

热超构材料学：热学这棵老树绽放的新花*

刘周费¹ 黄吉平^{1,2,†}

(1 复旦大学物理学系 上海 200438)

(2 上海理工大学理学院 上海 200093)

2025-03-29 收到

† email: jphuang@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250902

CSTR: 32040.14.wl20250902

Thermal metamaterials: A new blossom on the ancient tree of thermotics

LIU Zhou-Fei¹ HUANG Ji-Ping^{1,2,†}

(1 Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China)

(2 College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

摘要 热学作为物理学的重要分支，其研究历史源远流长。虽然人们对热本质的认知已趋于完善，但在热流调控方面仍面临重大挑战，难以满足当前能源危机背景下日益增长的热管理需求。2008年，基于变换热学理论提出的稳态热隐身开创了热超构材料学这一新兴研究领域，为解决这一难题提供了全新的思路。经过17年的蓬勃发展，热超构材料学领域已取得丰硕成果。文章将系统介绍该领域的研究进展：从最初的热隐身研究，逐步拓展到热聚集、热伪装和热幻像等多种功能；从单纯的热流调控，发展到实现拓扑态等丰富物理效应；研究范畴也从热传导体系延伸至包含热对流和热辐射的复合系统，相继实现了非互易、非厄米等新奇物理效应。相关研究也催生了地下掩体红外热防护、日间辐射制冷等重要应用。作为“热学”这棵老树开出的新花，热超构材料学不仅在基础研究方面展现出独特价值，更为解决实际工程问题提供了全新的解决方案。

关键词 热超构材料，热隐身，拓扑，非互易，非厄米，日间辐射制冷

Abstract As an important branch of physics, the study of thermotics boasts a long and illustrious history. Despite the increasingly sophisticated understanding of the nature of heat, significant challenges persist in heat flow manipulation, making it difficult to meet the ever-growing demands for thermal management amidst the current energy crisis. In 2008, the advent of steady-state thermal cloaking based on transformation thermotics ushered in a new research field—thermal metamaterials, offering a novel approach to address this challenge. Seventeen years of vigorous development has witnessed fruitful results, which will be delineated in this article. Starting from initial studies on thermal cloaking, topics have gradually expanded to include diverse functionalities such as thermal concentrators, thermal camouflage, and thermal illusions. Now, transitioning from pure heat flow manipulation to the realization of rich physical effects such as topological states of matter, research has extended from purely conductive heat transfer systems to composite systems encompassing convective and radiative heat transfer, successively achieving exotic physical effects such as non-reciprocity and non-Hermiticity, and giving rise to important applications such as daytime radiative cooling. As a new blossom on the “old tree” of thermotics, thermal metamaterials not only demonstrate unique merit in basic

research but also provide innovative solutions to practical engineering problems.

Keywords thermal metamaterials, thermal cloak, topology, non-reciprocity, non-Hermiticity, daytime radiative cooling

1 引言

有人提起“燕京”，可能想到的是“啤酒”，然而，提起“啤酒”，更多人想到的却是“青岛”。类似地，在当今社会，提起“热学”，人们对对应想到的是“物理”，然而，提起“物理”，人们可能更多会想到的却是“量子”。

热学是物理学的一个重要部分，是研究热现象的理论^[1]。正如上文所言，提及物理学，人们往往会想到当前有关量子物理的研究。事实上，在经典物理中，也有许多重要的物理学理论，热学即是其中一个典型例子。作为一门古老的物理学分支，热学的研究历史可以追溯至古希腊哲学家毕达哥拉斯在大约公元前500年提出的四元素(土、水、火、气)说。18世纪中叶，蒸汽机的发明使得人们开始了第一次工业革命，也推动了热学成为一门系统的科学理论。到了19世纪中叶，人们开始关注热的微观本质，从而推动了统计物理学的建立。当前，尽管人们已经对热现象有了非常深入的理解，但在热调控方面仍存在巨大的挑战。这是因为传统材料对热的调控主要依赖于其自身的物理特性，这种单一的调控方式在面对复杂多变的环境条件时已显得捉襟见肘。然而在现代社会中，能源危机问题使得对热的调控越来越重要，因此人们迫切需要一种新型的材料来满足日益严格的热管理要求。

超构材料是一种能够实现自然材料所不具备的新奇现象和功能的人工结构材料，其起源于1968年提出的“负折射率”的概念^[2]。由负折射率材料制成的平板具备成像特性，它能使物体发出的光线在经过该平板的前、后界面各发生一次折射后，重新聚焦于一点，从而实现成像的功能。

这种违背直觉的现象是自然界中常见材料所无法展现的，唯有通过人工精心设计的超构材料才能实现。

提起“隐身”，人们往往想到哈利·波特的隐形斗篷，而在物理学中，科学家们正通过超构材料，让物体实现真正的“隐身”。2006年，Leonhardt^[3]和Pendry等人^[4]分别独立地利用变换光学理论，设计出一种创新的光学隐身装置。这种超构材料能够有效屏蔽外部光场或电磁场的干扰，使得隐藏于其中的物体无法被外界探测到。受光学隐身技术的启发，复旦大学的一个研究团队于2008年提出了稳态变换热学理论^[5]，并据此设计出了热隐身装置(即一种能够使物体在红外热成像仪探测下实现“隐身”效果的装置，同时对背景温度场不会有任何扰动)，这一成果标志着热超构材料研究领域的正式开启^[6-12]。相较于传统材料，热超构材料能够灵活地调控热流，并能满足各种复杂环境的热管理需求。近17年来，科研人员成功设计出了多种多样的热超构材料器件，极大地推动了热超构材料学的蓬勃发展，使其成为了当前物理学、材料科学以及工程热物理领域的研究热点之一^[6-16]。这些热超构材料不仅具备实现多样化热学功能的能力，还作为一个强大的平台，促进了各种物理效应的实现，并因此催生了众多实际应用。

本文旨在根据热传递的三种基本方式——传导、对流和辐射，来综述热超构材料领域的研究进展。鉴于热超构材料最初起源于对热传导的调控，文章将首先聚焦于传导热超构材料的研究成果。随后，随着研究的深入，热对流和热辐射也被整合进热超构材料的设计中，极大地拓宽了这一领域的研究范畴。因此，在接下来的两个章节中，本文将分别阐述对流热超构材料和辐射热超构材料的最新进展。最后，文章将对热超构材料的未来发展进行展望。

* 国家自然科学基金(批准号: 12035004; 12320101004)、上海市教育委员会(批准号: 2023ZKZD06)、中国博士后科学基金会(批准号: GZB20250775)资助项目

2 传导热超构材料

作为最基本的传热方式,热传导是指当物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能传递,其发生在所有介质中。热超构材料的研究起源于2008年Fan等人^[5]设计的适用于稳态(控制方程不含时间项)热传导的热隐身。在这之后,越来越多的热超构材料被人们设计或制备出来,例如热聚集、热伪装以及热幻像。近年来,人们也利用热超构材料去揭示一些拓扑物理的现象。

2.1 热隐身

热隐身是指一种能够保护其内部的物体免受背景温度场干扰,同时该物体不会对背景温度场产生任何扰动的超构材料,如图1所示。设计热隐身的方法基于变换热学理论,接下来将简要介绍该理论。对于稳态无源的傅里叶热传导方程,其在任意坐标变换下的数学形式保持不变。如果初始物理空间中存在沿某个方向的热流,且为了实现某种功能需要对该物理空间进行弯曲,则热流方向也会根据形式不变性相应发生改变。这种空间变换实际上可以转化为材料参数的变化,从而在初始物理空间中也能观察到相同的热流调控效应。这里以热导率为例,变化之后的热导率张量 κ' 和初始热导率张量 κ 之间的关系为

$$\kappa' = \frac{J\kappa J^T}{\det J}, \quad (1)$$

其中 J 为坐标变换的雅可比矩阵, T 表示矩阵转置, $\det$ 表示矩阵的行列式。

经过17年的发展,变换热学理论及其设计的热隐身装置已经不断地被丰富和完善。与Fan等人^[5]研究的各向同性背景材料不同,2008年,Chen等人^[17]在各向异性的背景材料中基于变换理论实现了稳态热隐身装置。以上考虑的是稳态的情况,但更多情况下控制方程需包含时间项,即瞬态的情况。2012年,Guenneau等人^[18]将变换理论推广至瞬态传热体系,设计了瞬态情况下的热

隐身装置。此时除了热导率张量之外,密度热容积也需要进行相应的变换。若密度热容积不进行相应的变换,则会使热隐身器被探测到^[19]。目前,这个研究仍局限于理论层面,尚未实现实验上的热隐身效果。同年,Narayana和Sato^[20]设计了由两种不同材料交替构成的多层结构,根据有效介质理论其热导率为各向异性,并在实验上验证了稳态下的热隐身。与前述工作不同,2013年,Schittny等人^[21]通过在中层铜环结构的不同层中钻不同大小的孔,并在这些孔中填充聚二甲基硅氧烷(PDMS),从而实现了各向异性的热导率,并在实验上验证了瞬态下的热隐身。以上的讨论都是限制在热导率为线性的情况,即热导率不随温度变化。2015年,Li等人^[22]提出了基于非线性热导率(即热导率随温度变化)的变换热学理论,并根据非线性设计了可开关的热隐身装置以及制备了

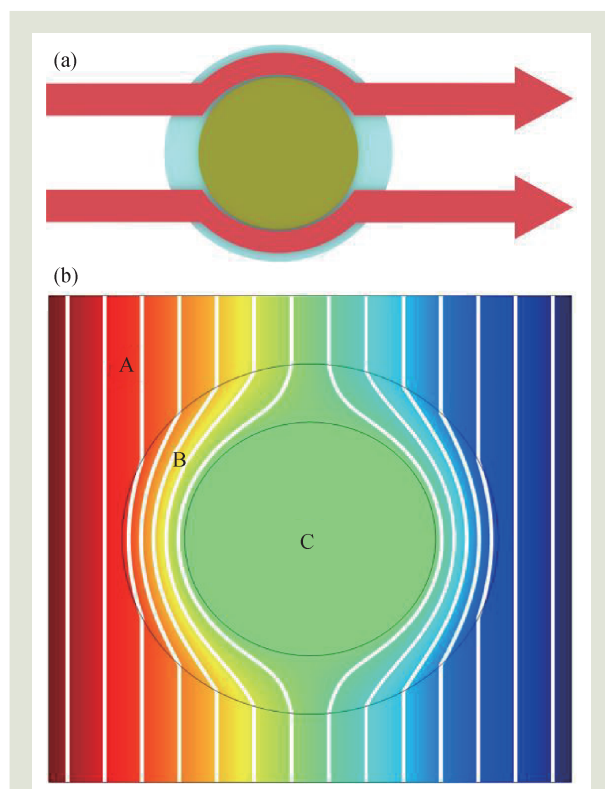


图1 热隐身 (a)热流示意图;(b)温度场分布。其中,A代表背景区域,B代表变换区域,即基于变换理论所设计的热隐身装置,C代表功能区域,即热隐身所屏蔽的区域。图中的左边界和右边界分别代表高低温热源,彩色代表温度分布,白色曲线代表等温线,图中的上边界和下边界设置了绝热条件

宏观热二极管。当边界条件固定时,热隐身可以保证其中心功能区域的温度不变,如图1(b)的C区域所示。但是,当边界条件改变时该温度就会发生变化。为了解决这一问题,2016年,Shen等人^[23]利用非线性材料设计了零能耗的恒温器,该装置保证了中心区域的温度不受环境温度的影响。当前,变换热学理论及其设计的热隐身装置发展得较为成熟,相关内容已经被写进了面向本科生的传热学教材^[24]。

变换热学理论要求热导率参数满足各向异性、非均匀性和奇异性(热导率接近于零或无穷大)的特点,这给热超构材料的制备带来了很大的困难。2014年,Han等人^[25]通过直接求解稳态热传导方程设计了由各向同性材料构造的双层热隐身装置。这一方法被称为散射相消理论,其核心思想是当两种不同热导率的材料组合出的等效热导率与背景热导率相同时,背景区域的等温线不会出现扰动。该方法弥补了变换热学理论的不足,使得热

隐身的制备更为便捷。

2.2 热聚集

热隐身的本质是在不影响背景温度场的情况下减小中心区域的热通量。而作为另一种重要的热超构材料,热聚集可以在不影响背景温度场的情况下增强中心区域的热通量,这有助于热能的收集和存储,如图2所示。2011年,Yu等人^[26]基于稳态情况下的变换热学理论设计了方形的热聚集器,这是此类装置的首次提出。其后在2012年,Guenneau等人^[18]设计了瞬态情况下圆形的热聚集器装置。同年,Narayana和Sato^[20]利用多层结构在实验上实现了稳态情况下的热聚集器。与热隐身类似,热聚集器的设计同样可以拓展到热导率为非线性的情况。2016年,Li等人^[27]基于非线性变换热学理论设计了可开关的热聚集器。同年,Shen等人^[28]利用具有非线性热导率的形状记忆合金,在实验上实现了随着环境温度变化在热隐身和热聚集之间切换的装置。近几年来,一些新奇的特殊结构同样可以实现热聚集功能。2023年,Jin等人^[29]通过对外部压强的调节在固液混合热超构材料实验中实现了热隐身和热聚集之间的切换。2025年,Tan等人^[30]利用扩展平面结构设计了热聚集器,可以显著提升热电转换效率。

2.3 热伪装和热幻像

热隐身只能做到让中心区域的物体不被红外成像仪检测到,在更多情况下,我们需要让探测到的物体的热学信号变为其他物体的热学信号。若能实现这样的热超构材料,则会在军事和工业等领域大有可为。热伪装是一种能够屏蔽原始物体的热学信号,使得在温度场中只能探测到期望物体热学信号的超构材料,如图3(a)所示。2014年,Han等人^[31]在其先前利用散射相消理论制备的稳态双层热隐身装置周围放置期望物体,则只能在温度场中探测到期望物体,这种热超构材料被称为热伪装。由于稳态热传导方程和电传导方程在数学形式上的相似性,2015年,Yang等人^[32]

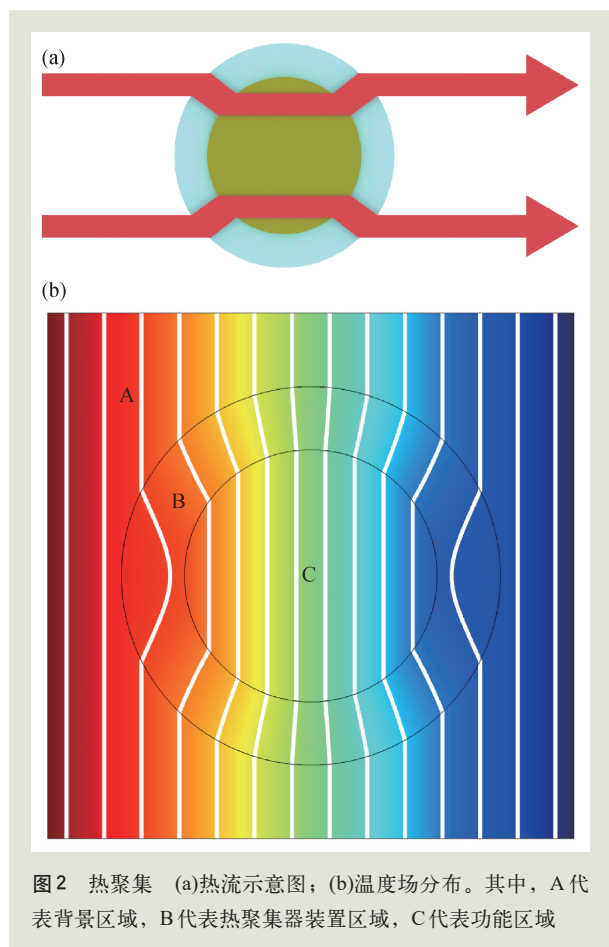


图2 热聚集 (a)热流示意图;(b)温度场分布。其中,A代表背景区域,B代表热聚集器装置区域,C代表功能区域

将稳态热伪装装置推广到了热电双场中。除了稳态，2016年，Yang等人^[33]实现了瞬态的热伪装装置。一些其他的特殊结构也能实现热伪装功能。2018年，Wang等人^[34]利用多颗粒结构实现了热伪装装置。然而，热伪装并不能将原始物体的热学信号转变为其他物体的热学信号。热幻像是一种能够将初始热源的热学信号转变为其他热学信号的超构材料，如图3(b)所示。2015年，Chen等人^[35]基于变换热学理论设计了热幻像装置，其能使一个物体展现出另一个物体的热学信号。2018年，Hu等人^[36]实验制备了能够使装置内部的一个初始热源看起来像四个热源的热幻像器，同时该装置外部的热学信号保持不变。

2.4 拓扑热学

拓扑物理是当今物理学界的前沿热点之一。拓扑本身是一门研究图形在连续变形下不变性质的数学分支，20世纪80年代被引入了物理学的研究中^[37]。近几十年来，大量的拓扑物相被理论预言，但在自然材料中得到实验验证的却并不多。后来人们想到利用人工材料去模拟这些拓扑物相，例如光子晶体、声子晶体、电学回路、冷原子等。近几年来，人们发现也可以利用热超构材料去实现拓扑物态，从而催生了一个新的前沿交叉研究方向——“拓扑热学”^[38]。拓扑热学的基本原理是经典热扩散方程和量子力学中的薛定谔方程 $i\partial_t\psi = \hat{H}\psi$ 在数学形式上的相似性，即热扩散方程可以写成如下的形式：

$$i\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \hat{H}\mathbf{T}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{T}$ 代表温度场矢量， $\hat{H}$ 代表等效哈密顿量。唯一的区别在于薛定谔方程中的哈密顿量一般是厄米的，而热扩散方程中的等效哈密顿量是反厄米的，出现这一现象的原因是热学系统的天然耗散性。作为拓扑热学的首篇论文，2021年，Xu等人^[39]在热超构材料中研究了拓扑几何相。同年，Yoshida和Hatsugai^[40]从理论上研究了热学版本的一维 Su—Schrieffer—Heeger (SSH) 模型，并指出可以通过测量温度场演化来判断系统是否存在拓

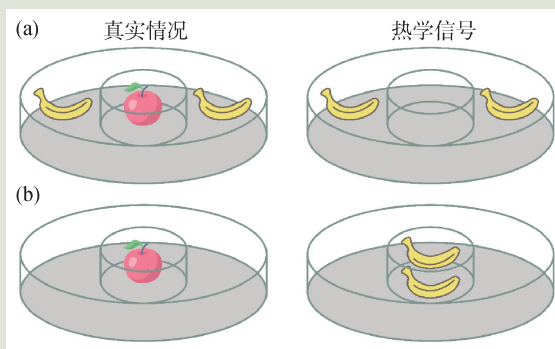


图3 (a)热伪装示意图：当一个苹果被伪装装置所覆盖时，在温度场中只能探测到装置周围的两根香蕉；(b)热幻像示意图：当一个苹果位于幻像装置中，在温度场中会探测到装置中出现两根香蕉。图中苹果和香蕉只是起到一个示意的作用

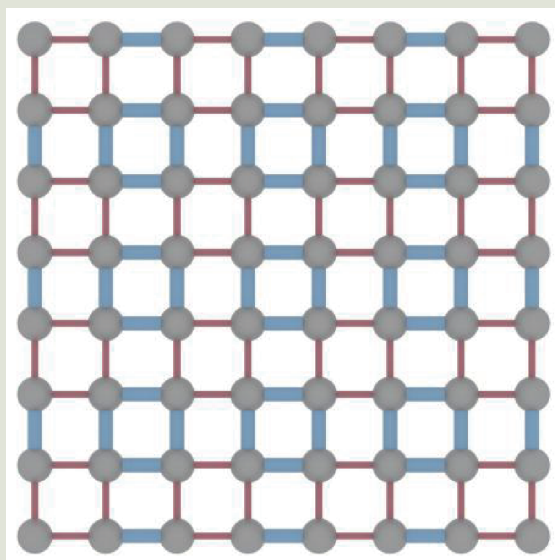


图4 球棒结构示意图。其中，红色和蓝色棒的半径不同；在模拟凝聚态物理中的紧束缚模型时，球体对应晶格格点，棒的不同半径导致其热扩散率存在差异，进而对应格点间的耦合强度存在差异

扑边缘态，即类似于高速公路的专用车道，热量只能在材料边缘特定路径中无损耗传输的状态。2022年，Hu等人^[41]在实验上实现了该热学一维 SSH 模型。但是，热学的拓扑理论有两个限制。第一个是温度场本质是连续的，而先前工作所基于的都是空间离散的紧束缚模型。因此，同年 Qi 等人^[42]提出了连续的一维热拓扑理论。第二个是目前的工作仅限于一维情况。因此，2024年 Liu 等人^[43]在热传导系统中实现了二维 SSH 模型，他们基于的是如图4所示的球棒结构。尽管只诞生

了几年, 拓扑热学已经成为热超构材料领域的重点发展方向。

2.5 其他传导热超构材料

以上讨论的热超构材料改变的只是中心区域热流的强度, 其方向并未改变。热旋转是一种能够使中心功能区域的热流方向改变, 但大小不变的热超构材料, 如图5所示。2012年, Narayana和Sato^[20]利用多层结构设计了稳态情况下的热旋转器。除了稳态, 2013年, Guenneau和Amra^[44]利用变换热学理论设计了瞬态情况下的热旋转器。然而, 这两种热旋转器并不具备智能性。因为根据变换热学理论其热导率依赖于背景材料的热导率, 而如果背景材料发生变化, 则原来热旋转器的功能将失效。为了解决这一问题, 2020年, Yang等人^[45]利用极端各向异性材料设计了可以适应环境变化的智能热旋转器, 其特性与变色龙类

似, 因此该装置也被称为类变色龙热超构材料。

在一个装置中同时调控热场与电场也是一个非常重要的研究方向。由于稳态热传导方程和电传导方程在数学形式上的相似性, 2010年, Li等人^[46]首先基于变换理论设计了热电双场的隐身器。2014年, Ma等人^[47]在实验中实现了一个装置中同时出现热隐身和电隐身。然而, 以上的工作认为热场和电场是解耦的, 而实际情况下热场与电场会发生耦合, 即出现塞贝克效应。2017年, Stedman和Woods^[48]基于变换理论设计了存在热电耦合的隐身器, 此时塞贝克系数亦需进行坐标变换。2021年, Lei等人^[49]将上述工作推广到了热导率和电导率为非线性的情况。

利用解析理论设计热超构材料在面对不规则几何形状和不对称边界条件时会遇到极大的挑战。因此人们想到了利用数值优化方法来设计热超构材料, 其是一种逆向设计。当前用到的优化方法主要有以下三种。第一种是拓扑优化算法。2018年, Fujii等人^[50]利用拓扑优化方法设计了稳态的热隐身, 其中只用到了两种自然材料。2019年他们又利用该方法设计了热电双场的隐身器^[51], 以及在2020年设计了可以在隐身与聚集之间切换的双功能器件^[52]。然而, 以上的这些优化方法需要提前知道背景温度场, 这大大限制了装置的灵活性。因此在2021年, Sha等人^[53]根据局域热导率张量利用拓扑优化方法设计了拓扑功能单元, 然后根据所要实现的热学功能将这些单元组装在一起, 制备需要的热超构材料。第二种是粒子群优化算法。2021年, Jin等人^[54]采用粒子群优化算法设计了双层热传感器。第三种是机器学习算法。2022年, Ji等人^[55]采用深度学习算法设计出了多层的热隐身装置。2024年, Jin等人^[56]利用深度学习算法设计出了新型活性超构材料, 可稳定调控热信号并显著提升热电转换效率。

3 对流热超构材料

作为另一种重要的传热方式, 热对流是指由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移, 冷、热流体相互掺混所导致的热量传

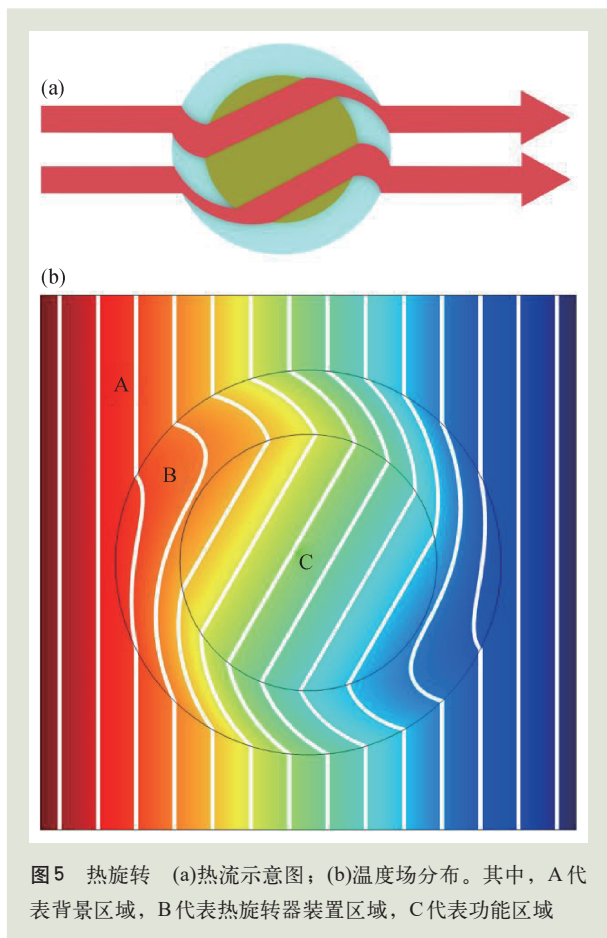


图5 热旋转 (a)热流示意图; (b)温度场分布。其中, A代表背景区域, B代表热旋转器装置区域, C代表功能区域

递过程。近几年来,越来越多的研究将热对流引入了热超构材料的设计之中,从而实现了原来传导热超构材料所不能实现的物理现象。本章将重点介绍两个利用对流热超构材料实现的新奇物理现象:热非互易和热非厄米。同时,本章也将介绍一些其他的对流热超构材料。

3.1 热非互易

热非互易性(即当热流分别沿正向与反向路径传播时,会展现出大小不同的独特现象)的实现源于热对流具有一定的方向性。目前利用热对流实现热非互易的方式主要有两种。第一种方法是时空调制,即对材料参数同时进行空间(体现在图6(a)中的非均匀ABAB结构)和时间(体现在图6(a)中的对流 v_0)调制,从而使等效热学参数在不同方向上具有差异,该方法由Torrent等人^[57]在2018年提出。2020年,Camacho等人^[58]在电荷扩散系统实验中实现了这种时空调制的非互易性。随后在2022年,Xu等人^[59, 60]在时空热超构材料中揭示了扩散非索拖曳现象,即热流向前和向后的传播速度不同。然而,由于在连续介质中质量守恒,Li等人^[61]在2022年发现时空调制并不会打破热互易性,除非施加外源从而使质量不守恒。

第二种方法是利用角向偏置的三端口环,即该环具有一定的转速,如图6(b)所示。受到声学中相关研究^[62]的启发,2021年,Xu等人^[63]首先在热学中设计了角动量偏置的三端口转动环。当转速达到一定值时,热流只在一个端口输出,而在另一个端口禁止。2024年,Ju等人^[64]通过建立热散射理论详细研究了工作于稳态和瞬态的三端口热环形器。同年,Qiu等人^[65]在原来流体转动环的内部插入一个固体转动环,其可以实现整流比接近于1的非互易性,同时该高整流比能够在不同的端口位置和环形器半径下保持不变。

3.2 热非厄米

非厄米物理是当今物理学领域的前沿热点之一^[66]。描述一个封闭系统的哈密顿量是厄米的,

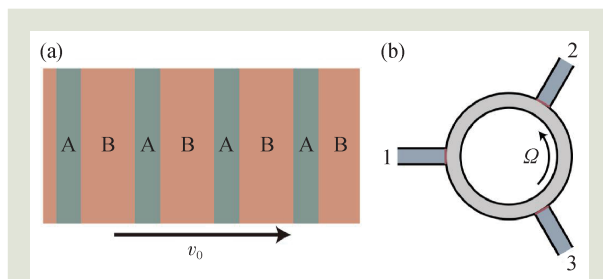


图6 利用热对流实现热非互易性的两种途径 (a)对材料参数进行时空调制的示意图,其中 v_0 代表时间调制的对流速度;(b)三端口角动量偏置环的示意图,其中 Ω 代表环的转速

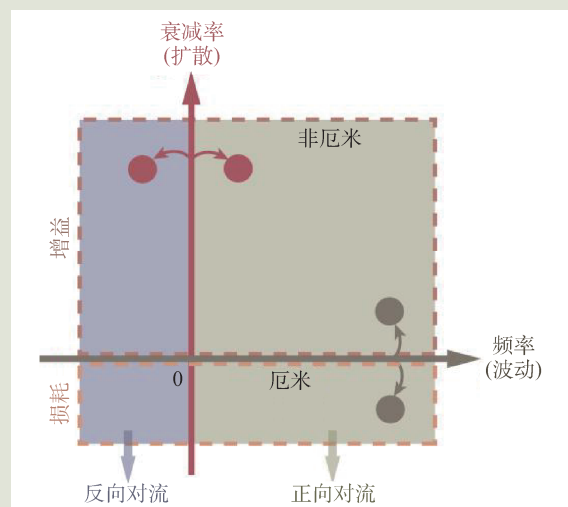
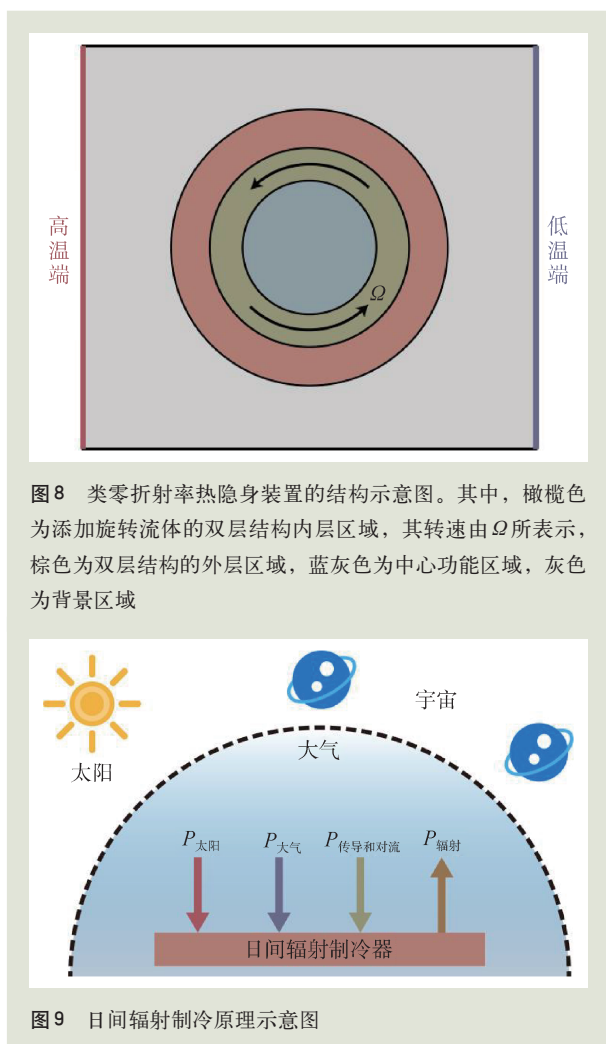


图7 两种实现非厄米物理的途径:在波动系统中引入增益和损耗,以及在扩散系统中引入一对方向相反的对流

即 $H = H^\dagger$ 。当系统与环境有能量的交换时,描述该开放系统的等效哈密顿量是非厄米的,即 $H \neq H^\dagger$ 。因此,对于波动系统,可以通过添加增益或损耗的方式来引入非厄米物理,如图7所示。同时对于本身就与环境有能量交换的热学系统,可以通过引入一对方向相反的对流来实现非厄米物理,该方法由Li等人^[67]在2019年提出。非厄米物理中一个很重要的概念是奇异点,若环绕其做积分会得到该点的拓扑荷。2021年,两个研究团队^[39, 68]先后独立地通过施加时间调制的对流,实现了热学奇异点的动态环绕。2022年,Xu等人^[69]通过增加对流空间维度的方法实现了热学版本的三维外尔奇异环,即由无数奇异点组成的环。非厄米与拓扑的结合也是当今物理学的重点发展方向。目前也有相当一部分的工作在对流热超构材料中实现了非厄米拓扑效应。2022年,Xu等人^[70]



通过周期调制对流设计了等效热晶格，从而实现热学一维非厄米拓扑绝缘体。2023年，Xu等人^[71]将以上工作推广到了二维情况，实现了具有四极子的热学非厄米高阶拓扑绝缘体，其具有拓扑角态。以上考虑的都是周期系统，而2024年，Gao等人^[72]通过对流中引入无序实现了热学的非厄米拓扑安德森绝缘体，其在无序强度足够大时会进入拓扑非平庸相。同年，Liu等人^[73, 74]通过对流进行准周期调制实现了热学的非厄米准晶，其温度场中存在扩展—局域相变现象。

3.3 其他对流热超构材料

除了实现非互易和非厄米之外，热对流作为一个灵活可调的自由度可以用来调节系统的等效热导率。2019年，Li等人^[75]通过在双层结构的内

层中添加转速极大的旋转流体实现了类比光学中零折射率的热隐身装置，其具有无穷大的等效热导率，如图8所示。然而，由于流体具有一定的粘度和不均匀性，当转速较小时该装置对等效热导率的调节会失效。为了解决这一困难，2020年，Xu等人^[76]通过在双层环的内部添加旋转的固液混合物构造了一种可调类比(tunable analog)热超构材料，其可以实现从零到无穷大等效热导率之间的灵活调节。该工作实现的等效热导率是一个各向异性的张量。同年，Li等人^[77]通过添加另外一个旋转层实现了一个由对流诱导的类固热超构材料，其等效热导率是一个实数并能在很大的范围内进行调节。同年，他们也把这种结构推广到了多层的情况^[78]。

将热对流引入热超构材料的研究中会面临一个很大的困难，即变换理论的适用性问题。事实上，支配流体的纳维—斯托克斯方程并不满足坐标变换下的形式不变性。为了满足形式不变性，2018年Dai等人^[79]采用适用于多孔介质中流体的达西(Darcy)定律来构造稳态的变换热对流理论。同年，他们又将该理论推广到了瞬态的情况^[80]。2023年，Jin等人^[29]在固液混合热超构材料中验证了该理论的准确性，并揭示了潜在的拓扑结构相变。

4 辐射热超构材料

作为第三种热传递方式，热辐射是一种物体以电磁波的形式传递能量的过程，由斯特藩—玻尔兹曼定律所描述。近十几年来，热辐射也被引入了超构材料的研究之中，其中最重要的便是其在日间辐射制冷方面的应用，这也是本章将重点介绍的内容。同时，本章也将介绍一些其他的辐射热超构材料。

4.1 日间辐射制冷

辐射制冷指的是一种通过热辐射将热量从物体表面传递到外部空间的冷却方式，其不需要外部能量的输入。很长时间内，人们认为辐射制冷

只能在夜间起效，白天由于太阳光的加热会大大限制制冷的效果。如图9所示，只有当通过热辐射向外散发的能量大于从太阳辐射吸收的能量、从大气辐射吸收的能量以及与环境通过热传导和热对流吸收的能量之和时，辐射制冷才会在日间起效，要做到这一点非常困难。2014年，Raman等人^[81]通过设计超构材料使0.3—2.5 μm波段范围(对应太阳辐射波长)内的吸收率和发射率尽可能小，而在8—13 μm波段范围(对应大气辐射窗口)内的吸收率和发射率尽可能大，从而实现了日间的辐射制冷。然而，这种材料的制备过程非常复杂，不利于大规模的生产应用。为了解决这一困难，2017年，Zhai等人^[82]通过在聚合物中掺杂随机分布的SiO₂颗粒同样实现了很高的制冷功率，这种材料制备过程比较简单，有利于大规模商业应用。以上的工作均要求辐射制冷器具有开阔的水平表面，从而最大限度地向天空辐射热能。2024年，Xie等人^[83]设计出了一种角度非对称的光谱选择性热发射器，该装置能够用于竖直表面的日间辐射制冷。

4.2 其他辐射热超构材料

类似于热对流，若要将热辐射引入热超构材料需要建立包含热辐射的变换理论。2020年，Xu等人^[84]基于Rosseland扩散近似建立了包含热辐射和热传导的多热场变换理论，并设计了相应的热隐身、热聚集和热旋转器件。所谓的Rosseland扩散近似是指当光子的平均自由程远小于材料厚度时，辐射热流 j_{rad} 可以简化为如下的形式：

$$j_{\text{rad}} = \alpha T^3 \cdot \nabla T, \quad (3)$$

其中 α 为与温度 T 无关的比例系数。可以看到辐射热流正比于温度梯度 ∇T ，因此Rosseland扩散近似也被称为辐射傅里叶定律。基于此工作，同年他们建立了同时包含传导、对流和辐射的全热场变换理论，并用其设计了相应的热学器件^[85]。

热伪装是热超构材料的一个重要功能。然而，该功能的实现往往是在一个平面当中，而热信号在大多数情况下是在平面外通过热辐射进行探测的，此时热伪装会失效。2018年，Li等人^[86]利用

变换理论设计了一种结构热表面，其可以在给定背景下对内部物体进行辐射伪装。基于此工作，2020年，Peng等人^[87]设计了一种适用于大角度的全景辐射热伪装器。类似于热伪装，在热幻像器中同样需要考虑热辐射的作用。特别是，尽管在红外辐射成像仪中可以观察到热幻像的效果，但是在可见光下仍然能将这不同的结构分辨出来。2020年，Wang等人^[88]采用辐射腔结构单元，设计出一种具备全热场特性的可重构超构表面，通过精准调节辐射腔的半径与高度，能够实现预期的幻像效果，如图10所示。2023年，Jin等人^[89]利用这种辐射腔结构单元实现了虚拟物体的热学信号生成，其能够用于模拟现实技术之中。

5 总结与展望

作为“热学”这棵老树开出的新花，热超构材料学虽然只诞生了17年，但其已经取得了显著的进展。本文综述了热超构材料领域的关键研究成果，重点探讨了其展现出的新颖功能(如热隐身、热聚集、热伪装和热幻像)、新型物理特性(包括热拓扑态、热非互易性和热非厄米性)以及创新应用(例如日间辐射制冷)。基于当前的研究趋势，我们有充分的理由相信热超构材料将在未来迎来更为广阔的发展前景。因此，下面将对该领域的未来发展方向进行展望。

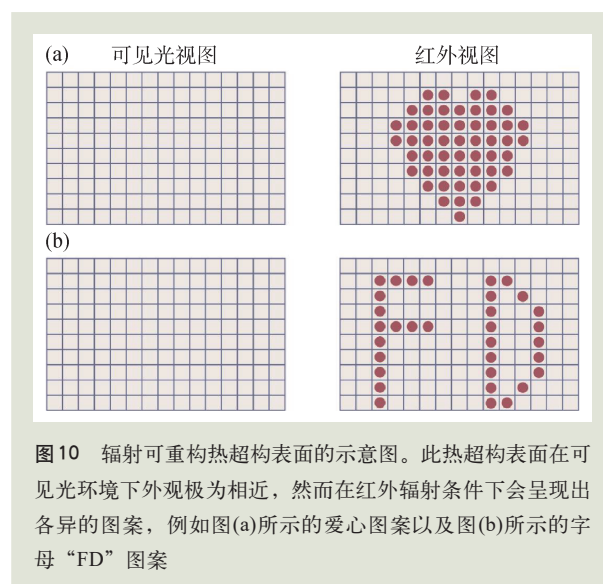


图10 辐射可重构热超构表面的示意图。此热超构表面在可见光环境下外观极为相近，然而在红外辐射条件下会呈现出各异的图案，例如图(a)所示的爱心图案以及图(b)所示的字母“FD”图案

当前设计热超构材料的主流理论方法是变换理论及其扩展理论。然而,变换理论在处理不规则几何或三维情况时会遇到很大的困难,因此亟需发展一套普适的设计热超构材料的解析理论^[90]。与此同时,近年来人工智能技术呈现出迅猛的发展态势,该技术同样能够应用于热超构材料的灵活设计环节,进而有效提升设计效率与精度^[91, 92]。

作为一种灵活可调的人工材料,热超构材料是一个实现多种物理效应的理想平台。除了前文所述的时空调制和角动量偏置之外,设计非对称结构即可非常便捷地实现热学非互易性^[93]。一些在凝聚态物理中较难实现的量子效应,例如热霍尔效应^[94]和安德森局域化效应^[73, 74]等,也可以在热超构材料中非常方便地实现。

从控制方程角度看,超构材料可以分为两个成熟的大类,即波动超构材料和扩散超构材料——它们的控制方程分别是波动方程和扩散方程。本文介绍的热超构材料属于扩散超构材料。除了热超构材料之外,扩散超构材料还包括颗粒扩散超构材料、等离子体扩散超构材料,等等。鉴于控制方程存在的相似性,热超构材料的研究成果同样适用于推动其他类型扩散超构材料的研究^[95, 96]。

热超构材料在国防军事、工业生产和日常生

活等各方面皆具有应用价值。例如,在国防方面,热隐身器可以用于地下掩体的红外热隐身技术^[97—100],这些掩体中可以存放战斗机、坦克等装备,从而免于被敌方探测到其热学信号,这在国防中有着极高的应用价值;在工业方面,热超构材料可以用于电子元件领域^[101—103],特别是具有高衰减率的热学拓扑边缘态可以用于提高散热效率,以及非互易热超构材料,可以用于热整流从而设计热二极管;在日常生活方面,利用非线性材料设计的零能耗恒温热超构材料可以用于食物和药物的恒温存储和运输^[104],以及用于日间辐射制冷^[81—83]。令人振奋的是,此处列举的诸多应用实例,距离实际落地实施已近在咫尺,甚至有些已经成功实现,如热隐身技术^[100]和日间辐射制冷技术^[82]等。

最后,值得一并提及的是,在热超构材料学领域, *Frontiers of Physics* 期刊近期发表了一篇路线图文章^[105]。该文章汇聚了来自25个子学科、中外35家机构的50余位专家的专业见解与研究成果,对该领域的研究进展进行了全面且系统的总结,为读者勾勒出一幅充满创新活力与发展机遇的科研全景图。倘若读者认为本文在深度和广度上尚有不足,那么这篇路线图文章不失为一个极具价值的参考选择。

参考文献

- [1] 李椿,章立源,钱尚武. 热学(第三版). 北京:高等教育出版社, 2015
- [2] Veselago V G. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, 10:509
- [3] Leonhardt U. *Science*, 2006, 312:1777
- [4] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. *Science*, 2006, 312:1780
- [5] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:251907
- [6] Zhang Z, Xu L, Qu T *et al.* *Nat. Rev. Phys.*, 2023, 5:218
- [7] Yang F, Zhang Z, Xu L *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2024, 96:015002
- [8] Yang F B, Huang J P. *Diffusionics: Diffusion Process Controlled by Diffusion Metamaterials*. Singapore: Springer, 2024
- [9] Yang S, Wang J, Dai G *et al.* *Phys. Rep.*, 2021, 908:1
- [10] Xu L J, Huang J P. *Transformation Thermotics and Extended Theories: Inside and Outside Metamaterials*. Singapore: Springer, 2023
- [11] Huang J P. *Theoretical Thermotics: Transformation Thermotics and Extended Theories for Thermal Metamaterials*. Singapore:

Springer, 2020

- [12] 黄吉平. 热能调控技术:基于变换热学等热超构材料理论的设计、仿真与实验. 北京:高等教育出版社, 2021
- [13] Li Y, Li W, Han T *et al.* *Nat. Rev. Mater.*, 2021, 6:488
- [14] Fan C, Wu C L, Wang Y *et al.* *Phys. Rep.*, 2024, 1077:1
- [15] Li Y, Xu L, Qiu C W. *Thermal Metamaterials: Controlling the Flow of Heat*. Singapore: World Scientific Publishing, 2025
- [16] Sklan S R, Li B. *Nat. Sci. Rev.*, 2018, 5:138
- [17] Chen T Y, Weng C N, Chen J S. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93:114103
- [18] Guenneau S, Amra C, Veynante D. *Opt. Exp.*, 2012, 20:8207
- [19] Sklan S R, Bai X, Li B *et al.* *Sci. Rep.*, 2016, 6:32915
- [20] Narayana S, Sato Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108:214303
- [21] Schittny R, Kadic M, Guenneau S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110:195901
- [22] Li Y, Shen X, Wu Z *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115:195503

- [23] Shen X, Li Y, Jiang C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117:055501
- [24] 陶文铨. 传热学(第六版). 北京:高等教育出版社, 2024
- [25] Han T, Bai X, Gao D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112:054302
- [26] Yu G X, Lin Y F, Zhang G Q *et al.* Front. Phys., 2011, 6:70
- [27] Li Y, Shen X, Huang J *et al.* Phys. Lett. A, 2016, 380:1641
- [28] Shen X, Li Y, Jiang C *et al.* Appl. Phys. Lett., 2016, 109:031907
- [29] Jin P, Liu J, Xu L *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2023, 120:e2217068120
- [30] Tan H, Zhao Y, Jin P *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2025, 122:e2424421122
- [31] Han T, Bai X, Thong J T L *et al.* Adv. Mater., 2014, 26:1731
- [32] Yang T, Bai X, Gao D *et al.* Adv. Mater., 2015, 27:7752
- [33] Yang T, Su Y, Xu W *et al.* Appl. Phys. Lett., 2016, 109:121905
- [34] Wang R, Shang J, Huang J. Int. J. Therm. Sci., 2018, 131:14
- [35] Chen Y, Shen X, Huang J. Eur. Phys. J. Appl. Phys., 2015, 70:20901
- [36] Hu R, Zhou S, Li Y *et al.* Adv. Mater., 2018, 30:1707237
- [37] Hasan M Z, Kane C L. Rev. Mod. Phys., 2010, 82:3045
- [38] Liu Z, Jin P, Lei M *et al.* Nat. Rev. Phys., 2024, 6:554
- [39] Xu L, Wang J, Dai G *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2021, 165:120659
- [40] Yoshida T, Hatsugai Y. Sci. Rep., 2021, 11:888
- [41] Hu H, Han S, Yang Y *et al.* Adv. Mater., 2022, 34:2202257
- [42] Qi M, Wang D, Cao P C *et al.* Adv. Mater., 2022, 34:2202241
- [43] Liu Z, Cao P C, Xu L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2024, 132:176302
- [44] Guenneau S, Amra C. Opt. Exp., 2013, 21:6578
- [45] Yang F, Tian B, Xu L *et al.* Phys. Rev. Appl., 2020, 14:054024
- [46] Li J Y, Gao Y, Huang J P. J. Appl. Phys., 2010, 108:1780
- [47] Ma Y, Liu Y, Raza M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113:205501
- [48] Stedman T, Woods L M. Sci. Rep., 2017, 7:6988
- [49] Lei M, Wang J, Dai G *et al.* EPL, 2021, 135:54003
- [50] Fujii G, Akimoto Y, Takahashi M. Appl. Phys. Lett., 2018, 112:061108
- [51] Fujii G, Akimoto Y. Appl. Phys. Lett., 2019, 115:174101
- [52] Fujii G, Akimoto Y. Int. J. Heat Mass Transf., 2020, 159:120082
- [53] Sha W, Xiao M, Zhang J *et al.* Nat. Commun., 2021, 12:7228
- [54] Jin P, Yang S, Xu L *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2021, 172:121177
- [55] Ji Q, Qi Y, Liu C *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2022, 189:122716
- [56] Jin P, Xu L, Xu G *et al.* Adv. Mater., 2024, 36:2305791
- [57] Torrent D, Poncelet O, Batsale J C. Phys. Rev. Lett., 2018, 120:125501
- [58] Camacho M, Edwards B, Engheta N. Nat. Commun., 2020, 11:3733
- [59] Xu L, Xu G, Huang J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2022, 128:145901
- [60] Xu L, Xu G, Li J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2022, 129:155901
- [61] Li J, Li Y, Cao P C *et al.* Nat. Commun., 2022, 13:167
- [62] Fleury R, Sounas D L, Sieck C F *et al.* Science, 2014, 343:516
- [63] Xu L, Huang J, Ouyang X. Appl. Phys. Lett., 2021, 118:221902
- [64] Ju R, Cao P C, Wang D *et al.* Adv. Mater., 2024, 36:2309835
- [65] Qiu Y, Yang F, Huang J *et al.* Phys. Fluids, 2024, 36:103632
- [66] Ashida Y, Gong Z, Ueda M. Adv. Phys., 2020, 69:249
- [67] Li Y, Peng Y G, Han L *et al.* Science, 2019, 364:170
- [68] Xu G, Li Y, Li W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127:105901
- [69] Xu G, Li W, Zhou X *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2022, 119:e2110018119
- [70] Xu G, Yang Y, Zhou X *et al.* Nat. Phys., 2022, 18:450
- [71] Xu G, Zhou X, Yang S *et al.* Nat. Commun., 2023, 14:3252
- [72] Gao H, Xu G, Zhou X *et al.* Rep. Prog. Phys., 2024, 87:090501
- [73] Liu Z, Cao P C, Li Y *et al.* Phys. Rev. Appl., 2024, 21:064035
- [74] Liu Z, Huang J, Li Y. Phys. Rev. Appl., 2025, 23:014059
- [75] Li Y, Zhu K J, Peng Y G *et al.* Nat. Mater., 2019, 18:48
- [76] Xu G, Dong K, Li Y *et al.* Nat. Commun., 2020, 11:6028
- [77] Li J, Li Y, Cao P C *et al.* Adv. Mater., 2020, 32:2003823
- [78] Li J, Li Y, Wang W *et al.* Opt. Exp., 2020, 28:25894
- [79] Dai G, Shang J, Huang J. Phys. Rev. E, 2018, 97:022129
- [80] Dai G, Huang J. J. Appl. Phys., 2018, 124:235103
- [81] Raman A P, Anoma M A, Zhao L *et al.* Nature, 2014, 515:540
- [82] Zhai Y, Ma Y, David S N *et al.* Science, 2017, 355:1062
- [83] Xie F, Jin W, Nolen J R *et al.* Science, 2024, 386:788
- [84] Xu L, Dai G, Huang J. Phys. Rev. Appl., 2020, 13:024063
- [85] Xu L, Yang S, Dai G *et al.* ES Energy Environ., 2020, 7:65
- [86] Li Y, Bai X, Yang T *et al.* Nat. Commun., 2018, 9:273
- [87] Peng Y G, Li Y, Cao P C *et al.* Adv. Funct. Mater., 2020, 30:2002061
- [88] Wang J, Yang F, Xu L *et al.* Phys. Rev. Appl., 2020, 14:014008
- [89] Jin P, Liu J, Yang F *et al.* Research, 2023, 6:0222
- [90] Xu L, Dai G, Yang F *et al.* Nat. Comput. Sci., 2024, 4:532
- [91] Zhu C, Bamidele E A, Shen X *et al.* Chem. Rev., 2024, 124:4258
- [92] 黄吉平, 庄鹏飞. 现代应用物理, 2024, 15:050101
- [93] Lei M, Jin P, Zhou Y *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2024, 121:e2410041121
- [94] Xu L, Liu J, Xu G *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2023, 120:e2305755120
- [95] Xu L, Dai G, Wang G *et al.* Phys. Rev. E, 2020, 102:032140
- [96] Liu Z, Huang J. Chin. Phys. Lett., 2023, 40:110305
- [97] 夏舸, 杨立, 寇蔚 等. 国防科技大学学报, 2018, 40:126
- [98] 周海, 李保权, 王怀超 等. 国防科技大学学报, 2023, 45:74
- [99] 王亮, 童忠诚, 吴俊. 国防科技大学学报, 2024, 46:99
- [100] 黄吉平. 热隐身:地下掩体的红外热防护. 湖南:国防科技大学出版社, 即将出版
- [101] Dede E M, Zhou F, Schmalenberg P *et al.* J. Electron. Pack-aging, 2018, 140:010904
- [102] 张文琪, 汪剑波. 现代应用物理, 2023, 14:20503
- [103] 牟春晖, 陈娟. 现代应用物理, 2024, 15:10502
- [104] Zhou X, Xu X, Huang J. Nat. Commun., 2023, 14:5449
- [105] Qiu Y, Nomura M, Zhang Z *et al.* Front. Phys., 2025, 20:065500