

# 关于如何理解物理量熵的若干思考

吴国玠<sup>1</sup>, 皇甫泉生<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

**摘要:** 热力学作为物理学最难理解的一门分支学科, 其改革与创新至关重要。通过热力学与电学之间的类比, 引入了基于直觉认知的热荷和热荷量的概念, 由此得出**熵就是热荷量**这一简单而明确的定义。其结果是, 熵(热荷量)与热量这两个不同性质的物理量得以清晰地区分开来(前者是一种能量载体, 而后者则是能量本身), 从而不仅消除了热力学的抽象性, 而且还消除了熵这个物理量之前在概念上的模糊性。以全新的面貌出现的热力学不但有利于我国广大科研和工程技术人员理解、掌握、应用和创新, 有利于提升我国的科技软实力, 而且也有利于大、中学生的物理教学和热力学知识的普及。

**关键词:** 熵; 热荷; 热荷量; 卡尔斯鲁厄物理教程; 物质型物理量; 类比

中图分类号: O 055 文献标志码: A

## Considerations on how to Understand the Physical Quantity Entropy

WU Guobin<sup>1</sup>, HUANGFU Quansheng<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** It is critical for thermodynamics, the most difficult branch of physics, to be reformed and updated. Through the analogy between thermodynamics and electricity, the concepts of thermal charge and quantity of thermal charge were introduced in an intuitive way, from which a simple yet explicit definition was derived——**entropy is the quantity of thermal charge**. As a result, the two quantities, i.e. entropy (quantity of thermal charge) and the quantity of heat can be clearly distinguished. The former is an energy carrier while the latter is in fact energy itself. This eliminates not only the abstractness of thermodynamics but also the fuzziness of the original concept of entropy. These new ideas for thermodynamics are expected to make it easier for our scientists and engineers to understand, apply and innovate, and therefore to enhance China's soft power in science and technology. Also, it should be beneficial to our physics teaching in both universities and high schools, as well as to the popularization of thermodynamic knowledge.

**Keywords:** entropy; thermal charge; quantity of thermal charge; Karlsruhe Physics Course (KPK); substance-like quantity; analogy

热力学是现代科学技术最重要的基础理论之一。事实上,目前在解释自然现象、进行科学实验和理论研究、开发新技术新产品,以及设计制造现代机器设备和技术装置等各个方面,热力学所涉及的范围已经超过力学。热力学不仅与人类生存环境和条件息息相关,而且它的应用几乎无处不在。除了能源动力、冶金、石油及天然气、食品、轻工、纺织、化工、生物医药、军事、环保、交通和建筑建材等传统工业领域外,热力学还在新能源、新材料、新医药、微电子、空间技术、海洋技术、核应用技术、航空航天发动机、生命科学、现代农业技术和尖端制造技术等高新技术领域中发挥着至关重要的作用。

然而,与物理学其他各分支学科相比,热力学被普遍认为是一门艰深难学的学科。热力学所包含的诸多抽象概念如熵、焓、自由能、态函数、循环和可逆性等,增加了人们理解这门学科的难度。在这些概念当中,熵是最难理解的物理量之一。科学史告诉我们,热力学的初期发展过程显现出某种独立特行的色彩。它与当时发展较为成熟的力学和电学等学科几乎没有什么交集,因而无法从这些学科获得有力的支撑或借鉴,其概念亦难以采用与其他学科进行类比的方法来加以阐明,结果难免遭遇较多曲折,走过较多弯路,形成所谓的历史包袱<sup>[1]</sup>。由于这些曲折或历史包袱长期沿袭下来而得不到纠正和清理,致使这门学科变得愈加艰涩费解,不易掌握。不少工程技术人员在谈及热力学时,坦承自己尽管已工作多年,但对熵和焓等概念仍有困惑之感。在他们当中流传着“伤(熵)透脑筋”、“含(焓)含糊”等调侃之语。很明显,这种状况对于正确理解和运用热力学的理论知识,对于各类新技术的攻关和新产品的研制,以及大学和中学物理教学都会产生不利影响。

由此可知,改革热力学这门学科,甩掉它所背负的历史包袱,重组其概念体系,理顺其内部结构,使之成为一门简明易学的学科是我国科技发展和物理教学改革的迫切需求,具有重大的现实意义。可以预料,这门基础学科的改革如果获得成功,它所产生出的巨大威力和深远影响必将不可估量。因为这一改革不仅将有利于我国广大科研和工程技术人员牢固掌握并熟练运用这门学科进行创新,有利于提高我国总体科技水平和国家的软实力,而且有利于物理教学,尤其有利于

提高我国高校目前相对薄弱的基础理论教学和研究水平。我们相信,只要不断增强创新意识,及时转变观念,在我国广大物理工作者的共同努力下,一定会迅速取得这项改革的成功。

## 1 热力学的改革与创新

1972年,德国物理学家Job博士在他的著作《新概念热力学(中译本)》<sup>[2]</sup>中提出将熵直接理解为热(entropy as heat)。另一位德国物理学家Herrmann教授在他主编的《卡尔斯鲁厄物理教程》<sup>[3]</sup>(Der Karlsruhe Physikkurs, KPK)中指出,熵就是人们在日常生活中所称呼的“热”或“热量”,它的值表示物体所含热的数量,并且将熵与温度一起选为热力学的中心物理量。对于传统热力学而言,如此解释熵的含义或给出熵的补充定义,无疑是一项重大的创新。经过数十年的不断实践和完善,KPK热力学目前已经站稳了脚跟,从而为热力学的改革打开了一扇大门。KPK物理教程的基本特点之一是:在物理学的各个分支学科中分别选定一对中心物理量。这些成对的中心物理量均由一个广延量和一个强度量所组成。例如,动量和速度是力学的中心物理量;电荷量和电势是电学的中心物理量;而熵和温度则是热力学的中心物理量<sup>[4]</sup>。然后,围绕着各自的中心物理量逐步展开分支学科的具体内容,这样不仅能使其层次分明,概念体系简洁明了,结构布局愈趋合理,阐述和分析论证更加通俗易懂,而且还有利于在不同的分支学科之间开展类比,即在展现其间共性的同时,保持并突出各自的个性,从而加深对物理学知识的理解和掌握。表1所示为物理学主要分支学科之间的类比。不难看出,位于第二列的广延量(亦称物质型物理量<sup>[5-6]</sup>)在类比中发挥着先导作用。这就是说,按照KPK的理念,每门学科的建构、阐述和学习顺序须从这些量开始,即:力学应从动量开始;电学应从电荷量开始;热学则应从熵开始。此处首先对KPK热力学作一简单扼要的介绍。

表1 物理学主要分支学科之间的类比

Tab.1 Analogy between major branches of physics

分支学科	广延量	强度量	流强度	能流
电学	电荷量 $Q$	电势 $\varphi$	电流 $I=dQ/dt$	$P=qI$
力学	动量 $p$	速度 $v$	动量流 $F=dp/dt$	$P=vF$
热学	熵 $S$	温度 $T$	熵流 $I_S=dS/dt$	$P=TI_S$

## 2 KPK 热力学概要

### 2.1 熵与温度——中心物理量

KPK 热力学明确指出, 对于一个与外界既有能量交换, 又有物质交换的实际热力学系统而言, 用熵和温度这两个中心物理量来描述热运动及其规律十分有效而且简洁明了。熵是物质的一种性质, 它就是人们在日常生活中所称呼的“热”或“热量”。在有些文献中也采用另一种类似的说法: 熵就是人们在日常生活中所说的“热量”(quantity of heat), 简称“热”(heat)<sup>[7]</sup>。假如有两只与外界热绝缘的杯子, 其中 A 杯盛有热水, B 杯则是空的。若将 A 杯中的一半水倒入 B 杯, 那么两只杯子中的水温显然与原来 A 杯中的水温相同。此时 A 杯中的水尽管减少了一半, 但它的温度并没有降低。然而, 由于水被平分到两只杯子中, A 杯中的水所含的熵与 B 杯中水所含的熵是相等的, 都是原来 A 杯中的水所含熵值的二分之一, 即熵值也被平分了。由此可知, 温度是一个表示物体冷热状态特性的物理量(强度量), 与物体的质量大小无关, 而熵则是一个表示物体含热多少的物质型物理量(广延量), 与物体的质量大小有关。简言之, 当其他条件相同时, 物体的温度越高, 它所含有的熵就越多; 物体的质量越大, 它所含有的熵就越多。事实上, 物体所含熵的多少不仅取决于它的温度和质量, 而且还与其组成材料有关, 具体数据可以查阅有关参数表<sup>[3]</sup>。

### 2.2 温差是熵流的驱动力

与其他物质型物理量一样, 熵也占据一定的空间区域并能在空间内流动, 形成熵流。在这里, 有必要在电学与热力学之间进行一下类比: 电势差是电流的驱动力; 温差则是熵流的驱动力。电势差一旦消失, 电流就会停止; 温差一旦消失, 熵流也会停止(达到热平衡)。与电荷自发地从高电势处流向低电势处的情况相似, 熵总是自发地从高温处流向低温处。当然熵也可以改变其自然流向从低温处流向高温处, 或者在没有熵流的地方产生熵流, 但这种非自发过程需要依靠像热泵那样的装置(电学中的相应装置是电池和发电机)来完成。为了描述熵流流动的快慢即熵流的大小, 需要引入一个类似于电学中电流强度的重要物理量——熵流强度。设在时间间隔  $\Delta t$  内流

过物体横截面的熵为  $\Delta S$ , 那么在单位时间间隔内流过该截面的熵就被定义为熵流强度  $I_S = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ , 其瞬时值为

$$I_S = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

熵流强度的国际计量单位是“卡诺/秒”, 符号为 Ct/s。与电流强度常常简称为电流一样, 熵流强度也可简称为熵流。此外, 与影响电流强度的因素类似, 影响熵流强度的因素有温差、热导体的长度、横截面积, 以及热导体的组成材料。

$$I_S = \sigma_S A \frac{\Delta T}{d} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_S$  为热导体材料的导熵率;  $A$  为热导体的横截面积;  $\Delta T$  为温差(绝对温度或热力学温度);  $d$  为热导体的长度。电荷的流动有两种不同形式: 电荷在导体中流动时形成的传导电流, 以及由带电体运动而形成的运流电流。熵的流动也具有类似的不同形式, 除了热传导方式以外, 另一种较为普遍的熵输运方式就是对流熵输运(简称对流), 即由携带熵的物体运动而形成的熵流。对流熵输运不需要温差作为驱动力, 流动的液体或气体本身就是熵的载体。此外, 熵还可以通过辐射来传输。

### 2.3 熵是能量载体

与其他物质型物理量一样, 熵也是能量载体。大家知道, 在任何有电流(电荷流动)的地方, 必然有能量流过。类似地, 在任何有熵流过的地方, 也必然有能量流过。换句话说, 任何熵流总是与能流相伴。那么, 这两股流之间存在着什么样的联系呢? 大家知道, 能流与电流的关系是

$$P = \Delta\varphi I$$

式中:  $P$  为能流强度, 即单位时间内流过的能量, 亦称功率;  $I$  为电流强度;  $\Delta\varphi$  为电势差。与此类似, 能流与熵流的关系为

$$P = \Delta T I_S$$

由此可知, 当温差保持恒定时, 能流强度与熵流强度成正比, 而具有相同强度的两股熵流在不同的温差下可以承载不同数量的能量。实际上, 若将上式展开为两项, 则其中每一项都代表着不同温度下的能流强度, 一般可以记为<sup>[3]</sup>

$$P = T I_S \quad (3)$$

式(3)更加直接地表明, 熵流运载多少能量的能力取决于其温度的高低。

## 2.4 熵的产生和熵源

首先将熵与其他几个物质型物理量能量、动量和电荷量作一个简单的比较。众所周知,在一定条件下,一个物体的能量是守恒的。如果物体增加或减少了某些能量,那么这部分能量一定是通过与其他物体相互作用而转移进来或转移出去的。能量既不能凭空产生,也不能被消灭。对能量得出的这个结论也同样适用于动量和电荷量。换言之,这两个量再加上另一个物质型物理量——质量都服从守恒定律。然而,熵虽然也是物质型物理量,但它却并不服从守恒定律,而是服从所谓的半守恒定律:熵能够产生,但不能消灭。熵产生的主要途径或过程包括机械摩擦、接通电流和化学反应(含生化反应)等。这些过程实际上都可以归结为某种“流”与“阻力”之间产生的“摩擦”而导致的熵产生。

熵的产生时时刻刻都在我们周围的无数个实际过程中进行着。常见的有人和动物体内的生化反应、各种各样的燃烧现象、各类机器设备运行中的电流与电阻之间以及不同机器零件之间所产生的“摩擦”等等。这些现象或过程都是熵产生的来源。典型的人工熵源包括化石燃料的燃烧和核裂变,这些熵源所产生的熵被大量用来驱动各类热机,自然界中也有许多熵源。目前世界各国正在努力开发利用自然界中处于较高温度的熵源,其中最常用最环保的开发途径是利用太阳光和利用地热来获得熵。

## 2.5 两个熵是同一个物理量

熵(entropy)的概念和数学表达式由德国物理学家克劳修斯于1865年首次提出。1923年,德国科学家普朗克来华讲学时用到了entropy一词。我国物理学家胡刚复教授在翻译时,把“商”字加上火旁来意译这个英文词,创造了“熵”这个汉字,因为熵的表达式中含有热量 $Q$ 除以温度 $T$ 的商数。事实上,KPK热力学中的熵与传统热力学中由克劳修斯所定义的熵是同一个物理量,只是视角不同而已。其详细证明和说明可参看有关文献[2,8],在这里,仅作一简略证明。

现将克劳修斯定义的熵标记为 $S_{Cl}$ ,而KPK热力学中的熵则标记为 $S$ 。根据式(3),熵流所携带的能量为

$$P = T I_S$$

或改写为

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt}$$

式中: $E$ 为能量; $T$ 为物质的热力学温度。由此可得

$$dE = T \cdot dS \quad \text{或} \quad dS = \frac{1}{T} dE$$

积分后得到

$$\Delta S = \int_r dS = \int_r \frac{dE}{T}$$

式中的符号“r”是英文词reversible的缩写,表示热在传输过程中所引起的变化是可逆的。当物体吸收一份热量 $\delta Q$ 时,它的能量相应地增加了 $dE$ (由于 $Q$ 是过程量而非状态量,所以此处须用 $\delta Q$ 来代替 $dQ$ )。根据能量守恒原理, $\delta Q$ 和 $dE$ 必定具有相同的数值,尽管它们并不是同类量。所以得到

$$\int_r \frac{dE}{T} = \int_r \frac{\delta Q}{T}$$

容易看出,上式左边为KPK热力学中熵的增值 $\Delta S$ ,右边则为克劳修斯熵的增值 $\Delta S_{Cl}$ ,即

$$\Delta S = \Delta S_{Cl} \quad (4)$$

如果恰当地选择熵的零点,那么这两个熵在数值上就会相等。实际上,这也正是为什么KPK热力学中仍然使用传统热力学中“熵”这一术语的原因,因为它们虽然视角不同,但所描述的实际上是同一个物理量。

## 3 关于熵的几点思考

在KPK热力学中,由于将熵的概念建立在对热的直觉感知的基础之上,致使其概念体系和内部结构有机会重新加以整理并从总体上得到简化。经过长期实践,KPK热力学如今已基本定型。改革后的热力学甩掉了许多抽象概念和历史包袱,难度大为降低,以至于连中学生都可以学习。事实上,自1990年开始,德国部分大学和中学一直在直接使用KPK物理教程,或在自编的教材中部分引用其概念和内容,尤其是后者的数量始终在不断扩大。作者有幸于2010年在一所德国中学里观摩了一堂直接使用KPK热力学教材的物理课,深感将其引入我国的必要性和迫切性。实际上,这也是我国所有曾经涉足KPK物理学研究和引进的人员的共识。

然而,由于东西方文化之间的差异以及德汉两种语言在语境方面存在的区别,在研究KPK物理学的过程中,大家普遍感到理解热力学要比理

解力学和电学等其他分支学科更加困难。人们刚刚从克劳修斯抽象的熵定义中走出来, 庆幸熵有了更为具体的含义, 但却似乎又遇到了新的障碍, 甚至于被挡住, 出现止步不前的现象。问题的起因是, KPK里“熵就是人们在日常生活中所称呼的热量或简称热”中的“热量或热”, 与传统热力学中的“热量或热”不属于同一类物理量。大家知道, 熵并非一种能量形式, 它不是一个能量型的物理量, 然而KPK热力学中的熵却直接与原来属于能量概念范畴的物理量热量(简称热)等同起来, 由此发生了冲突, 引起了混淆。所以解决这个问题的关键在于如何才能清晰地区分开这两种不同的“热”, 或在于如何才能真正解释清楚KPK中的熵这个物理量。为了避免产生冲突或混淆, Job博士在其著作中曾采用标注符号的方法来区分传统热力学和KPK热力学中的“热”: 在述及前者时使用上标“·”, 即“热<sup>·</sup>”; 在述及后者时则使用上标“\*”, 即“热<sup>\*</sup>”<sup>[2]</sup>。不过, 这样的处理方式显然只能视为一种权宜之计, 不仅使用起来不方便, 而且并不能真正解决问题。要想切实地解决这个问题, 作者认为还是应该从文字和概念上着手去区分。这就是我们的第一个基本思考点。那么, 究竟应该从哪一方面着手比较合适呢? 具体地说, 是在传统的“热”概念上做文章好呢, 还是在KPK中的“热”概念上做文章好?

众所周知, “热量”一词不仅在传统热力学中, 而且在汉语语境中, 都是指能量的一种形式(热能), 即使在日常生活中也有许多例子。例如, 人们普遍认为食物会产生热量, 即产生能量, 各种食品包装盒上的热量指标“卡路里(卡)”就是一个能量单位, 而各类教科书中有关“热功当量”的内容更加强化了热量与能量之间的直接联系, 明确了热量就是能量的一种形式。总而言之, 热量或热就是能量的观念已长期流传、深入人心、根深蒂固, 难以改变。这就意味着, 传统的观念还是以保持原状为妥, 我们只能从KPK中的“热”入手解决。这是我们的第二点基本思考。但在改革的方向确定之后, 我们感到仍有必要进行其他方面的一些思考。首先, 在KPK热力学中“熵就是人们在日常生活中所称呼的热量或热”这样的提法本身, 如果作为定义似尚欠严密。因为仔细推敲起来, 它所覆盖的涵义过于宽泛而且模糊, 不够精准, 需要加以改进。德国物理学家们的另一种解释是, KPK中的熵就

是门外汉心目中的“热”<sup>[8]</sup>。所谓的门外汉应该是指那些没有学过物理学, 没有能量概念的普通人。普通人根据直觉或日常生活经验, 认为“热”是这样的一种“东西”: 它可以从壁炉或电加热器里产生, 并在加热后的房间里保存, 而且还能从打开的窗户里随空气流出。然而“门外汉心目中的热”这种提法本身就含糊不清, 更加不适合作为一个物理量的定义。因此我们必须在熵的定义方面有所突破。这是我们的第三点基本思考。接下来的一点思考是, 我们能否从历史上寻找到问题的解决之道? 前面我们曾提到, 热力学的发展初期由于历史原因难以从当时发展较为成熟的力学和电学等学科获得有力的支撑或借鉴, 其概念亦未能采用与其他学科进行类比的方法来加以阐明。既然我们已经意识到当时曾经错过了历史机遇期, 那么现在何不“亡羊补牢”, 设法弥补回来呢? 实际上在前面的讨论中, 我们已经在电学与热力学之间进行过多次类比, 这表明二者之间有着很强的可类比性。有鉴于此, 我们不妨再次使用一下类比这个工具, 尝试从源头上, 即在电荷量与熵之间作一次类比。

## 4 热荷与热荷量

首先借鉴一下电荷(electric charge)这个名称, 让我们将人们在日常生活中直接感受到的那个既可以产生、保存, 又可以流走的“热”称作热荷(thermal charge)。与电荷一样, 热荷也是有多少的, 可以进行量化, 它的量就称作热荷量, 类似于电学中电荷量的定义。这样, KPK热力学中原来的定义式陈述“熵就是人们在日常生活中所称呼的热量或热”就可以直接改为“熵就是热荷的量, 即热荷量”这样的简单定义。如果我们将前面表1中的力学分支去掉并略作修改, 就可以得到一张热力学与电学之间的类比表, 如表2所示。现在, 我们可在表中位于第二列的两个物质型物理量电荷量与热荷量(熵)之间进行一系列的类比。大家知道, 电荷是物质的一种物理性质。带有电荷的物质称为带电物质。物体所携带的电荷越多, 它的电势就越高; 反之, 则电势越低。电荷本身并非物质, 却总是作为一种负荷依附在物质粒子身上。在自然界中没有能够脱离物质而单独存在的电荷。人们有时将带电粒子称作电荷, 但电荷本身其实并非“粒子”, 只是人们常将它想像成粒子以方便描述。电荷可以量化, 电



荷的量称为电荷量(quantity of electric charge)。电荷量是物质型物理量,是一种能量载体。在国际单位制里,电荷量的符号是 $Q$ ,单位是库仑(C)。类似地,热荷也是物质的一种物理性质。物体所携带的热荷越多,它的温度就越高;反之,则温度越低。热荷本身并非物质,它总是作为一种负荷依附在物质身上。在自然界中没有能够脱离物质而单独存在的热荷。热荷可以量化,热荷的量称为热荷量(quantity of thermal charge)。就像一个物体所带电的多少可用电量来表示一样,物体所含热的多少可用热荷量来表示。热荷量也是物质型物理量,而且也是一种能量载体。在国际单位制里,热荷量(熵)的符号是 $S$ ,单位是卡诺,用字母 Ct 表示。处于常温下的 $1\text{ cm}^3$ 的水约含有4 Ct 的热荷量<sup>[3]</sup>。

表2 热力学与电学之间的类比

Tab.2 Analogy between thermodynamics and electricity

分支学科	广延量	强度量	流强度	能流
电学	电荷量 $Q$	电势 $\phi$	电流 $I=dQ/dt$	$P=\phi I$
热力学	热荷量(熵) $S$	温度 $T$	熵流 $I_S=dS/dt$	$P=TI_S$

不难看出,在引入热荷和热荷量的概念之后,热力学与电学之间的类比更加全面深入,凸显出更多共性。更为重要的是,热荷量与热量这两个完全不同的物理量现在可以清晰地区分开来了。换句话说,对于前面提到的如何区分传统热力学和 KPK 热力学中两种不同的“热”的问题,我们舍弃了采用标注符号的方法,成功地提出了一种从文字概念上加以区分的解决方案,从而为热力学的改革扫清了一大障碍。至此,改革后的热力学不但消除了抽象性,而且还消除了原来的熵概念的模糊性,真正成为了一门通俗易懂的学科,有望在我国科研和工程技术界里得到广泛应用,在高校里得到深入研究,在中学里得到全面普及。

值得一提的是,由于热荷和熵(热荷量)的概念有所不同,所以在具体使用时应注意其间的区别。虽然在许多情况下二者可以混用,例如,“熵产生”与“热荷产生”,“熵的总量”与“热荷总量”的意思基本相同,但在有些场合下二者不宜混用,例如,“熵总是自发地从高温处流向低温处”宜改为“热荷总是自发地从高温处流向低温处”;“热泵能把熵从低温处输送到高温处”宜改为“热泵能把热荷从低温处输送到高温

处”,以使这些陈述更加精确。在进行类比时,人们往往会将关注的重点放在不同分支学科之间的普遍性或共性上。不过与此同时,我们还必须牢记它们各自的特殊性或个性。因为只有这样,类比才真正具有实际意义。更加确切地说,对于事物之间的共性,研究得越充分越透彻,它们各自的个性才会越加清楚地凸显出来。熵(热荷量)与电荷量尽管都是物质型物理量,都是能量载体,有着不少相似之处或共性,但它们毕竟是两个截然不同的物理量,各具自身的特点。例如,电荷有正有负,电荷量与质量一样是一个守恒的物理量;而熵只有正值(包含0),没有负值,而且不是一个守恒量,它一旦产生,就不能消灭。事实上,正是这些不同的个性,展示出了事物的多样性,构成了千姿百态的美丽世界。

## 5 回顾历史——热质说的辉煌与衰落

为了进一步认清引入热荷和热荷量概念的重要意义,作者觉得有必要在这里简略地回顾一下历史。科学发展史告诉我们,在19世纪初叶之前的一百多年里曾出现过一种对热的本性进行解释的学说,即所谓的热质说。它将“热”视为一种既没有质量,也没有体积,可以在物体中自由流动的物质,称为“热质”。作为一种物质,它既无法产生也无法消灭,符合物质不灭定律或守恒定律。含热质越多的物体,温度就越高,所以物体温度的高低取决于其热质的含量。它还认为热质可以渗入一切物体之中,热质会从温度高的物体向温度低的物体流动。放在茶几上的一杯热茶逐渐冷却至室温,是由于杯中所含的热质在杯内外温差的作用下自动地流到温度较低的周围环境中去所造成的结果。

热质说在历史上曾经一度流行乃至辉煌,在物理学界占据着统治地位。可以说,几乎整个18世纪是热质说的黄金期。热质说长期兴盛不衰的一个主要原因是:它能够简易地解释当时发现的大部分热现象。例如,认为物体温度的变化是由于吸收或放出热质所引起的;热传导是热质的流动过程;摩擦或碰撞生热现象是由于“潜势”被挤压出来以及物质的比热变小所导致的结果,等等。不仅如此,根据热质说,瓦特改进了蒸汽机,傅里叶建立了热传导理论,卡诺又提出了卡

诺循环及相关的定律, 形成了热机理论的基础, 拉普拉斯还在热质说的基础上修正了牛顿的音速公式。此外, 热质说也可以解释空气受热膨胀、热辐射和物体在不同温度下的相变, 甚至大部分气体定律。热质说的成功, 曾使人们对其正确性深信不疑。

18世纪末, 热质说开始受到挑战。尽管热质说可以用来解释许多热现象, 但它无法解释那些只要持续做功就可以持续产生热的现象, 例如机械摩擦、燃烧和电加热等。一些著名的实验结果清楚地表明, 热质并不守恒, 也并不存在。人们逐渐意识到热现象与构成物质内的微粒的运动相联系, 热并非物质, 而只不过是物质的一种运动形式, 是微观粒子振动的宏观表现。1860年, 能量守恒和相互转化定律的建立, 尤其是焦耳对热功当量的一系列精确测定以及能量守恒数学理论的建立, 确认了热是物质运动的一种形式, 热质说从此开始衰落。然而, 热质说的观点仍在之后的许多科学文献中反复出现, 继续存在达半个世纪之久, 足见其影响面之宽广, 影响力之深远。事实上, 热质说直到19世纪末才被彻底否定, 真正进入历史博物馆。

人们不禁会问, 究竟是什么因素在起作用使得热质说经历犹如过山车般的戏剧性变化呢? 简单地推想, 热质说似乎不应被全盘否定, 其中必定包含着某种值得肯定的有效的合理成分, 否则如何解释它曾经具有的如此强大的影响力和穿透力, 使得在那么长的历史时期内有那么多当代杰出科学家接受并运用它取得那么多阶段性的成功呢? 然而如果确实有, 那么这个合理成分究竟是什么? 人们自然也同时会问, 又是什么因素导致了热质说的终结呢? 令人感到不无意外的答案是, 热质说辉煌和衰落的原因竟然相同, 都是由于把“热”当成是一种物质而造成的。真可谓“成也萧何, 败也萧何”! 那么, 其中的奥妙究竟在何处呢? 其实, 有了热荷量或熵的新概念之后, 整个奥妙一点就破。很明显, 在热质说处于历史上的鼎盛期内, 它所包含的合理成分在起着主要作用。许多当时的科学家不仅在理论上对热质说予以肯定, 而且在实践中也应用它解决了不少科学技术中的问题。现在看来, 这个当时起作用的合理成分或者说正确的做法, 就是它将“热”处理为能够像气体和液体等物质那样流动

的物理量, 即物质型物理量或广延量。另一方面, 热质说的致命之处则在于它将“热”当成是一种真实的物质(热质), 认为它不但能够像液体和气体那样在空间流动, 而且还符合守恒定律。显然, 这样的认知必然导致它最终被推翻。正确的理解应该是: “热”或热荷量(熵)是一个广延量或物质型物理量, 但并非物质; 它是一种能量载体, 但并非能量, 因而无须服从守恒定律。换言之, 如果我们对热质说“去伪存真”、“去粗取精”的话, 那么应予保留的精华就是它将热处理为物质型物理量(熵), 而应该去除的糟粕就是它将热当成一种符合守恒定律的真实物质。

当我们回首热质说的盛衰这段往事的时候, 自然会联想到今日之热荷量或熵的概念的出现似乎是在又一次印证着事物的螺旋式上升的发展规律。事物的自身发展经过肯定、否定和新的肯定, 即否定之否定的曲折过程, 仿佛是在回归至出发点或原点, 但实质上是在更高级的阶段上重复某些低级阶段的特点和特性。人的认识是对客观事物的反映, 所以同样也是螺旋式发展的。热荷与热质虽仅一字之差, 但有着本质的区别。换句话说, 相对于热质而言, 热荷的概念已产生了质的飞跃。顺便提一句, Job博士在他的著作里曾经提及热荷一词<sup>[2]</sup>, 但可惜提过一次之后就沒有任何下文, 未能接着继续讨论下去, 没有引出热荷量的概念并明确地给出熵的定义, 从而与深入一步探索挖掘的机会失之交臂。

## 6 结束语

由于东西方的文化和语言之间存在着差异, 所以在引进西方理论时一定要注意在消化和吸收的基础上进行再创新。只有这样才能真正实现本土化, 使之发扬光大, 为我所用。事实上, 这种再创新反过来对于被引进的理论本身也可以起到补充、完善的作用。本文通过引入热荷与热荷量的概念, 改善了KPK热力学的结构, 进一步理顺了它的概念体系, 解决了熵的定义问题, 使之与属于能量概念范畴的物理量热量清晰地区分开来。热力学从此完全摆脱了长期背负的历史包袱, 真正变成一门较为容易理解的学科。

Bulletin, 2007, 32(2): 99–108.

- [3] HUANG Y, DUAN X F, LIEBER C M. Nanowires for integrated multicolor nanophotonics[J]. *Small*, 2005, 1(1): 142–147.
- [4] PAN A L, LIU R B, SUN M H, et al. Spatial composition grading of quaternary ZnCdS<sub>2</sub> alloy nanowires with tunable light emission between 350 and 710 nm on a single substrate[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 671–680.
- [5] ZHUANG X J, NING C Z, PAN A L. Composition and bandgap-graded semiconductor alloy nanowires[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(1): 13–33.
- [6] PAN A L, ZHOU W C, LEONG E S P, et al. Continuous alloy-composition spatial grading and superbroad wavelength-tunable nanowire lasers on a single chip[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(2): 784–788.
- [7] GU F X, YANG Z Y, YU H K, et al. Spatial bandgap engineering along single alloy nanowires[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(7): 2037–2039.
- [8] REIMERS P. The preparation of graded-band-gap single crystals of II-VI compounds[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 1969, 35(2): 707–716.
- [9] REIMERS P, RUPPEL W. The preparation of CdS-CdSe graded single crystals[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 1968, 29(1): K31–K33.
- [10] GU F X, ZHANG L, ZHU Y B, et al. Free-space coupling of nanoantennas and whispering-gallery microcavities with narrowed linewidth and enhanced sensitivity[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 682–688.
- [11] GU F X, CUI H B, LIAO F, et al. Mode tailoring in subwavelength-dimensional semiconductor micro/nanowaveguides by coupling optical microfibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23361.
- [12] MA L, HU W, ZHANG Q L, et al. Room-temperature near-infrared photodetectors based on single heterojunction nanowires[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 694–698.
- [13] GUO P F, HU W, ZHANG Q L, et al. Semiconductor alloy nanoribbon lateral heterostructures for high-performance photodetectors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(18): 2844–2849.
- [14] GU F X, ZHANG L, YIN X F, et al. Polymer single-nanowire optical sensors[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(9): 2757–2761.
- [15] GU F X, XIE F M, LIN XING, et al. Single whispering-gallery mode lasing in polymer bottle microresonators via spatial pump engineering[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6: e17061.

(编辑: 董伟)

(上接第 109 页)

在热力学发展史上, 物理学家虽然很早就使用了“温度”和“热”这两个基本概念, 但在相当长的一段时期内, 二者的含义并未真正区分清楚。英国科学家 Black<sup>[3]</sup>于 1757 年澄清了这两个长期被混淆了的概念, 分别将温度和热量称为“热的强度”和“热的数量”。爱因斯坦曾经说过: “用来描述热现象的最基本的概念是温度和热, 在科学史上经过了非常长的时期才把这两种概念区分开来。但是, 一经辨别清楚, 就使科学得到飞速发展。”<sup>[9]</sup>人们有理由相信, 熵(热荷量)和热量这两个物理量的基本概念一旦分辨清楚, 也必然会有力地推动热力学以至整个物理学的发展。

#### 参考文献:

- [1] HERRMANN F. 科学知识所背负的历史包袱 [J]. 吴国玠, 译. *国际物理教育通讯*, 2010(45).
- [2] JOB G. 新概念热力学 [M]. 陈敏华, 译. 吴国玠, 审. 上海: 华东理工大学出版社, 2010.
- [3] HERRMANN F. 德国卡尔斯鲁厄物理教程中文版·新物理教程(高中版)-热学 [M]. 朱铤雄, 改编. 上海: 上海教育出版社, 2010.
- [4] 吴国玠. 关于德国物理课程教学实验中若干问题的讨论 [J]. *物理与工程*, 2011, 21(3): 43–51.
- [5] 吴国玠, 章琢之. 德国卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)的结构 [J]. *大学物理*, 2012, 31(10): 42–45.
- [6] FALK G, RUPPEL W. *Energie und Entropie* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1976.
- [7] HERRMANN F. *Der karlsruher physikkurs ein lehrbuch fur den unterricht in der sekundarstufe II* [M]. Berlin: AULIS Verlag, 2008.
- [8] POHLIG M, ROSENBERG J. Three chances for entropy[J]. *Latin America Journal of Physics Education*, 2012, 6: 49–58.
- [9] [德]艾·爱因斯坦, [波]利·英菲尔德. 物理学的进化[M]. 周肇威, 译. 湖南: 湖南教育出版社, 1999.

(编辑: 丁红艺)