

物理·技术·社会

# 奇妙的热超构材料

黄吉平

(上海复旦大学物理系,上海 200433)

**摘 要:** 热学是一门古老的物理学分支学科,当它与今天先进的理论工具和实验手段相结合时,这门古老的分支学科开始取得突破进展,无论是微观尺度,还是宏观尺度,本文主要介绍热学在宏观超构材料领域的新发展。

**关键词:** 热超构材料; 热隐身; 宏观热流二极管; 变换热学; 传热

## 1 从能源危机与能量守恒说起

知道能源危机、也知道能量守恒定律的人,有时也会钻牛角尖,可能会问自己一个问题:能量既然守恒,何来能源危机?

事实上,这是因为“能量”与“能源”的内涵不同。从对人类的有用程度来区分,能量可以有高品质和低品质之分。高品质的能量对人类很有用,例如石油和煤炭中蕴含的化学能,而低品质的能量,一般而言,对人类的用途相对而言差一些、甚至无用,例如工厂锅炉产生的、散发到空气中的热能。可以这么说,能量越用,其品质通常变得越差,例如:用煤炭烧锅炉,煤炭中蕴含的化学能被释放出来后,锅炉中的水开了,这固然对人们有用,但是,随之也产生了大量的热能,散发到环境中。这些热能,相对而言,是很难被人类重新利用的,所以说,这些热能是低品质能量。事实上,所有蕴含高品质能量的能源(例如:石油、煤炭、天然气等),使用后,最终皆转变为低品质的热能。可见,从对人类是否有用的角度看,各种能源使用后,其蕴含的能量品质都会变低。而且,需要指出的是,在所有能量中,热能的品质是最低的,因为所有高品质的能量最终都变成了它,虽然这整个过程中总能量是守恒的。

可见,所谓的能源危机其实是指对人类有用的高品质能量越用越少这个事实,即便在这个过程中总的能量是守恒的。

正如上面已经提及的,热能是品质最低的能量。可是,在能量守恒定律的启发之下,我们知道,所有高品质的能量最终都会转变为等量的低品质热能。这里自然可以提出一个具有建设性的问题:如果人们能够自由操控热能,让热能变得对人类更为有用,那么,能源危机是否永远不会到来? 或推迟到来?

无疑,这是一个有趣的问题。事实上,热学正是专门研究如何利用热能、如何操控热能的一门物理学分支学科。

## 2 热学简史

物理学里有不少分支学科,例如热学、力学、光学、电磁学、电动力学、量子力学、统计力学等。在这些分支学科中,热学最奇特,它的奇特体现在哪里呢? 它与其他分支学科有一点很不一样,热学的正式诞生并不是因为物理学家的贡献,而是因为工程师的贡献,例如法国的工程师卡诺(1796—1832)就是热学的创始人之一。这个历史也映衬了另一个事实:热学是个与应用密切相关的学科,也正因为如此,工程师们才会“近水楼台先得月”地研究它、创造它。其实,即便在当今,物理学家们对热学的关注度还远远不够,例如今天中国高校物理系里几乎没有传热学这个专业方向。那么,传热学这个专业方向在哪些院系呢? 在机械与能源工程学院等与工科相关的学院。为什么? 因为今天的传热学主要关注与应用密切相关的问题(例如高速飞行器表面气动加热防护系统设计、发动机高温部件冷却系统设计),而不是基础问题——要知道,物理系里的专业的研究多是关注基础问题,这是由物理学本身的特点决定的,因为物理学是所有自然科学的基础。

当初热学诞生之后,物理学家们才恍然发现,这里其实还是有很多基础问题有待解决的。例如:温度的微观本质是什么? 热量为什么能够自发地从高温区域流向低温区域,反之则不能? 等等。于是玻尔兹曼(1844—1906)等物理学家,在热学的基础上,创立了统计力学。根据统计力学,人们终于知道温度本质就是微观世界中分子平均动能的宏观体现。人们也知道了热量自发地从高温区域

流向低温区域与系统内部的无序程度的演变方向密切相关,并且针对这个无序程度引入了“熵”这个物理量来进行描述.令人兴奋的是,如今的统计力学已经成为物理学家们开展与其他学科交叉研究的有力武器.例如“熵”这个物理量就被拓展到信息学、社会学、经济学、金融学等学科.然而令今天的物理学家们尴尬的是,玻尔兹曼等物理学大师们创立了统计力学之后,物理学家们在热学方面的研究固然取得重要的突破进展(例如:完善了热力学定律),但是,这些突破进展都是大约 100 年前取得的,今天的物理学家,在基础研究方面,对热学的研究鲜有突破进展.当然,这里说“鲜有突破进展”的意思并非完全没有,主要体现在与其他学科的交叉方面,例如与材料学的交叉研究.下面举例介绍相关的进展.

### 3 热学新进展

#### (1) 纳米尺度反常热输运.

随着电子器件的不断小型化,散热问题自然也就成为制约器件小型化的瓶颈.所以,如何在纳米尺度提高散热效率自然变成了一个很受关注的基础问题.这里为什么说它是一个基础问题呢?其中一个重要原因就是宏观热传导方程(傅里叶定律)在这个尺度已经不适用,物理学家们必须寻找新的传热机理,从而用于理解、并控制纳米尺度的热输运.鉴此,物理学家们最近十几年确实已经从机制上取得重要突破,并且实现了单方向导热等类似电子二极管现象的纳米热二极管等等.<sup>[1]</sup>关于这里所说的“单方向导热”与“纳米热二极管”,其意是指:热流可以从纳米线的一段传到另一端,反之则不行.当前,人们已经基于纳米热二极管,实现了纳米热三极管,并继而实现了纳米热存储——用于储存热声子信息.这些发展使得基于热声子的逻辑运算成为可能,而这些逻辑运算正是热声子计算机诞生的必要条件——正如有了电信号的逻辑运算才有电子计算机一样.显然,这是非常激动人心的进展.

#### (2) 宏观尺度新奇热现象.

让我们回顾一下热学诞生的当年:在那个年代,卡诺等人关注的是宏观层面的传热现象.为什么呢?因为宏观传热与人类生活息息相关,例如穿衣保暖等.当今的物理学家基于先进的理论工具和实验手段可以在纳米尺度的传热方面取得突破进展,那么,在宏观尺度,物理学家们还能不能

有新的基础突破呢?

答案无疑是肯定的——“能”!

这个领域的开端得益于几年前提出的变换热学(transformation thermotics)理论,基于该理论人们已经理论预言并实验实现了多种宏观尺度的新奇热现象并揭示了其中的新物理机制.我们知道,针对宏观传热,热传导方程(傅里叶定律)是适用的,其实,这里提及的变换热学理论正是基于热传导方程的新发展.接下来将详细介绍之.

### 4 热超构材料:热隐身与宏观热流二极管

首先让我们假想一个非常简单的场景(这里仅仅是假想,既然是假想,那么,笔者在表述时就可以忽略很多因素,例如热损耗,而仅仅保留笔者最想介绍的核心内容):有一束热流在均匀铜片(或其它任何均匀材料)中流动,按照我们的日常经验,想象得出来,铜片内的热流会沿直线传播;这时,我们假设热流和铜片都突然被“冻结”在一起,然后,我们扭曲或挤压一下铜片(假设铜片允许我们任意扭曲、挤压),可以想象,这时热流在铜片里面也得相应地被扭曲挤压,不再沿直线传播了.此时热流的非直线传播现象并不影响我们继续使用描述宏观传热的热传导方程,只是此时铜片不再均匀,其材料性质(例如用于描述热传导的热导率)发生了变化而已.换言之,如果下次我们直接让同样的一束热流以同样的角度流进这个扭曲或挤压之后的铜片,这束热流的路径必然与先前的非直线路径一致.这个现象蕴含了一个科学原理,它就是“热传导方程的形式不变性”,即热传导方程既适用于扭曲或挤压之前的均匀空间,也适用于扭曲或挤压之后的非均匀空间.对于前者,该方程用到的热导率不仅均匀而且各向同性;对于后者,该方程用到的热导率可以非均匀且各向异性.但是,可喜的是,这两种热导率之间存在确定的定量关系,可以通过雅可比矩阵把这两个不同空间的几何结构关联起来而直接给定——可以看出,这里的非均匀且各向异性的热导率,其本质是由空间几何结构确定的.所以,人们把这种通过空间几何结构变换确定材料热学性质(含热导率分布)的新的理论方法叫做变换热学(图 1).于是,人们把基于变换热学理论设计的材料叫做热超构材料,以便彰显几何结构在材料设计中的关键作用.变换热学给物理学家的启发就是,人们可以基

于这个方法,设计材料的几何结构,使得热流能够绕过某个特定的区域后,继续传播,并不改变原先的传播方向,从而使得该特定区域内的物体不影响区域外的热流分布,也就是说,这个物体实现热隐身(thermal cloak)了(图 2).<sup>[2]</sup>图中箭头代表热流方向;颜色代表温度大小.此图呈现两个特点:(1)内圈里面温度均匀分布;(2)外圈之外的温度分布不受内外圈之间的材料的影响.这两个特点直接导致,当内圈里面存在一个物体时,外圈外面的观察者将无法通过探测外圈外面的温度分布而探测到内圈里面的物体,所以,把内外圈之间的材料叫做热隐身衣.

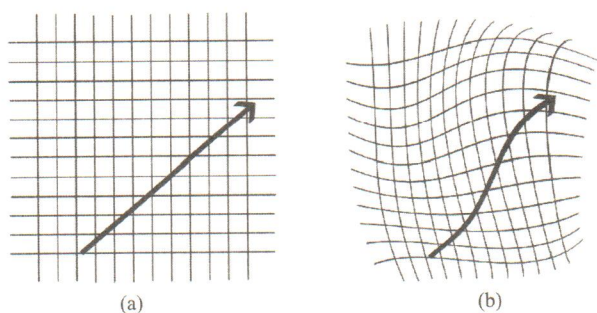


图 1 变换热学

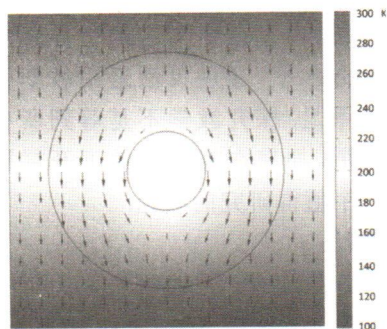


图 2 热隐身衣的温度分布(有限元模拟结果)<sup>[3]</sup>

这个“热隐身”是个全新的物理概念,它是 2008 年提出的理论预言.<sup>[2]</sup>自 2012 年起,很多实验验证了这个热隐身的理论预言.例如:在文献<sup>[4]</sup>中,有研究人员实验制备了一种多层结构,用于实现热隐身;后来,有学者进一步简化,实验上用双层结构就能实现这样的热隐身效果了.<sup>[5]</sup>

之前的这些热隐身衣固然能够去除器件内部物体对外部温度场的干扰,从而达到热隐身效果,但是,这些隐身衣并不具有开关功能.从实用性角度看,还有进一步发展的空间.事实上,之前所有的变换热学研究(含理论研究和实验验证)中,人们都没有考虑温度对热导率本身的影响.

为区别起见,不妨把之前研究热导率不随温度变化而变化的变换热学叫做线性变换热学.最近,有研究人员提出非线性变换热学的理论<sup>[6]</sup>,该理论可以用于处理热导率随温度变化而变化的情形.继而这些研究人员发现,该理论可以用于设计能够自动开启或关闭的热隐身衣:当环境温度上升到某个阈值之后,A 型隐身衣将关闭隐身效果,而 B 型隐身衣则会开启隐身功能.并且,此过程完全是材料自发完成的,不需要提供额外的能量.利用 A、B 型隐身衣可以实现宏观热流二极管(图 3):与电子二极管对电流的单向整流作用类似,这种热流二极管只允许热流单方向通过.他们的实验也成功显示了这样的整流效果.<sup>[6]</sup>该器件有望成为热计算的基础元件,例如,通过其与传统电子计算机的杂化,人们未来也许能够利用计算产生的废热进行二次计算从而提高能源的利用率并提高运算效率.无疑,这是一个值得期待的美好愿景.

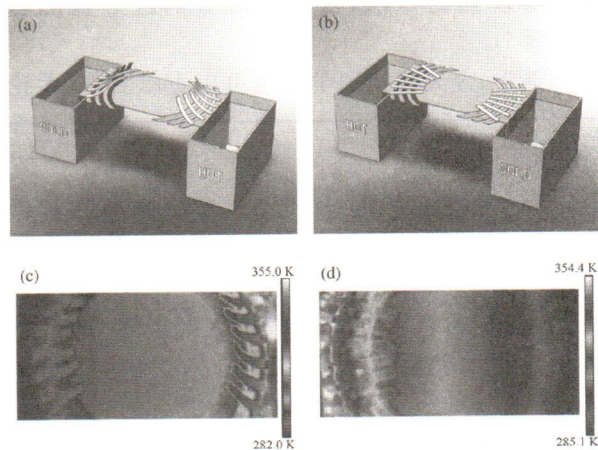


图 3 宏观热流二极管<sup>[6]</sup>

(a)(b)为示意图;(c)(d)为实验测试结果;(a)(c)热流不能从右向左流;(b)(d)热流能够从左向右流.

以上介绍的热隐身新材料,是基于变换热学理论由人工设计并实验实现的.正如上文已经阐述过的,这类材料热学性质本质上是由材料几何结构(例如与扭曲或挤压有关的尺寸、大小等几何参数)决定的,而非材料本身物理性质决定的.所以,现在文献中也有不少人把这类材料叫做热超构材料(thermal metamaterial),以便彰显几何结构在其中的关键作用.换言之,所谓的热超构材料,其本质上是异质复合材料,除组分材料的内禀物理性质外,几何结构成为热超构材料新颖特性的物理机制,并起关键作用.

### 5 热超构材料:其他功能与应用

事实上,热超构材料除了可以实现热隐身,还有许多新奇热性质,例如高效聚集热流(即让热流聚集到某个特定区域)、热流反转(即热流表观上从低温流向高温)、热流的任意旋转、热幻像等.这里提及的“热幻像”是指通过设计材料几何结构,使得 I 物体(例如一个士兵)周围的温度斑图呈现出与 II 物体(例如一棵树)一样的分布,这样人们在通过红外探测温度斑图时会把物体 I (士兵)误以为物体 II (树).当然,与热幻像有关的问题已经不单纯是热学研究的范畴了,它与电磁学也有关——因为红外探测器探测到的温度斑图本质上是物体发出的电磁辐射分布图.

可见,针对这类热超构材料,除了上面提及的与宏观热流二极管有关的应用之外,还可以有很多实际应用,例如:通过设计热隐身衣,可以使得人类居室四季如春,不受寒暑交替的影响(“保温”);这种材料还可以用于器件或设备的高效散热(“散热”);在军工方面也有潜在应用,例如可以用于实现热幻像,以便迷惑敌方的红外探测器(“幻像”).

热学,今天的物理学家也可以贡献更多,无论

是微观尺度,还是宏观尺度.

#### 参考文献:

- 1 N Li, J Ren, L Wang, G Zhang, P Hanggi, B. Li. Phonics: Manipulating heat flow with electronic analogs and beyond[J]. *Reviews of Modern Physics* 84, 2012:1045-1066.
- 2 C Z Fan, Y Gao, J P Huang. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity[J]. *Applied Physics Letters* 92, 2008:251907.
- 3 J Y Li, Y Gao, and J P Huang, A bifunctional cloak using transformation media [J]. *Journal of Applied Physics* 108, 2010:074504.
- 4 S Narayana, Y Sato. Heat flux manipulation with engineered thermal materials[J]. *Physical Review Letters* 108, 2012:214303.
- 5 T Han, X Bai, D Gao, J T L Thong, B Li, C W Qiu. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak [J]. *Physical Review Letters*, 112, 2014:054302.
- 6 Y Li, X Y Shen, Z H Wu, J Y Huang, Y X Chen, Y S Ni, J P Huang. Temperature-dependent transformation thermotics: From switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes[J]. *Physical Review Letters*, 115, 2015:195503.

(收稿日期:2015-12-12)

(上接第 70 页)

教学内容;另一方面,对于某一节课如何侧重则应视具体教学内容与教学目标而定,若教学目标定位于让学生体验某一探究过程,学习某种研究方法,则结论可置于课外让学生继续琢磨;若定位于帮助学生理解某部分知识内容,则探究结论最好能当堂呈现并进行适当的讨论,而要求学生在课外完成探究过程的一部分甚至大部分.

讨论 6:关于探究教学制约因素,教师能力因素得到一定关注,超半数教师更重外因.

调查结果指出,关于制约探究教学开展的因素,60%的参赛教师置于第一位的是教学时间、实验器材、学生水平和教材内容等外因,其余教师则认为教师能力是首要影响因素.应当承认,上述外部因素是当前一线教学中切实存在且在一定时期内较难得到妥善解决的问题,需要教育行政部门和相关机构的协助,为教师创设实施探究教学的有利条件.广大教师在看到外在条件制约的同时,应当积极发挥主观能动性,通过合理设计课程内容协调探究教学时间,通过自己动手开发与

补充实验器材,通过循序渐进的引导逐步提高学生的探究能力水平,通过灵活运用教学资源弥补教材内容的不足.探究教学不是等到所有条件成熟了才能开展,如何在现有条件下开展探究教学本身就是一个值得研究的课题.

#### 参考文献:

- 1 C Sheppard, J Gilbert. Course design, teaching method and student epistemology [J]. *Higher Education*, 1991;22,229-249.
- 2 K Trigwell, M Prosser, F Waterhouse. Relations between teachers' approaches to teaching and students' approaches to learning [J]. *Higher Education*, 1999 (1):57-70.
- 3 高凌飏,王晶. 教师的教学观——一个重要而崭新的研究领域[J]. *学科教育*, 2003(7):1-6.
- 4 D Kember. A reconceptualisation of the research into university academics' conception of teaching[J]. *Learning and Instruction*, 1997, 7(3):255-275.
- 5 L Gao. A study of Chinese Teachers' Conception of Teaching[M]. Hubei Education Press, 2004.

(收稿日期:2015-10-13)