

热隐身：小概念，大用途*

统计物理与复杂系统课题组^{†, 1)}

(复旦大学物理学系 上海 200438)

2023-07-20收到

† email: jphuang@fudan.edu.cn

DOI: 10.7693/w120230902

Thermal cloak: small concept, big applications

Statistical Physics and Complex Systems Research Group[†]

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

摘要 热隐身这个概念的提出，无论从应用角度，还是从学术层面，皆有其异乎寻常的重要性。文章简介了热隐身的来龙去脉，在介绍概念的同时，重点阐述其在地下掩体中红外热防护方面的特殊应用价值——其在领域内已经发展十五年，广为人知，而在领域外尚显陌生。至于热隐身的特殊学术价值，也在文末一并介绍，并着重介绍基于其进行的概念延拓，即从“热隐身”这个小概念，推广到“热超构材料”这个大概念，再进一步推广到“扩散超构材料”这个更大的概念。此外，文章对热隐身的制备方法和原理亦有述及。

关键词 热隐身，变换热学，红外热防护，地下掩体，热超构材料，扩散超构材料

Abstract The concept of thermal cloak is of exceptional importance, both practically and scholastically. This article provides an overview of the emergence of thermal cloak, while highlighting its unique value in infrared thermal protection for underground shelters. After fifteen years of development and recognition, it is as yet relatively unfamiliar to those outside the field. The special academic value of thermal cloak is also discussed at the end of the article, focusing on its conceptual extension from the lesser concept of “thermal cloak” to the broader concept of “thermal metamaterials” and further expanding to the larger concept of “diffusion metamaterials.” Additionally, this article also discusses the principle and methods of fabricating thermal cloaks.

Keywords thermal cloak, transformation thermotics, infrared thermal protection, underground shelter, thermal metamaterial, diffusion metamaterial

1 名字由来

“热隐身”这个中文名称，来源于对应的英文词组“thermal cloak”，其实这个英文词组对应的

中文名称直译过来应该是“热斗篷”，但是考虑到“thermal cloak”与“隐身”密不可分，而“隐身”正是其区别于普通“斗篷”的最大特色，所以，中文语境中将其翻译为“热隐身”或“热隐身斗篷”，简洁起见，前者更常见。

* 国家自然科学基金(批准号: 12035004)、上海科学技术委员会(批准号: 20JC1414700)资助项目

1) 复旦大学物理学系统计物理与复杂系统课题组现有研究人员名单: 金鹏、雷敏、庄鹏飞、杨福宝、周鑫晨、刘晋榕、周宇鸿、刘周费、谭浩瀚、邱宇光、才昊旻、王译希、赵昱倩、李祉昕、王成猛、熊科诏、黄吉平。

2 起源及内涵

热隐身这个概念在2008年最早被提出^[1, 2]。当时有学者参照变换光学发展了稳态变换热学理论,并在“光隐身(optical cloak)”这个概念的启发之下,提出了“热隐身(thermal cloak)”概念,如图1所示。在图1(a)中,当背景A中的热量从高温边界向低温边界流动时,A中的热流线总是沿着直线传播,即中间斗篷区域B的存在并不影响A中的热流线分布,就好像中间的B和C区域完全被A中的背景材料填充了一样。此时,如果在C中放置任意的物体,并不会干扰A中的温度场和热流场,换言之,通过探测A中的温度场或热流场,并不能推知C中是否隐藏有物体,故而,C中的物体也就成功实现了热隐身。

2008年之前,研究人员主要针对波动系统研究了各分支领域的类似概念,例如光隐身、电磁隐身(electromagnetic cloak)、声隐身(acoustic cloak)等。当时,大家都认识到描述波动系统的波动方程,例如麦克斯韦方程组、声波方程等,都是能够用变换理论处理的,然而,并没有人意识到描述热、质扩散行为的扩散方程同样可以用变换理论进行处理——事实上,的确,并非所有方程都能够用变换理论直接处理,例如,纳维—斯

托克斯(Navier—Stokes)方程就是一例。最早的热隐身概念是基于稳态热扩散系统得到的,当时有学者尝试把变换理论用于处理稳态热扩散方程,并取得了成功^[1, 2]。从这里也可以看出,就数学上来看,从处理波动方程的变换理论到处理扩散方程的变换理论,中间就隔了一层窗户纸,极其容易;但是从观念上来看,当时把变换理论从波动方程推广到扩散方程,需要探险的勇气、顽强的毅力和执着的追求——因为有时“观念”就似横亘在科学道路上的一座大山,难以逾越。

3 应用价值

热隐身能够用于地下掩体的红外热防护,这是十五年以来领域内众所周知的事实。这个应用,就其重要性而言,若向大处去说,它能够挽救一个国家的命运、能够保护所有老百姓的生命财产安全,若向小处说,它能够保护地下掩体中设施的安全。下面细述。

2006年,光/电磁隐身横空出世以后,针对各种波动系统中“隐身”的研究论文,犹如雨后春笋般地涌现出来,但是,今天再回过头去看,这些“隐身”并没有在工程中获得实际的应用,其中一个关键原因就是:波是携带频率的,各种波动“隐身”只能在特定频率或很窄的频带适用。类似地,真正能够用于隐藏潜艇的流体力学“隐身”也尚未造出——因为已有实验室中验证过的模型多是针对特殊的或简化的水流环境,例如浅水波等。可是,热隐身则不同,它能够产生真正的应用价值,并且确实已经产生,这在已有的各种类型的“隐身”中,也算是独树一帜了。故而,自从“隐身”于2006年诞生,直到今天才来撰写此文专门介绍热隐身,可谓正逢其时,并有其特殊意义。

关于热隐身的应用,这里举一个具有代表性的例子。这个例子来自多年前的一次国际学术会议,当时有欧洲学者

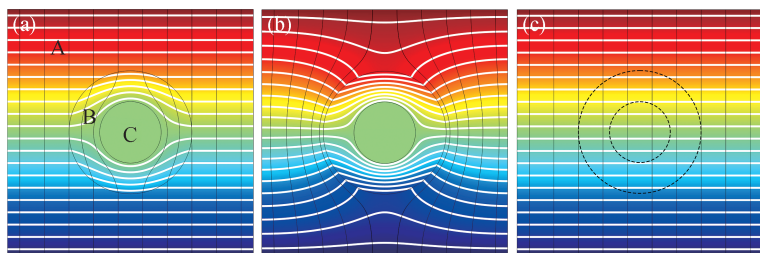


图1 不同隐身手段下地下掩体热流分布示意图 (a)两个黑色圆环将整个区域分割为A、B、C三个部分,其中A代表背景区域,B代表斗篷区域(各向异性且梯度分布),C中可放置任意物体;(b)同(a)图,但将其中的B区域替换为单纯的隔热材料(各向同性且均匀分布);(c)同(a)图,但B和C区域均被背景材料填充。图中顶边界和底边界分别代表高低温热源,彩色代表温度分布,水平方向的白色直线或曲线表示等温线,垂直方向的黑色直线或曲线表示热流线。其中,为了呈现B和C区域对A中温度场和热流场的不同影响,三张图中顶边界和底边界均被设为恒温

对这个应用做了详细说明，他的介绍涉及伊拉克战争(2003年3月20日—2011年12月18日)，内容栩栩如生，令人印象深刻，故而我们乐意做个搬运工，把国外对于先进技术的前瞻思考介绍给国内读者。当然，下面仅从攻防角度进行技术探讨，不涉及价值观或意识层面的任何考量。

坦率地讲，不少读者可能并不觉得热隐身这个概念有什么重要的应用价值，认为它仅仅是光学隐身斗篷向热学领域的一个简单推广，就像向其他领域推广一样，例如，声学隐身斗篷、地震波隐身斗篷等。其实，热隐身这个新概念，可以用于地下掩体的热红外隐身，这些掩体中可以存放战斗机、坦克等装备。当初在伊拉克战争中，面对外国军队的地面进攻，伊拉克军队几乎没有还手之力，就是因为它的王牌武器——战斗机、坦克等已被外国空军在空袭中定点摧毁，并且是几乎全部摧毁。当时，伊拉克的战斗机和坦克埋藏在沙漠中(图2)，可是，战斗机或坦克的存在改变了覆盖在其外的沙土的红外热信号，也就暴露了它们的藏身之所，故而尽被摧毁。如果当时就有热隐身斗篷，帮助伊拉克军队保护所有战斗机和坦克，那么，伊拉克在战争过程中，特别是后期的地面战争中，应该不会是那么的不堪一击，其国家命运可能亦会随之改变……

基于以上例子可见，用一条隔热毯覆盖来实现热红外隐身，与用热隐身结构来实现热红外隐身，其效果差异也就凸显出来了。图2中伊拉克的飞机外用沙土覆盖，就似给飞机包裹了一条隔热毯，但是实际战争中，这个“隔热毯隐身”完全没起作用——原因上文已经叙述。可是，如果这些飞机外层先包裹热隐身结构(对应图1(a)中的B区域)，之后再在其外覆盖沙土(对应图1(a)中的A区域)，那么，藏在中心区域(对应图1(a)中的C区域)的飞机，自然不可能暴露给对方。

以此类推，数年以前有媒体曾经报道过，某国空军发布未来十年的作战规划，声称未来如果与邻国发生军事冲突，其计划是把后者地对空武器的80%在升空之前全部摧毁。基于上文内容可见，如果后者的地对空武器都储藏在地下修筑的热隐身结构之中，那么对方声称的80%也就只能



图2 战斗机被埋藏在沙漠之中(图片来自网络)

变为0%了。这个“如果”，看起来着实激动人心，不过，也不能高兴得太早，因为在真正能够实施之前，还有一个重要的科学问题需要解决：当前，针对规则形状(例如球形)设计的热隐身结构，能够达到理想的效果，可是对于不规则形状(视其偏离球形的程度，偏得越多，不规则的程度越大)，尚不能获得精确的热隐身效果。为此，国际国内的研究人员发展了不少数值优化方法，希望能够解决这个问题，但他们所呈现的热隐身功效离理想效果仍有差距。考虑到实际装备的形状各异，继续探讨这个问题，有其现实意义。

显然，热隐身结构是防守之“盾”，而非进攻之“矛”。幸运的是，热隐身结构的防守功效，自2008年提出热隐身这个概念伊始，国际上就已经逐渐意识到其特殊应用价值了。让热隐身结构为国家安全和人民的生命财产提供全面的安全护卫，这也是无数爱好和平的热隐身研究人员的共同心愿。

此外，热隐身结构还有若干其他用途，例如用于印刷电路板或电子器件的热管理等，这方面美国学者做了很多漂亮的研究工作，但囿于篇幅，本文不赘述细节，有兴趣的读者可以阅读他们的综述论文^[3]。

4 制备方法原理

作为热隐身理论的实验验证，2012年，美国哈佛大学研究团队率先给出的验证方案是使用多

层结构^[4]。其后, 2013年, 德国学者建议使用层状梯度结构, 并给出了更为精确的验证结果^[5]。2014年两个新加坡团队建议使用双壳层结构^[6, 7], 其后, 这个建议因为工程实施的便利而获得广泛且迅捷的推广, 其不仅可以用于二维, 而且可以用于三维——需知实际应用时的结构都是三维的。那么, 为什么这个双壳层结构能够实现热隐身的效果呢? 答案是: 源于“等效”。

什么是“等效”呢? 说得学究一点, 它源于散射相消原理——这个若不好懂, 也可以说得通俗一点, 其实就是外壳层的热导率很大, 它倾向于“吸引”热量, 而内壳层的热导率很小(理论上应该为0, 实际上通常采用接近0的数值), 它倾向于“排斥”热量, 在精确设计之下, 背景中产生的这个“吸引”和“排斥”恰好抵消, 故而, 也就得到了所需的热隐身效果。以上就是以等效为核心的散射相消原理的通俗解释。

为更好地理解上述“等效”, 试以上文提及的欧洲学者介绍的伊拉克战争中的场景为例。假设沙漠中地下10 m处有一个直径为5 m的球形洞穴, 其可视为是将图1(c)的B和C区域掏空后得到的洞穴。显然, 这个洞穴中充满的是空气, 它的存在削弱了B和C区域原先(充满沙土时)的传热能力, 此时, 如果把B区域用一层高导热的铝和一层隔热的泡沫填充(当然, 这两层的具体厚度需要基于理论公式精确设计), 那么B和C区域的等效传热能力又能够恢复如前, 且此时C中还可以专门用来隐藏任意物体。换言之, 当B区域填充

双壳层材料(即高导热铝和隔热泡沫)时, 它的传热能力等同于B和C区域原先充满沙土的传热能力, 即填充双壳层材料的B起到了一个补偿传热的作用, 同时使得C中可以放置任意物体, 且这些物体不能通过探测A中的热信号改变而推知。

5 学术价值

关于热隐身这个概念的学术价值, 主要体现在其推动了相关概念的延拓, 即, 热隐身^[1, 2]→热超构材料^[8, 9]→扩散超构材料^[10, 11], 如图3所示。

自2008年热隐身这个概念被提出之后, 对这个概念本身做研究, 无论是理论还是实验都已经取得了巨大进步(注: 在Web of Science检索, 以“thermal cloak”为主题的论文, 截至2023年6月30日已达462篇), 而且最难能可贵的是, 其在实际应用中也已经开始发挥功效了。发展到这一步, 对于热隐身而言, 已经算是功德圆满了, 为此有台湾学者专门出版了一部热隐身专著^[12], 并且热隐身连同对应的变换热学理论也已经被写进了面向本科生的传热学教材^[13]。而且更为重要的是, 基于热隐身, 2013年美国麻省理工学院学者在*Nature*发表综述论文^[8], 直接把变换热学理论设计的、以热隐身为开端的所有材料或器件, 概括为“热超构材料(thermal metamaterial)”, 其包含热超构材料基器件, 即热超构器件(thermal metadvice)。这就使其开始成为“超构材料”这个大家族中的一个重要分支^[9]。随着对扩散系统的深入研究, 到今天, 热超构材料的概念又被进一步拓展到“扩散超构材料(diffusion metamaterial)”了^[10, 11]。现如今, 已经得到国际国内同行认可的是, 从控制方程的角度分类, 超构材料可以分为三个主要分支^[14-17], 其控制方程分别如下: 对应第一个分支的是描述波动系统的麦克斯韦方程组(横波), 其适用于光波和电磁波, 即光或电磁超构材料; 第二个分支是描述波动系统的其他波动方程, 包含声波方程(纵波)等, 其适用于声波、弹性波、机械波等, 即光或电磁之外的波动超构材料; 第三个分支就是扩散超构材料, 它的

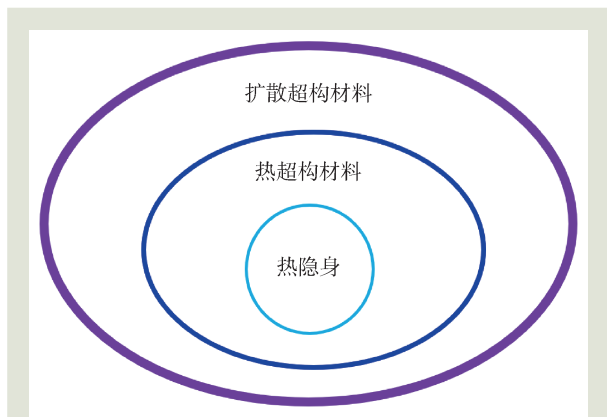


图3 热隐身概念的延拓

控制方程是扩散方程，包括热超构材料、颗粒扩散超构材料、等离子体扩散超构材料等，其中热超构材料在第三个分支中出现最早，就其体量而言，当前也依然在第三个分支中占据着主要地位^[18-37]。当然，以上分类并非唯一，因为从不同的角度出发，超构材料可以分为不同的分支，例如：从编程角度看，超构材料可以分为可编程超构材料与非可编程超构材料；从维度角度看，超构材料可以分为体超构材料与超构表面等。无疑，从不同角度出发，可获得不同分类，这有助于全面理解超构材料的工作机理与新奇功能，对深入研究和实际应用，大有裨益。

话说回头，这里有必要提及的是，关于扩散超构材料，今年上半年 *Nature Reviews Physics* 专门出版了一篇综述论文^[10]，标题正是“Diffusion metamaterials(扩散超构材料)”，这篇论文，短小精悍，主要介绍了技术层面的进展。还有最近 *Reviews of Modern Physics* 也对扩散超构材料表现出浓厚的兴趣，已经邀约了一篇综述长文，标题为“Controlling mass and energy diffusion with metamaterials (超构材料对质能扩散的调控)”^[11]，将于不久的将来刊发——该长文主要关注物理机制和内涵，并将其中的扩散调控理论命名为“diffusionics (扩散学)”。需要补充说明的是，这里的扩散是指更广义的一类物理现象，即除了包含纯扩散，还包含以扩散为主导的各类现象。例如，以热超构材料为例，这类现象除了包括单纯的热传导，还包括“热传导+热对流”、“热传导+热辐射”、“热传导+热对流+热辐射”。

此外，可喜的是，随着研究的深入，若干新近研发的材料或器件，例如转子驱动为零磁场室温热霍尔器件^[38]，已经开始突破扩散超构材料所覆盖的范围^[39]。可见，热隐身概念的延拓并不会止步于扩散超构材料，未来还有新的可能，未来已来。说到这里，有必要对超构材料的定义做一个简介：超构材料(或超构器件)是一类人工结构材料，其性质是由组分材料的几何结构决定的，而非由组分材料的内禀物理性质决定的，最为关键的是，其必须有特征长度，并要求结构单元的

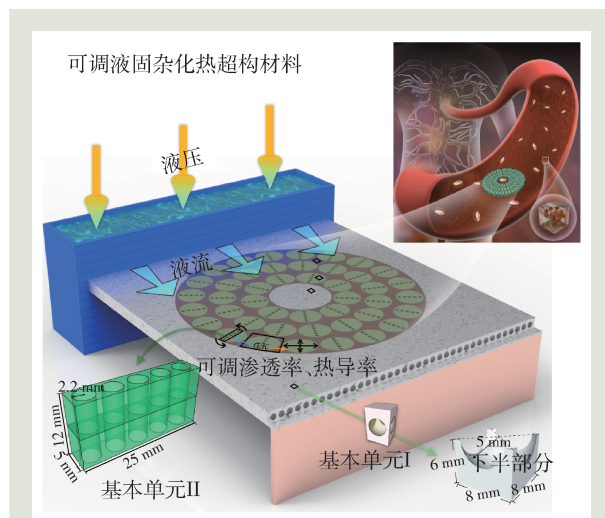


图4 基于液固混合系统的热隐身器件设计，其可用于更为复杂的环境，例如，人体血管中红细胞的温度控制(改编自文献[66])

尺寸远小于或小于这个特征长度，此时，可以使用有效介质理论来理解超构材料的性质或功能。例如，对于控制热传导的热超构材料来说，这个特征长度就是热扩散长度^[14]；对于操控电磁波的电磁超构材料来说，这个特征长度就是入射电磁波的波长。换言之，如果不存在对应的特征长度，也就不可以使用有效介质理论来解释或预言其功能，这样的材料并不属于“超构材料”^[39]。

6 总结

近年来，众多新材料和新机制的不断涌现，使得热隐身器件的设计日益多样化。尤其是，提高热隐身器件的适应性和稳定性已经成为这一领域的核心研究方向^[40-42]。在材料特性的适应性方面，实际应用中，热隐身器件可能需要在不同热导率的环境中工作^[43-45]，然而基于变换理论或散射相消理论设计的静态器件往往难以适应这些变化。相比之下，在热学零折射隐身斗篷中，将极端对流视为超高热导率^[19, 46, 47]，因此能够更好地适应多种环境。从几何适应性的角度来看，目前的热隐身器件多为二维、规则形状，虽然经典理论可以扩展到三维^[6, 48]，但设计出具有任意形状的器件仍然是一大挑战。幸运的是，拓扑优化算

法可以精细优化材料分布^[49-56], 结合 3D 打印技术, 研究者们能够轻松制造出任意形状的热隐身器件。值得注意的是, 热学系统本质上是一个耗散系统。通过非厄米物理的研究范式, 以及构造热耦合哈密顿量, 科研人员已经成功开发出可配置的热学拓扑材料^[33, 57-64]。这些材料对外部的杂散热量和环境对流有着极高的鲁棒性, 确保了器件功能的高度稳定。而在超高温环境中, 机器学习驱动的可配置非线性热材料有望保持器件的稳定性^[65]。此外, 引入对流的变换热学理论及其相应的实验研究^[66, 67], 为我们提供了一种新的液固混合系统, 进一步扩展了热隐身器件的设计范围, 使其能够适应更为复杂的环境(图 4)。借助于相变材料, 科研人员提出了一种具有类梯田结构温度分布的热超构材料, 并基于此实现了高效多区域、多温度控制^[68]。当然, 万变不离其宗, 科研人员

一直在追求更先进的热隐身技术, 相信未来会有更多突破, 值得期待。

毋庸置疑, 热隐身这个概念具有极其重要的应用价值和学术意义。国际国内针对这个概念的已有研究, 完整地呈现了一个全链条的研究范式, 即从基础理论的突破(从无到有), 到技术开发的实现(从虚到实), 再到工程应用的落地(从无用到有用)。它的应用价值使其备受瞩目, 它的学术意义令人踌躇满志。这里也可以看出, 一个研究领域从诞生萌芽, 到茁壮成长, 再到瓜熟蒂落, 其间既有耕耘过程中的艰难探索, 更有收获结果时的无上喜悦, 想来这也是科学研究的一个迷人魅力吧。

致谢 感谢中国工程物理研究院研究生院须留钧博士对文章提出的修改建议与帮助。

参考文献

- [1] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92: 251907
- [2] Chen T Y, Weng C N, Chen J S. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93: 114103
- [3] Kim J C, Ren Z, Yuksel A *et al.* *J. Electron. Packag.*, 2021, 143: 010801
- [4] Narayana S, Sato Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 214303
- [5] Schittny R, Kadic M, Guenneau S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 195901
- [6] Xu H Y, Shi X H, Gao F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 054301
- [7] Han T C, Bai X, Gao D L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 054302
- [8] Maldovan M. *Nature*, 2013, 503: 209
- [9] Yang S, Wang J, Dai G L *et al.* *Phys. Rep.*, 2021, 908: 1
- [10] Zhang Z R, Xu L J, Qu T *et al.* *Nat. Rev. Phys.*, 2023, 5: 218
- [11] Yang F B, Zhang Z R, Xu L J *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2023, in press. Preprint at <http://arxiv.org/abs/2309.04711>
- [12] Yeung W S, Yang R J. *Introduction to Thermal Cloaking: Theory and Analysis in Conduction and Convection*. Springer, 2022
- [13] 陶文铨. *传热学(第六版)*. 高等教育出版社, 预计 2024 年出版
- [14] Wegener M. *Science*, 2013, 342: 939
- [15] Kadic M, Bückmann T, Schittny R *et al.* *Rep. Prog. Phys.*, 2013, 76: 126501
- [16] Huang J P. *Theoretical Thermotics: Transformation Thermotics and Extended Theories for Thermal Metamaterials*. Springer, 2020
- [17] 张浩驰, 汤文轩, 刘硕 等. *中国新材料研究前沿报告 2021*, 第 6 章“超材料”. 化学工业出版社出版, 2022. pp.131—160
- [18] Li Y, Li W, Han T *et al.* *Nat. Rev. Mater.*, 2021, 6: 488
- [19] Li Y, Zhu K J, Peng Y G *et al.* *Nature Mater.*, 2019, 18: 48
- [20] Shen X Y, Li Y, Jiang C R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 055501
- [21] Li Y, Shen X Y, Wu Z H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115: 195503
- [22] Xu L J, Huang J P. *Chin. Phys. Lett.*, 2020, 37: 080502
- [23] Wang R Z, Xu L J, Ji Q *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2018, 123: 115117
- [24] Wang J, Dai G L, Huang J P. *iScience*, 2020, 23: 101637
- [25] Xu L J, Yang S, Huang J P. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, 11: 054071
- [26] Xu L J, Wang R Z, Huang J P. *J. Appl. Phys.*, 2018, 123: 245111
- [27] Zhu N Q, Shen X Y, Huang J P. *AIP Adv.*, 2015, 5: 053401
- [28] Xu L J, Yang S, Huang J P. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, 11: 034056
- [29] Yang S, Xu L J, Wang R Z *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 111: 121908
- [30] Dai G L, Huang J P. *J. Appl. Phys.*, 2018, 124: 235103
- [31] Xu L J, Yang S, Huang J P. *Phys. Rev. E*, 2018, 98: 052128
- [32] Xu L J, Dai G L, Huang J P. *Phys. Rev. Appl.*, 2020, 13: 024063
- [33] Xu L J, Wang J, Dai G L *et al.* *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, 65: 120659
- [34] Xu L J, Yang S, Dai G L *et al.* *ES Energy Environ.*, 2020, 7: 65
- [35] Shen X Y, Jiang C R, Li Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109: 201906
- [36] Xu L J, Huang J P. *Chin. Phys. Lett.*, 2020, 37: 120501
- [37] Yang F B, Xu L J, Huang J P. *ES Energy Environ.*, 2019, 6: 45
- [38] Xu L J, Liu J R, Xu G Q *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2023, 120: e2305755120
- [39] Xu L J, Huang J P. *Transformation Thermotics and Extended*

- Theories: Inside and Outside Metamaterials. Springer, 2023
- [40] Guo J, Xu G Q, Tian D *et al.* Adv. Mater., 2022, 34: 2201093
- [41] Guo J, Xu G Q, Tian D *et al.* Adv. Mater., 2022, 34: 2200329
- [42] Guo J, Qu Z G. Int. J. Heat Mass Transf., 2023, 212: 124314
- [43] Ji Q X, Chen X Y, Liang J *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2022, 196: 123149
- [44] Ji Q X, Qi Y C, Liu C W *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2022, 189: 122716
- [45] Zhu Z, Ren X C, Sha W *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2021, 176: 121417
- [46] Xu G Q, Dong K C, Li Y *et al.* Nat. Commun., 2020, 11: 6028
- [47] Li J X, Li Y, Cao P C *et al.* Adv. Mater., 2020, 32: 2003823
- [48] Su Y S, Li Y, Yang T Z *et al.* Adv. Mater., 2021, 33: 2003084
- [49] Sha W, Xiao M, Zhang J H *et al.* Nat. Commun., 2021, 12: 7228
- [50] Sha W, Hu R, Xiao M *et al.* npj Comput. Mater., 2022, 8: 179
- [51] Wang Y H, Sha W, Xiao M *et al.* Adv. Mater., 2023, 35: 2370237
- [52] Fujii G, Akimoto Y. Appl. Phys. Lett., 2019, 115: 174101
- [53] Fujii G, Akimoto Y. Int. J. Heat Mass Transf., 2020, 159: 120082
- [54] Hirasawa K, Nakami I, Ooinoue T *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2022, 194: 123093
- [55] Xu X Q, Gu X D, Chen S K. Int. J. Heat Mass Transf., 2023, 202: 123720
- [56] Hostos J C A, Storti B, Lefevre N *et al.* Int. J. Heat Mass Transf., 2023, 212: 124238
- [57] Xu G Q, Li Y, Li W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 105901
- [58] Xu G Q, Li W, Zhou X *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2022, 119: e2110018119
- [59] Qi M H, Wang D, Cao P C *et al.* Adv. Mater., 2022, 34: 2202241
- [60] Hu H, Han S, Yang Y H *et al.* Adv. Mater., 2022, 34: 2202257
- [61] Li Y, Peng Y G, Han L *et al.* Science, 2019, 364: 170
- [62] Wu H, Hu H, Wang X *et al.* Adv. Mater., 2023, 35: 2210825
- [63] Cao P C, Li Y, Peng Y G *et al.* Commun. Phys., 2021, 4: 230
- [64] Cao P C, Peng Y G, Li Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2022, 39: 057801
- [65] Jin P, Xu L J, Xu G Q *et al.* 2023, Preprint at <https://arxiv.org/abs/2301.04523>
- [66] Jin P, Liu J, Xu L J *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2023, 120: e2217068120
- [67] Ju R, Xu G Q, Xu L J *et al.* Adv. Mater., 2023, 2209123
- [68] Zhou X C, Xu X, Huang J P. Nat. Commun., 2023, 14: 5449

通过我们的工作，服务教育事业，
培养科技人才，创造更美好的社会！

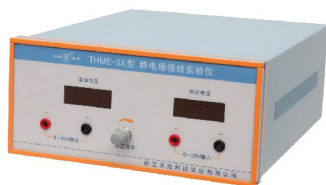
天煌物理类专业实验室、实训室建设方案



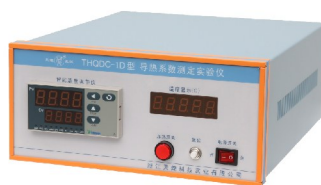
中国·浙江天煌科技实业有限公司
ZHEJIANG TIANHUANG SCIENCE & TECHNOLOGY INDUSTRIAL CO., LTD. OF CHINA

地址：中国·杭州市西湖科技园西园五路10号 邮编PC：310030
客户服务热线：400-106-1992(86)-571-89978000/89978111
售后服务热线：400-105-1992(86)-571-89978222/89978333
传真：(86)-571-89978266/85229897
<http://www.tianhuang.cn> E-mail: sales@tianhuang.cn

THME-3X 型 静电场描绘实验仪



THQDC-1D 型 导热系数测定实验仪



THQPC-1A 光电效应测量实验仪





实验室小型真空设备无油革命 —安捷伦 IDP 系列干式真空泵

- 适用于真空干燥箱、冻干箱、手套箱等
- 无需加油换油，杜绝排气油雾造成的实验室空气污染
- 低振动低噪音，维护保养间隔长
- 全密封抽气通道，被抽气体不会与轴承等部件接触
- 标准抽气接口，安装替换方便
- 大小双气镇*，抽水蒸气能力强

*IDP-3 为单气镇



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部
800 820 6778（固定电话拨打）
400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，
或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。