

微纳尺度界面热阻调控推动新能源汽车产业发展研究

王欣^{1,2} 赵嘉强^{1,2*}

1. 渭南师范学院 物理与电气工程学院, 中国·陕西 渭南 714099

2. X 射线成像与检测陕西省高校工程研究中心, 中国·陕西 渭南 714099

摘要: 微纳尺度界面热阻调控对新能源汽车产业发展意义重大。界面热阻源于材料原子层面间的不连续性, 在微纳尺度下成为热运输的主导因素, 给新能源汽车带来诸多挑战。通过声子工程、表面分子工程、微纳结构构筑等调控机制, 可降低界面热阻。该技术在动力电池、智能驾驶芯片、功率模块及整车集成热管理系统等方面应用广泛, 能推动整车安全性与可靠性提升、助力续航里程与能效突破、支撑智能化进程加速、促进热管理产业链技术升级, 为新能源汽车产业高质量发展提供关键支撑。

关键词: 微纳尺度; 界面热阻; 热调控; 新能源汽车; 热管理

Research on Regulating Micro-Nano Scale Interfacial Thermal Resistance to Drive the Development of the New Energy Vehicle Industry

Wang Xin^{1,2}, Zhao Jiaqiang^{1,2*}

1. School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Normal University, China Shaanxi Weinan 714099

2. Engineering Research Center of X-ray Imaging and Detection, University of Shaanxi Province, China Shaanxi Weinan 714099

Abstract: Micro nano scale interface thermal resistance control is of great significance for the development of the new energy vehicle industry. The interface thermal resistance originates from the discontinuity between the atomic layers of the material and becomes the dominant factor in heat transport at the micro nano scale, posing many challenges to new energy vehicles. By regulating mechanisms such as phonon engineering, surface molecular engineering, and micro/nano structure construction, the interfacial thermal resistance can be reduced. This technology is widely used in power batteries, intelligent driving chips, power modules, and integrated thermal management systems for vehicles. It can promote the improvement of vehicle safety and reliability, assist in breakthroughs in range and energy efficiency, support the acceleration of intelligent processes, promote technological upgrades in the thermal management industry chain, and provide key support for the high-quality development of the new energy vehicle industry.

Keywords: Micro nano scale; Interface thermal resistance; Thermal regulation; New energy vehicles; Thermal management

0 引言

新能源汽车产业兴起, 热管理是保障其性能与安全的关键。微纳尺度界面热阻是热管理核心问题, 在动力电池、智能驾驶芯片、功率模块等关键部件中广泛存在, 影响热量传导, 威胁车辆安全可靠, 制约续航与智能化提升。深入探讨微纳尺度界面热阻调控推动新能源汽车产业发展, 对突破发展瓶颈、推动产业升级意义重大。

1 微纳尺度界面热阻特性与挑战

1.1 微纳尺度界面热阻的物理特性

由于两个物体在界面处原子尺度的结构不连续, 导致界面处产生热阻, 这一现象被称为界面热阻。热量从一物体传到另一物体的过程中, 能量载体(如在金属中以电子为主导, 而在半导体或绝缘体则主要为声子)在界面上受

到阻碍而产生的温降就是界面热阻。界面热阻大小受界面两侧晶体振动谱一致性、化学结合力以及界面形貌等多种因素的综合影响^[1]。通常在宏观尺度下被忽略的界面效应对微纳尺度下的热运输起着决定性作用。实验发现, 在金属-半导体异质结界面附近存在载流子高度的非平衡化区域, 并且在金属中靠近界面一定厚度范围内电子乃至声子的局域热阻值可能很大, 可以达到部分隔热材料的水平; 而对于半导体来说, 由于声子平均自由程较大, 其非平衡化范围则也相对较大。因此, 在这种多尺度不均衡传输条件下, 界面热阻不再是单纯的接触热阻, 而是与许多物理机理耦合的一个综合的问题。

1.2 微纳尺度界面热阻带来的现实挑战

在新能源汽车实际工程应用中, 界面热阻带来的烦恼

可谓比比皆是。例如在动力电池的充放电过程中,其活性颗粒和导电剂之间以及电极涂覆层和集流体箔材之间的界面都是热量聚集的地方,并且这些界面会阻碍热量向外扩散,在电池内部造成温差过大、引发快速局部老化甚至导致安全隐患^[1]。在整车计算平台层面,智能驾驶芯片性能不断提高,芯片上晶体管数量接近摩尔定律极限,单个芯片发热功率持续攀升。芯片通过封装与散热盖连接、散热盖再通过热界面材料与散热器接触,每一层界面都会引入可观的热阻。更棘手的是,随着汽车电动化向 800V 甚至 1000V 高压平台演进,功率器件如碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管模块的开关频率更高、热流更集中,界面散热若不能及时跟进,器件结温将迅速攀升,直接威胁整车可靠性与安全性。

2 微纳尺度界面热阻调控机制

2.1 声子工程视角下的界面匹配调控

界面热阻调控的首要切入点在于控制界面处声子的透射能力。声子是微纳尺度热输运最重要的能量载体,而界面两边的材料在界面上的透射概率很大程度上取决于它们之间的声子态密度重叠程度,在两者声子谱越匹配的情况下,声子更容易从一边穿过界面传到另一边,否则就更容易发生反射。因此,学者们也尝试在界面上设计一个梯度过渡区或者超晶格使得材料性质不是突然发生变化而是渐变,以降低界面散射强度。上述分子动力学模拟研究表明,可以通过精细调控界面附近原子层的成分及排列来有效地调控特定频率声子的透射率,即在原子层面设计界面并考虑了声子输运上的阻抗匹配,从而为从根本上减小界面热阻提供了理论支持。

2.2 表面分子工程与界面键合调控

除了物理适配之外,界面化学状态也是影响界面热输运的重要因素。传统热界面材料是基于物理接触作用来填平表面缺陷的,但是由于只有有限的微观接触区域,所以只能通过对少量接触点进行传热实现。而近来的界面改性方法是想从本质上解决这个问题,在两个固体之间构建如自组装的单层膜,可精准控制表面能及化学键合。填料表面与基材之间达到最佳表面能匹配后,在压缩过程中容易实现更充分的贴合,从而使得界面实际接触面积显著增大^[3]。更为重要的是,某些短链分子层能够在界面处形成具有一定柔性的“分子弹簧”,既增强了界面的黏附力,又可降低界面的有效模量,使材料在封装压力下更能流动填充微观沟壑。

2.3 微纳结构构筑与热流通道设计

除改善界面本身的物理化学性质之外,在界面区域上

构筑特定的微纳结构也可以调节其热输运路径。例如在由二维材料组成的界面处(如氮化硼纳米片堆叠),研究发现通过调控纳米片取向及搭接的角度可构筑低热阻的界面声子桥结构,并且当纳米片以一定弧度存在时,搭接界面处声子散射机制发生变化,有效促进单向热流传输。上述结构设计思想改变了以往提高热界面材料中填料含量以增强导热的传统方式,而是利用对热流通道的几何设计方法从而减少界面热阻,并且在金属-非金属之间使用金属间化合物作为中间相也能显著地提高界面热输运性能,其热量传输介质从声子变为电子。在界面处从微弱的范德华作用变为牢固的金属键连接,导致界面热阻成数量级地下降。

3 微纳尺度界面热阻调控在新能源汽车的应用

3.1 动力电池内部多界面热输运优化

作为新能源汽车的核心动力源,动力电池是由若干个膜片组成的一个层状系统,正负极涂层和铝箔或者铜箔集流体之间的界面是电池中热由活性材料向极耳传递的关键路径。在常规生产过程中,涂层与集流体主要通过黏结剂进行物理连接,在二者之间存在着大量的微孔隙,声子传输阻碍较大。可以通过使用纳米尺寸的界面修饰层如在集流体上构筑垂直取向碳纳米管阵列或者覆盖非晶碳过渡层来提高涂层和箔材间的声子耦合。该修饰层不仅作为力学锚点,也引入新的热通路。此外,研究发现,如果在电极浆料中掺杂少量功能纳米材料,则其干燥后会在活性粒子间形成纳米级烧颈,并导致原为点接触的粒子间变为面接触乃至体连接,从而有效降低界面热阻。

3.2 智能驾驶芯片封装界面热管理

车载智能驾驶芯片是车辆的核心处理单元,其可靠性直接影响到整车的安全性。该类芯片一般为倒装焊或者三维堆叠封装技术,在芯片间、芯片与基板间存在大量的微凸点,每个微凸点是电流传输路径同时也是散热路径。高功率导致芯片局部发热量急剧增大,常规底部填充材料的热导率已经难以满足散热的需求,在微凸点周围填充高导热纳米复合材料或者在芯片背面与散热盖之间的加入液态金属热界面材料是减少封装热阻行之有效的方法之一^[4]。尤其是对于液态金属而言,在其本身具备的优良导热能力及流动性的基础上,可以很好地实现与芯片之间的近似完美接触;如果再在液态金属与芯片背金层之间引入金属间化合物过渡层,则会使得两者的接触形式由简单的物理接触变为冶金结合,散热效果更为显著,从而更好地解决芯片热点温度过高的问题。

3.3 功率模块多层级界面散热

随着新能源汽车电驱系统的高电压、高功率密度的发展趋势,碳化硅功率模块的应用日益广泛。由于碳化硅模块在工作过程中开关损耗及导通损耗较大,并且产生的热量较为集中,在模块内,芯片是通过焊料层与直接覆铜陶瓷基板进行连接,而陶瓷基板又是通过导热硅脂和散热器进行贴合,使得整个模块形成了以焊料层—基板—散热器为热阻串联的传热途径。其中焊料层中的空洞、导热硅脂的老化干涸,会导致界面热阻显著增大,极易造成芯片结温超限。为此,学者们尝试用银烧结取代传统的软钎焊连接芯片和基板,银烧涂层具有较高的热导率及优异的抗高温疲劳特性。在模块与散热器连接界面,开发基于垂直取向石墨烯或氮化硼纳米片的导热垫片替代传统硅脂,借助二维材料面外高导热特性构建高效垂直热运输通道,降低接触热阻,提升长期服役可靠性。

3.4 整车集成热管理系统中的界面协同

由单个部件上升到整车层面,热界面调控的作用就更加明显。新能源汽车的热管理涉及电池、电驱、空调、智驾计算等诸多子系统,各个子系统之间通过冷却液管路或者制冷剂管路进行热量传递^[9]。管路与冷板之间、冷板与电池模组之间、换热器与风扇之间,均具有大量的需要高效传热的连接界面。传统机械连接通常采用紧固力压紧,其界面压力不均匀,导致局部接触热阻差别悬殊。采用可压缩的柔性石墨复合垫片或者相变导热材料,在较小的装配压力下就能实现界面良好的贴合,其材料在达到相变温度时会软化流动以适应界面的微观起伏,服役中即便出现热循环变形也能保持较好的热接触状态。

4 微纳尺度界面热阻调控对新能源汽车产业的影响

4.1 推动整车安全性与可靠性跃升

热失控是新能源车最为严峻的安全挑战,而界面热阻失控常常是诱发热失控的关键环节。若电池内部界面散热不良,则局域高温将加剧隔膜收缩、正极分解等副反应,从而引发热失控的链式反应。借助于微纳尺度界面热阻调控技术手段,能够使电池内温度分布更均匀,热失控的触发阈值显著提高,热点温度大幅下降,在电控及功率模块上,器件结温降低将直接延长功率模块寿命,减少由热疲劳引起的焊料层开裂及键合线脱落的风险。从整车角度看,热管理系统的可靠性提升意味着因过热导致的故障率显著下降,用户的维保成本随之降低,品牌信誉度得到持续增强。

4.2 助力续航里程与能效突破

续航焦虑始终是制约消费者接受纯电动汽车的关键因素。在电池总能量一定的情况下,降低热管理系统能耗相当于间接增加可用续航。界面热阻的降低使电池产生的热量能够更顺畅地传导至热交换器,减少了热量在电池包内部的滞留。冬季低温环境下,电池需要加热才能达到适宜的工作温度,良好的界面热输运使外部热量更高效地传入电池内部,加热时间缩短,能耗下降。对于热泵系统而言,冷凝器与蒸发器的换热效率高度依赖于管翅接触界面的热阻,优化界面设计可使系统能效比获得可观提升,在低温工况下维持更高的制热能力,从而减少电池用于座舱加热的耗电量。

4.3 支撑汽车智能化进程加速

稳定可靠的高性能计算平台是汽车智能化的核心支撑。自动驾驶级别每上升一个等级,所需芯片算力就将成数量级地增加,这需要以有效的热管理作为算力释放的基础。微纳尺度界面热阻调控技术使得芯片封装总热阻不断降低,在相同芯片尺寸下可实现更高功率密度,而在同样的功耗下芯片温度更低。这就给智驾芯片的性能挖潜带来了充足的热设计冗余,让车企可以在现有的芯片上开放更多的算力来实现更为复杂多样的感知算法与决策模型。与此同时,座舱域控制器、车联网终端等智能化部件的集成度也在不断提高,紧凑空间内的界面散热问题得到有效解决后,整车的智能化功能方能稳定发挥。

4.4 促进热管理产业链技术升级

界面热阻调控技术的发展正深刻重塑新能源汽车热管理产业链。以机械加工、流体输送为特征的传统热管理企业,正积极向材料合成、界面表征、微纳加工等高新技术领域延伸。热界面材料由硅脂、相变材料向液态金属、垂直取向二维材料、金属间化合物复合体系等高端化方向加速演进。测试表征工具如飞秒激光时域热反射系统、扫描热显微镜已开始逐步应用于产业质检环节中。材料供应商、器件制造商和整车企业之间形成更加密切的技术交流,甚至合作开发解决某一方面的散热难题已成为趋势;热管理产业链整体向高端化迈进,在国际市场上具有更高的话语权。

综上所述,微纳尺度界面热阻调控技术对新能源汽车动力电池及电芯层面因存在界面热阻而导致的散热难题、车用高功率芯片等关键器件的散热难题等发挥着巨大作用,对于保障整车安全具有关键意义。该技术有助于有效降低能耗,支撑续航里程及能效的新突破,缓解用户里程焦

虑；在智能时代下，给芯片性能发挥预留热设计冗余空间，加快汽车智能化进程。此外，它还带动热管理产业链上下游协同升级，增强本土供应链在全球竞争中的优势，成为新能源汽车产业高质量发展的强劲引擎。

参考文献：

[1] 袁瑞琳, 陈龙, 吴长征. 二维纳米材料热传导行为及其界面调控[J]. 化学学报, 2022,80(06):839-847.

[2] 张志, 张艳岗, 曹美文等. 动力电池材料—结构—性能跨尺度关联效应研究[J]. 工程设计学报, 2024,31(01):120-129.

[3] Dou Z, Lei C, Wu K, et al. The development of thermal interface materials[J]. Nature Electronics, 2025,8(12):1-10.

[4] 王瑾玉, 张永海, 魏进家. 功率器件热界面材料研究进展[J]. 工程热物理学报, 2022,43(10):2699-2710.

[5] 王镇, 莫德锋, 汪洋等. 界面热阻测量方法及影响因素研究进展[J]. 工程热物理学报, 2020,41(10):9.

基金项目：全国大学生创新创业训练计划项目：微纳尺度界面热阻调控（202410723012）；陕西省科学技术厅自然科学基金基础研究计划项目：石墨烯和碳纳米管填充铜基热管理材料微观传热性能研究（2024JC-YBQN-0045）；渭南师范学院科学研究计划人才项目：界面设计增强 CNT 填充铜基热管理材料微观传热性能研究（2022RC09）；渭南师范学院区域协同创新计划项目：高性能电子散热的铜石墨烯热管理材料研究（2025QY-CY-ZH02）。

作者简介：王欣（1988-），男，汉族，陕西渭南人，博士，讲师，研究方向：微纳尺度传热。

* 通讯作者：赵嘉强（2004-），男，汉族，陕西咸阳人，学士，研究方向：新能源汽车。