

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D36-热管理材料
D36-Thermal Management Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

最终交流类型: 主题报告

碳基高导热复合材料的制备及进展

封伟*

天津大学/材料科学与工程学院

导热材料是一类以热量的快速传导、扩散为目的, 提高大功率设备快速散热能力的功能材料。随着科技的快速发展, 导热材料被广泛应用于国防科技和电子信息等多个领域, 同时对导热材料也提出更多的要求, 例如高导热、耐腐蚀性、耐高温性、质量轻、结构稳定等。碳基材料具有低成本、导热率高、结构稳定和响应速度快等优点, 如石墨烯、碳纳米管等。因此, 发展碳基导热复合材料, 控制导热填料的结构、含量及界面相互作用, 是提升复合材料导热性能、力学性能及加工性能的有效手段。因此, 如何构建多尺度有序碳基导热复合结构, 突破力热定向传导和界面增强的关键技术, 实现热疏导和力学强度性能的提升是碳基导热材料研究的关键。经过多年研究, 根据碳基微观结构对导热的调控机理, 我们提出在优化碳材料共轭结构的基础上, 通过结构设计, 实现从碳材料从无序-有序, 从无规到可控的目标, 利用三维复合结构实现其定向导热功能。同时, 在膨胀石墨层间, 控制催化剂的分布和密度, 生长碳纳米管阵列。通过研究生长条件和表面修饰对于控制碳管阵列的取向性、长度、密度的影响规律, 总结出调控复合材料的面内、面外方向导热系数、力学强度和压缩回弹性之间的关系, 最终构建可实现高通量散热的热控结构。

最终交流类型: 主题报告

Innovative Development and Smart Applications of Phase Changes Materials

Ruqiang Zou*, Zhenghui Shen, Feng Xiong, Mulin Qin

Peking University

Representing as a promising candidate for clean energy utilization, phase change materials (PCMs) have gathered tremendous attention with ever-increasing energy and environmental concerns. In the past decades, PCM-integrated energy storage, conversion and utilization have been the mainstream in this field. With the fast development of science and technology, with the growing demand for functional and smart materials and devices, the innovative development and smart applications of PCMs have become hot research topics. Moreover, deep insights into the material design, structural and performance regulation and related scientific mechanisms are still insufficient. More efforts are required to promote innovative development and cutting-edge interdisciplinary applications, thus enabling the high-added value of PCMs.

One critical application of PCMs lies in temperature management and thermal shock mitigation owing to their exceptional latent heat storage capacity. However, the low thermal conductivity of PCMs, although considered a drawback for rapid heat conduction for thermal storage, remains insufficiently low for insulation applications, e.g. thermal management of aerospace equipment. In our research, a novel phase change aerogel has been designed to realize the functional integration of latent heat storage and thermal insulation. Instead of conventional encapsulation of PCMs in the porous structure of foams and aerogels for this purpose, we use the in situ nanoconfined PCMs to directly form the aerogel framework. The unique framework maintains its low thermal conductivity, and the latent heat absorption could enhance the thermal shock resistance. The resulting PCM aerogel exhibits satisfactory stability at an elevated temperature of 300 °C, as rigorously demonstrated at both macro and micro scales. The enthalpy value can reach up to 152 J/g, while the thermal conductivity is as low as 0.041 W m⁻¹ K⁻¹. Additionally, it demonstrates sufficient mechanical strength and self-extinguishing properties. Compared to conventional aerogels and bulk phase change materials, the thermal insulation capacity of our developed PCM material is far superior, proving a competitive strategy for high-performance thermal insulation.

Based on the fascinating properties of PCMs, we also developed cooling devices with high-efficiency thermal-shock resistance for buildings and high-power electronics. To this end, we couple the radiative cooling technology and latent heat storage, thus simultaneously enabling efficient sub-ambient cooling and high-efficiency

thermal-shock resistance. The electrospinning technique and absorption-pressing methods are used to assemble the dual-function cooling device, which endows the facile fabrication and scalability. The electrospun radiative film has high sunlight reflectivity (95.9%) and high mid-infrared emissivity (93.4%), resulting in an excellent sub-ambient temperature of 5.1 °C. When subjected to thermal shock, the dual-function cooling device demonstrates a pinning effect of huge temperature drop of 39 °C and stable low-temperature level by isothermal heat absorption compared with the traditional radiative cooler. The molten PCMs provide the heat-time transfer effect by converting thermal-shock heat to delayed preservation. The proposed strategy paves a powerful way to protect objects from thermal accumulation and high-temperature thermal shock, which may promote the innovative applications of PCMs in advanced electronic and smart buildings. Overall, our research efforts may give some inspiration on the development and applications of PCMs, promoting their contribution to green and clean human communities.

最终交流类型: 邀请报告

Supercooled erythritol for high-performance seasonal thermal energy storage

Sheng Yang, Liwu Fan*

Zhejiang University

Seasonal storage of solar thermal energy through supercooled phase change materials (PCM) offers a promising solution for decarbonizing space and water heating in winter. Despite the high energy density and adaptability, natural PCMs often lack the necessary supercooling for stable, long-term storage. Leveraging erythritol, a sustainable mid-temperature PCM with high latent heat, we introduce a straightforward method to stabilize its supercooling by incorporating carrageenan (CG), a bio-derived food thickener. By improving the solid-liquid interfacial energy with the addition of CG the latent heat of erythritol can be effectively locked at a very low temperature. We show that the composite PCM can sustain an ultrastable supercooled state below -30°C, which guarantees no accidental loss of the latent heat in severe cold regions on Earth. We further demonstrate that the common ultrasonication method can be used as the key to unlocking the latent heat stored in the CG-thickened erythritol, showing its great potential to serve as a high-performance, eco-friendly PCM for long-term seasonal solar energy storage.

最终交流类型: 邀请报告

热界面薄膜材料的各向异性热物性测量系统与应用

王建立*

东南大学

随着薄膜厚度减少到了微米量级, 其表面形貌、导电性等都存在巨大差异, 准确表征微米薄膜的热输运性能成为重大挑战。目前业内主要采用商用化的激光闪光分析仪 (LFA) 对毫米厚度的块状材料进行热输运性能表征, 然而, 随着薄膜厚度减少到了微米量级, 无论是面内 (薄膜表面方向) 还是面外 (薄膜厚度方向) 热输运性质, LFA 测量数据的可靠性都被广泛质疑。针对各向异性微米薄膜热测量的巨大应用需求, 课题组开发了一套基于激光周期加热的测试系统, 测量了石墨烯薄膜、碳纤维增强基薄膜等各向异性薄膜的 3D 热扩散率和热导率, 获得了各向异性率随温度, 以及热物性随面内角度的变化规律, 实现了高精度热物性测量系统的国产化, 为各种高性能热界面薄膜的性能表征和研发提供有效依据。

最终交流类型: 口头报告

铁性材料的导热系数调控

刘晨晗*

南京师范大学

智能热管理的发展离不开热管理材料。考虑到声子是主要的热载流子之一，对声子输运的主动调控能实时精准调控热路中热流大小，满足各行各业对热管理的需求。然而，与电子输运相比，声子输运调控则困难得多，原因是声子和外部激励之间缺乏直接联系。本报告围绕报告人近年来关于电控铁性材料相变调控导热系数的系列工作，介绍多种调控导热系数的新方法并揭示热调控机制，包括：1) 锆酸铅的反铁电-铁电相变，调控原胞大小；2) 锆钛酸铅的位移型相变，调控晶格对称性；3) 钛酸钡的有序-无序相变，调控声子散射强度；4) 铁磁-顺磁相变，调控磁-声耦合强度等。本报告深入交叉铁性材料和微尺度传热学科，发展铁电热管理，为下一代高速响应、长寿命、宽温域和大开关比智能热管理材料的设计提供指导。

最终交流类型：主题报告

本征高导热高分子材料

顾军渭*

西北工业大学

高分子材料由于质轻、比强度高、电绝缘性优异、易成型加工、化学稳定性优良和成本低，常被用于电子元器件界面、封装材料和特高压换流阀以及饱和电抗器中。但高分子本体导热系数低(λ 在 0.18~0.44 W/(m·K)之间)，无法适应高功率化、高密度化和高集成化电子元器件以及特高压输电设备高效快速的散热要求。但本征高导热高分子材料的制备难度大，且其研究进展极其缓慢。本报告通过环氧树脂、聚酰亚胺、聚酯和聚硅氧烷等的分子结构优化设计引入液晶有序结构来提升其本体导热性能，并基于“分子链-有序结构-导热性能”的本构关系研究揭示其导热机理，拟为本征高导热高分子基体及其复合材料提供新的制备方法和理论依据。

最终交流类型：主题报告

基于有序氢键相互作用设计的导热和可拉伸弹性体

王振宇^{1,2}、曾小亮¹、许建斌^{*2}

1. 深圳先进电子材料国际创新研究院

2. 香港中文大学

弹性体因其大应变可逆拉伸性而被广泛使用，但其热传导率较低，限制了其在热管理方面的应用。提高弹性体的热导率通常需要添加填料，而填料会降低弹性体的拉伸性和其他理想特性。在此，我们提出了一种超分子结构设计策略，在不影响非晶弹性体的拉伸性和自愈能力的前提下，提高其热导率。我们设计的超分子聚(硫代辛酸-N,N'-亚甲基双丙烯酰胺)弹性体具有有序的氢键相互作用，可提高热传导效率并保持出色的拉伸性。由此制备的弹性体具有 0.72 W m⁻¹ K⁻¹ 的热导率、427% 的高拉伸性、475 kPa 的低弹性模量以及自愈合和再加工能力。我们的策略为开发不依赖传统填料的导热弹性体提供了一种前景广阔的替代方案。

最终交流类型：邀请报告

高性能导热电磁屏蔽材料

谢兰*

Guizhou University

《中华人民共和国第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》发布，其中明确提出深入实施制造强国战略，并对高端新材料的发展做出明确指示：“推动功能材料等材料研发应用，聚焦新材料、绿色环保以及航空航天等战略性新兴产业，加快关键核心技术创新应用”。因此，高性能和功能型生物基高分子材料布局航天航空、半导体、电子工业等高端产品领域势在必行。其中制备导热/电磁屏蔽生物基高分子复合材料能够解决电子、电气设备及元器件热量聚集问题，同时使作业人员不受电磁干扰。然而，从导热/屏蔽一体化高分子复合材料基础研究到产业化应用有很多重要的科学与技术瓶颈问题亟需解决。比如：(1) 如

何设计具有功能性的异质结构填料，并实现其在高分子基体内的有序且可控分布，从而明晰生物基高分子复合材料结构与导热性能的构效关系，最终制备力学性能优异且高导热的生物基高分子复合材料。(2) 如何构筑高分子复合材料的非对称结构，实现其结构功能一体化设计与制备。

研究一直围绕生物基高分子材料加工过程中高分子晶体形态调控、异质结构填料制备及功能化与其在生物基高分子基体中的分布、生物基高分子复合材料体系非对称结构设计和结构-性能关系等关键科学问题，开展了高性能生物基高分子导热复合材料和生物基高分子电磁屏蔽复合材料制备两个方面的研究工作，获得一些创新成果如下：

(1) 设计了功能异质结构填料并调控其有序分布，赋予纤维素基复合材料高导热性，为功能性异质结构填料设计与其在生物基高分子基本内的有序分布提供了一种新方法。

(2) 构筑了多层次非对称结构，包括预先构筑二维与三维高效电磁屏蔽结构网络，调控了生物基高分子材料多级非对称结构，制备了高效的生物基高分子电磁屏蔽复合材料，并提出了定向电磁屏蔽新概念（即材料一面实现信号屏蔽，另一面实现信号发射），为电磁屏蔽高分子复合材料结构功能一体化设计与制备提供了新思路。

最终交流类型：邀请报告

非理想导热模式对热管理材料导热系数测量精度的影响

张虎、唐桂华*

西安交通大学

本文总结了目前广泛应用的宏观尺度导热系数测量方法、特点和适用范围。热管理材料类型众多，内部存在多种传热模式，如玻璃、激光晶体、氧化硅气凝胶等材料具有光谱选择透过性，高温下辐射影响显著；多孔隔热材料内部主要传热模式包括气体导热、固体导热以及辐射传热；对于液体材料，存在温度梯度时内部还会引起自然对流。不同导热系数测量方法均基于纯导热介质假设，而应用于非理想导热介质测试时，测量理论与实际测试传热过程不完全一致，引入误差难以定量评估，还会导致相同材料不同方法测量结果分散性较大。本文提出“数值实验”分析方法，通过数值模拟实验测试传热过程，对比分析获得考虑和不考虑各种非理想假设因素（对流、辐射）对测量结果的影响规律。获得了瞬态平面热源法、热线法、热带法测试不同消光系数半透明材料高温导热系数时辐射传热的影响规律，并与稳态方法进行了对比。对于液体材料，获得瞬态平面热源法测试时自然对流引入误差受材料类型、测试时间、测试功率、加热方向等因素的影响规律。此外，还数值分析获得了瞬态平面热源法测试隔热材料、薄膜材料以及各向异性材料时探头绝缘层厚度等理论假设因素引入误差，查明了云母探头高温隔热性能测试结果偏大的原因，提出改进测量精度的建议得到瑞典 Hot Disk 仪器的应用。

最终交流类型：邀请报告

AI 辅助的高导热材料设计与热输运调控

鞠生宏*

上海交通大学

开发设计具有极限热输运特性的热功能材料在微纳器件热控等领域具有广泛的应用前景。传统试错法受限于材料设计过程中的诸多参数选择及耦合效应，实现最佳热输运性能的材料设计往往效率低、成本高。近年来，大数据及人工智能技术得到了快速发展和推广应用，如能将快速发展的信息学和传统材料热输运特性研究方法相结合，将有助于解决以往设计难、效率低的困境。本报告将主要介绍团队近年来基于大数据与人工智能开展的系列高导热材料设计及热输运调控探索研究，主要包括：(1) 基于高通量计算与搜索，分别实现了高导热晶体及高导热聚合物的系统挖掘及机理分析；(2) 基于贝叶斯优化、蒙特卡洛树搜索、深度学习实现了的材料微纳结构热输运性能的高效调控与设计。开发的相关方法具有通用性和普适性，已成功推广到电子、光子、磁子等多载能子复杂能量输运设计体系。

最终交流类型：口头报告

柔性防漏海藻酸钠基相变复合薄膜

胡成志^{*1}、李宏阳²、唐大伟¹

1. 大连理工大学
2. 河北工业大学

潜热蓄热技术具有等温蓄热的特性，在电子元器件的热管理领域受到广泛重视。然而，固液相变材料在熔化过程中的液化会导致泄漏，难以直接应用在电子设备内部。为解决这一问题，本文通过海藻酸钠、羧甲基纤维素和多壁碳纳米管与相变材料聚乙二醇一步合成不泄露的、柔性的相变复合膜，并将其应用于手机背部温控的热场景。通过对纳米增强型相变材料的热物性表征和换热实验，总结了纳米颗粒对蓄热体导热换热、对流换热、相变焓及形状稳定性的影响，得到以下主要结论：

(1) 在相变材料纯 ODA 中添加高导热的 MWCNTs 对所获得的 NePCMs 的蓄热表现影响可归纳为：a) 与纯 ODA 相比，NePCMs 的导热系数显著提升 9.53%~123.74%，可见添加高导热 MWCNTs 对 NePCMs 的导热系数有明显强化作用；b) 与纯 ODA 相变，添加< 0.10wt% 的 MWCNTs 并未大幅提升 NePCMs 的动力粘度，而当添加 MWCNTs 的质量分数 $\geq 0.10\text{wt}\%$ 时，NePCMs 表现出非牛顿流体特性，动力粘度显著增大；c) 添加 0.05wt% 纳米颗粒的 NePCMs (ODA@0.05) 的相变焓相较于纯 ODA 提升 6.45%，表明小剂量纳米颗粒可提升相变材料的焓值；d) NePCMs 受纳米颗粒对导热、对流换热和相变焓的综合影响，蓄热功率相较于纯 ODA 有明显不同，ODA@0.05 的蓄热高功率比纯 ODA 提升 22.38%。由此可见，通过优化纳米颗粒的浓度，可显著提升 NePCMs 的蓄热表现。

(2) 通过一步合成法制备海藻酸钠-羧甲基纤维素基相变复合膜，采用 MWCNTs 强化膜体的导热表现，通过一系列热物性测试结果表明：a) 复合膜具有优异的抗拉伸特性，最大拉伸强度可达 20.17 MPa；b) 复合膜相变焓为 100.05 J/g，面内导热系数达 3.52 W/(m·K)；c) 通过加热冷却实验和手机热实验发现，复合膜具有优异的隔热和蓄热表现，可使手机背部温度降低 5.3℃。由此可见，纳米颗粒一步合成的复合相变膜在手机热管理场景极具应用潜力。

最终交流类型：口头报告

辐射/相变偶联式零功耗热管理材料

卢翔*

华中科技大学

由于主动式热管理技术涉及的设备结构繁琐且能耗显著，其应用受到了极大限制。相对而言，被动式热管理技术，特别是辐射制冷技术，因其低能耗、结构简单等优势，逐渐凸显出广阔的应用前景。如何提升辐射制冷功率则是当前研究人员关注的重点。在本研究中，我们成功制备了一种具有优异性能的柔性多孔纤维素/相变微胶囊复合薄膜，实现辐射/相变并联式零功耗热管理。一方面，通过调控相变微胶囊的浓度可以调节复合材料微孔的大小，提升材料反射率，同时，相变微胶囊特殊的核壳结构能够增强散射效率，进一步提升辐射制冷功率。另一方面，当白天温度超过相变微胶囊的熔点时，辐射制冷和相变过程偶联作用，制冷功率达到 169 W/m²，远超目前报道的辐射制冷功率极限 (150 W/m²)，且最大降温可超过 20℃。基于以上结果，本研究不仅为辐射制冷材料的设计提供了新的思路，且有望为辐射制冷技术的发展和开辟新的道路。由于主动式热管理技术涉及的设备结构繁琐且能耗显著，其应用受到了极大限制。相对而言，被动式热管理技术，特别是辐射制冷技术，因其低能耗、结构简单等优势，逐渐凸显出广阔的应用前景。如何提升辐射制冷功率则是当前研究人员关注的重点。在本研究中，我们成功制备了一种具有优异性能的柔性多孔纤维素/相变微胶囊复合薄膜，实现辐射/相变并联式零功耗热管理。一方面，通过调控相变微胶囊的浓度可以调节复合材料微孔的大小，提升材料反射率，同时，相变微胶囊特殊的核壳结构能够增强散射效率，进一步提升辐射制冷功率。另一方面，当白天温度超过相变微胶囊的熔点时，辐射制冷和相变过程偶联作用，制冷功率达到 169 W/m²，远超目前报道的辐射制冷功率极限 (150 W/m²)，且最大降温可超过 20℃。基于以上结果，本研究不仅为辐射制冷材料的设计提供了新的思路，且有望为辐射制冷技

术的发展和应用开辟新的道路。

最终交流类型: 墙报

双两亲分子修饰策略: 实现高发光水溶性量子点微球及其环境监测荧光探针应用

王裕鑫¹、黄晓鹏*¹、杨艳冬²

1. 北京师范大学文理学院, 珠海市香洲区唐家湾镇金凤路 18 号, 519087
2. 哈尔滨工程大学青岛研究(生)院, 山东省青岛市黄岛区三沙路 1777 号, 266000

量子点 (QDs) 的水溶修饰性对于其在生物成像、荧光探针和光催化等领域的应用至关重要。然而, 传统的表面修饰技术, 如链交换法、聚合物包覆法和表面硅烷化法, 往往伴随着亮度降低、稳定性差和操作复杂等问题。在本项研究中, 我们创新性地引入了双两亲分子策略, 成功制备了稳定且发光效率高的量子点微球。首先, 我们选用了一种胺辅助的羧酸盐配体作为第一个两亲分子, 它能够与量子点表面的阴离子形成配合, 不仅增强了量子点的发光性能, 还显著提升了其疏水性。接着, 我们采用了一种常用的表面活性剂作为第二个两亲分子, 通过疏水-疏水相互作用, 将量子点封装成亲水性的微球。该方法操作简单, 转移效率高, 且适用性广。经过修饰后的量子点微球, 表面电荷可以是正电、负电或中性, 荧光效率超过 60%, 粒径稳定在 200 纳米左右。我们将这些量子点微球作为荧光探针, 用于检测水体中的金属离子。实验结果显示, 它们对银离子、铜离子和镉离子具有较好的响应性, 特别是对银离子的检测限达到了 2.5 至 3.0 nM, 显示出了极高的灵敏度。这一研究成果为水溶性量子点的制备提供了新的思路, 也为水环境中的重金属检测提供了新的技术参考。

最终交流类型: 墙报

Porous liquid metal coating with micro/nanostructure by bubble-induced self-assembly enabling enhancement of boiling heat transfer

Ben Chu, Benwei Fu*

Shanghai Jiao Tong University

Boiling is a kind of vapor-liquid phase change and utilizes the enormous latent heat of working medium to effectively transfer mass and energy. Boiling process has been used in extensive energy-related applications, such as power plant, thermal management, solar steam generation and water purification. Improving boiling heat transfer capacity to ensure high energy utilization efficiency is desired. Boiling heat transfer capacity is generally characterized by two parameters including the critical heat flux and heat transfer coefficient. Many recent efforts have been paid to enhance the critical heat flux and heat transfer coefficient by surface engineering. Conventional fabrication methods to generate micro/nanostructures on the substrates for enhancing boiling heat transfer include chemical vapor deposition, electrochemical deposition, photolithography, and laser processing. These methods, however, require over several complex procedures and expensive equipment. Here, we develop a porous eutectic gallium-indium liquid metal coating with micro/nanostructures, which is densely stacked with liquid metal nanoparticles via a facile, low-cost and cost-effective bubble-induced self-assembly method. The liquid metal nanoparticles are readily prepared by nanoprobe ultrasound sonication. By self-assembly of liquid metal nanoparticles under the action of the structural disjoining force, vapor recoiling force and capillary force underneath individual bubble, the porous liquid metal coating can be generated when nanofluid containing liquid metal nanoparticles is employed as working medium. When this porous coating with micro/nanostructure is used for boiling heat transfer of ethanol, it shows a critical heat flux of 903.2 kW/m² and a heat transfer coefficient of 67.9 kW/(m²·K). Compared to the pristine copper, the porous liquid metal coating enables the enhancement ratios of critical heat flux and heat transfer coefficient up to 36% and 168%, respectively. We also conducted the visualization experiment of the bubble dynamics during boiling and explore the mechanism of enhanced boiling heat transfer. The enhanced critical heat flux is due to the modified surface characteristics with improved

wettability and surface roughness, while the enhancement of heat transfer coefficient is ascribed to the increased bubble nucleation sites on the liquid metal coating. In addition, the liquid metal coating shows good stability and favorable connection with the copper substrate due to the metallic bond interaction between them. The developed porous liquid metal coating in this work is expected to be used for highly efficient thermal energy utilization and thermal management of high power applications. This boiling-induced self-assembly may provide an alternative method to generate various coatings with micro/nanostructures having high performance and stability.

最终交流类型: 墙报

Nonlinear and Significant Thermal Conductivity Change in NiTiCuCo Shape Memory Alloys across the Martensitic Phase Transition

Ziyan Qian, Qiye Zheng*

The Hong Kong University of Science and Technology

Shape memory alloys (SMAs) have garnered significant interest due to their unique ability to undergo reversible thermally-induced non-diffusive phase transitions with various applications in health care and energy technologies. Among SMA materials, the NiTiCuCo alloy system exhibits ultra-high thermal and elastocaloric cyclic stability, making it a promising candidate for elastocaloric cooling and advanced thermal management applications. In this work, we investigate the temperature-dependent thermal conductivity of NiTiCuCo alloys using Frequency-domain Thermoreflectance (FDTR) across the martensitic phase transition of novel temperature range of 213 K to 297 K. The results demonstrate a nonlinear and significant increase in thermal conductivity from ≈ 6 to ≈ 8 W/m·K as temperature rises within a narrow window of 30 K associated with the thermally induced martensitic phase transition in the alloys. Moreover, based on the FDTR spatial thermal conductivity mapping, distinct textural patterns that closely align with the grain orientation was observed in these alloys in the martensite phase, indicating a strong correlation between the microstructure and thermal transport properties of alloys. These findings provide valuable insights into the thermal transport mechanisms in these alloys for their elastocaloric application and underscore their potential as high-performance materials for advanced thermal regulation applications with enhanced cyclability and responsiveness.

最终交流类型: 墙报

轻质多孔水凝胶用于极端热应激下的可穿戴被动冷却

胡雪妍、王锦*

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

全球范围内日益加剧的极端高温压力使人类在户外环境中面临中暑和脱水的风险。个人热管理 (PTM) 是一种有前景的策略, 通过调节人体局部环境来解决这一问题。然而, 当前在炎热夏季的 PTM 方法面临着冷却效率低下的问题。在此, 我们设计了一种轻质分级多孔水凝胶 (HPHG), 通过使用聚乙烯醇 (PVA) 作为水凝胶基质, 以及超疏水二氧化硅气凝胶 (SHBSA) 微粒作为功能性组分, 设计和合成了具有低密度 ($0.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、强机械性能 (0.22 MPa)、高蒸发焓 ($1926.7 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$)、高太阳光反射率 (90%) 和红外发射率 (98%) 以及可控蒸发速率 ($1.04\times 10^{-4} \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 的 HPHG。因此, HPHG 在炎热的夏季直接阳光下 (环境温度: 59.3°C) 表现出强烈的持续被动冷却效果, 亚环境温度下降 22.5°C , 并在多云天气中展现出长达 15 h 的持续冷却时间。它们还能在 8 月份高达 68°C 的环境温度下, 将沙漠沙面的温度降低 24.1°C 。此外, HPHG 可以制备成轻质冷却背心 ($<350 \text{ g}$), 在 45°C 的空气温度下, 与环境温度和棉质背心相比, 平均温度分别下降 11°C 和 2.7°C 。本研究提出的 HPHG 概念为水凝胶作为轻质可穿戴材料在 PTM 中的应用开辟了新途径, 并解决了户外极端高温压力下被动冷却的瓶颈问题。

最终交流类型: 墙报

防风透气的气凝胶功能化纺织品作为全年的被动式热调节器

刘玲、王锦*

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

在户外经常会遇到巨大的温度波动，个人会受到过度热应激或快速热量损失的威胁。因此，迫切需要能够适应各种环境条件的合适热调节材料。在这项研究中，我们开发了一种简单且经济有效的策略来合成平均直径为 $1.9\ \mu\text{m}$ 的超细且近单分散的二氧化硅气凝胶微球。并将其作为功能基元制造了一种气凝胶功能化纺织品作为被动热调节器 (AT-PTR)，包括 CNTs 改性棉织物的加热层以及氧化硅气凝胶微球/PVDF-HFP 的冷却层。由于加热侧出色的宽带光谱吸收性能，可以实现冬季 23.2°C 的升温。冷却侧的高太阳光反射率和红外发射率，实现了夏季的 12.7°C 的降温。此外，在不同地区和季节的实际户外测试表明 AT-PTR 可以实现全年的户外人体热管理。同时，AT-PTR 表现出了突出的防风透湿性。此外，对使用了 AT-PTR 后的理论碳排放分析，结果表明，在使用了 AT-PTR 后碳排放减少了 13.6 吨二氧化碳当量。这种方法旨在为不同环境中的个人提供必要的热舒适性，从而实现个性化的热调节。只需翻转 AT-PTR，即可实现对热流方向的被动控制，确保个人在广泛的环境温度范围内保持持续的热舒适性。这一努力代表了一种基于高性能集成 AT-PTR 的开创性零能耗人体热管理技术。

最终交流类型：墙报

0D/2D 共掺杂高热导率辐射制冷薄膜的制备和研究

赵欣、唐桂华*

西安交通大学

辐射制冷技术通过热辐射实现被动降温，不需要任何额外能量的消耗，在电子器件热管理领域具有巨大的应用潜力。然而大多数辐射制冷材料的低热导率特性不利于电子器件散热，限制了在该领域的应用和发展。本文提出一种 0D/2D 多形状共掺杂策略，以实现导热性能和辐射制冷性能的协同优化。

采用静电自组装技术制备了 hBN 包覆的 SiO_2 空心球颗粒，与片状 hBN 颗粒共同掺杂到聚（偏二氟乙烯-六氟丙烯）基底中，真空干燥后得到了高热导率辐射制冷薄膜。采用离散偶极近似理论对辐射制冷性能优化机理进行了揭示。与实心 and 空心球颗粒相比，核壳包覆球颗粒的多层结构有利于入射光线的散射和方向改变，具有最优异的反射性能；0D 球颗粒和 2D 片状颗粒分别在 $0.3\text{-}0.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.6\text{-}2.5\ \mu\text{m}$ 波段具有较高加权散射系数，共掺杂实现了整个太阳辐射波段的高反射性能；聚合物基底在 $3\text{-}20\ \mu\text{m}$ 具有较高的发射率，用于辐射散热。通过理论计算对颗粒粒径进行优化，优化后球颗粒和片状颗粒的粒径均为 $1\ \mu\text{m}$ ，用于指导实验制备。实验结果表明，0D/2D 多形状共掺杂策略可以显著提高薄膜的辐射制冷性能，反射率和发射率分别高达 94.9% 和 91.2%。此外，这种核壳包覆结构和 0D/2D 共掺杂结构有利于导热网络的形成，薄膜的热导率提高到 $1.32\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。户外实验结果表明，高热导率辐射制冷薄膜可以将加热片温度从 $58.8\ ^\circ\text{C}$ 降低到 $31.3\ ^\circ\text{C}$ ，与传统低热导率辐射制冷薄膜相比，温度进一步降低了 $7.2\ ^\circ\text{C}$ 。在阳光直射条件下，薄膜的净冷却功率为 $102.5\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，夜间可达 $158.6\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。该工作为电子器件的高效冷却提供了新的思路，展现出高热导率辐射制冷薄膜在电子器件热管理领域的应用前景。本研究得到国家自然科学基金项目 (No.52130604) 的资助。

最终交流类型：墙报

基于功能基元序构的高频高速电子器件用热界面材料的制备及其散热性能研究

吕书培¹、欧阳静¹、陈德良^{*2}

1. 中南大学

2. 东莞理工学院

现代信息技术的高需求、高标准，促进电子器件向高频、高速、高功率密度的方向发展，由此产生的散热问题已成为阻碍电子器件性能提高及可靠性提升的主要因素。传统热界面材料 (TIM) 的介电常数和

介电损耗过高,无法适用于高频、高速信息传输的使用场景。因此,基于功能基元序构设计材料新思路,设计、制备兼具高导热、电绝缘、介电性能良好的 TIM 是促进器件向高频、高速、高功率密度发展的关键。基于此,引入具有高导热的六方氮化硼 (h -BN),并调控液相的表面性质改善其同 h -BN 的润湿性,进而提升液相剥离效率,获得六方氮化硼纳米片 (BNNS);通过原位生长二氧化钛纳米颗粒 (TiO_2 NPs) 改善 BNNS 的表面惰性 (TiO_2 @BNNS),结合 TiO_2 NPs 的黏附作用与静电吸引力将 TiO_2 @BNNS 包覆至在具有低介电常数/损耗的球形二氧化硅 (SiO_2) 表面,获得具有良好包覆结构的 TBNS (TiO_2 @BNNS/ SiO_2) 复合导热填料:最终将其与聚四氟乙烯混合制备得到厚度为 70 μm 的热界面材料 (TBNS-PTFE)。研究结果表明,当 BNNS 添加量仅 7.5 wt.%时,即可构建顺畅的导热通路,TBNS-PTFE 的面内、透面热导率分别达到约 1.67、1.14 $\text{W/m}\cdot\text{K}$,表现出极佳的单位质量导热贡献率;且在 10 GHz 下的介电常数与介电损耗低至 2.66 和 4.97×10^{-4} ,满足高频、高速、高功率密度器件的使用需求。此外,该复合热界面材料具有良好的机械性能、热循环稳定性、极端温度稳定性、化学稳定性及一定的阻燃性能。综上所述,该工作通过功能基元的合理筛选和组分间的有效序构,设计、制备了一种兼顾高导热、低介电与低成本的复合导热填料,在极低的 h -BN 添加量下即可达到良好的接近各向同性的散热效果,为高频、高速、高功率密度电子器件用热界面材料的可控制备提供思路。

最终交流类型:墙报

通过变形势调制和巨变形工艺在 n 型 Bi_2Te_3 中实现了高热电致冷温差

张福东¹

1.陕西师范大学

热电制冷技术可利用珀尔帖效应实现固态制冷,在包括人工智能和微芯片行业在内的诸多近室温热管理场景中具有广泛的应用潜力。对于热电材料而言,除了热电优值(ZT)外,较大的功率因数(Power factor)是产生最大致冷密度的主要因素。目前适合近室温热电致冷商业化的材料仍以 Bi_2Te_3 基合金为主。然而,目前限制 Bi_2Te_3 基器件冷却性能提升的主要原因在于 n 型 $\text{Bi}_2(\text{Te}, \text{Se})_3$ 的热电性能滞后于 p 型 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 。在这项工作中,我们通过逐步施加 Cu, Nd 和巨热变形(giant hot deformation)调控工艺成功地在 n 型 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ 中实现了热电优值和功率因子的同步提升,并在 10-对热电冷却模拟模块中实现了最大冷却温差为 70 K (热端温度为 300 K)。

最终交流类型:墙报

Non-reciprocal Diffusionics and Hall-like Heat Transfer

Jingrong Liu¹, Jiping Huang¹

1. Fudan University

Recent advancements in thermal diffusion systems have paved the way for non-reciprocal and topological transport, challenging the traditional reciprocal mechanisms inherent in diffusion equations. We begin by exploring the domain of Diffusionics, emphasizing cutting-edge technologies such as spatiotemporal modulation and active structures. Then discuss "thermal chirality," or the directional bias of heat flux, which opens new avenues for heat control. Our study features an active thermal lattice, comprised of a stationary solid matrix integrated with rotating solid particles, achieving Hall-like heat transfer without the need for strong magnetic fields or low temperatures. These innovations shed light on potential pathways for topological and non-Hermitian heat transfer, heralding a new era of more efficient heat utilization.

最终交流类型:墙报

基于电场调控热导率的纳米颗粒悬浮液热智能材料

董玉霞、张梓彤、曹炳阳*

清华大学航天航空学院

随着科学技术的迅速发展,航天航空、电子器件等领域对能够实时响应外界环境变化、自主调节热流

的智能热控技术的需求非常紧迫。智能热控技术的关键是制备具有可逆调控热导率的热智能材料。本研究制备了石墨烯复合纳米片-硅油悬浮液热智能材料，石墨烯复合纳米片在直流电场由于链状结构的形成/断裂而表现出可逆热导率，最大热开关比约为 1.5。此外，我们提出了一种基于热智能材料的热智能器件，并模拟实际系统的工作状态。该热智能器件可以在复杂多变的热流条件下实际运行，具有良好的温度调节能力，在环境温度为 20°C、热源输入热流密度为 3500 W/m²、电场强度为 600 V/mm 时，设备温度可以降低 5.3°C。当热源输入热流为 2800 W/m² 时，使用热智能器件可以节省近 10% 的功耗。纳米颗粒悬浮液热智能材料在电子器件、航天器系统和动力电池等各种热管理系统中具有巨大的应用潜力。

最终交流类型：墙报

单相浸没式液冷氟化液综述

李沫潼、曹炳阳*

清华大学航天航空学院

近年来，随着信息技术的迅速发展，数据中心的体量和功耗迅速提升，在“双碳”目标的引领下，以低 PUE 值为重要优势的浸没式液冷技术成为降低数据中心冷却系统耗电量的良好选择。其中，单相浸没式液冷采用电子器件直接浸没在冷却液环境中，利用流体工质直接接触式对流实现对热源的散热，这就要求冷却工质既要与各部件材料良好兼容，同时在不影响器件工作的前提下，实现更高效的流动换热。电子氟化液是常见的浸没式液冷冷却液，但其种类繁多，性质、成本以及生产过程中对环境的污染程度等有较大差异，在单相浸没式冷却场景中应用也展现出不同的优劣势。本文将系统介绍目前产业内常见的用作单相浸没式冷却液的氟化液，按照元素组成和分子结构，分别介绍不同种类氟化液的流动、传热以及相关电学和化学性质，并提出直观的、可综合评估氟化液冷却性能的评价指标，为数据中心单相浸没式热管理提供技术指导。

最终交流类型：墙报

Ga₂O₃/SiC 异质结的高质量外延生长和机器学习驱动的界面热导预测

杨鸿澳、曹炳阳*

清华大学

杨鸿澳¹，杨永涛²，刘源斌³，吴真平²，曹炳阳^{1*}

¹ 清华大学工程力学系，热科学与动力工程教育部重点实验室，北京 100084

² 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室与理学院，北京 100876

³ 牛津大学无机化学实验室，牛津大学，英国伦敦

Ga₂O₃ 作为第四代半导体材料，凭借其 4.9 eV 的超宽带隙在下一代功率半导体器件中展现出巨大潜力。然而，Ga₂O₃ 极低的本征热导率(20 W/mK)对其热管理提出了严峻挑战。采用高热导率的 SiC 衬底是一种可行的解决方案，但现有 Ga₂O₃/SiC 界面的界面热导较低(23~100 MW/m²K)，需要提升其异质结合质量和界面热导。本文通过射频磁控溅射法在 4H-SiC 衬底上外延生长 β-Ga₂O₃ 薄膜，利用 X 射线衍射和 TDTR 测试，发现界面热导达到 200 MW/m²K。TEM 表征显示界面非晶过渡层厚度小于 1nm。为了解释界面热导的机理，本文结合机器学习势函数和晶格动力学方法，预测了 β-Ga₂O₃/4H-SiC 界面的热导。通过 MACE 势函数和晶格动力学方法，研究了不同过渡层厚度和界面应力对热导的影响。结果显示，无过渡层时界面热导可达 210 MW/m²K，3nm 过渡层时降至 89 MW/m²K，验证了减少非晶过渡层厚度的重要性。此外，界面残余应力增加会显著降低热导，强调了降低应力的重要性。本文的方法不仅适用于 Ga₂O₃/SiC 界面，还可扩展至其他材料系统。通过机器学习势函数与晶格动力学的结合，实现了高精度的界面热导预测，为未来电子器件的热管理提供了理论指导。

最终交流类型：墙报

低沸点液滴在热表面的撞击过程实验研究

李斌、曹炳阳*

清华大学

喷淋式冷却技术实施过程中最基本的现象是冷却工质液滴撞击固体表面的运动及传热过程。液滴撞击固体表面的现象非常复杂，它不仅是一个热物理学的问题，而且也是流体力学问题，仅以传热性能参数的获取为研究目的，不利于揭示液固相互作用引起的液滴撞击换热机制和建立预测液滴撞击换热的分析模型。因此，本文基于液滴撞击动力学开展了低沸点冷却液撞击加热固体表面的实验研究，旨在了解低沸点工质液滴撞击加热表面后的形貌演变规律，以低沸点氟化液为研究对象，探究了单个氟化液液滴的撞击动力学特征。了解了撞击速度等对液滴运动轨迹、界面变化的影响，观察了不同条件下铺展、飞溅、回缩和莱顿弗罗斯特(反弹)现象，分析了液滴撞击过程中铺展直径、铺展时间、动态接触角、停留时间等参数随韦伯数、表面温度的变化规律，最后建立了液滴撞击的最大铺展系数预测模型。本研究对设计良好的喷雾冷却系统保证电子器件正常工作和延长使用寿命有重要参考意义。

最终交流类型：墙报

液态金属柱阵列增强硅橡胶基热界面材料导热性能的研究

叶振强*

深圳大学材料学院

本研究提出了一种创新策略，将液态金属柱 (Liquid Metal Pillar, LMP) 嵌入铝粉-聚二甲基硅氧烷 (Al-PDMS) 复合物中合成液态金属复合材料 (Al-PDMS-LMP)。该方法不仅可以对热界面材料的导热系数进行定制调整，而且可以有效地利用液态金属的高导热率优势。我们选取了目前应用最广泛的铝粉作为主体导热填料，辅以少量液态金属构建高效导热通路；聚合物基体选用聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS)；选取共晶镓铟合金液态金属 (EGaIn) 构建 LMP。当液态金属含量仅为 17.53 vol.% 时，热界面材料的导热系数即可达到 $10.9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。此外，LMP 的引入增强了导热垫片的柔软度，促进界面间的接触，从而提高传热效率。Al-PDMS-LMP 材料表现出卓越的耐用性，在 300 次高低温循环后仍保持 85% 以上的热性能，并在 1000 次功率循环后保持芯片温度变化在 1°C 以内。该方法为增强电子设备的热管理提供了一种有效的解决方案，通过引入少量的液态金属，整体导热系数获得显著提高，大大提升了液态金属的利用效率。因此，我们的方法以更低的成本获得了更高的效益，在成本和性能之间取得了平衡，具有很高的实际应用价值。

最终交流类型：墙报

基于连续导热相的膨胀石墨“开口封装”聚乙二醇热界面材料研究

刘长青*¹、于伟²、李一凡²、范俊辉²、袁文华¹、曹炳阳³

1. 邵阳学院

2. 上海第二工业大学

3. 清华大学

相变型热界面材料是强化功率器件散热的一个重要研究方向，但其面临防止泄露和降低接触热阻共存的一对矛盾问题。针对该问题，本文提出高导热的多孔状膨胀石墨“开口封装”聚乙二醇的新方法。基于膨胀石墨的高导热和多孔结构特性，添加少量的膨胀石墨可以防止聚乙二醇的泄露，并保持低接触热阻 (TCR)，同时容易实现首尾相连构筑连续导热相而显著提高热导率。系统研究了复合热界面材料的热性能。结果表明：膨胀石墨/聚乙二醇热界面材料的热导率随膨胀石墨填充质量增大而增加，膨胀石墨质量分数为 3.23wt%，复合热界面材料热导率高达 $3.24 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，提高了 575%；TCR 随温度升高而降低，当温度达到聚乙二醇的相变点时，发生急剧降低 ($15\sim 25 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ 降低至约 $0.2 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$)；复合相变材料应用于

定温加热板散热过程，表面温度变化结果证实接触面处温升诱导其逐渐转变为熔融态，并降低接触热阻。该研究结果为推进高导热、形状稳定和低接触热阻的相变型热界面材料实际应用提供了一个可行性方案。

最终交流类型：墙报

宽禁带半导体 GaN 中的拓扑声子

唐道胜*

苏州大学

声子导热调控是近几十年来受到特别关注的重要基础问题，对高功率密度电子器件近结点热管理和优异性能热功能材料设计具有重要意义。从拓扑物理的角度理解半导体中的声子行为，将有助于更为深刻地理解声子输运和电子-声子相互作用，并提供更多调控视角和方法。本文将拓扑声子效应引入到 GaN 体系中的声子热输运及其调控。基于拓扑声子理论和第一性原理计算方法系统研究了 GaN 体系（包括同族氮化物）的拓扑声子性质及表面态，发现在 GaN 中引入 Al 原子可以实现 GaN 体系的声子拓扑相变，AlN 和纤锌矿型 AlGa₂N₃ 是拓扑非平庸的声子体系，两种材料中均存在两种不同的 Weyl 声子态。进一步构建了 GaN/AlN 和 AlGa₂N₃/GaN 两种典型的 GaN 超晶格结构。在拓扑声子平庸和非平庸的体系组成的复合结构中，拓扑声子仍然可以存在。超晶格中的 Weyl 声子分布在 $k_z=0$ 的两侧，随着超晶格原胞中原子数目的增加，Weyl 声子数也随之增加，从一层结构中的几十个增加至三层结构中的几百个。(GaN)₂/(AlN)₂ 超晶格中的 Weyl 声子主要源于 Al 和 Ga 原子的振动，其他超晶格结构中的 Weyl 声子则主要源于 N 原子的振动。对于 GaN 体系中的拓扑声子，其不受晶格对称性的保护，而是源于原子间相互作用造成的声子能带偶然间并。为了揭示 GaN 体系中拓扑声子的微观机制，构建了基于解析力常数模型的纤锌矿结构的拓扑声子模型。通过调整力常数模型中的关键系数和相互作用项，重点探究了力常数强度和非局域相互作用（最近邻范围以外的原子间相互作用）对拓扑声子的影响。研究表明，力常数强度和非局域相互作用均会引发 GaN 晶格体系的声子拓扑相变。在相变中，原有的 Weyl 声子消失或者产生新的 Weyl 声子，这些拓扑声子具有绝对值为 1 的陈数指标，来自于声子能带的非平庸交叉，其相变发生于交叉顺序的改变。绝大多数 Weyl 声子分布于布里渊区 $k_z=0$ 平面，其余部分出现在布里渊区边界或内部非高对称面上。对于纤锌矿结构的 GaN 和 AlN，在同类力常数模型描述下，体系中出现的 Weyl 声子大部分都是相同或相似的，源于同一组声子能带的交叠，并具有相似的局部声子色散关系。相比于力常数强度变化，非局域相互作用可以造成更显著的 Weyl 声子相变，尤其在价力场和 SW 势函数框架下，GaN 和 AlN 体系会在引入非局域相互作用后产生多组 Weyl 声子。由于晶格常数的不同，AlN 和 GaN 具有不同的第 3 近邻原子，使得 AlN 体系中有更多声子拓扑相变的空间。

最终交流类型：墙报

自修复热界面材料的制备及性能研究

俞慧涛、封伟*

天津大学

热界面材料 (TIM) 是一类通过填充任意两个给定表面之间的间隙来增强界面间的热传递的特殊材料。优良的 TIM 要求兼具高导热系数、高弹性变形和良好的表面接触，在材料的反复收缩、膨胀过程中表现出长效的声子迁移率和低的界面热阻。但是传统 TIM 材料在反复压缩、回弹或摩擦的作用下，结构发生损伤，导致导热性能降低。因此，通过优化其分子结构或交联，设计得到具有高的声子迁移率/有效的声子转移、自愈合和良好的弹性的 TIM 材料显得尤为重要。课题思路首先通过将柔性段和刚性段的共聚，引入不同动态基团，控制基团含量，制备得到具有不同自修复功能的共聚物。然后，采用不同工艺得到多尺度导热网络，优化填料界面，将聚合物均匀地填充到的填料间隙中，最终得到兼具高导热、自修复和弹性的热界面材料。结果表明，复合材料的导热系数为 $>10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，不同力学压力下可快速回弹，并实现 -20~100°C 下力学强度和导热性能的快速自修复。

最终交流类型：墙报

振动-超声复合场构建具有串晶的 HDPE/BN 复合材料：提高双向导热性能和力学强度

马仪杰、高雪芹*

四川大学

目前高分子材料主要依靠添加填料来提升其导热性能，然而大量填料的引入往往会导致材料力学性能的降低。为了在不牺牲材料力学强度的情况下增强导热性能，本研究利用液压振动-超声挤出设备探索了在高密度聚乙烯(HDPE)中引入 5 wt%氮化硼(BN)的导热性能以及导热通路的构建。差示扫描量热法(DSC)数据显示，在拉伸场下，HDPE 形成了 shish-kebab 晶体结构，有助于构建 shish-BN-shish 和 kebab-BN-kebab 的晶体-填料-晶体导热通路。在液压振动场和超声场下，材料的双向导热性能和力学强度均有所提升，其中在 4 Hz 和 800 W 条件下试样的力学强度达到 45.4 MPa，导热系数最佳可达 1.2 W/mK。本研究通过外力场制造了具有高效散热和更高力学性能的 HDPE/BN 复合材料，并可进行工厂化连续生产。

最终交流类型：墙报

各向异性纳米复合结构的有序构筑和热管理应用

沈曦*

香港理工大学

热管理材料在电子器件、光热转换、太阳能利用、辐射制冷等可持续能源高效利用及节能环保等方面扮演着十分重要的角色，是推动实现“双碳”目标的关键材料之一。二维材料如石墨烯、氮化硼物纳米片、MXene 等具有独特的各向异性光热性能，即面内高导热而面外高隔热，使其成为构筑具有高度可调导热率的复合材料的理想填料。然而，由于宏观复合材料的性能不仅受到纳米填料的本质性质影响，更取决于微观尺度的界面性质及介观尺度的结构特征，使得将纳米填料的光热性能直接传递到宏观复合材料中还存在诸多挑战。为解决上述问题，我们通过多尺度模拟和实验相结合的方法，利用理论模拟揭示了纳米填料的界面性质和介观尺度的结构特征对热导率的影响规律，并建立了新的理论模型以阐明宏观复合结构中的传热机理，在此基础上开发了多种定向冷冻铸造技术，如顺序双向冷冻铸造、溶剂辅助冷冻铸造、冰结构冷冻铸造、增材式定向冷冻铸造等，对冰晶生长进行了有效调控，实现了孔壁结构、孔隙取向、孔隙率等影响热导率的重要结构参数的可控化及宏量制备，进一步构筑了光热特性可调的聚合物基纳米复合薄膜、气凝胶、水凝胶等各向异性结构，从而最大化的将二维填料的光热性能传递到宏观结构中，使这些宏观各向异性纳米复合结构在包括热界面材料、辐射制冷材料和太阳能水蒸发材料等光热管理应用中展现出优异的性能。

最终交流类型：墙报

Interface regulation of diamond-doped GaInSn composites

Shijie Du^{1,2,3,4}, Hong Guo^{1,2,3}, Hui Yang^{*1,2,3}, Jie Zhang^{1,2,3}, Zhongnan Xie^{1,2,3}, Nan Wu^{1,2,3}

1. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd., China

2. State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes, GRINM Group Co., Ltd., China

3. General Research Institute for Nonferrous Metals, China

4. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology, Beijing 10083, China

Diamond-doped GaInSn thermal interface materials have broad application prospects in the field of electronic thermal management. However, the poor wettability of diamond and liquid metal makes the fabrication of composites through simple mechanical agitation difficult. In this study, the wettability between GaInSn and diamond was improved by reducing the surface tension of liquid metal and improving the anisotropy of the diamond surface. The diamond/liquid metal (Dia/LM) interface structure was regulated by controlling the gallium oxide content. Ga₂O₃ was enriched in the GaInSn and diamond contact surface, which can reduce

the surface tension of the liquid metal, improve the wettability of GalnSn to diamond, produce a mechanical locking force with the diamond surface, strengthen the bonding between the liquid metal and the diamond, and reduce the thermal resistance of the liquid metal/diamond interface. The Dia/LM interface structure was controlled by using crushed diamond. Result shows that the wettability of the surface (111) of the diamond was the best. The(100) and (110) planes with poor wettability were cut by the crushed diamond cleavage step, and the area of the crystal plane with poor wettability was reduced, thus improving the wettability of the liquid metal. The improvement of the crushed diamonds' wettability was verified by molecular dynamics calculation. The composite preparation technology of diamond and the GalnSn liquid metal was optimized, and the high-performance Dia/LM thermal interface material was prepared by ultrasonic-assisted and micro-oxidation methods.

最终交流类型：墙报

蒙烯氧化铝粉体的制备方法和应用研究

吴雨竹、宋雨晴、刘忠范*

北京大学

随着电子信息技术的发展，小型化和高集成化的需求引领了高密度集成微系统高效散热发展的技术浪潮。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。石墨烯具有超高的导热性能，本研究采用过流化床-化学气相沉积法，针对流化床的高效传质传热特性，通过碳源设计、温度调节、流化状态调控，实现层数可控、低缺陷密度、均匀性好的蒙烯氧化铝粉体制备。明晰了石墨烯在球形氧化铝生长基底上的形核和生长行为，同时结合理论计算，探究了蒙烯氧化铝粉体的导热增强机制。将石墨烯蒙皮直接包覆在导热填料 Al_2O_3 粉体表面，利用石墨烯蒙皮的高效声子输运能力以及载体材料的球形结构，构筑了结构功能一体化的高效热输运通道，为高导热热界面材料在 5G 通信、电子封装、能量传输等领域发展了新的应用前景。

最终交流类型：墙报

低模量高导热热界面材料的构筑：支化结构中悬挂链的缠结与解缠结

文志斌*、章志安、任琳琳、曾小亮、孙蓉

深圳先进电子材料国际创新研究院

随着高性能计算、人工智能、物联网、大数据时代的来临，芯片的发展趋于高功率、高频率和大尺寸，导致芯片功耗和热流密度不断上升，电子设备温度每升高 10°C ，器件有效寿命就降低约 50%，有效散热已经成为制约其发展的关键问题。同时在芯片高低温使用过程中，由于芯片和均热板热膨胀系数不匹配产生的热应力会导致芯片发生不同程度的翘曲，容易引起材料本体破坏产生裂纹，增加热阻而降低散热效率，最终导致芯片失效。热界面材料用于填充热源与热沉之间的空隙，不仅要有优异的导热性能，还需具有低模量高柔性以抵抗翘曲失效。热界面材料中导热填料的加入会使模量升高，低模量、高柔性和高导热系数的矛盾是一个重要的挑战。研究表明，支化网络结构可以有效降低分子链之间的缠结，从而降低模量，但是另一方面，支化网络中的悬挂链与导热填料会形成更多的物理缠结，为了探究支化网络在热界面材料中缠结与解缠结的作用，我们通过构筑多支链聚二甲基硅氧烷（PDMS）网络，与铝粉形成热界面材料，通过频率扫描和拉伸曲线研究了悬挂链间距变化对基体和热界面材料解缠结和缠结效应，研究表明模量先降低后增加，当 PDMS 悬链间距为 149 个原子时，模量达到最低（21.2 kPa），热界面材料达到具有低模量（0.39 MPa）、94% 的高断裂伸长率和高导热系数（6.02 W/(m K)）。

最终交流类型：主题报告

芯片热管理材料

曹炳阳*
清华大学

芯片热管理材料是对芯片内热量的产生、传导和排散进行调控的功能材料。近年来,随着芯片晶体管尺寸的不断微缩和封装密度的不断提高,芯片的热流密度已超过 1000 W/cm^2 ,对高性能热管理材料提出了迫切需求,当前芯片热管理材料研究成为了传热学、材料学、化学、物理学等多学科交叉的国际前沿热点。芯片热管理材料研究热点包括新型填料的发现和设计、复合材料的制备方法、导热机理、材料热物性的测试技术等。热管理材料通常由高导热填料和基质组成,除了传统的高导热填料,如氧化铝、银纳米颗粒、氮化硼、石墨烯、金刚石等,近年来,研究人员通过人工智能技术对材料进行高通量筛选,发现了更多种类的高导热填料;另一方面,在复合材料制备方面,通过采用构建高导热填料的导热通路、不同填料尺寸的梯级匹配等方法,实现了复合材料热导率的大幅提升。在导热方面,研究人员通过采用分子动力学模拟、第一性计算、蒙特卡洛模拟等手段,对电子、声子等热载流子的界面热输运特性进行分析和调控,进而减小填料和基质之间的界面热阻;在热物性测试技术方面,除了传统宏观热测试方法,如稳态热流法、稳态平板法、热线法、瞬态平板法、激光闪射法和差式扫描量热法之外,研究人员重点研究微纳尺度热物性测试方法,如 3ω 谐波法、时域热反射测量法和拉曼光谱法。本报告将介绍本团队近年来在热界面材料、热智能材料、固液相变材料、导热膜、盖板材料和异质结材料等方面的研究成果。

最终交流类型: 主题报告

高性能热电材料与器件

姜鹏*

中国科学院大连化学物理研究所

基于 Peltier 效应的热电材料与器件可以实现主动式热管理,具有全固态、响应快、精度高、寿命长、无噪音等优点,在通信、探测、医疗、航空、航天、汽车等领域具有广泛应用。但是,目前高端热电材料与器件仍被国外垄断,迫切需要突破卡脖子关键技术,实现国产替代。我们发展了高性能高机械强度热电材料制备方法,开发了全自动器件集成工艺,制备了高效能微型热电器件,通过了可靠性和稳定性测试,推动了热电器件国产化进程。此外,我们还开发了基于热电薄膜材料的芯片制冷(on-chip cooling)技术,通过芯片-热电器件一体化制备技术,有望实现微纳芯片局域主动控温。

最终交流类型: 邀请报告

氮化镓异质结界面热输运机理与调控

刘向军*、熊玉成、李寿航、王权杰、孙健时

东华大学

氮化镓(GaN)因其宽禁带和卓越的物理特性,成为高温、高频、大功率电子器件的优选材料。然而,GaN 器件在散热方面面临挑战,特别是由于高度局域化的焦耳热和纳米尺度下的非傅里叶导热问题的存在。在这些器件中,界面热阻对热耗散起着至关重要的作用,尤其是 GaN 与衬底之间的界面热阻,它对晶体管结点温升的贡献巨大。实际界面处存在的晶格和热膨胀失配导致的各种缺陷,会改变声子的动力学行为,从而影响热传输。为了深入理解并改善这一问题,本研究从原子尺度和声子模态层面探究了 GaN 界面的微观热输运机理。重点研究了 GaN 晶体管内的两种典型界面:化学键结合界面和范德华键结合界面,并为这两种界面提出了有效的热导调控方案。在 GaN/AlN 异质结界面热输运机理方面,研究揭示了界面微观结构和声子入射角等因素对声子动力行为的影响。发现非晶层会降低声子透射率,增加界面热阻,而通过退火技术优化界面微观形貌,可以显著提升界面热导。此外,研究还发现,温度和尺寸的变化对界面热导有复杂的影响。对于 GaN/MoS₂ 范德华异质结界面,研究显示衬底厚度和温度对界面热导的影响较小,而衬底表面形貌/粗糙度则有显著影响。衬底表面非晶层的存在可以显著提高界面热导。此外,研究还提出了在衬

底底部引入缺陷的新策略，以提高界面热导并减少对 MoS₂ 面内热导率的负面影响。这些研究成果不仅增进了对 GaN 基异质结界面热输运的理解，而且为高温电子器件的散热问题提供了新的解决思路。通过调控界面特性和引入特定的缺陷，可以有效地管理热输运，从而提高器件的性能和可靠性。

最终交流类型：口头报告

协同各向异性网络和多级电极的高效 N 型准固态热化学电池

高崴*

东南大学

低品位热能 (<100°C) 在自然和工业过程中普遍存在，如太阳辐射、地热、工业废热和生物热。基于弹性聚合物网络、惰性电极和离子电解质的准固态热化学电池，可以利用热电化学效应直接将热能转化为电能，其热电势可达 mV K^{-1} 数量级，并且在动态界面上表现出卓越的适应性和抗干扰能力，有利于在特定温差下持续产生电能。在这种情况下，开发成本效益高、性能优越的准固态热化学电池对实际应用至关重要。在本研究中，我们提出了一种制备低成本、高功率密度的 N 型准固态热化学电池方法。通过将 Cu^{2+}/Cu 氧化还原离子电对纳入各向异性聚乙烯醇 (PVA) 水凝胶网络，并利用准固态凝胶基质和分级电极的协同工程实现的。具体而言，利用定向冻融策略构建的各向异性水凝胶将热电势与离子电导率解耦，同时建立有序排列的离子传输通道，从而减轻了电解质传输阻力。此外，所得到的各向异性聚合物网络与盐析出效应相辅相成，具有出色的机械性能（延伸率为 350%，拉伸应力为 1.5 MPa，杨氏模量为 197 kPa），超越了现有 N 型热电池的能力。优化后的低成本铜电极增加了电活性表面积，减少了电荷转移阻力，并增加了热化学反应位点，进一步提高了输出功率（在 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 时为 0.51 mW m^{-2} ）。所开发的协同各向异性网络和分级电极提供了一种简化的方法来制造低成本、高性能的 N 型准固态热电池，为利用以前未开发的低品位热能源铺平了道路。

最终交流类型：口头报告

膨胀石墨骨架形态对石蜡复合相变材料热管理性能的影响研究

赵一霖¹、黄树晖*¹、谢忠南¹、金兆国²、郭宏¹、解浩峰¹

1. 中国有研科技集团有限公司

2. 海鹰空天材料研究院（苏州）有限责任公司

石蜡是航天器热控系统中最常用的储热材料之一，主要用于对电子器件进行热管理。但是石蜡的导热能力很低，仅为 $0.3\sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，无法满足航天器热控系统热管理进一步提升的要求。膨胀石墨作为高效的导热强化骨架，将其与石蜡复合制备的相变材料可以兼具高焓值和高导热的特性。本文首先研究了膨胀石墨的热膨化工艺与颗粒形态的关系，在此基础上设计了两种工艺路径构筑高导热石墨骨架。其一为控制变形量冷压法制备高联通石墨骨架，再采用真空熔渗法制备出石蜡/石墨复合相变材料；其二为控制比例混粉冷压法制备石蜡/石墨复合相变材料。采用扫描电子显微镜 (SEM)、差示扫描量热仪 (DSC) 激光热导仪等，表征膨胀石墨形态和复合材料的微观组织，以及相变温度、焓值、热导率和密度等与热管理密切相关的物理性质，从而明确膨胀石墨骨架形态对石蜡复合相变材料热管理性能的影响规律和机理。研究结果表明，（1）经 $900^\circ\text{C}/30\text{s}$ 热处理后，石墨膨胀程度最大，呈均一蠕虫状；（2）工艺路径一中膨胀石墨质量分数为 9.95wt% 时，石蜡/石墨复合材料的导热系数和相变潜热分别可达 $6.19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 229.24 J/g ；（3）工艺路径二中膨胀石墨质量分数为 6.16wt% 时，石蜡/石墨复合材料的导热系数和相变潜热分别可达 $4.63 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 246.24 J/g 。本文通过膨胀石墨导热增强体形态的控制，实现了对石蜡复合相变材料热管理性能的调控。

最终交流类型：主题报告

气凝胶基相变隔热材料及辐照损伤机理

冯妍卉*¹、冯黛丽¹、赵梓皓¹、查婕¹、李文君²、苗建印²

1. 北京科技大学能源与环境工程学院

2. 北京空间飞行器总体设计部

高效可靠的热防护系统是保障飞行器在极端服役环境和复杂工况下安全运行的关键，而热防护系统的有效实施依赖于先进的防隔热材料。将兼具大热沉和低热导率的相变材料纳入热防护结构，利用“潜热+显热”联合消纳外部热量，可为飞行器多功能热防护方案设计提供一种新思路。对此，本研究以开发“高储热密度-低热导率”的多级孔复合相变隔热材料为目标，制备具有耐高温、轻质、高孔隙率、低热导率等特点的气凝胶骨架，通过改变制备工艺、优选添加剂等方式对多级孔骨架热、力性能进行调控。进一步，高效负载宽温域相变芯材(50-170°C)，获得了系列热导率均小于 0.5 W/(m·K)、潜热接近纯芯材的多孔组装相变隔热材料。此外，考虑到热防护系统在空间环境中服役会遭遇大量空间粒子、引发材料损伤，通过实验和模拟探究了钴 60 辐照下，骨架及复合材料结构的变异乃至对相变热特性的影响。结果表明，辐照会引起骨架产生少量点缺陷、相变材料分子链断链并产生新化合物，导致复合材料潜热和热导率的降低，但整体隔热性能提升。本研究为面向航天器热防护的新型复合相变隔热材料精准设计与快速制备提供指导。

最终交流类型：邀请报告

掺杂散射反常增强纳米尺度热源附近传热

鲍华*¹、胡跃¹、徐家璇¹、Xiulin Ruan²

1. 上海交通大学

2. Purdue University

一般认为缺陷散射会抑制热传输。然而，我们通过分子动力学和玻尔兹曼输运方程计算，证明了在纳米级加热区引入缺陷散射可以反常地提高系统的等效热导率，提高幅度高达 75%。我们进一步揭示了该效应背后的物理机制：没有缺陷的加热区会产生定向非平衡，其中过多的倾斜传播声子会抑制热传输，同时引入缺陷会随机重定向声子以恢复方向平衡，从而提高热导率。研究进一步证明，缺陷散射可以在不同温度、不同材料种类和尺寸下实现这种热传输增强，具有很强的普适性。该研究提供了一种通过操纵声子定向非平衡来增强热传输的新策略。

最终交流类型：邀请报告

液态金属基弹性复合导热材料

何志祝*

中国农业大学

在人体热舒适调节、临床医学实践、柔性电子和热能回收等应用领域，开发能够适形化形变、轻量化且紧凑、高效传热并长期稳定运行的热管理技术至关重要。基于刚性导热材料的热管理技术难以适应复杂曲面，尤其是与人体皮肤、可穿戴电子及软体机器人等相结合时存在界面力学适配难题。硅橡胶等弹性体具有显著的变形能力，然而其较低的热导率限制了传热能力。尽管通过掺杂高导热微纳颗粒可提升弹性体热导率，但其硬化效应会严重削弱变形能力。本报告聚焦液态金属基弹性复合导热材料制备、传热特性及其应用，重点介绍液态金属-弹性体双相嵌套结构的高导热及高拉伸功能，由此形成的液压驱动调节的主动液冷技术，并讨论了基于柔性热电器件的人体热调节技术。

最终交流类型：口头报告

高质量石墨烯导热膜的制备与构效关系研究

张晴、任文才*

中国科学院金属研究所

石墨烯膜是由石墨烯纳米片堆叠构成的类石墨层状材料。理想的石墨烯二维晶体具有优异的平面热导率和电导率，已在电子信息、5G 通讯、热管理等领域展现了广阔的应用前景。然而，当石墨烯经堆叠组

装成宏观石墨烯膜时，膜材料中的片层间界面、晶格缺陷、晶界、杂原子掺杂、褶皱和气孔等，都会对载热声子的传递造成不同程度的散射并阻碍自由电子在结构中的移动，从而使宏观薄膜的性能受到抑制。根据文献报道，即使经过了高温石墨化处理，宏观石墨烯膜的性能与具有接近理想石墨结构的单晶石墨或高定向热解石墨相比也存在较大差距，例如，以氧化石墨烯、还原氧化石墨烯和石墨烯纳米片等作为前驱体经热处理制备得到的石墨烯膜，仍然存在结晶程度差、结构有序度低等不足，限制了其导电导热性能和进一步散热应用。因此，通过结构调控使石墨烯膜实现褶皱密度、致密度、有序度、结晶程度和堆垛方式的全面优化是现阶段实现石墨烯膜高性能应用的可行途径。目前，除了高质量石墨烯膜的可控制备问题尚未解决，其石墨化机制并不清晰，现有的结构表征方法仍有局限，作为导热膜的“构-效关系”也不明确，研究人员在该领域仍面临着巨大挑战。

炭材料的石墨化是指非石墨化碳在高温下经碳原子结构重排和结晶化转变成三维有序结构的过程。我们系统研究了石墨烯膜在不同温度下结晶结构和堆垛方式从无序到三维有序结晶态的演变过程，提出并解释了石墨烯层状膜在高温热处理过程中“缺陷促进碳原子重排”的重要作用。我们发现，以氧化石墨烯作为前驱体的层状薄膜，在高温热处理过程中首先在 1000-2000 °C 范围内发生面内结构修复和相邻片层间的融合，2000 °C-3000 °C 范围内层间结构由无序堆垛向 AB 堆垛转变，但石墨化转变效率有限，3000 °C 热处理后其层间和面内晶粒尺寸分别为 11.7 nm 和 2.7 μm ，石墨化度仅达到 68%。这是由于完美的石墨烯面内共轭结构提高了高温下碳原子的层间迁移势垒，从而增大了石墨化过程中碳原子迁移和结构重排的难度。我们通过在石墨烯晶格中引入氮掺杂来抑制石墨烯网络的面内晶格修复和微晶合并，随着氮原子在高温下的分解来保留空位、位错和晶界等缺陷结构，在高温下，碳原子的快速晶界扩散和层间迁移促进了石墨化进程，提高了石墨化效率。经过 3000 °C 石墨化处理后，制备得到了类似于高定向热解石墨的高定向高结晶石墨烯膜，其层间和面内晶粒尺寸分别达到 52.4nm 和 20.0 μm ，石墨化度达到 93%，其电导率和热导率分别达到了 $2 \times 10^4 \text{ S cm}^{-1}$ 和 $1700 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，与氧化石墨烯制备的石墨烯薄膜相比，分别提高了约 6 倍和 2 倍。该方法也为其他石墨材料(如石墨烯纤维、碳纳米管纤维、碳纤维、聚合物衍生石墨和高定向热解石墨)的高质量制备提供了普适性思路。

最终交流类型: 口头报告

Highly thermally conductive and flexible thermal interface materials with aligned graphene lamella frameworks

Kun Huang^{1,2}, Songfeng Pei^{1,2}, Hui-Ming Cheng^{1,2}, Wencai Ren^{*1,2}

1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences

2. University of Science and Technology of China

Thermal interface materials (TIMs) are indispensable for heat dissipation in modern electronic devices, which fill the space between the chips and heat sink to minimize the thermal resistance of heat transfer through the interfaces. To this end, TIMs are required not only high thermal conductivity but also good flexibility. The thermal conductivity of TIM is mainly determined by the network constructed by thermally conductive fillers in polymer matrix. Increasing the content of fillers can directly improve the thermal conductivity of TIM, but it is usually accompanied by a serious decline in flexibility. Therefore, how to achieve high thermal conductivity with a low filler fraction to keep good flexibility is essential for TIMs.

In this work, we fabricate a high-crystalline aligned graphene lamella framework (AGLF) with precisely controlled lamella thickness, pore structure and excellent inter-graphene contact by manipulating the thermal expansion behavior of scanning centrifugal casted graphene oxide films. The rational design of AGLF well balances the trade-off between thermal conductivity and flexibility of TIMs. The AGLF-TIM shows a record thermal conductivity of $196.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ with a graphene loading only 9.4 vol.%, which is about 4 times higher than those of reported TIMs at the similar graphene loading. Meanwhile, it remains good flexibility comparable to commercial TIMs. As a result, the use of AGLF-TIM achieves a temperature decrease of $\sim 8^\circ\text{C}$ for LED chips compared to high-performance commercial TIM.

This work not only offers a new strategy for the controlled fabrication of graphene macrostructures but also provides new insights into the use of graphene for thermal management.

最终交流类型：主题报告

氟化液在浸没液冷数据中心的应用及流场优化设计研究

郝京阳*

联想集团

氟化液是目前浸没液冷数据中心常用的冷却工质。本报告介绍了氟化液在浸没液冷数据中心的应用现状；例举了产品设计中遇到的工程化问题，在氟化液选型、服务器系统流场优化、散热器局部流场优化及强化换热等方向做出的研究，以及针对液体流场测量方法进行的创新性的探索和尝试；同时分享了联想在浸没液冷技术方向上的长期规划，对未来氟化液在浸没液冷数据中心的应用前景和应用方案进行了探讨和展望。

最终交流类型：主题报告

高性能新型热管理材料的研制和应用

吴永明*

中国科学院上海有机化学研究所

热管理材料是帮助产品提高散热效果的功能性材料，用于提高热传导效率，使得热量均匀分散，是消费电子、汽车电子、通信设备等领域不可或缺的材料。先进的热管理材料构成了热管理系统的物质基础，而热传导率则是所有热管理材料的核心技术指标。电子氟化液是一种功能性的化学品，它是一种分子中氟含量很高的液态化合物。它具有高介电强度、不易燃、无腐蚀性、低毒性、高热稳定性和化学稳定性和良好的材料兼容性等优点。作为高性能的新型热管理材料，已经广泛应用于数据中心服务器散热、锂离子电池储能系统的散热和被动式安全解决方案、尖端武器的高效散热系统……。

本文包括三个方面的内容：

- 一、 PFAS 概念介绍
- 二、 第一代热管理材料的研制及在数据中心应用
- 三、 第二代热管理材料的研制及应该研究

最终交流类型：邀请报告

液态金属热界面材料研究、应用及未来展望

邓中山*

中国科学院理化技术研究所

液态金属作为一种同时兼具流动性、高导热性、高体积相变潜热的材料，为先进热管理技术的发展带来了颠覆性变革。其中，利用液态金属的高导热性，并通过浸润性改性将其制作成高性能热界面材料，热阻显著低于现有硅脂基热界面材料，可用于降低发热芯片或器件与散热器之间的接触热阻。本报告主要介绍团队近年来面向芯片散热应用的液态金属热界面材料研究及应用，包括液态金属热界面材料、液态金属复合热界面材料、低熔点合金导热片等相关技术的提出、发展与应用，以及液态金属基热界面材料在 5G 及消费电子热管理领域的应用展望。

最终交流类型：邀请报告

节能高效固态热管理系统

马儒军*

南开大学

低能耗热管理技术既是未来高新技术发展的重要保障又符合我国“双碳”的战略目标。然而，传统的热管理系统通常耗电量大、不环保、体积大等。这里，为了降低能耗，我们开展了节能高效固态热管理系统研究，从低能耗的电卡效应到零能耗的辐射效应的热管理系统，再到自持续的可穿戴固态热管理系统。利用电卡效应制备的低能耗热管理系统，不仅具备环保、高效、小型化且结构简单，还可以对电子器件进行时空精准控温。利用辐射效应制备的零能耗热管理系统，不仅解决了传统辐射热管理系统在应对动态温度变化时的局限性，更实现了保温与制冷双模式的零能耗切换效果，显著提升了热管理系统的能效和灵活性。另外，通过光伏模块与电卡-静电力模块集成的自持续全天候可穿戴热管理衣物，从根本上解决了电卡效应热管理系统的供能难题，可根据人体制冷/加热需求实现了快速体温调节，并扩大了人体热舒适区范围。这种节能的固态热管理系统为我国“双碳”目标的顺利实现提供了理论和技术支撑。

最终交流类型：邀请报告

超高热导率的电沉积毛细芯热管

莫冬传*、吕树申

中山大学

近年来，电子器件的高度集成化带来了严峻的高热流密度散热问题，亟需超高热导率的材料将热量带走，保证设备的正常工作。常见的热管是一种以金属外壳-多孔材料组成的金属基复合材料，主要靠内部工质的气液相变过程进行换热，并靠毛细芯驱动液体回流维持工质的循环，具有非常高的当量热导率。但随着厚度的减小以及热流密度的增加，采用常规毛细芯的热管面临传热极限的瓶颈。为了进一步提高热管的传热能力，制备高性能的毛细芯成为关键。针对不同的应用场景，我们提出了多种不同的仿生结构毛细芯，并采用电化学沉积法进行可控制备，建立起制备机理、形貌特征及对应流动特性与传热性能的关系。典型的工作有：针对有限空间内散热的需求，制备了采用电沉积毛细芯的平板热管，其厚度仅为 0.23 mm，当量热导率达到了 $2.2 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。针对超大功率散热的需求，制备了超大功率平板热管，可将最大传热量提升 50%。针对应用面最广的普通圆管热管，将传统烧结毛细芯改为电沉积毛细芯后，可以将最大传热量提升 75%。这些工作显示，电沉积毛细芯是进一步实现超高热导率热管的重要途径。

最终交流类型：主题报告

通讯产品导热/散热材料应用及研究现状

张显明*

中兴通讯股份有限公司

新一代移动通信、AI、高性能计算等新型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高，散热面临日益严峻的挑战，急需在新材料、新技术上寻求突破。本次演讲将介绍通讯产品热管理中的导热散热材料，重点介绍金属材料 and 热界面材料的应用研究现状和技术挑战，并结合新材料工程化导入流程，阐述行业对导热散热材料落地应用的技术需求。

最终交流类型：主题报告

高导热聚合物材料的热管理设计与研究

刘志春*

华中科技大学能源学院

针对聚合物基体本征导热性能差、经典填料表面工程强化导热机制揭示难、导热材料性能标签数据缺乏等瓶颈问题，本团队从复合聚材料的基体、填料、界面与结构出发，结合理论与实验方法，聚焦于聚合物基导热材料的设计、制备、分析与预测等环节，对高导热聚合物材料类型、填料表面工程方法和导热预测模型进行了探索。首先，采用分子动力学与蒙特卡洛法，并结合遗传算法等优化算法，通过热阻网络模

型揭示了聚合物基体、导热填料以及填料网络结构对复合材料导热性能的影响机理，明确了高导热聚合物材料的设计策略；其次，开发一系列填料表面工程方法，实现了高定向聚合物块体材料 3D-1D-2D/3D 的多维度合成，有效提高了聚合物导热材料的性能；最后，为进一步提升导热理论模型泛化能力，提出了一种协同训练式半监督人工神经网络模型（Co-ANN），围绕导热性能进行预测建模，提高了模型的回归预测性能。上述研究工作可为高导热聚合物材料的设计和制备提供理论指导和实验基础，也为其进工业应用提供参考。

最终交流类型：邀请报告

界面氢键相互作用设计具有高粘附能和低界面热阻的软/硬界面

曾小亮*、曾祥亮

中国科学院深圳先进技术研究院

软/硬界面的粘附能力和界面热传递能力对于从电子封装、软电子到电池的各种应用至关重要。然而，由于这两种性质在软/硬界面上的冲突性质，很难同时获得。本报告介绍了节界面处的氢相互作用，聚氨酯/硅界面具有高粘附能（ 13535 J m^{-2} ）和低界面热阻（ $0.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ）。优异的界面粘结和低的界面热阻通过引入大豆油基环氧交联剂来实现的，该交联剂可以破坏聚氨酯网络中的氢键，同时可以促进聚氨酯/硅界面氢键的形成。本研究为提高软/硬界面的粘附能和降低界面热阻提供了全面的理解，为定制各种材料系统的界面性能提供了一个很有前途的前景。

最终交流类型：邀请报告

流固界面热整流与负微分热阻效应

王军*

北京工业大学

热整流效应和负微分热阻效应是实现热流调控的两个关键因素。热整流效应是指热流密度大小依赖于温度梯度或者热流方向的一种传热现象；热流密度随着温差增大而降低的现象称之为“负微分热阻效应”。本文基于分子动力学模拟方法，研究了纳米尺度受限空间内的流固界面传热特性，基于气体动理论方法和热流密度的微观理论计算并分析了流固界面传热机理。建立了基于纳米受限空间系统的流固界面热整流模型和负微分热阻模型，实现了流固界面传热的调控，并进一步揭示了纳米受限空间内流固界面热整流效应和负微分热阻效应的微观机理。

最终交流类型：邀请报告

碳纳米管阵列热界面材料的制备、热测量及热性能调控

邱琳*

北京科技大学

垂直碳纳米管阵列与热沉之间的极大的界面热阻是阵列作为纳米热界面材料进行实际应用的主要障碍。围绕着碳纳米管阵列热界面材料与热沉之间界面传热的调控，依据阵列生命周期，提出基于制备工艺过程调控的热传递增强方法。在碳纳米管阵列的制备阶段，我们通过精细调节碳源及载气流量、时间、生长温度、催化剂含量及升华温度等参数，最大限度地提升碳纳米管阵列的高度均匀性及直径，获得形貌最佳的碳管阵列，热导率可高达 $170 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。在碳纳米管阵列的应用阶段，利用施加涂层、机械剪压等方式使接触面积进一步提升：基于等离子体增强化学气相沉积方法获得了顶部涂敷 DLC/TiN 涂层的垂直碳纳米管阵列，与不含涂层的阵列相比，其与热沉的界面热阻降低了 50 倍（ $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 降至 $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）；采用机械剪压将垂直碳纳米管阵列转变为水平碳纳米管阵列，其与热沉的接触热阻降低了 23 倍（ $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 降至 $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）。上述研究结果弥补了碳管阵列热界面材料的制备工艺过程调控规律的缺失，为未来将其应用于芯片热管理提供了理论和技术支撑。

最终交流类型：邀请报告

微纳尺度声子导热与器件热管理

赵云山*

南京师范大学

随着当前微电子器件尺寸的缩小，过多的热量会在局部产生并集中，从而影响器件的性能和寿命，纳米尺度内进行热量管控显得尤其重要。对于低维材料，有理论计算和实验验证存在反常热传导，其声子扩散的物理机理值得深入研究。本报告讨论低维体系特殊的声子热传导作用机制，通过对低维材料声子热传导的精准测量，探讨低维体系中声子热输运调控的缺陷工程、维度工程等实验策略，并分析其物理机制；探究在纳米尺度下不同材料之间界面热传输，以新型二维磁性材料为载体，探讨低维材料在近结点原位散热的热耗散，为微纳尺度有效热管理提供新思路 and 方向。

最终交流类型：口头报告

导热聚酰亚胺薄膜及复合材料的研究

阿布都合里力亚克甫*

石油化工研究院

由于聚酰亚胺薄膜具有优异的绝缘性能和出色的耐热性能，广泛应用于国防军工，航空航天，芯片制造，微电子，新能源等重要领域。其本征导热系数仅仅 0.1-0.2w/m.k 左右，难以满足现代电子设备的散热需求，所以合适的方法提高聚酰亚胺薄膜的导热性能具有非常重要的意义。本报告以聚酰亚胺薄膜以及复合材料的制备和分子模拟以及建立导热模型等三个方面介绍高导热型聚酰亚胺复合材料薄膜的研究。

最终交流类型：主题报告

微纳尺度界面热阻调控若干策略

徐象繁*

同济大学

高密度元器件在高速工作的过程中会产生大量热量，如果不能及时将热量疏导出去，就会导致元器件因局部温度过高(即通常所说的热点)而性能降低甚至被烧坏。如何将过多的热量传导出去,使得元器件在相对低温环境下稳定运行是现代半导体工业面临的普遍问题。所有的散热过程都要通过一个重要的步骤: 热量通过微电子器件之间的界面, 包括半导体-半导体界面, 半导体-金属界面等。这使得对界面热阻的研究变得至关重要。特便是在微纳米尺度下, 界面热阻往往决定了器件的整体热阻。以石墨烯、氮化硼为代表的二维材料为研究低维体系热传导及其相关界面热阻提供了一个绝佳的平台。我们系统地研究了二维过渡金属硫族化合物(MoS₂, MoSe₂, WSe₂ 等)与氧化硅衬底的接触热阻, 并提出一系列调控热阻的方法, 如表面粗糙度调控、声子-声子匹配调控、尺寸效应及开辟新的电子-声子耦合通道等。

最终交流类型：主题报告

相变热界面材料的研究进展

于伟*

上海第二工业大学

随着电子器件尺寸的不断缩小和功率密度的增加，散热问题成为制约器件性能和稳定性的关键因素。开发具有优异导热性能和低界面热阻的材料至关重要。温度升高时，相变材料逐渐发生相变，界面处由固固接触转变为固液接触，显著改善接触情况并降低接触热阻，在电子器件热管理领域有着广泛的应用前景。作者针对相变材料热导率低且相对较容易泄露等缺点做了一系列的工作，包括：（1）制备了形状稳定的 Al₂O₃/OBC/PA 复合相变热界面材料，发现当 Al₂O₃ 含量超过 60%时，体系的热导率显著增加，当温度由

37°C 增加到 41°C 时, 复合材料的接触热阻由 10~20K·cm²/W 降低到 1~2K·cm²/W; (2) 添加了少量的高热导率石墨烯作为填料制备了石墨烯水凝胶基相变复合热界面材料, 热导率由 0.3W/mK 提高到 1.23W/mK, 且表现出良好的柔性, 80°C 时, 当接触压力由 10psi 增加到 50Psi 时, 接触热阻由 20K·cm²/W 降低到 0.5K·cm²/W; (3) 制备了液态金属/PA/OBC 复合相变热界面材料, 热导率由 0.99W/mK 提高到 1.87W/mK, 60°C 和 40Psi 的情况下, 界面热阻降低到 0.024K·cm²/W; (4) 通过“开包”法制备了一种柔性的、形态稳定的、低界面热阻的石墨烯/丙烯酸聚合物泡沫微球/聚乙二醇(G/APM/PEG)相变热界面材料, 热导率提升了 230%, 65°C 和 40 Psi 下 G/APM/PEG 的接触热阻降低到为 0.5~0.9 K·cm²/W; (5) 通过层层堆叠的方式制备了氧化石墨烯/液态合金的相变复合材料, 跨平面导热系数提高到 1.35 W/mK, 接触热阻降低到 0.47K·cm²/W, 高温条件下, In-Bi 相变发生, 填补了粗糙界面之间的空隙, 促进了界面润湿, 从而提高了传热效率。此外, 由于表面张力的影响, 液态合金均匀地涂覆在氧化石墨烯表面, 为复合膜提供了坚固的机械性能, 并确保优异的抗泄漏性。

最终交流类型: 邀请报告

高导热砷化硼应用于电子器件热管理中的热输运性质调控研究

秦光照*

湖南大学

电子器件的高效散热需要高热导率衬底, 同时亟需针对界面热阻这一瓶颈问题进行优化设计。砷化硼作为具有仅次于金刚石的超高热导率材料, 在电子器件中具有重要的应用前景。我们采用机器学习势函数驱动的多尺度模拟仿真方法, 在系统研究砷化硼热输运性质的基础上, 进一步研究了其与常用半导体材料所构成异质结构中的热输运过程及底层机制, 并探索在电子器件工作时内部广泛存在的电场对热输运的调控规律, 相关研究结果为砷化硼在电子器件热设计与热管理中的重要应用奠定理论基础。

最终交流类型: 口头报告

石墨烯-纳米银复合散热互连材料制备及银电热力性能

杨冠南*

广东工业大学

随着第三代半导体功率芯片能量密度的不断提高, 芯片热管理及封装散热性能面临重大挑战。开发兼具高导热、高导电性的散热互连材料对功率芯片的应用具有重要意义。本研究研发了一种石墨烯-纳米银复合散热互连材料。利用氧化石墨烯与亚微米级银粉颗粒之间的静电相互作用, 实现了氧化石墨烯在银基体中的均匀分布。并研究了氧化石墨烯含量对氧化石墨烯/银复合接头剪切强度、导热系数和电阻率的影响。银复合浆料在 260°C、5 MPa 和还原气氛(5% H₂ / 95% Ar)条件下烧结 30 分钟。结果表明, 添加 0.2wt% 的氧化石墨烯纳米片后, 氧化石墨烯/银复合烧结接头的剪切强度和导热系数分别达到 71.9 MPa 和 388.5 W/(m·K), 比纯银接头分别提高了 57.0%和 68.3%。电阻率测试结果表明, 添加 0.2 wt.%的氧化石墨烯银/复合烧结接头的电阻率仅为 1.9 μΩ·cm, 比纯银烧结接头降低了 45.0%。所开发的氧化石墨烯/银复合材料具备优异性能, 作为下一代高温功率器件的散热互连材料具有巨大潜力。

最终交流类型: 口头报告

用于人体热管理的柔性热电材料及其器件

吴波*

Hong Kong Centre for Cerebro-Cardiovascular Health Engineering

皮肤是人体面向外界环境的多功能窗口, 它不仅是人体抵御有害物质的保护屏障, 也是感知和与周围环境互动的生物传感器。尽管皮肤非常重要, 但其自我调节能力有限, 尤其是体温调节能力, 在高温和消防安全等不断变化和苛刻的场景中可能会出现问题。个人热管理器件集成环境感知、温度调节和能量捕获

等功能，可以有效帮助人体应对极端的外部环境。在所有热管理解决方案的替代方案中，可穿戴热电器件因其可靠的温度感知和双向热电转换能力，已经被认为具备优异的人体热管理能力。在我们的工作中，系统地研究了基于纤维、薄膜等形态材料构筑柔性热电器件的基本策略，并探究其在人体温度感知、热能捕获以及通电制冷中的应用（Adv. Funct. Mater. 2024, 2402319; Chem. Eng. J. 2023, 453, 139749; J. Alloys Compd. 2023, 945, 169260; Nano Energy. 2021, 89, 106487; Adv. Funct. Mater. 2019, 29, 1900304）。此外，我们进一步将柔性热电器件与其他能源器件（光伏、电致变色）结合，探索热电材料及其器件更广泛的应用前景。

最终交流类型：主题报告

Nonlocal Thermal Metasurface

Cheng-long Zhou, Xin-Yu Jia, Hong-liang Yi*

School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

* Corresponding author, E-mail: yihongliang@hit.edu.cn

Nonlocal metasurfaces, by harnessing the nonlocality, have shown their unparalleled capacities for the efficiency of wave-front manipulation. Here, we demonstrate that nonlocality also can be served as a powerful tool to achieve a substantial enhancement in radiative energy transfer, showcased by a dislocated nanowire-array. In the deep near-field region, this nonlocal metasurface achieves nearly 200% enhancement of radiative heat transfer through a nonlinear perturbation. The reason for this unique enhancement is that the nonlocal nature of the structure effectively modifies the thermophoton tunneling wavevector distribution, creating a nonlocal thermophoton tunneling mode, which in turn effectively enhances the energy spectrum of this thermal metasurface. Our finding opens up new perspectives for the study of nonlocal metasurfaces and provides an efficient approach to manipulating thermal flux in a nonlocal manner.

最终交流类型：邀请报告

硅纳米线挠曲传热的理论研究

岳圣瀛*

西安交通大学航天航空学院

硅纳米线是一种典型的纳米结构，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，如声子弹道输运、声子水动力学等特殊现象。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传输的传统理论模型，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。

最终交流类型：邀请报告

基于飞秒光谱的声子动力学研究

郭亮*

南方科技大学机械与能源工程系

声子是晶格振动能量的量子，是晶体中重要的载能粒子，在能量输运与转化中扮演着重要的角色，影

响着电子器件的散热、光伏转化效率、电致发光光谱等应用中关注的物理过程。报告将介绍光与不同声子模式的作用机制，飞秒光谱的实验原理，飞秒光谱实验中相干声子的产生机理，以及基于飞秒光谱的声学声子和光学声子动力学的研究方法，并介绍基于相干声子动力学检测的电-声耦合表征方法。最后，报告将展望飞秒光谱在声子动力学研究方面的潜在改进方案。

最终交流类型：口头报告

PEDOT:PSS 基多元复合薄膜的热电性能研究

赵焯、许婧婧、赤骋、陈林*

华北电力大学

热电材料利用塞贝克效应，能够实现热能到电能的直接转换，对于废热回收和缓解能源紧张问题具有重要的价值。PEDOT:PSS 作为典型的热电材料，以其出色的成膜性、高透明性和良好的溶液加工性能而受到关注。然而，其总体热电性能尚显不足，主要因为其关键性能参数——塞贝克系数和电导率之间存在相互耦合制约的关系，这使得同时提高这两个参数变得极为困难。为了解决这一问题，本研究通过物理掺杂 MXene 来提高电导率，并采用 KI 化学掺杂来中和 PEDOT 链上的正电荷以降低载流子浓度，从而在提升电导率的同时，也获得了较高的塞贝克系数，实现了 PEDOT:PSS 热电性能的综合提升。在所研发的材料中，PM10K6 的塞贝克系数达到了 $26.78 \mu\text{V/K}$ ，电导率达到了 190.06 S/cm ，相较于纯 PEDOT:PSS 分别提升了 103.65% 和 486.33 倍，其功率因数达到了 $13.6 \mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ，提升了三个数量级。本文提出的这种物理与化学手段相结合的方法，成功实现了电导率和塞贝克系数的解耦，为复合热电材料性能的进一步提升开辟了新的路径。

最终交流类型：口头报告

气凝胶纳米隔热材料研发及多功能应用

吴晓栋*

南京工业大学

气凝胶材料是一种由纳米粒子或聚合物分子链组成的三维轻质多孔材料，具有低密度、低热导率、高孔隙率、高比表面积、低折射率和低介电常数等一系列优异性能，保持了 14 项吉尼斯世界纪录，在航空航天、石油化工、光电催化、环境治理、节能建筑、储能转化等领域具有广泛的应用价值。本报告主要针对气凝胶作为典型的热管理材料，重点阐述了气凝胶材料在石油化工、新能源电池隔热片、国防军工和建筑保温等领域的应用。在此基础上，进一步阐述了南京工业大学气凝胶团队在气凝胶热管理方向的最新研发成果，同时基于气凝胶的高孔隙率、高比表面积、高电导率等特征，简单讲述了气凝胶材料在吸附、催化、传感器和光谱调控等领域的多功能应用。

最终交流类型：主题报告

被动式热管理相变材料热物性分子动力学模拟

饶中浩*

河北工业大学

被动式热管理相变材料导热系数、相变潜热、热机械性能等热物性影响着其服役性能，通过分子尺度模拟建立其热物性和分子结构的构效关系，对于揭示热管理材料热物性的调控机理，指导其制备工艺优化具有重要意义。本研究采用分子动力学方法构建了相变材料微观分子动力学模型，研究了服役温度、压力等因素对其导热性能、热机械性能等热物性的影响规律，揭示了胶囊封装、高导热填料、交联结构、高分子有序度等因素对相变储热材料导热性能等热物性的调控机理。

最终交流类型：主题报告

基于二维异质材料的高效整流器件制备及其性能表征

王海东*

清华大学

近年来, 半导体纳米异质材料因其丰富多样的原子界面结构, 表现出优异的光、电调控特性, 成为材料科学研究的热点方向。已有工作证明, 通过构造不对称的面向纳米异质结, 控制界面两侧的材料极性, 能够对电子输运进行高效控制, 但对于纳米异质材料中热量(声子)的调控研究还非常局限, 仅有少量理论计算工作报道。本次报告将介绍二维纳米异质材料中声子调控的最新研究成果, 利用选择性化学气相沉积方法制备了单层二硒化钼/二硒化钨异质结, 之后使用高精度电子束曝光和定向干法刻蚀工艺, 制作了包含两个独立金属纳米电极的悬空半导体整流器件, 可以实现不同方向热流/电流的同步测量, 避免了衬底漏热的影响。结果显示二维异质界面对电子和声子具有同步整流效果, 从二硒化钼到二硒化钨方向, 异质器件的电导率和热导率都会显著增强, 体现出纳米异质界面对载流子的特殊选择透过性。更进一步, 实验发现纳米异质器件在电流导通条件下, 热导率会明显降低, 分子动力学计算结果证明电子-声子耦合作用是影响热导率的主要原因。实验结果证明纳米异质结构对载流子具有显著调控作用, 为后续开发高效纳米热功能器件奠定了基础。

最终交流类型: 邀请报告

有机功能材料及其复合结构热输运机理与调控研究

王鑫煜*

山东大学

随着电子皮肤、可穿戴设备等柔性电子领域不断取得革新性突破, 柔性有机器件已成为“十四五”规划重点瞄准的战略性技术领域。然而器件高度集成化发展导致器件焦耳热效应愈益显著, 且柔性有机器件的核心功能层——有机功能材料层具有本征温度敏感性, 温度升高时易出现性能退化, 甚至“热失效”等问题, 这使得柔性有机器件高效热管理成为制约器件设计开发的核心瓶颈之一。本研究立足于有机功能材料及其复合结构高效热输运, 首先开展了高质量有机功能薄膜制备研究, 建立了可反映有机半导并五苯薄膜原位动态演变过程的普适性模型, 通过引入自组装单分子层(SAM)调控基底表面自由能分布, 实现了并五苯分子由三维岛状生长模式至逐层生长模式的转变。此外进一步利用理论结合 $3-\omega$ 实验方法, 深入揭示了有机功能材料 DNTT 链构象、链取向、链耦合程度等因素对其载热粒子输运行为的影响机制, 发现苯基侧链与主链构象相似、取向一致会导致主链与侧链之间产生更强的振动耦合, 从而强化载热粒子输运能力使材料的热导率提升了 15.8%。针对器件中有机功能材料和金属功能层界面热输运较差, 创新性发展了通过调控范德华作用区延展深度以及弱相互作用强度进而改善复合结构载热粒子输运行为的新方法, 明晰了 SAM 在界面热输运中发挥着“声子桥”和“鳍片”作用, 有效突破了界面传热壁垒, 使有机功能材料和金属电极界面热导提升了 11 倍; 并进一步建立了有机功能材料金属纳米颗粒复合物热输运调控手段, 通过在金属颗粒范德华作用区引入 $\pi-\pi$ 堆叠作用使得材料的热导率进一步提升了 92.2%。围绕柔性有机器件外部高效热管理, 研究揭示了材料原子组分以及化学键振动频率与光电、光声以及光热耦合物理关联, 利用结构基元序构方法调控电子带隙避免太阳光的吸收, 结合碳氟键弯曲振动激发红外光学声子模式强化“大气窗口”红外发射, 提出了具有高消光系数、高发射率的 P(VDF-TrFE)有机辐射冷却薄膜, 进而实现在太阳辐照高峰时段器件表面最高 11.4 °C 的温降。相关研究成果已为柔性有机器件产热-传热-散热全链条多层次协同热管理奠定了重要技术基础。

最终交流类型: 邀请报告

多孔晶体材料的热输运性质以及应用

周艳光*

香港科技大学

利用多孔晶体材料广泛应用于被动式制冷技术、清洁能源气体存储和空气集水等多个领域。其中决定其对应性能的关键因素之一是其热物理性能：包括多孔晶体材料的本征热物理性质、多孔晶体材料与基体或者存储罐直接的界面热输运性质、存储或者吸附气体分子对其热物理性质的影响。本报告中，我将从三个方面介绍课题组在多孔晶体材料中热输运机理探索和潜在应用的尝试。具体包括量化表征多孔晶体材料中的热载子导热机理、多孔晶体材料与基体之间的界面导热调节和基于多孔晶体材料的被动式蒸发制冷涂层设计。

最终交流类型：口头报告

新型 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 气凝胶的制备与高温性能研究

司巧玲、唐桂华*

西安交通大学

航空航天、能源生产、汽车制造等领域不断发展，材料常常需要承受极端高温条件，对耐高温、轻质、高效隔热材料提出了迫切需求。氧化铝气凝胶由于具有低密度、高比表面积、耐高温和低热导等特性受到关注，但高温稳定性差（1000 °C以上）、复杂干燥过程、成本和效率等问题限制了其广泛应用。本文提出了一种新的简便路线，促进溶胶颗粒的快速凝胶，实现均相凝胶化，合成了花朵状团簇的、高热稳定性的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 气凝胶。采用基于瞬态平面法的 Hot Disk 热常数分析仪测试不同比例的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 气凝胶的等效热导率，并测试在不同热处理温度下（800 – 1600 °C）气凝胶的高温热稳定性。结果表明，由花朵状团簇组成的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 气凝胶材料具有轻质（0.13 g·cm⁻³）、低热导率（0.03 W·m⁻¹·K⁻¹）、和优异的高温热稳定性（1600 °C，30 min），拓展了气凝胶在高温领域的应用前景。本研究工作得到国家自然科学基金项目（No.52130604）的资助。

最终交流类型：主题报告

聚合物复合材料中棒状纳米颗粒转动与定向控制及热管理应用浅谈

董若宇*

北京航空航天大学

电子器件热管理对高导热聚合物复合材料的需求日益迫切，获得聚合物基材中以碳纳米管为代表的非球形纳米颗粒的转动定向控制是进一步提升复合系统热性能的重要途径。本文基于粗粒化分子动力学模拟，探索了聚合物熔体中棒状纳米颗粒的转动动力学行为，特别的，通过改变纳米棒直径引入三维横截面效应，首次系统计算了围绕棒状颗粒对称轴的转动扩散系数；通过改变高分子链长度，探讨了当高分子网络从非缠结到缠结区域转变时，纳米棒转动扩散系数与自身直径间标度关系的变化；进一步在平衡态模拟的基础上，施加线性剪切流场并研究了纳米棒在聚合物体系中的定向排布特征。本文相关工作可为热界面材料中高导热纳米颗粒的定向性控制和热导率提升提供新的理论支撑。

最终交流类型：邀请报告

基于机器学习的声子输运和热界面材料研究

郭瑞强*

山东高等技术研究院

近年来，机器学习在材料预测与设计方面大显身手，为材料热输运研究提供了新的高效手段。机器学习在材料输运研究中的应用主要包括两方面：一是开发机器学习势函数，用其计算材料热物性，揭示热输运机理；二是构建机器学习模型，用其预测材料热物性，优化设计热功能材料。本报告将介绍我们在这两方面的研究进展：一方面，我们开发了能够准确高效地预测复杂材料体系声子热输运的机器学习势函数；另一方面，我们构建了预测热界面材料导热性能的机器学习模型。

最终交流类型：邀请报告

基于热学超材料的全域热学隐身斗篷设计

侯泉文*

西北工业大学

热学超材料的发展为器件的热管理和能量控制提供了更多的可能性。基于超材料的热学隐身斗篷能够消除异质物体在均匀背景材料中产生的温度扰动，在器件的温度控制、温度精密测量、消除热应力等领域存在可能的应用。传统的热隐身斗篷往往只关注消除斗篷外部的温度扰动，不考虑斗篷及其包裹物体的温度分布情况。第二代热隐身斗篷在消除外部温度扰动的同时，可以实现对被包裹物体自身温度的调控，但是斗篷区域的温度分布并不被考虑。因此，如果通过红外成像等方式进行探测，仍然可以通过斗篷区域温度的异变，从而探测到异质物体的存在。本工作提出了两种设计全域热隐身斗篷的方案，其设计的热隐身斗篷，不仅能够消除物体在背景区域产生的温度扰动，还能将物体及斗篷区域的温度调整到与背景区域相匹配，从而实现整个区域的热隐身。在第一种方法中，我们采用变换热力学和散射相消结合的方法，通过增加斗篷的设计自由度来实现多区域温度的匹配设计。第二种方法，我们基于导热反问题，给出了全域隐身斗篷的参数分布。两种方法设计的斗篷均需要采用非均匀各向异性材料，其可以通过离散化复合材料的方式实现。通过数值仿真，我们验证了两种设计方法的有效性。

最终交流类型：邀请报告

热超构材料及其对称性

李鹰*

浙江大学

热超构材料揭示了扩散主导过程中的新奇物理，在热管理和热信息技术中有广阔的应用前景。对称性作为一类基本属性，在热扩散和热输运中所起的作用还有待探究。我们通过将移动媒质引入热超构材料当中，构造了动态基元及其序构，并深入探究了单动态基元、耦合动态基元、以及动态基元阵列系统的对称性及其破缺。我们理论预测并实验观测到了散射对称性（互易性）及其破缺导致的定向热输运，耦合对称性破缺导致的热扩散趋肤效应，宇称时间-对称性保护下的热场相位锁定以及对称性破缺后的热场振荡效应。相关工作作为揭示功能材料和人工结构的新机理、发展新型传热调控和热能应用技术提供了基础。

最终交流类型：口头报告

the metal-based microcapsules of $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al-Si@Al}_2\text{O}_3$ filled epoxy resin composites as high performance thermal interface materials

Qingzhu Jiang*

Wuhan University of Science and Technology

With the development of modern electronic products towards miniaturization, high power density and high integration, heat accumulation has become a key issue affecting the performance and reliability of electronic products. The application of thermal interface materials is a common thermal management strategy. In this study, metallic microcapsules $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al-Si@Al}_2\text{O}_3$ as thermal conductive fillers were investigated by numerical simulation and experiment. Firstly, a physical model of thermal interface material (TIM) using epoxy resin as the matrix and spherical particles as the filler was established, and its effective thermal conductivity (ETC) was numerical calculated. The results showed that TIM exhibit ETCs of $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al-Si@Al}_2\text{O}_3$ are $1.43 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and $1.425 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ at the filler volume fraction of 43%, the ETCs of TIM with two different fillers had little difference, which is because the thermal conductive filler did not form a thermal conductivity path, the ETC of TIM was determined by the matrix. When the filler volume fraction of 58.89%, the fillers are in close contact with each other to form a thermal conductivity path. The ETCs of TIM for two different fillers (Al@

Al_2O_3 and $\text{Al-Si@Al}_2\text{O}_3$) are $11.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and $10.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectively. Based on this result, TIM composites were prepared by adding the filler volume fraction of 43% for $\text{Al@Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al-Si@Al}_2\text{O}_3$ into epoxy resin, and their ETCs and breakdown voltage were tested. Their ETCs are $1.35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and $1.33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, respectively. The errors with the simulation results are 5.6% and 7%, respectively, and the error range is less than 10%. The simulation results were consistent with the experimental results. Meanwhile, their breakdown voltage reached 3 kV, higher than the breakdown voltage of epoxy resin (2.5 kV). This study showed that metal-based microcapsules have great potential in the application of thermal interface materials in advanced electronic packaging technologies.

最终交流类型：口头报告

机器学习在热管理材料中的应用

宋晓涵*

山东高等技术研究院

近年来，机器学习技术的发展为热管理材料的设计和优化提供了新的思路和方法。通过利用机器学习算法对大量的材料数据进行分析 and 预测，能够快速筛选出具有优异热导率的材料，从而加速材料研发的过程。机器学习还能够帮助理解材料的结构-性能关系，揭示材料的潜在机制，并指导后续的材料设计和优化工作。我们利用机器学习方法成功预测了单填料聚合物复合材料的热导率，分析了体积分数、基体和填料热导率等因素对复合材料热导率的影响。此外，界面热阻在微纳器件的热管理中起着至关重要的作用，我们构建了可以有效预测界面热阻的机器学习模型，并且定义了新的描述符对应于声速的匹配程度，增强了机器学习模型的可解释性，可加速热管理材料的设计和优化。

最终交流类型：口头报告

氧化硅薄膜在日间阳光直射下的辐射冷却性能研究

杨昊崑^{*1}、张梓晗^{1,2}

1. 中国工程物理研究院材料研究所

2. 东华理工大学

辐射冷却技术利用大气透明窗口 ($8\text{-}13 \mu\text{m}$) 反射阳光并将热量从地球辐射至外太空中，选择针对太阳光具有高反射率和红外光高发射率的辐射制冷材料尤为关键。氧化硅材料作为一种具有足够高的可见光透过率以及优异的红外光发射率的材料，具有重大的研究与经济价值。本文通过等离子体增强化学气相沉积技术，成功制备具有反蛋白石光子晶体结构的氧化硅薄膜，可用于高效的日间被动辐射冷却。结果显示该薄膜在标准太阳光下具有约 94 W/m^2 的制冷效率，与环境空气温度相比温差约为 8.4 K，展现了优异的热管理性能，在未来建筑设计、热电器件等领域具有优异的前景。

最终交流类型：口头报告

低热阻红外辐射制冷涂料制备及其性能研究

曹志林、冯劲松、王晗、张迅、王如志*

北京工业大学

红外辐射制冷是一种利用热辐射实现降温的被动冷却技术，该技术通过反射阳光并提高大气窗口内的红外发射率来将热量释放到太空，而不需任何能源消耗。然而，传统的辐射制冷涂层往往会导致表面热阻的增加。此外，对于会产生巨大热量且温度高于环境温度的户外电子设备（如空调外机、通信基站等），过高的热阻会导致热量的聚积，进而降低设备的性能和使用寿命。本工作采用具有高热导率的二维介质氮化硼纳米片(BNNS)构建导热通道，并引入聚合物中制备了低热阻红外辐射制冷涂料。性能测试表明，在实现高太阳反射率(>0.95)和热红外发射率(>0.90)的同时，同时具有低的热阻值。将该涂层应用于室外器件，

测试表明, 其具有十分优异的散热性能。由于该涂料能容易地喷涂在金属或其他基材表面, 兼顾了便捷性和耐用性, 将在电子器件散热等领域具有广阔的应用前景。

最终交流类型: 仅发表全文

相变微胶囊悬浮液 (MEPCMS) 在矩形小通道内对流换热分析

闵雪、金涛、郑子锋、关欣*

上海理工大学

电子器件在工作时会因为内部热量无法及时排出而使其工作效率降低。本文建立了矩形小通道的三维模型, 提出了使用相变微胶囊悬浮液(MEPCMS)作为流动工质进行散热的方法。分析了 MEPCMS 强化换热机理, 发现将 MEPCMS 看作两相流来进行模拟更契合实际, 利用 CFD-DPM 模型数值模拟了 MEPCMS 在矩形通道内的对流换热过程, 分析流速(u), 质量浓度(cm) 和斯蒂芬数(Ste)对换热的影响。为了更有效的利用 MEPCMS 的相变潜热, 提出了相变长度因子 LX , LX 接近 1 时能够保证 MEPCMS 在流出流道时能够保证完全相变, 并拟合出这一关系式。

最终交流类型: 仅发表论文

多功能流体对太阳能光伏板均温性的研究

沈耀天¹、杨曼莹¹、关欣*¹、韩雷涛²

1. 上海理工大学

2. 国家中低温太阳能光热利用产品质量检验检测中心 (浙江)

多功能流体由 CuO /水纳米流体和相变微胶囊按 21:4 比例混合而成, 本文研究了其在提升太阳能光伏热 (PV/T) 系统冷却效率和均温性方面的应用。通过增强热传导和热存储能力, 优化光伏板的温度分布, 从而提高系统的热电转换效率和稳定性。本文采用实验与仿真相结合的方法。测试了水冷 PV/T 系统在不同太阳辐射强度和流量条件下的性能; 同时, 建立了 PV/T 系统的物理和数学模型, 与实验进行了对比。在此基础上, 进一步探索了不同条件下多功能流体对 PV/T 系统性能的影响。结果表明, 多功能流体在冷却和均温效果方面均优于水。当使用多功能流体作为工作流体时, 相同进口流量下, 随着太阳辐射强度的增加, 光伏板平均温度和温差增加得更为缓慢。在质量流量为 0.02kg/s , 太阳辐射强度为 1000W/m^2 时, 与水相比, 多功能流体使光伏板温度下降了 5°C , 均温性提高了 45.1%。

最终交流类型: 仅发表论文

铜水型均热板传热性能失效机理实验研究

郭小军、李勇*、田跃、高昂

华南理工大学

传热性能是均热板品质好坏的主要评价指标, 对铜水型均热板传热性能失效机理进行探究, 本文设计制造了一定量特定尺寸规格的均热板, 并搭建了传热性能测试装置, 对成型后均热板传热性能进行初测, 随后将其置于 150°C 恒温试验箱中进行老化, 每隔 48 小时将均热板取出对其传热性能进行复测, 以热源温度退化超过 2°C 为阈值进行失效判定。针对失效均热板, 基于失效分析流程, 由表及里对正常和失效均热板进行取样检测分析, 主要包括: 平面度检测, 泄漏检测、X-ray 内部结构破坏性检测, 刨切取样后内部微观结构 SEM-EDS 检测及 XPS 检测, 结果表明: 较正常均热板相比, 失效均热板表面平面度变化较小, 密封完整无泄漏且内部结构完好无破坏, 不同倍数下, 正常均热板吸液芯表层干净整洁, 铜含量约为 99% 以上, 失效均热板吸液芯表层布满大量析出物, 析出位置铜含量约为 95.2%, 氧含量约为 4.8%, XPS 检测表明析出物为铜、氧化亚铜、氧化铜的混合物, 综合分析可以断定均热板传热性能失效本质是其内部吸液芯物质改变所致, 具体讲是吸液芯由铜变成了铜、氧化亚铜、氧化铜的混合物。进一步对铜发生氧化的基本历程、氧足迹及铜、氧化亚铜、氧化铜对均热板传热性能的影响机制进行探究, 结果表明: (1) 有氧作

用下，铜发生氧化一般需经过如下历程：①氧原子吸附②疏松氧化膜形成③铜离子向外迁移④氧化膜增厚四个过程，最终形成铜、氧化亚铜及氧化铜的混合物。（2）氧是吸液芯物质改变的本质，对氧足迹进行跟踪，确定一除二除工艺是氧的主要来源，为提升均热板寿命及性能，后续可通过降低工质含氧量及改进一二除工艺来实现。（3）毛细压力下降是均热板传热性能失效的本质。具体讲，当吸液芯物质由铜变成铜、氧化亚铜、氧化铜的混合物时，铜与水的接触角为 75 度，氧化亚铜与水的接触角为 135 度，氧化铜与水的接触角为 166 度，吸液芯由亲水性变成了疏水性。进一步结合毛细压力计算公式可知，当工质表面张力、吸液芯有效毛细半径近乎不变，吸液芯物质由铜变成铜、氧化亚铜、氧化铜的混合物时，吸液芯毛细压力由正值变为负值，工质回流速度逐渐减慢，因此导致均热板传热性能逐渐变差直至失效。

最终交流类型：仅发表论文

不同平面丝网均热板吸液芯结构传热性能分析

田跃、李勇*、郭小军、高昂

华南理工大学

通过建立热阻网络模型，明确了蒸发端热阻为均热板总热阻的主要影响因素。研究了不同目数的平面丝网对均热板传热性能影响规律，通过不同的目数平面丝网形成径向孔隙变化的蒸发端吸液芯复合结构，阐明了均热板蒸发端吸液芯径向孔隙变化对内部工质相变过程的影响机制。总结了均热板径向吸液芯结构设计准则，即：在径向上形成孔隙梯度，蒸发端底层孔隙小，毛细力大；蒸发端顶层孔隙大，毛细力小。小孔隙吸液芯结构提供大毛细力，促进液态工质回流；大孔隙吸液芯结构提供高渗透率，增加毛细极限，提升均热板极限功率。按照本设计准则设计的底层 2*200 目铜网，顶层 2*100 目的 V 型均热板，热阻仅为 0.07 K/W。