

2018年热超构材料研发热点回眸

黄吉平

复旦大学物理学系, 上海 200438

摘要 热超构材料研发活动在2018年再次取得丰硕的研究成果。回顾了热超构材料2018年在热传导、热对流、热辐射3种传热方式方面的研究进展及应用,归纳为7个研究热点:结构表面高效调控热传导、非均匀热学结构理论进展及应用开发、热学零折射隐身斗篷、建立了变换热对流理论、反常对流传热现象、从太阳和太空中同步收集能量、热超构材料应用设计与集成开发。

关键词 变换热学;热学器件;热传导;热对流;热辐射

热超构材料(thermal metamaterial)是一种人工结构热学材料,它的新奇结构使其能够拥有自然材料或化合物所没有的热学性质或功能,它属于热力学与统计物理学、热物性学和传热学的新兴前沿交叉研究方向,至少涉及物理学、动力工程及工程热物理、材料科学与工程3个一级学科的交叉融合。该领域在2018年取得的成果一如既往地丰硕、诱人。以下根据热超构材料2018年在热传导、热对流和热辐射3种传热方式方面的研究进展,分7个研究热点综述。

1 热传导

1.1 结构表面高效调控热传导

红外成像技术是目前应用最广的用于探测物体表面温度特征的成像技术。在大力发展该项技术的同时,如何避免物体表面的热学信号被红外相机探测到,也是人们关注的重点之一。

2018年, Li等^[1]发展了变换热学理论,提出了一种可以在给定背景上对外部物体进行热辐射伪装的结构

表面器件。该器件在设计上可分为三个步骤(图1^[1])。

第一步,在热导率为 κ_0 的背景材料表面拉伸一个高度为 δ 的小区域(从 x_0 到 x_1)形成三角形区(灰线阴影),于是,得到的热导率 κ' 取决于 κ_0 (图1(b))中各区域的线条代表各向异性热导率的取向)。

第二步,在创建出的三角形空间上设计一个单向的热隐身斗篷(用粉色及天蓝色线标记)的变换区域用以放置伪装物体(黄色)。在变换中区域A的热导率保持不变,并将区域 A_1 和 A_4 压缩到区域B,区域 A_2 和 A_3 压缩到区域C。变换后得到的热导率 κ'' 依赖于 κ' ,因此也取决于 κ_0 。

第三步,消除空间。取 $\delta \rightarrow 0$ 的极限,填补第一步中被拉伸的区域,以避免修改背景的热导率。在该变换操作下, κ' 和 κ'' 的热导率独立于 κ_0 。最后重新建立变换区域与背景的热接触。

该方法基于变换热学理论,与之前采用的通过修改材料表面发射系数以隐藏物体的热辐射信号方法不同。该方法的优点在于,物体的表面温度分布可以是任意的,并且该装置设计可以不对样品本身产生破坏,

收稿日期:2018-12-30;修回日期:2019-01-02

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(11725521)

作者简介:黄吉平,教授,研究方向为热调控与热超构材料,电子信箱:jphuang@fudan.edu.cn

引用格式:黄吉平. 2018年热超构材料研发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 99-105; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.010

便可达到热伪装之目的。Li等^[1]通过数值模拟和实验证实了该装置的性能以及可行性。

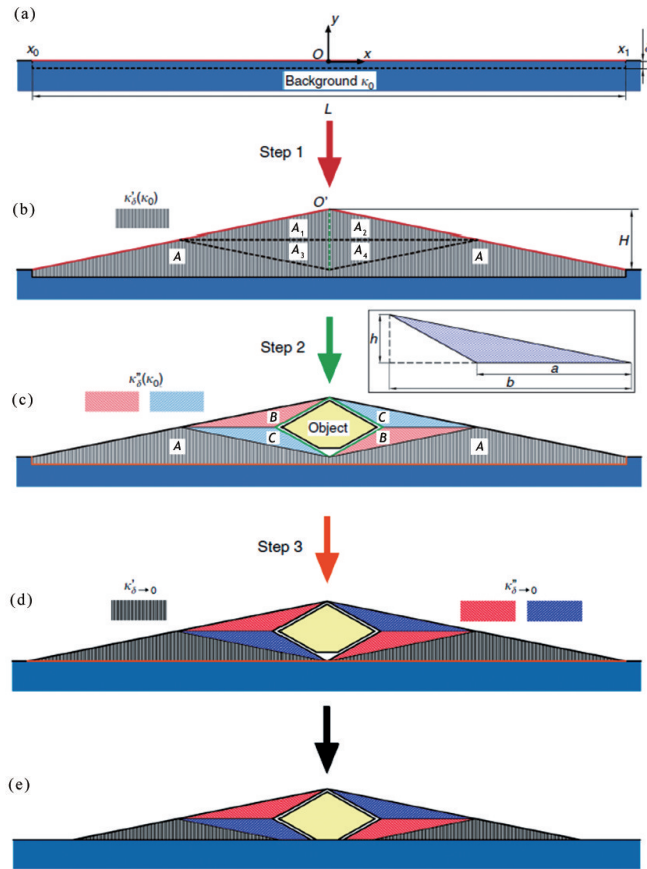


图1 热伪装器件设计

Fig. 1 Design of thermal camouflage device

以上热伪装方法是基于变换热学理论实现的,还可以用于实现热源位置的伪装^[2],甚至热编码^[3]。

1.2 非均匀热学结构理论进展及应用开发

虽然热能无处不在,但其利用率却非常低(在能量守恒定律约束下,其他能量通常转化为热能这个废能,而被浪费掉),因此热管理就显得尤为重要。幸运的是,热超构材料提供了一种有效的热管理方法。然而,现有研究局限于内核是均匀的情况,这在很大程度上限制了实际应用,出现这种情况主要是因为缺乏一套处理非均匀结构的理论框架。

为了解决这个问题,Xu等^[4]建立了一套完整的理论框架描述非均匀结构的热学性质。为了表明非均匀结构在热管理方面出色的性能,研究者们进一步提出了热学杰纳斯(Janus)核的概念,并通过理论、模拟和实验验证了相关概念。结果表明,热学杰纳斯核能够灵活地操控热聚集和热旋转。这项工作建立了非均匀热学

结构的理论基础,并提出了理论的潜在应用,为解决热管理问题提供了一个不同的研究思路。

在热管理中,热源扮演了非常重要的角色,因为它在自然界中几乎随处可见。夜视仪的原理就是探测热源的红外辐射;导弹可以通过追踪飞行器(热源)的红外辐射进行攻击。所以,如果能够伪装热源或对热源进行有效操控,那么有望在国防军工领域起到重要作用。

为了解决这个问题,Xu等^[5]设计了一种基于非均匀结构的伪装装置,它可以对任意形状、数量、大小的热源进行伪装。通过变换热学理论,研究者成功地将2个线热源伪装为1个点热源,达到了迷惑红外探测的效果。为了验证理论的正确性,研究者分别进行了稳态和瞬态的模拟,模拟结果均达到了预期的效果。为了确保实验的可行性,研究者进一步利用2种自然材料的交替排列结构实现了理论设计的参数。这项工作设计了一种伪装装置,可以将任意热源伪装为一个圆形热源,在欺骗红外探测等相关领域发挥作用。

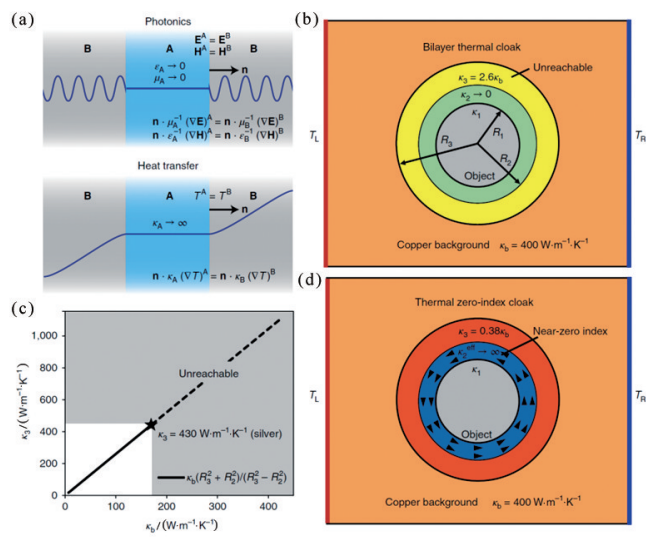
Xu等^[6]也针对热源做了相关研究。虽然变换热学已经可以对热源进行灵活地操控,但是它得出的参数非均匀、各向异性、甚至存在奇点,这就为实验验证带来了不便。为了解决这个问题,Xu等^[6]提出了一种对热源变换的等价操作,即对热源形状进行变换,从而简化变换热学给出的复杂参数。基于对热源变换的等价操作,研究者进一步提出了2种功能,即与边界无关的热传导和全方向热复制。这些功能皆已经过模拟和实验验证。这项工作简化了热源变换的复杂参数,为进一步研究热源变换打下了理论基础,并有望推动热幻像领域的相关研究。

另外,热隐身斗篷一直是热超构材料领域的研究热点,但已有研究存在两点不足:(1)参数过于复杂,特别是任意形状的热隐身斗篷,实验很难实现;(2)热隐身斗篷自身是可见的(即可被红外探测器探测到)。为了解决这些问题,Xu等^[7]基于热场的唯一性定理,设计了一类任意形状的热超空腔,其外部的等温线能够完全不受空腔内部物体的影响。研究者进一步通过2种自然材料的交替排列实现了理想化的参数,并进行了模拟和实验验证。继而,他们进一步实现了物体本身的隐身,并进行了模拟验证。这项工作不仅实现了热隐身斗篷、甚至是物体本身的不可见,同时还简化了任意形状热隐身斗篷所需要的复杂参数,为设计热隐身斗篷提供了不同的研究思路。

2 热对流

2.1 热学零折射隐身斗篷

热超构材料在热能管理方面展现出优越性,尤其是在温度场的控制上具有极高的准确性。但是,热超构材料的性能会受到热导率的约束,现有的热学器件使用的仍然是普通材料,与零折射率材料(图2(a)^[8])还有很大差距。此外,现有的理论还要求器件具有普通材料无法达到的热导率,这就使得普通材料很难与若干良导体(例如铜)协同工作。例如,在设计热隐身斗篷(图2(b)~图2(d)^[8])时需要找出热导率为背景热导率2.6倍的材料实现,如果背景材料为常用的铜,那么,普通材料将很难满足这一要求。这就要求在设计热超构材料时所使用的背景热导率不能太大,从而大大降低了传热速度,这也在很大程度上限制了热超构材料领域的发展。



(a) 为在光子晶体和热学中的零折射;(b)为双层热隐身斗篷的设计,其中外层热导率比背景热导率大得多;(c)显示在阴影部分的双层热隐身斗篷无法实现;(d)为热学零折射隐身斗篷,其中内层有效热导率趋于无穷大

图2 热学零折射超构材料的起源及其在热隐身斗篷中的作用
Fig. 2 Origin of thermal near-zero-index-materials and function in thermal cloak

为了解决这个问题,需要在热学领域中探讨可以使热导率无穷大的方法。Li等^[8]研究发现,光子学中的零折射率与热学中的无限大热导率是对应的,如图2(a)所示。基于此类比,研究者提出了一种利用热对流达到无限大热导率的方法,实现了材料的热学零折射率,如图2(d)所示。研究者首次将热对流引入热超构

材料领域,获得了新奇的等效热导率,从而能够进行高效的热管理。在此基础上,他们在流速较大的情况下,获得了热学零折射率材料。继而,他们理论设计并实验实现了一种可在任意背景热导率中工作的热学零折射率隐身斗篷。

这项研究解决了热隐身斗篷面临的一个巨大问题,并在热能利用、散热、温度传感等方面有潜在应用价值。同时,值得一提的是,2018年热隐身斗篷也继续向形状各向异性方向进行了拓展,并取得重要进展^[9]。

2.2 建立了变换热对流理论

除了热传导与热辐射,热对流也是一种基本的传热方式。在宏观运动的流体系统中,热量会随着流体分子转移到其他地方,从而产生热流,此即对流传热。另一方面,如果同时空间上温度分布也不均匀,就会产生扩散带来的传导热流,故而,这两种形式的传热会同时存在。热对流在生活中随处可见,小到电扇、空调等家居用品,大到大气、海洋、地幔等复杂系统中,都在发生热对流现象。要研究热对流,需要求解包括 Navier-Stokes 方程组、热流连续性方程、传热方程在内的一组复杂方程,这与热传导中只需要考虑传热方程形成鲜明对比。对流中同时存在能量与物质的空间转移,两种过程相互耦合,此时,若要调控热对流,则必须同时调控流体运动本身。然而,这很难,故而,目前热超构材料领域针对对流传热的调控少有研究。

Dai等^[10-11]研究发现,若多孔介质的达西流动模型中考虑对流传热,可以应用变换理论调控热流分布,其中达西定律代替了一般的 Navier-Stokes 方程。想象一个二维平面,其上有一矢量物理场,满足特定的物理规律(方程)。若使物理场反向,一个自然的想法是将二维平面进行反射变换,但问题是目前缺乏实际可行性。幸运的是,变换理论能够证明,如果该物理场满足的方程在空间变换下满足相同的形式,则可以根据一定的变换规则改变原空间上材料的相应属性,使产生的新物理场达到与空间变换相同的效果。Dai等^[10-11]研究了稳态和瞬态中的受迫对流传热和自然对流传热,设计出了相应的隐身斗篷(通过将部分空间映射成点使之与外部空间互不干扰)、聚集器(通过空间压缩变换增大场强)及旋转器(通过空间旋转变换扭曲矢量场),它们可以用于同时操控流体运动与热量流动(图3^[11])。基于变换理论的启示,结合工程上的优化技术,希望未来在对流传热的调控方面能有实际的应用。

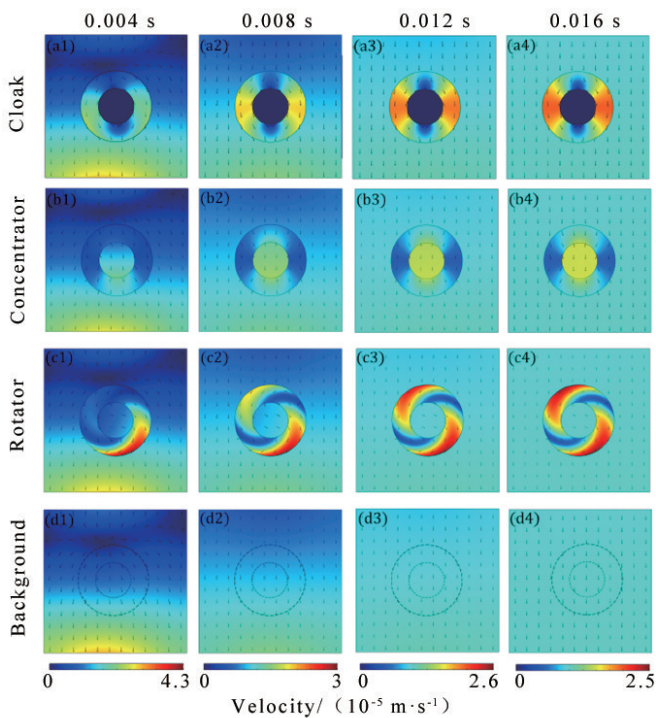


图3 瞬态对流中速度分布随着时间的演化

Fig. 3 Time evolution of velocity distribution in transient convection

2.3 反常对流传热现象

自然界中有许多不同类型的流体,它们能够显现不同的流动和传热特性,这就为热超构材料的设计提供了可能的新思路,但同时也为热超构材料的设计增加了难度。

Wang等^[12-14]通过研究不同流体在腔体内的流动与传热特性,发现空气、水、机油和水银等流体,在给定特定的物理条件下,会出现一些反常的流动或传热特性。

根据人类日常生活经验和直觉,当一个物体两边有恒定的温差时(例如左边40℃、右边20℃),物体越厚(两侧边距离越远),隔热效果就越好,即热从左边传到右边也就越慢。事实上,这个经验针对固态物体是正确的,但是当这个物体是装有流体的腔体时,这个直觉并不完全正确。Wang等^[12]研究发现,当给一个充满空气、水或机油的矩形腔体两侧边壁面恒定温差(例如左边40℃、右边20℃),其他壁面热绝缘时,在绝大多数时候,当腔体宽度越宽,从左边传到右边的热的确就越弱。但研究者通过调控腔体的高度发现,腔体在特定的高度下,随着腔体宽度的增大,在一定的宽度范围内,腔体的宽度越大,腔体的传热就越强。也就是说,距离越远,在单位时间内从左边传到右边的热就越多,

这与人的直觉经验相违背。此外,在特定的宽高比(宽度/高度)下还会出现负热导的现象,亦即出现了与左边高温右边低温相反的温度梯度的反转热传导现象,这也违背了人们的直觉。

另一方面,Wang等^[13]研究了水银液体的对流传热特性。研究者让一个充满水银的矩形腔体两侧边壁面温差恒定(例如左边40℃、右边20℃),且让其他壁面热绝缘,此时,研究发现水银液体的流动和传热特性与空气和水的完全不同,通过调节腔体的宽高比,在特定的高度下,增加腔体的宽度,腔体会出现“台阶”状的突变传热特性,也就是在某些特定的宽度,只要宽度微调,传热就会出现“台阶”状的突变;此外,还发现水银液体在不同的宽度会出现不同的涡旋流态。而与之不同的是,对空气和水,它们的流态随着宽度的增加,只会出现单涡旋状态。

根据人类生活经验,当给一个系统加热时,系统的平均温度会逐渐升高,直至达到某一温度后不再变化;但是,Wang等^[14]研究发现,在给具有约束条件的系统加热时,系统的平均温度不仅能够上升,而且出现反常的降低现象。

以上说明了流体传热的若干新奇特特性。可见,通过巧妙操控物理条件可以获得特定的热场或流场,这也就为对流隐身设计提供了新的思路。Dai等^[10-11]首次多孔介质中从蠕动流角度设计出了相应的对流热隐身特性,但仍有不足,离应用还有很长的一段路要走。在未来,如果人类可以真正自由地操控流体的“隐身”特性,使流体按照预先设定的路径运动,那么飞机可以在空中畅通无阻地飞行;台风对人类也将构不成伤害,甚至可以成为人类取之不尽、用之不竭的能源。

3 热辐射:从太阳和太空中同步收集能量

对于地球来说,太阳和外太空是两个最重要的热源和冷源。地球从太阳吸收能量,维持着地球的生态环境和地球上生物功能的正常运转。同时地球也向外太空释放多余的能量,以保持地球环境的稳定。身处地球上的人类,对太阳能的收集和利用也贯穿了人类整个漫长的文明进程。近年来,利用外太空这个冷源,将热量从地球向外太空进行辐射,从而获得制冷的效果,已引起科学界广泛的研究兴趣^[15-16]。然而,在同一器件上同时实现从这两个源收集或释放能量,迄今尚

未实现。这是因为,一方面,太阳能电池板或者太阳能热面板均在高于环境温度的条件下工作,不可能用来制冷;另一方面,目前实现辐射制冷需要设计反射电磁波的结构表面,从而不可能实现太阳光波能量的收集。

2018年,Chen等^[17]首次设计并实验验证了一种同时以太阳和外太空为源的工作装置,将太阳能技术和辐射制冷技术合二为一,从而为可再生能源的收集和利用开辟了一条新路。之所以称其为“新路”,是因为从热力学第二定律来说,理想热机的效率取决于高温热源与低温冷源的温度。以往收集可再生能源的工作方式,往往以单一的太阳或者外太空作为其中一个源,另一个源只能取地球。由于地球的温度(25℃)介于太阳(6000℃)和外太空(-270℃)之间,则其效率肯定低于直接以太阳和外太空作为热源和冷源的理想热机。那么,如果能实现同时从太阳和外太空收集能源,将能够提高可再生能源的利用效率,其应用前景很是诱人。

他们的制备方法如下:首先,将辐射制冷板装置放在真空腔中,腔上表面覆盖硒化锌透明窗口。硒化锌在8~13 μm大气透明窗口的穿透率极高,这正是辐射制冷器的工作波段。整个辐射制冷装置放置在这样的封闭环境中,并与外部环境实现热隔离,以实现最佳制冷效果。接着,在硒化锌透明窗口正上方放置太阳能吸收板,该板选用半导体材料锗。锗的选取是该器件能够工作的关键,因为它能高效吸收相关太阳能波段的光子,同时让底下辐射制冷器辐射的中红外波段的光子畅通无阻地通过。于是,上层的太阳能吸收板吸收太阳波段光子,下层的辐射制冷器向太空辐射中红外波段能量,彼此互不影响而又协同工作,实现了设计的初衷。光谱仪测实验证了其中的光子学设计。实验结果显示,在正午时,太阳能吸收板温度与环境温差达到最大,即24℃。而辐射制冷板在整个实验过程中始终低于环境温度25~30℃,这与实验预期一致。

该研究首次设计并实现了一种能够同时从太阳和外太空获取能量的器件。更为重要的是,给出了一种全新的提高可再生能源利用效率的思路,即将从自然界可获得的最髙温度和最低温度的源应用到同一个装置中,根据热力学第二定律,热机的工作效率(能量的转换效率)能实现最大化,这对可再生能源领域的研究有着深远影响。同时,值得提及的是,2018年还在结构增强热辐射方面取得了新的重要进展^[18],这对未来充分利用热辐射具有重要的意义。

4 应用:热超构材料应用设计与集成开发

随着热超构材料领域在过去10年的发展,采用热超构材料实现对热的控制日渐成熟。Dede等^[19]介绍了关于热流控制的基础实验研究,采用热隐身斗篷、热聚集、热旋转的基本构建模块,基于标准印刷电路板(PCB)的技术,拓展到各种电子应用中,包括设备温度控制、热能收集以及热电电路设计等。

首先是关于超薄印刷电路板的基本演示。根据热超构材料的设计结构要求,在508 μm厚的基板的正面和背面蚀刻铜质“纤维”,可以实现热隐身斗篷、热聚集器和热旋转器的功能。将这样的技术应用于多层印刷电路板的热流控制中,则可以实现更加适应需求的隔热效果、热能收集及热电电路设计。

具有特定结构的PCB很好地屏蔽了发热器件旁边的热敏器件如图4^[19-20]所示。在发热装置和温度敏感装置之间,利用热隐身斗篷防止直接的热联通。然后设置类似于热旋转器的迹线特征,从而将温度敏感装置周围的热量传递到PCB冷却器端。在电板的冷端,热聚集器则可以增强PCB最冷的部分与温度敏感设备之间的热联通。通过实验测量对比,可以发现热超构材料对于PCB的性能提升至关重要。

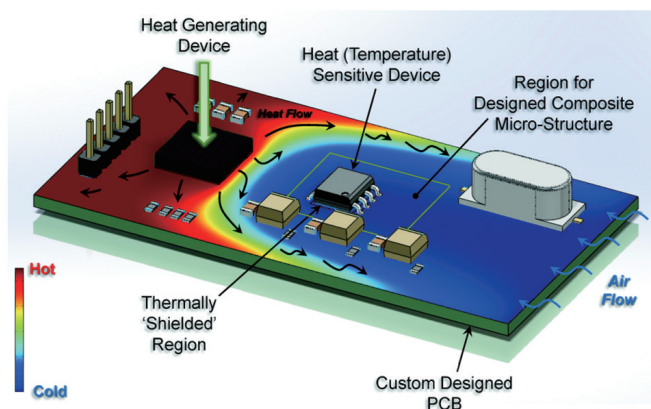


图4 采用热超构材料设计的标准印刷电路板

Fig. 4 Standard printed circuit board designed by using thermal metamaterials

热屏蔽可以很好地保护器件,而废热的收集则可以更加充分地利用热能。通过基线设计,在使用与传统工艺相同体积分数的铜的条件下,可以利用热隐身斗篷、热聚集和热旋转的结构,优化热源和汇聚处之间的热流,从而将热流更好地聚集在热电发电机处,结合高效的电源管理策略,可以很好地清除低等级废热,同

时对实现自动供电的超低功率远程无线传感系统颇有价值。

除此之外,热超构材料还可以应用于兼具电和热的双功能降压转换器电路。热隐身斗篷结构的热迹线可以使得来自一个器件的热量不容易向另一个器件传导,在相应区域构建热旋转器和热聚集器,可以将热量传递到电路板的冷却部分。改进PCB的电热迹线充当分布式元件低通滤波器,增加高频阻抗的同时可以降低频率偏移的低频阻抗。尽管仍有挑战,但热超构材料可以增强功能电路设计的传热性能,并为电性能改进提供新的机会,具有改善热响应和电响应的潜力,且为功率转换应用提供帮助。

Dede等^[19]所提到的宏观电子电路板,可以用于新兴的多功能结构复合材料、电子产品外壳等。而在微观层面上,声子传导、热光调谐光学器件等研究也正在如火如荼地开展之中。

热超构材料,尤其是热隐身斗篷、热旋转器、热聚集器对更快的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)电子器件、光电子器件和光子器件的需求都有所帮助;同时各向异性的热导结构可以促进下一代高功率密度器件的热管理,充当微机电系统中的动态可重构热流途径,实现先进的类脑(神经形态)计算,用于热计算布尔逻辑门等。

5 结论

由于热超构材料主要用于宏观热流的控制与利用,所以在超构材料中,相比电磁超构材料和声学超构材料等,热超构材料虽然出现得最晚,但是离应用却很近。以上盘点了7个研究热点,希望能够比较全面地反映该领域在2018年的主要进展,但是,囿于能力和篇幅,挂一漏万,在所难免。例如,利用自适应热源设计热隐身斗篷在2018年又有重要进展^[21],它为热隐身斗篷的实现提供了新的机制,并且为其应用提供了新的可能。此外,2018年出现的非线性热学也应该是一个不可忽视的方向,它立足于热导率依赖于温度的事实,类比于非线性光学,揭示了特定热超构表面中非线性增强与谐波产生现象^[22]。

展望未来,热超构材料显然会继续在热传导、热对流、热辐射3个方面取得更多进展,并终将在应用中发挥应有的作用。这里值得提及的是,已有的热传导相

关研究,主要聚焦于热导率的空间分布设计与制备,鉴此,如何基于自然材料的结构设计,以获得常规材料所不具有的等效热导率,也将一直是接下来的研究重点。再且,已有的与热对流相关的研究并不太多,但是2018年在热对流领域的研究已经初步显示了调控热对流对实现新奇性质或功能的重要作用^[8,10-11],接下来,有望在此方向取得更多进展,例如基于反常热对流现象设计新的功能器件。至于热辐射方面,无疑自2014年起^[15-16],日间辐射制冷一直是其中的一个研究热点,接下来也不例外,但更值得期待的则是其将会向工业化方向继续前进。

衷心希望此文能够起到抛砖引玉的作用,唤起更多读者的兴趣,在未来选择研究方向时能够多加考虑这个方向。有兴趣了解更多,不妨阅读《热超构材料十年简史》^[23]一文,其中介绍了热超构材料领域自2008年诞生^[24-25]以来,以及在2012年开始兴盛^[26-27]、2013年得名^[28]的历史发展脉络。

致谢 在本文撰写过程中,本研究组戴高乐、蒋超然、田博衍、王斌、王骏、须留钧和杨帅帮助整理了相关素材。

参考文献(References)

- [1] Li Y, Bai X, Yang T Z, et al. Structured thermal surface for radiative camouflage[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 273.
- [2] Hu R, Zhou S L, Li Y, et al. Illusion thermotics[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(22): 1707237.
- [3] Hu R, Huang S Y, Wang M, et al. Binary thermal encoding by energy shielding and harvesting units[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(5): 054032.
- [4] Xu L J, Yang S, Huang J P. Thermal theory for heterogeneously architected structure: Fundamentals and application[J]. *Physical Review E*, 2018, 98(5): 052128.
- [5] Xu L J, Huang J P. A transformation theory for camouflaging arbitrary heat sources[J]. *Physics Letters A*, 2018, 382(46): 3313.
- [6] Xu L J, Jiang C R, Huang J P. Heat-source transformation thermotics: From boundary-independent conduction to all-directional replication[J]. *European Physical Journal B*, 2018, 91(7): 166.
- [7] Xu L J, Wang R Z, Huang J P. Camouflage thermotics: A cavity without disturbing heat signatures outside[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(24): 245111.
- [8] Li Y, Zhu K J, Peng Y G, et al. Thermal meta-device in analogue of zero-index photonics[J]. *Nature Materials*, 2019, 18: 48-54.

- [9] Han T C, Yang P, Li Y, et al. Full-parameter omnidirectional thermal metadivices of anisotropic geometry[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(49): 1804019.
- [10] Dai G L, Shang J, Huang J P. Theory of transformation thermal convection for creeping flow in porous media: Cloaking, concentrating, and camouflage[J]. *Physical Review E*, 2018, 97(2): 022129.
- [11] Dai G L, Huang J P. A transient regime for transforming thermal convection: Cloaking, concentrating and rotating creeping flow and heat flux[J]. *Journal of Applied Physics* 2018, 124(23): 235103.
- [12] Wang B, Shih T M, Tian B, et al. Mildly zigzag heat transfer affected by aspect ratios for recirculating flows in rectangular enclosures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 372–378.
- [13] Wang B, Shih T M, Chen X W, Chang R R G, Wu C X. Cascade-like and cyclic heat transfer characteristics affected by enclosure aspect ratios for low Prandtl numbers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 131–140.
- [14] Wang B, Shih T M, Chen X W, et al. Anomalous cooling during transient heating processes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1253–1262.
- [15] Raman A P, Anoma M A, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight [J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540–544.
- [16] Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1062–1066.
- [17] Chen Z, Zhu L X, Li W, et al. Simultaneously and synergistically harvest energy from the sun and outer space[J]. *Joule*, 2018, 3: 1.
- [18] Ghashami M, Geng H Y, Kim T, et al. Precision measurement of phonon-polaritonic near-field energy transfer between macroscale planar structures under large thermal gradients[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(17): 175901.
- [19] Dede E M, Zhou F, Schmalenberg P, et al. Thermal metamaterials for heat flow control in electronics[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2018, 140(1): 010904.
- [20] Dede E M, Schmalenberg P, Nomura T, et al. Design of anisotropic thermal conductivity in multilayer printed circuit boards [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5(12): 1763–1774.
- [21] Guo J, Qu Z G. Thermal cloak with adaptive heat source to proactively manipulate temperature field in heat conduction process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1212–1222.
- [22] Dai G L, Shang J, Wang R Z, et al. Nonlinear thermotics: Nonlinearity enhancement and harmonic generation in thermal metasurfaces[J]. *The European Physical Journal B*, 2018, 91(3): 59.
- [23] 黄吉平. 热超构材料十年简史[J]. *物理*, 2018, 47(11): 685–694.
Huang Jiping. A brief history of ten years of thermal metamaterials[J]. *Physics*, 2018, 47(11): 685–694.
- [24] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 251907.
- [25] Chen T Y, Weng C N, Chen J S. Cloak for curvilinearly anisotropic media in conduction[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(11): 114103.
- [26] Guenneau S, Amra C, Veynante D. Transformation thermodynamics: Cloaking and concentrating heat flux[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 8207–8218.
- [27] Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(21): 214303.
- [28] Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics[J]. *Nature*, 2013, 503(7475): 209–217.

Seven hot research topics in thermal metamaterials in 2018

HUANG Jiping

Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract This paper reviews the overall research and development of thermal metamaterials in terms of thermal conduction, convection and radiation in 2018. We summarize in particular seven research topics, which are (1) efficient manipulation of thermal conduction by using structured surfaces, (2) theoretical establishment and application exploration of inhomogeneous thermal structure, (3) thermal cloak with thermal near-zero-index-materials, (4) establishment of transformation thermal convection theory, (5) abnormal phenomena of thermal convection, (6) thermal radiation: energy collection from the sun and the outer space, and (7) application design and integration development of thermal metamaterials. All these topics are related not only to fundamental research but also to application development.

Keywords transformation thermotics; thermal device; conduction; convection; radiation ●



(责任编辑 王志敏)