

热超构材料十年简史*

黄吉平[†]

(复旦大学物理学系 上海 200433)

2018-09-29收到

[†] email: jphuang@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181101

A brief history of ten years of thermal metamaterials

HUANG Ji-Ping[†]

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

摘要 文章简要介绍了热超构材料自2008年以来的十年发展历程。作者挑选了24篇文章按照出版时间的先后顺序,逐一点评,在呈现新物理和新应用的同时,亦述及人文思想。期望此举有助读者快速了解该领域的全貌及未来发展趋势。

关键词 热超构材料, 热隐身斗篷, 热聚集器, 热旋转器, 热晶体, 热二极管, 零能耗保温, 日间辐射致冷

Abstract A brief history of thermal metamaterials from 2008 to 2018 is presented. For this purpose, I choose 24 papers in chronological order on the new physics and applications of the field, and also point out some of the humanistic aspects. I hope this paper can help the reader to quickly understand the whole field as well as its future trends.

Keywords thermal metamaterial, thermal cloak, thermal concentrator, thermal rotator, thermocrystal, thermal diode, energy-free thermostat, daily radiation cooling

1 引言

今天,文献中公认的热超构材料元年是2008年。可见,若把热超构材料(thermal metamaterial)视为一个人的话,时至今年,她已年满10岁,遵照国人习惯,这是一个值得庆贺的年份。故而,欣然接受《物理》之邀,不揣鄙陋,提枪上马,为她撰写过去十年的历史,一为纪念过去,二为展望未来。纵观中国,撰写历史,可有两种体裁:一是编年体,它以时间为经、以史事为纬,例如孔子修订《春秋》;一是纪传体,它以给人物撰写传记的方式叙述历史事实,例如司马迁撰写《史记》。编年体有助呈现不同事情在时间上的先后顺序,与后者相比,虽失之于零碎,但为

优秀的读者重新思考和自主创新着实提供了便利的素材。有鉴于此,现在我为热超构材料写史,亦选择编年体的叙事方式,我希望这个方式能够帮助读者自行弥补因我才疏学浅而导致的疏漏。

本文译“thermal metamaterial”为“热超构材料”,而非“热超材料”。其实,在中文领域,二者通用,各有拥趸,不过,前者在南京大学祝世宁院士、复旦大学许宁生院士、中国科学院物理研究所高鸿钧院士、清华大学南策文院士的大力推广之下(参见2016年11月19—20日国家自然科学基金委员会主办的双清论坛“超构材料中功能基元的设计、制备及新奇性能”),2016年起,在中文领域,被更多人使用。当然,我个人也更喜欢前者,因为其中的“构”是“结构”之意,而“热超构材料”的新奇热性质正是主要由“结构”诱导的,所以,在其中添个“构”字,

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 11725521)资助项目

看起来正如蒙娜丽莎的微笑那样，增一分嫌多，减一分嫌少，恰如其分。“超”，体现了这类材料新奇的性能；“构”，体现了这些性能背后的工作机制。故而，命名“热超构材料”，委实妙哉。

其实，所谓超构材料(metamaterial)，就是人工设计制备出来的结构材料，这种材料因其结构之故，能够拥有通常材料所不具备的一些性质。超构材料虽然可以追溯到20世纪60年代，但是真正兴起却是20世纪90年代在电磁学和光学领域开始的，其能够呈现出光学负折射等新奇的现象。自人类进入21世纪以来，超构材料陆续在声学领域、弹性波、地震波领域、甚至力学领域取得蓬勃进展，这主要是这些领域巨大的应用需求促成的。然而，超构材料在热学领域的进展并未能同步跟上，直到2008年才开始萌现，其中一个不可忽视的原因就是前面诸多领域，与电磁学领域类似，都是由波动方程主导的，它们的基本理论之间有其互通性。本文的主题是热超构材料，它是超构材料在热学领域的拓展，这类材料使得人类拥有了一种全新的、用于宏观热调控的武

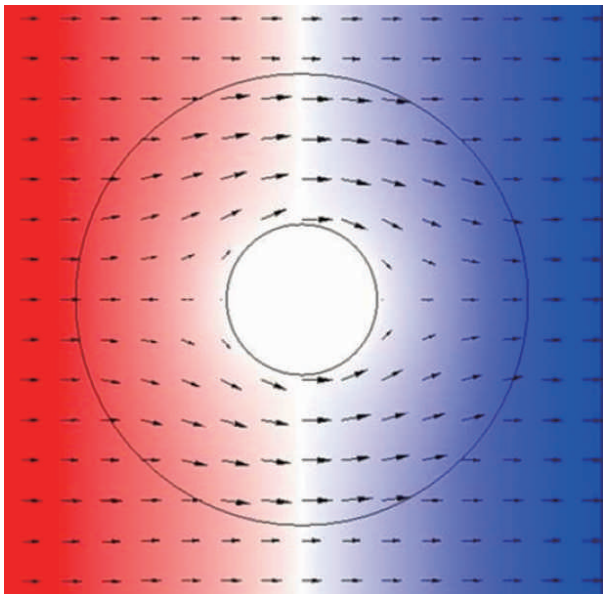


图1 热隐身斗篷温度分布的有限元模拟结果。此图呈现两个特点：(1)内圈里面温度均匀分布；(2)外圈之外的温度分布不受内外圈之间材料的影响。这两个特点直接导致，当内圈里存放一个不同物体，外圈外面的观察者将无法通过探测外圈外面的温度分布而推知内圈里物体的存在(图中左右边界分别与高温热源和低温热源相连，颜色代表温度分布；图中箭头表示热流的大小和方向)

器。十年以降，已有数百篇论文发表。考虑到篇幅所限，我只能忍痛割爱，遴选出以下24篇研究论文或评论文章，以飨读者。下面将仿照编年体的史书撰写之笔法(可能是画虎不成反类犬)，严格依照时间顺序，逐一介绍，以便为读者诸君了解热超构材料领域之概貌贡献一份绵薄之力。

2 十年简史,一部群雄逐鹿的奋斗史

(1)2008年6月24日：东方出现了一抹鱼肚白——国际上热隐身斗篷理论首次问世(Ref.1: C. Z. Fan, Y. Gao, and J. P. Huang, “Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity”, *Applied Physics Letters* 92, 251907 (2008))

隐身斗篷一直是人类梦寐以求的神奇物件。2006年，Leonhardt和Pendry等人分别提出了电磁隐身斗篷的理论，并受到了广泛的关注。2008年，Fan等人(Ref. 1)首次将电磁隐身斗篷的概念引入热学领域，理论预言了热隐身斗篷(图1)。通过借鉴变换光学理论，他们提出变换热学理论，预言了热隐身斗篷：其可以保护内部的物体免受外界的热干扰，且不对外界产生任何的扰动，就好像其内部物体不存在一样。他们进一步在该系统中预言了热流反转的现象，这和传统“热往低温流”的观点截然不同，并基于其提出了表观负热导率的概念。相关研究成果对以下领域有潜在应用：热保护、欺骗红外探测、精确控温等。该工作是变换热学领域的第一篇论文，发表后的四年内几乎没有受到学术界的公开关注，一直处于默默无闻之中。

(2)2008年9月15日：地上的路是人走出来的——热隐身斗篷理论研究第2篇论文(Ref.2: T. Y. Chen, C. N. Weng, and J. S. Chen, “Cloak for curvilinearly anisotropic media in conduction”, *Applied Physics Letters* 93, 114103 (2008))

Chen等人(Ref. 2)也使用坐标变换的方法实现了热隐身斗篷。不同的是，之前Fan等人(Ref. 1)研究的是各向同性的背景材料，而Chen等人讨论

了在各向异性背景材料中实现热隐身斗篷的可能, 他们的研究表明坐标变换理论在这种情况下仍然适用。该工作拓宽了热隐身斗篷的适用范围, 并对研究特定的非均匀背景具有理论指导意义。

(3)2010年10月1日: 热隐身斗篷理论研究第3篇论文, 提出了热电双功能隐身斗篷理论(Ref.3: J. Y. Li, Y. Gao, and J. P. Huang, “A bifunctional cloak using transformation media”, *Journal of Applied Physics* 108, 074504 (2010))

随着热隐身斗篷的提出和变换热学理论的进一步发展, 单独的热隐身斗篷已经不能满足研究者的的好奇心和实用性。为此, Li等人(Ref. 3)提出了利用坐标变换设计多功能隐身斗篷的原理。该多功能隐身斗篷除了能实现热隐身斗篷的功能之外, 还能够实现电隐身斗篷的功能, 此举拓宽了隐身斗篷的实用范围, 并为多功能器件的小型化提供了一个不同的思路。

(4)2011年3月: 热隐身斗篷理论研究第4篇论文(Ref.4: G. X. Yu, Y. F. Lin, G. Q. Zhang, Z. Yu, L. L. Yu, and J. Su, “Design of square-shaped heat flux cloaks and concentrators using method of coordinate transformation”, *Frontiers of Physics* 6, 70 (2011))

随着热隐身斗篷的提出, 另一些可以实现新奇热现象的热流调控方法也成为研究者关注的焦点, 这就为变换热学领域的发展提供了新动力。在此, Yu等人(Ref. 4)根据稳态热传导方程在不同坐标系中的形式不变性, 提出利用坐标变换理论来设计方形热隐身斗篷和热聚集器的方法。值得一提的是, 此文首次理论预言了热聚集器。已有的热学器件相关研究多是基于圆形或球形结构来开展的, Yu等人的工作则为任意形状热学器件在应用领域的推广提供了可能。

(5)2012年3月26日: 众人拾柴火焰高——热隐身斗篷理论研究第5篇论文(Ref.5: S. Guenneau, C. Amra, and D. Veynante, “Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux”,

Optics Express 20, 8207 (2012))

Fan等人(Ref. 1)提出的变换热学理论适用于稳态热传导方程, Guenneau等人(Ref. 5)首次提出了适用于处理非稳态热传导方程的变换热学理论, 并基于解析理论和有限元模拟证明了该理论的可靠性。同样重要的是, 基于该理论, 他们成功设计了瞬态热隐身斗篷和热聚集器, 并提出利用多层均匀结构替代各向异性材料制备热隐身斗篷的方法, 这为实验制备和实际应用提供了理论指导。

(6)2012年5月21日: 让火焰烧得更猛烈些吧——热隐身斗篷研究第6篇论文, 亦是第1篇实验论文(Ref.6: S. Narayana and Y. Sato, “Heat flux manipulation with engineered thermal materials”, *Physical Review Letters* 108, 214303 (2012). Selected for Editors' suggestion)

此文实验验证了Fan等人(Ref. 1)关于热隐身斗篷和表观负热导率的理论预言。该文和Ref. 5在2012年先后发表, 立即掀起了热隐身斗篷研究的空前热潮。值得一提的是, 之前的Ref.1—4在发表当时并没有引起学术界的足够关注, 自2012年起, 它们也开始受到广泛关注, 特别是其中的Ref.1—3。

因为变换热学理论对材料热学参数的非均匀性和极端各向异性有严格的限制, 这就导致这类材料在自然界中几乎不存在, 从而使得实验验证热隐身斗篷等新奇的热学器件面临着巨大的挑战。2012年, 美国哈佛大学Narayana和Sato(Ref. 6)首次制备出了真正意义上的热隐身斗篷等热学器件。他们利用两种热导率不同的同心均匀材料从内向外交替叠加, 根据有效媒质理论, 此时的径向和切向热导率分别满足不同的有效热导率近似方程, 即径向可看作两种热导率的串联, 而切向则可看作两种热导率的并联, 从而实现不同方向上热导率的区分, 获得等效的各向异性热导率。基于这种方法, 他们成功克服了超构材料对热导率各向异性要求的痛点, 利用均匀的各向同性材料, 仅仅在材料空间排布上进行了精心设计, 便制备出热隐身斗篷、热聚集器和热旋转

器。他们的这项作为宏观热运输的新型调控及具体实现开辟了前进的道路。

值得补充的是：Ref. 6 发表之后，*Science* 杂志为之发布了一篇新闻报道(<http://www.sciencemag.org/news/2012/05/heat-trickery-paves-way-thermal-computers>)，该报道的标题为“Heat trickery paves way for thermal computers(热技术为热计算机铺平道路)”，其中也有对我的采访内容，在该报道中，我当年对这个领域的未来发展也做了一些展望，时过六年，这些展望在今天看来，仍旧是对未来的展望。

(7)2012年6月21日：针对 Ref. 1 和 Ref. 6 的评论文章(Ref.7: P. Ball, “Against the flow”, *Nature Materials* 11, 566 (2012))

Ball 在这篇评论文章中，详细介绍了哈佛大学 Narayana 和 Sato 首次对 Fan 等人理论预言(Ref. 1)的实验验证，这些理论预言包括热隐身斗篷和表观负热导率。Narayana 和 Sato 对热聚集器的实验验证，在此文中也有专门介绍和点评。更为重要的是，此文最后对表观反常热现象与物理学定律的相容性进行了深入探讨，此举有助消除疑虑，对推动热超构材料沿着原有方向健康发展具有积极意义。

(8)2013年1月11日：一座丰碑——基于周期结构带隙的热声子调控方法问世(Ref.8: M. Maldovan, “Narrow low-frequency spectrum and heat management by thermocrystals”, *Physical Review Letters* 110, 025902 (2013))

受光子晶体调控电磁波的启发，Maldovan 在此文中率先提出热晶体的概念，这种热晶体可以用于任意调控热流。利用声子的相干反射，计算出热晶体的带隙，发现可以在微观层面精确控制热声子输运过程。他进一步从理论上设计了纳米尺度中的周期结构，并计算了相应的能带结构。基于此，提出可以利用这样的纳米结构设计热波导、热成像、热二极管、热隐身斗篷、热学超晶格等热学器件或系统。该工作首次提出热晶体的概念，并为探索新奇热现象提供了一个革命性的

理论方法，启发了后来大量的研究工作。

(9)2013年5月10日：德国科学院院士 Wegener 教授团队的大作——瞬态热隐身斗篷的实验验证(Ref.9: R. Schittny, M. Kadic, S. Guenneau, and M. Wegener, “Experiments on transformation thermodynamics: molding the flow of heat”, *Physical Review Letters* 110, 195901 (2013). Selected for Editors' suggestion)

作者利用热导率大小交替的十个同心同厚度的圆环结构，来实现热导率在切向远大于径向的设计，并利用在铜板上钻孔填充聚二甲基硅氧烷的结构，来实现常规材料不易达到的热导率分布，从而使得整个结构符合坐标变换后的热导率空间分布，首次实验验证了瞬态热隐身斗篷。值得一提的是，这类热隐身斗篷在工业上可以用于保护电路或芯片中的敏感区域免受过热损害。

(10)2013年6月27日：热隐身斗篷领域的最新进展惊动了大咖、大期刊(Ref.10: U. Leonhardt, “Cloaking of heat”, *Nature* 498, 440 (2013))

Leonhardt 教授是变换光学领域的开创者之一，他和 Pendry 等人分别于 2006 年提出的光学隐身原理入选 *Science* 杂志评选的 2006 年度十大科学突破。2013 年他在 *Nature* 上发表的这篇评论文章介绍了热隐身斗篷这个领域的最新进展。此文为后来的热隐身斗篷和热超构材料的发展起到了很好的推动作用。

(11)2013年11月14日：“热超构材料”这个名字的出处和最初内涵(Ref.11: M. Maldovan, “Sound and heat revolutions in phononics”, *Nature* 503, 209 (2013))

《论语·子路》中有：名不正，则言不顺；言不顺，则事不成。美国麻省理工学院 Maldovan 这篇文章(Ref. 11)的发表，使得热超构材料这个领域终于有了自己正式的名字，更为重要的是，这个名字包含的物理内涵有了清晰的描述，而非泛泛的概括。此文中专门有一个章节，其标题就是“Thermal metamaterials and heat cloaking(热超构材料与热隐身斗篷)”，该章节中，针对 Ref. 1, 2,

5, 6, 8, 作者首次使用热超构材料来命名基于变换热学理论设计的热隐身斗篷、热流反转等功能或器件, 此文促成了变换热学与热超构材料这个研究方向的形成, 并使得热超构材料这个名字从此获得广泛认可。此文对该领域已有的研究, 给予了中肯的评价, 认为这些工作提供了“创造性的理论概念”、“激动人心的新技术”、“史无前例的热流控制”, 并认为这些属于“革命性的进展”。

这里必须说明的是, 毋庸置疑, Maldovan 这篇 *Nature* 综述论文(Ref. 11)对热超构材料这个领域在2013年后的蓬勃发展起到了无可替代的推动作用, 这篇文章也成了“thermal metamaterial”这一名字的公认出处。但其实, “thermal metamaterial(热超构材料)”这个词组第一次出现是在一个会议的论文集中, 这个会议便是2010年6月7—10日在美国 Indianapolis 召开的美国实验物理学学会年会, 该年会的会议论文集有 C. T. Roman, R. A. Coutu 和 J. L. A. Starman 发表的一篇文章, 其标题为“Thermal management and metamaterials (热管理与超构材料)”, 该论文的摘要中开头两个单词就是“thermal metamaterials”。可能是因为会议论文的缘故, 此文在学术界的影响力有点逊色, 而且其并没有对已有的相关研究做必要的梳理, 所以, 有点遗憾, 此文没有对热超构材料这个领域的发展起到应有的推动作用。

(12)2013年11月22日: 热隐身斗篷领域最新进展再受大咖和大期刊关注(Ref. 12: M. Wegener, “Metamaterials beyond optics”, *Science* 342, 939 (2013))

Wegener 教授是德国科学院院士。他撰写的这篇评论文章介绍了热隐身斗篷的最新进展, 并且明确指出热传导过程中与光学波长(其是设计光学超构材料的特征长度)可类比的物理量是热扩散长度, 其平方等于热扩散系数与热扩散时间的乘积。而且, 在此文中, 他明确指出设计外部热隐身斗篷(其理论预言见2013年11月15日被接收并于2013年12月10日公开发表的论文: Y. Gao and J. P. Huang, “Unconventional thermal cloak hiding an object outside the cloak”, *EPL* 104,

44001 (2013))需要的负热导率, 在被动系统中因热力学第二定律的限制, 不可能存在, 但是, 在主动系统中因为存在热源或冷源, 负热导率能够存在且不违反热力学第二定律。关于负热导率的这些论述为后来基于负热导率设计热超构材料提供了理论思想。值得一提的是, 他关于负热导率的这些论述与论文“*EPL* 104, 44001 (2013)”末尾的相关论述一致, 互为呼应。

(13)2014年2月3日: 首个三维热隐身斗篷的理论设计和实验验证(Ref.13: H. Y. Xu, X. H. Shi, F. Gao, H. D. Sun, and B. L. Zhang, “Ultrathin three-dimensional thermal cloak”, *Physical Review Letters* 112, 054301 (2014). Selected for Editors' suggestion and a Viewpoint in *Physics*)

Xu 等人(Ref. 13)首次制备出了三维热隐身斗篷。此前实验上制备的热隐身斗篷都属于二维器件, 而三维器件无疑具有更广泛的适用性。他们通过精巧的三维金属加工技术, 成功制备了三维超薄热隐身斗篷, 其中铜的厚度为 $100\ \mu\text{m}$, 且其内部区域半径为 $0.5\ \text{cm}$ 。

(14)2014年2月3日: 双层热隐身斗篷的理论设计和实验验证——李保文教授和仇成伟教授课题组强强合作的成果, 成就了该领域的一篇高被引论文(Ref.14: T. C. Han, X. Bai, D. L. Gao, J. T. L. Thong, B. W. Li, and C. W. Qiu, “Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak”, *Physical Review Letters* 112, 054302 (2014). Selected for Editors' suggestion and a Viewpoint in *Physics*)

基于坐标变换理论设计得到的热隐身斗篷, 一般要求具有各向异性的热导率, 同时在数值范围上涵盖零到无穷大, 所以, 在自然界中难以找到严格对应的材料, 这在一定程度上限制了热隐身斗篷的制备与应用。针对该问题, Han 等人(Ref. 14)设计出了一种新的双层热隐身斗篷。该热隐身斗篷只需要两层均匀且各向同性的材料, 这两层材料各自的热导率由傅里叶热传导方程求出, 通过其边界条件约束可使得斗篷内温度均匀分布, 而斗篷外的温度分布不受斗篷内物体的影

响。此方法适用于二维和三维、稳态和瞬态的所有情形。他们成功制备的二维热隐身斗篷，其内层为热导率极低的发泡聚苯乙烯，外层为一种合金，内外层的径向厚度分别为3.5 mm与2.5 mm，斗篷内部区域的半径为6 mm，外部背景材料为导热硅胶。基于该样品，他们成功探测到了与理论预期相符的实验数据。

(15)2014年3月：此文是热伪装和热幻像研究热潮的开端(Ref.15: T. C. Han, X. Bai, J. T. L. Thong, B. W. Li, and C. W. Qiu, “Full control and manipulation of heat signatures: cloaking, camouflage and thermal metamaterials”, *Advanced Materials* 26, 1731 (2014))

在双层热隐身斗篷的基础上，Ref. 15基于同样的理论，通过直接求解拉普拉斯方程，设计了热伪装结构，该文的理论设计获得了有限元模拟和实验的验证。该结构中的左右两边分别有一个半圆弧，这是这个设计的核心，它们是两个低热导层，其有效隔绝了热流，因此，无论在这两个半圆弧结构之间的双层热隐身斗篷中是否存在物体，外部背景中的等温线分布都是一样的，于是这个设计也就实现了热伪装，它能将内部的物体伪装起来。该工作的潜在应用是在军工领域，例如用于欺骗红外探测。

(16)2014年11月12日：热电双功能隐身斗篷理论预言获得实验验证(Ref.16: Y. G. Ma, Y. C. Liu, M. Raza, Y. D. Wang, and S. L. He, “Experimental demonstration of a multiphysics cloak: manipulating heat flux and electric current simultaneously”, *Physical Review Letters* 113, 205501 (2014))

随着变换理论陆续推广到不同的物理场(如电磁波、声波、电流、热流、物质波)，隐身斗篷等新奇器件的设计和实现也在不同物理场中得到实现。然而，人类世界是由多种物理场综合叠加而成的，其中面临的大量问题都是在多物理场共同作用下。因此，研究单个器件对于不同外场的不同表现具有重要的意义。2010年和2014年，Li等

人(Ref. 3)和Moccia等人(*Physical Review X* 4, 021025 (2014))分别理论设计了同时适用于外界温度场和电场的隐身斗篷或聚集器。随后，Ma等人(Ref. 16)成功制备出第一个同时对温度场和电场适用的隐身斗篷，即“热电隐身斗篷”。他们借鉴了双层热隐身斗篷的设计思路，发现只要背景的热导率与电导率之比等于双层结构外层材料的热导率与电导率之比时，该结构即能具有热电隐身的双功能。在实验上，他们舍弃了传统的金属—绝缘介质复合结构，转而利用半导体硅来实现他们的构想。其中，隐身斗篷外层利用低密度掺杂的n型硅，内层为空气膜，背景材料使用刻有周期性孔洞的硅，孔洞中填充聚二甲硅氧烷。根据有效媒质理论，在合适的孔洞/硅面积比下，背景材料的热导率与电导率之比恰好能够满足要求。最终的实验结果很好地验证了他们的构想。这项工作，与之前Li等人和Moccia等人的理论工作一起，成功地将单物理场(热场)隐身斗篷推广到多物理场情形，为后续的大量研究提供了可靠的理论基础和实验方法。并且，这项工作对于芯片中载流子传输和热能运输的同时调控提供了全新的设计思路，具有潜在的应用价值。

(17)2014年11月27日：又见丰碑——日间辐射制冷原理和原型问世(Ref.17: A. P. Raman, M. A. Anoma, L. X. Zhu, E. Rephaeli, and S. H. Fan, “Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight”, *Nature* 515, 540 (2014))

制冷系统的能量消耗占全球能量消耗的15%(E. A. Goldstein, A. P. Raman, and S. H. Fan, *Nature Energy* 2, 17143 (2017))，而在美国这一占比更是高达50%。相对于通常需要能量输入的“主动制冷”设备，如果存在可以不需要能量输入的“被动制冷”装置，则可以极大地降低制冷系统在能源消耗中的占比，从而有效缓解能源危机。值得庆幸的是，早在1967年，辐射制冷的概念便被F. Trombe提出，并在1975年被实验验证(S. Catalanotti, V. Cuomo, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, and G. Troise, “The

radiative cooling of selective surfaces”, *Solar Energy* 17, 83 (1975))。然而, 该装置只能在夜间起效。大量研究者们努力寻找可以在白天实现被动制冷的有效方式, 但很长时间一直没有实质性进展, 甚至有人预言实现日间的辐射制冷是不可能的。

然而, Ref. 17 报道的研究结果则成功地打破了上述预言。由于物体最终的稳定温度由吸收的热量减去散发的热量决定, 除去制冷系统与环境的传导和对流外, 其输入能量来自于太阳辐射(对应波长 0.3—2.5 μm), 而输出能量则是通过热辐射向外散发的能量(这部分能量可以通过大气透明光窗 8—13 μm 将热量辐射至广袤的宇宙当中)。通过设计材料吸收和发射谱, 使得材料在 0.3—2.5 μm 波段范围内“吸收率和发射率”尽可能小, 而在 8—13 μm 波段范围内的“吸收率和发射率”尽可能大, 这样便可以实现日间的“被动制冷”。这就相当于一方面尽可能减小蓄水池进水管的进水量, 另一方面尽可能增大排水管的出水量, 最终使蓄水池的水量尽可能少。他们利用 SiO_2 、 HfO_2 等材料, 通过光子晶体设计方法, 成功地制备出了满足上述理论要求的光子晶体薄膜材料。经测定, 该薄膜材料在白天阳光直射的情况下, 其表面温度可以比环境温度低 4.9 $^\circ\text{C}$, 从而首次实现了“日间被动制冷”。如果这项技术得以大规模应用, 如在居民房屋顶部铺满该薄膜材料, 则可以极大地减少夏天对空调的依赖, 从而降低能源消耗。

(18)2015年7月17日: 源于自然, 高于自然——向自然界学习如何设计热超构材料(Ref.18: N. Shi, C. C. Tsai, F. Camino, G. D. Bernard, N. Yu, and R. Wehner, “Keeping cool: enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants”, *Science* 349, 298 (2015))

由于 Ref. 17 中设计光子晶体的方法需要对薄膜各层材料厚度的设计和生长进行严格控制, 因此材料制备过程复杂, 技术要求高, 周期长, 不利于大规模生产应用。撒哈拉沙漠中的银蚁可以在夏天环境温度高达 60—70 $^\circ\text{C}$ 时维持体温 48—51 $^\circ\text{C}$ 。由于生物体通常不具备大量 SiO_2 、 HfO_2 等

物质, 更不具备上述人工光子晶体结构, 因此研究银蚁的散热机制有助于开发更有效的辐射制冷机制。通过对银蚁头部的扫描电子显微镜观察, Shi 等人(Ref. 18)发现, 其头部存在大量细小的三棱柱毛发(截面为正三角形, 边长约为 3 μm), 这种毛发的微观结构使其可以反射大量太阳辐射(0.3—2 μm), 并在大气光窗(8—13 μm)辐射大量能量, 从而能够维持其相对较低的温度。这种与太阳辐射波长相匹配的微观结构不需要通过复杂的光子晶体结构设计便可以完成。银蚁头部表面细小的毛发结构对挖掘新的辐射制冷机制具有重要启发意义。

(19)2015年11月5日: 非线性变换热学理论及宏观热二极管(Ref.19: Y. Li, X. Y. Shen, Z. H. Wu, J. Y. Huang, Y. X. Chen, Y. S. Ni, and J. P. Huang, “Temperature-dependent transformation thermotics: from switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes”, *Physical Review Letters* 115, 195503 (2015). Cover Article)

2008年发表的 Ref. 1—2 提出了利用坐标变换方法设计热超构材料的变换热学理论, 时至2015年, 该方法已经得到实验验证并获得广泛的扩展应用。可见, 变换热学理论已经成为宏观热调控的基本方法之一。然而, 为了解决宏观热整流, 设计宏观热二极管, 现有的变换热学实验中常用的材料是不够的, 因为通常材料的热导率与温度(近似)无关, 而热二极管只能在一个方向上传递热流, 在相反方向上隔绝热流, 这对应着热流的不对称性。为此, 必需采用非线性材料, 即热导率的大小依赖于温度的变化。在 Ref. 19 中, 作者提出了一种基于热导率随温度变化的材料设计的开关热隐身斗篷, 获得了该斗篷对环境温度的选择性响应, 故而, 也把其叫做智能热隐身斗篷。同时, 他们更进一步利用这种思路理论设计并实验验证了一种宏观热二极管, 该热二极管具有若干潜在应用价值, 其可涉及保温、散热、节能, 而且, 若能基于其设计出宏观热三极管, 则宏观热逻辑门也将可以预期, 这为热能的利用和控制提供了一个不同的思路。

(20)2016年7月29日：环境温差中零能耗保温(Ref.20: X. Y. Shen, Y. Li, C. R. Jiang, and J. P. Huang, “Temperature trapping: energy-free maintenance of constant temperatures as ambient temperature gradients change”, *Physical Review Letters* 117, 055501 (2016). Selected as Focus in *APS Physics*)

自然界中，热量无处不在。但是，很多时候，这种热量是一种低品位的能量，不能被充分利用，只能被浪费掉，这就如同鸡肋一般，食之无味，弃之可惜。如果能够充分利用环境中的这些热量，无疑，对节能环保大有裨益，但同时技术上却不得不面临巨大的挑战。Shen等人(Ref. 20)通过使用热导率对温度具有响应的相变材料，提出了一个温度捕获理论(temperature-trapping theory)，同时，他们理论设计并实验验证了一种新型的恒温器，这种恒温器在变化的环境温差中无需额外输入能量，也能够自我维持所需的恒定温度。作为该概念模型的应用，作者设计并模拟计算了一种保温热隐身斗篷，对该斗篷而言，尽管环境温度梯度发生显著变化，但其中心区域内仍具有恒定温度，这与已有的热隐身斗篷有着显著不同。该工作为操纵热流而不额外消耗能量提供了一个新思路。

(21)2017年3月10日：杨荣贵教授及其合作者在基础研究和产业化方面的双重突破(Ref.21: Y. Zhai, Y. G. Ma, S. N. David, D. L. Zhao, R. N. Lou, G. Tan, R. G. Yang, and X. B. Yin, “Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid

metamaterial for daytime radiative cooling”, *Science* 355, 1062 (2017))

日间辐射制冷的基本原理已经受到普遍认可，它就是减少太阳辐射的吸收，增加通过大气透明光窗的热辐射。但是，如何实现这样的基本理论要求呢？实验上主要有光子晶体法(Ref. 17)和聚合物光子法(Ref. 21, 图2)。其中，聚合物光子法在日间被动制冷领域正受到越来越多的关注，这主要是因为它具有以下优点：实验过程相对简单，对技术要求低，制备周期短。该方法的具体细节是：在聚合物中掺杂体积分数约为6%的随机分布的 SiO_2 颗粒，如此，该聚合物能够对波长为8—13 μm 的光具有强烈的散射作用，而对0.3—2.5 μm 的光是透明的，但是，透过该层聚合物材料的太阳光会被背面的银薄膜反射回去。这样便实现了基本的理论原理要求。基于这种有机聚合物和银薄膜的复合结构，Zhai等人(Ref. 21)所制备的样品可以反射96%的太阳辐射，同时在大气光窗范围内的发射率达到0.93，制冷功率达到93 W/m^2 。由于该方法对实验过程没有太多限制，材料可以快速大量地制备，很有希望获得大规模商业应用。2018年3月31日，该研究团队已经与宁波市政府签订“宁波瑞凌节能环保创新与产业研究院和宁波瑞凌辐射制冷技术产业园共建协议”，显然，该技术的产业化进程已经开始。

(22)2017年8月29日—9月1日：热超构材料在印刷电路板中开始有实际应用(Ref.22: E. M.

Dede, F. Zhou, P. Schmalenberg, and T. Nomura, “Thermal metamaterials for heat flow control in electronics”, *Proceedings of the ASME 2017 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems*, Paper No. IPACK2017-74112 (2017))

2014年，Dede及其合作者提出一种具有“热纤维”结构的热超

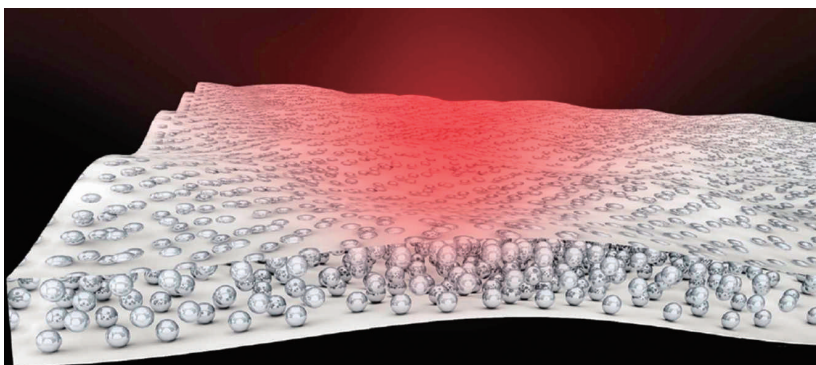


图2 用于日间辐射致冷的玻璃聚合物杂化材料：球形 SiO_2 颗粒随机分布在聚甲基戊烯之中(此图出自 Ref. 21)

构材料 (*Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49, 59—68 (2014)), 2017年, 他们(Ref. 22)继续发展这种热纤维结构, 并把其应用于电子元件领域。利用理论计算和实验研究, 将几何构型优化的铜纤维长在印刷电路板上, 发现这种设计可以有效地保护电路板上的热敏元件。对比不加任何铜纤维结构的电路板, 该优化结构可以将热敏元件处的温度降低 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这也是国际上首次将热超构材料实际应用于电子电路领域。基于同样的思路, 这种结构还可以用于集热, 以便提高热电转换效率、提高散热效率等。

(23)2018年1月18日: 如何使物体发出假的红外热辐射信号(Ref.23: Y. Li, X. Bai, T. Yang, H. Luo, and C. W. Qiu, “Structured thermal surface for radiative camouflage”, *Nature Communications* 9, 273 (2018))

基于黑体辐射理论, 人们知道, 任何物体都根据温度的不同而向外辐射不同波长的电磁波。利用诸如红外相机等装置测量热辐射的红外成像技术已被用于许多领域, 例如温度测量、夜视、红外制导导弹。因此, 如何伪装红外热辐射信号具有一定的学术意义和应用价值。需知, 当物体的温度与背景的温度不同时, 其热辐射比背景的热辐射更强或更弱, 因此物体在红外热成像仪上可以被探测到。鉴此, 为了实现热辐射伪装, 目前通常的做法是使用发射率经过精心设计的薄膜覆盖住物体的表面, 从而调节来自物体的热辐射, 以便与来自背景的热辐射相匹配。这就不可避免的需要预先知道背景温度以及需要伪装的物体材料性质, 从而限制了这种方法的应用。与此不同的是, Li等人(Ref. 23)设计了一种特殊的热超构材料, 用于实现热辐射伪装。他们设计的这种热超构材料可以直接应用在物体和背景之上, 并改变热辐射的性质, 而无需预先知道背景温度。显然, 该方法与之前的做法不同, 它是利用变换热学理论, 通过结构设计直接改变了被观测物体表面的温度梯度分布, 从而影响被观测表面的热辐射特征, 达到热伪装的效果。因此它将自动调整表面温度曲线以匹配背景温度梯度, 具有

很强的设计便利性以及应用拓展性。

(24)2018年5月29日: 把热源隐藏起来(Ref. 24: R. Hu, S. L. Zhou, Y. Li, D. Y. Lei, X. B. Luo, and C. W. Qiu, “Illusion thermotics”, *Advanced Materials* 30, 1707237 (2018))

热超构材料的诞生使得许多新奇的热学现象成为可能, 热幻像就是其中之一。但是针对热源幻像的研究少之又少, 事实上, 自然界中的任何物体都可以被视为热源, 因为它们都有热辐射。在Ref. 24中, Hu等人提出可以将内部单个原始热源伪装成多个虚拟的热源信号, 并且观察者不能通过外部的热分布分辨出实际热源。换言之, 实际热源的位置、形状、大小和数量都得到了隐藏。他们(Ref. 24)基于变换热学理论, 发展了位置变换方法(Q. W. Hou, X. P. Zhao, T. Meng, and C. L. Liu, *Applied Physics Letters* 109, 103506 (2016)), 给出了解析结果, 又利用有限元模拟和实验验证了文中的理论结论。该报道的热源幻像装置, 设计方法简单, 为实际应用提供了便利。且, 此文结果可以相应拓展到物理学其他领域。

斯为纪念! 然而, 总结过去, 是为了更好的面向未来。

3 面向未来, 未来已来?

希望以上24篇文献的介绍能够帮助读者了解热超构材料领域的概貌, 当然, 挂一漏万, 在所难免, 万望读者体谅。其实, 欲了解该领域之全貌, 单读此文, 可能不够, 有兴趣者, 恭请阅读为国内《物理学进展》撰写的英文综述(标题为“Metamaterial for heat transfer: geometric structure, working mechanism, and novel function”)。

一个领域的兴起, 并非一蹴而就的, 它需要很多因素的合力, 例如需要研究人员之间的国际合作、需要不同研究方法之间的类比、需要理论与实验的配合, 等等。热超构材料接下来的发展趋势, 宏观上看, 我想不外乎基础研究与商业应用相结合。对于这两者, 当前在日间辐射制冷方

面已经取得突破性进展,在这方面,美国科罗拉多大学的杨荣贵教授及其团队成绩卓著。其实,该领域已有的不少科研成果都发表在工程热物理方向的学术期刊上,这说明工程领域的同行们很看重这个研究方向,这也为已有基础研究成果的实际应用提供了难得的机遇。事实上,该领域的部分已有成果已经获得初步应用,遗憾的是,已有的公开文献报道中介绍的应用并不很多,这主要是因为一些应用是在国防军工领域,不适合公开。从微观上看,这个领域的理论方法还需要进一步开发、挖掘,例如:如何基于热导率对温度的依赖,发展非线性光学理论在热学领域的对应理论?如何集成对热传导、热对流和热辐射的综合调控?如何通过热超构材料对热能史无前例的控制,提高能源材料(如热电材料)的利用效率?等等。这些问题的解决,需要有志于接受挑战的年轻人加盟,当然,更需要同行们的投入与坚持。

当前,在热超构材料领域开展工作的国家主

要有中国、美国、新加坡、德国、法国、意大利、韩国等。就具体研究单位而言,国际上,正如上文提及的,包含美国哈佛大学、麻省理工学院等高校,国内的主要高校分别是(以拼音为序):复旦大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、清华大学、沈阳航空航天大学、同济大学、西安交通大学、西北工业大学、西南大学、浙江大学。此外,据我所知,国防科技大学、湖南大学以及若干国防军工单位也正在投入力量,准备在该领域一展身手。我相信,随着该领域向应用方面的纵深推进,更多的国家和更多的单位会进入这个名单中来,卓有成效的成果应该拭目以待。

致谢 此文撰写过程中,我课题组的博士生们帮助整理了部分文献,他们分别是须留钧、杨帅、王骏、田博衍、戴高乐、王瑞喆、尚进、蒋超然、杨福宝。在此,一并致谢。

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕
—〈物理〉四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕—〈物理〉四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

户名:中国科学院物理研究所

帐号:112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649470; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

