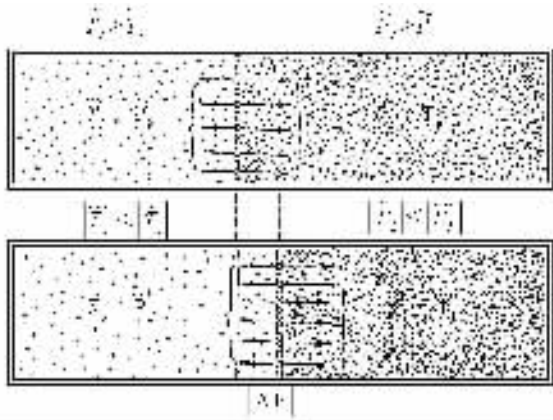


图1 高低温区接触时膨胀收缩过程示意

负能谱中“热”可以无补偿地完全转化为功(图 2).

如果反过来对热机输入功 \tilde{W} (图 3), 这时工作物质将从低温热源吸入热量 \tilde{Q}_1 , 同时将热量 $\tilde{Q}_2 = \tilde{W} + \tilde{Q}_1$, 送入高温热源中. 在这个循环中从低温热源输入的热量 \tilde{Q}_1 不能等于零, 否则热机不可能完成一个循环以实现非零功 \tilde{W} ($\tilde{W} \neq 0$) 的输出. 反之, 对于负能谱系统, 这里的功 \tilde{W} 却可以等于零, 因为低温热源可以通过热传输方式直接将热量 \tilde{Q}_1 输入高温热源中. 这就是说在负能谱中任何作功(功的输入或输出)都不可避免地伴随着热量的转移, 而热量的转移却不一定必需伴随有功的输入或输出. 这一点还可以更一般地分析如下: 设有一个处于周围环境中的系统(图 4), 假定最初 A 和它的环境具有共同温度 \tilde{T}_0 , 现在对系统 A 输入功 \tilde{W} , 其结果使系统 A 的能量升高, 也即使系统 A 中粒子的引力势能升高, 从而升高了系统 A 的温度, 设系统 A 的温度 \tilde{T}_0 因此升高到 \tilde{T} ($\tilde{T} > \tilde{T}_0$), 这时仍处于较低温度 \tilde{T}_0 的周围环境必将自发地向系统 A 输入热量 \tilde{Q} , 而热量 \tilde{Q} 的输入将导致 A 中粒子的引力势能进一步升高, 引起系统略为膨胀, 周围环境略为收缩, 就是说系统在这个过程中将从周围环境中吸入的热 $\tilde{Q} = (|\tilde{P}_0| - |\tilde{P}|)\Delta V$, 这里 \tilde{P}_0 是周围环境中的压强, \tilde{P} 是系统 A 的压强. 同样, 若令系统 A 对外界输出功 \tilde{W}' , 必然会降低系统 A 的温度, 使它的温度 $\tilde{T}' < \tilde{T}_0$. 这时系统 A 必然会自发地向周围环境输出热量 \tilde{Q}' . 而由于热量 \tilde{Q}' 的输出, 将进一步降低系统 A 的温度, 引起系统 A 略微收缩, 使周围环境略为膨胀, 因此系统在此过程中将向周围环境输出热 $\tilde{Q}' = (|\tilde{P}'| - |\tilde{P}|)\Delta V$, 这里 \tilde{P}' 是周围环境中的压强, \tilde{P} 是系统 A 的压强. 由此可见, 对系统 A 的任何功 \tilde{W} 的输入都必然伴随着周围环境对系统 A 的附加热 \tilde{Q} 的输入, 而系统 A 对外界任何功 \tilde{W}' 的输出, 都必然会伴随着系统 A 对周围环境进行的附加热 \tilde{Q}' 的输出. 因此, 在负能谱中任何作功都不能无补偿地全部转化为热, 而热却可以无补偿地全部转化为功.

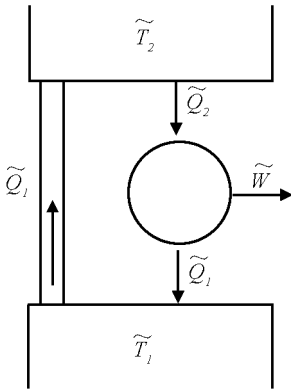


图 2 “热”可以无补偿地完全转化为功

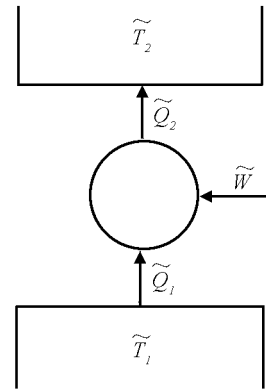


图 3 功不能无补偿地全部转化为“热”

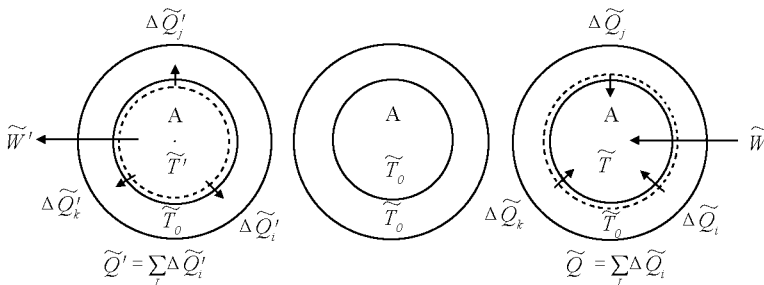


图 4 系统 A 和周围环境的“热-功”转化

总之, 可以看出正、负能谱中“热”的自发传输规律与“热-功”转化规律是完全互补的. 在正能谱中“热”可以自发地从高温流向低温, 功可以无补偿地完全转化为“热”, 而“热”却不能无补偿地全部转化为功. 但在负能谱中“热”可以自发地由低温流向高温, “热”可以无补偿地完全转化为功, 功不能无补偿地全部转化为“热”. 在正能谱中一个处于非平衡的孤立系统, 必将通过“热”的自发传输消除系统内部各部分间

的温度差，最终达到一个由某一温度标示的“热寂”式的熵极大态。而在负能谱中，一个处于非平衡态的孤立系统，必将通过“热”的自发传输，不断地扩大系统内各部分间的温度差，也即扩大系统中各部分间的密度差，使得密度愈高，质量愈大的区域愈来愈长大，密度小，质量小的区域愈来愈小，直到消失，最终达到物质的最大聚集的黑洞式的熵极小态。

参考文献：

- [1] 汪志诚. 热力学统计物理[M]. 第 2 版. 北京：人民教育出版社，1980：59—61.
- [2] 邓昭镜. 黑洞熵的演化规律与热力学第三定律[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2006，31(3)：32—38.
- [3] 徐锡中. 实用物态方程理论导引[M]. 北京：科学出版社，1986：119—120.
- [4] 邓昭镜. 系统的能谱、温度和熵的演化[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2002，27(5)：794—800.

The Law of Heat Transfer and the Law of Heat-Work Conversion

DENG Zhao-jing

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The law of heat spontaneous transfer and the law of heat-work conversion are correspondence between positive energy spectrum (PES) and negative energy spectrum (NES). In PES systems, the heat can be spontaneously transferred from high temperature to low temperature, and the work can be completely converted into heat, but the heat is impossible completely converted into work without any compensation. In NES systems, the heat can be spontaneously transferred from low temperature into high temperature, and the heat can be completely converted into work, but the work is impossible completely converted into heat without any compensation. This paper, the law of heat transfer and the law of heat-work conversion in NES systems are demonstrated into detail.

Key words: the heat spontaneous transfer; the heat-work conversion; negative energy spectrum

责任编辑 潘春燕