



热智能材料及其在空间热控中的应用

曹炳阳 张梓彤

Thermal smart materials and their applications in space thermal control system

Cao Bing-Yang Zhang Zi-Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 014401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211889

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211889>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

专题: 纳米工程和热物理

热智能材料及其在空间热控中的应用*

曹炳阳[†] 张梓彤

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

(2021 年 10 月 11 日收到; 2021 年 11 月 29 日收到修改稿)

空间技术等高新领域对智能高效的热控制技术的需求日益提高, 而实现智能热控制技术的关键是要实现材料的热物性智能调控, 于是热导率可响应外场变化的热智能材料成为了研究的焦点. 本文梳理了热智能材料的最新研究进展, 从调控机理、调控幅度、应用价值等角度出发, 介绍了纳米颗粒悬浮液、相变材料、软物质材料、受电化学调控的层状材料和受特定外场调控的材料等不同种类热智能材料的研究现状, 以及以热智能材料为基础的智能热控部件在空间技术等领域的应用. 最后, 本文对热智能材料未来的研究方向进行了探讨.

关键词: 热智能材料, 热导率, 空间热控, 智能调控**PACS:** 44.10.+i, 44.90.+c**DOI:** 10.7498/aps.71.20211889

近年来, 随着科学技术的迅速发展, 航天航空、电子通讯、能源动力等领域对热控技术的要求日益提高^[1-3]. 国内外航天科技发展很快, 外太空存在极端的高低温、剧烈的温度波动等恶劣热环境, 这对航天器的热控技术提出了很高要求. 具体来讲, 外空间探测载荷的增加, 要求热控部件的质量尽量降低; 卫星设计寿命延长, 要求热控部件的能耗减小; 轨道类型差异大, 载荷设备精密度提高, 工作模式复杂, 要求热控系统能够适应复杂的空间外热流变化, 对精度和响应速度的要求提高. 目前主流的热控技术分为被动热控技术和主动热控技术^[4]. 被动热控技术发展较为成熟, 通常使用热控涂层、多层绝热部件和其他热控材料, 通过优化系统器件的布局 and 结构来改变、优化工作系统与环境间的热量交换. 但是, 被动热控制技术是一种开环控制技术, 在控制过程中控制系统得不到被控对象的温度反馈, 无法实时响应环境的温度变化, 可控性较低. 现有的主动热控制技术包括电加热器、百叶窗等, 多为单一的加热或者散热技术, 很难满足一些复杂的传热要求, 且能耗较高, 在寿命和响应

性方面仍然存在较大不足. 在空间技术领域, 对于温度敏感且环境温度波动大的载荷, 以及发热量大且工作温度范围要求严格的设备, 如通信终端、蓄电池等, 亟需更先进的热管理技术来满足其温度控制需求. 因此, 对能够实时响应外界环境变化、自主调节热流的热智能技术的需求非常紧迫, 而实现智能热控制技术的关键是要实现材料的热物性智能调控.

对于热学性质的调控, 智能材料热导率的主动和可逆调节是关键. 其热导率(k)需要能根据外部刺激做出响应, 在开(高)/关(低)状态之间切换, 或连续改变热导率的大小(图 1). 衡量热智能材料最关键的指标, 是其响应前后热导率的最大变化幅度(r): $r = k_{\text{on}}/k_{\text{off}}$. 近些年, 已有不少研究者研发了不同的材料, 通过不同的操纵机制实现了对材料热导率的可逆调节. 本文将在后面介绍不同类型热智能材料的响应机理、调控幅度以及优缺点, 并将不同响应机理总结在图 2 中; 之后, 总结热智能材料的应用, 并对热智能材料的现存问题以及未来发展方向进行分析与探讨.

* 国家自然科学基金(批准号: 51825601, U20A20301)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: caoby@tsinghua.edu.cn

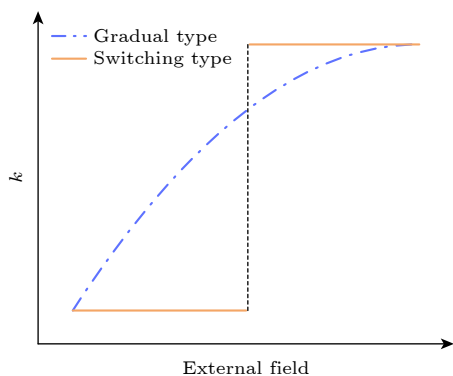


图 1 开关式及连续调节式热智能材料示意图

Fig. 1. Schematic of switching and gradual thermal smart materials.

纳米颗粒悬浮液: 低维纳米颗粒拥有卓越的热性能^[5,6], 如碳纳米管、石墨烯的热导率超过了 $1000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. 研究者将高导热纳米颗粒添加到传统换热工质 (如水、有机溶剂等) 中制备得到纳米颗粒悬浮液, 希望提高其导热性能. 但大量实验结果显示, 单纯的添加纳米颗粒对流体基质的热导率提升幅度有限^[7,8], 原因之一是低维纳米颗粒的性能具有各向异性, 其高导热性能需沿某一方向定向排列才能得到体现, 而纳米颗粒与流体基质间的界面热阻限制了系统热导率的提升^[9]. 无外场时, 纳米颗粒在流体中做布朗随机运动, 随机分散在基质中. 布朗运动实质是颗粒在液体中的扩散行为, 包

括平动扩散与旋转扩散, 纳米颗粒的旋转扩散与其定向行为直接相关. 本研究小组^[10–12]发展了计算纳米颗粒的扩散系数及扩散张量的方法, 验证了旋转扩散系数与颗粒定向性之间的关系, 模拟证明了电场下低维纳米颗粒会在溶液中转动并首尾相接形成链状结构, 形成有效导热网络 (图 2(a)). 此时, 热量的传输主要通过颗粒形成的网络进行, 热导率得到有效提升, 达到“热渗流”的效果^[9]. 在电场作用下, 低维纳米颗粒极化形成偶极子, 两个极化后的低维纳米颗粒受到库仑力作用而相互吸引, 形成链状结构. 在此基础上, 本研究小组^[13]利用石墨烯片状纳米颗粒作为悬浮颗粒, 利用电场作为外场调节, 实现了 $r = 1.4$ 的调节幅度, 其响应时间在毫秒量级. Philip 等^[14–16]利用 Fe_3O_4 铁磁性纳米颗粒作为悬浮颗粒, 磁场作为外场, 进行了一系列的实验研究, 他们发现, Fe_3O_4 铁磁颗粒-煤油系统在 $B = 101 \text{ G}$ 时, 调节幅度最高可达到 $r = 2.16$, 并根据颗粒的扩散弛豫时间计算系统的响应时间约为微秒量级. 同时, 也有研究者利用高热导率的碳纳米颗粒, 如石墨烯等来替代铁磁性颗粒. Sun 等^[17]利用石墨烯纳米片作为悬浮颗粒, 磁场作为外场, 在 $B = 425 \text{ G}$ 实现了 $r = 3.25$ 的调节幅度. 使用纳米颗粒悬浮液作为热智能材料, 响应速度快, 在毫秒量级, 能耗小, 并且可以连续调节热导率的变化.

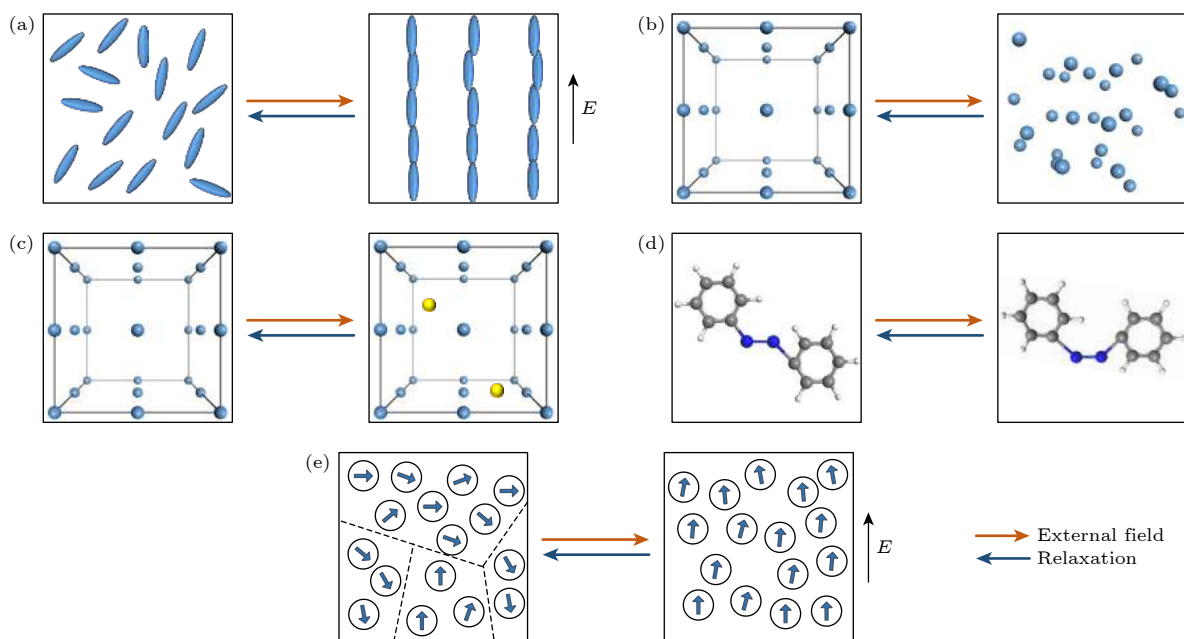


图 2 不同热智能材料响应机理示意图 (a) 纳米颗粒悬浮液; (b) 相变材料; (c) 层状材料; (d) 软物质材料; (e) 受电磁场调控的材料

Fig. 2. Schematic of physical mechanisms of thermal smart materials: (a) Nanoparticle suspensions; (b) phase change materials; (c) layered materials; (d) soft materials; (e) materials tuned by electric and magnetic field.

相变材料: 相变材料在相变温度处会发生相态变化, 使得自身的物质结构发生转变, 如图 2(b) 所示, 热导率也发生改变. 当温度回到原区间时, 其结构和热导率也会恢复原样, 从而实现了开关型热调控的效果. 按照相变形式, 相变材料可分为固-液、固-固、固-气、液-气四类^[18]. 由于固-气和液-气相变材料相变前后体积差异较大, 所以广泛研究与应用的主要是固-固与固-液两类相变材料. 固-固相变材料包含多种类型, 如金属-绝缘相变材料、相变存储材料、磁结构相变材料等, 由于转换前后均为固相, 材料性质稳定, 所以具有广泛的应用前景. 金属-绝缘体转变会大幅度地改变材料的电导率, 如 VO_2 在相变点 $T = 340 \text{ K}$ 附近电导率的变化可达到 10^5 量级. 考虑 Wiedemann-Franz (WF) 定律, 研究者希望 VO_2 的热导率也能在相变点处发生较大变化. 尽管 VO_2 体材料在相变点处热导率几乎没有变化^[19], 但 Kizuka 等^[20] 研究发现, 多晶 VO_2 纳米薄膜在相变点处面向热导率的变化幅度可达到 $r = 1.6$. 此外, Lee 等^[21] 发现, 在 VO_2 薄膜中掺杂少量的钨, 热导率可实现 $r = 1.5$ 的调控幅度. 相变存储材料主要由硫属化合物制备, 多为 GeSbTe (GST) 系合金, 可以在室温临界点下在不同相态间切换^[22,23]. 低温下, GST 为无定型相, 声子振动模式间的耦合为热传导做出了绝大部分贡献^[24], 热导率低; 随温度升高, GST 发生相转变, 变为六方相, 电子对导热的贡献增加, 热导率也得到提高, 由此可以实现 $r = 2$ 的调控幅度. 此外, 还有一些其它固-固相变材料, 如 Huesler 合金^[25,26], 作为磁结构相变材料, 在 $T = 300 \text{ K}$ 时可实现 $r = 1.6$ 的调控幅度. 固-液相变材料以液态基质中掺杂高导热固体颗粒的复合材料为主, 当液态基质在相变点凝固为针状晶体后, 内含的固体颗粒会沿晶界排列, 搭接形成有效的导热通路, 在低温下提升系统的热导率. Zheng 等^[27] 最早选用石墨烯-十六烷复合材料, 在 $T = 291 \text{ K}$ 下, 实现了 $r = 3.2$ 的调控幅度, 且调控范围经多次循环后没有明显变化. 后续研究结果表明, 将石墨烯片更换为其它低维碳材料, 基本都能取得类似的调节效果^[28–33]. 相变材料的响应速度与系统和环境的温差有关, 可通过调整外界制热/制冷功率来调整系统响应时间的快慢.

原子插层 (电化学调控): 对于具有层状结构的材料, 在其原子面之间插入新原子, 会改变材料的微观结构, 进而改变其热学性质. 通常将原子插入

层状材料的有序晶格中会导致其晶格产生缺陷, 如图 2(c) 所示, 使得声子散射增强, 材料热导率降低, 如锂离子的插入会导致石墨和 MoS_2 薄膜热导率的降低^[34–36]. 除利用静态插层技术改变材料热导率外, 目前通过电化学驱动, 使原子动态进出晶体结构的技术也得到了发展, 使层状材料的热导率可以进行可逆转换, 从而实现了智能调节的效果^[37]. Cho 等^[38] 发现, 对于电化学电池中的 LiCoO_2 薄膜电极, 在充放电循环中, LiCoO_2 进行了锂化与去锂化过程, 在 $\text{Li}_{1.0}\text{CoO}_2$ 与 $\text{Li}_{0.6}\text{CoO}_2$ 间转化, 热导率发生可逆变化, 调节幅度可达到 $r = 1.46$, 但系统响应时间缓慢, 一次充放电循环长达数小时. 类似地, 对于二维材料黑磷^[39], 锂离子的浓度也会在充放电过程中发生变化, 导致其面向热导率发生可逆转变, 调节幅度达到 $r = 1.6$. Lu 等^[40] 利用 SCO 材料, 通过改变其两端的电极方向使 SCO 材料发生氢化或氧化, 在 BM-SCO (钙钛矿相), P-SCO (闪锌矿相) 和 H-SCO (高掺杂钙钛矿相) 三种不同的相态间转变, 从而实现了最高 $r = 10$ 的调控幅度, 但其调节过程仍需要数十分钟来完成. 使用电化学手段调控材料的热导率, 最大的问题在于其响应时间, 由于离子出入晶体的过程相对缓慢, 其调节过程可能长达几分钟甚至几小时.

软物质材料: 软物质材料的物态介于固态和流体之间, 液晶、橡胶等材料均为软物质材料^[41]. 软物质材料可在外界微小的作用下, 产生结构或性能上的显著变化, 如聚合物基团的构象转变等 (图 2(d)). 这种外界作用可以是力、热、光、电磁及化学扰动等^[42]. 此特性使软物质材料具有成为热智能材料的潜力. Shin 等^[43] 发现, 光敏型偶氮苯聚合物在可见光和紫外光的照射激发下, 偶氮苯基团的构象会在顺式和反式之间变化, π - π 堆积几何结构改变, 热导率也产生较大变化, 可实现 $r = 2.7$ 的调控幅度, 响应时间在十秒量级. Li 等^[44] 以热敏型聚合物聚异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM) 的稀释水溶液作为研究体系, 发现在其相变点 $T = 305 \text{ K}$ 附近, PNIPAM 链构象发生变化, 热导率调节幅度可达到 $r = 1.15$, 由于其为二阶相变, 响应时间快, 在毫秒量级. 类似地, Shrestha 等^[45] 发现, 结晶化的聚乙烯纳米纤维在温度临界点 $T = 420 \text{ K}$ 处, 部分聚合物链发生分段旋转, 从高度有序的全反式构象转变为具有旋转无序性的高切式与反式构象的混合, 热导率发生变化, 平均调节幅度高达 $r = 8$.

Zhang 和 Luo^[46] 针对聚乙烯纳米纤维进行了分子动力学模拟研究, 在机理上证实了聚合物链的分段旋转会导致链结构的无序, 从而影响声子沿分子链的传输, 使热导率下降. Shin 等^[47] 发现列相液晶在磁场作用下, 通过液晶单体的光聚合作用, 形成了定向的液晶网络, 在 $B = 0.4$ T 时实现了 $r = 1.4$ 的调控幅度, 响应时间为数百秒. Tomko 等^[48] 考虑生物大分子材料, 设计了具有串联重复序列的蛋白质, 其链结构可在水合作用下发生变化, 使热导率的调控幅度达到 $r = 4$, 响应时间为百秒量级. Feng 等^[49] 在水凝胶系统中实现了智能热开关, 在室温下调控幅度达到 $r = 3.6$, 并分析了含水量和内部结构变化对调控效果的影响. 软物质材料可对多种外部刺激作出反应, 响应性好, 但是自身热导率偏低, 一定程度上降低了其高调控幅度的应用价值, 其响应时间的跨度很广, 可从毫秒量级到数十分钟.

受特定外场调控的材料: 部分铁电材料可通过电场控制实现热导率的可逆调节. 铁电材料中铁电畴密度会影响声子输运^[50], 进而改变材料的热导率. 无外场时, 大量的畴区具有不同的极化方向, 施加电场后, 偶极子会沿电场方向排列, 如图 2(e) 所示, 使铁电畴壁密度降低, 畴壁引起的声子散射降低, 材料的热导率提高. Ihlefeld 等^[51] 选用多晶锆钛酸铅 (PZT) 双层薄膜作为研究系统, 施加电场降低了薄膜中纳米级铁电畴壁的密度, 使薄膜热导率提高. 外加 $E = 475$ kV/cm 的电场, 可实现 $r = 1.11$ 的调节幅度, 其响应时间在亚秒量级. 外加电场还会使部分铁电材料产生铁电相变^[52], 从而改变材料的热导率. Kalaidjiev 等^[53] 发现, 硫酸三甘肽在 $E = 4.2$ kV/cm 的电场下, 热导率会提高, 可实现 $r = 1.2$ 的调控幅度. Deng 等^[54] 通过电场影响有机铁电材料聚偏氟乙烯 (PVDF) 原子结构, 从而对其热导率进行调控, 调控幅度可达 $r = 1.5$. 此外, Deng 等^[55] 通过模拟发现, 通过电场调控氢键同样可以实现对有机尼龙的热导率改变, 调控幅度可达 $r = 1.5$.

对于磁场, WF 定律在磁场的存在下仍然成立, 经典磁电阻模型预测磁场会降低金属或半导体的电导率, 并因此降低热导率, 但对于室温下的大多数金属而言, 这种效应可以忽略不计^[56]. 但在铋和铋合金中观察到了较为明显的磁电阻效应, 对于铋化铋合金, 室温下施加 $B = 0.75$ T 的磁场, 可实

现 $r = 1.2$ 的调控幅度^[57]. 除经典磁电阻效应外, 当纳米尺度的金属铁磁体被非磁金属薄层隔开时, 会产生巨磁电阻效应^[58]. 当无外场时, 磁极矩无序排列, 材料电阻率较高, 施加磁场后, 磁极矩沿磁场方向排列, 材料电阻率降低, 并带动热导率提高. Kimling 等^[59] 发现, Co/Cu 多层薄膜的法向热导率在 $B = 0.2$ T 的情况下可实现 $r = 2$ 的调控幅度, 面向热导率可实现 $r = 1.2$ 的调控幅度, 其响应时间在微秒量级.

在应力作用下, 材料会发生构型变化, 引发材料性质的改变. 利用应力来调控材料的电学、光学、力学等性能已经比较成熟^[60–62]. 模拟方面, Li 等^[63] 利用分子动力学方法研究了应变场对二维硅材料热导率的影响, 表明当硅纳米线由拉伸状态转为压缩状态时, 其热导率会不断提高, 这是由于模态化声子的群速度和单独声子支的比热在纳米线压缩过程中均发生下降造成的. Yang 等对应力对一维材料的热导率影响进行了系统性研究, 包括二硫化钼纳米管^[64]、一维范德华异质结构 (碳-氮化硼纳米套管)^[65]、环氧树脂原子链^[66,67] 等, 发现应力可以高效调控一维材料的热导率, 调控幅度最高可达到 $r = 30$. 实验方面, Yu 等^[68] 研发了一种液态金属泡沫弹性体复合材料, 当应变率达到 400% 时, 可实现 $r = 3.5$ 的调控幅度. Du 等^[69] 制备了一种可压缩的开孔石墨烯复合泡沫材料, 当压缩率为 80% 时, 可实现 $r = 8$ 的调控幅度, 其调控时间在十分钟量级.

目前以热智能材料为基础的智能热控器件在空间技术等领域已有一定应用. 如将热开关器件应用在固态制冷循环^[70,71] 和余热处理^[72] 中, 可以减少循环过程中的能耗. 更广泛的应用是在热控系统中维持设备工作的热环境稳定. Ventura 等^[73] 提出了一种以纳米颗粒悬浮液为基础的磁驱动热开关, 无外场时, 纳米颗粒悬浮液从热源处吸收热量, 施加磁场后, 纳米颗粒悬浮液将热量从热源传输到散热器并释放. Yang 等^[74] 基于声子折叠效应, 提出了一种纳米结构热滑动变阻器^[75], 通过对石墨烯进行折叠与展开, 可以实现石墨烯热导率的连续变化, 模拟证明其调控幅度最高可达 $r = 3$. Du 等^[69] 利用石墨烯复合泡沫材料, 设计了热导率可随压力连续调节变化的变热阻器, 能够在环境温度连续变化约 10 K 或发热功率变化 2.7 倍的条件下, 稳定发热设备的工作温度. 本研究小组^[76] 基于受

电场调节的纳米颗粒悬浮液热智能材料, 设计并制备了变热阻器, 在变热阻器内部填充纳米颗粒悬浮液, 在其外部加载不同强度的电场, 使得热阻可随加载电场的强度不同而连续变化. 目前该变热阻器已经被应用到卫星蓄电池的热管理中^[77], 当蓄电池单体的热耗变化时, 对应调整电场的开关以及电场强度, 可使热阻的变化与蓄电池热耗变化同步, 从而维持蓄电池工作温度的稳定. 该变热阻器可使加热器功率降低 15%, 温度均匀性改进 8%, 同时可降低散热面积的需求, 并具有无机械部件、重量轻、耗能低、响应快等优点.

热智能材料的研究虽历经数十年, 但从调控机理、材料种类、热调控性能和工程应用等方面来看, 目前都还处于探索起步阶段. 从复合型材料、固液相变材料、软物质材料到纯固态材料, 材料的选择范畴不断加大; 从电磁驱动、相转变到各类外场激发, 调控的机理越来越丰富; 从传统的热控系统、非线性热控部件到声子计算机, 应用的前景也更加广阔. 目前热智能材料的热导率调控幅度也逐渐提高, 已在实验条件下得到接近 $r = 10$ 的结果. 当前大部分研究还处在机理探索阶段, 未能进入工业化应用, 主要原因是热智能材料还存在一些问题尚待解决. 例如, 相变材料对温度临界点的要求往往很严苛, 许多材料的转变点远高于或低于室温, 限制了其应用范围; 软物质材料尽管对外场响应好, 调控范围大, 但自身基础热导率很低, 一定程度上降低了其高调控范围的应用价值; 使用电化学方法调控层状结构材料的热导率, 响应时间很长, 至少在分钟量级以上, 无法适应需要快速调节的情况. 此外, 目前研究的重点是材料热导率的调控幅度, 但其它性能指标, 如循环性、响应时间、经济性、与现有热控系统的兼容性等, 在实际应用中也都有着重要意义. 未来, 自身热学性能优越的热智能材料将会得到更多研究关注, 如高性能纳米材料、固-固相变材料等, 能源动力领域的碳中和目标会对热智能材料提出很多非常迫切的需求, 而能够在不同热环境下均可稳定工作的热智能材料也是今后应用领域的挑战. 热智能材料的调控机理仍有待深入研究, 包括不同外场对材料微观结构的改变、微观导热机理等, 这既需要发展更先进的实验探测技术, 也需要导热理论的不断推进. 探索新型的热智能材料, 实现调控幅度和其综合性能的提升, 构建新型热功能器件, 仍然是今后最重要的努力方向.

参考文献

- [1] Wehmeyer G, Yabuki T, Monachon C, Wu J, Dames C 2017 *Appl. Phys. Rev.* **4** 41304
- [2] Moore A L, Shi L 2014 *Mater. Today* **17** 163
- [3] Zhu W, Deng Y, Wang Y, Shen S, Gulfam R 2016 *Energy* **100** 91
- [4] Hou Z Q, Hu J G 2007 *Thermal Control Technology of Spacecraft* (2nd Ed.) (Beijing: Science and technology of China press) pp1–11 (in Chinese) [侯增祺, 胡金刚 2007 航天器热控制技术 (第 2 版) (北京: 中国科学技术出版社) 第 1—11 页]
- [5] Baughman R H 2002 *Science* **297** 787
- [6] Geim A K 2009 *Science* **324** 1530
- [7] Kleinstreuer C, Feng Y 2011 *Nanoscale Res. Lett.* **6** 229
- [8] Pil Jang S, Choi S U S 2007 *J Heat Trans.* **129** 617
- [9] Xu Y, Wang X, Hao Q 2021 *Compos. Commun.* **24** 100617
- [10] Dong R Y, Cao B Y 2014 *Sci. Rep.* **4** 6120
- [11] Cao B Y, Dong R Y 2014 *J. Chem. Phys.* **140** 034703
- [12] 董若宇, 曹鹏, 曹桂兴, 胡帆 杰, 曹炳阳 2017 *物理学报* **66** 014702
- [13] Zhang Z T, Dong R Y, Qiao D S, Cao B Y 2020 *Nanotechnology* **31** 465403
- [14] Philip J, Shima P D, Raj B 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 203108
- [15] Philip J, Shima P D, Raj B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 043108
- [16] Shima P D, Philip J, Raj B 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 133112
- [17] Sun P C, Huang Y, Zheng R T, Cheng G A, Wan Q M, Ding Y L 2015 *Mater. Lett.* **149** 92
- [18] Sharma A, Shukla A, Chen C R, Wu T N 2014 *Sustainable Energy Technol. Assess.* **7** 17
- [19] Berghund C N, Guggenheim H J 1969 *Phys. Rev.* **185** 1022
- [20] Kizuka H, Yagi T, Jia J, Yamashita Y, Nakamura S, Taketoshi N, Shigesato Y 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 053201
- [21] Lee S, Hippalgaonkar K, Yang F, Hong J, Ko C, Suh J, Liu K, Wang K, Urban J J, Zhang X, Dames C, Hartnoll S A, Delaire O, Wu J 2017 *Science* **355** 371
- [22] Lyeo H K, Cahill D G, Lee B S, Abelson J R, Kwon M H, Kim K B, Bishop S G, Cheong B K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 151904
- [23] Reifenberg J P, Panzer M A, Kim S, Gibby A M, Zhang Y, Wong S, Wong H S P, Pop E, Goodson K E 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 111904
- [24] Yang L, Cao B Y 2021 *J. Phys. D:Appl. Phys.* **54** 505302
- [25] Batdalov A B, Aliev A M, Khanov L N, Buchel'nikov V d, Sokolovskii V V, Koledov V V, Shavrov V G, Mashirov A V, Dil'mieva E T 2016 *J. Exp. Theor. Phys.* **122** 874
- [26] Zheng Q, Zhu G, Diao Z, Banerjee D, Cahill D G 2019 *Adv. Eng. Mater.* **21** 1801342
- [27] Zheng R, Gao J, Wang J, Chen G 2011 *Nat. Commun.* **2** 550
- [28] Angayarkanni S A, Philip J 2014 *J. Phys. Chem. C* **118** 13972
- [29] Angayarkanni S A, Philip J 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 094306
- [30] Harish S, Ishikawa K, Chiashi S, Shiomi J, Maruyama S 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 15409
- [31] Sun P C, Wu Y L, Gao J W, Cheng G A, Chen G, Zheng R T 2013 *Adv. Mater.* **25** 4938
- [32] Warzoha R J, Weigand R M, Fleischer A S 2015 *Appl. Energy* **137** 716
- [33] Wu Y, Yan X, Meng P, Sun P, Cheng G, Zheng R 2015 *Carbon* **94** 417
- [34] Issi J P, Heremans J, Dresselhaus M S 1983 *Phys. Rev. B* **27** 1333
- [35] Zhu G, Liu J, Zheng Q, Zhang R, Li D, Banerjee D, Cahill D G 2016 *Nat. Commun.* **7** 13211

- [36] Qian X, Gu X, Dresselhaus M S, Yang R 2016 *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 4744
- [37] Sood A, Xiong F, Chen S, Wang H, Selli D, Zhang J, McClellan C J, Sun J, Donadio D, Cui Y, Pop E, Goodson K E 2018 *Nat. Commun.* **9** 1267
- [38] Cho J, Losego M D, Zhang H G, Kim H, Zuo J, Petrov I, Cahill D G, Braun P V 2014 *Nat. Commun.* **5** 4035
- [39] Kang J S, Ke M, Hu Y 2017 *Nano Lett.* **17** 1431
- [40] Lu Q, Huberman S, Zhang H, Song Q, Wang J, Vardar G, Hunt A, Waluyo I, Chen G, Yildiz B 2020 *Nat. Mater.* **19** 655
- [41] Barnes H A 2000 *Chem. Eng. J.* **79** 84
- [42] Hu H Q, Gopinadhan M, Osuji C O 2014 *Soft Matter* **10** 3867
- [43] Shin J, Sung J, Kang M, Xie X, Lee B, Lee K M, White T J, Leal C, Sottos N R, Braun P V, Cahill D G 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **116** 5973
- [44] Li C, Ma Y, Tian Z 2018 *ACS Macro Lett.* **7** 53
- [45] Shrestha R, Luan Y, Shin S, Zhang T, Luo X, Lundh J S, Gong W, Bockstaller M R, Choi S, Luo T, Chen R, Hippalgaonkar K, Shen S 2019 *Sci. Adv.* **5** eaax3777
- [46] Zhang T, Luo T 2013 *ACS Nano* **7** 7592
- [47] Shin J, Kang M, Tsai T, Leal C, Braun P V, Cahill D G 2016 *ACS Macro Lett.* **5** 955
- [48] Tomko J A, Pena-Francesch A, Jung H, Tyagi M, Allen B D, Demirel M C, Hopkins P E 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 959
- [49] Feng H, Tang N, An M, Guo R L, Ma D K, Yu X X, Zang J F, Yang N 2019 *J. Phys. Chem. C* **123** 31003
- [50] Hopkins P E, Adamo C, Ye L H, Huey B D, Lee S R, Schlom D G, Ihlefeld J F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 121903
- [51] Ihlefeld J F, Foley B M, Scrymgeour D A, Michael J R, McKenzie B B, Medlin D L, Wallace M, Trolier-McKinstry S, Hopkins P E 2015 *Nano Lett.* **15** 1791
- [52] Chynoweth A G 1956 *J. Appl. Phys.* **27** 78
- [53] Kalaidjiev K N, Mikhailov M P, Bozhanov G I, St. Stoyanov R 1982 *Phys. Status Solidi A* **69** K163
- [54] Deng S C, Yuan J L, Lin Y L, Yu X X, Ma D K, Huang Y W, Ji R C, Zhang G Z, Yang N 2021 *Nano Energy* **82** 105749
- [55] Deng S, Ma D, Zhang G, Yang N 2021 *J. Mater. Chem. A* **9** 24472
- [56] Ziman J M 1960 *Electrons and Phonons* (Britain: Oxford University Press) pp483–523
- [57] Yim W M, Amith A 1972 *Solid-State Electron.* **15** 1141
- [58] Yang F Y 1999 *Science* **284** 1335
- [59] Kimling J, Wilson R B, Rott K, Kimling J, Reiss G, Cahill D G 2015 *Phys. Rev. B* **91** 144405
- [60] Ismail K, Nelson S F, Chu J O, Meyerson B S 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 660
- [61] Chu M, Sun Y K, Aghoram U, Thompson S E 2009 *Annu. Rev. Mater. Res.* **39** 203
- [62] Vogelsang T, Hofmann K R 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 186
- [63] Li X, Maute K, Dunn M L, Yang R 2010 *Phys. Rev. B* **81** 245318
- [64] Meng H, Ma D, Yu X, Zhang L, Sun Z, Yang N 2019 *Int. J. Heat Mass Transf.* **145** 118719
- [65] Meng H, Maruyama S, Xiang R, Yang N 2021 *Int. J. Heat Mass Transf.* **180** 121773
- [66] Wan X, Demir B, An M, Walsh T R, Yang N 2021 *Int. J. Heat Mass Transf.* **180** 121821
- [67] Li S H, Yu X X, Bao H, Yang N 2018 *J. Phys. Chem. C* **122** 13140
- [68] Yu D, Liao Y, Song Y, Wang S, Wan H, Zeng Y, Yin T, Yang W, He Z 2020 *Adv. Sci.* **7** 2000177
- [69] Du T, Xiong Z, Delgado L, Liao W, Peoples J, Kantharaj R, Chowdhury P R, Marconnet A, Ruan X 2021 *Nat. Commun.* **12** 163
- [70] Ma R, Zhang Z, Tong K, Huber D, Kornbluh R, Ju Y S, Pei Q 2017 *Science* **357** 1130
- [71] Smullin S J, Wang Y, Schwartz D E 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 093903
- [72] McKay I S, Wang E N 2013 *Energy* **57** 632
- [73] Puga J B, Bordalo B D, Silva D J, Dias M M, Belo J H, Araújo J P, Oliveira J C R E, Pereira A M, Ventura J 2017 *Nano Energy* **31** 278
- [74] Yang N, Ni X X, Jiang J W, Li B W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 093107
- [75] Song Q C, An M, Chen X D, Peng Z, Zang J F, Yang N 2016 *Nanoscale* **8** 14943
- [76] Cao B Y, Qiao D S 2018 ZL201810298324.6
- [77] Hu G J, Cao G X, Qiao D S, Cao B Y 2019 *J. Eng. Thermophys.* **40** 1380 (in Chinese) [胡帼杰, 曹桂兴, 乔德山, 曹炳阳 2019 工程热物理学报 **40** 1380]

SPECIAL TOPIC—Nano engineering and thermophysics

Thermal smart materials and their applications in space thermal control system^{*}

Cao Bing-Yang[†] Zhang Zi-Tong

(*School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 11 October 2021; revised manuscript received 29 November 2021)

Abstract

Effective thermal control technologies are increasingly demanded in various application scenarios like spacecraft systems. Thermal conductivities of materials play a key role in thermal control systems, and one of the basic requirements for the materials is their reversibly tunable thermal properties. In this paper, we briefly review the recent research progress of the thermal smart materials in the respects of fundamental physical mechanisms, thermal switching ratio, and application value. We focus on the following typical thermal smart materials: nanoparticle suspensions, phase change materials, soft materials, layered materials tuned by electrochemistry, and materials tuned by specific external field. After surveying the fundamental mechanisms of thermal smart devices, we present their applications in spacecraft and other fields. Finally, we discuss the difficulties and challenges in studying the thermal smart materials, and also point out an outlook on their future development.

Keywords: thermal smart material, thermal conductivity, space thermal control, smart tuning

PACS: 44.10.+i, 44.90.+c

DOI: 10.7498/aps.71.20211889

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51825601, U20A20301).

[†] Corresponding author. E-mail: caoby@tsinghua.edu.cn