# 中国材料大会 2025
# 暨新材料科研仪器与设备展

**7 月 5-8 日, 2025**

福建 厦门

## D36-热管理材料

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: https://cmc2025.scimeeting.cn

# D36.热管理材料

**分会主席：曹炳阳、唐桂华、封伟、顾军渭、宋柏、郝京阳、张显明**

**D36-01**

## 高品质碳纳米管规模化制备关键技术与产业化应用

何燕

青岛科技大学

针对“高品质”碳纳米管的规模化制备基础理论缺乏、碳纳米管制备装置产量低成本高、分散难，以及难以实现规模化应用等瓶颈性问题，通过深入机理、工艺研究和技术开发创新，相继攻克了从理论、制备、分散至应用等一系列产业关键共性技术难题，实现了碳纳米管在复合材料、橡胶、导电浆料、军工等方面的产业化应用。

**D36-02**

## 高强高导热碳纳米管纤维材料

邵元龙*

Peking University

随着高超声速飞行器热防护与高集成芯片散热需求的日益迫切，开发兼具轻量化、高强度和高效热管理性能的材料成为关键挑战。芯片三维封装技术带来的热堆积问题严重制约其性能与可靠性。碳纳米管纤维（CNTF）凭借碳纳米管本征的超高强度和超高热导率，成为实现结构-热功能一体化的理想候选材料。

本团队聚焦碳纳米管纤维的湿法纺丝技术，系统优化牵伸比与聚合物复合策略引入 10%聚酰亚胺共价交联体系，通过界面强化，使纤维拉伸强度与热导率分别达 3.54 GPa 和 426.22 W m⁻¹K⁻¹，高温热处理消除结构缺陷并提升结晶度，碳纳米管纤维力学强度及热导率提升至 5.44 GPa 和 669.24 W m⁻¹K⁻¹，突破现有碳纤维性能极限。团队成功建立丝束连续纺丝技术，实现碳纳米管纤维 0.1K 丝束的批量连续制备。

**D36-03**

## 界面分子工程调控热管理材料物性

林悦*

中国科学院福建物质结构研究所

应用于先进热管理技术的热学功能复合材料往往具有复杂的界面结构，正确理解表界面物理化学对声子/电子输运特性的影响至关重要。本报告包含:（1）纳米材料界面工程:本报告将介绍如何以石墨烯、碳纳米管等纳米材料为“手术刀”精准调制材料的界面特性，以调控钛酸锶、锑化镁、碲化铅等无机材料的热电性能;（2）非共价键界面工程：本报告将介绍如何利用氢键等非共价相互作用键调制界面热阻，以调制硅橡胶、聚氨酯等有机材料的热学性能。该系列工作提出了通过异质界面调控能源材料、微纳电子器件、以及纳米热输运的新机制。

**D36-04**

## 面向先进电子封装的导热吸波复合热管理材料研究

李鑫*、杨君友

华中科技大学

环氧树脂（EP）因其卓越的机械性能、耐腐蚀特性和易加工性而被广泛用于电 子设备的封装，从而抵御外界物理撞击和化学侵蚀，确保电子设备的长期稳定运行。 然而，随着电子器件趋向高集成化、高频率化和高功率密度化，热量积累和电磁干 扰问题变得尤为严重。过多热积累可能损害电子系统，甚至导致火灾等安全事故， 而电磁干扰不仅影响设备的信号传输，还可能对环境和人体健康造成危害。尽管当 前高导热型或电磁波吸收型的 EP 取得了显著发展，然而兼具优异导热和电磁波吸 收性能的 EP 仍面临缺乏深入研究的挑战。因此，本论文面向电子元器件对导热吸 波功能型 EP 的迫切需求，通过成分设计、微观结构调控和界面工程等方法，研发 集导热、吸波、绝缘和阻燃功能一体的 EP 复合材料，主要

研究内容如下：

1. 提出三维结构增强环氧树脂传热性能的新方法，解决传统导热填料填充量高、难以形成有效导热通路的问题，实现封装材料热导率的大幅度提升，热导率达 1.2 W/m·K，是单纯环氧树脂的 5 倍，可实现~15.7 ℃的温差效果；

2. 通过静电自组装的方式构建 MDCF@hBN 双层级三维结构，解决一维、二维填料易团聚的问题，实现热量传热路径进一步增强，热导率达 1.87 W/m·K，较单纯环氧树脂提升 938.9%，可实现~18.2 ℃的温差效果；

3. 揭示异质界面是增强电磁波极化损耗的物理本质，提出通过界面工程实现热传输和电磁波吸收性能结合的新思路，热导率提升达 177%，电磁波吸收性能优异（MinRL=-49.77 dB，MaxEAB=5.44 GHz）；

4. 将分级纳米结构引入 3D 网络结构内部，提出电磁波多元极化损耗的新方法，有效改善损耗效应和阻抗匹配，实现电磁波吸收性能的提升，填充量仅为 5%时，MinRL=-58.92 dB，MaxEAB=5.60 GHz；

5. 通过界面修饰与阴离子插层，开发了具备超高电磁波吸收和优异阻燃性能的新型多功能型环氧树脂基电子封装材料,实现了导热-电磁波吸收-阻燃特性的协调优化提升，最低的反射损耗值达到-57.77 dB，有效吸收带宽为 7.20 GHz，几乎覆盖整个 KU 波段，更重要的是，当温度过高时，NiAl-LDH-CO32−可以释放 H2O 和 CO2，显著提升了封装材料阻燃性能，峰值热释放速率降低 19.4%，总热释放量降低 30.7%；

6. 开发新型自适用水凝胶相变导热吸波热管理材料（获得华为“火花”奖），得益于 GH 骨架独特的多级三维网络结构，阻抗匹配得到优化，优化后的水凝胶有效吸收带宽 (EAB) 为 4.8 GHz，最小反射损耗 (RLmin) 为 -55.6 dB。此外，GH 骨架促进了传热途径，从而使水凝胶的优化导热系数从 0.634 W m-1 K-1 提高到 1.091 W m-1 K-1。导热系数的提高，加上水蒸发散热，导致模拟加热器的温度下降约 10℃。

**D36-05**

## 用于人体热管理的柔性热电材料与器件

吴波*

香港城市大学

皮肤作为人体面向外界环境的多功能窗口，其实现感知周围环境并与之互动的基础在于完善的自我调节能力。然而，皮肤有限的自我调节能力，特别是体温调节，会限制其面对极端变化环境时的自我保护与修复能力，造成不可逆的损伤。集环境感知、能量捕获和温度调节为一体的个人热管理，可以有效帮助人体皮肤应对外部极端环境。在众多的热管理方案中，热电技术通过稳定的温度感知和双向热-电转换能力，在人体热管理应用中展现出显著的优势。基于此，我们从高性能的热电材料角度出发，设计可穿戴柔性热电器件，通过结构设计优化其对温度感知、热量转换和通电制冷的能力。目前，针对具备人体热管理的热电材料及其器件的相关工作，团队已经在 Adv. Funct. Mater、Nano Energy、Chem. Eng. J.、等期刊发表论文十余篇。

**D36-06**

## Thermal Properties of Polyethylene wax as a phase change material for thermal management

Junfeng Li*

Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology

The thermophysical properties of a commercial polyethylene wax (PEW) used as a potential phase change material for thermal management, such as melting point, latent heat, thermal conductivity, specific heat, supercooling degree, the stability of phase change characteristic parameters in the thermal cycles, thermal endurance, the viscosity in the liquid state, have been investigated in detail. It is found that the PEW has good thermal performances as a phase change material. The PEW has high latent heat and specific heat, the former falling in the range of 210 - 230 kJ/kg, the latter falling in the range of 1.52 - 4.48 $J•g^{-1}•°C^{-1}$ in the temperature range 0 - 95 ℃ and 2.63 - 3.12 $J•g^{-1}•°C^{-1}$ in the range temperature 150 - 300 ℃. The PEW can keep its microstructure stable up to 200 ℃ and 238 ℃ in the air and nitrogen atmosphere, respectively. The PEW has a

small supercooling degree of about 1.45 °C, and low viscosity of 0.11 Pa•s at 200 °C. The thermal conductivity of PEW does not change significantly in the temperature range 30 - 90 °C, and the average value is 0.45 W•m-1•K-1. There is almost no change in the characteristic temperatures of PEW during the thermal cycles of 10 times, such as the starting temperature, peak temperature, end temperature in the melting and freezing peaks of DSC curves.

**D36-07**

## 基于蒲公英仿生的径向石墨烯-液态金属气凝胶微球复合材料及其柔性热传导调控

秦盟盟、封伟*

天津大学

受蒲公英结构启发，开发了一种仿生微球导热填料。其设计核心是将镓铟合金（液态金属）封装入径向取向的石墨烯微球中。径向排列结构建立了各向同性的三维“热高速公路”，实现了微球间最有效的热传递。该结构同时形成了模量梯度区，具备多尺度应力耗散能力，显著提升机械柔顺性。仿生微球结构有效抑制了液态金属填料在动态载荷下的团聚现象，提升了材料的长期服役可靠性。作为热界面材料使用时，展现出优异的抗振动保形接触能力和突出的热稳定性。

**D36-08**

## 有机无机杂化柔性相变热管理材料

石玲英*

四川大学

固-液相变材料（PCMs）在热能存储与温度管理领域展现出巨大潜力，但在实际应用中仍面临熔融泄漏和结晶态刚性等问题。我们通过有机-无机杂化策略实现了低成本、高潜热的柔性相变热管理材料的制备。基于相变材料在熔融态溶解单体进行原位聚合的方法，实现了以聚合物网络稳定的无机水合盐相变材料的制备，同时解决了熔融泄露、相分离与晶态刚性等问题。并通过双网络结构设计，提高了材料的强度和韧性，进而通过溶剂化策略抑制了“盐析水合盐”的盐析行为，并实现了水合盐的晶态柔性，成功制备出兼具本征柔韧性和高相变焓的结晶态柔性相变热管理材料。所制备的柔性相变盐材料表现出优异综合性能，包括高能量密度、低弹性模量、良好的强度和韧性，以及低的接触热阻。并探索了所制备的柔性相变材料在热管理以及能量转换方便的应用潜力。该研究为低成本高性能柔性相变材料的发展提供了研究思路，有望推动先进热管理应用的发展。

**D36-09**

## GaN 异质纳米结构中的扩展导热及其调控

唐道胜*、陈兴际

苏州大学

高功率宽禁带半导体器件广泛应用于高铁、新能源车辆、通信基站中的功率变换和电流转换设备，然而高功率密度带来的严峻散热问题抑制了宽禁带半导体及其器件的性能发挥和使用可靠性，亟需发展有效的器件热管理方法，其中最为基础的部分就是器件近结点温度场的准确预测。以 GaN 横向异质结器件为例，近结点导热表现为声子弹道扩散机制-热扩展-界面导热耦合特征。本研究综合使用声子蒙特卡罗（MC）模拟和分子动力学（MD）模拟方法，并借助发展的纳米结构复杂路径导热等效热导率反问题求解方法，系统研究了 GaN 异质纳米结构扩展导热过程中的等效热导率和热阻变化规律，分析了扩展导热中尺寸诱导的等效热导率各向异性、扩展导热和界面导热的交叉影响、界面影响扩展导热的耦合机制。研究发现，在扩展导热中，各向同性等效热导率不能完整描述温度分布，实际的等效热导率表现为显著的各向异性，各向异性程度同时和热扩展程度、纳米结构尺寸相关；引入异质界面后，GaN 薄膜的等效热导率下降，下降程度取决于界面性质；通过释放界面 GaN 侧的非均匀应力，GaN 薄膜等效热导率增加。进一步通过在模拟中设定应力层（一层自由程较小的薄膜层）和增强表面态层（表面态声子具有长自由程和沿表面平行输运特性），探讨了界面诱导效应对扩展导热的影响。计算结果表明，扩展导热中，非均匀应力层会造成结温的降低，即等效热导率的增加，增加幅度和应力层声子自由程的减小程度正相关，源于热源表面层的散射增强了输运的聚焦程度；表面态层能够通过增强表面的热源分布均匀性，降低热扩展程度，从而降低扩展热阻，实际热阻改善效果依赖于热扩展程度、弹道扩散程度以及表面态声子的层厚度和态密度。

**D36-10**

## 微纳传热过程中的非平衡问题：拉曼热测量实验探索

黄小娜

武汉大学

微纳尺度传热存在非平衡性问题，如空气导热、纳米热点散热、界面传热等，然而由于尺度限制，热测量工作相对较少。本研究首先针对小尺度针尖-平板结构，首次直接测得亚微米间距下（最小 80 nm）两表面温度变化；基于此，研究了空气分子与二硫化钼之间空气导热弹道输运特性，首次测得了两者间热适应系数；进一步针对更小尺度的纳米热点，基于针尖增强拉曼，直接观测到 GaN 晶体内纳米热点声子温度非平衡现象，分析了声子弹道输运特性；最终，考虑温度非平衡，揭示了二维材料和基底界面处声子非平衡性对界面传热测量的影响。

**D36-11**

## 辐射制冷结合相变潜热的包裹式防泄漏冷却器用于户外电子设备热管理

杜清源*

南方科技大学

Outdoor electronics are simultaneously subject to constant solar radiation and instantaneous thermal shock, thus urgently requiring effective thermal management. However, commonly adopted radiative cooling has an issue of low cooling power and phase change temperature control technology suffers from materials leakage, which cannot meet the increasing demands for outdoor electronics. To address these problems, a leakage-proof wrapped cooler that integrates radiative cooling and latent heat storage is proposed to achieve sub-ambient cooling and efficient thermal-shock resistance. The wrapped cooler is designed by directly wrapping paraffin wax (PW) phase change material (PCM) within a hexagonal boron nitride/polydimethylsiloxane (h-BN/PDMS) coating, possessing leakage-proof property during force and thermal shock. The wrapped cooler can achieve an average sub-ambient temperature drop of 4.8 ℃ under direct sunlight. Moreover, a maximum temperature drop of 35.3 ℃ can be achieved for the heater covered with the wrapped cooler when experiencing 2000 W m-2 thermal shock, mainly due to the temperature-pinning effect of PCM and the high thermal conductivity of h-BN/PDMS coating. The wrapped cooler that integrates radiative cooling with latent heat storage provides an effective way for protecting outdoor electronics from solar radiation and thermal-shock damage, thereby advancing passive thermal management technologies towards practical applications.

**D36-12**

## 多功能复合的月球基地建筑热管理材料研究

孙春磊[1]、耿毅超[1]、肖楚凡[2]、唐桂华*[1]

1. 热流科学与工程教育部重点实验室，西安交通大学能源与动力工程学院，西安 710049

2. 西安交通大学米兰理工联合学院，西安 710049

建造月球基地对于深空探索、资源开发和未来的星际移民具有重要的战略意义。然而，由于缺乏大气保护，月球表面面临极其复杂的热管理问题和强烈的紫外线辐射挑战。本研究通过共掺杂不同种类纳米颗粒提出了一种多功能复合二氧化硅气凝胶，可强化紫外线屏蔽、增强隔热并促进植物光合作用，从而实现月球基地的可持续发展。掺杂方案基于 Mie 散射、离散偶极子近似 DDA 和蒙特卡罗 MC 相结合的数值模拟方法进行设计。优化的紫外遮光剂 $TiO_2$ 的掺杂体积分数为 0.005%，颗粒半径为 30 nm。体积分数为 0.05%、半径为 20 nm 的红外遮光剂氧化铟锡 ITO 可减少红外辐射耗散，从而增强隔热性能。体积分数为 0.001%、长径比为 3.5、半径为 10 nm 的银纳米棒可以过滤绿光，促进植物的光合作用和基地的可持续发展。这种复合气凝胶采用一步碱催化溶胶-凝胶法进行合成。实验结果表明共掺杂多功能复合气凝胶在可见光波段平均透过率仍可达 75.2%，同时将紫外波段平均透过率限制<11.4%，比纯气凝胶紫外屏蔽性能提升 18.4%。银纳米棒的引入使绿光过滤效率较纯气凝胶提高 9.4%，显著增强了植物光合作用与系统可持续性。掺杂 ITO 使多功能复合二氧化硅气凝胶在 400 K 时的热导率从 0.0439 W $m^{-1}$ $K^{-1}$ 降至 0.0409 W $m^{-1}$ $K^{-1}$，降幅达 6.8%。与现有透明材料相比，该复合气凝胶展现了最佳的节能性能。在总表面积为 50 $m^2$ 的月球基

地中，采用多功能复合气凝胶作为建筑材料，可在一个月球日期间维持稳定温度时实现高达 87.1%的节能效果。通过集成紫外线屏蔽、隔热及植物生长光谱选择性功能，该复合气凝胶为可持续安全月球居住提供了重要的解决方案。

**D36-13**

**高效电磁吸收、阻燃 NF@HCS/NF 填充环氧树脂基电子封装材料**

熊天顺、罗裕波*、杨君友

华中科技大学材料科学与工程学院

下一代集成电路（IC）向更高功率密度发展的趋势带来了不可避免的电磁干扰和热失控问题，这些问题仅靠聚合物封装材料难以有效解决。为了满足高功率 IC 封装的电磁-热管理需求，本研究开发了一种具有高效电磁波（EMW）吸收和阻燃性能的环氧基复合材料。本文中，通过水热-溶剂热法和物理共混制备的空心碳球（HCS）-多尺度镍铁氧体复合填料（NF@HCS/NF）被证明是一种有效的电磁波吸收剂，在 2.0 mm 的低匹配厚度下，其反射损耗最低值（RLmin）可达-59.5 dB，有效吸收带宽（EAB）可达 3 GHz。得益于本征不可燃镍铁氧体的物理屏障效应，NF@HCS/NF/EP 复合材料表现出高的热稳定性和阻燃性，与纯 EP 相比，其热分解温度（此处使用 T10%）提高了 8%，总热释放值（THR）降低了 37.5%。此外，NF@HCS/NF/EP 复合材料具有高达 3×1011 Ω·cm 的体积电阻率和低至 10000 MPa s 的粘度，表明其具有良好的电绝缘性和流动性。综上，NF@HCS/NF/EP 复合材料具有的高 EMW 吸收率、阻燃性、电绝缘性和流动性表明其在先进电子封装领域具有较大潜力。

**D36-14**

**单相浸没冷却液的流动换热特性研究**

李震*、张博、王露、李弘锐

清华大学航天航空学院

随着芯片功耗的增大，传统风冷暴露出能耗高、噪声大、冷却能力有限的不足。浸没式液冷依靠冷却液体积比热容大，载热能力强的优点，有望有效控制芯片温度，同时降低能耗。针对现有的三种典型单相浸没冷却液：矿物油、硅油、氟碳液，我们对比了它们的密度、比热容、热导率、粘度、普朗特数等物性参数，并分析了这些物性参数随温度的变化特征。结果表明，这些冷却液的密度和粘度都随温度升高而降低，而比热容随温度升高而升高。大部分冷却液的热导率随温度升高而降低，但是并不明显。我们定义了一个评价冷却液性能的析热系数（Heat dissipation coefficient，HDC）指标，可以用来评价冷却液流动换热性能的优劣，并与现有的评价冷却液的性能系数（Figure of merit，FOM）进行了对比。最后，我们搭建了一个单相浸没液冷实验系统，实验测试对比了氟碳液和硅油的冷却效果。结果表明，在实验研究的范围内，硅油的冷却能力不如氟碳液，且存在显著的温度不均匀现象。电脑主机可以长期浸泡在硅油和这种新型碳氟类冷却液中，仍能正常开机运行。

**D36-15**

**Innovations in Thermal Metrology: Analytical and Machine Learning Solutions for Thermal Management Materials**

Qiye Zheng*,Jiaqi Gu,Yanglong Lu

HKUST

Effective thermal management is a critical challenge across microelectronics, energy technologies, aerospace, and advanced manufacturing. Accurate measurement of thermal conductivity (λ) is essential for optimizing materials in these fields, particularly as the complexity and heterogeneity of new materials increase. Rapid and precise thermal characterization is vital for advancing additive manufacturing, composite development, and high-performance electronics.

First, I will discuss our recent advancements in the transient plane source (TPS) method (ISO 22007-2:2022), a widely adopted technique for bulk solid thermal conductivity measurement. Our work addresses the substantial systematic errors—up to 97%—that arise when measuring high-λ materials (λ > 30 W/(m·K)), primarily due to the limitations of conventional analysis models that neglect sensor/sample interfacial resistance (Rc) and heat

conduction within the sensor itself. We introduce two new analytical frameworks: the Green's function-based realistic sensor model (RSM) and the thermal quadrupole-based multilayer model (MLM), both explicitly accounting for sensor heat transfer and Rc effects. Additionally, we propose a derivative-based nonlinear regression approach that significantly improves robustness and accuracy, reducing λ measurement errors from as high as 97% to below 10% for high-λ materials, even under 60 times initial Rc variations. Our sensitivity analysis, leveraging singular value decomposition (SVD), guides optimal time interval selection and parameter identification, while 3D finite element modeling and experiments across a wide range of materials validate the superior performance of our models and fitting strategies. Collectively, these advances offer a comprehensive, practical solution for accurate TPS measurements, with particular benefits for high-λ materials in demanding real-world study of metallic and composite materails. We have also extended the traditional TPS to studying bilayer anisotropic materials and thermal interface resistances with high accuracy which is critical for thermal management material development.

Secondly, I will introduce our development of a physics-informed fully convolutional network (PIFCN) architecture for solving forward and inverse problems in thermal conduction. Unlike traditional PINNs, which suffer from high computational cost and limited accuracy due to their fully connected architecture, PIFCNs leverage the localized connectivity of convolutional networks. This enables efficient, node-level matching between inputs and outputs, allowing direct discretization of PDEs via finite difference methods. Our results show that PIFCNs flexibly implement Dirichlet and Neumann boundary conditions, accurately predict temperature distributions, and can estimate unknown thermal diffusivity with over 99% accuracy even with sparse data and incomplete boundaries—substantially outperforming PINNs. Furthermore, the PIFCNs can be integrated with our high-throughput photothermal metrology system (SI-TI), which uses structured illumination and thermal imaging for rapid, parallel characterization of multiple samples. This synergy represents a promising direction for adaptive, high-throughput thermal characterization of complex materials.

**D36-16**

## 声子熵制冷理论与超级弹卡材料

刘晨晗*

南京师范大学

卡效应制冷凭借高能效比、零全球变暖潜能值及结构紧凑等优势，是传统压缩制冷技术最有前景的替代方案之一。然而，结构熵或极化熵的计算难题阻碍了卡效应制冷理论的发展和性能的提升。本文基于与温度直接相关的声子熵概念，建立了一套系统的卡效应制冷理论框架。在此框架下，我们首次阐明了负电卡效应的物理本质，破解了国际学术界长期争议的机理；同时指出，低频区较高的声子态密度可保证初态具有较大熵值，而在该频段中声子态密度与模式熵乘积的显著变化则是实现大熵变的微观关键。在该理论指导下，我们发现 PbO 为优异的弹卡材料。详尽的第一性原理计算表明，PbO 在静水压下的等温熵变是典型弹卡材料 TiNi 的 11 倍，充分验证了我们声子熵理论的预测能力。本研究为声子熵理论在卡效应制冷领域的应用奠定了坚实基础。

**D36-17**

## AI 辅助的自组装单分子层界面导热调控与设计

鞠生宏*

上海交通大学

设计开发导热可控的自主装单分子层（SAM）在三维封装、电子器件散热领域具有广泛的应用前景。目前针对界面导热 SAM 的微观导热与调控机理尚不明确。本研究提出了一种高效的界面导热 SAM 端基设计框架与高通量筛选方法，构建了一个包含 300 个不同端基的 SAM 界面热导数据库及 135 个界面热输运物理关联描述符。基于网格化符号回归搜索，在近 30,000 个拟合公式的帕累托前沿筛选了多个简单且易解释的描述符。与依赖单一界面相互作用指标相比，这些新的描述符明显更有助于识别高界面导热的 SAM。基于构建的方法，探索了 9 个界面热导高于 150 MW/m²K 且可合成系数低于 3 的 SAM 端基结构。基于数

据驱动的特征分析表明，界面相互作用是影响界面热输运的核心因素，高极性端基与水分子的强库仑相互作用有利于增强界面导热。以上结果可为界面导热 SAM 主动设计及其在三维封装、电子器件散热中的应用提供理论支撑。

**D36-18**

**Significant suppression in Thermal Transport of β-$Ga_2O_3$ Induced by Inhomogeneous Strain**

Guangwu Zhang,Qiye Zheng*

The Hong Kong University of Science and Technology

β-$Ga_2O_3$ is a ultra-wide bandgap semiconductor which is promising for next-generation power electronics and energy systemes. In device applications, it often experiences inhomogeneous strains when epitaxially grown on various substrates and during implementation in flexible devices, which inevitably affect the thermal transport properties. However, previous stuides have only investigated the effect of uniform strain on thermal transport. Here, we demonstrate a significant suppression of anisotropic thermal conductivity (κ) in β-$Ga_2O_3$ 10nm thin films induced by strain gradients using the machine learning potential and phonon Boltzmann transport equations methods. Specifically, strain gradients lead to a substantial reduction in κ—a 0.6% $nm^{-1}$ c-axis gradient resulting from the inhomogeneous biaxial strain ($\varepsilon_{ab}$ = -3% to 3%) and uniaxial srains ($\varepsilon_a$ = -3% to 3% or $\varepsilon_b$ = -3% to 3%) lead to approximately 50% and 40% reduction in anisotopic κ, respectively, which are around twice the reduction observed under a uniform tensile strain of 3% along all directions. This suppression arises from phonon dispersion broadening, which enhances band overlap and crossover, thereby relaxing selection rules and intensifying phonon scattering. Our findings provide a more comprehensive understanding of the thermal transport properties of β-$Ga_2O_3$ under strains and offer valuable insights for the design and optimization of β-$Ga_2O_3$-based devices.

**D36-19**

**膜排气热沉高热流散热技术研究**

刘志春*、张一帆

华中科技大学能源学院

随着电子芯片热流密度不断提高，必须发展高效、可靠的高热流散热技术。微通道流动沸腾的换热能力十分优异，但由于通道内气体的快速扩张，其应用面临流动稳定性较差的难题。为此，本研究通过在微流道上方布置具有优异排气作用的疏水微米孔膜，将热质输运模式从横向的流动沸腾转变为纵向的膜排气薄液膜蒸发和微池沸腾，从而大幅降低了通道内气相分数，改善了流动稳定性和压降。

实验表明，以水为工质，采用 1 μm 孔径的 PTFE 疏水孔膜进行排气后，热沉的有效热流可达 287.8 W/cm2，此时跨膜热流密度为 152.7 W/cm2，出口的蒸气分数为 0.46，相比于无膜排气的情形，最大有效热流提高了 553%。这证明通过疏水孔膜增加垂直方向的热质传输通道是一种改善流动沸腾的有效手段。为了进一步提高膜排气流动沸腾的性能，采用了以下三种改进措施：(a) 引入开式微通道结构以降低流动压降，提高沸腾稳定性；(b) 降低系统压力以促进相变换热的提前发生，改善中低热流下的换热性能；(c) 改变进口温度以改善沸腾稳定性。开式微通道膜排气热沉实现了 488.6 W/cm2 的有效散热，且热沉温度波动仅±0.2℃，压降波动仅 ±0.2 kPa，充分抑制了高热流密度下流动沸腾的不稳定性。此外，为深入研究膜排气热沉内部气液流动规律和换热机理，搭建了可视化实验台架，将两相流状态与热沉性能相关联，实验证明了流型演变对热沉稳定性的决定性影响，发现了周期性回流、“温度超调”与“压降超调”等现象。

综上，本研究通过对膜和热沉结构的参数和设计优化，大幅强化了膜排气流动沸腾的垂直热质输运通道，建立了稳定的传热传质模式，有效抑制了高热流密度下流动沸腾的不稳定性，大大改善了热沉的综合性能。

**D36-20**

**电沉积增材制造毛细芯热管**

莫冬传*

中山大学

随着芯片集成度提升，电子器件散热面临严峻挑战。热管作为一种高效传热元件，凭借外壳-多孔毛细芯-工质的复合结构，通过工质相变循环实现高效传热，其当量热导率可达金属材料的数十倍，其中，毛细芯性能很大程度上决定了传热性能。针对微型化趋势下传统毛细芯性能不足的问题，我们采用电沉积增材制造技术，针对不同应用场景开发了系列高性能仿生毛细芯，系统研究了其制备机理、形貌特征及对应的流动与传热性能。本报告重点介绍我们在最近一年的研究进展：（1）揭示了孔结构对沸腾传热的影响机制，发现直通孔结构相较于错排孔具有更优的传热性能，且增大孔径可降低气泡成核过热，提高气泡脱离频率，使临界热流密度（CHF）和传热系数（HTC）分别提高 340%和 820%。（2）攻克了长径比大（>30 cm）圆管内电沉积均匀性难题，成功制备超长电沉积热管，其最大传热量提升约 1 倍，为长距离高效传热提供了新方案。（3）在柔性聚酰亚胺基底上构建了微/纳双尺度仿生树林状多孔毛细芯，该结构展现出优异的抗弯曲疲劳性能，经 20000 次弯曲后吸液高度与流动性能仍保持稳定，为柔性电子器件的热管理提供了可靠解决方案。本研究为高性能热管毛细芯的设计与制备提供了新思路，有助于推动电子器件高效散热技术的发展。

**D36-21**

## 辐射与自然对流共存散热过程的数据分离算法及检验

冷学礼，宋占龙，张冠敏，辛公明

山东大学能源与动力工程学院

自然对流与辐射换热共同存在的热传递过程是工程热物理领域普遍存在的一般性问题, 通常发生在以气体为介质的热传递过程中, 具有明确的工程应用背景和理论研究价值, 目前主要以数值模拟求解和实验测试为研究方法. 实验测试中目前普遍存在的困难是实现自然对流换热量和辐射换热量的有效分解, 从而分离确定出研究对象中两种热传递过程的具体性能参数. 当前分离辐射与对流散热量的第一种方法是将实验环境抽真空进行换热测试从而得到辐射换热量, 确定出实验装置内的发射率与角系数的乘积, 然后在共同散热作用的换热测试中减去对应的辐射换热量, 该方法可以有效确定辐射散热量, 但增加了实验装置的复杂性. 第二种方法是测量出辐射表面的发射率并计算出角系数后, 根据辐射换热定律确定出实验装置内的辐射换热量, 这一方法要求已知数据比较多, 并且在装置结构复杂时角系数计算困难. 从以上两种方法的特点看, 有必要寻求更简单可靠的数据分离方式.

论文通过对测试过程中影响对流散热和辐射散热过程关键数据的分析, 发展出使用一系列散热数据同时分离出对流换热和辐射换热热量的新方法, 克服上述两种实验方法的缺陷, 对对流换热和辐射换热实验测试和工程实践均具有很好的应用价值, 基于以上考虑, 撰文论述解决这一问题的方法并进行实际检验.

在论文中通过实验展示出了数据分离后对流温差与自然对流散热功率间的关系以及热力学温度与辐射散热功率的关系,分离后的数据重新拟合后得到的指数关系与分离计算的结果基本吻合,分离后辐射力与散热功率间呈现线性关系, 均符合自然对流和辐射换热特征.当前实验工况为恒热流边界条件，回归方法所用准则式为恒壁温边界条件，二者虽有差异但其本质均为表达表面传热系数与对流温差的关系，将得到的 Nu 与恒热流条件下的准则式比较后发现，二者数据趋势相同，温差较小的两组数据偏差较大，分别为 14.47%和 9.56%，其余数据偏差均在±7%以内，平均偏差为 0.43%，以上分析结果进一步表明使用该方法分离辐射与自然对流换热并获取自然对流换热准则式是可靠的.

论文中提出的使用一组散热数据分离辐射和对流换热散热量的回归方法,不需要抽真空环境测量辐射换热量,不需要提前测量传热过程中各部分发射率以及角系数,可以很大程度降低实验装置和测量过程的复杂度以及计算过程中辐射数据不确定带来的问题, 可丰富热管理材料在具体装置中的应用测试方法.

**D36-22**

## 相变材料 MgAgSb 热输运机理研究

张晓亮*

大连理工大学

MgAgSb 基热电材料在室温下展现出优异的热电性能，但 Peierls-Boltzmann 理论预测的热导率温度效应与实验测量存在显著差异。本研究结合非简谐晶格动力学和统一热输运理论，阐明了 MgAgSb 中粒状声子（$\kappa_C$）和波状声子（$\kappa_P$）的协同输运机制。Ag 原子的局域振动模式导致声学支与光学支产生避免交叉现

象，并与声子分支的准简并特性共同导致了显著的波状声子隧穿效应，从而导致 α-、β-和 γ-MgAgSb 热导率的异常温度效应。

**D36-23**

**Significant reduction of thermal conductivity in $(Yb/Sc)_xAl_{(1-x)}N$ films**

Ziyan Qian,Qiye Zheng*

The Hong Kong University of Science and Technology

With their exceptional piezoelectric performance and spontaneous polarization, AlN-based alloy nitrides are promising candidates for next-generation high-frequency electronic and acoustic wave devices. Understanding the role of composition and microstructure in their thermal transport properties is critical for the co-optimization of piezoelectricity and thermal management, thereby mitigating self-heating effects in high-power 5G applications. In this work, we systematically investigated a novel system of $Yb_xAl_{(1-x)}N$ ($0.184 < x < 0.491$) films alongside the well-studied $Sc_xAl_{(1-x)}N$ ($0.047 < x < 0.359$) films, both fabricated via radio frequency sputtering, to explore the alloying effect on the thermal conductivity (k). Our results reveal that k decreases from 2.27/11.6 to 0.83/3.09 W/(m Ƙ) as the Yb (Sc) content increases from 0.184/0.047 to 0.491/0.359 for wurtzite thin films with thickness ranging from 0.82 to 3.2 μm, as measured by frequency domain thermoreflectance (FDTR). This indicates a stronger suppression effect on k by Yb doping compared to Sc doping. An extremely low k of 0.83 W/(m Ƙ) is measured in amorphous $Yb_{0.538}Al_{0.462}N$, compared with the 320 W/(m Ƙ) for AlN. Further temperature-dependent k measurements for $(Yb/Sc)_xAl_{(1-x)}N$ show an increasing in k as the temperature rises from 100 to 500 K, indicating high Debye temperatures. To gain deeper insights into the thermal transport mechanisms, we conducted the first-principles-based Debye-Callaway model calculations, molecular dynamics simulations, and quasi-harmonic Green-Kubo analyses. Theoretical k as a function of composition and temperature show excellent agreement with experimental observations. This work provides a deeper understanding of the phonon transport in novel AlN-based nitride alloys and offers guidance for optimizing the thermal design of related devices through compositional engineering.

**D36-24**

**通讯产品热管理材料研究现状及后续演进**

张显明

中兴通讯股份有限公司

新一代移动通信、AI 智算等新技术对芯片算力和产品性能提出了越来越高的要求，通讯电子产品的功率密度和发热量持续攀升，散热面临日益严峻的挑战。高性能、高可靠的热管理材料重要性愈发凸现。本次演讲从热传导、对流、辐射三大传热机理出发，对通信电子产品的热管理材料进行了系统性的梳理，并结合产品的实际应用实践，分享了金属材料、热界面材料、液冷工质等材料的研究现状与技术需求，为行业发展方向提供参考。

**D36-25**

**High-Efficiency Thermal Management in Nanoelectronics via Engineered Graphene-Skinned Composites Fabricated by Fluidized Bed-CVD**

Yuqing Song*

Beijing Graphene Institute

The demand for future-oriented high-performance chips, driven by the ongoing digitalization and intelligence advancements in the information society, is rapidly increasing. Nevertheless, this trend is accompanied by escalating power consumption, underscoring the critical importance of efficient heat dissipation for the sustainable advancement of the electronics industry. Graphene and its composites, characterized by their exceptionally high thermal conductivity, hold a distinctive position in this domain. The controlled synthesis of high-quality multilayer graphene composites, however, remains a significant challenge that hinders the full utilization of graphene's exceptional thermal conductivity. In this talk, we will introduce an innovative composite

structure featuring graphene as a conformal skin for ceramic ($Al_2O_3$, AlN, SiC) powders, leading to graphene-skinned powders that exhibit markedly improved thermal conductivity and performance. This material is synthesized via the fluidized bed-chemical vapor deposition (FB-CVD) process, resulting in a continuous graphene skin consisting of multiple highly crystalline layers that are directly grown on the surface of the ceramic powder, forming an impeccable continuous and uniform structure. The exceptional thermal conductivity of graphene on both the surface and interlayer, combined with the strong phonon coupling between graphene and ceramic powder, ensures efficient heat transfer at the interface. The heat flow within the graphene skin surpasses that within the ceramic powders by more than an order of magnitude, establishing a comprehensive heat transfer network in the composite system. Our findings provide a facile and scalable strategy for the synthesis of high-crystallinity, multilayer graphene-skinned composite for the applications in thermal management of nanoelectronics.

**D36-26**

## 高导热柔性定向排列碳纤维热界面材料制备与性能研究

刘斌*、涂宇骞、尧光宏、骆宏杰、贾潇、陈林

中国科学院工程热物理研究所

随着电子设备的高性能化和小型化，热界面材料在电子芯片散热中的作用愈发重要。本文基于流动剪切定向方法开发了一种二次定向的新制备策略，以沥青基碳纤维（CFs）和球形氧化铝（$Al_2O_3$）为填料，双组份聚二甲基硅氧烷（PDMS）为基体，制备了定向排列的高导热界面材料。实验系统探究了 $Al_2O_3$ 粒径比和 CFs 填充量等因素对复合材料导热性能的影响规律，研究表明当 10 μm 和 2 μm $Al_2O_3$ 的比例为 6:4、CFs 填充量为 13 wt%时，导热垫片的通平面热导率达到 25.6 W/(m·K)，激光闪光法下热导率最高可达 37.5 W/(m·K)。利用扫描电子显微镜（SEM）和 X 射线衍射（XRD）分析了 CFs 的取向和分布，结果表明二次定向工艺使 CFs 在厚度方向高度定向排列，且多尺寸 $Al_2O_3$ 复配优化了导热网络。同时，制备的定向排列 CFs 导热垫片兼具优良的柔性，邵氏 00 硬度为 55-90 度，低应力下可以更好的填充界面间的微小间隙，在 LED 散热实验中相较商用垫片降低了 11.4℃，展现了优异的散热性能。本研究为高性能定向排列热界面材料的研究和应用提供了一种简单有效的技术支撑。

**D36-27**

## 高透明防污降温涂层材料研究

谭新玉*，齐贵广，胡伟伟

三峡大学材料与化工学院，宜昌市大学路 8 号

随着全球气温不断升高，气候变化问题日益严峻。传统制冷技术广泛依赖电能，进一步加剧了能源危机，其产生的温室气体还进一步加速了气候变化。在此背景下，辐射冷却技术作为一种零能耗、无污染的新型制冷手段，通过大气窗口将物体热量以辐射的形式散发到外太空，成为减少温室气体排放、应对气候变化、减少热污染以及解决能源和经济危机的重要策略。

课题组经过多年的研究，通过将具有高发射率多孔结构的聚合物与高折射率的纳米颗粒相结合，人工设计获得了多款具有极高热发射率和反射率的涂层材料，尽可能的实现对太阳光紫外/可见光/近红外全热波段高强反射。与一般隔热涂层不同的是，我们的涂层还实现了在 8-13 微米的大气窗口波段超过 95%的高热发射率。基于开发的降温涂层，开展表面疏水改性，实现了改性后薄膜疏水自清洁性和制冷降温双功效，疏水角达到 150 °以上。研发薄膜具有良好耐酸碱性。发明涂料涂覆可喷涂、刮涂等灵活制模方式到金属、混泥土、塑料等多类基底并牢固附着。于金属基底上涂层在一个阳光照射下能达到比裸基底温度低 25℃，平均低 15℃的显著降温性能。该涂料可广泛用于各类户外电力设施，储能系统及建筑的表面防污及降温。

**D36-28**

## 铟铜复合热界面材料界面结构与热性能调控

张洁、郭宏*

北京有色金属研究总院

铟片作为常见的大功率器件的商用热界面材料具有很好地散热性能，但由于摩尔定律的存在，更高性

能的热界面材料在未来是必要的。为提高铟基热界面材料的传热性能，本文采用热压烧结制备了一种以铟为基体，铜为增强体的复合热界面材料。利用透射电镜表征了 In/Cu 复合材料典型界面结构；采用理论模型计算了不同结构 CuIn 相界面层的界面导热规律；通过改变热压烧结制备参数调控 CuIn 相界面层形貌，阐明了 CuIn 相界面层形貌对复合材料导热率的影响规律。结果表明，In-Cu 界面为反应结合，形成的 CuIn 相与 In 和 Cu 均为紧密的原子结合；CuIn 相为连续态且厚度越薄时界面热导越高；考虑到实际制备情况下，厚度为~1 μm 时 CuIn 相界面层才从非连续状逐步变为连续状，故 CuIn 相界面层为~1 μm 厚的连续状时导热率最高，为 122.25 Wm-1K-1，是纯铟导热率的 1.4 倍。为高导热界面材料的发展提供了新的选择和思路。

**D36-29**

## APG-Al 复合材料界面及其组织结构探究

刘语霖*

有研工程技术研究院

为开发新型二维均热材料，本文在铝基体中引入具有超高面内热导率（1500 W/m Ƙ）的退火热解石墨（APG），制备退火热解石墨-铝高导热复合材料。为优化石墨与铝之间的界面结合，提升材料导热性能，针对 APG 进行表面改性，镀覆了 Ti 元素碳化物镀层，随后进一步镀覆了 Cu 金属层，构建双层界面结构。证明了 Ti 改性层对界面结合的优化效果，同时二次镀覆得到的双层结构可以进一步优化石墨-铝之间的界面结合，优化宏观热力性能。在 APG 体积分数为 60%的情况下，$APG_{Ti}$-Al 面内热导率达到 939.48W/m Ƙ，抗弯强度为 151MPa。$APG_{Cu-Ti}$-Al 面内热导率为 954W/m Ƙ，抗弯强度为 156MPa。为开发高导热高强度二维均热材料提供了一条有效途径。

**D36-30**

## 电子封装热管理复合材料

林正得

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

近年来，基于氮化镓等第三代半导体的高频率、大功率芯片得到了国家和产业的重点关注与广泛应用；为了提升内核效能，新一代芯片架构正朝向微缩化和 3D 互联方向发展，致使单芯粒功率密度达到了 150 W/$cm^2$，局部热点可达 800 W/$cm^2$。伴随着巨大的发热量，芯片的“热失效”成为了制约 Al 大算力、空天等精密装备内功率器件发展的主要瓶颈之一。要解决目前电子封装的散热难题，需要对既有热管理材料进行升级迭代，并有效连接与统合这些部件，形成从芯片至散热器的最优传热路径。本团队针对电子封装中“芯片–衬底–均热板–热沉”热输运串联系统的关键零部件进行了攻关开发，克服了复合材料中二维材料填料的“定制调控排列取向”与“强化异质传热界面”两个共性难题，研发出“低热阻全无机导热垫片”、“高导热强绝缘氮化硼垫片”、“大尺寸纳米银导热环氧胶”、“轻质高导热碳/铜散热器”等系列新型热管理材料，从而提出面向新一代芯片架构的综合解决方案，实现拥有自主知识产权的创新技术与产品。

**D36-31**

## 垂直碳纳米管阵列热界面材料的可控制备及应用

邱琳

北京科技大学

热界面材料（Thermal Interface Materials, TIMs）作为电子设备热管理技术中的核心组件，通过填充发热元件与散热器之间的微观空隙、降低界面热阻。广泛应用于 5G 基站芯片、集成电路等高功率器件的热管理领域。当前聚合物基材料（如硅脂、凝胶）导热系数普遍偏低，难以满足高功率芯片的散热需求。新型 TIMs 的开发能够填补传统材料短板，以更高热导率、更低的接触热阻精准适配芯片微观结构，保障芯片在复杂工况下高效散热，提升电子器件可靠性。聚焦于化学气相沉积法构建碳纳米管阵列（Vertically Aligned Carbon Nanotubes, VACNTs）TIMs 的生长系统，制备大厚度、高纯度、高密度的 VACNTs，为芯片热量快速传导开辟新路径。借助焊料转移法中的热压焊接技术，确保在转移及应用过程中的完整性，解决高功率芯片的散热难题。通过优化生长参数热提升 VACNTs 的散热效能，降低芯片过热风险，减轻高温与热应力对器件的损伤。最终实现高功率器件的高效散热，延长服役寿命，推动芯片产业进步。

**D3-32**

## 金属间化合物过渡层大幅提升液态金属热界面材料的导热性能

张旭东[1]、曹炳阳*[2]

1. 中国科学院理化技术研究所

2. 清华大学

液态金属与固态金属之间的界面热阻是液态金属热界面材料应用中的主导热阻，界面处自然生成的氧化物导致液态金属与固体金属之间的界面作用力为范德华力，载热子为声子，不利于界面热输运。本研究中，我们提出了在界面处生成金属间化合物的策略增强液态金属的界面热输运性能，该方法能够使界面作用力转变为金属键，载热子转变为电子。以液态镓/铜界面为例，TDTR 测试表明金属间化合物的界面热阻比氧化物的界面热阻降低一个数量级，分子动力模拟和实验测试表明了金属间化合物界面具有更强的界面键合力和优异的润湿性能。芯片应用实验表明，当热通量为 200 W/cm²时，采用该方法，芯片与散热器之间的界面温差为 10.2 ℃，这一数值接近焊接（8.3 ℃）时的温差，且远小于传统氧化方法（30.1 ℃）的温差。

**D36-33**

## 聚合物基高性能热界面材料

叶振强*

深圳大学材料学院

热界面材料是热管理领域不可或缺的材料，用于填充器件内部空隙，增强界面传热。我们针对热界面材料接触热阻占总热阻比重高的问题，从填料角度、基体角度、复合材料整体等多维度开展研究。我们提出填料取向和表面改性等手段增强界面传热，优化传热通路，提高传热效率。采用理论分析、模拟计算、实验制备、热测量等多种方法。在理论方面，我们建立起预测热界面材料界面粘接厚度的模型，界面粘接厚度是影响热界面材料总热阻的关键因素之一；通过分子动力学方法预测了界面接触热阻，并揭示了影响界面接触热阻的机制。在材料制备方面，我们提出了一种等离子体辅助策略在石墨薄膜表面接枝一个自组装的单分子层，以降低石墨膜与聚合物基体的接触热阻，实现填料与基体的界面接触热阻下降了一个数量级；我们基于静电自主装方法，用 MXene 片改性氧化铝增强热界面材料界面传热，通过改性，热界面材料热导率提升 50%；此外，提出了一种新的热界面材料制备技术，通过模具在传统热界面材料内部构件导热通道阵列，将液态金属注入其中，实现了性能的精确调节。在接触热阻测量方面，建立起非接触式 Photothermal 热测量系统，测量了不同条件下的接触热阻。

**D36-34**

## 基于液态金属封装的可拉伸新型热管

申清臣*

宁波东方理工大学（暂名）

得益于卓越的可穿戴性和多功能性，近些年来可拉伸电子器件发展迅速。但因为可拉伸电子器件所用的基体往往是导热性能很差的高分子弹性体材料，其散热问题变得越来越关键。本人通过研制基于液态金属的新型可拉伸封装、设计腔体结构、制备可拉伸的吸液芯等，成功开发可稳定工作的可拉伸热管，在未拉伸状态下，液态金属密封热管的有效热导率为 285 W/(m K)， 在 10%拉伸状态下， 有效热导率甚至增加到 309 W/(m K)， 这远远高于 PDMS 的~0.2 W/(m K)，有望为可拉伸电子器件热管理提供全新的解决方案。该工作以“Liquid Metal-Based Soft, Hermetic, and Wireless-Communicable Seals for Stretchable Systems”为题发表于《Science》上，并被新华网、人民网、中国科学报、 Chemistry World、 Phys.org、 IMechE、AZO Materials 等国内外知名媒体以研究热点的形式进行报道。

**D36-35**

## 碳纤维/石墨烯双重热传导网络的构筑及其导热复合材料

卢晓航、刘骥、束超、张思成、赵浩宇、于中振、李晓锋*

北京市朝阳区北三环东路 15 号北京化工大学

导热聚合物复合材料在电子工业的热管理中展现出巨大潜力，但由于声子散射和填料-填料、填料-基

质界面的热阻，类似金属的高导热率（>200 W $m^{-1}$ $K^{-1}$）仍难以实现。为解决这一难题，我们提出了一种有效的方法：将宏观层面的中间相沥青基碳纤维（CF）阵列与高质量的自组装石墨烯网络焊接，设计了一种致密的互连填料框架。其中垂直排列的连续 CFs 作为主要的垂直导热路径，最大限度减少声子散射和界面热阻。与此同时，石墨烯次级网络互连 CFs，构建更完整、更致密的框架，并增加额外的热传导通路。在填充量为 23.3%时，该环氧复合材料的垂直导热系数达到 262 W $m^{-1}$ $K^{-1}$，树立了导热聚合物复合材料新的标杆。用作热界面材料时，该复合材料的冷却效率比标准的商用材料提高了 68.2%。此外，该功能复合材料还具有优异的焦耳加热和界面粘附性能，适用于复杂环境下的热界面愈合和多功能热管理。

**D36-36**

## 磁场辅助定向排列氮化硅/环氧树脂复合材料性能研究

王宇泽[1]、张同[2]、韩召[2]、张显*[1]

1. 西安电子科技大学

2. 安徽工业大学

电子设备的小型化和高功率密度给热管理带来了新的挑战。对微结构排列的精确控制，特别是氮化硅（β-$Si_3N_4$）这种具有良好应用潜力的各向异性导热填料，对于其在电绝缘封装内的高导热复合材料中实现高效散热至关重要。本研究使用实验室独立制备的高长径比 β-$Si_3N_4$ 粉体，利用化学共沉淀法将 $Fe_3O_4$ 负载于 $Si_3N_4$ 表面（$Si_3N_4$@$Fe_3O_4$），以环氧树脂（EP）为基体，通过外加磁场诱导 $Si_3N_4$@$Fe_3O_4$ 杂化填料在树脂中定向排列，制备一系列不同填充量（10 wt%、20 wt%、30 wt%和 40 wt%）的 $Si_3N_4$@$Fe_3O_4$/EP 复合材料。研究结果表明，磁场辅助定向排列显著提升了复合材料的性能，$Si_3N_4$@$Fe_3O_4$/EP 的热导率呈现明显的各向异性。具体地，在垂直磁场作用下，$Si_3N_4$@$Fe_3O_4$ 复合材料的面内热导率最大可达到 1.08 W $m^{-1}$ $K^{-1}$（填充量为 40 wt%），此时材料的面外导热率仅为面内导热率的 54%，同时，$Si_3N_4$@$Fe_3O_4$/EP 表现出优异力学性能与热力学稳定性。此外，采用 Foygel 理论阐明了填料排列对导热机制的影响以及在 LED 灯组上的实际应用，强调了 β-$Si_3N_4$ 长晶须作为导热填料的 $Si_3N_4$@$Fe_3O_4$/EP 复合材料在热管理应用中的潜力。本研究为开发适用于电子热管理的各向异性导热复合材料提供了有效的设计理念和基础。

**D36-37**

## 用于超高导热聚合物复合材料的高连续碳纤维-石墨烯填充网络的无损工程设计

张思成、卢晓航、刘骥、于中振、李晓锋*

北京市朝阳区北三环东路 15 号北京化工大学

现代电子设备的快速小型化和集成化加剧了热量产生，迫切需要高效的热界面材料（TIM）来促进热量散发。尽管垂直排列的填充物网络在开发高热导率复合材料用于 TIM 应用方面展现出巨大潜力，但传统方法通常需要苛刻的处理工艺，且忽视了整体热通量方面的局限性，这已成为进一步提升热导率的关键瓶颈。在此，我们提出一种温和、可扩展且无损的策略，通过设计独特的“枝叶”结构填料网络实现高效热传导。其中，聚多巴胺修饰的长沥青基碳纤维（mPCFs）作为垂直排列的热传导枝干，而聚酰胺环氧氯丙烷改性石墨烯纳米片则自组装于 mPCF 表面形成侧向导热桥。该设计通过协同整合定向声子传输、增强的界面热传导及横向热扩散，显著提升了复合材料的整体热通量。所得环氧树脂复合材料在适中的填料含量（34.7 %vol）下，实现了卓越的热导率（289.5 W $m^{-1}$ $K^{-1}$），超越了大多数聚合物基复合材料，甚至部分金属材料。此外，通过结合实验数据、理论模型和有限元分析揭示了“茎叶”结构填料网络的关键贡献。这项工作为开发具有金属级导热性能的下一代聚合物基热界面材料（TIMs）提供了策略，以满足高要求应用的需求。

**D36-38**

## 高取向碳纤维复合薄膜各向异性热物性研究

王建立*

东南大学

微米薄膜在热管理领域具有广泛的应用，其中高取向碳纤维/环氧树脂复合材料因其独特的三维各向异性热物性，在电子芯片定向散热中展现出巨大应用潜力。然而，目前常用的商业测量设备如激光闪光分析仪（LFA）、Hot disk 等，难以同时精准表征此类复合材料在不同方向的热导率，限制了对材料热输运机理

的深入理解。近期，课题组结合 T 型探针法、2ω 法及激光点周期加热法，成功实现了碳纤维复合材料及其组分热导率、热扩散率与体积比热容的精准表征。通过有限元模拟分析了微观纤维弯曲对热流路径的影响。通过完整测量高取向碳纤维复合材料三个主轴方向的热物性，深入探讨了复合薄膜与其各组分热性能之间的内在联系，使导热模型更加清晰明确。实验结果表明，该复合材料沿纤维方向的热导率高达 312 W/(m Ƙ)，而横向热导率仅约 1.06 W/(m Ƙ)，热导各向异性比达到近 294，表现出卓越的定向导热性能。在 100 K–300 K 温度区间内，该材料保持稳定的各向异性热性能，为高密度电子器件的定向散热与热管理设计提供了有效依据。

**D36-39**

## 微纳米界面中热载子的表征和相关散热应用

周艳光*

香港科技大学

当材料的尺度到非常小的尺度的时候，只有十亿分之一米的纳米尺度，由于量子和尺寸效应，材料中的热输运过程同在体材料中有着显著的不一样。正因为如此，纳米科技常常被用于设计高散热性能或者高热转换效率相关材料和结构，这些材料或者结构在医学，能源和制造方面有着广泛的应用。在此报告中，我将从兩个方面介绍课题组在微纳米界面中热输运机理探索和潜在应用的尝试。具体包括热载子表征算法开发和具体表征纳米界面处的热输运过程和机理，从而为设计高散热性能的半導體界面提供指导；利用表面修饰、金属有机物框架材料的吸附性能设计合成高散热效率的表面和高调控热阻比的界面。

**D36-40**

## 基于扫描热显微镜的微纳尺度热物性定量测量技术：从理论模型，校准原理到仪器集成

李一凡*

上海第二工业大学

微纳尺度热物性测试对于揭示材料热传输机制、优化器件热管理性能以及推动高性能电子与能源器件的发展具有重要意义。扫描热显微镜（Scanning Thermal Microscopy, SThM）因其纳米级空间分辨率和表面热响应表征能力，被广泛用于探测局域热物性。然而，由于探针-样品界面复杂的耦合热传输机制，实现 SThM 的定量测量仍面临诸多挑战。本工作将系统回顾了过去二十年来在实现 SThM 定量热物性测量方面的研究进展，重点围绕三个方面展开：理论建模、标定策略与仪器集成。在理论建模方面，研究深入探讨了多路径热传输机制，并分析了各类模型在不同热传输条件下的适用性；在标定策略方面，涵盖了隐式与显式热交换标定方法，以及用于热导率和温度场匹配的双扫描法与零点法等技术；在仪器集成方面，介绍了包括 3ω-SThM、基于 MEMS 的热平台、热探针优化等在内的先进配置，并探讨了其在提升测量灵敏度与空间分辨率方面的作用。

**D36-41**

## 两相浸没式液冷技术于芯片热管理领域的应用探究

李斌、曹炳阳*

清华大学

在数据中心应用领域，两相浸没式液冷已成为一种极具前沿性的热管理技术，它与现代算力不断增长的需求实现了有效契合。芯片制造商、数据中心运营商以及服务提供商均积极且深入地开展针对两相浸没式液冷的研究工作，认可其在数字时代对于热管理变革的巨大潜力。在本项研究工作中，构建了一套两相浸没式实验系统。此系统旨在通过创新性的浸没冷却策略，应对商业服务器芯片因功率需求持续攀升而产生的热挑战。研究设计了高性能散热器，借助机械精密加工工艺制造一体式铜质散热器，用以取代现有的商用铝制风冷散热器。采用微纳涂层技术，促进成核现象并强化沸腾传热过程，从而实现高效散热的目标。通过将散热器与均温板进行集成，显著降低了芯片的最高温度，同时有效解决了芯片表面温差较大的问题。基于实验数据的推断结果表明，该散热方案具有可扩展性，能够应用于单芯片千瓦级功耗的热管理场景。

**D36-42**

## 射频超导腔内壁镀膜热扩散性能的激光模拟测量与仿真验证

陈善童[1,2]、罗迪迪*[1]

1. 中国科学院近代物理研究所

2. 中国科学院大学

射频超导（SRF）腔的性能高度依赖于铌（Nb）腔的热传导效率，这直接影响了腔体在强射频场下的稳定性与临界磁场阈值。在腔内壁镀覆氮化铝（AlN）等高导热薄膜可有效提升热输运能力，但传统热导率测量方法存在系统性误差，无法准确评估其真实提升效果。实际情况下，Nb 基材伦敦穿透深度范围的杂质或晶体缺陷与射频场相互作用发热，随后热量向 Nb 基体深处、导热膜和沿表面传播；而传统导热系数测量方法为加热准一维样品侧面，热量沿样品长度方向传播，热源位置与 SRF 表面发热的位置和传播路径均有差异，且导热膜与热源非直接接触，导致测量值严重低于其在射频腔应用中的实际热导性能。为解决此问题，本研究提出一种基于激光加热的热导率测量新策略，并通过优化激光波长，选择性激发 Nb 吸收并抑制导热膜被激光直接加热，从而将加热位置精准限制在从 Nb/导热膜交界面向 Nb 内部延伸的区域内，模拟射频场作用下的表面温升行为。分析发现，在 560nm 波长附近，Nb 吸收率>45%，AlN 吸收率<10%，最符合我们的要求。接着，我们利用 COMSOL 多物理场仿真，模拟并计算激光加热下准一维纯 Nb 样品近加热端与远加热端之间的温差分布，通过比较有无 AlN 导热膜时的温差，来定量评估 AlN 薄膜对热扩散能力的改善效果。下一步，我们将根据仿真结果改造热导率测试仪器，将所述激光加热部件整合到热导率测量中，为高梯度超导加速器的热稳定性设计提供更精确的实验方法和数据支撑。

**D36-43**

## 块体铁弹材料 $MX_2$（M = Pd, Pt; X = S, Se）的电热输运性质研究

雷文*

桂林理工大学

由于在机械开关、多功能超弹性、光伏电池和非易失性存储等诸多领域有着良好的应用前景，铁弹材料的研究受到了科学界和工业界的广泛关注。在应力作用下，铁弹材料的晶格取向会发生一定程度的旋转，使得一些与方向有关的物理性质随之发生变化，进而产生独特的耦合效应，这为设计可控器件提供了新的思路。我们利用第一性原理和玻尔兹曼输运理论研究了块体 $MX_2$（M = Pd, Pt; X = S, Se）的铁弹特性，并探索通过铁弹相变对其电、热输运性质进行有效调控。此外，我们还对其的晶格热导率进行了对比研究。我们的第一性原理计算结果发现，块体 $PtSe_2$ 表现出良好的铁弹性。当沿着层间方向施加单轴压缩应变时，该体系会出现 90 °晶格旋转，同时伴随着较强的铁弹信号（39.1%）和适中的转换能垒（53 meV/atom）。通过求解玻尔兹曼输运方程，我们发现 $PtSe_2$ 面内的空穴迁移率和晶格热导率远高于面外方向，表现出较强的各向异性。另外，通常认为，晶格热导率随着组成元素质量的增加而减小。结合第一性原理计算和玻尔兹曼输运方程，我们发现铁弹体系 $MX_2$（M = Pd, Pt; X = S, Se）的晶格热导率表现出不同寻常的质量依赖关系。在 $PdS_2$、$PdSe_2$ 和 $PtSe_2$ 这三个稳定的化合物中，含有较重阴离子的 $PdSe_2$ 体系的晶格热导率明显低于 $PdS_2$，与经验的 Slack 模型相符合；然而，对于含有较重阳离子的 $PtSe_2$，其晶格热导率明显高于较轻的 $PdSe_2$。进一步分析表明，Pt 元素的镧系收缩效应会减小 $PtSe_2$ 中的 Pt-Se 键长，使得原子间相互作用增强，从而导致 $PtSe_2$ 表现出较小的散射相空间和较弱的晶格非谐性并增加了体系的声子弛豫时间。值得一提的是，这三个体系的晶格热导率表现出强烈的各向异性，因此可以利用铁弹相变来调控它们的热输运性质。

**D36-44**

## 利用阳离子配位能力差异研发高性能 N 型固态离子热电材料

陈林、许浈婧、吴晓阳、孟锴、杜明圣、赤骋*

华北电力大学

在全球能耗增长、人们环保意识增强的时代背景下，具有低成本、高热电势（毫伏级）特性的离子型热电（ionic thermoelectric，i-TE）材料有望广泛用于低品位余热回收从而提高能源利用率。但是，为满足实际应用需求，现有 i-TE 材料的性能与稳定性还需进一步提升。此外，n 型 i-TE 材料种类较少、热电势调控机制不够清晰也是限制实际应用的因素。本研究提出了一种新策略：选择性地引入不同阳离子（$X = Li^+$、

$Na^+$、$Mg^{2+}$、$Zn^{2+}$），利用它们与聚氧化乙烯（PEO）中醚氧（EO）的配位能力差异来调控离子热电性能。通过精确调控阴阳离子的扩散率和 Eastman 熵变，成功获得了高性能的 n 型固态 i-TE 材料。分子动力学模拟表明，在 X/EO 之比为 0.15 时，二价阳离子（$Mg^{2+}$和 $Zn^{2+}$）相较于一价阳离子（$Li^+$和 $Na^+$）熵变差异和扩散率差异更大，从而有助于提高热电势。在实验测试中，二价体系 PEO/$MgTFSI_2$的热电势为 -6.18 mV $K^{-1}$，明显优于一价体系 PEO/LiTFSI 的 -1.6 mV $K^{-1}$。实验数据与模拟结果相互吻合，验证了通过调控阳离子配位来调节热电性能的有效性。这些结果为设计基于 PEO 的 n 型固态 i-TE 材料提供了良好的参考和指引。

**D36-45**

## 点缺陷对高导热 III-V 族半导体热输运的影响

郭瑞强*

山东高等技术研究院

高导热材料是实现高效散热的关键核心材料，被广泛应用于电子器件热管理。然而，材料中普遍存在的点缺陷通常会阻碍热量传导，显著降低其热导率。因此，理解点缺陷对高导热材料热传导的影响是调控其热导率的基础，对于器件热管理和热设计至关重要。近年来，立方砷化硼(c-BAs)和氮化硼(c-BN)等 III-V 族半导体材料因其高热导率受到广泛关注，在电子器件散热等领域展现出广阔的应用前景。我们采用基于第一性原理的格林函数方法研究了点缺陷对典型高导热 III-V 族半导体热输运的影响，揭示了点缺陷引起的非瑞利声子散射机理，阐明了点缺陷导致的非本征与本征声子散射之间的竞争关系，以及点缺陷的电荷状态对声子输运的影响。本研究加深了对点缺陷-声子散射机理的理解，为利用缺陷工程调控材料热物性提供了指导。

**D36-46**

## 微纳米尺度的挠曲传热现象理论初探

岳圣瀛*

西安交通大学航天航空学院

纳米结构具有特殊的电子能带结构、较高的超导转变温度、以及奇异的电催化活性的特性。同时纳米结构也具有奇特的导热特性，对硅纳米线施加均匀应变会对其声子导热特性的研究已经较为熟悉，非均匀应变下的声子输运机理由于其复杂性目前还缺少相应的理论研究。实验中利用弯曲单个硅纳米带引入非均匀挠曲应变，并测量其对热传输的影响，结果表明每纳米 0.112%的应变梯度可导致热导率急剧下降(34±5)%。空间的非均匀应变梯度破坏了晶格的空间平移对称性，为了在第一性原理的计算中考虑非均匀应变梯度对声子输运的影响，采用了小局域均匀应变微分逼近的方式来描述空间中的非均匀应变梯度。该理论模型得到的模拟结果与实验结果有较好的吻合程度。利用该理论模型可以得到由声子展宽效应引起的声子散射率，该工作打破了声子热输运的传统理论模型，揭示了硅纳米线挠曲传热中的声子谱展宽效应加剧了声子散射，并阻碍了声子热传输。

**D36-47**

## Pushing thermal conductivity to its lower limit in crystals with simple structures

Xingchen Shen*

Northwestern Polytechnical University

Materials with low thermal conductivity usually have complex crystal structures. Herein we experimentally find that a simple crystal structure material AgTlI2 (I4/mcm) owns an extremely low thermal conductivity of 0.25 W/mK at room temperature. To understand this anomaly, we perform in-depth theoretical studies based on ab initio molecular dynamics simulations and anharmonic lattice dynamics. We find that the unique atomic arrangement and weak chemical bonding provide a permissive environment for strong oscillations of Ag atoms, leading to a considerable rattling behavior and giant lattice anharmonicity. This feature is also verified by the experimental probability density function refinement of single-crystal diffraction. The particularly strong anharmonicity breaks down the conventional phonon gas model, giving rise to non-negligible wavelike phonon behaviors in AgTlI2 at 300 K. Intriguingly, unlike many strongly anharmonic materials where a small propagative thermal conductivity is often accompanied by a large diffusive thermal conductivity, we find an unusual

coexistence of ultralow propagative and diffusive thermal conductivities in AgTlI2 based on the thermal transport unified theory. This study underscores the potential of simple crystal structures in achieving low thermal conductivity and encourages further experimental research to enrich the family of materials with ultralow thermal conductivity.

**D36-48**

## 界面力热调控提升宽禁带半导体电子器件的热管理

周岩*、马登科、赵云山、张力发

南京师范大学

宽禁带半导体(即，第三代半导体)目前在全球高性能芯片产业正扮演着越来越重要的作用，其中氮化镓(GaN)是获得最广泛关注的热点材料之一。但是，GaN 基晶体管在较高的功率工作时会导致大量局域化的近结焦耳自热产生，进而导致器件沟道温度过高而很快失效，是影响 GaN 基器件寿命和可靠性的重要因素之一，也是制约 GaN 基器件进一步发展的瓶颈[1-2]。大量研究表明，GaN 基晶体管近结区域的热输运主要受 GaN 层、界面缓冲层和衬底层材料热导率的影响，及 GaN 外延层和衬底的异质界面处非常高的界面热阻(TBR)的显著制约。目前不同衬底 GaN 基高电子迁移率晶体管(HEMT)中存在太大 TBR 的主要原因是由于生长制备和缓释应力方法等造成的 GaN 层与衬底层之间的界面缓冲层材料厚度太厚和其热导率太低，如能设法集成高质量的较薄的高导热异质界面缓冲层材料和结构，并从理论上指导低界面热阻材料与结构的设计和制备，将会使目前 GaN 基器件的加载功率密度和工作寿命等均获得显著提高。高热导率高性价比的多晶金刚石(PCD)与 GaN 基电子器件的异质集成已展现出优异的散热能力，可显著提高器件的热管理性能。对于 GaN HEMT 而言，若想最大程度的受益于金刚石的高导热性能，一方面可以通过用 PCD 替代现有衬底来实现，另一方面可以通过在 GaN HEMT 沟道顶部以生长或键合方式集成 PCD 来实现；尽管异质集成已经实现，但其热学性能还不尽人意。为研究上述 GaN 与 PCD 异质结构的热学性能，本文采用理论设计、计算与实验结合系统研究了 GaN HEMT 顶部生长和衬底替换的 PCD 的 TBR 及其热导率，设计并实验对比了不同高导热界面缓冲层材料及界面结构对其 TBR 和热导率的影响。在所得实验参数的基础上，本文进一步通过第一性原理研究了界面热输运机制、并采用有限元热学模拟研究探索了 GaN 与 PCD 以不同界面异质集成的 HEMT 的热管理性能及其优化设计，为进一步发挥 PCD 对 GaN 基电子器件的散热性能的材料生长设计和器件集成制备提供了重要指导。

**D36-49**

## 二维石墨烯范德华堆叠结构的热导率和声子行为研究

董源*

杭州电子科技大学

本文采用第一性原理计算方法，研究了不同范德华模型对石墨烯范德华堆叠结构热导率及声子特性的影响。

采用不同范德华模型计算了不同层间距下的系统能量，确定了最合理的层间距。vdW-DF-R 和 vdW-DF 模型预测的层间距更接近实验值，而 DFT-D2 因忽略部分电子关联效应，倾向于低估范德华相互作用，得到的层间距最小。热导率计算结果表明，vdW-DF-R 模型能更准确描述多层石墨烯间的长程电子密度关联，使用其平衡原子间力常数计算热导率更可靠。对比实验数据，vdW-DF-R 模型对双层石墨烯(BLG)和石墨热导率的预测与实验吻合度较高。

对声子特性进行分析发现，vdW-DF 模型计算的 BLG 声子态密度出现虚频模式，可能导致热导率计算异常。不同模型下，BLG 和石墨的声子群速度、散射率存在差异。在 vdW-DF-R 模型中，BLG 的 ZA 声子模式非谐散射比石墨更强，降低了其热导率；而在 DFT-D2 模型中，石墨的非谐散射更强，导致其热导率计算值低于 BLG。在 DFT-D2 模型中，石墨的加权相空间显著高于 BLG，且在约 15 THz 处存在平带模式，这表明石墨层间 vdW 相互作用增强了阻力散射过程，该阻力随石墨烯层数增加而线性增大，与部分早期实验和计算结果相符，即多层石墨烯热导率随层数增加而增加。而在考虑长程相互作用的 vdW-DF-R 和 vdW-DF 模型中，BLG 的加权相空间略高于石墨。虽然 vdW 相互作用增强了 BLG 中 ZA 模式的声子非谐散射，大幅降低其热导率，但石墨中层间 vdW 相互作用不局限于此，其原有的非谐散射被多层范德华相

互作用抑制，由此产生的非线性声子-声子相互作用使其保持较高热导率，与实验测量相符。

**D36-50**

## 微纳力热功能结构原子级构筑与应用

秦光照*

湖南大学

随着新能源汽车从电动化到智能化的发展，具有高功率算力的智驾芯片作为智能化的核心，其安全稳定可靠工作，是新能源汽车的行车保障之基。智驾芯片面临车载工况下的高温和强振动挑战，亟需高效散热技术保障其稳定可靠工作。该报告将介绍芯片微系统散热技术中的微纳力热功能结构原子级构筑与应用研究，通过原子排布和结构设计实现热量传递的高效控制，从理论发展、结构设计和器件应用三个方面汇报相关研究工作。包括发展先进力热功能结构的原子级设计与调控理论；发展基于机器学习技术的高通量多尺度模拟仿真方法，通过结构的多尺度设计实现先进力热性能；提出过程可逆的通过外加电场调控热导率的新思路，成功构建电控热开关器件，并在后续的实验中证实。相关研究工作为汽车智驾芯片稳定可靠工作所面临的高温和强振动等挑战提供解决方案。

**D36-51**

## 人工智能助力活性热超构材料

金鹏*

复旦大学

精准温度控制在电子设备热管理、废热回收及生物细胞调节等前沿领域至关重要。基于超构材料的热管理技术因其独特性质而备受关注，但现有材料难以适应实时变化的外部环境。理想的热超构材料应具备环境自适应能力，能根据需求自动调整工作模式实现功能可调性。然而，目前能够自感知并主动适应环境变化的活性超构材料尚未成熟。本研究利用深度学习技术开发了一种新型活性热超构材料，可根据温度梯度变化自动调节热传递性能。这种非线性热响应材料为制造真正智能的自适应设备奠定了基础，使设备能够感知环境变化、在多变条件下保持功能稳定或灵活切换工作状态，有效提升热传递效率。

**D36-52**

## 超构材料空间扰动驱动的近场热辐射强化研究

周承隆*、楚俊宇、易红亮

哈尔滨工业大学

近场热辐射作为微纳尺度能量传递的核心机制，其性能优化对于推动微纳米技术的创新发展具有关键意义。在现有研究中，近场热辐射强化技术主要聚焦于超构材料元胞单元本征特性的优化策略。然而，受限于调控模式自由度不足以及能带色散局域近似假设等固有局限，此类方法在性能提升方面遭遇了难以突破的瓶颈。鉴于此，本研究提出一种创新的超构材料近场热辐射强化路径，即通过引入元胞单元间的相对空间扰动，打破传统设计的局限性。该空间扰动策略能够将原本准孤立的局部共振模式转化为由邻近元胞间强相互作用主导的扩展非局部共振模式。相较于仅关注元胞单元本征特性的传统研究范式，空间扰动策略仅通过调整元胞单元的空间排列关系，即可实现辐射热传导性能近两倍的显著提升。进一步研究发现，准无序空间扰动所驱动的非局域相互作用能够突破传统近场热辐射的局域限制，使辐射能量在远场间隔内实现超普朗克输运，甚至在某些条件下超越近场场景的传输效率。超构材料空间扰动策略的研究有望突破当前近场辐射换热基础理论的发展瓶颈，为热管理与能源转化技术的革新提供坚实的理论支撑与技术路径。

**D36-53**

## 兼具高面外热导率与低石墨烯含量的柔性复合薄膜

靳钧、苏杨、过嘉辰、张众望、彭勃、陈敏*、武利民

复旦大学 材料科学系

因石墨烯优异的本征热导率，基于石墨烯的复合材料已成为高集成度电子器件中颇具前景的热界面材料（TIMs）。然而，挑战仍然存在，例如，如何在柔性聚合物中实现石墨烯的有序排列，以及如何调控石墨烯/石墨烯界面的声子散射。本研究采用非溶剂致相分离（non-solvent induced phase separation，NIPs）技

术结合原位焊接技术，在柔性硅橡胶基体中制备了垂直取向的石墨烯骨架。得益于快速的溶剂交换，NIPs工艺能够生成具有垂直长程有序互连微结构的聚丙烯腈粘接石墨烯骨架。随后，该聚丙烯腈-石墨烯骨架在2800℃下通过石墨化处理被原位焊接成垂直排列的石墨烯骨架。模型拟合结果表明，该过程有效提高了石墨烯-石墨烯界面热导。最后，将焊接后的石墨烯骨架浸入室温硫化硅橡胶中，制得石墨烯/硅橡胶复合薄膜。所制备的薄膜在低石墨烯含量（7.5 wt%）下展现出高达 29.5 W $m^{-1}K^{-1}$ 的优异面外热导率。这表明其单位石墨烯含量下的热导增强率（specific thermal conductivity enhancement，specific TCE）极高，超过1950%/wt%。此外，该复合薄膜继承了硅橡胶基体良好的适型性，并在各种压力和界面条件下实现了 40-70 K $mm^2$ $W^{-1}$ 的低接触热阻。本研究为高性能石墨烯基聚合物热界面材料的深入开发提供了重要参考。

**D36-54**

## 氮化铝填料颗粒及其在热界面材料中的应用

张泽鹏*

北京科技大学

近年来，随着 5G、人工智能、新能源汽车等高端电子行业领域的持续创新推进，电子元器件也朝着小型化、集成化、高功率化的方向不断发展，这使得其热流密度也越来越高。散热问题已经成为制约相关行业发展的瓶颈，而热界面材料可以有效提高电子器件的散热效率。但是目前以氧化铝、氧化锌等为原料制备的传统热界面材料已无法满足高热流密度电子器件的散热需求，需要开发出高性能的热界面材料以应对电子器件的散热挑战。氮化铝是一种性能优异的导热材料，理论热导率高达 320W/（m K），约为氧化铝的 10 倍，是开发高性能热界面材料的理想材料，具有非常广阔的应用前景。本研究通过使用喷雾造粒的球形氮化铝颗粒进行合理的颗粒搭配，并结合有机物结构的调整，制备出热导率 10W/m K 以上的导热垫片，满足高功率热流密度电子元器件的散热使用。

**D36-55**

## 半导体材料原子振动调控电子热输运机理及其芯片热管理应用研究

黄滇、唐桂华*、高志斌、岳圣瀛

西安交通大学

在电子芯片和热电冷却装置等应用领域，严苛的热管理要求对器件的产热传热和温度控制提出了挑战，宏观尺度上需要精准调控器件的结温波动，开发具有优异温度稳定性的新型电子器件；微观尺度则要协调晶格振动与载流子的热运动强度。受金属体系中静电势振荡 EPO 模型研究电子热传递的启发[1]，本研究基于第一性原理分子动力学（AIMD），改编了 VASP 源代码以提取原子的瞬时速度。首先提出了按原子种类统计温度波动的方法，根据重轻原子种类，在有限温度下计算了氮化铝、氮化镓等材料中重原子和轻原子的温度波动。重轻原子的非等效温度产生不同的相位差证明了有限温度下重轻原子振动之间存在非简谐性，为区分不同原子对半导体传热的贡献奠定了理论基础。其次采用功率谱密度方法建立半导体的 EPO 模型，不同温度下半导体中重原子和轻原子的 EPO 是由晶格振动引起。温度升高导致电子浓度增加，驱动静电势振荡，半导体中电子对总热导率的贡献增加，声子对总热导率的贡献减小，这揭示了不同种类原子振动（温度效应）和静电势振荡的强关联性。此外为了描述原子晶格振动和 EPO 的不确定性，定义了原子温度熵、原子速度熵、原子 EPO 熵和原子 VEPO 熵，计算结果符合熵增原理。研究结果表明 GaN 的电导率和电子热导率最高，其产热最小；GaN 静电势振荡熵也最低，有利于传热。通过有限元法将第一性原理计算得到的热导率，比热容等参数传递，构建了材料芯片结构温度场，标准差分析结果显示 GaN 芯片结构的温度波动最小，这为电子元件从温控角度出发的材料选型提供了理论依据。本文提出的理论概念和统计方法不仅推进了对半导体器件中电子热传输的理解，也为从跨尺度温度场角度为芯片热设计提供了材料选择策略。

**D36-56**

## 用于建筑立面辐射制冷的红外辐射定向器

张磊*

电子科技大学

全球变暖加剧导致建筑制冷能耗激增，严重制约可持续发展目标。辐射制冷技术通过材料本征热辐射

特性，利用大气红外透明窗口（8-13 μm）将热量被动辐射至低温外太空，为被动降温提供了新路径。然而，该技术在垂直立面应用时受高温地面热辐射干扰，面临制冷效率显著降低的核心挑战。本研究提出一种适用于建筑立面的周期性锯齿结构红外辐射定向器。通过引入几何非对称性设计，实现了红外辐射的方向性调控。采用聚二甲基硅氧烷（PDMS）热固化翻模工艺制备柔性锯齿衬底，并在特定倾角面沉积导电金属氧化物多层膜，同步达成高可见光透过率与宽带红外波段的定向光谱选择性。该制备工艺兼具低成本与可规模化优势。该器件在日间相较于常规辐射制冷材料呈现更优的主动降温性能（温降约 2℃），有效克服了立面应用效率瓶颈。器件的柔性特性与 PDMS 固有疏水性，进一步提升了其在真实建筑环境中集成应用的可靠性。该红外辐射定向器为突破建筑立面辐射制冷技术瓶颈提供了创新解决方案，对降低建筑运行能耗具有重要应用价值。

**D36-57**

**激光加工网格阵列结构增强 $MnFe_2O_4$/PVDF 宽带辐射薄膜的电子设备散热性能研究**

朱婉婷、魏平、张玉、刘明瑞、赵文俞*

武汉理工大学

针对电子设备微型化、高功率化发展带来的散热技术瓶颈，本文利用零能耗、无污染的红外辐射制冷技术，开发了一种高效热管理方案。通过旋涂法制备 $MnFe_2O_4$/PVDF 宽带辐射复合薄膜，其全波段发射率高达 0.96。实验表明，在 20℃环境温度下，该薄膜可使工作功耗 9 W 的电子器件表面温度从 90.8℃显著降至 83.2℃，实现 7.6℃的温降。为进一步提升性能，结合 COMSOL 多物理场仿真与激光微加工技术，在薄膜表面构建阵列网格结构。研究发现，辐射制冷性能随网格间距减小呈先增大后减小趋势。当网格间距为 0.75 mm 时，薄膜在 3 ~ 5 μm、8 ~ 14 μm 和 2.5 ~ 25 μm 波段发射率分别提升至 0.960、0.969 与 0.964；器件表面制冷温差由 7.6℃进一步提升至 9.4℃。可见构建表面微结构可协同提高红外发射率与增大有效辐射面积，显著增强了薄膜的宽带辐射制冷性能。本研究为电子设备高效热管理提供了新的材料与结构设计途径和理论参考。

**D36-58**

**具有出色介电储能和热管理能力的聚合物基介电复合薄膜**

王新、李晓锋*

北京化工大学

电子设备向微型化、集成化和极端环境适应性发展，对聚合物介电材料的能量密度和热导率提出了严格要求。我们通过 “异质界面增强-双填料协同 ”策略，解决了同时提高介电常数和热导率这一长期难题。羟基氮化硼纳米片（BNNS）和还原氧化石墨烯（rGO）共同分散在聚酰亚胺（PI）基体中，形成连续的网络，促进高效的热传输。羟基化 BNNS、rGO 和 PI 之间的强力氢键建立了稳定的界面，而 BNNS 和 rGO 之间的介电常数失配提高了界面极化，在 1 kHz 时产生了 12.6 的介电常数。相互渗透的 BNNS/rGO 网络促进了有效的声子传输，从而使热导率达到 13.6 W/（m-K）。此外，超薄 BNNS 的大横向尺寸抑制了击穿通道的传播，从而保持了 440 kV/mm 的高击穿强度。这项工作克服了聚合物-无机纳米复合材料介电性能和热性能之间的权衡，为开发用于先进电子产品的高性能介电薄膜提供了一种引人注目的策略。

**D36-59**

**面向电子器件热管理应用的尖晶石铁氧体宽带红外辐射性能研究**

贺林涛、张琛卓、朱婉婷、赵文俞*、张清杰

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室，武汉 430070

随着电子设备不断向小型化、高功率化和集成化方向发展，其散热问题日益突出。红外辐射制冷技术凭借零能耗、低污染和空间占用小等独特优势，成为解决电子设备散热难题的理想选择。然而，发展应用于电子设备热管理的红外辐射制冷技术还有赖于研发性能优异的宽带红外辐射材料。本文通过化学共沉淀法成功制备了尖晶石型 $MeFe_2O_4$（Me = Cu，Mn，Ni，Co，Mg，Zn）粉末，并研究了样品在 3 ~ 5 μm、8 ~ 14 μm、2.5 ~ 25 μm 和 1 ~ 22 μm 波段的发射率。研究发现，尖晶石铁氧体材料在宽带红外辐射性能方面表现出色，特别是 $MnFe_2O_4$ 在各波段都达到了最高的发射率值，分别为 0.90、0.97、0.96 和 0.97。结果表明：缩小材料带隙和提高载流子浓度可以显著提升 3 ~ 5 μm 波段的发射率，而增强晶格不对称性和晶格

应变则能有效改善 8 ~ 14 μm 波段的发射率。基于此将 $MnFe_2O_4$ 粉末与 PVDF、Graphene 复合后涂覆制备了一种柔性红外辐射散热薄膜，并模拟测试了该薄膜对电子设备的降温效果。结果显示，在环境温度为 20 ℃、电子设备工作功率约为 9 W 时，该复合膜可使电子设备表面温度从 90.8 ℃降低至 83.2 ℃，展现出良好的散热效果。本工作为应用于电子设备热管理领域的辐射冷却材料体系设计和性能优化提供了重要参考。

**墙报**

**D36-P01**

**PMMA/SiO2 复合辐射制冷薄膜的制备与表征**

韩昕阊 [1,2]、章俞之*[1,2]、赵云松 [1,2]、王忻毓 [1]、马佳玉 [1]、谷红宇 [1]、吴岭南 [1]、宋力昕 [1]

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

2. 中国科学院大学材料与光电研究中心

辐射制冷技术因其零能耗、低污染等优势，在应对全球能源危机和减缓气候变暖方面展现出巨大潜力。理想辐射制冷材料需在太阳光谱范围 0.2-2.5 μm 实现高反射以减少热量吸收，同时在大气窗口波段 8-13 μm 具备高发射率以通过热辐射实现降温。然而，现有技术普遍存在制备工艺复杂、成本高昂等问题，限制了其大规模应用。本研究提出一种基于聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）与二氧化硅（$SiO_2$）的多层复合薄膜，通过旋涂法优化制备工艺，实现低成本高效辐射制冷。通过有限元法分析，以铝膜为反射层、PMMA/$SiO_2$ 微球混合层为辐射层的复合结构在太阳波段反射率达 94%，验证其理论可行性。PMMA 在可见光消光系数趋近于零，而在红外波段消光系数较高；$SiO_2$ 因 Si-O 键声子共振，在大气窗口波段吸收显著，两者协同支撑高效热辐射。实验采用旋涂法制备薄膜，系统优化工艺参数。结果表明：PMMA/$SiO_2$ 旋速（600 rpm/400 rpm，9 次）可提升薄膜均匀性，最优样品太阳波段反射率达 83%，大气窗口发射率达 93%。扫描电镜图显示薄膜内部形成随机微米/纳米孔隙，通过多重散射增强光反射，同时 PMMA 与 $SiO_2$ 共振特性强化红外发射。本研究通过工艺简化实现了高性能辐射制冷薄膜的低成本制备，为规模化应用提供参考。未来需进一步提升反射率，并探索耐候性及彩色兼容性，以推动技术实用化。

**D36-P02**

**热电致冷功率半导体器件封装用低膨胀阻燃环氧树脂**

李优、罗裕波、杨君友*

华中科技大学

随着第三代功率半导体器件向高功率密度和高工作结温发展，其封装环氧树脂（EP）应用受到限制。一方面，EP 的低散热效率会导致热量大量积累；另一方面，EP 的高热膨胀系数（~60 × $10^{-6}$ / ℃），约为芯片（SiC/GaN 基）和散热器（如 AlN）的 20 倍，会导致芯片-EP 界面及 EP-AlN 界面在热循环时产生巨大应力，引发界面开裂，造成器件性能或者寿命显著下降甚至失效。此外，EP 的易燃性加剧了热失控风险。本研究设计了一种负热膨胀阻燃材料 $Zn_{1.5}Cu_{0.5}P_2O_7$ （ZCPO），其在 20~190 ℃ 范围内，热膨胀系数达-20 × $10^{-6}$ / ℃。将其与环氧树脂复合，首次在 ZCPO/EP-61 复合材料中实现了类陶瓷级热膨胀系数（4 × $10^{-6}$ / ℃）和 UL-94 V-0 级阻燃性能。热膨胀系数与芯片（SiC/GaN）/热电制冷器件（AlN）近似匹配，显著降低了 EP 与芯片/热电制冷器间的界面应力，且不使用热界面材料（TIM2），简化了热电制冷功率半导体器件的封装结构。相较于传统包含 TIM2 的散热结构，本工作将器件的制冷温度了 42%（由 18.89 ℃ 提升至 26.85 ℃），为功率器件的高效运行提供了有力保障。

**D36-P03**

**Accurate TPS-Based Thermal Conductivity Measurement for High-Performance Thermal Management Materials: Modeling and Sensitivity Analysis**

Jiaqi Gu,Qiye ZHENG*

The Hong Kong University of Science and Technology

High-performance thermal management materials are critical for the next generation of electronic packaging, aerospace systems, energy conversion devices, and high-power optoelectronics, where efficient heat dissipation is essential to ensure operational stability and device longevity. Among thermal property characterization techniques, the transient plane source (TPS) method (ISO 22007-2:2022) has been widely adopted for its versatility in measuring the thermal conductivity (λ) of bulk solids. However, for materials with high thermal conductivity (λ > 30 W/(m·K))—a key target range for advanced thermal management applications—the conventional TPS approach often yields significant errors (as high as 97%), largely due to simplifications that ignore sensor/sample interfacial thermal resistance (Rc) and heat conduction within the sensor structure.

To overcome these limitations, we propose a comprehensive framework that enhances TPS measurement accuracy for thermal management materials. Firstly, two new analytical models—the Realistic Sensor Model (RSM) and the Multilayer Model (MLM)—are developed, capturing both the Rc effect and internal sensor heat conduction. Secondly, we introduce a temperature derivative-based nonlinear regression (NR) method that significantly improves the robustness of thermal conductivity fitting, especially in the presence of unknown or varying Rc.

We further perform detailed sensitivity analysis and parameter correlation studies via singular value decomposition (SVD) of the sensitivity matrix, guiding the optimal selection of fitting intervals for λ and heat capacity (C). To validate our method, we use both experiments and 3D finite element simulations (FEM), including a high-fidelity model of the bifilar spiral TPS sensor. Materials with a broad range of thermal conductivities—from polymers to metals—are evaluated, including polymethyl methacrylate, borosilicate glass, 304 stainless steel, and aluminum.

Our findings demonstrate that the proposed NR-2 method, combined with the new analytical models, can reduce λ fitting errors for high-λ materials to below 10%, even under Rc variations spanning one to two orders of magnitude. In cases with known heat capacity, a simplified one-parameter fitting further reduces computational time by 30–80% while maintaining accuracy within 5%.

Additionally, we propose a derivative ratio model to address practical limitations such as long measurement times and large sample sizes, making the improved TPS method more applicable to real-world thermal management material development, including high-thermal conductivity composites, metal matrix materials, and carbon-based thermal interface materials.

This work not only advances the fundamental understanding of the TPS method but also provides a powerful tool for the accurate characterization of emerging high-performance thermal management materials, supporting their design, optimization, and integration in next-generation thermal systems.

**D36-P04**

## 氧化铝基导热聚合物中的热逾渗网络

徐浩哲、徐象繁*

同济大学

添加高导热填料的有机聚合物是最常用的一种热界面材料，关于提高其热导率的研究数不胜数。其中一种方式是采用不同形貌填料复合添加，取长补短，结合各种填料的优点。然而，由于有效介质理论局限性，以及热逾渗理论的滞后研究，对于不同形貌填料的协同机制依旧缺乏探索。为了剔除不同材料的耦合影响，本文采用不同形貌的同种氧化铝作为填料，分别制备了添加氧化铝球、氧化铝片以及球/片 1:1 混合的环氧树脂复合材料。通过稳态法测量样品的热导率，发现球/片 1：1 混合样品热导率得到显著提升。结合热逾渗理论，以及对填料微观分析的观测，发现片状和球状填料复合添加的协同作用对热逾渗网络有促进作用。

**D36-P05**

## 一种具有高热开关比的磁响应柔性热开关

董玉霞[1]、张旭东[2]、李斌[1]、曹炳阳*[1]

1. 清华大学航天航空学院

2. 中国科学院理化技术研究所

热管理对器件性能和能源效率至关重要。作为热管理的关键组件，热开关通过在高低状态之间可逆地切换热导率来实现智能热管理。然而，实现多维和连续的热导率调控仍然是一个重大挑战。因此，本研究提出了一种由磁性液态金属、石墨烯膜和聚二甲基硅氧烷（PDMS）组成的磁响应柔性热开关，磁场可以调节磁性液态金属的形态，从而改变导热通路，实现热导率从 0.36 到 3.65 W/(m·K)的动态调节，热开关比可达 10.1。通过设计实验系统测试了该柔性热开关的温度调节能力，在环境温度为 25℃、热流密度为 1500 W/m²的工况下，柔性热开关在开启状态下的器件温度比关闭状态下的器件温度降低 17.02℃，表明该柔性热开关具有优异的温度调节能力。此外，该柔性热开关可应用于多维热显示，移动磁力笔在柔性热显示材料上绘制动态图案，通过红外热像仪可以观察到绘制的图案。本研究为多维热调控和智能显示提供了新思路。

**D36-P06**

## 全天候光热仿生涂层的设计及防污防腐研究

侯志强*

广西大学化学化工学院

在建设海洋强国战略背景下，生物污损问题已成为制约海洋资源开发、威胁生态平衡、影响公共卫生及阻碍海洋工程发展的重大挑战。尽管传统防污涂层已得到广泛应用，但其对非目标海洋生物产生的毒性效应已引发重大环境关切。近年来，基于荷叶、鲨鱼皮等生物表面的仿生微织构设计涂层被证明不仅能高效阻隔液体浸润，还可显著抑制生物污损附着。然而海洋环境的复杂动态特性使得单一微织构难以实现长效防护，且应用范围受限。当前，光热-仿生协同策略虽拓展了防污功能，却受限于光照条件而无法实现全天候防护。因此，亟需开发一种高度稳定的全天候光热仿生涂层，用于解决海洋生物污损问题。

基于仿生微织构技术，我们开发了一种集全天候光热防污/防腐与自修复功能于一体的仿生复合涂层。通过将光热相变材料与聚氨酯基体复合，结合激光微织构加工技术，成功构建了具有微/纳米结构的光热仿生功能涂层。该涂层表现出优异的全光谱吸收能力和高表面温度，在多次循环后相变特性及储热性能仍保持稳定。实验结果表明，该涂层可在短时间内完成划痕的光热自修复；在光照条件下，涂层表现出较高的抗菌活性。抗藻实验进一步证实该涂层具有显著的防生物污损性能，表面藻类附着量极低。基于数值模拟的协同优化设计，实现了涂层性能与实际工况的精准匹配。本研究创新性地将光热相变材料应用于多功能涂层领域，为海洋防护涂层的技术革新提供了新思路。

**D36-P07**

## 多重散射效应增强球形 $LaPO_4$ 的辐射散热性能

刘蕤之[1]、孙川请[1]、刘明瑞[2]、朱婉婷[1]、赵文俞*[1]、张清杰[1]

1. 武汉理工大学

2. 佛山仙湖实验室

红外辐射材料凭借其高效辐射、耐高温、环境适应性强等特性，在电子器件散热应用中发挥着至关重要的作用。本研究主要探讨了 $LaPO_4$ 形貌结构变化对复合薄膜红外辐射散热性能的影响。通过光学模拟计算和镧磷比调控探索了三种不同形貌（球状、棒状和海绵网状）的 $LaPO_4$ 红外辐射变化规律。结果表明，填充具有低漫反射特性的大尺寸球形 $LaPO_4$ 颗粒的 PDMS 复合薄膜，其红外辐射能力显著增强，在 2-15 μm 的宽波段发射率高达 95.6%。此外，在 2250 W/m² 的加热功率下，该薄膜实现了 6.2 ℃的明显降温和 11.9%的制冷效率。经过 30 次热循环（20-80 ℃）后，薄膜发射率无衰减，具备优异的热稳定性。本工作为调控材料发射率提供了一种新策略，有助于推动辐射散热技术的发展和应用。

**D36-P08**

## 半导体超晶格中的声子热输运探测及其调控研究

耿志明、樊星、袁铭谦、颜学俊、周健、芦红、卢明辉*、陈延峰

南京大学

随着微电子器件产业的飞速发展，散热及热管理难题成为制约其继续向小尺寸、高功率方向发展的主要瓶颈。界面是半导体微纳器件中普遍存在的一种特征结构，因为其极小的尺寸与复杂的组成，针对界面的热输运实验研究仍面临巨大挑战。超晶格因为其特殊的周期性重复界面结构为界面热输运研究提供了一个绝佳的平台，并受到越来越多的关注。

本研究基于分子束外延（MBE）分别生长得到的 AlGaAs 合金及 InAs/AlAs 超晶格薄膜，利用时域热反射技术（TDTR）进行其中的声子热输运探测及其调控研究。实验发现 AlGaAs 合金超晶格中长达~1 μm 平均自由程（MFP）的长波声子仍对热输运产生贡献，而界面上生长的 ErAs 量子点对长波声子热输运具有显著的调控作用，热导率调控达到 60%以上。基于玻尔兹曼输运方程的理论模型成功对声子热输运的谱学探测进行了描述和预测。并率先提出用于评估声子热输运调控效率的指标 $\eta$，发现在 MFP 达到~1 μm 时，界面上 ErAs 量子点对声子热输运的调控效率可以达到 $\eta$=90%以上[1]；基于组分及短周期设计，实验在 InAs/AlAs 超晶格中间接探测到声子的相干输运行为及隧穿效应，并发现其在~500 K 高温下仍然是鲁棒存在的。第一性原理计算表明，在相干声子主导热输运情况下，热导率受到超晶格周期的调制作用主要由声子能带折叠效应导致。声子能带折叠将同时对声子群速度和声子弛豫时间产生调控作用[2]。

本研究工作从声子谱学角度描绘了超晶格界面上声子热输运机制的物理图像，并提供一种普适的声子热输运贡献探测方法的实验范例，这对半导体微纳结构热学设计、热调控技术及其探测方法的发展具有重要指导意义。

**D36-P09**

## SiC/EOG/PVDF-HFP 复合涂层的近室温高发射率和优异散热性能

张玉、余晓晓、聂晓蕾*、魏平、赵文俞、张清杰

武汉理工大学

高红外发射率和优异的导热能力对可应用于现代电子元件热管理的散热涂层的散热性能而言至关重要。本研究通过高温碳热还原反应在边缘氧化石墨烯（EOG）层间原位生长碳化硅纳米线（SiC NWs），成功制备出具有三维导热网络结构的 SiC NWs / EOG/聚偏二氟乙烯-六氟丙烯（PVDF-HFP）复合涂层。相较于 EOG/PVDF-HFP 涂层，SiC NWs/EOG/PVDF-HFP 复合涂层的面外热扩散系数提高了 27%，这源于原位生长的 SiC NWs 增强了垂直方向的声子传导。SiC NWs 原位生长的堆垛层错和孪晶、EOG 引入的结构缺陷，以及二者共同带来的多尺度表面和界面，协同优化了复合涂层的红外发射率，使 SiC NWs/EOG/PVDF-HFP 复合涂层获得了高达 0.92 的红外发射率。涂覆原位生长 SiC NWs/EOG/PVDF-HFP 复合涂层的铜板降温效果达到 9.3 ℃，相较于涂覆 EOG/PVDF-HFP 涂层、涂覆机械复合的 SiC/EOG/PVDF-HFP 涂层及涂覆机械复合 SiC NWs/EOG/PVDF-HFP 涂层的铜板，降温幅度分别提升了 126%、93%和 78%。这些研究结果表明，SiC NWs/EOG/PVDF-HFP 复合涂层在电子器件热管理应用中具有巨大潜力。

**D36-P10**

## 具有高效的蒸发冷却和优异的电磁波吸收性能的 GO-HNTs 框架基水凝胶

陶阳、李鑫、杨君友*

华中科技大学材料科学与工程学院

高效的散热和电磁波吸收对于缓解电子产品中的热积聚和电磁干扰问题至关重要。解决该问题的传统策略是将特定填料掺入聚合物基底以得到导热吸波复合材料。但以往的大量工作证明了同时实现高导热性和有效的电磁波吸收性能通常颇具挑战性。在本研究中，氧化石墨烯/埃洛石纳米管 (GO-HNTs) 骨架被引入水凝胶中。得益于 GO-HNTs 骨架独特的三维分级网络，水凝胶的介电特性得到调控，由于阻抗匹配的优化，水凝胶最佳有效吸收带宽 (EAB) 达到 4.8 GHz，最小反射损耗 (RLmin) 值为 -55.6 dB。此

外， GO-HNTs 骨架结构提供了三维传热通路，从而使水凝胶的导热系数大幅提高，从 0.634 $Wm^{-1}K^{-1}$ 上升到 1.091 $Wm^{-1}K^{-1}$。热导率的提高，加上水分蒸发驱动的热量散失，使热模拟实验中发热源的最高温度下降约 10℃。此外，在极端高温下，埃洛石纳米管可形成致密的阻燃层，确保水凝胶在超高温下的安全性。综上，这种多功能水凝胶为解决电子产品中的热量积聚和电磁干扰问题提供了一种富有前景的解决方案。

**D36-P11**

**Isotope-driven hydrogel smart windows for self-adaptive thermoregulation**

Hongyi Tu,Wu Limin*

Fudan University

As a cutting-edge and environmentally friendly approach, thermochromic hydrogel smart windows show great potential in combating climate change and achieving carbon neutrality. However, the substantial absorption of near-infrared (NIR) energy by H2O poses an enormous challenge in enhancing the spectral responsiveness. Herein, we propose an innovative concept of isotope-driven D2O-hydrogel smart windows, which can effectively resolve the inherent issue of NIR energy absorption associated with H2O, without compromising versatility. It facilitates near-optimal transmittance modulation across the entire solar spectrum (ΔΓSol=91.97%), demonstrating a marked enhancement in NIR modulation of transmittance (ΔΓNIR) and reflectance (ΔRNIR) by ~16% and ~31%, respectively, in comparison to conventional H2O-hydrogel. Moreover, the integration of Ag-nanowires into D2O-hydrogel further substantially augments the regulation of longwave infrared emissivity (=31.89%) while preserving a comprehensive modulation ratio (ΔΓSol=66.02%, ΔRSol=48.41%) that is not achieved by the existing thermochromic devices. This isotope-driven D2O-hydrogel smart window provides another design strategy for future energy-efficient windows.

**D36-P12**

**核壳结构的 rGO-BN 填料赋予聚丁二烯复合材料高导热和高效微波吸收**

李俊伟、李鑫、杨君友*

华中科技大学

电子设备的不断微型化和高集成化使得散热和电磁干扰问题日益严重，同时也限制了热界面材料和微波吸收材料的同时应用，因此开发兼具高热导率和高效微波吸收性能的界面材料变得至关重要。本文报道了一种兼具高导热和高效微波吸收性能的核壳结构 rGO-BN 填料，该填料由聚多巴胺包覆的球形氮化硼（BN）和氧化石墨烯（GO）自组装，并经热还原制备而成。以 rGO-BN 作为导热/微波吸收填料，与氮化硼纳米片（BNNS）和聚丁二烯（PB）共混，制备了 rGO-BN/BNNS/PB 复合材料。当 rGO-BN 和 BNNS 的质量分数分别为 45 wt%和 13 wt%时，rGO-BN/BNNS/PB 复合材料的热导率为 5.94 W $m^{-1}$ $K^{-1}$，最低反射损耗值为-50.10 dB（3.9 mm，8.42 GHz），有效吸收带宽为 5.25 GHz（2.7 mm，10.70-15.95 GHz）。这项工作为克服高导热和优异微波吸收之间的权衡提供了新思路。

**D36-P13**

**稀土能级调控增强高熵稀土磷酸盐辐射散热性能**

刘明瑞*[1]、刘蕤之 [1,2]、孙川清 [1,2]、赵文俞 [1,2]

1. 佛山仙湖实验室

2. 武汉理工大学

随着高功率电子器件散热需求的日益增长，传统金属基复合材料因红外辐射效率低和热稳定性不足而面临挑战。高熵稀土磷酸盐结合了高熵效应与稀土元素特性，在高效红外辐射领域展现出潜力，但相关研究尚少。本研究通过熵构型调控，揭示了稀土元素能级跃迁对增强磷酸盐红外辐射性能的机制。研究表明，引入 Pr、Nd、Sm、Eu 等稀土离子构成的(Ce0.16Pr0.2Nd0.2Sm0.24Eu0.2)PO4 材料，实现了高达 94.1%的宽波段发射率，其近红外辐射性能的显著提升主要源于近红外跃迁能级的增加。进一步与高导热聚苯并噁唑（PBO）纤维复合制备的涂层，展现出优异的辐射-导热协同增强效应。散热性能测试表明，该复合薄膜

相比纯 PBO 对照组可实现近 10 ℃ 的显著温降。本研究为高功率电子器件的热管理提供了有效方案，为红外辐射材料在新能源与电子领域的应用提供了新策略。

**D36-P14**

## 耐高温硅基气凝胶快速近净成型及其热物性研究

吴琼、蒋文杰、刘晨晗*

南京师范大学

针对硅基气凝胶在耐温、隔热与可加工性方面的挑战，本研究提出"多糖分散相温控辅助浆料快速凝胶-超临界干燥"策略：以气相二氧化硅为原料，利用多糖高温溶胶-低温凝胶特性实现超快凝胶（＜10 min），干燥后气凝胶体积收缩率低至 2.7%，满足陶瓷材料近净成型要求，且无掉粉，结合预凝胶墨水直写技术可实现高精度 3D 打印（线径<0.3 mm）；气相二氧化硅组装形成介孔网络，赋予材料超低导热系数（15.4 mW/(m·K), 298K）及 1000 ℃（30 min）下线收缩率<2%的热稳定性，压缩强度达 1.9 MPa；此策略兼容功能化拓展，基于高效隔热性能，结合掺杂碳纳米管构建导电网络，可实现气凝胶高效热电转换（25K 温差下输出电压 40 mV）。该技术为多功能一体化高效气凝胶热管理材料的开发提供了新范式，在航空航天热防护、精密电子器件和新能源交通热管理等前沿领域具有较高的应用前景。

**D36-P15**

## 物理特征驱动下的自组装单层膜界面热输运调控

马圣荦、鞠生宏*

上海交通大学

从电子器件液冷到纳米颗粒辅助光热治疗，基于自组装单层膜（SAM）的固-液界面改性工程是改善界面导热特性（ITC）的重要手段。尽管关于自组装单层膜实现界面热导调控的机理和性质研究已经取得一定进展，但由于实验和计算数据的缺乏，对于自组装单层膜结构主动设计与界面导热调控工作仍有待进一步推进。本文开发了一套自动化高通量筛选框架，结合非平衡分子动力学模拟，对 300 种不同自组装单层膜结构在金-水界面的导热特性进行了计算，获得的界面热导分布为 38.93 至 240.31 $MW/m^2K$。其中界面热导超过 200 $MW/m^2K$ 的自组装单层膜有 6 种，低于 50 $MW/m^2K$ 的有 7 种。与此同时，基于分子动力学计算构建了自组装单层膜的声子振动、界面作用等与界面热输运相关的物理特征描述符。通过引入可解释机器学习模型，揭示了界面作用力和振动谱耦合是固-液界面导热调控的关键因素。本工作为自组装单层膜的数据驱动设计以及其固-液界面导热调控提供了相关理论支撑与筛选依据。

**D36-P16**

## 具有热流微通道的超薄光热膜用于增强的太阳能水蒸发

苏杨、陈敏*

复旦大学

在太阳能水蒸发膜中，二维（2D）材料的垂直排列对于增强太阳能吸收和热能利用管理具有巨大潜力。然而，由于二维材料的比表面积与体积比大，通过自组装实现垂直排列的微结构仍是一项重大挑战。在此，我们提出了一种非溶剂诱导相分离（NIPS）策略，用于制备用于太阳能水蒸发的超薄柔性热塑性聚氨酯（TPU）膜。该架构呈现出垂直排列的二硫化钼/石墨烯纳米片（GNPs），实现了光热转换和热传递的顺序组合的热和流体微通道。该膜表现出高光吸收率（94.3%）、增强的光热转换效率（96.1%），以及比不含 GNPs 的膜高 2.5 倍的垂直热导率。在单太阳光照射下，经单宁酸修饰的膜实现了 2.62 $kg·m^{-2}·h^{-1}$ 的快速太阳能水蒸发速率。值得注意的是，由于引入了石墨烯，热损失从 9.1% 降低到 2%，从而实现了 93.5% 的能量转换效率。这项工作开发了一种可扩展的自组装策略，用于构建具有二维材料工程垂直有序性的膜，为便携式太阳能蒸发器的设计奠定了材料基础。

**D36-P17**

## 光谱选择性彩色电致变色红外发射率调制器，用于建筑全季节智能热管理

梅哲跃、丁一琳、王梦颖*、刁训刚

北京航空航天大学

目前，建筑能耗约占全球能源消耗总量的 40%，其中供暖、通风和空调（HVAC）系统贡献了 38%用于保持舒适的室内环境。建筑能耗直接或间接造成了大量的温室气体排放，造成了严重的环境问题和资源枯竭。因此，提高建筑能效，降低能耗，减少碳排放至关重要。近年来，被动辐射冷却技术得到了快速发展。然而，这种静态高发射率的辐射制冷方式在对保温需求更为迫切的寒冷地区明显缺乏适应性。为了实现建筑的全季节节能，需要认真考虑将制冷和保温功能结合起来的动态红外发射率调节。此外，在现代城市地区，密集的建筑群导致建筑外墙不能完全的暴露在天空背景下。由于城市热岛效应的影响，非大气窗口波段的寄生热将严重影响辐射制冷材料的实际冷却效果。因此，根据大气窗口的分布发展光谱选择性辐射制冷技术对于应对全球气候的多样性具有更现实的意义。在这项工作中，我们在多层膜的薄膜光学理论和电致变色材料发射率调节机理的指导下，成功地制备了一种光谱选择性彩色电致变色红外发射率调节器（CECIER），它的结构为 PE/ITO/$WO_3$/$LiNbO_3$/NiO/Au。通过制备结晶程度可控的 $WO_3$ 纳米晶体颗粒，实现调制器在中远红外波段的 LSPR 吸收。在此基础上，考虑了与厚度相关的薄膜干涉效应，实现了 CECIER 的选择性发射率调节。它在第一、第二大气窗口红外发射率可调，非大气窗口（5~8 μm）保持红外高反射率。这种光谱选择性 CECIER 通过抑制来自环境的热增益，将有助于实现有效的动态热管理，使其与同类设备相比具有很强的竞争力。同时，PE 材料可以实现多色外观定制满足审美要求，并产生漫反射，减少眩光和光污染。本研究对 CECIER 在节能建筑中的应用进行了初步探索，并对节能效果进行了量化，为未来智能高效的建筑节能空间热管理技术提供了思路。

**D36-P18**

## A Dual-mode Ceramic Aerogel for Human Body Thermal Regulation in Diverse Climate Zones

赵雯

香港城市大学

Dynamic personal thermal management techniques may be more advantageous for regulating the thermal heat transfer of the human body to stabilize thermal comfort, since external surroundings are in a dynamic state. Traditional textiles, constrained by fixed infrared emissivity and static heat transfer coefficients, lack adaptive functionality. Advanced fabrics must incorporate intelligent thermoregulation mechanisms that dynamically adapt to fluctuating environmental conditions to provide the thermal comfort zone of the wearer (28-32 ℃), which could be achieved through stimuli-responsive materials such as phase-change materials (PCMs) for latent heat buffering, shape-memory polymers (SMPs) for pore structure modulation, and hygroscopic fibers or coatings enabling moisture-triggered heat dissipation. Nanopore-engineered fibers providing visible-light opacity (via scattering) while maintaining mid-infrared (MIR) transparency. Such materials can lower skin temperature by several degrees compared to silk textiles, taking advantage of the high solar reflectivity (0.3–2.5 μm) and high long-wave infrared (LWIR) emissivity (8–13 μm). For cold environments, metallic nanowire-coated and nanoporous metallized textiles have been developed to suppress infrared thermal emissions from the body and improve thermal comfort. Effective heating demands suppression of body infrared radiation (7–14 μm), responsible for 40–60% of heat loss.

Moreover, stringent material requirements exist for wearability, breathability, and flexibility, and rigorous optical engineering. An exciting possibility is to fabricate metafabrics with high-MIR transparency for radiative cooling, while embedding high-MIR-reflective nanoparticles for the heating mode. Here, we report the large-scale production of uniform and continuous nanoporous aerogels (nanoPA) with cotton-like softness for industrial fabric production. The nanopores embedded in the fiber effectively scatter visible light to make it opaque without compromising the mid-infrared transparency. Moreover, using industrial machines, the nanoPAmicrofibres are utilized to mass produce fabrics. Compared with commercial cotton fabric of the

same thickness, the nanoPA fabric exhibits great cooling power (>100 W/m$^2$), lowering the human skin temperature by 8.9 ℃ in summer and warming the skin by 6.5 ℃ in winter, which corresponds to a greater than 20% saving on indoor cooling energy. Besides the superior cooling effect, the nanoPA fabric also displays impressive wearability and durability. As a result, nanoPA microfibres established a foundational platform for scalable, energy-efficient adaptive textiles, paving the way for sustainable personal thermal management.

**D36-P19**

## 蒙烯氧化铝粉体的流化床-化学气相沉积法可控制备及其在热管理的应用

吴雨竹[1,2]、孙秀彩[2]、曹炳阳[3]、宋雨晴[2]、刘忠范*[1,2]

1. 北京大学

2. 北京石墨烯研究院

3. 清华大学

随着数字化与智能化技术的快速发展，高性能芯片的功率密度持续攀升，电子器件热管理已成为制约产业发展的关键瓶颈。热界面材料广泛应用于电子元件散热领域，由导热填料和弹性体基质组成，用于填补散热器和芯片间的空隙，降低工作温度。然而目前报道的传统热界面材料的导热系数与预期相差甚远，严重制约了电子信息技术的进一步发展。石墨烯及其复合材料因其优异的本征导热性能，在热管理领域展现出独特优势。然而，高质量多层石墨烯复合材料的可控制备仍是制约其性能充分发挥的关键难题。本研究基于流化床化学气相沉积技术，创新性地制备出蒙烯氧化铝粉体，其表面形成连续均匀且高结晶度的石墨烯包覆层，并与氧化铝基体形成共形接触。该结构通过石墨烯优异的表面/层间导热特性以及与氧化铝的强声子耦合效应，显著提升了复合材料的导热性能。实验表明，石墨烯包覆层内的热流密度较氧化铝基体高出一个数量级，成功构建了三维高效传热网络。基于该复合材料制备的热界面材料导热系数达到 6.44 W ₥⁻ ¹K⁻ ¹，使发光二极管(LED)表面温度降低 17.7℃，展现出卓越的散热性能。本研究为高结晶度多层石墨烯包覆复合材料的制备提供了简便、可规模化生产的解决方案，在纳米电子器件热管理领域展现出重要应用前景。

**D36-P20**

## 高导热复合基碳纳米纤维的设计与制备

郝梦圆，林安琪，吴瑶，张永刚，钱鑫，王雪飞

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

碳纤维（CF）由于其高比强、高比刚的特性成为高性能复合材料增强体的首选。为进一步满足碳纤维在高速飞行器、折叠电子产品结构件等领域散热、承力的双重需求，本研究设计制备以高结晶度聚酰亚胺（PI）为芯部、聚丙烯腈（PAN）为皮层的同轴前驱体纤维，并经稳定化、碳化、石墨化处理，获得高导热复合基碳纳米纤维。首先，通过前驱体碳化石墨化特征及导热表征证明，PI-CNF 的石墨微晶取向和缺陷等结构特征很容易受前驱体刚性及结晶取向度影响，进而影响 PI-CNF 和 PI-GNF 的导热性能。以 PMDA-ODA（PI-M）为前驱体的 PI-GNF-M-2500 表现出高度石墨化及最高导热性能为 76.372 W/m Ⱪ。以上述高结晶度 PI-M 为核层、PAN 为壳层，通过同轴静电纺丝技术、碳化及石墨化高温热处理后制备得到核壳结构复合基碳纳米纤维 PI/PAN-CNF 和复合基石墨纳米纤维 PI/PAN-GNF-2500。石墨化处理后 PI/PAN-GNF-2500 展现出优异的石墨晶格特征，晶面间距减小至 0.3357 nm，石墨缺陷程度小，ID/IG 值仅为 0.1596，这与 PI\PAN 双前驱体的化学键合及协同石墨化密切相关。因而，PI/PAN-CNF 导热系数提升至 226.223 W/m Ⱪ，相比 PAN-GNF-2500、PI-GNF-2500 分别提升 616%及 296%。

**D36-P21**

## 多波段电致变色智能窗

黄娅

清华大学化工系

据统计，全球每年约 16%的能源消耗用于建筑的供暖、通风和空调系统，以保持舒适的室内温度。窗户作为建筑主要的能量交换介质，是建筑物最不节能的部位，所以高性能节能窗的开发对减少建筑能耗起着关键作用。电致变色材料能够通过改变电压来改变自身颜色和光线的透过率，是一种非常有前景的降低能耗和改善室内热舒适度的建筑节能窗技术。然而，目前大多数电致变色技术的研究主要集中于可见光和近红外波段的动态调控，对中红外波段的动态调控能力较为薄弱，这成为限制建筑电致变色智能窗性能提升的主要瓶颈。在电致变色智能窗的结构中，电解液是其关键组成部分。然而，现有的研究主要聚焦在增强其电子/离子传导能力，而忽略了电解液在光热调控方面的潜力。基于此，我们提出了一种新型液流电致变色窗的概念和原型设计，该窗能够通过电解液的液流状态动态调节其在中红外波段的发射率，并通过控制电致变色材料的氧化还原反应调节可见光和近红外波段的透过率。该研究成果克服了传统电驱动装置的局限性，为高性能节能窗提供了新的解决方案，同时也为液流电池等储能系统的光热调节提供了潜在应用方向。