

# 熱控與熱管理

網刊地址：[HTTPS://WWW.TCATMM.COM](https://www.tcatmm.com)

# THERMAL CONTROL

理事長寄語 P2

行業觀察 P3

電子產品熱管理現狀和技術方向思考 P35



## 呂國峰

創刊寄語

特別策劃

## 2021 导热界面材料 行业调研报告

2021年12月號

總第1期



ISSN 2789-3731

# 目 錄

封面人物：呂國峰理事長

P 1 目 錄

P 2 理 事 長 寄 語

P 3 行 業 觀 察

P 3 5 電 子 產 品 熱 管 理 現 狀 和 技 術 方 向 思 考

P 5 1 導 熱 界 面 材 料 行 業 調 研 報 告

P 9 1 作 者 風 采



熱 控 與 熱 管 理

**主 辦 單 位：**

中 國 電 子 工 業 標 准 化 協 會

熱 管 理 行 業 工 作 委 員 會

**協 辦 單 位：**

合 肥 明 睿 數 據 服 務 有 限 公 司

**出 版 單 位：**

熱 控 與 熱 管 理 雜 志 社 有 限 公 司

**國 際 刊 號：**

I S S N 2 7 8 9 - 3 7 3 1

網 址：[HTTPS://WWW.TCATMM.COM](https://www.tcatmm.com)

地 址：香 港 九 龍 旺 角 亞 皆 老 街 9 8 號 富 都 大 厦 2 樓 2 2 室

電 話：+ 8 6 - 0 1 3 7 2 1 0 2 9 7 3 6

編 輯 郵 箱：8 7 1 6 5 0 5 2 6 @ Q Q . C O M

## 理事长寄语

各位同仁大家好：

应行业发展的需求，在中电标协热管理行业工作委员会专家委员会积极筹备下，《热控及热管理》行业期刊正式出版，此期刊专注服务于热管理行业，通过期刊将为我们获取获取前沿动态，研习行业知识带来新的途经，为产、学、研提供交流平台，为行业上、中、下游提供沟通渠道，为从事热管理行业的相关人士提供展示机会。

在通讯、物联网和人工智能技术的带动下，由高功率电子产品散热引发的产业发展瓶颈限制了相关产业的发展，行业面临新的要求。在机遇与挑战并存的今天，热管理行业工作委员作为行业的服务平台，我们秉承初心，以服务为己任；发挥政府、行业和企业之间的纽带作用，积极开展国内外高质量的交流平台；加强热管理人才的培养，推进产、学、研一体化行业体系建设；助力热管理行业的革新，鼓励企业自主创新、固化创新成果，《热控及热管理》行业期刊将打造热管理行业又一新的里程碑。

在此，鼓励同仁为《热控及热管理》期刊多做推广，让更多热管理相关领域的兄弟单位及个人参与进来，共同探讨热管理行业的发展之路，建言献策，使《热控及热管理》期刊与时俱进，加速成长。作为中电标协热管理行业工作委员会的理事长会尽最大努力支持《热控及热管理》期刊的发展，把握方向，提振信心，尽心尽力的服务热管理行业。

目前期刊处创刊初期，期刊尚存在许多待完善之处，恳请大家批评指正，同时热忱欢迎广大热管理企业、高校、科研机构及从事热管理专业人士惠赐稿件，给予大力支持。最后，再次感谢大家对本期刊的支持鼓励！让我们携手共进，团结一心，共同促进热管理行业的发展，共创热管理行业更美好的明天！



中电标协热管理行业工作委员会第一届理事会理事长

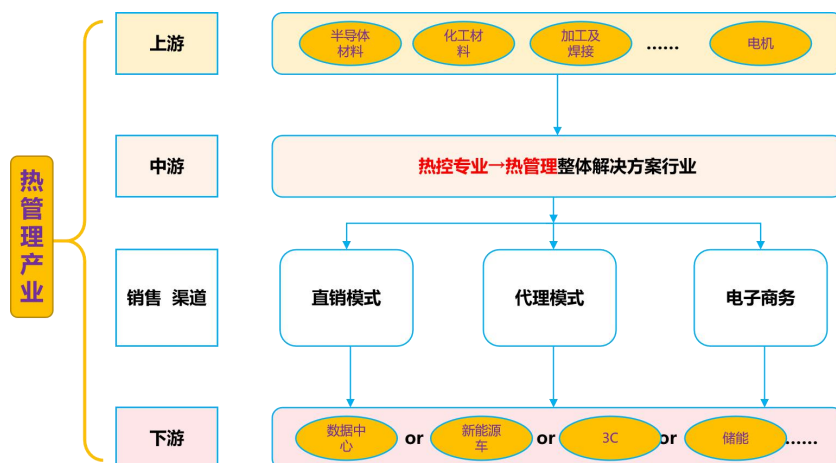
# 热管理行业观察

孙萌

在碳达峰、碳中和背景下，汽车、电力电子、通信行业等作为高能耗产业，绿色转型的需求愈发迫切，“十四五”期间为碳达峰的关键时间窗口，碳控排政策力度有望超预期，热管理行业即将迎来新的发展机遇。我国热管理产业民族企业整体实力仍然不强，大部分企业徘徊在中低端领域，同质化严重，主要依靠价格优势维持生存。高端材料及关键技术的发展受到制约，不仅高端产品严重依赖进口，甚至部分中低端产品亦无法实现完全国产化。

热控及热管理产业作为未来工业及信息产业的基础与核心，必定是具有前瞻性、先导性和探索性的战略必争高地，应紧握新一轮科技革命和产业变革带来的机遇，大力发展实施热管理产业，推动高质量发展。

在双循环和新的国际经济环境下，国内企业对供应链的诉求空前高涨，下游厂商对来自于本土的上游供应商的重视程度显著提高。



# 1 热管理产业应用领域技术观察

科研技术牵引产业发展，下面从电化学储能领域、通信电子行业、新能源汽车三条思路出发，探讨热管理行业产业链组成。

## 1.1 电化学储能领域热管理技术发展

“双碳”目标下，电力行业亟需推进节能减排，优化资源供给结构。除对可靠性及热管理要求较高的发电及传输电网以外，储能系统的引入可有效优化电力行业供需关系、降低可再生资源发电弃风弃光率、降低用户端的综合用电成本等。当前储能系统主要应用在大型发电厂，未来随着国家政策持续支持以及储能技术发展，储能系统将向配电端和用户端渗透。然而，近年来储能电站事故频发，2021 年以来已发生了多起重大事故，储能电站热管理的市场关注度提升。常见的电力行业热管理技术包括风冷/液冷散热，风冷结构简单、成本低、易维护，但最大的缺点就是散热效果不佳。液冷与风冷相比的优势是散热效果好。除传统的散热方式外，间接蒸发冷却被广泛运用在储能场景中，间接蒸发冷却兼备高效和节能。除此之外，相变材料也是当前比较热门的散热方式之一，利用材料相间变化时的吸放热，可以高效进行热管理。未来热管理方式将继续以高效和节能为目标，不断发现性能更优异的冷媒，使得储能系统更加安全和稳定。

随着国家政策大力支持储能产业发展，储能装机规模有望快速增长，为热管理行业带来极大的成长机会。

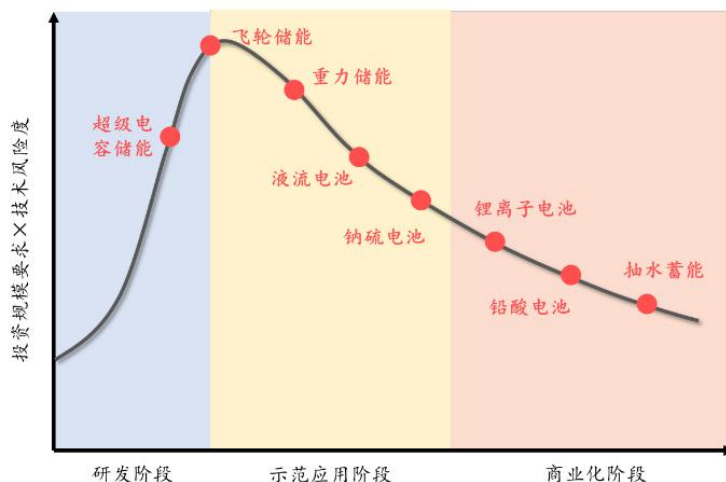


图 1-1 各类储能技术的成熟度

储能系统按照储存介质可分为机械类储能、电气类储能、电化学类储能、热储能和化学类储能。抽水蓄能发展最为成熟，电化学储能为未来发展方向。

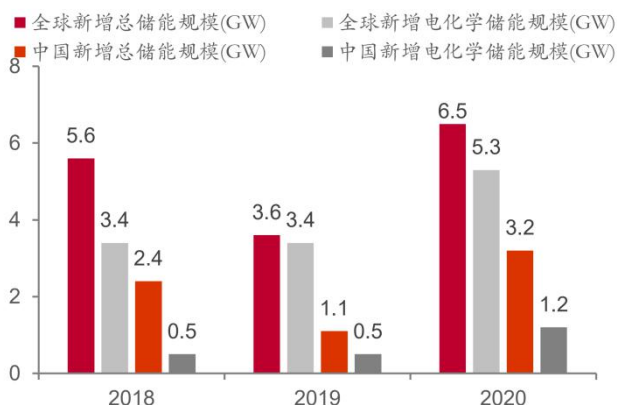


图 1-2 2018-2020 新增储能/电化学储能装机功率（数据来源自 CNESA）

电化学储能快速增长，可再生能源并网为未来储能装机驱动因素。近年来，国内外电化学储能均呈快速增长态势。在新增电化学储能的应用中，主要以可再生能源并网为主。根据 BNEF 数据，2020 年中国新增电化学储能中，可再生能源并网储能占比为 40%左右。

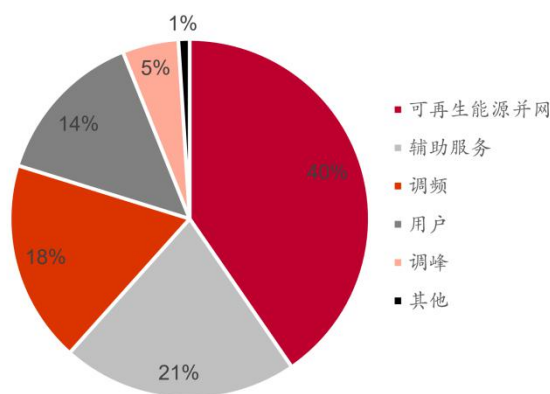


图 1-3 2020 年中国新增电化学储能分应用占比（数据来源自 BNEF）

对于电化学储能来说，温度控制的好坏直接影响整个储能系统的性能，严重时会引起热失控，造成事故。其可采用的冷却方式也有多种方向。

### 1.1.1 单相流体冷却方式（空冷/液冷）

空冷/液冷通过空气/液体流经发热部件，通过接触换热的方式进行降温。空冷结构简单、成本低、易维护，相较于液冷和相变材料冷却，空冷的稳定性好，但空气的低热导率限制了空冷系统的冷却性能，所以空冷系统冷却速度较慢，散热效果不佳，虽然强制风冷可加强气流运动，提高散热效率，但使用风扇或气泵强制对流将造成系统能量损失。液冷冷却的冷却剂为液体，相对空气来说，液体具有更大的比热容、温度传递快、吸收热量大等优点。同体积液体带走的热量显著大于风冷，热传导的效率亦显著高于空冷，液冷冷却技术优势明显。液冷技术可以分为间接制冷和直接制冷两种方式，对于电力设备，考虑到安全问题，一般以间接制冷为主。

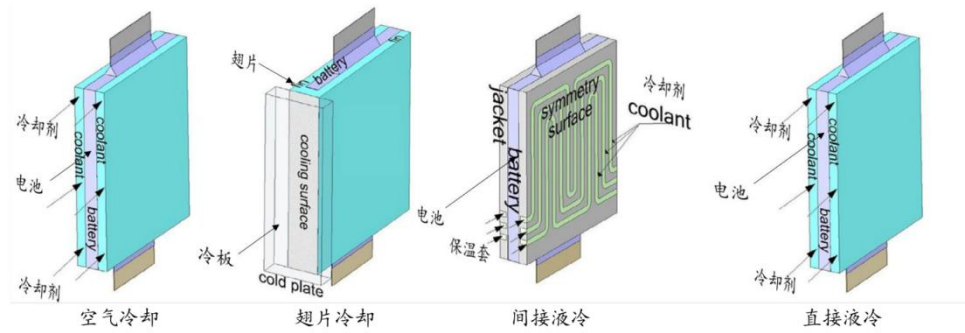


图 1-2 常见储能电池的空冷/液冷冷却结构

表 1-1 自然冷却与空/液冷特性对比

冷却方式	冷却原理	优势	劣势
自然冷却	空气自然对流	成本低、空间小	冷却效率低
直接冷却空冷系统	空气对流	易循环、稳定性高	冷却效率一般
直接冷却水冷系统	液体强制对流	系统紧凑、冷却性能好、温度分布均匀、应用广泛	系统复杂、燃料经济性差、额外重量、泄露风险
间接冷却水冷系统			

### 1.1.2 蒸发冷却技术

蒸发冷却方式是一种具有优异冷却效果且能随负荷变化自平衡的冷却方式。蒸发冷却分为直接蒸发冷却 ( Direct Evaporative Cooling , DEC ) 和间接蒸发冷却 ( Indirect Evaporative Cooling , IEC ) 。直接蒸发冷却是将水直接喷淋于未饱和湿空气中,使空气等焓增湿、降温。由于空气与水直接接触,使其含湿量增加,因此存在一定的应用限制。间接蒸发冷是工作介质先经直接蒸发冷却设备处理,流经换热器通道一侧,形成湿通道,产出介质流过于侧通道,湿侧介质吸收干燥介质的热量,借助于湿表面蒸发,从而冷却产出介质。由于工作介质不与水直接接触,其含湿量不变,实现空气的等湿降温。常见的间接蒸发冷却的冷却



介质为冷媒水。

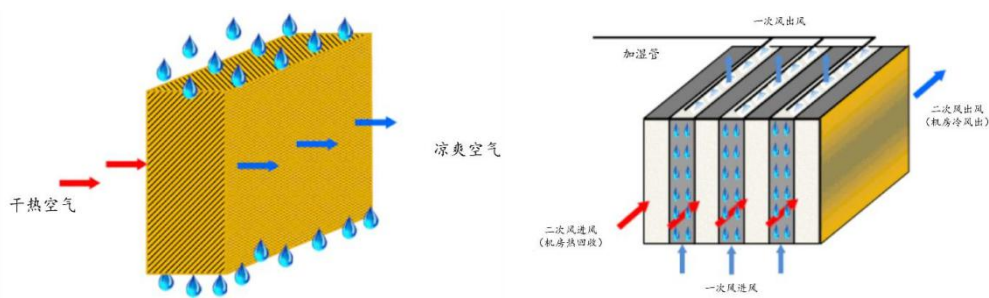


图 1-3 直接蒸发冷却与间接蒸发冷却示意图

间接蒸发冷却系统高效节能兼具。间接蒸发节能技术具有三种工作模式：当室外温度较低时，直接换热器换热模式；室外温度升高时，开启间接蒸发模式；当室外温度较高时，启动机械制冷模式。间接蒸发冷却技术可从自然环境中获取冷量，与一般常规机械制冷相比，具备较为显著的节能效应。

间接蒸发冷却系统技术发展完善，应用场景广泛。按照冷却器结构可以分为板式间接蒸发冷却器和管式间接蒸发冷却器两种形式。板式间接蒸发冷却器优点是换热效率高、制造工艺比较成熟，应用较多。存在的主要问题是流道窄小，容易堵塞，随着运行时间增加，换热效率急剧降低，流动阻力大，布水不均匀、浸润能力较差，同时由于使用的金属材料易被腐蚀，造成结垢、维护困难等。管式间接蒸发冷却器优点是布水均匀，容易形成稳定水膜，有利于蒸发冷却的进行，空气流道较宽，不会产生堵塞，因而流动阻力小，且二次空气流道和风机便于布置。存在的主要问题是占地空间较大。目前间接蒸发冷却系统已大量应用于数据中心、发电端、化工、冶金、轨道、机场、医药和市政商用领域。根据不同的使用场景，可分为分体式、嵌装式和顶置式。

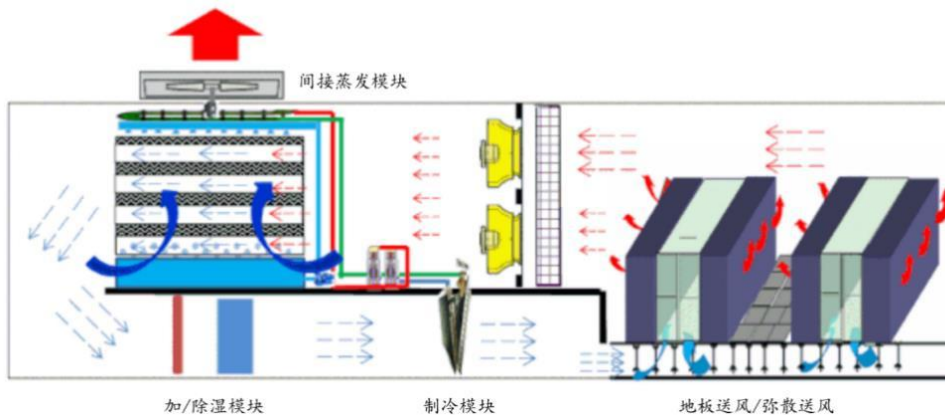


图 1-4 数据中心的分体式间接蒸发冷却系统示意图

不同应用场景下,间接蒸发冷却系统与传统制冷方案和其他自然冷却方法相比优势明显:对于发电-电动机等应用领域而言: 1) 蒸发冷却系统可实现无泵自循环,运行时系统内部压力低,发生工质泄漏的可能性小。2) 蒸发冷却系统可自动根据热负荷调整运行状态,无需外加调节控制装置。3) 蒸发冷却介质绝缘具有高绝缘性与不燃性,即使发生介质泄漏问题,也不会造成短路等重大事故,因此具有较好的安全性。4) 蒸发冷却系统散热能力强,采用管道内冷的形式应用于发电-电动机定子线棒冷却上,可有效降低铜导杆与主绝缘间温差,使线棒在轴向和周向上温度分布更均匀,从而降低热应力、提高主绝缘寿命。5) 蒸发冷却系统维护方便,运行、维护成本低。对于数据中心等应用领域而言: 1) 自然冷源利用效率高。2) 换热链路短,高效换热。3) 集成度高,环境要求简单。4) 与传统机械制冷方法相比,可实现有效节能。5) 户外安装的制冷设备使得空气处理机组的维护更方便。

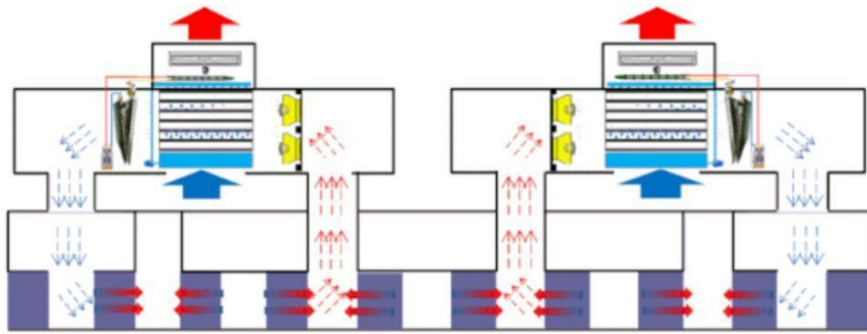


图 1-5 用于电化学储能系统的顶置式间接蒸发冷却系统示意图



图 1-6 用于发电厂的间接蒸发冷却系统

### 1.1.3 相变材料储能

相变材料是一类温度变化时发生相变的材料，一般利用相变过程吸收或释放大 量潜热，以达到热管理的目的。常见相变材料按物理状态可分为气固相变、固 液相变、固固相变和气液相变四类，气固和气液相变材料虽然储能密度大，但是 发生相变过程时体积变化较大，不利于实际应用；固固相变材料在相变过程中体 积变化小，无气、液泄漏风险，但是材料难以获取，且相变温度较高；相比之下， 固液相变材料在熔化或凝固过程中体积变化小，熔点低，相变潜热大，因此受到 广泛应用。

相变材料储热系统的优点是散热效果好，无需消耗电池额外能量，同时可用

于散热和加热使用,缺点是相变前的低热导率和相变传热的迟缓性会限制其在极端服役工况下的应用。相变材料储热方法已有较多研究,其适用范围广,但当电池发热量小,未达到相变材料熔点时,相变材料无法通过相变过程潜热,即相变冷却失效,所以相变材料冷却适用于发热量较大的电池包。考虑到在大倍率放电过程中电池发热量的不一致性,因此,在发热量较大部位的相变材料中插入质量轻的铝热管可以辅助散热,提高电池均温性。目前相变材料冷却多用于电子设备散热。相变材料作为一种被动换能材料具有节能、环保等优势,目前产业处于起步阶段,未来技术突破将驱动产业加快发展,未来市场前景广阔。

表 1-2 各类相变材料的特征区别

分类	优点	缺点	材料代表
有机类	在固体状态时成型性较好,不易出现过冷和分离现象,并且对材料的腐蚀性较小,性能比较稳定,毒性小,成本低	导热系数小,导致对热量变化的响应速度,密度较低、储能能力较小,并且有机物一般熔点较低、不适与高温场合	直链烷烃、脂肪酸、脂肪醇、多元醇以及高分子相变材料、层状钙钛矿、高分子类聚合物等
熔融盐类	一般应用于中高温领域,120~1000°C 及以上。可以应用于小功率电站、太阳能发电、工业余热回收等方面	-	一般由碱金属的氟化物、氯化物、硝酸盐、碳酸盐等组成
合金类	在中高温相变储热应用中,金属材料的储热性能占有明显的优势,且相变稳定性好、性价比高、使用寿命长	合金类相变储热材料密度较高和相变潜热较低,导致其在对重量较敏感的储热领域关注度不高	合金类相变储热材料主要由单一金属或多种金属等组成的二元、三元或四元合金
复合类	可实现相变材料的微封装以解决相变材料的相分离、导热性能差、储热密度不高以及储/释热性能的结构优化等问题	微胶囊在实现较好的封装效果的同时往往难以实现热性能的提高	

## 2 通信电子方向热管理行业观察

通信行业是上下连接 TMT 各领域的重要纽带,通过整合各类资源(包括水电、网络、土地等)承载上层 TMT 的各类应用,是数字流量与传统周期品

连接的入口，“碳中和”将对其中细分环节的长期趋势产生深远影响。



图 2-1 通信电子行业碳中和路径

## 2.1 通信电子行业热管理需求

### 2.1.1 消费电子领域

智能手机、平板电脑和可穿戴设备等消费电子产品的快速增长要求产品性能的不不断提高，增加了散热需求。随着 5G 时代带来的换机潮，预计到 2023 年智能手机出货量将达到 15.4 亿部。5G 手机在拥有更强性能、更快速度的同时，也带来了功耗增加的弊端，对散热的要求进一步提高。智能手机的功耗主要来源于处理器、屏幕、射频前端、摄像头模组、电池及充电等模块。5G 时代智能手机进行了全方位的升级，5G 旗舰手机的处理器性能大幅提升、采用高屏幕分辨率及高屏幕刷新率、射频前端模组化及复杂程度提升、摄像头模组升级、电池容量及充电功率增加，在此背景下，5G 手机对散热的要求进一步提高。根据 Wind

资讯的统计数据，2012-2020 年平板电脑出货量保持高速增长，虽然近几年略有下滑，但预计未来下降速度会有所缓和。随着硬件性能和可扩展性的不断提升，已经有部分平板电脑具有替代笔记本电脑的能力，但高性能平板电脑的散热问题仍需进一步解决。根据 IDC 发布的数据，预计 2022 年可穿戴设备市场可达到 1.9 亿台。Apple Watch 中具有医疗传感器、无线充电、压力传感器、触觉反馈、蓝宝石和 SIP 封装等技术特点，其中的无线充电、芯片等对散热都提出了更高的要求。可穿戴设备中的芯片、电池、屏幕等都会增加散热的需求。

表 2-1 5G 手机功耗和结构变化拉动散热需求

变化因素	5G 零部件升级	5G 相对 4G 导热增量需求
芯片计算效率提升	5G 芯片处理能力有望达到 4G 芯片的 5 倍，耗电达 2.5 倍	处理器、CMOS 图像处理器等芯片发热密度和热量绝对值明显增加
频段、带宽增加	5G 智能手机天线数量可达 4G 手机的 5-10 倍，数据速率、频段明显提升	天线、射频前端等器件对散热在工艺、材料、性能上提出更高要求
电磁信号强度高	玻璃、陶瓷等非金属材料机壳替代存在电磁干扰问题的金属机壳	玻璃、陶瓷等非金属材料导热能力、散热性能比金属差，需要数量更多、更有效的导热器件
防水性能升级	内部零部件与整机结构具有更高的密封性	封闭状态
轻薄化	内部器件集成化、模组化	内部器件更加紧凑、内部电磁信号干扰更严重，需要加强散热

屏占比提升、无线充电	全面屏、无线充电增加了散热量，减小了整机内部空间	散热需求增加
拍摄性能升级	后置双摄、三摄成为趋势，前置人脸识别采用结构光方案，手机发热模组和发热密度大幅提升	散热需求明显提升

### 2.1.2 5G 基站领域

基站架构包括 BBU(Base Band Unite 基带处理单元)和 AAU AAU(Active Antenna Unit, 有源天线), 4G 为 RRU(Remote Radio Unit, 射频处理单元)+天线。5G 基站引入 Massive MIMO 技术, 典型应用是 64T64R, 单基站典型功耗超过 3500W, 而 4G 基站主要采用 4T4R MIMO, 单基站典型功耗仅 1000W 左右。从基站功耗数据的构成来看, BBU 功耗相对稳定, 与所插板件相关, 受业务负荷的影响不大, 而 5G AAU 功耗相对于 4G 有 3 倍左右的提升, 因此在 5G 基站的推广过程中亟需更节能的器件及更有效的散热。

### 2.1.3 服务器/IDC 领域

CPU 散热关乎服务器性能、成本和稳定性。有发表在 “International Heat Pipe Conference” 研究论文指出, 服务器单个 CPU 核温每提高 10°C, 可靠性会降低 50%; 55% 的 CPU 宕机是因为过热; 服务器前部需要保持在 25°C 以下, 才能稳定工作。

目前, 用于服务器散热的空调因能源载荷高于 IT 设备, 已成为决定数据中心 PUE 的关键要素。根据 HP 统计, 数据中心的能耗中仅有 33% 用于 IT 负荷,

而整体散热能源负荷能耗却高达 63%，散热负荷已经远远超过了 IT 设备。目前，机房中散热空调的载荷主要来自主机设备（包括服务器、存储、网络等）、外部辅助设备，发热量约占机房总热量的 80%~95%。而在主设备中，服务器所产生的热量约占 80%左右。

数据中心是碳排放的重要来源。近年来，国家发布了一系列政策，快速推进数据中心绿色发展。政策主要手段为督促提高数据中心效率，降低数据中心 PUE。随着政策对 PUE 要求趋严，提高数据中心中的可再生能源比例和进一步提高制冷效率的重要性进一步提高。

## **2.2 通信电子领域散热设计解决方案**

### **2.2.1 热管和 VC 渗透到智能手机，5G 单机散热 ASP 显著提升**

传统手机散热材料以石墨片和导热凝胶等 TIM 材料为主，但是石墨片存在导热系数相对较低，TIM 材料存在厚度相对较大等问题。在手机品牌商的推动下，热管和 VC（Vapor Chamber）均热板开始从电脑、服务器等领域渗透到智能手机终端，并且在石墨烯材料持续取得突破，也开始切入到消费电子散热应用。相对而言，VC 和石墨烯的导热系数高，厚度薄，是散热材料的更优选择。

2020 年 2 月份发布的小米 10 系列手机采用了 VC 均热板+石墨烯+6 层石墨的“三明治”散热系统，大大提升了整机散热能力；三星 Galaxy S20 Ultra 采用 VC 均热板+石墨+高导碳纤维垫片的散热方案。2020 年 3 月发布的华为 P40 pro 手机采用 VC 均热板+3D 石墨烯的散热方案；VIVO NEX 3s、OPPO Find X2 采用 VC 均热板散热技术。综合来看，现阶段传统手机散热方案难以单独满足 5G 手机散热要求，以 VC 均热板为主、石墨及石墨烯等为辅的散热组合或成为主流散热方案。



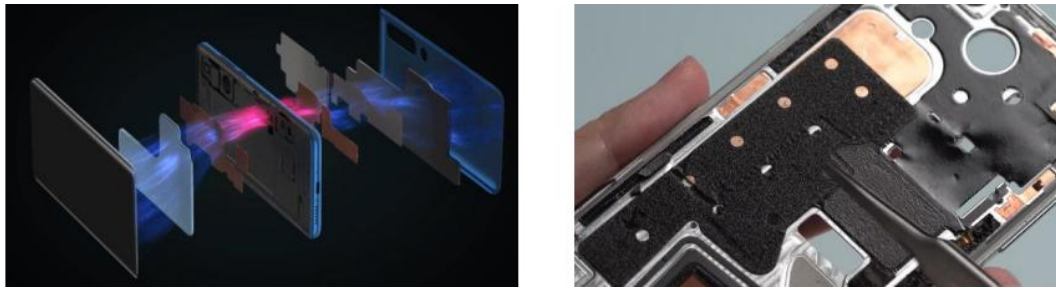


图 2-2 VC 和石墨烯的散热组合

### 2.2.2 半固态压铸件+吹胀板，5G 基站壳体价值量提升

目前主流的基站散热方案为:BBU 正面使用鳍片散热片覆盖 PCB，仅仅露出电源部分，背面使用金属散热片和热管/均热板，而内部使用导热界面材料(TIM)。AAU/RRU 由于功耗大幅增加，除了在内部使用 TIM 材料填充缝隙之外，还需要使用重量更轻、散热性能更好的压铸壳体，对翅片设计、壳体材料以及壳体压铸工艺都提出更高要求。为解决 5G 基站 AAU 的散热问题，可以从采用液冷散热方式、新型的散热材料、新型的结构设计方向入手。

基站热管/均热板等液冷散热模组具有诸多优势：导热速度快；可承受热流密度大，消除系统热点；不存在异种金属连接，反复的温度变化不会破坏连接；与热源面直接接触，减少接触热阻，宽度与长度方向任意调整。



图 2-3 用于基站散热的热管

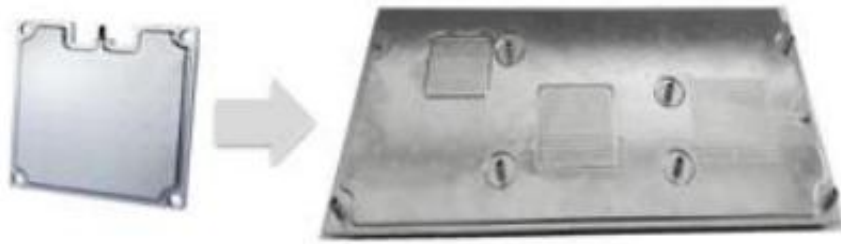


图 2-4 用于基站散热的 VC

半固态压铸件具有重量轻和散热性能好的优势，吹胀板具有热传导效率高、制冷速度快的优势，相比于传统的散热材料及方案，“半固态压铸件+吹胀板”有望成为 5G 基站 AAU 散热的主流方案。随着 5G 商用基站大规模建设的推进，将进一步驱动半固态压铸件和吹胀板散热市场规模的增长。

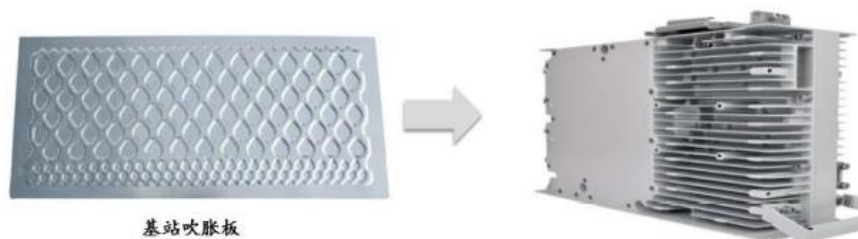


图 2-5 用于基站散热的吹胀板

基站厂商还可以采用新型结构设计来提升基站的散热能力。例如散热片结构中的散热齿，下部热量上部扩散，造成散热齿结构上部温度高，降低散热效率，成为散热瓶颈。中兴通讯采用独特的 V 齿结构设计，改进散热气流，使冷空气正面进两侧出，避免热级联，散热提升 20%，成为业界首创。华为也采用了独创的仿生散热技术——辊压接合散热齿，同样使基站的整体散热能力提升 20%。



图 2-6 新型翅片结构设计

### 2.2.3 液冷和两相传热技术有望成为服务器散热标配

我国大部分数据中心采用风冷技术进行降温处理，随着 5G 数据中心能耗密度提高，传统的空气冷却散热系统已不能完全满足服务器散热需求。之后，IDC 冷却技术也发展出了冷冻水自然冷、直接/间接蒸发冷却方案等方案，但直接与服务器接触的冷媒仍然是空气。下一步，液冷和两相传热技术将凭借低能耗、高散热效率、低噪音等优势有望取代风冷、成为主流。

液冷方案优势明显，海外云计算巨头逐步采用液冷技术。2018 年，Google 宣布将在其数据中心采用液冷技术，并表示今后其数据中心的降温方式将向液冷方向转变。微软、英特尔、IBM、HP 等公司也已经在液冷技术领域布局。目前，全球高密集度、高供电密度的超大型数据中心已逐渐采用液冷技术。根据咨询机构 IDC 预测，抛开传统的大规模数据中心不计，未来有大概 20% 的边缘计算数据中心也将采用液技术。Research And Markets 数据显示，到 2023 年，全球液冷数据中心市场规模将达 45.5 亿美元，年复合增长率将达 27.7%。国内外主流厂商都在推进液冷技术研究，除了美国的部分公司外，国内以曙光节能、阿里为代表的厂商也陆续推出了系列液冷产品。

表 2-2 不同冷却方式 PUE 对比

优势	指标	风冷	冷板式	浸没式
节能	PUE	1.6	1.3 以下	1.2 以下
	数据中心总能耗 单节点均摊	1	0.67	0.58
成本低	数据中心总成本 单节点均摊 (量产后)	1	0.96	0.74
	功率密度 (kW/ 机柜)	10	40	200
省地	主机房占地面积比例	1	1/4	1/20
CPU 可靠性	核温 (°C)	85	65	65
机房环境	温度、湿度、洁净度、腐蚀性 性气体 (硫化物、盐雾)	要求高	要求高	要求低

全浸没式液冷式服务器将成为未来技术大方向。液冷主要有冷板、浸没和喷淋 3 种技术路线，冷板式液冷目前已经得到了较多的商业应用案例（例如神威太湖之光），而全浸没式液冷将是超高能耗密度 IDC 发展的大方向。目前，国内液冷服务器标准得到了阿里、腾讯等云计算厂商的推动，中科曙光、浪潮信息等服务器厂商和以英维克为代表的温控解决方案商都纷纷跟进，近年来得到了快速发展。2020 年 1 月 6 日，ODCC 与阿里在北京举办了“浸没式液冷数据中心开源发布会”。会上，阿里宣布正式开放“浸没式液冷数据中心技术规范”，指出基于自主研发的液冷、深层水冷等技术，数据中心能效的整体节能效果超过 70%，浸没式液冷数据中心已经全面应用于张北数据中心，将每万笔电商交易的耗电量控制在 2 度电以内，实现“绿色双 11”的目标。

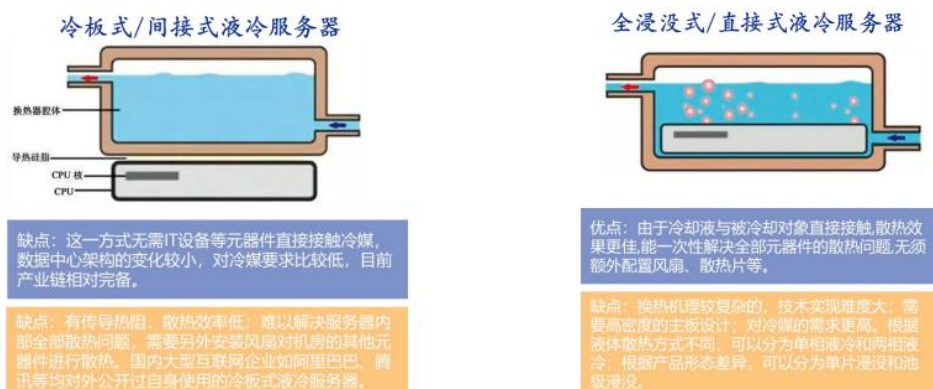


图 2-7 两种不同形式的液冷冷却方式

对于 230W 以上 CPU 功耗的服务器，基于 ThermaSyphon 的两相虹吸热管技术是解决在紧凑机架体积内高密度布置服务器单元的最佳手段。



图 2-8 基于 ThermoSyphon 的服务器散热系统

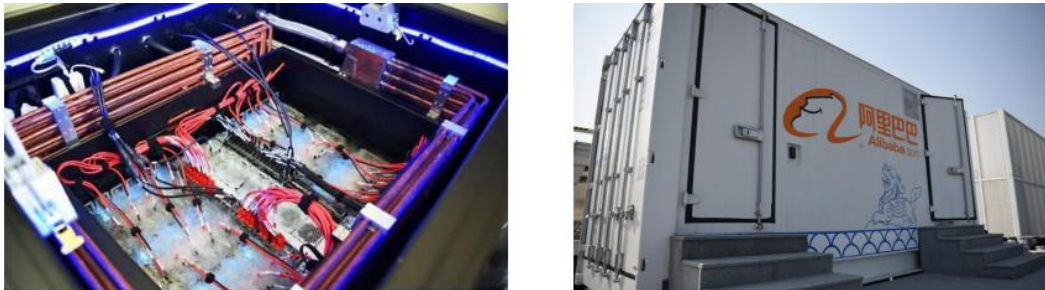


图 2-9 不同形式的两相冷却应用

## 2.2.4 导热材料主要用于解决电子设备的热管理问题

导热材料按应用方式分为两类，一类为导热界面材料，一类为导热传热材料。导热界面材料主要是应用于系统热界面之间，通过对粗糙不平的结合表面填充，用导热系数远高于空气的热界面材料替代不传热的空气，使通过热界面的热阻变小，提高半导体组件的散热效率，行业又称“热界面材料”。中电标协热管理工作委员会在 2021 年也发布了第一版《导热界面材料研究报告（2021）》，全面对导热界面材料进行了介绍。

传统的导热传热材料主要是金属材料，如铜、铝、银等。但是金属材料密度大，膨胀系数高，在要求高导热效率的场合尚不能满足使用要求（如银、铜、铝的导热系数分别为  $430\text{W/m.K}$ ， $400\text{W/m.K}$ ， $238\text{W/m.K}$ ）。导热石墨片具有独

特的晶粒取向，可沿两个方向均匀导热；其通过将手机发热的中心温度分布到一个大区域以便均匀地散热。相较于热管、均温板等散热材料，石墨散热膜具有柔韧性好、质量轻薄的性能优势，且易于贴合于摄像头模组、手机中框、芯片等各种电子元器件中。基于多元化、组合化的散热方案逐渐成为市场主流，多种散热材料协同运作的背景下，石墨散热膜仍是目前及今后主流散热材料，市场需求量可观。而增加石墨散热膜热通量则是其未来发展的主要方向之一

多层石墨片是当前智能机主流散热方式。石墨是一种良好的导热材料，导热性超过钢、铁、铅等多种金属材料。石墨片的工作原理是利用其在水平方向上具有优异的导热系数的特点（性能好的石墨片导热系数能达到 1500 - 1800W/m·K，而一般的纯铜的导热系数为 380W/m·K，高的导热系数有利于热量的扩散），能够迅速降低电子产品工作时发热元件所在位置的温度（热点温度），使得电子产品温度趋于均匀化，这会扩大散热表面积以达到降低整个电子产品的温度，提高电子产品的工作稳定性及使用寿命。智能手机中使用石墨片的部件有 CPU、电池、无线充电、天线等。

## 2.3 通信电子方向热管理行业观察小结

### （1）多元化、组合化散热方案逐渐成为市场主流

在 5G 时代，作为基础散热材料的石墨散热膜，可与热管、均温板、石墨烯散热膜等高效散热材料搭配使用，在高端智能设备市场发挥巨大优势，且不断向中低端智能设备渗透。未来，电子产品、5G 基站、大型服务器等设备的散热方案均将朝着多材料、立体化的组合散热方式继续迈进，逐渐演变为多种材料“协同运作、并驾齐驱”的散热模式。

### （2）石墨散热膜未来仍为主流散热材料，市场需求可观，并朝着高热通量

## 方向发展

材料的热通量是指单位面积的材料在单位时间内所传递的热能。通常情况下，材料厚度越大，单位时间内可传递的热能更多，其热通量也就越高，散热效果越好。通过增加石墨散热膜厚度进而加大热通量的方法能较好匹配 5G 时代高功率电子设备的散热需求。石墨散热膜由于材料特性，本身厚度薄、质量轻，最大厚度也不及热管、均温板的 1/2，因此增加石墨散热膜厚度提高材料热通量，既不会影响电子产品轻薄便携、美观的形态要求，还可以进一步提升各元器件和整机的散热效率，增强电子产品可靠性。高热通量石墨散热膜是 5G 时代极具性能优势的散热材料之一。

通过增加材料厚度提高热通量通常可采用两种途径，一种是将常规石墨散热膜反复粘贴胶带叠加在一起，但由于胶类材料热阻通常较高，导致多层石墨膜散热效果并不理想；另一种则是采用超厚 PI 膜通过特殊工艺烧制而成，无需使用胶带粘合，生产的高热通量的厚石墨膜具有更好的散热效果。

制作高热通量的厚石墨散热膜不仅要求原材料 PI 膜到达相应厚度，同时还对生产商核心技术的掌握程度、生产工艺的熟悉程度以及操作人员的专业素质都有着较高要求。

### (3) 热管及均温板渗透率不断增加，并朝着超轻、超薄、高强度方向发展

随着电子产品朝着超轻、超薄化的趋势演变，将热管和均温板的厚度控制在合理范围且仍保持优秀的散热效果将面临极大挑战，尤其在生产工艺上，需要保证其内部拥有高毛细力与一定的内腔空间以供液体和蒸汽充分循环流动，维持良好的散热效果。对于热管，在压缩厚度并维持高性能同时，不仅需要选择合适的毛细结构，同时还需要保证工作中蒸汽的传播速率，例如利用凹槽型毛细结构设

计并在狭小的内腔中开辟新的通道,使得工作时蒸汽流动通道加大同时也进一步降低整体厚度,这对生产商的技术储备以及设计能力都有着极高的要求。而降低均温板的厚度条件通常更为苛刻,一方面,均温板制作工艺复杂、精细化程度较高,厚度越薄,则铜片封合的间隙越难掌控,封合阶段的良品率也就越低;另一方面,均温板厚度越薄,意味着其内部毛细通道与蒸汽通道空间越小、蒸汽的有效传播距离更短,均温板的工作性能也将损失更多。因此,生产商封合技术的先进性以及对内部蒸汽通道的合理设计将成为制造高强度超薄均温板的关键。

#### (4) 拥有优质特性和成本优势的石墨烯膜将成为极具竞争力的散热材料

石墨烯拥有其他材料所不具备的特殊性能,如优异的电学性能、出色的机械性能、超高的导热性、优异的阻隔性能等,可运用于能源、环境、电子、化工等多类行业,具备良好的发展前景。

由于石墨烯在面内方向是各项同性的,在平面内的热传导不会存在方向性,通过独特的加工工艺,可得到任意厚度(特别是超厚)的石墨烯散热膜。石墨烯散热膜导热效率实验可达  $5300\text{W/m}\cdot\text{K}$ ,因此将石墨烯用于散热材料领域,开发新型石墨烯散热薄膜为大势所趋。

此外,石墨烯散热膜还具有良好的耐弯折性及柔韧性,在折叠屏、柔性屏等智能设备散热方案中占据优势,是未来极具竞争力的散热材料。

石墨烯散热膜系通过氧化还原天然石墨得到原材料后加工制成,相较于石墨散热膜,在材料成本方面更具优势。但由于目前石墨烯加工工艺复杂,对设备投资、研发实力、人员技能的要求较为苛刻,能熟练掌握全套生产工艺的厂商较少,产品良率偏低。同时,由于产线前期投资较高,产品规模效应尚未凸显,目前产品单位成本普遍偏高。未来,随着加工工艺不断优化与改进,石墨烯散热膜的生



产质量将进一步得到保障，产、销量持续扩大，成本优势逐渐体现，成为极具市场竞争力的新型散热材料。

### 3 新能源汽车热管理行业观察

#### 3.1 新一代汽车热管理需求

汽车热管理系统的作用愈发受到重视。早期汽车研究中并没有热管理这个细分领域，与之相关的主要有调节车舱温度的空调系统，帮助发动机降温的冷却系统等等。后来汽车消费者逐渐提高对空调的舒适度要求以及对节能降费的要求，国家也逐渐提高对油耗排放等要求；而且，在汽车电动智能化浪潮下，新能源汽车高速发展，而新能源汽车的续航和安全等问题尤为突出，汽车热管理显得越来越重要，因此未来热管理行业需求的确定性高。

表 3-1 汽车热管理的意义

对象	热管理的意义
国家	热管理系统能够减少碳排放，节约能源，对国家的碳达峰、碳中和目标具有重大意义。
汽车企业	新技术的开发能够增强企业的竞争力和自身价值，同时能够更好的适应新的节能减排大环境下国家的政策和指标要求。
消费者	汽车安全性提升，能耗减少，同时能够提供更加舒适的驾乘环境。
新能源车主	热管理系统可以使汽车的电池等核心部件的性能维持在最佳工作区间内，大大改善车主的使用体验。

相比传统汽车的热管理系统，新能源汽车热管理系统更为复杂，同时在系统效率，控温精度方面也有了更高的要求。

传统汽车的热管理系统，基本围绕其动力系统展开，主要包括发动机冷却系统以及主要利用发动机余热和动力进行制热/制冷的空调系统。

而相比于传统汽车热管理系统，新能源汽车的热管理系统脱离传统“三电”，并且没有发动机余热可以利用，更多依靠 PTC 和热泵，同时电池的工作特性也对新能源汽车热管理的控温精度提出了更高的要求。

新增系统、提升效率、精细温控三个因素使新能源汽车热管理系统架构发生变革



图 3-1 新能源汽车热管理系统的结构性升级

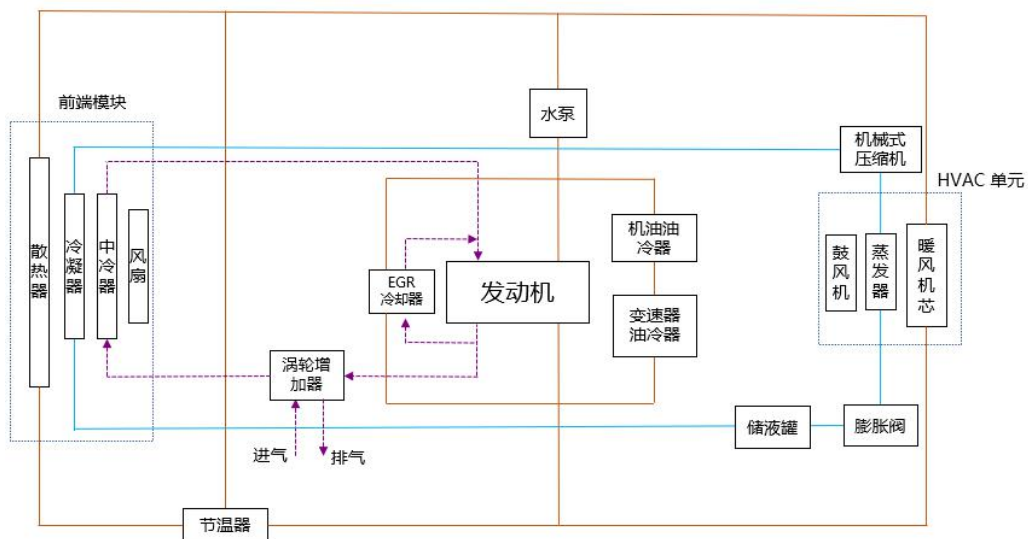


图 3-2 传统汽车热管理系统

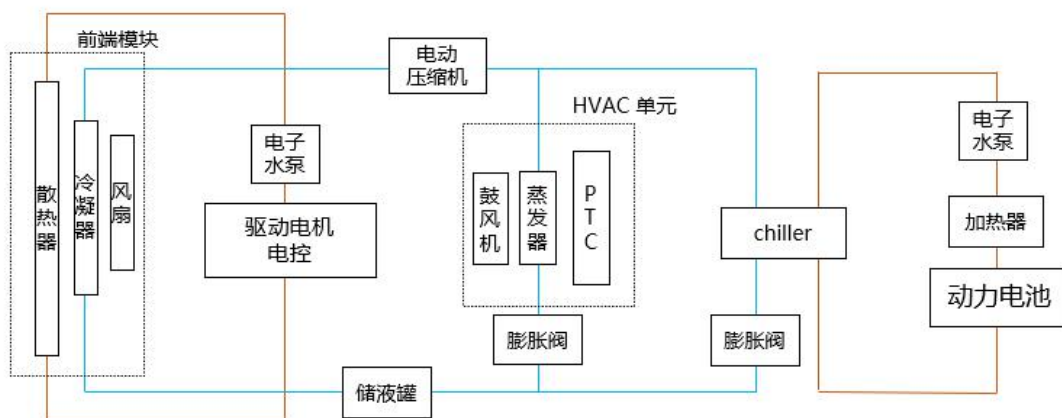


图 3-3 新能源汽车热管理系统

## 3.2 新能源汽车热管理系统发展

### 3.2.1 电池热管理

电池热管理是新能源汽车热管理系统的核心。电池高效工作温度范围较窄，热管理系统是维持电池性能和安全性关键。动力电池能完全发挥性能的温度范围通常为  $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。温度过低，电池充放电功率性能下降，整车表现出动力不足、续航缩减；温度过高会产生电池热失控风险，威胁整车安全。

电池的“木桶效应”要求温控均匀一致。动力电池是由大量电池单体串并联组成的。整体的电压、容量等易受某个“短板”电芯的影响。一个单体发生热失控不但导致电池故障，甚至引发整个电池热失控。为保证电芯性能的一致性，电池热管理系统通常需要设计复杂、精细的冷却回路，布置多个温度传感器，维持电芯温度的一致性。

目前常用的电池散热系统主要有风冷式和液冷式。随着电池容量、功率提升，高效的液冷已经成为主要的电池冷却方式。

液冷采用冷却液（或称为防冻液，如乙二醇等）作为换热介质，其传热系数高于空气，换热效果更优。动力电池常用的液冷方案为：动力电池冷却液回路与

空调回路并联耦合，通过换热器（Chiller）对冷却液降温，低温的冷却液流经电池从而为电池散热。在电池内部，电芯间通常布置冷却板。冷却液流经冷却板内的精细流道，把电芯的热量带走。

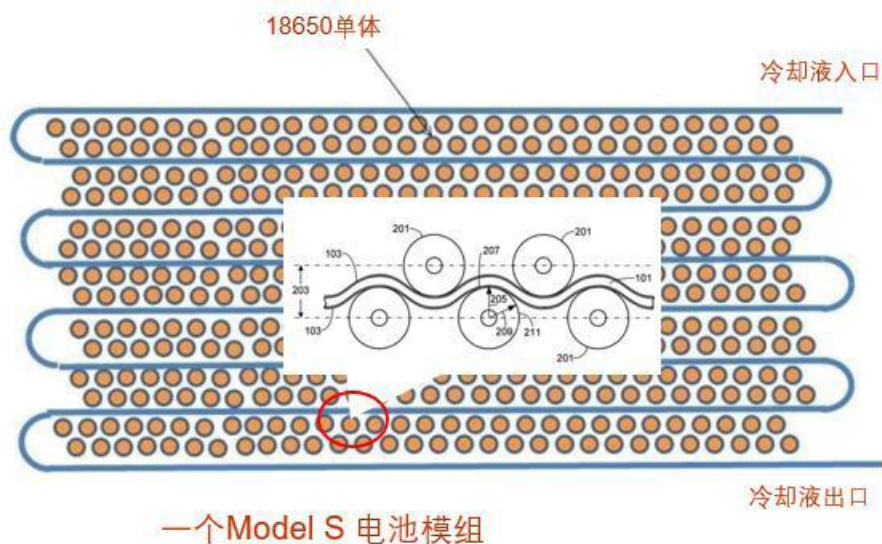


图 3-4 特斯拉 Model S 电池控温系统

风冷系统较为传统，在国内使用较多。按照技术类型主要分为被动式风冷系统与主动式风冷系统。被动式风冷系统指的是汽车行驶时自然吸入外部环境空气或驾驶舱内的空气与电池形成对流带走热量。主动式风冷系统通常是利用空调系统蒸发器和电池包专用蒸发器对外部环境空气处理后进入电池包完成冷却或加热。

风冷系统的特点系结构简单、成本较低，但热管理的效果相对一般，主要应用于早期的乘用车及大巴车等。

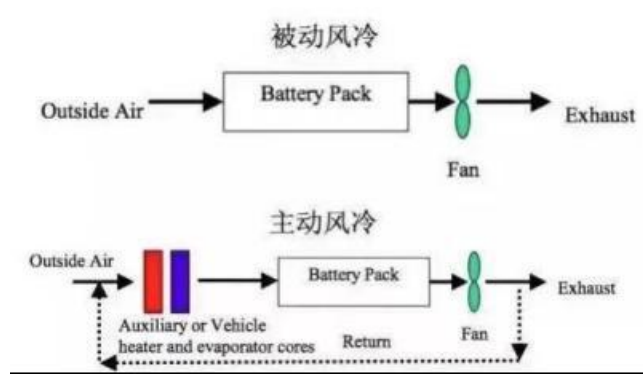


图 3-5 电池风冷系统

### 3.2.2 空调系统的趋势

目前新能源汽车的空调系统主要有两种，PTC 空调和热泵空调。

表 3-2 两种主要的空调系统

技术	主要部件	优点	缺点	应用车型
热泵	压缩机、四通换向阀	效率高	系统复杂、低温适应性差	Model Y、BWMi3、Prius、ZOE、蔚来 ES6
PTC	PTC 加热器	成本低	电能消耗大	Model X、Bolt、EC220、iEV6E

PTC 是 Positive Temperature Coefficient 的缩写，意思是正的温度系数，泛指正温度系数很大的半导体材料或元器件，简称 PTC 热敏电阻。PTC 技术的基本原理是给陶瓷/电阻丝等热材料通电，从而产生热量，给舱内供暖。如果热量不够，可通过增加电阻数量或者加大功率的方式提高产热量。

PTC 空调具有恒温发热特性，其原理是 PTC 加热片加电后自热升温使阻值升高进入跃变区，PTC 加热片表面温度将保持恒定值，该温度只与 PTC 加热片的居里温度 and 外加电压有关，而与环境温度基本无关。PTC 空调中所用的 PTC

陶瓷发热元件，由若干单片并联组合后与波纹铝条经高温胶结组成。该类型 PTC 加热器有热阻小、换热效率高及长期使用功率衰减低的优点，而且安全性能较好，即遇风机故障停转时，PTC 加热器因得不到充分散热，其输入功率会自动急剧下降，此时加热器的表面温度维持在居里温度左右(一般在 250°C 上下)，从而不致产生如电热管类加热器的表面“发红”现象，安全事故发生的概率较低。

PTC 的特点是成本低、结构简单、出热快、受外界环境影响小，因此从入门车到高端车都普遍在使用。PTC 加热器的整体外形轻巧，在整机内装配极为便捷。

PTC 空调的不足是明显影响车辆续航。因为它需要耗电发热，所以直接影响车辆续航，随着外界温度降低，PTC 的电阻值随之减小，电流通过电阻产生热量，其制热能效比(COP)最大值不超过 1，也就是说 1kW 电量最多可产生 1kW 热量，试验表明，当冬季行驶时打开暖风，全程至少消耗三分之一电量，功率越大耗能越大，时间越久耗能越大，冬季续航里程会受到极大的影响，这个不足在续航能力较差的新能源汽车上显得尤为明显。



图 3-6 新能源汽车 PTC 空调系统

热泵系统采暖/制冷时，低温低压的气态制冷剂在压缩机内被压缩成高温高

压状态后，制冷剂流入内/外部换热器，向车内空气/车外环境放热，变为高压液态，然后流过储液干燥瓶，除去水分和杂质，再经过膨胀阀转变为低温低压气液混合态，最后经过外部/车内换热器从车外/车内吸热变为低温低压气态并进入下一个循环，车内空气流经车内换热器吸热升温/放热降温，实现车内采暖/降温功能。

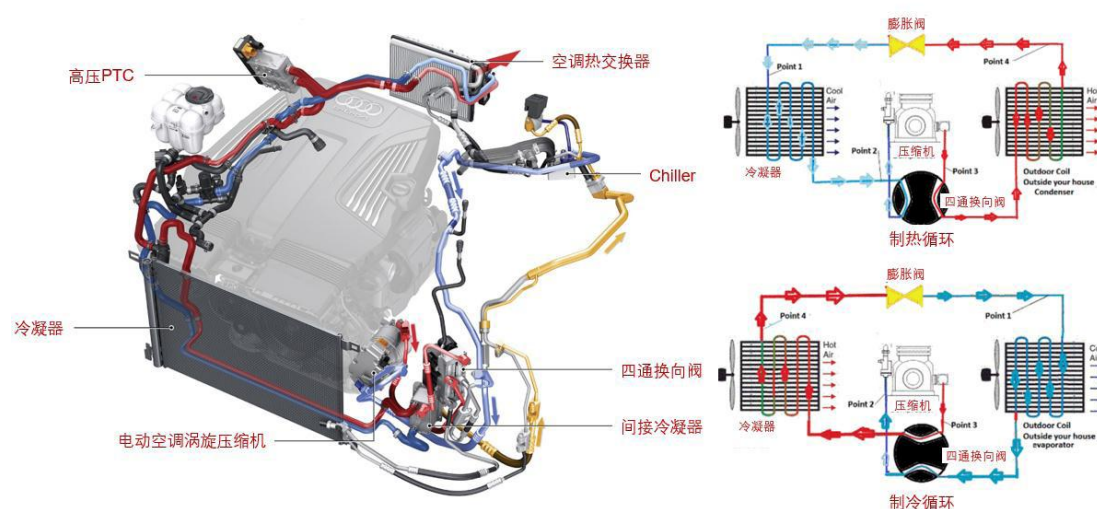


图 3-7 热泵空调系统

热泵式空调系统通过热泵技术实现对汽车内部的制热，其高效的制热能效比符合新能源汽车的发展方向，而且热泵式空调系统的驱动方式是电动压缩机，具有独立的能源提供方式，热泵式空调系统对新能源汽车的运行状况并无明显影响。因为客舱获得的热量=消耗的电能+外界吸进来的热能，那么热能效比 COP（吸收的热能+消耗电能）/消耗电能）一定大于 1，让 1kW 电功率能够达到 1.5kW 甚至 2kW 的热量。

热泵空调的制热效率相对于 PTC 空调要高，有较好的前景。热泵空调系可提升整车电能利用效率，改变纯电动汽车在低温环境下续驶里程大幅缩减的现象。其基本原理为利用四通阀使热泵空调的蒸发器和冷凝器功能对换，从而改变热量的传递方向，来实现制热的目的。由于热泵空调相对高效节能，新能源汽车未来

可能采用热泵空调为主。

热泵系统可以把热量从温度低的地方搬到温度高的地方。主要是把外界环境中的热量收集起来，蒸发吸热，液化放热。在夏季，热泵系统把车内的热量搬向车外，达到制冷效果。在冬季制热时，把车外的热量送到车内。比 PTC 节能很多，大约能节省 30%-50%的空调功耗。主要的零部件是压缩机、泵体等。

不过，热泵的渗透率难以达到 100%，因为在对制暖需求不高的地区，热泵空调不具备性价比。另外，即使采用热泵空调，PTC 短期依然难以被完全替代，因为：1) 当前，仅靠热泵难以满足除霜除雾的强制标准，PTC 仍然是当前新能源汽车的标配；2) PTC 具有成本优势。

### 3.2.3 电驱电控系统热管理

电机和电控（逆变器、充电机、DCDC 等）是新能源汽车一大发热源。在高功率输出和充电情况下电机绕组和 IGBT 会产生大量热，若热量不能及时散去，电磁、电子元件在高温下性能和寿命下降，最终致整车性能减弱甚至引发故障停机。

与传统汽车发动机冷却系统相似。电机冷却主流方式是液冷，部分高性能车采用油冷式。在大电流下，电机内耗以热量方式急剧增加。如果电机在大电流工况下运转得不到有效的冷却，电机的内部温度不断升高，会导致电动机效率下降。如果温度过高，就会造成内部烧蚀甚至击穿导致电机损坏。根据介质种类，电机冷却系统分为空冷、水冷和油冷。空冷即风冷，散热能力有限，通常用于功率不高的微小型电动车。水冷是目前电机的主流散热方式。冷却液通过流经电机壳体带走热量。不过，转子、绕组、定子等内部元件的热量需经过层层部件传导至外壳与冷却液热交换，传递路径长，存在温度梯度，散热效率低，易形成局部热点。



油不导电、不导磁、导热好，可作为介质直接冷却电机内部部件。油冷方式需要增加一个油冷却器使油与冷却液进行热交换。油冷系统复杂，技术难度大，成本高，目前除特斯拉外应用并不多。

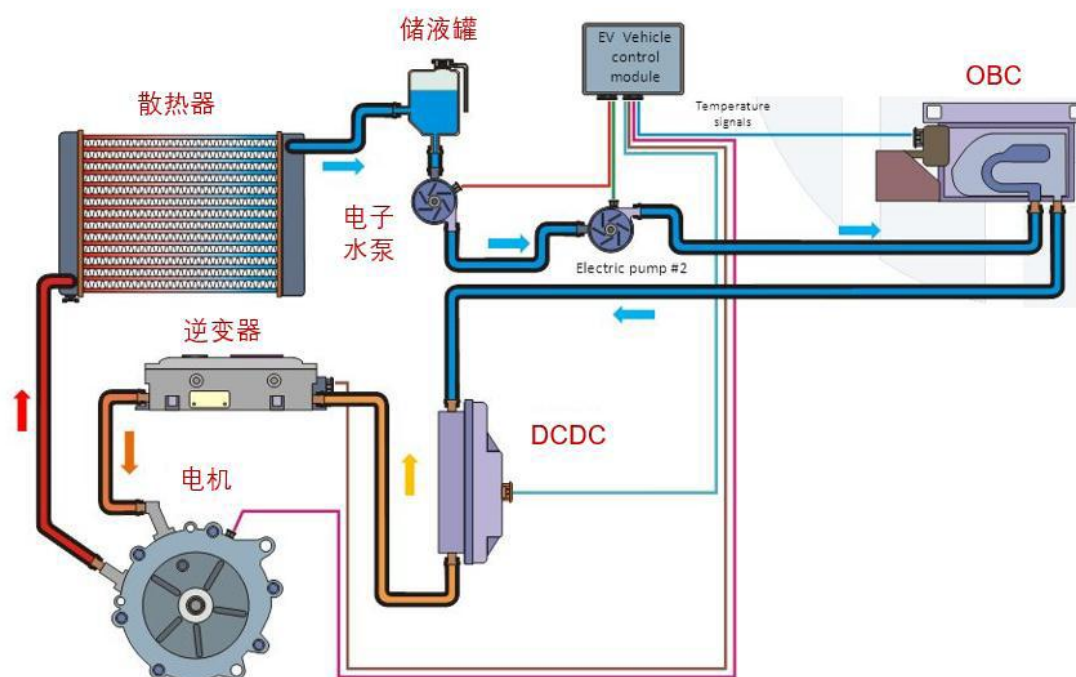


图 3-8 电机电控冷却系统

电控系统的发热部件主要来自 IGBT 等功率元件。对电机高功率的追求和对电控系统紧凑化设计的要求向电控系统尤其是功率元件的散热提出更高的挑战。目前，通常把电控系统和电机串联在一个冷却回路，通过散热器散热，架构与发动机散热系统相似。

### 3.3 新能源汽车热管理行业展望

目前汽车市场上新能源汽车爆发式增长，助力汽车行业景气向上。2021 年 1 月中国新能源汽车销量为 17.9 万辆，同比增长 238.5%，销量快速爆发，新能源汽车市场成为汽车市场复苏的主要驱动力。



图 3-9 中国新能源汽车月度销量 (中汽协数据)

未来,中汽协预计 2021 年汽车总销量达 2630 万辆,同比增长约 4%;2025 年国内汽车销量有望突破 3000 万辆,估计 2020-2025 年的年复合增长率为 3.5%。

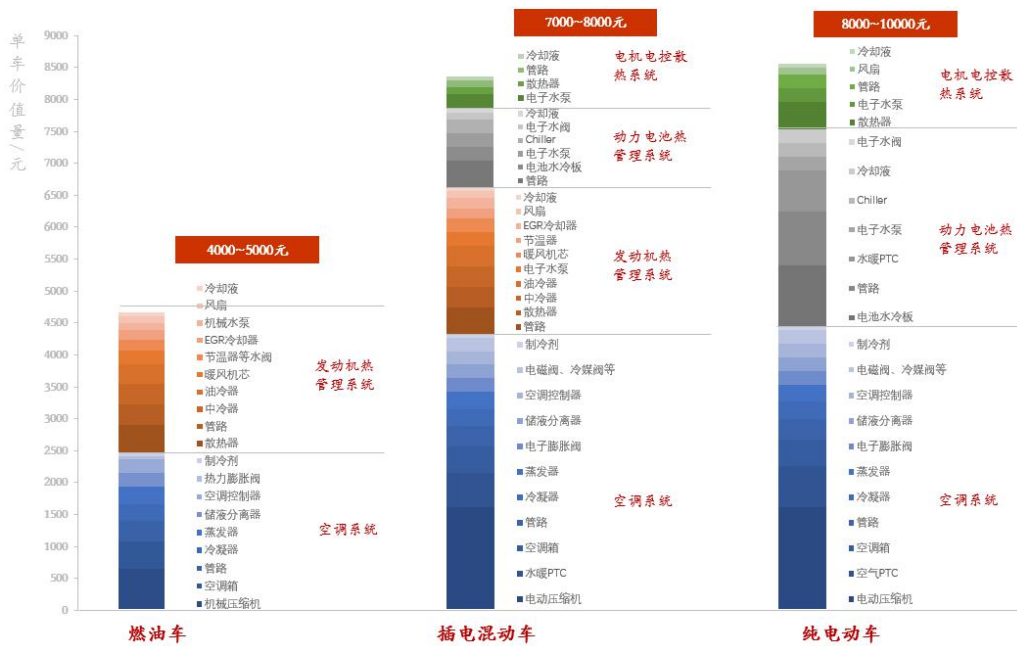


图 3-10 传统汽车与新能源汽车单车热管理系统价值对比

同时,新能源汽车热管理系统相比与传统汽车的更为复杂,也决定了新能源汽车热管理系统的价值更高,在整车制造成本中所占的比例将会提升。

总体来看,新能源汽车总体销量在未来将会保持持续增长的趋势,与此同时,

具有更高价值的热管理系统，将助力新能源汽车热管理市场实现快速增长、量价齐升。

## 4 总结

在碳达峰、碳中和背景下，热管理技术作为助力企业绿色转型的重要手段，对工业各领域的长期趋势产生深远的影响，热管理行业即将迎来新的发展机遇。本文从电化学储能领域、通信电子行业、新能源汽车三条思路出发，介绍了双碳加持背景下对热管理行业产生的新需求以及新技术方向，可供相关专业人员参考。

# 目录

电子产品热管理现状和技术方向思考——可触摸类消费电子篇	2
1 引言	2
2. 可触摸类消费终端散热现状概述	3
3 散热预想	8
3.1 散热外设	8
3.2 进一步提高集成度，加大散热空间	10
3.3 微通道冷却系统	11
3.4 热池	13
4 总结	14

# 电子产品热管理现状和技术方向思考——可触摸类消费电子篇

陈继良

工作单位：热设计网 E-mail：leonchen@resheji.com

摘要：电子产品热管理问题正变得越来越严峻。热物理定律的限制和产品热失效机制特征，使得温度控制问题在很快的时间内从一个几乎不需要考虑的因素上升到产品设计的核心难题。本文概述了当前可触摸类消费电子产品常用的热设计方案，并结合当前技术特征，对未来可能出现的热研究方向提出了猜想。

## 1 引言

清洁能源、5G 万物互联、人工智能是当今普遍认可的社会演进方向。在实现这几个愿景的过程中，要解决海量的科学难题。其中，热管理问题是这三个方向共同面临的难题：清洁能源中，风力发电机、光伏逆变器需要温度控制，电动车中的热管理系统甚至是决定汽车安全性的核心技术；5G 基站、终端产品的热问题更是直接影响使用体验，近乎成为每个商家在宣传产品时重点强调的技术点；人工智能需要巨大的算力支持，元器件发热量急剧加大，间接液冷甚至浸没冷却已经在数据中心广泛使用。援引英特尔在 2010 年半导体热管理会议上的数据（下图 1），单芯片功耗在 16nm 工艺制程时已经达到了 700W，热流密度甚至已经超过  $2.0\text{W}/\text{mm}^2$ 。这意味着为了达成温度目标（通常在  $100^\circ\text{C}$  左右），外部的散热手段要在数十度的温升前提下在硬币大小的面积上每秒钟转移数百焦耳的热量。

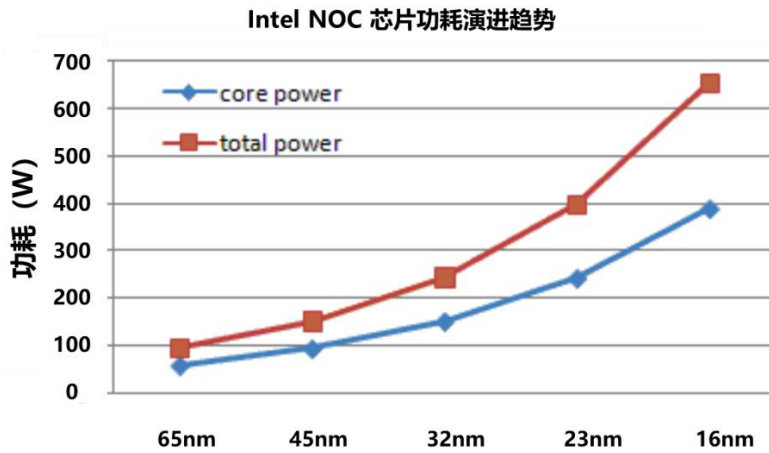


图 1 不同工艺制程下 Intel NOC 芯片的功耗值[1]

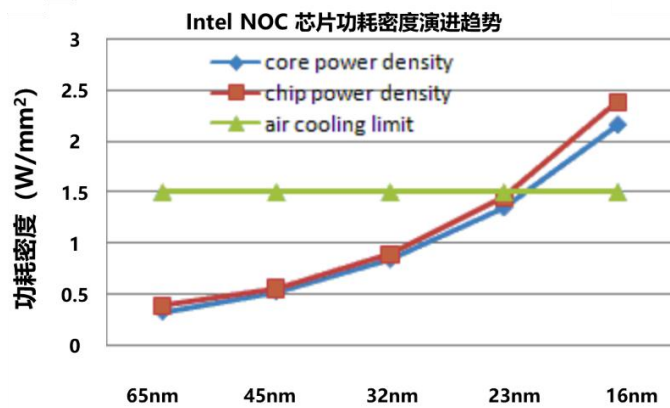


图 2 不同工艺制程下 Intel NOC 芯片的功耗密度值[1]

手机、平板电脑等可触摸类消费电子产品的综合热流密度虽然不高，但其温度设计空间小（通常在 20°C 左右），散热手段受到空间、噪声、电磁信号等影响和限制，热设计难度也非常大。受制于此，电子产品的热设计正迅速从数年前的毫不关注到现出全方位设计的方向演进。

## 2. 可触摸类消费终端散热现状概述

热设计是一门应用型学科，热设计方案在产品中体现为热管理相关物料的选型、组合和摆放形式。当热设计工程师掌握了基本的温度控制思路，产品温度表现实际取决于材料或散热部件的热物理性能。随着产品的智能化和使用场景的复杂化，热设计方案还包含软件控制算法，使设备性能和产品散热能力之间建立匹配关系，确保温度和性能的平衡，但这不在本文的讨论范围内。

消费电子终端的散热目标包括但不限于如下两个：

- 1) 表面温度不超温，保证触摸体验
- 2) 内部电子元器件温度合理、安全

产品表面温度很大程度影响了人体接触感受（粗糙度、硬度等也会影响），这种感受取决于人体皮肤的构造，具体感受取决于传入热流的速率对人体皮肤产生伤害的可能性。

表 1 不同表面材质、不同连续触肤时间下的烫伤温度阈值（℃）<sup>[2]</sup>

表面材质	在不同连续触肤时间下的烫伤温度阈值（℃）		
	1 min	10 min	≥8h
金属表面	51	48	43
陶瓷、玻璃或石头	56	48	43
塑料	60	48	43
木材	60	48	48

人体本身是一个温度高度敏感的对象，要求恒温在 37℃附近。其控温方式除了外部的

衣物，内部是一个高度精密的相变液冷系统。如下图所示，人体皮下组织中含有血管，血管内的血液能够起到转移热量的作用，而皮下组织上方的真皮中则有大量的温度感受器。过高的温度和过低的温度都会使得人体机能紊乱。当外部设备传入的热流人体无法经过皮下组织中的血管有效解决时，就表现为温度上升，真皮内的温度感受器识别到这一信号，就反馈为疼痛，让人体有离开热源的冲动。人体的这一反应有些类似于产品的降频或关机保护机制。因此，人体对表面的烫感，与传入热流的效率、人体内部移热效率、表皮的厚度（不同部位的表皮厚度不同，而表皮内没有温度感受器，相当于隔热层）有关，与被触碰表面的温度没有直接关系。故而，不同材质的表面，即使温度相同，人手触摸时烫感也有很大差异。

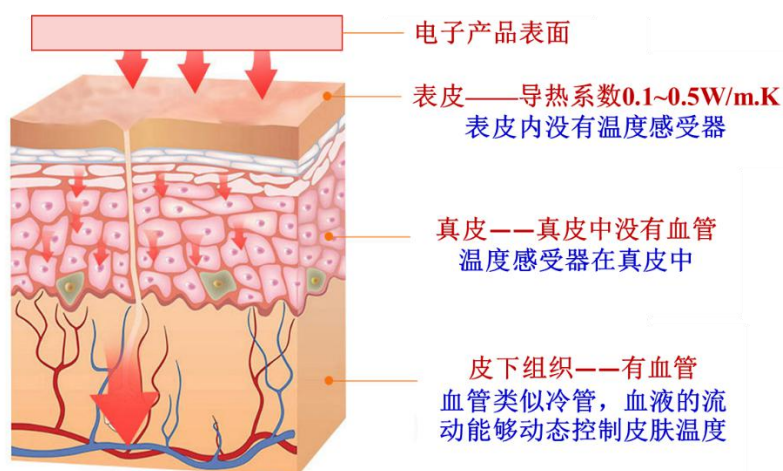


图 4 人体皮肤构造的热设计解读[3]

人体进化缓慢，并不会在短时间内因为电子产品的温度控制问题越来越难而适应更高的表面温度。因此，表面温度的控制，仍将是可触摸类电子产品的关键热设计挑战。

从传热学角度入手分析，电子产品的散热难度取决于内外两个因素：

内：产品发热量和温度控制目标值

外：可用的散热手段

以手机为例，内外两个方面的特点都决定了产品散热难度的逐年提高。下图中展示的功



耗趋势仅统计到 2018 年，其功耗最高约为 5W，实质上，受限于空间和材料热特性，2021 年主流的机型，其功耗上限仍然在 5W 附近，但芯片实际功耗上限远不止 5W，也就是说，从某种程度上讲，热设计技术限制了芯片性能的发挥。



图 3 手机热设计面临的挑战：功耗增加，外观要求越来越高，散热空间愈加狭小<sup>[4]</sup>

已知的热量传递方式就只有与热传导、热对流和热辐射三种（第四种传热方式理论刚刚被发现，即使属实，其所作传热贡献在电子产品的应用场景中也微乎其微，本文忽略[5]）。随着电子产品散热问题愈加突出，消费类电子产品的热设计呈现出立体化、材料的组合应用趋势。以手机为例，其散热路径可简化如下图所示：

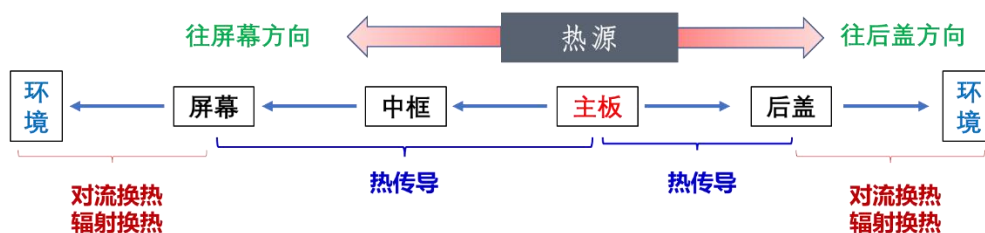


图 4 手机热流路径<sup>[3]</sup>

我们以消除某个面的局部热点这一问题为例，采用的手段有如下几种：

- 1) 使用高导热材料将局部热量扩散开，降低局部高温；
- 2) 使用隔热材料，阻止热量传递到此方向；
- 3) 使用高导热材料，将热量拉往相反方向，间接降低通往此面的热流；
- 4) 使用储热材料，当热量不可避免地传递至此点时，延缓温度上升的速率

在消费电子终端产品中，这四种方式正在被组合使用。散热物料明确地朝轻薄、高导热、高辐射率等方向发展。

手机的主要发热源为中央处理器、功放芯片、电源管理芯片、摄像头模组等，热量相对集中且在不同场景下分布有极大差异。内部热量只能通过前屏以及后壳散失到空气中（四周面积较小，实际也有贡献）。屏幕和后壳都是重要的人手接触面，下图示意了常见的手机散热构造，通过控制散热物料施加位置、施加面积以及和热源的结合方式，来控制热量的传递方向和传递效率。

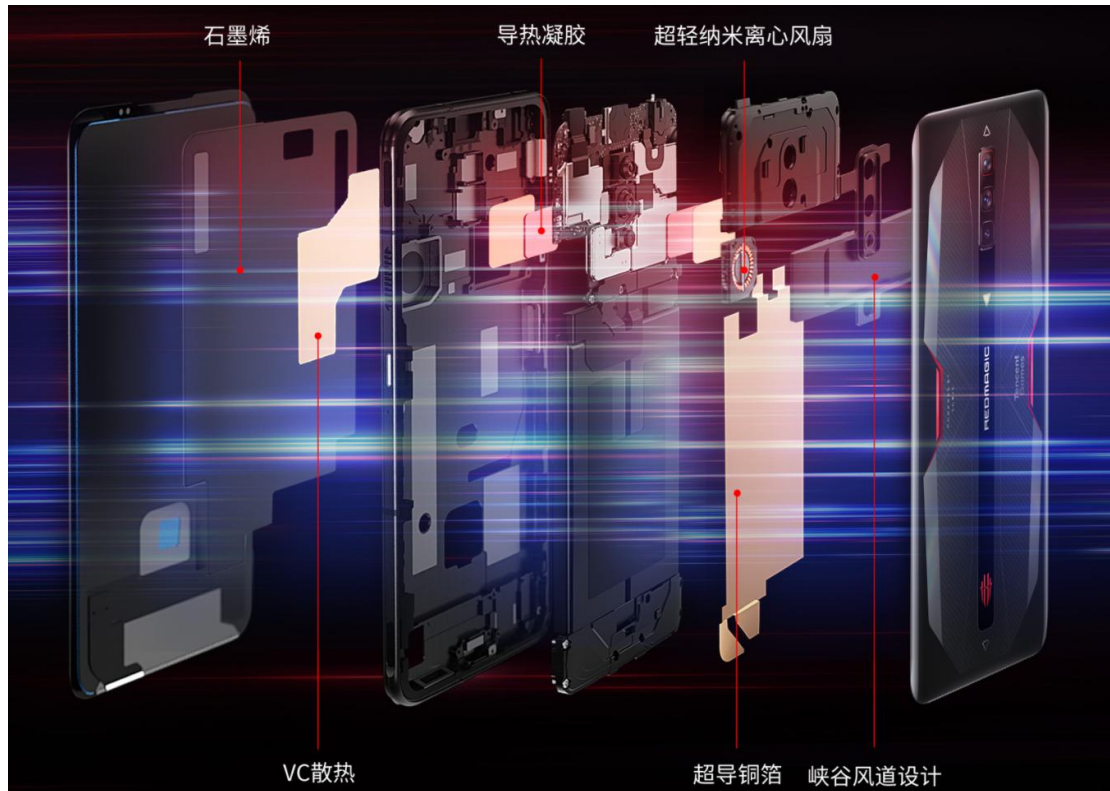


图 5 某品牌手机内部散热法案示意了当前手机中常见的散热物料：导热凝胶、石墨(烯)膜、均热板、铜箔等<sup>[6]</sup>

手机、平板电脑等产品的现行热设计思路已经能找到大量资料，此处不再赘述。为了克服当前的功耗瓶颈，我想结合产品基本特征和传热学限制，提几点预想。这些预想未必正确，且需要从材料、工艺、电子等多方面努力才可能实现，供行业学者、研发人员参考。

### 3 散热预想

#### 3.1 散热外设

散热外设的诞生源于智能设备在不同使用情境下散热需求差异极大。我们仍以手机为例：录制视频时，摄像头模组热量很大，而运行游戏时，摄像头根本不工作但中央处理器功耗很高，但在浏览网页或处理文本信息时，整个手机的热量需求很小，待机状态下发热量更是微乎其微。

当工程师参考最恶劣的场景来设计手机时，要保证各个元器件在所有工况下温度都能受

控,产品很可能会被做的非常笨重,但这些为极限工况准备的设计在大多数情况下都用不到。

散热外设的出现比较有效地解决了这个难题:当在极限工况时,可以通过施加外部移热手段来辅助降低设备温度,不需要时,外设可以被方便地移除。

从热设计角度上看,散热外设本质上是空间和能量的外拓。它使用原设备之外的空间和能量(许多时候还涉及到会产生噪音)来实现更强的温控能力。

目前,消费终端领域,散热外设基本分为三类:

- 1) 主动类:有风扇、泵、半导体制冷片等能耗部件,高效地转移热量,比如当前盛行的手机散热背夹,如图 6 所示;
- 2) 被动类:夹套、保护壳、支架等无能耗部件,通过利用材质本身的高导热系数或改变被保护产品本身的放置状态,来强化散热,如手机壳、笔记本无风扇支架等,如图 7、图 8 所示;
- 3) 混合类:既改变产品放置状态,又通过能耗部件促进散热,笔记本电脑的带风扇散热支架是典型代表。



图 6 某品牌手机散热背夹,包含风扇、半导体制冷片[7]



图 7 某品牌散热手机壳及其内部堆叠[8]

热量传递效率受到材料热物理性质、空间尺寸、热量分布等影响，其中空间尺寸必然会被持续压缩，而热量的大小和分布也正趋向于使得散热问题更加难解的方向演进。材料的热物理性质固然可以通过技术工艺来改进，但其涉及到基础原材料的进步，非常困难且缓慢。另外，当材料热物理性质到一定程度，再去提升，对于改善综合散热效率的贡献会逐渐衰减。有理由相信，散热外设是解决当前智能终端散热难题很现实的方向。从技术上讲，散热外设由于使用了外部空间，其灵活性大大提升，完全可以将过往的风冷、液冷经验再填充到外设中去尝试。

### 3.2 进一步提高集成度，加大散热空间

提高集成度，对散热而言是一把双刃剑：一方面，它可以腾出空间，使得散热方案灵活性增强，另一方面，它使得热量更加集中，扩散热阻对温度的影响变得更大。

自屏蔽封装(图 8)、类载板技术、3D 封装(图 9)等都在尽可能提高电子元器件的集成度且已经大规模商用。但类似于材料性能提升，其对散热的贡献也存在边际递减效应。而且，

即便不考虑其热量集中带来的温度恶化问题,其本身的技术进步对能够争取到的空间效益也在减小。从热设计角度考量,这中间存在一个平衡点:提高集成度带来的散热空间被充分利用导致的散热优化幅度,刚好可以解决热量集中带来的温度恶化效应。



图 8 自屏蔽技术带来的空间改善[9]

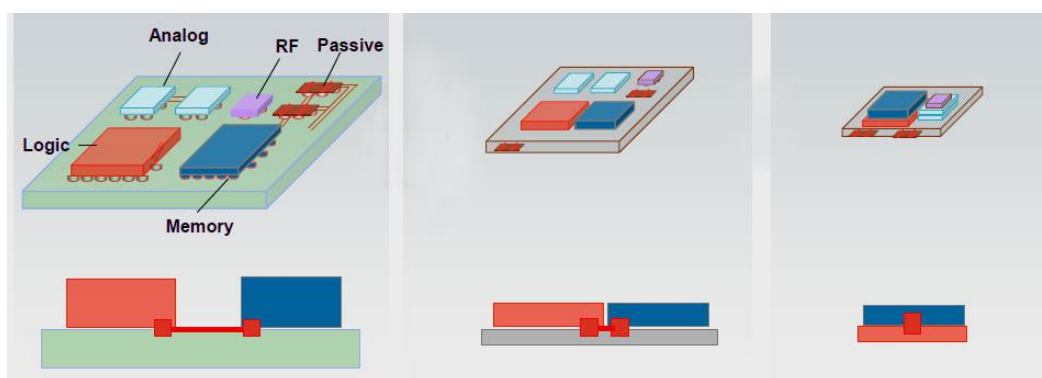


图 9 芯片封装技术带来的空间改善示意:左-传统 PCB;中-2.5D 硅通孔互联技术;右-3D 封装[10]

### 3.3 微通道冷却系统

在设备内部最接近热源的位置建立微通道,在微通道内泵入循环流动的可控温流体被广泛认为是下一代热管理技术[11][12]。使用导热界面材料(如导热凝胶、导热垫片、导热硅脂等)将发热源热量传递到外部的固体结构件上,固体结构件再将热量传递到空间中,是当前绝大多数电子产品的热管理方式(如图 10 所示)。

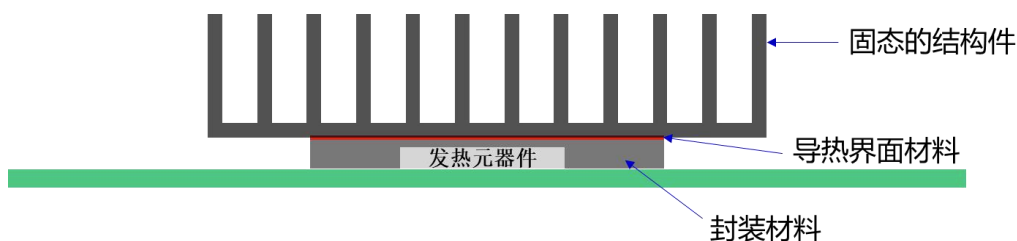


图 10 常规热管理方式示意。其中固态的结构件形态有很多种类型，如薄片、厚板、翅片状或针状散热器、水冷板等，此图仅为示意[3]

可触摸类终端通常存在被移动属性，目前全部采用上述方式进行温度控制。从传热学的基础原理上分析，任何环节都有传热热阻，热沉越接近发热源头，热管理效率越高。由于材料电阻、介电损耗、磁滞损耗的天然存在，元器件在处理信息的过程中将这些电能转化成了热量。热量产生的位置并不是芯片的表面，而是有电流流通的位置，如晶体管上、键合线上、焊球上、PCB 内部的导线上等。电能的供给目前是通过导线在 PCB 内分配、传输的，将热量（或冷量）也参考类似的思路，集成到单板或元器件内部进行换热，无疑是一个极具研究价值的主题。

当前，随着封装技术和芯片制程工艺的演进，设备热量集中现象越来越明显，内部空间狭窄和极大的市场需求，使得热管和均温板行业被倒逼着在数年内从最薄的 1mm 进步到 0.3mm，2016~2018 年之间，热管和 VC 减薄工艺近乎数月就会有新的突破。厚石墨烯的制造工艺也在近两年取得了突破。但接下来呢？封装技术和芯片制程技术并未达上限，热量的集中程度会继续提高，而热管、均热板、石墨烯等目前被认为是最高效的热量转移部件制造工艺却已陷入瓶颈。热设计要深度匹配半导体发展节奏，切入底层，开发集成热路，是为半导体行业发展贡献热学智慧的重要方向。

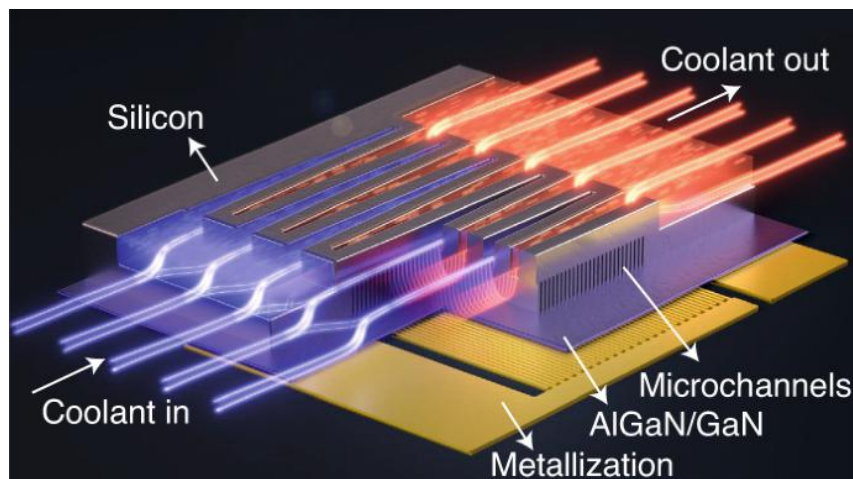


图 11 微通道冷却或 3D 片上冷却[12]

微通道流体冷却效率已经被实验证实很高[12]，但这是一个尚未被商业化的方向。这种片上冷却，由于热路与电路太近，以至于很可能不得不进行热、电协同设计才能确保产品按照预期目标运行。其大面积推广将建立在许多技术甚至科学问题被解决的前提之上：

- 1) 微通道的嵌入工艺：微通道将会贯通元器件，并在单板内部穿梭，和冷量提供部件结合，从工艺上实现这一结构，保证密封性和长期可靠性，并无先例；
- 2) 流体在微通道内的流动和传热状态：微流体力学已经建立了大量理论，但在芯片和单板内部，还存在反复高频交变的电磁场，其与流动的流体之间产生的相互影响，以及这种影响对换热效率、对信号处理带来的效应并不清晰；
- 3) 流体本身的物理性质：流体的导热系数、粘度、密度等热物理参数，以及导电率、介电常数、磁导率、介电损耗、磁滞损耗等电学性能设计，对微通道结构形态甚至微通道冷却系统的可行性有关键影响。

### 3.4 热池

相对电能，热量是一种品质更低的能量，其宏观指标为温度。低品位意味着外部许多形式的能量都可以自发地转换成热能，从而导致其在自然界普遍存在且更难控制。电的敏感性和可控性使得信息社会建立在高低电位的控制逻辑之上。自然界存在半导体，微量的杂质掺杂即可大幅改变材料导电性，但至今尚未发现热的半导体。本文提出的热池，是相对电池而言的，虽然并不违背热力学第二定律，但结合当前人类电池技术的现状，它难度更大，更像是一种猜想。热池功能的发挥甚至建立在微通道冷却技术被攻克的基础之上，就像电池必须要有电能输运线路一样。热池需要具备如下功能：

- 1) 能够在很小的体积内高效吸收存储大量热量；
- 2) 能够在很短的时间内释放出存储的热量；



3) 上述过程可以多次循环进行。



电池 → 热池?

图 12 热池的概念

这些特性与已经在当前消费类终端中广泛使用的储热片基本相同,只是储热片的储热能力过低,不能称为热池。我们仍以电学中的功能元器件来类比,储热片只能充当类似电容的功能,而非电池。

和电池类似,热池也并非适用于所有的消费终端,它只针对那些短时间应用、可间歇性关断的设备。搭载热池技术的产品,设备在工作时产生的热量被储存起来,在不被使用的时候则将热量释放。热池技术普及后,移动式电子产品可以充冷,成为克服当前材料导热性、散热空间限制的另一方式。

## 4 总结

电子产品的热问题正在以前所未有的速度引起人们的重视。本文简述了当前可接触式消费电子产品的热管理现状和面临的限制,指出在当前的技术水平和设计框架下,手机等产品散热已达上限,难以应对持续攀升的热量。结合传热学基本特征,作者以可实现性为序,提出了散热外设、提高集成度、建立微通道热管理系统和热池等几个思路方向,简述了各个方向面临的问题,为电子产品热管理技术研究提供参考。

参考文献:

- [1] Huang W, Stan M R, Gurumurthi S, et al. Interaction of scaling trends in processor architecture and cooling[C]//2010 26th

- Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). IEEE, 2010: 198-204.
- [2] IEC GUIDE 117 -- Electrotechnical equipment – Temperatures of touchable hot surfaces Appendix A, 2010.
- [3] 陈继良.《从零开始学散热.培训教材》2021
- [4] Tang, Heng, Tang, et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling[J]. Applied Energy, 2018, 223:383-400.
- [5] Fong, K.Y., Li, HK., Zhao, R. et al. Phonon heat transfer across a vacuum through quantum fluctuations. Nature 576, 243–247 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1800-4>
- [6] 红 魔 6 Pro 产 品 介 绍 .  
<https://www.nubia.com/product/detail/s/1887>
- [7] 黑鲨散热背夹. <http://www.blackshark.com/>
- [8] 图拉斯. 散热手机壳. <https://www.torras.hk/cn/>
- [9] George Kountardas. EMI Shielding and SinterInks for 5G RF components. <https://www.caplinq.com/>.
- [10] AAROHI DESAI. 2.5D and 3D are the best alternatives to transistor scaling in order to sustain Moore’ s law. 2020

- [11] Moita A, Moreira A, Pereira J. Nanofluids for the Next Generation Thermal Management of Electronics: A Review[J]. *Symmetry*, 2021, 13(8): 1362.
- [12] Remoco van Erp. et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling. *Nature* 585, 211–216 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2666-1>

# 导热界面材料行业研究报告

(免费版)

2021 年

中国电子工业标准化技术协会热管理行业工作委员会

## 目 录

引言.....	1
术语及关键定义.....	1
第一章 综述篇.....	3
1.1 行业需求和发展前景.....	3
1.2 导热界面材料的增量市场.....	4
1.3 国内外几个典型导热材料企业简介.....	9
1.4 导热界面材料行业专利分析.....	12
第二章 技术篇.....	18
2.1 导热界面材料技术原理.....	18
2.2 导热界面材料选型浅析.....	20
第三章 导热界面材料基础研究进展.....	26
3.1 新型填料的合成.....	26
3.2 新型导热聚合物.....	28
3.3 新的热界面材料制备工艺.....	31
第四章 细分市场的导热材料需求和应用.....	34
4.1 导热界面材料在新能源汽车、储能行业的应用.....	34
4.2 导热界面材料在通信行业的应用.....	34
4.3 导热界面材料在电源、光伏行业的应用.....	34
4.4 导热界面材料在智能手机、笔记本电脑、可穿戴设备上的应用.....	34
第五章 国内典型企业及产品介绍.....	35
参考文献.....	36
报告编写成员（按字母排序）.....	37

# 引言

随着电子技术的迅速发展，电子元器件的集成程度和功率密度不断提高，电子器件的耗散功率密度和发热量越来越大，因此散热问题变得越来越重要，对热管理技术的要求也更加严格。导热界面材料在热管理中起到十分关键的作用。

21 世纪初期，全球制造业向中国转移，众多导热界面材料厂商如莱尔德、3M 等在中国投资建厂，带动中国厂商技术进步，中国导热界面材料得以快速发展，导热界面材料市场规模不断扩增。导热界面材料作为电子设备中不可或缺的材料，其下游应用领域的发展将推动导热界面材料需求上升。

2020 年，全球导热界面材料市场规模达 19 亿美元，预计 2027 年达到 40 亿美元，年复合增长率超过 11%。传统的聚合物填充材料在所有品类中占比接近 90%，其中导热垫片、导热凝胶及导热硅脂属于主流品类，市场规模的占比约为 4:3:3。

导热界面材料下游的消费电子、新能源汽车、通信技术、医疗等应用领域的稳定发展，推动了中国导热界面材料的高速增长。近年来，伴随环保“大浪”逐渐席卷全球、国家新能源汽车的优惠政策频频颁布，选择新能源汽车的消费者日渐增多。对新能源汽车而言，热管理系统不仅关乎其环保性能和节能效果，还在运行安全性和驾驶舒适性方面起关键作用。2020 年，全球新能源汽车热管理市场约 210 亿元，伴随车型放量，2025 年市场空间有望达到 1117 亿元，实现五年五倍的增长。

伴随着 5G 的大规模商用，截至 2021 年 3 月底，我国建成 5G 基站 81.9 万个，占全球 70% 以上，2021 年我国 5G 基站数量将达到 175 万座。作为 5G 基站和数据中心中光电信号转换的重要元器件，光模块的需求也随之上扬，光模块催生导热界面材料蓝海。5G 基站的增量带来国内热界面材料市场空间约为 15 亿元。

**研究对象：**热界面材料分为填充聚合物材料、金属填充材料以及相变材料，其中填充聚合物占比最多达 90%；导热垫片、导热凝胶及导热硅脂属于填充聚合物的主流品类，是本报告重点研究对象；

**研究方法和目的：**通过行业专家的访谈，企业调研、典型企业应用研究，对于热界面材料的发展现状，应用的场景和选择逻辑做综合的陈述和深入分析。给导热界面材料（Thermal Interface Material，TIM）产业链企业提供参考意见，推进学术创新成果转化及行业应用。

## 术语及关键定义

热界面材料（TIM）：导热界面材料（TIM）是热管理体系中重要的材料，在热界面之间

起绝缘导热的同时，承担着填隙支撑的重任，建立了芯片与散热之间的导热通道，提高导热效率，实现芯片的热量快速传递；

导热硅脂 (Thermal Grease) 俗称散热膏：导热硅脂以有机硅酮为主要原料，添加耐热、导热性能优异的材料，制成的导热型有机硅脂状复合物，大部分以二甲基硅油为原材料，容易产生挥发，渗油现象；

导热凝胶 (Thermal Gel) :是一种凝胶状态的导热材料，通过把导热膏里面的硅油铰链到一起，解决了导热膏容易流动及长时间高温工作变干等问题；分为单组份凝胶和双组份凝胶。

导热垫片 (Thermal Pad)：填充了陶瓷颗粒以用来提高导热性能的弹性体热界面材料，产品具备柔韧、绝缘、可压缩性及表面天然粘性等特点。主要用于填充热源与散热器件间的热传递，起到减小界面热阻、绝缘、减震等作用。

导热系数 (Thermal Conductivity)：衡量一种材料导热效果的指标，单位：瓦/米·度，指在稳定传热条件下,1m 厚的材料,两侧表面的温差为 1 度(K,℃),在 1 秒钟内(1S),通过 1 平方米面积传递的热量；

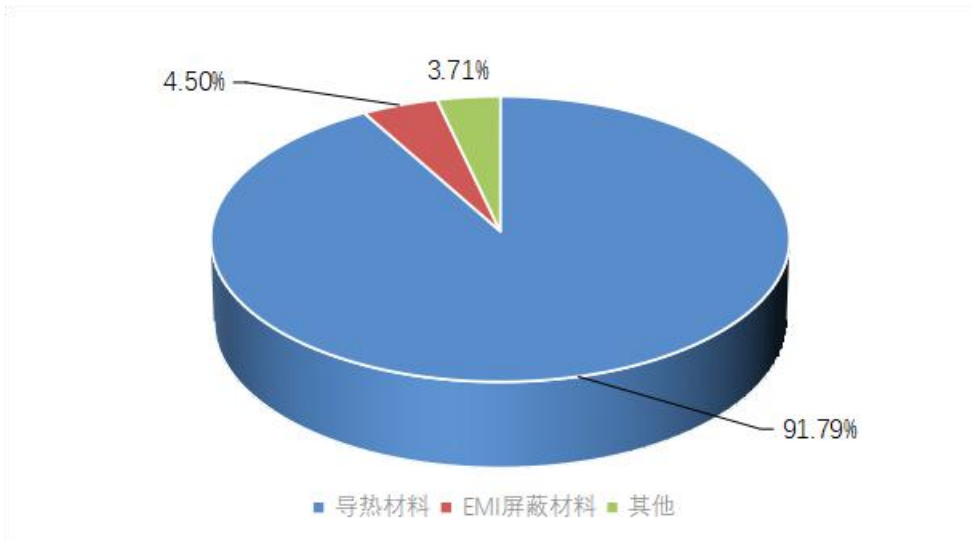
# 第一章 综述篇

## 1.1 行业需求和发展前景

随着电子技术的迅速发展，电子元器件的集成程度和功率密度不断提高，电子器件的耗散功率密度和发热量越来越大，因此散热问题变得越来越重要，对热管理技术的要求也更加严格。导热界面材料在热管理中起到十分关键的作用。

21 世纪初期，全球制造业向中国转移，众多导热界面材料厂商如莱尔德、3M 等在中国投资建厂，带动中国厂商技术进步，中国导热界面材料得以快速发展，导热界面材料市场规模不断扩增。导热界面材料作为电子设备中不可或缺的材料，其下游应用领域的发展将推动导热界面材料需求上升。

2020 年，全球导热界面材料市场规模达 19 亿美元，预计 2027 年达到 40 亿美元，年复合增长率超过 11%。传统的聚合物填充材料在所有品类中占比接近 90%，其中导热垫片、导热凝胶及导热硅脂属于主流品类，市场规模的占比约为 4:3:3。



(数据来源: QY Research)

图 1-1:2020 年导热界面材料种类市场占比情况

随着科技的发展，电器电路模块、电子元器件、大规模集成电路等领域进一步实现了高性能、高可靠性和小型化，工作效率不断提高，各个元器件在工作时产生的热量也急剧增加。因此，将热量迅速传导出去已成为设备安全稳定运行的关键。

导热界面材料(Thermal Interface Materials)，简称 TIM，又称热界面材料或界面导热材料，其能够填补两种材料接合或接触时产生的微空隙及表面凹凸不平的孔洞。使用具有高性



能的导热界面材料填满这些间隙，排除其中的空气，在电子元件和散热器间建立有效的热传导通道，可以大幅度降低接触热阻，使散热器的作用得到充分发挥。

## 1.2 导热界面材料的增量市场

移动互联网热潮的兴起，手机、平板电脑等手持设备仅靠壳体散热，带来导热器件的巨大需求，并不断提升器件的柔软度要求。小型化，轻薄化的设计是当前电子产品的主流，这对产品的热设计带来了巨大考验。有研究显示，电子元器件温度每升高 2 度，其可靠性会下降 10%。当电子元件的温度过高时，将对电子产品的稳定性、可靠性和使用寿命造成严重的威胁。电路（晶体管）的可靠性与结温呈指数关系，工作温度的小幅变化（10 度-15 度），将导致器件的使用寿命存在约 2 倍的差异。

如果仅仅依靠微电子元件与金属散热器或散热管直接接触，将很难有效地进行热量传递，这是因为热源表面和散热器之间存在很多凹凸不平的空隙，这些空隙被导热系数仅为 0.023 W/(m·K) 的空气填充着，大幅降低了散热效率。



(数据来源：霍尼韦尔公开分享)

图 1-2 5G、物联网的催生下，导热界面材料行业增长的驱动力

导热界面材料下游的消费电子、新能源汽车、通信技术、医疗等应用领域的稳定发展，推动了中国导热界面材料的高速增长。全球范围看，预计 2025 年全球新能源乘用车销量 1781 万辆，2030 年销量 3767 万辆。对应 2021-2025 复合增长率 32%，2025-2030 复合增长率 16%。2020 年，全球新能源汽车热管理市场约 210 亿元，伴随新能源车型放量，预计 2025 年市场空间有望达到 1117 亿元，实现五年五倍的增长。

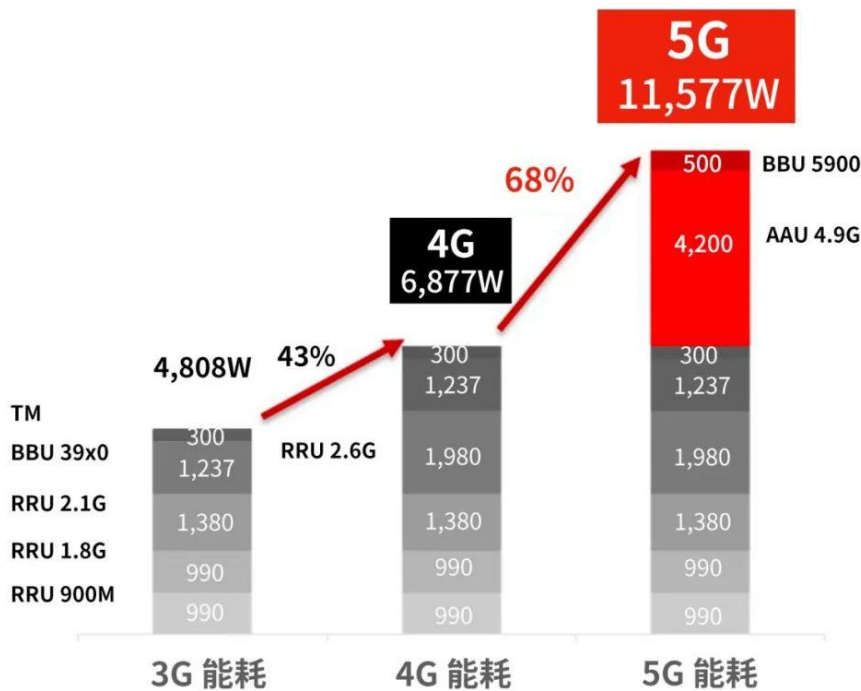
	纯电动车				插电混动车	合计
	A00/A0级车	A级车	B级车及以上			
全球市场2020						
占比	20%	30%	25%		25%	100%
销量 (万辆)	57.6	86.4	72		72	288
单车价值 (万元)	0.7	0.73	0.94		0.55	
市场空间 (亿元)	40.0	62.6	68		39.6	210.2
全球市场2025						
占比	10%	40%	30%		20%	100%
销量 (万辆)	178.1	712.4	534.3		356.2	1781
单车价值 (万元)	0.58	0.6	0.79		0.46	
市场空间 (亿元)	103.1	430.6	419.6		164.2	1117.5

(数据来源: Marklines, 中金公司)

图 1-3 新能源汽车 2025 年热管理市场达到 1117 亿元市场空间

5G 商用开启短短两年内, 中国已初步建成了全球最大规模的 5G 移动网络, 覆盖全国所有地级以上城市, 根据工信部公布的最新统计数据, 截至 2021 年 6 月底, 中国 5G 终端连接数已达 3.65 亿; 截至 2021 年 3 月底, 我国建成 5G 基站 81.9 万个, 占全球 70% 以上, 2021 年我国 5G 基站数量达到 175 万座。5G 基站的增量带来国内热界面材料市场空间约为 15 亿元。

作为 5G 基站和数据中心中光电信号转换的重要元器件, 光模块的需求也随之上扬, 光模块催生导热界面材料蓝海。由于 Massive MIMO 技术使得 5G 基站 TRX 链路大幅增加, 5G 基站功耗约为 4G 的 2.5-3 倍。5G 基站的散热方案引入了更多新的高效器件, 其散热方案将从内部到外壳进行革新, 带动产业价值提升。市面上 2W/m.K 或 3W/m.K 等常规导热材料已难以满足现代高速传输和通信设备的升级需求, 市场对高瓦数导热材料的需求与日俱增。然而导热系数的提升, 会使材料的应用性能、长期可靠性下降, 使用过程中可能出现渗油、溢出现象, 在高压下还会出现油粉分离等情况, 对终端设备的长期可靠性带来风险。



(数据来源: 华为 5G 电源白皮书)

图 1-4 5G 基站与 4G 能耗对比情况

手机散热市场将随单机价值量提升和 5G 手机出货量提升, 迎来百亿规模增量市场空间。未来随着 5G 手机渗透率提升和散热方案的升级, 全球手机散热市场有望从 2019 年的 150 亿元增长到 2022 年的 230 亿元。

5G	2019	2020	2021E	2022E
5G手机导热界面材料ASP	15	14.25	13.54	12.86
5G手机热管渗透率 (%)	40%	38%	36%	35%
5G手机热管ASP	6	5.7	5.42	5.14
5G手机VC渗透率 (%)	60%	62%	64%	65%
5G手机VC ASP	18	17.1	16.25	15.43
5G手机石墨片市场空间 (亿元)	0.65	7.95	13.45	17.83
5G手机导热界面材料市场空间 (亿元)	2.81	34.07	57.63	76.42
5G手机热管/VC 市场空间 (亿元)	2.47	30.53	52.56	70.31
5G手机散热市场规模 (亿元)	5.93	72.55	123.64	164.56
YOY		1123.85%	70.43%	33.09%
智能手机散热市场规模	145.99	172.92	206.22	230.76
YOY	-2.69%	18.45%	19.26%	11.9%

(数据来源: 新浪财经)

图 1-5 5G 手机出货量情况及导热界面材料市场空间

智能手机出现新的热量和热量集中问题源于如下两个因素:

- 1) 在更高的毫米波频率上运行的 5G 蜂窝信号和大规模 MIMO 的实现;
- 2) 市场对更轻、更薄、更快的设备的需求, 设备内的电路变得更密集

这使得手机对热管理材料更轻、更薄和更好的伸展率要求不断提高。在智能手机中, 密

集的应用处理器，电源管理电路和相机模组是主要的热源。AP 包含多个子组件，例如 GPU，多媒体编解码器，尤其是 CPU，产生的热量最多。

因素	分析
芯片计算效率提高	5G芯片处理能力有望达到4G芯片的5倍，发热密度绝对值增加
频段、带宽增加	5G智能手机天线数量可达4G手机的5-10倍，对散热需求更高
电磁信号强度高	玻璃、陶瓷等非金属材料机壳替代金属机壳，其散热性能下降
防水性能升级	内部零部件与整机结构具有更高的密封性，整机散热性能下降
轻薄化	内部器件集成化度高，零部件间排布紧凑，热量难以扩散
屏占比提升，无线充电	全面屏，无线充电增加了散热量
拍摄性能升级	后置双摄、三摄成为趋势，前置人脸识别采用结构光方案，发热模组和热密度大幅提升。

(数据来源：兴业证券、赛瑞研究)

图 1-6 智能手机导热需求大幅提升



图 1-7 智能手机内的电磁、散热相关的辅料 (数据来源：2020 年飞荣达年报)

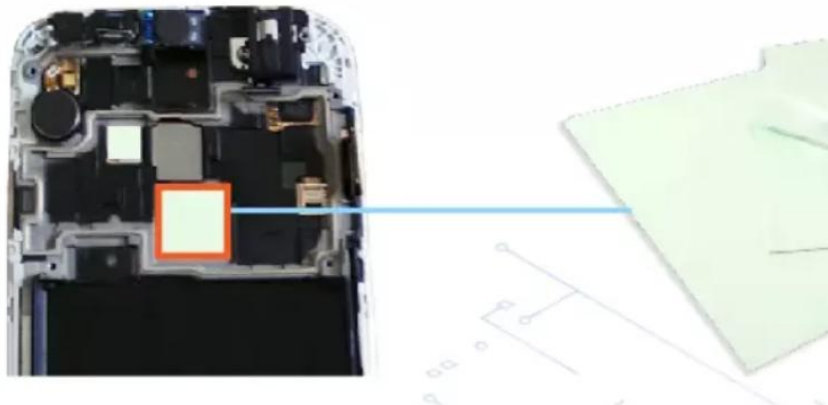
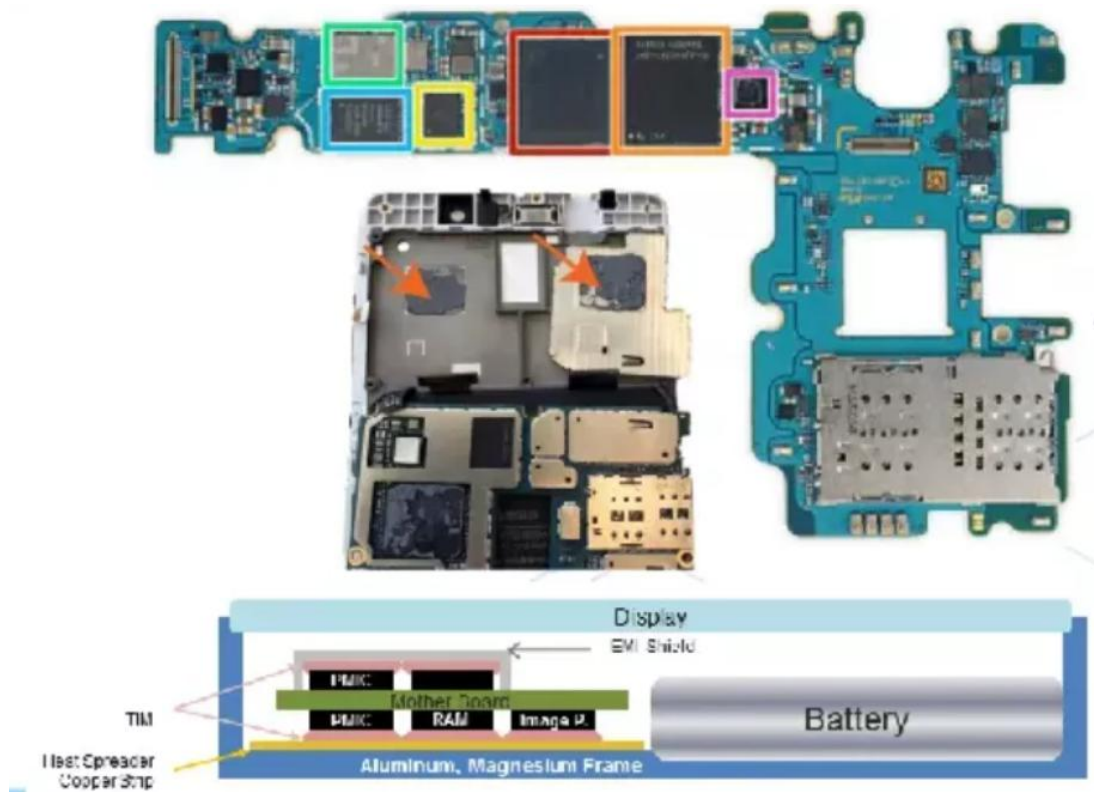


图 1-8 CPU - 智能手机使用导热垫的应用处理器散热方案

(数据来源：热设计网)



(数据来源: 热设计网)

图 1-9 PMIC-通过导热凝胶对电源管理集成电路散热

复杂的 5G mm Wave 天线模块集成了功率放大器，这些功率放大器在设备边缘附近产生热量。由于空间限制，很难通过增加空气间隙来降低表面温度，节流则会损害 5G 性能。传统的散热材料（石墨片、铜箔、铝箔等）也不是一种选择，因为它们通常具有导电性并且会干扰 RF 信号。

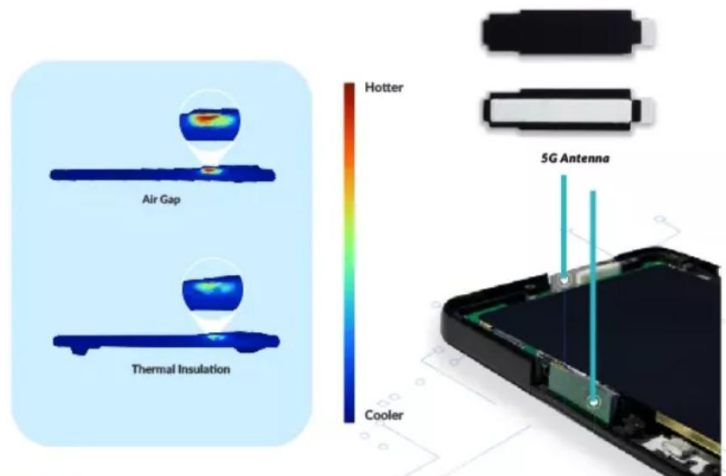
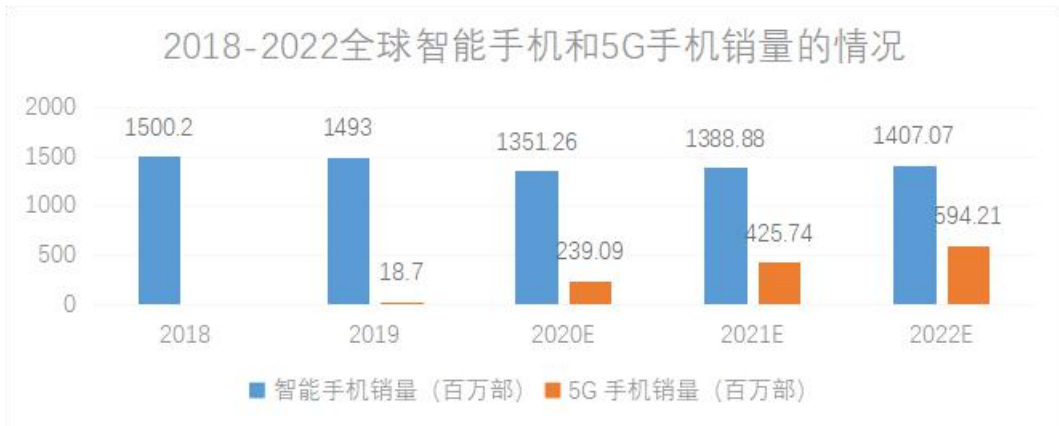


图 1-10 5G 手机天线隔热设计 (数据来源: 热设计网)



(数据来源: Garter)

图 1-11 5G 手机出货量情况及导热界面材料市场空间

随着电脑、手机、可穿戴设备等消费电子产品配置升高，消费电子产品硬件不断升级，向高性能、高传输速率和智能化方向发展，消费电子产品的 CPU、显示屏、射频器件等都将迎来新的改变。硬件的升级改造对散热提出了更高的要求，推动导热材料需求扩增。以电脑处理器英特尔为例，处理器芯片逐渐从单核、低频、低散热设计功耗向多核、高频、高散热设计功耗发展。英特尔双核 i3 处理器散热设计功耗为 73W，而其四核 i7 处理器散热设计功耗达到 130W。处理器散热需求升高将推动导热界面材料的发展。

同时，以智能手环、智能手表、VR 为代表的可穿戴设备蓬勃发展，为导热界面材料带来新的市场空间。中国智能穿戴设备行业 2018 年市场规模为 304.1 亿元，预计至 2023 年将达到 913.7 亿元。可穿戴设备行业的高速发展将对导热界面材料的需求增长带来积极影响。

### 1.3 国内外几个典型导热材料企业简介



图 1-12 导热界面材料行业产业链情况

(数据来源: 头豹研究院)

我国导热领域起步较晚，由于高端产品技术仍垄断在欧美及日本等少数企业中，国内众多导热界面材料生产厂家仍以低端产品输出为主，销售额仅占市场总额 10%左右。

目前导热界面材料的高端市场主要由海外公司 Dow Corning（道康宁）、Bergquist（贝格斯）、Laird（莱尔德）、Chomerics（固美丽）、Momentive（迈图）等公司占据。相比国外热界面材料公司，中国大陆厂商起步较晚，缺少高端产品。

（Laird）莱尔德是高性能电磁屏蔽和热管理领域全球领先的公司，提供高性能产品和解决方案，管理热能并保护设备免受电磁干扰。莱尔德在全球拥有超过 4300 名员工，11 个制造基地分布在北美、欧洲和亚洲，2020 年的营收达到 4.65 亿美元。2021 年 7 月 1 日，莱尔德高性能材料公司（Laird Performance Materials）被杜邦收购，成为杜邦电子与工业事业部电子互连科技业务的一部分。

国内巨大的绿色减碳市场吸引跨国低碳技术供应商加大在华研发投入。霍尼韦尔近日在沪宣布成立霍尼韦尔（中国）有限公司可持续发展研究院低碳中心。霍尼韦尔正开发先进溶剂、新型薄膜碳捕集技术、改进吸附剂和新工艺设计，并逐步技术商业化。

## 国内导热材料上市公司展示



(数据来源: 公开资料整理)

图 1-13 我国导热界面材料行业上市企业情况

飞荣达主要从事电磁屏蔽材料及器件、导热材料及器件、基站天线及相关器件及防护功能器件的研发、设计、生产与销售。2020 年营业收入 29.29 亿元，同比增长 12.1%，其中导热材料营收 9.95 亿元，占比 34%。



(数据来源: 飞荣达历年的年度报告)

图 1-14 飞荣达 2018-2020 年营业收入及增长情况

中石科技主要产品包括导热界面材料、EMI 屏蔽材料、人工合成石墨、热管/均热板、热模组等。2020 年公司实现营业收入 11.49 亿元，同比增长 48.06%，导热材料营业收入 10 亿元，营收占比 91.7%。

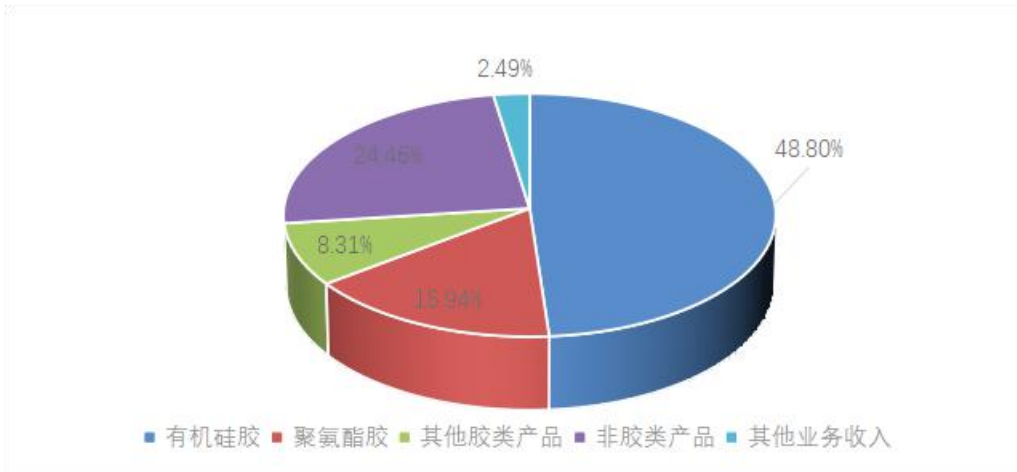


(数据来源: 中石历年的年度报告)

图 1-15 中石科技 2018-2020 年营业收入及增长情况

回天新材 2020 年公司实现营业收入 216,373.06 万元，同比增长 15.09%；实现营业利润 24,885.15 万元，同比增长 36.67%；归属于上市公司股东的净利润 21,820.30 万元，同比增长 37.94%。





(数据来源: 回天新材的年度报告)

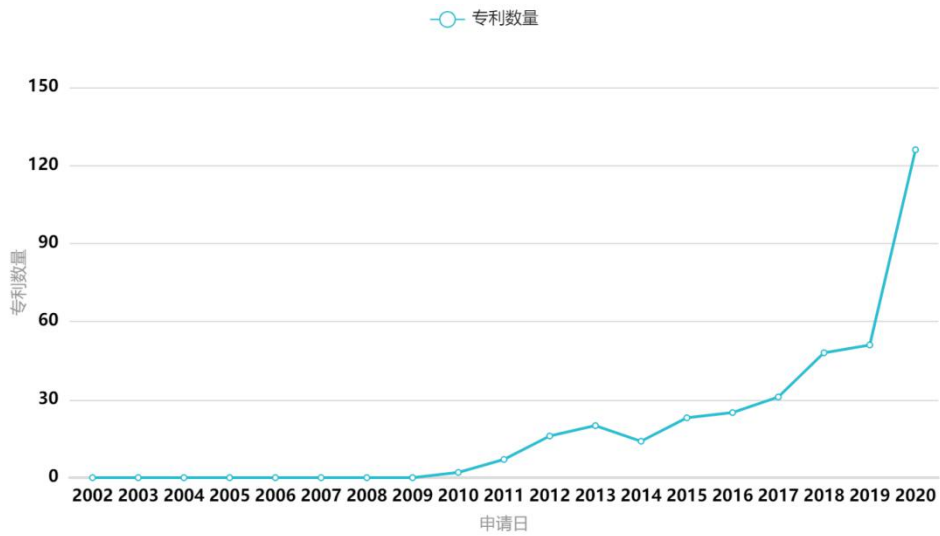
图 1-16 回天新材 2020 年分业务营业收入情况

## 1.4 导热界面材料行业专利分析

详细的专利分析部分为收费内容，下文仅展示部分基础数据。如需购买，可联系工作人员。专利分析的详细内容将包含以下内容：

- 1) 专利归属分布
- 2) 专利关注的产品分布
- 3) 专利关注的技术点趋势
- 4) 结合专利分析未来导热界面材料对原材料的需求
- 5) 结合专利分析未来导热界面材料自身性能的演进趋势
- 6) 结合终端客户热管理专利技术，分析终端用户对导热材料的需求趋势
- 7) 结合终端客户热管理专利技术，分析导热界面材料的未来增量客户分布
- 8) 结合专利数据和发展趋势，分析具有发展前景的导热材料企业或投资标的

下图展示了导热界面材料相关的专利数量趋势。在 2010 年以前，每年专利的数量变化不大，这主要是因为 2010 年以前，对导热和散热的需求主要集中在传统的热交换设备等领域，相对比较成熟，新的需求点增加不多。而随着微电子工业的快速发展，手机、电脑、汽车以及通讯器材（特别是 5G）等电子器件对散热的要求越来越高，从而催生了对新一代导热散热材料的需求，导致相关专利迅速增长。



(数据来源:四川力久律师事务所)

图 1-17 导热界面材料行业专利申请数量的变化

目前国内在电子器件导热散热材料的创新研发主要集中在珠三角和长三角地区,聚集的主要原因还是相关产业链和人才优势。国内市场经过近 10 年的快速发展,逐步从之前的完全进口到中低端产品替代走向了高端产品的自主创新开发。下图展示了部分国内导热材料企业的专利数量分布。

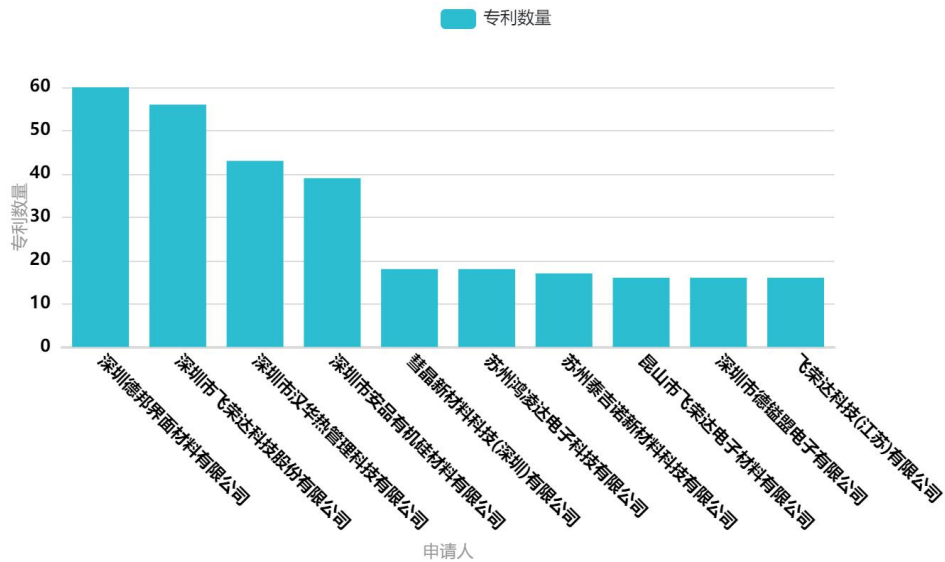


图 1-18 国内导热界面材料企业专利数量情况 (数据来源:四川力久律师事务所)

在专利涉及的技术领域方面,主要还是集中在有机材料,特别是高分子材料为基材的填

充型导热散热材料方面。主要原因是这种复合材料相对于其他合金、陶瓷材料来说，涉及的组分比较多，组合灵活多样，可设计和调整的空间比较大，因此可申请专利保护的点或者对应的产品种类相对较多。

从专利技术发展趋势角度分析，目前主要研究的方向大概有三个方向，多功能化、取向结构导热材料和非硅体系导热材料。其中导热材料的多功能化主要是指在具有导热功能的前提下，增加其他功能或者对除导热性能之外的性能有更高的要求，例如：导热的同时能够具有电磁屏蔽功能、可打印、可点胶、防火阻燃、低密度、高绝缘、高回弹等，其目的主要是针对不同的导热场合需求，能够在散热同时满足其他性能要求，从而实现功能集成、优化器件结构并进一步提升综合性能。

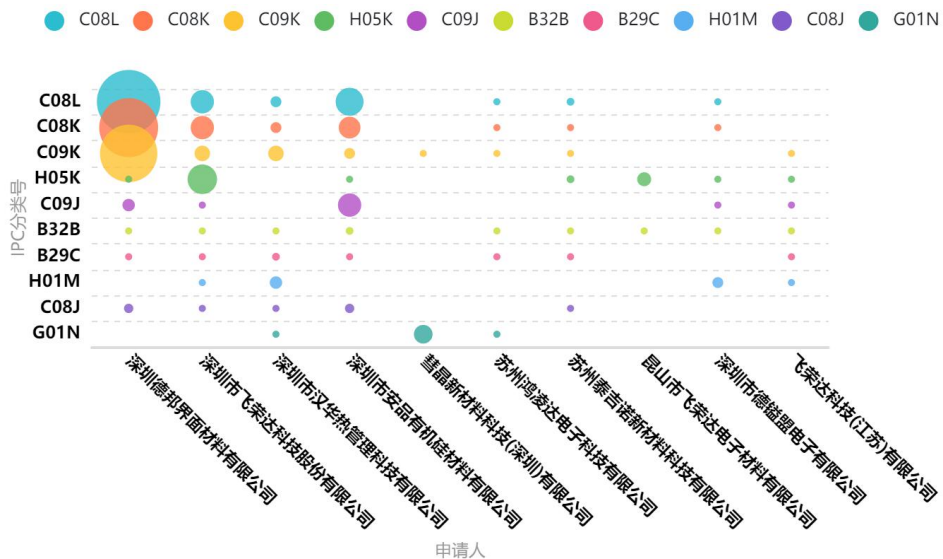


图 1-19 国内导热界面材料企业专利涉及技术领域 (数据来源:四川力久律师事务所)

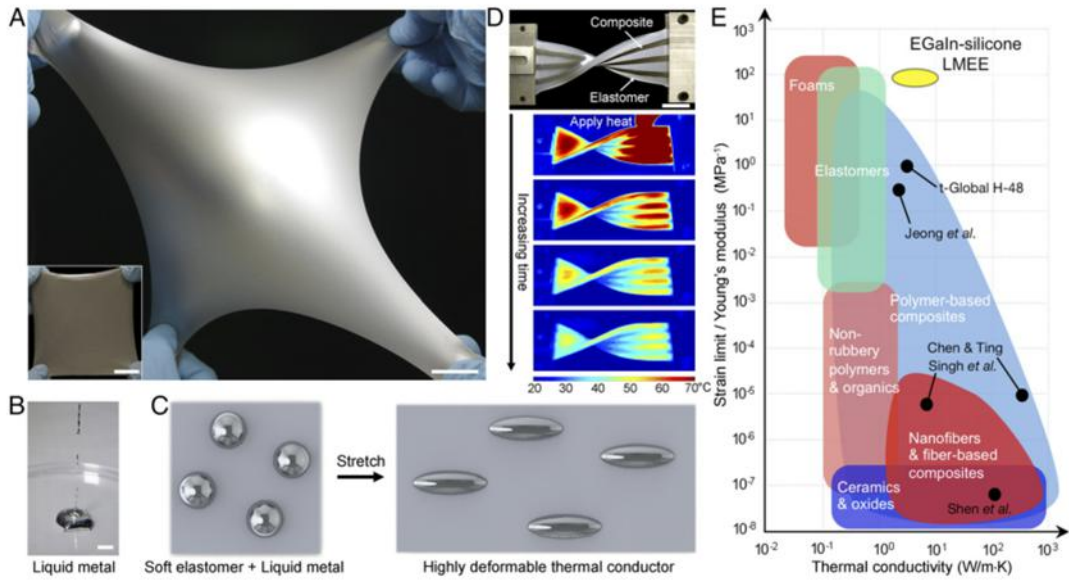


图 1-20. 具有高热及柔性的 LMEE 复合材料 (A) 高度变形的 LMEE。(B) LM 在室温下是液态的，液滴下降显示出流体特征。(C) LMEE 复合材料的示意图，其中 LM 液滴分散在弹性体基体中，在变形时，LM 和弹性体沿着拉伸方向伸长。(D) 对 LMEE 和纯 Elastomer 的交变条进行热抢加热的红外照片。(E) 体积分数为 50% 的 LMEE 复合材料与最新技术在导热系数和应变极限与杨氏模量的比值比较。

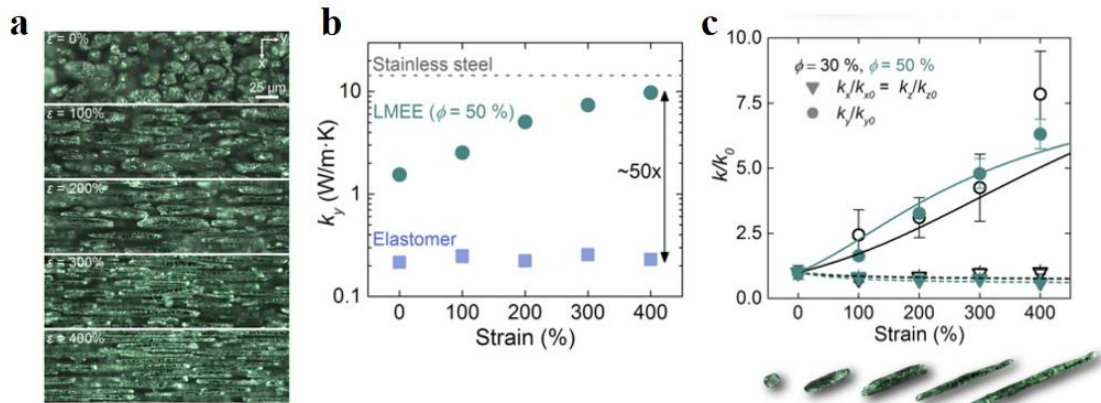


图 1-21. LMEE 复合材料的热-力学行为 (a) 30vol% LMEE 拉伸过程中微结构的光学显微照片。(b) 纯 Elastomer 和 50 vol%LMEE 复合材料的热导率在拉伸方向与应变关系图。(c) 30 vol%以及 50 vol%的 LMEE 拉伸时 y 轴方向上导热增加的比值。

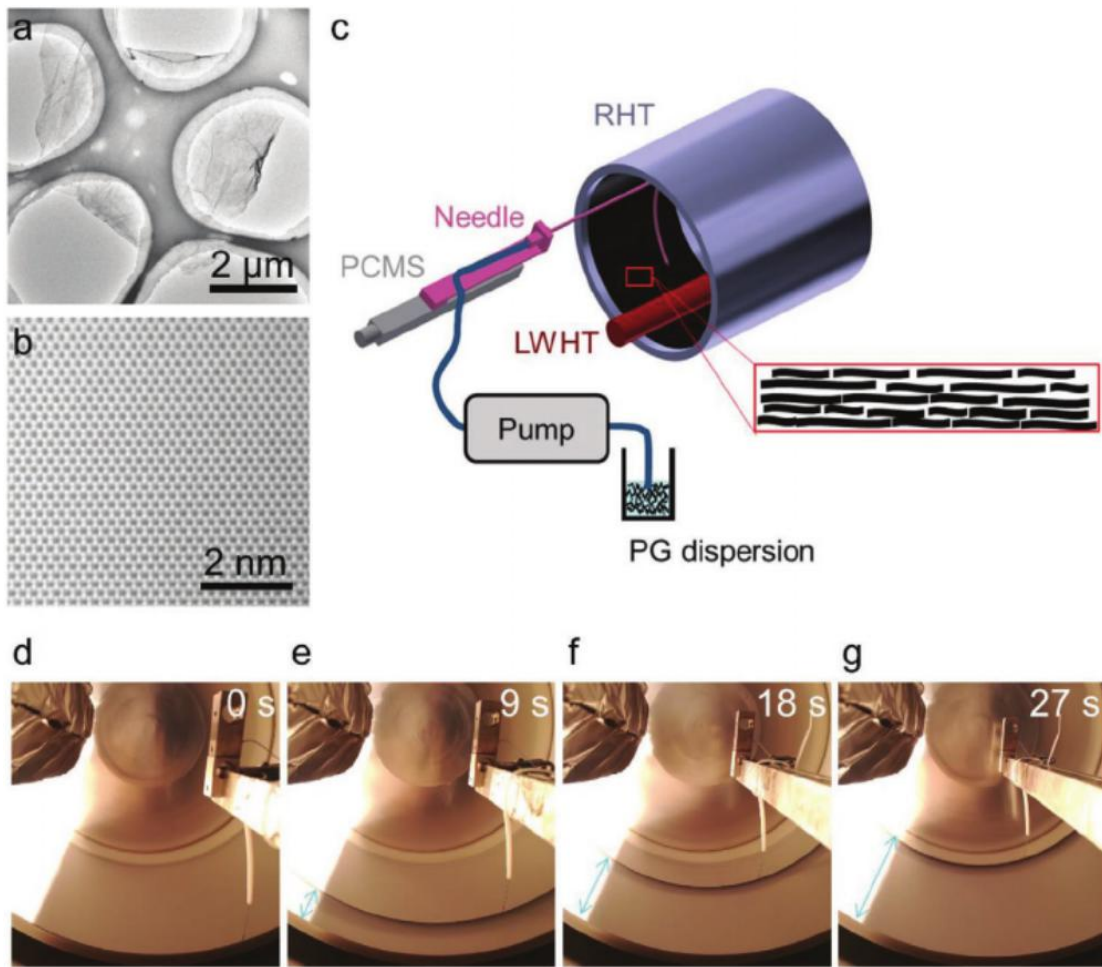


图 1-22 扫描离心铸造法制备高度排列的层压石墨烯薄膜。

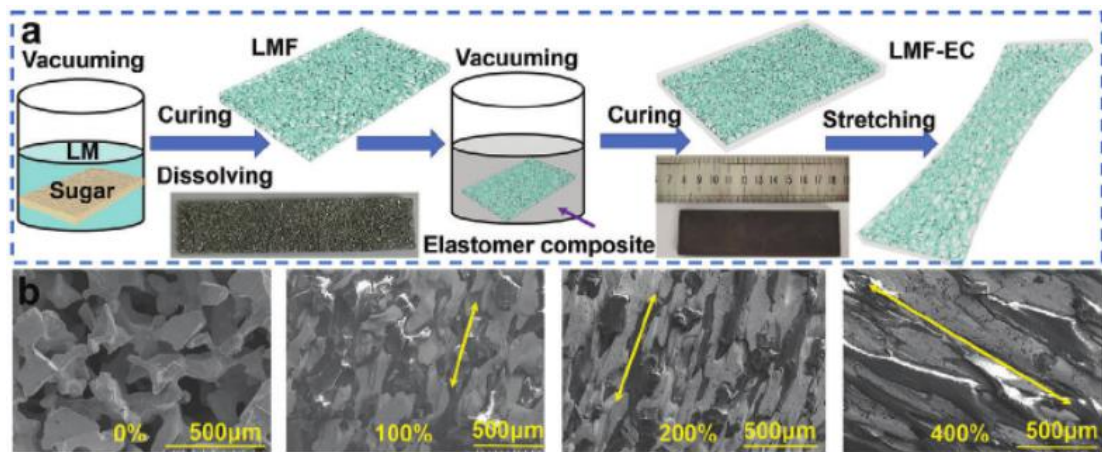


图 1-23 液态金属泡沫弹性体复合材料的制备示意图。

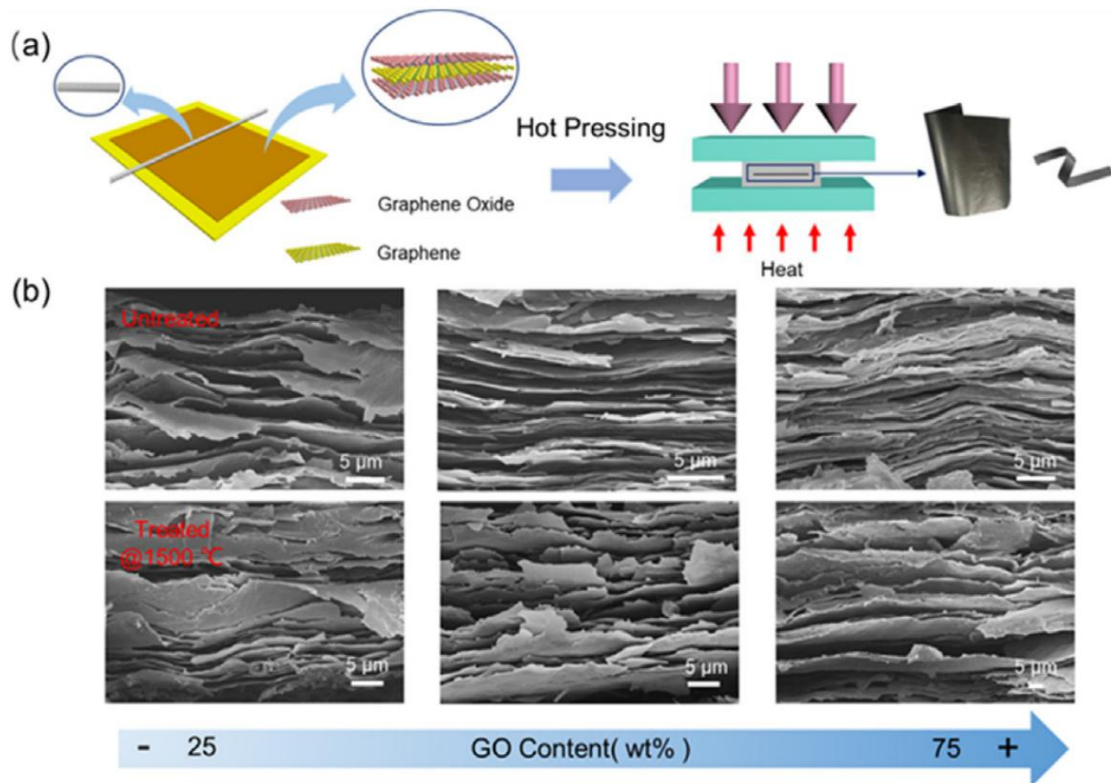


图 1-24 (a) 制造过程的示意图。(b) 具有不同 GO 含量的 GGHF 和 r-GGHF-1500 的 SEM 图像。

## 第二章 技术篇

### 2.1 导热界面材料技术原理

由于散热器和热源是一个平面接触，看似平整的表面实际是凹凸不平的，没有办法实现良好的贴合度，这就造成散热通路过程中的瓶颈。

工程热力学的第一、第二定律是进行传热学研究的基础：

热力学第一定律：能量守恒定律。

热力学第二定律：凡是有温差存在的地方，就有热能自发地从高温物体向低温物体传递。

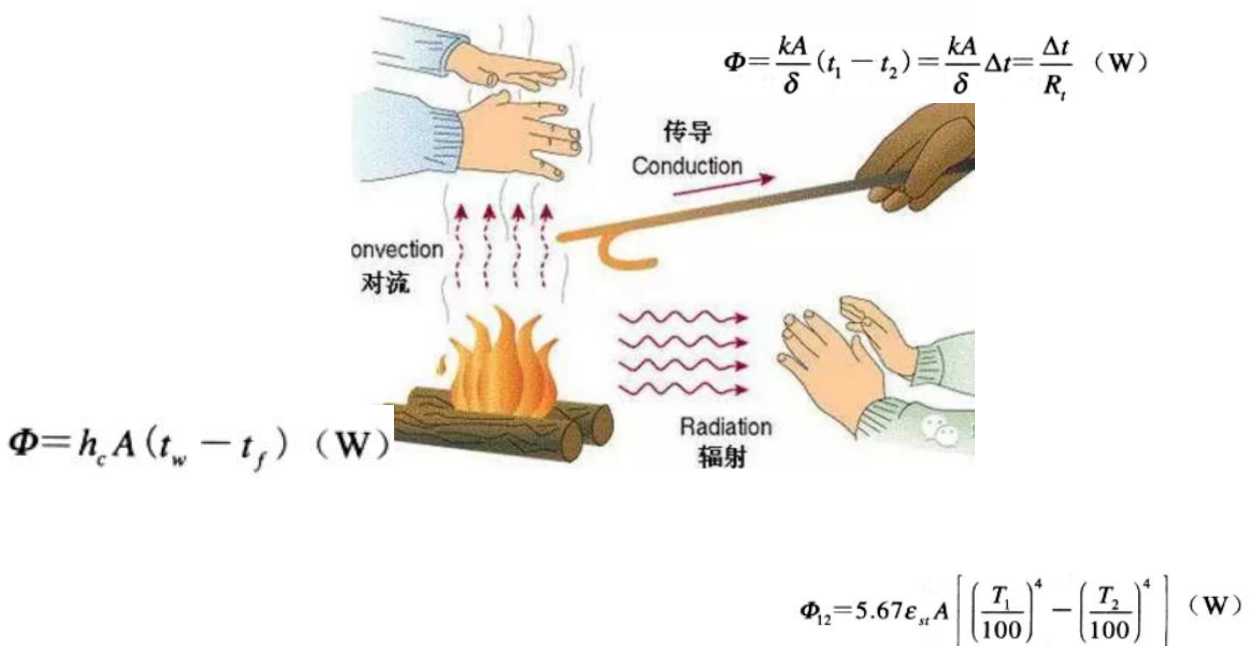


图 2-1 三种散热方式

热能传递的三种基本方式热传导、热对流、热辐射。

热传导：物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能传递称为热传导（heat conduction），简称导热。

热对流（heat convection）是由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移，冷、热流体相互掺混所导致的热量传递过程。热对流仅能发生在流体中，而且由于流体中的分子同时在进行着不规则的热运动，因而热对流必然伴随有热传导现象。

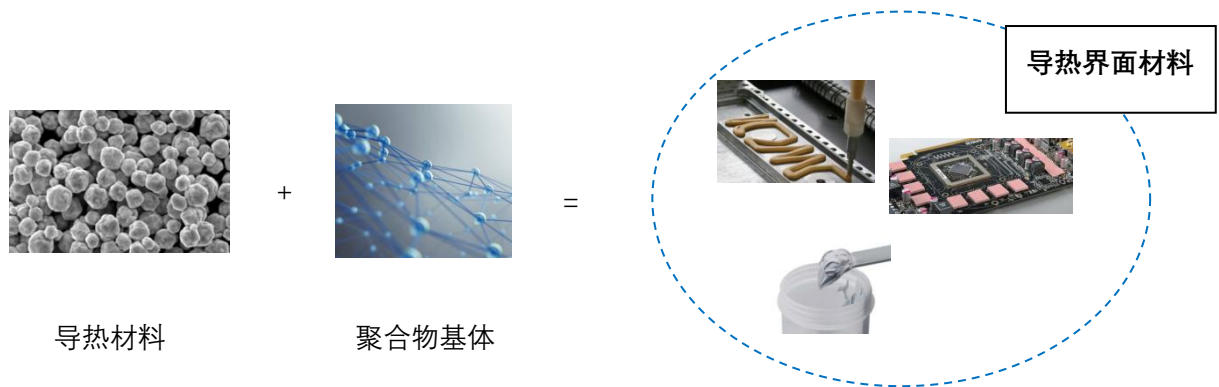
热辐射：物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射(thermal radiation)。

很多电子器件在工作时，温度能达到几十度甚至是上百摄氏度，而随着温度的增高，它的失效率也会成倍的增长。

元器件类别	基本失效率, $\lambda$ (10 <sup>-6</sup> /h)		温升 ( $\Delta T$ °C)	高温与室温失效率之比
	高温	室温		
PNP硅晶体管			105	7:1
NPN硅晶体管	0.063 (在130°C和应力比0.3)	0.0096 (在25°C和应力比0.3)	105	5:1
玻璃电容器	0.047 (在120°C和应力比0.5)	0.001 (在25°C和应力比0.5)	95	47:1
变压器与线圈	0.0267(在85°C)	0.0008(在25°C)	60	33:1
碳膜合成电阻器	0.0065 (在100°C和应力比0.5)	0.0003 (在25°C和应力比0.5)	75	22:1

图 2-2 不同工作温度部分元器件的基本失效率 (数据来源: 霍尼韦尔公开资料)

导热界面材料 (TIM) 是热管理体系中重要的材料，在热界面之间起导热的时候，承担着填隙支撑的重任，主要应用于系统热界面之间，通过对粗糙不平的结合表面进行填充，用导热系数远高于空气的热界面材料替代导热系数极低的空气，使通过热界面的热阻变小，提高半导体组件的散热效率。常见的导热界面材料有导热硅脂、导热衬垫、导热相变化材料、导热胶 (水)、导热胶带、导热凝胶等。





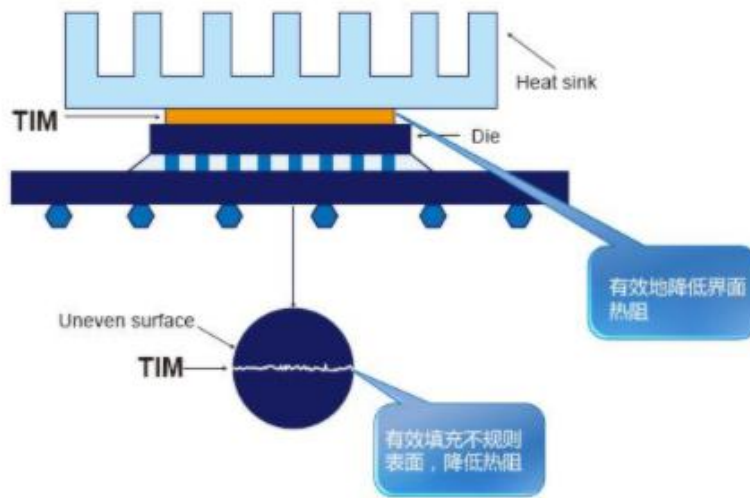


图 2-3 导热界面材料是发热元器件和散热器之间不可缺少的高效导热路径

## 2.2 导热界面材料选型浅析

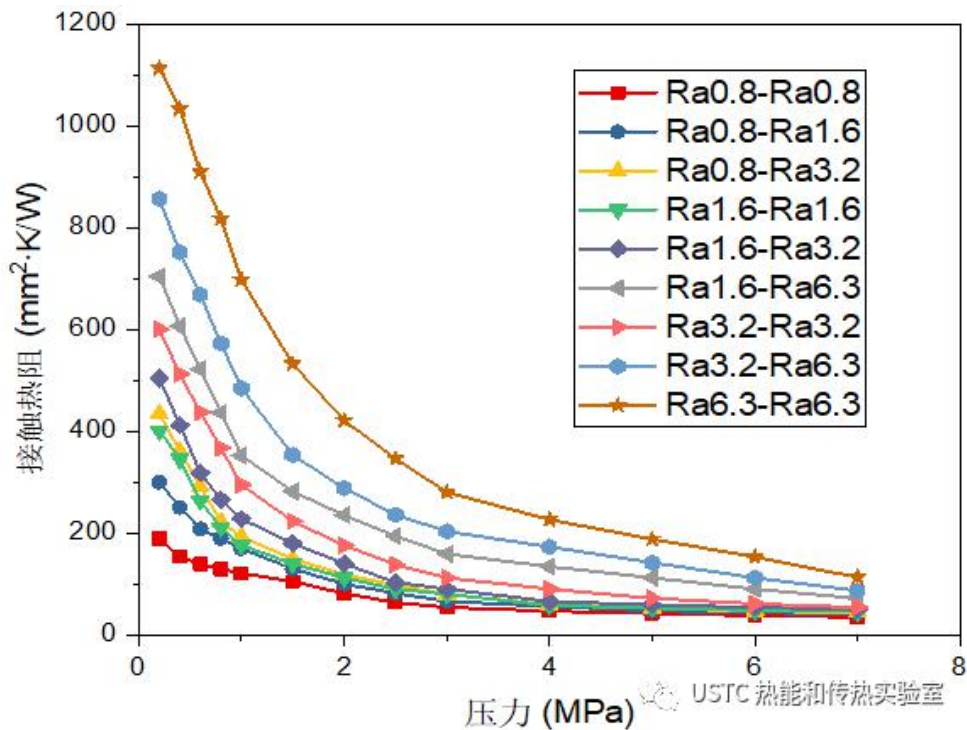
在林林总总的产品图册中，热界面材料的核心技术指标一般都是热导率和厚度。在推销员的口中，产品的薄膜特性和高导热性往往是高附加值的体现。但是在实际的应用中，我们发现这种指标体系不怎么靠谱，高热导率并不能保证低界面热阻，而薄膜特性也只是在迎合结构设计的轻量化需求。接下来我们通过一项实测分析来谈谈导热界面材料的选型。

我们在实验室搭了一个 ASTM D5470 的测试台，我们首先介绍一下 D5470 背后的测试目的。这个测试台的直接测试结果是界面热阻，用于表征两个界面之间的热传导效果，数值越小，热传导效果越好。减小界面热阻的方法一般有两种，一是提高表面的平面度和装配的压紧力，二是添加热界面材料。



我们首先看第二种压紧力对界面热阻的影响。

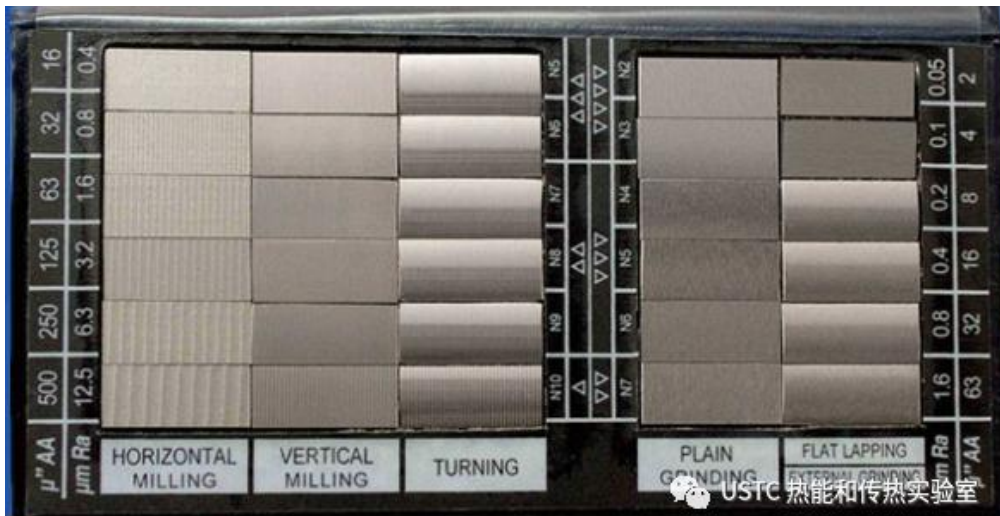
- 1) 粗糙度越小，界面热阻越小；
- 2) 压紧力越大，接触热阻越小；
- 3) 压紧力的影响在大粗糙度的情况下更显著；
- 4) 表面粗糙度优于 Ra1.6 的两个平面，在压紧力大于 0.5MPa 时，其界面热阻大概在 400mm<sup>2</sup>.K/W 左右，但在压紧力升高到 4MPa 以上时可以降低到 60mm<sup>2</sup>.K/W 左右。



我们重点介绍第 4 点：

第 4 条里面出现了三个参数，逐一解释一下。表面粗糙度可以近似的理解为表面上疙瘩

的大小，Ra1.6 指的是表面的峰谷距离不超过 1.6 $\mu\text{m}$ ，一般的精加工都能做到。



压紧力也有叫夹紧力的，对于螺栓组固定的平面而言，压紧力跟螺栓的尺寸、间距、两个平面的材料/厚度都有关系，需要个案分析。这里举一个例子，对于 CPU 这种脆弱的元器件而言，大部分导热衬垫的安装压力建议在 0.1MPa 以下。当然，这是确保安全的做法，其裕量有多少我不得而知。我自己拿过一个老旧的 CPU 试过，0.5MPa 没压坏，后面我就按照 0.5MPa 来。

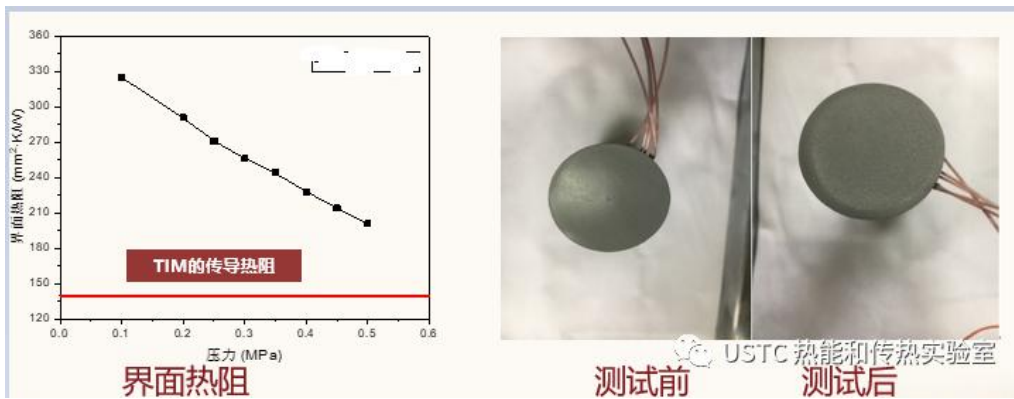
最后一个概念是界面热阻。400mm<sup>2</sup>.K/W 是什么概念呢？对于一个 Ryzen 3000 CPU 来说，其热流密度是 1.62W/mm<sup>2</sup>，那么它通过这样一个界面时的温升就是 648 $^{\circ}\text{C}$ 。可以搞冶炼了，很吓人！当然，CPU 在达到这个温度之前就已经烧坏了。这里，我们假设 CPU 可以耐住 4MPa 的压力，界面热阻是 60mm<sup>2</sup>.K/W，温升 97.2 $^{\circ}\text{C}$ 。还是很吓人，可以烧开水了。

看到这里，我们可以下一个结论。在高热流密度热控领域，仅仅依靠表面粗糙度控制是难以实现界面热阻优化的，所以热界面材料是很重要的。

接下来，看看热界面材料的使用效果。下文中展示的都是货架商品的实际测量效果，（此处隐去了品牌和型号）。

### 1. 材料的传导热阻和真实界面热阻之间存在差异

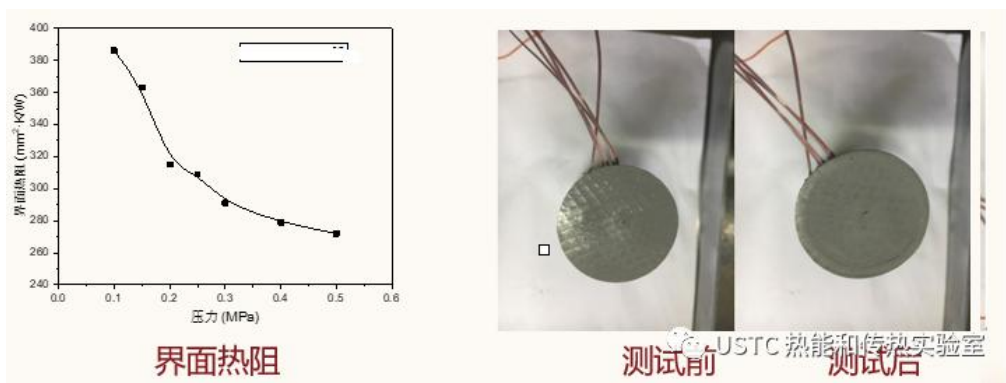
这里，主要是为了说明材料热导率不能直接表征一款导热衬垫的界面热阻。



材料的导热热阻，指的是用材料的热导率折算出来的导热热阻，用傅里叶定理可以直接计算出来。我们先来看看，一块导热衬垫的导热热阻和实际界面热阻之间的差异。图中的红线是材料的热阻，远远小于实际的界面热阻。通过对比测试前、后热界面材料的外观，可以发现这一款热界面材料有着一定的形变，但是外观变化并不大。当我们提供 0.5MPa 的压紧力时，实际的界面热阻远远大于材料的导热热阻，这主要是因为材料的变形量不足以填满界面之间的缝隙，界面之间仍有残存的空气。

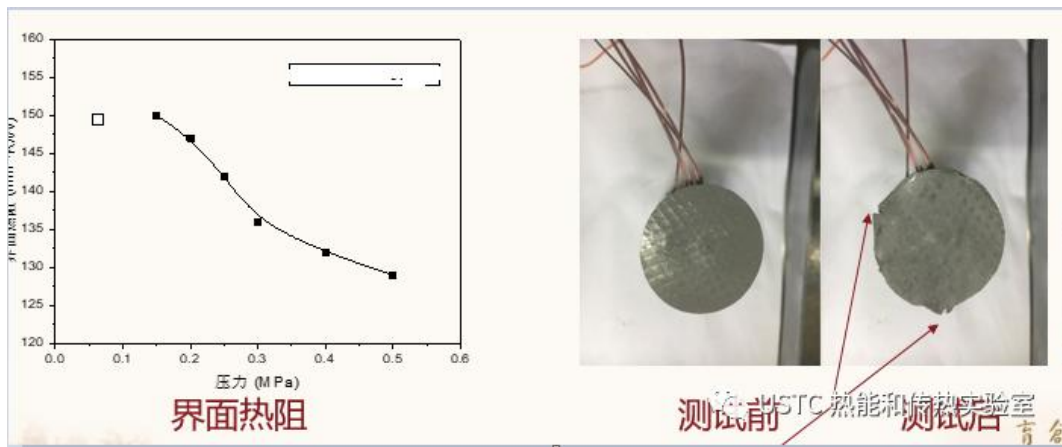
### 2. 硬丝网的效果不大好

金属丝网既可以提高热导率，又能够强化导热衬垫结构，还有助于实现轻薄化。但是，传热效果并不好。原因和上面说的一样，丝网的强度阻碍了导热衬垫的变形，造成填隙效果不佳，从而导致界面热阻较大。与上一个导热衬垫相比，这一款导热衬垫的热导率更高，但界面热阻不降反升。



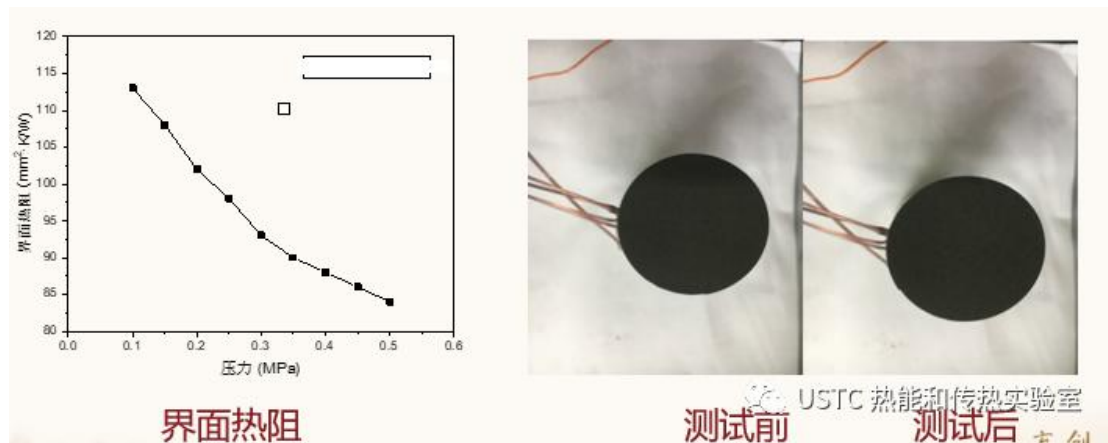
### 3. 软丝网的效果还可以

这一款丝网是软的，在 0.5MPa 时完全压扁了，界面热阻是 130mm²·K/W，比同样压力下的硬接触降低了约 70%，比上一款热界面材料降低了 50%左右。值得一提的是，这一款热界面材料的热导率和上一款是一样的。



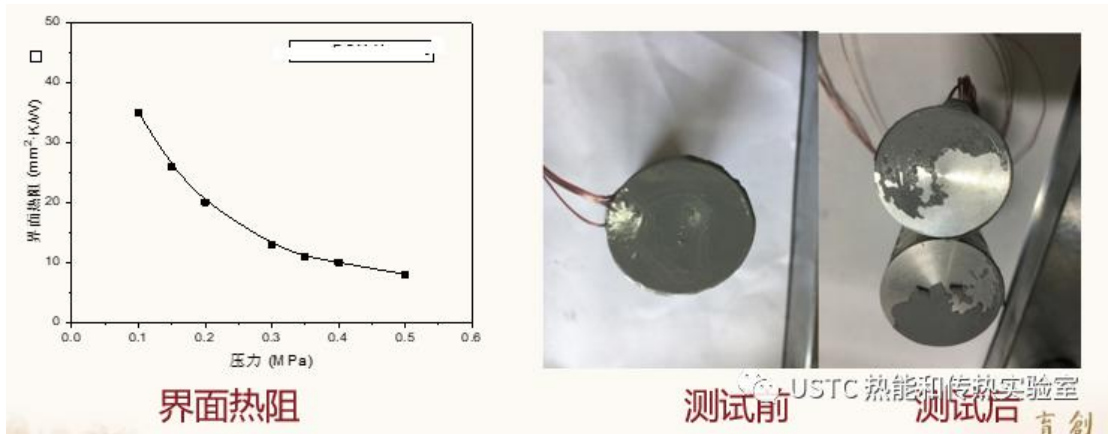
#### 4. 厚一点儿不要紧，关键是变形量

在我测过的这几款材料里，这一款的热导率是最低的，只有  $1.0\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，但是效果却最好，其热阻仅为  $84\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ 。没有意外，这一款是最软的。有点儿意外，这一款挺厚的。使用过后，揭下来的导热衬垫上几乎都能看到金属面的纹理，这说明界面之间的空气基本上被挤干净了。这印证了我们之前的感官认识：热界面材料应该在有限的压力下提供足够的变形量，在此基础上才是去追求高热导率和低厚度。



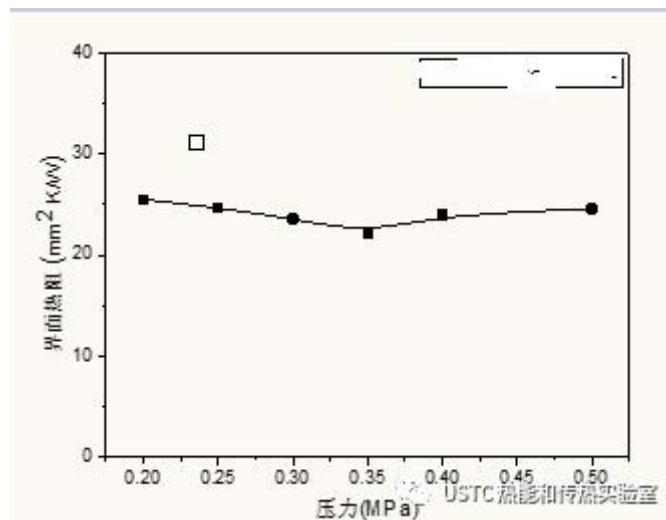
#### 5. 相变材料基的导热衬垫：泄漏是个问题

这一款相变型导热衬垫的界面热阻是  $8\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$  (@ $0.5\text{MPa}$ )，仅仅是硬接触时的 2%，效果不言而喻！但是，用过之后再看，流淌的到处都是，惨不忍睹。这种材料，关键是解决好固化相变的问题。一款理想的相变型热控材料应该是这样：受热后只软化，不液化。还需要更新换代吧。



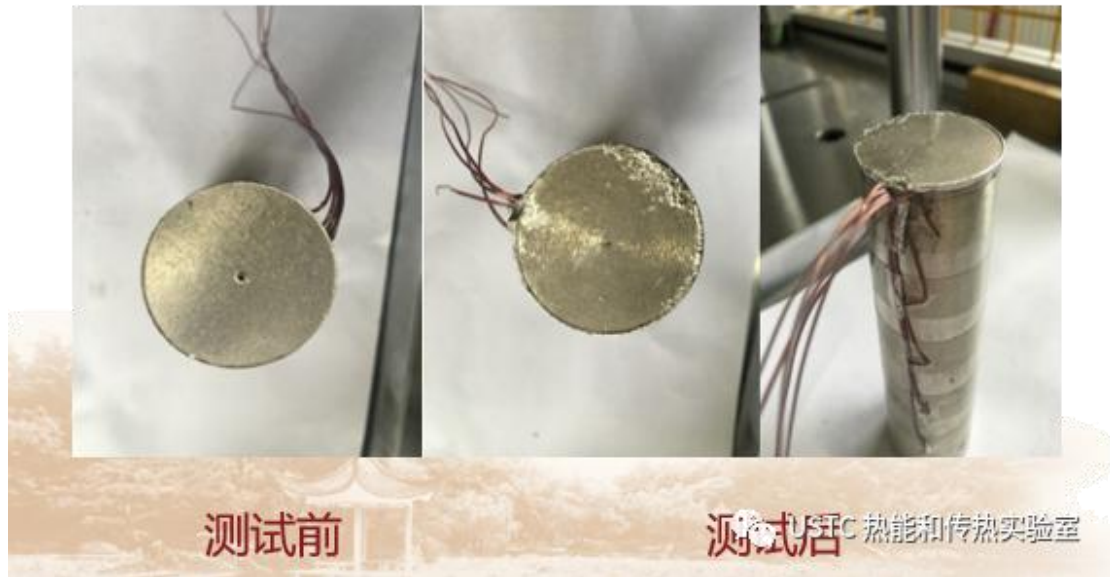
### 6. 导热硅脂

导热硅脂的效果是公认的好，界面热阻小，不需要太大的压紧力，携带方便等等。主要问题是“爬油”，里面的油脂会沿着缝隙爬，时间长了会干掉。当然，也不是所有导热硅脂都会干掉。



### 7. 液态金属

液态金属化了之后，到处流淌，感觉比较危险。当然，这可能是因为我不会用，也许它有更合适的应用场合。单纯地比一下结果，界面热阻 30~40mm<sup>2</sup>·K/W，似乎和硅脂差不多。



综上所述，我们可以得出两个小结论：

- 1) 不要将高热导率和低厚度作为导热衬垫的选型标准：热界面材料应该在有限的压力提供足够的变形量，在此基础上才是去追求高热导率和低厚度。
- 2) 不要轻易选择受热融化的导热衬垫：这主要是从安全和重复可用性的角度考虑，因为它们很难复原，也很难清洗；但是，如果就用 1 次，效果是非常好的，建议用。

## 第三章 导热界面材料基础研究进展

### 3.1 新型填料的合成

2018 年，来自德克萨斯大学达拉斯分校，伊利诺伊大学厄巴纳-尚佩恩分校和休斯顿大学的研究人员同时在《Science》期刊上[1-3]，报道了使用改进的化学气相沉积（CVT）技术来生产高质量的神化硼单晶（BAs），与其他导热结晶材料一样，BAs 通过原子晶格中的振动传递热量。振动可以描述为声子 - 或能量-类似于通过晶格传递热量的准粒子。使用时域光热反射技术（TDTR）测量了室温下 1000 毫米级 BAs 晶体的热导率为  $1000 \pm 90$  W/m/K，成为最有潜力的热界面材料用导热填料。

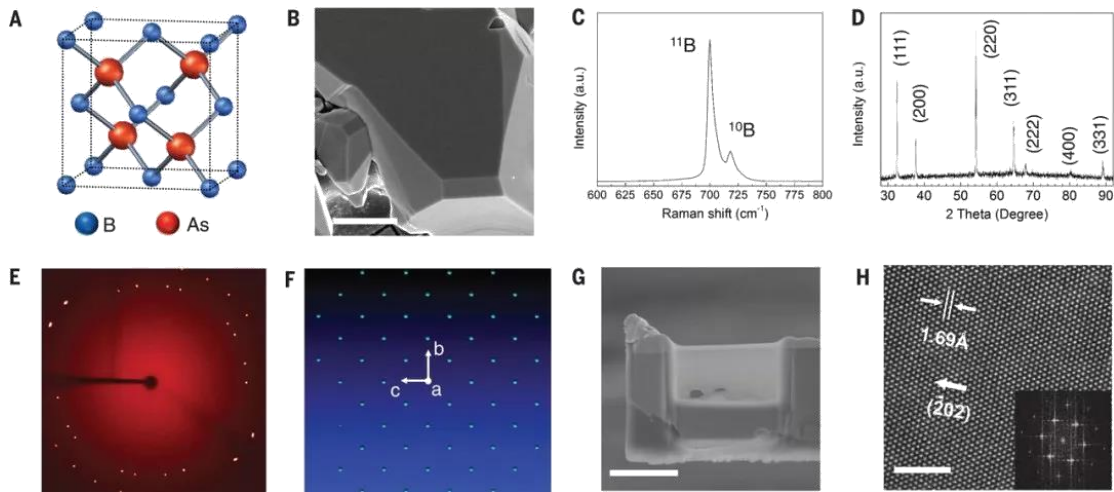


图 3-1 单晶 BAs 的结构表征

在此基础上，2021 年，加州大学洛杉矶分校 Yongjie Hu 教授团队首次报告了基于立方砷化硼 (s-BAs) 的自组装制造技术[4]，通过合理设计聚合物复合材料中的 BAs 微晶，s-BAs 具有非常理想的特性，即高达 21W/m·K 的高导热性和出色的弹性柔度，类似于低至 100kPa 的生物软组织。此外，s-BA 具有很高的灵活性，并在至少 500 个弯曲周期内保持了高电导率，为柔性热冷却开辟了新的应用机会。研究人员展示了器件与功率 LED 的集成，并通过将热点温度降低了 45°C 来测量了 s-BA 的出色冷却性能，超越了现有技术。这项研究证明了可扩展制造的新一代节能灵活的热接口，为未来集成电路和可穿戴电子设备和软机器人等新兴应用的高级热管理提供了广阔的前景。

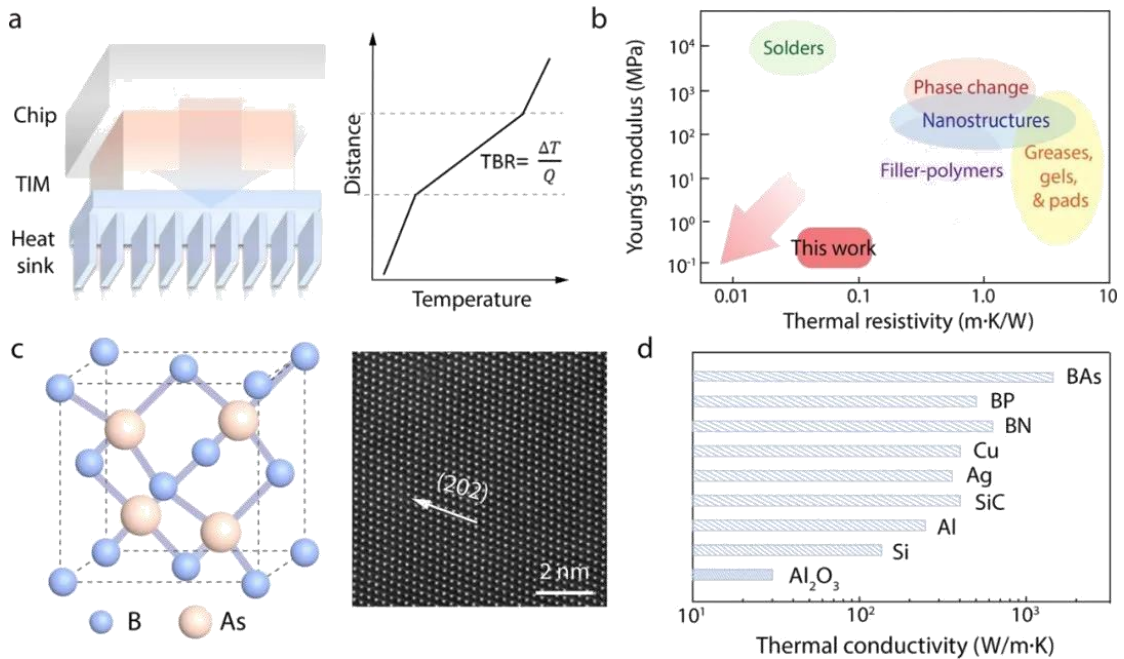


图 3-2. 基于自组装砷化硼 (s-BAs) 的高性能热界面，可增强散热。(a) 电子封装中典型热接口的示意图。芯片通过热接口从芯片到散热器的散热，通常受到所产生的热边界电阻 (TBR) 的限制。 $\Delta T$  是温度下降， $Q$  是穿过界面的热通量。(b) s-BA 与最新技术的性能比较。指向左下角的箭头表示高性能热界面的



设计目标，以实现低弹性模量和低热阻率。(c) 立方 BAs 的闪锌矿晶体结构示意图和显示原子分辨晶格的高分辨率 TEM 图像。箭头指示 (202) 的晶体方向。(d) 不同材料 (包括典型的填料) 的导热系数分布。

## 3.2 新型导热聚合物

传统聚合物固有的低导热系数 $k$  ( $\sim 0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) 限制了它们在需要高散热性能如热界面材料领域上的广泛应用[5]。聚合物分子链的无序性和分子链间相互作用弱是导致聚合物热导率低的主要原因，聚合物链的非晶态结构和随机振动极大地降低了声子的平均自由程，造成大量的声子散射。通过提高聚合物的结晶度、改善聚合物链的取向性、增强分子链间的相互作用，可以有效地改善声子在聚合物链上的传递，从而提高聚合物的热导率。目前，增强分子链的排列和结晶度的最常用方法是拉伸形成聚合物纤维或薄膜，麻省理工的陈刚团队强调获得高聚合热导率在于最大限度地提高了聚合物分子链有序排列，降低了分子链缠结，而不是仅仅追求较高的结晶度[6]。陈刚团队通过对聚乙烯薄膜高度拉伸取向，可获得具有高导热的聚合物薄膜。实际上该薄膜是由结晶态和无定形态的纳米纤维组成的，通过对无定形区的形貌调控，使得无定形区域也具有非常高的导热系数 (约为  $16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )，为往后制备具有高导热非结晶聚合物提供了重要思路。

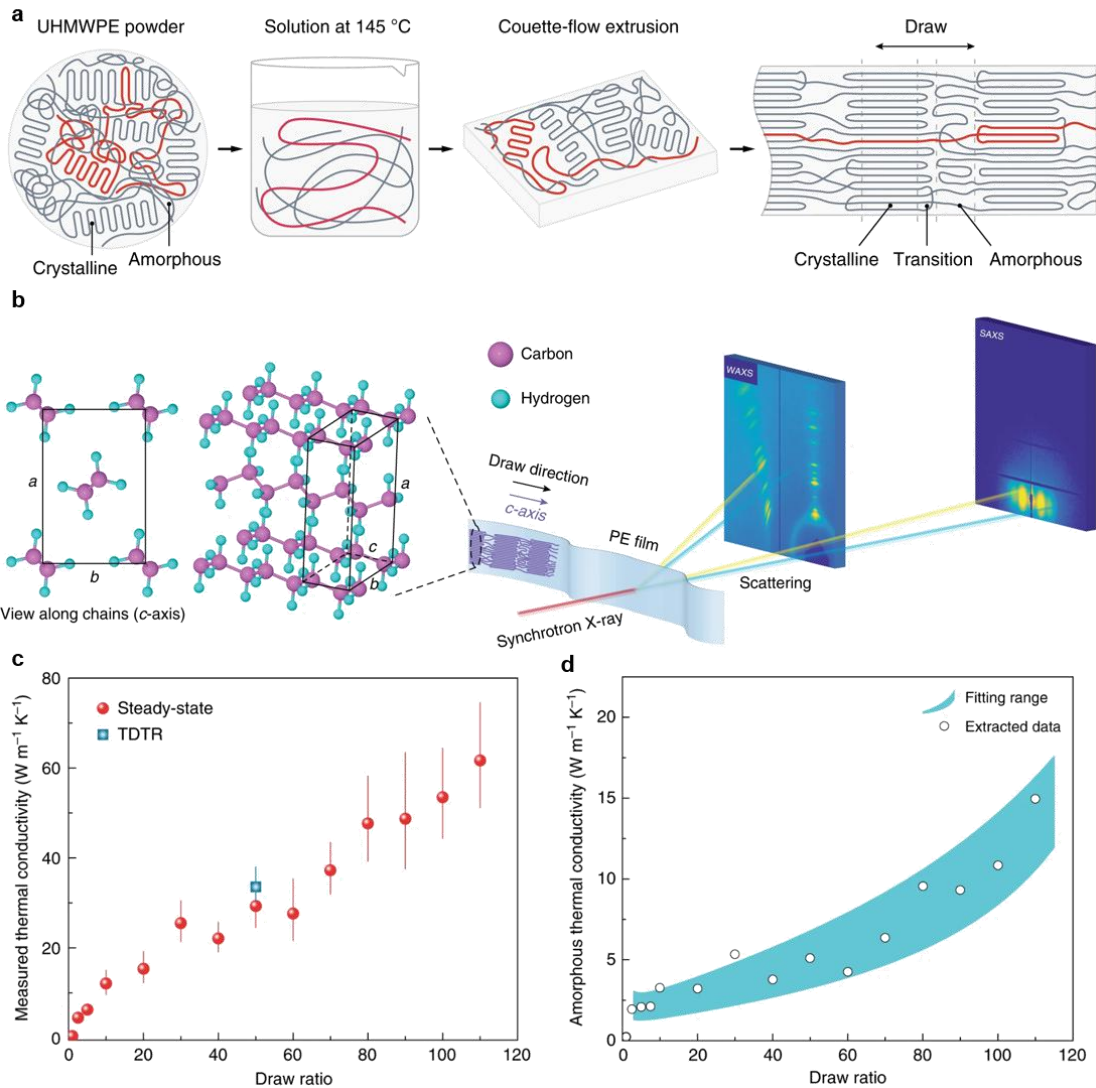


图 3-3 高导热聚乙烯薄膜的制备与表征。(a) 在高温下让聚乙烯粉末在溶剂中溶解，使最初的链缠结展开。后续通过挤出和拉伸的方式使得分子链进一步取向。(b) 结晶聚乙烯的实验装置和正交晶胞的图示。入射光束垂直于绘制方向。晶格常数为  $a=7.42$ ,  $b=4.95$ ,  $c=2.54\text{\AA}$ ，其中  $c$  轴是分子链方向。(c) 测量的总热导率与拉伸比的函数关系。红色球体是从稳态实验中获得。62  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$  的热导率由  $\times 110$  薄膜测得。蓝色方块表示在 3 和 6 MHz 调制下 20 次瞬态热反射测量的平均值。(d) 基于来自 SAXS 分析的拟合结构参数提取的非晶热导率值。

Gun-Ho Kim 教授的团队则把聚合物导热系数提高的重点放在了聚合物中大量存在的非共价作用中[7]。他们认为在聚合物系统中，有序分子链排布中测量的高  $\kappa$  表明热量沿着共价链比弱范德华 (VDW) 相互作用键合的链之间更有效地传递，且增加分子键的强度已被证明可以改善其在纳米分子单层中的导热性，因此他们推断链间热导率的改进可能同样有助于本体聚合物热导率的改进。然而，单独的链间键强度并不能决定本体聚合物中的  $\kappa$ ，许多能够强氢键的聚合物聚合物仍具有很低  $\kappa$  值。相反，最大化本体聚合物材料中的链间热导要求相互作用的强分子间键必须通过短和强的键替代弱的 VDW 且尽可能紧密地连接到聚合物主链。同时，在高于渗透阈值的浓度下实现这些键的均匀分布以形成连续的热网络是至关重要

的。通过合理的设计氢键受体 PAP (聚 (N-丙烯酰基哌啶)), 氢键供体 PAA (聚丙烯酸)、PVA (聚乙烯醇) 和 PVPh (聚 (4-乙烯基苯酚)) 来探究几种不同的 H 键合策略对  $\kappa$  的影响。结果表明通过 PAA 直接连接在主链上形成的短而强的氢键作用, 经过简单共混制备的聚合物在 PAA 占整体 30% 摩尔份数时测得超过  $1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  的导热系数, 比普通的聚合物的  $\kappa$  值高了一个数量级。

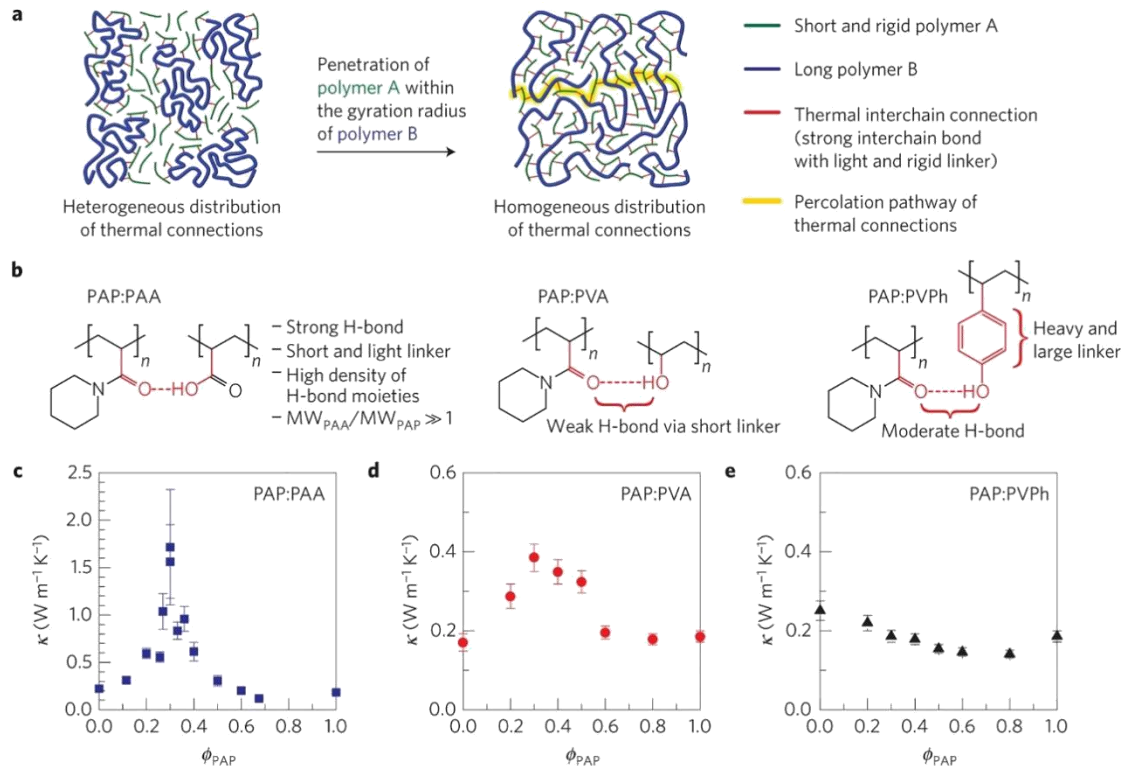


图 3-4. 氢键渗透网络对导热性能的影响 (a) 在相同浓度的氢键部分下, 导热链间连接的异质 (左) 和同质 (右) 分布的图示, 显示了键分布的均匀性如何影响渗透热通路的形成。相对较短且刚性的聚合物 A 穿透较长聚合物 B 的旋转半径内, 并通过强链间键将其保持在扩展构象中, 从而改善链内和链间热传递。(b) 链间氢键的聚合物对 (虚线) -OH 基团与 PAA 和 PVA 的主链紧密相连, 而 PVPh 则通过苯环接头连接到主链上。(c-e) 在不同单体摩尔分数的 PAP 下测量的旋铸 PAP:PAA (c)、PAP:PVA (d) 和 PAP:PVPh (e) 薄膜的热导率。

无独有偶, 麻省理工学院陈刚教授团队联合 Karen K. Gleason 教授团队采用分子工程的方法来同时提高聚合物分子内和分子间的相互作用, 从而提高聚合物的热导率。但他们也指出当前该领域的研究主要都局限在单一提高聚合物分子内相互作用以提高声子沿着分子链方向的传输效率, 或单一提高聚合物分子间的相互作用以提高声子在分子链间的传输效率。这些方法需要特殊的制备过程, 而且材料的热率呈现各向异性, 在实际应用中难以保证稳定性和可靠性。因此他们采用自下而上的氧化化学气相沉积 (OCVD) 法, 利用沿着聚合物伸长链方向强的 C=C 共价键和分子链间强的  $\pi$ - $\pi$  堆叠非共价键相互作用, 首次实现了共轲聚合物薄膜 [聚 (3-己基噻吩), P3HT] 的高热导率。P3HT 中同时存在的分子内和分子间的相互作用实现了高达  $2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  的室温热导率, 是传统聚合物的 10 倍。他们研究发现, P3HT 具有刚性的共轲主链和强的分子间  $\pi$ - $\pi$  堆积相互作用, 与 C-C 单键的热导率相比, 共轲的

C=C 双键强度几乎是它的两倍，因此有望显著改善聚合物链方向上的声子传输。同时，分子链间的 $\pi$ - $\pi$ 堆积相互作用是范德华力的 10-100 倍，可以增强声子在聚合物链间的传输。

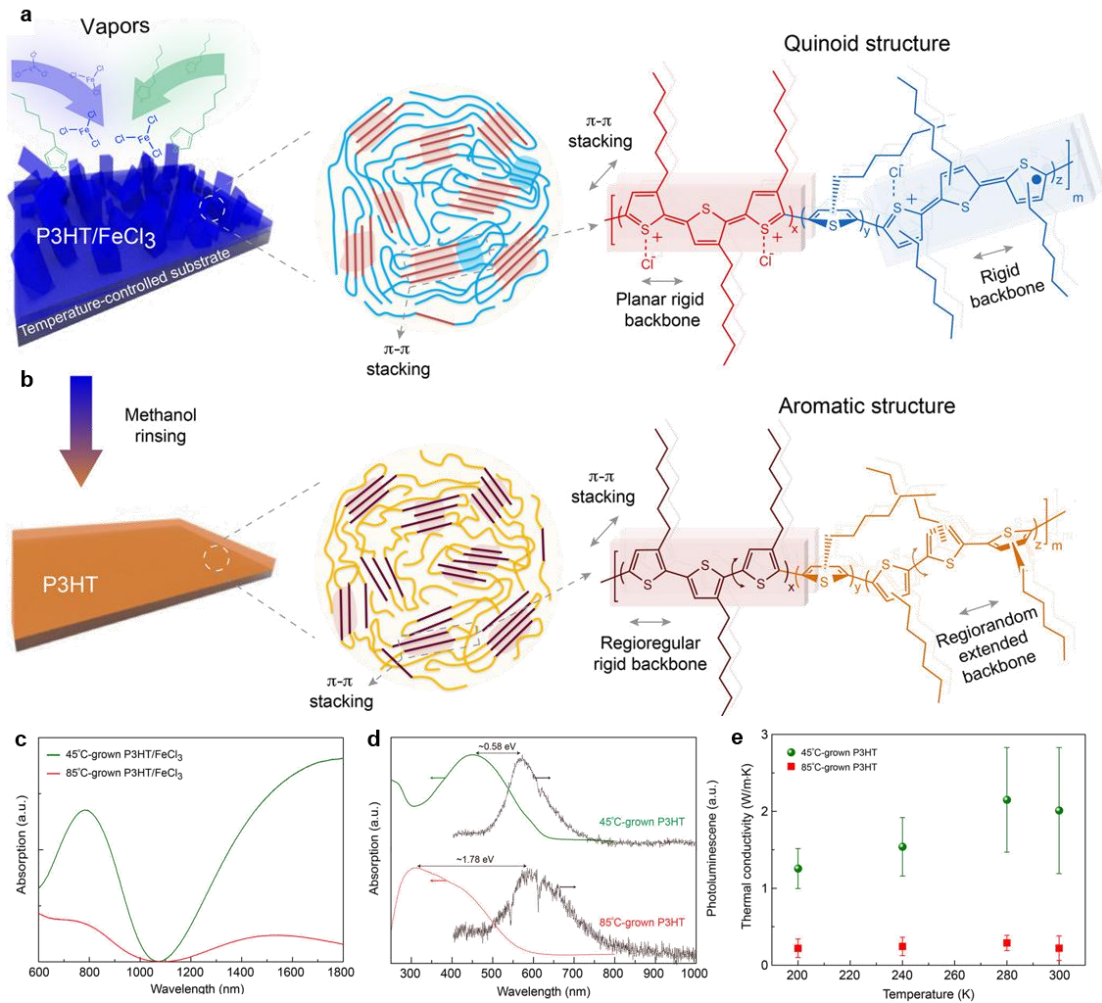


图 3-5. (a) P3HT/FeCl<sub>3</sub> 薄膜。左图：吸附的单体（3-己基噻吩）和氧化剂（FeCl<sub>3</sub>）从它们的气相和纳米棒状结构的连续生长开始薄膜生长。中：掺杂 P3HT 薄膜的微观结构示意图；有序链颗粒（红色和蓝色阴影）是 p-p 堆叠组件。右图：在 FeCl<sub>3</sub> 上生长的醌型延伸链。(b) P3HT 薄膜。中：去掺杂的 P3HT 薄膜的微观结构示意图，显示了通过 p-p 堆叠（红色阴影）和扩展链的有序链组装，扭曲受到抑制，源自 (a) 中的醌型结构。(c) P3HT/FeCl<sub>3</sub> 薄膜的 UV-vis-NIR 光谱在 700 到 900 nm 和 1800 nm 处观察到（双）极化子的典型吸收带，表明在聚合过程中形成了醌型结构。(d) 玻璃基板上本征 P3HT 薄膜的吸收和发射光谱。在吸收光谱中，45°C 生长的 P3HT 样品的吸收峰出现在更长的波长处，表明与 85°C 生长的 P3HT 相比，共轭长度更长。(e) TDTR 测量的热导率。在玻璃基板上生长的 P3HT 薄膜的温度依赖性热导率。

### 3.3 新的热界面材料制备工艺

2020 年，北京化工大学 Yonglai Lu 教授研究团队通过一种新型的氧化石墨烯辅助凝胶化并结合简便的热压缩工艺方法制备了具有优异散热性能的高柔性 rGO-BN-NR 复合薄膜 [8]。实验结果表明在 BN 负载量为 250 phr 的含量下，制备的 rGO-BN-NR 复合薄膜面内热导率达到了 16.0 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>，同时复合薄膜还表现出优异的机械性能（断裂伸长率为 113%）、

阻燃能力和显著的抗静电能力。热红外成像结合有限元模拟证明了 rGO-BN-NR 复合膜具有较强的散热能力，在各种电子器件的热管理领域中展现出了广阔的应用前景。

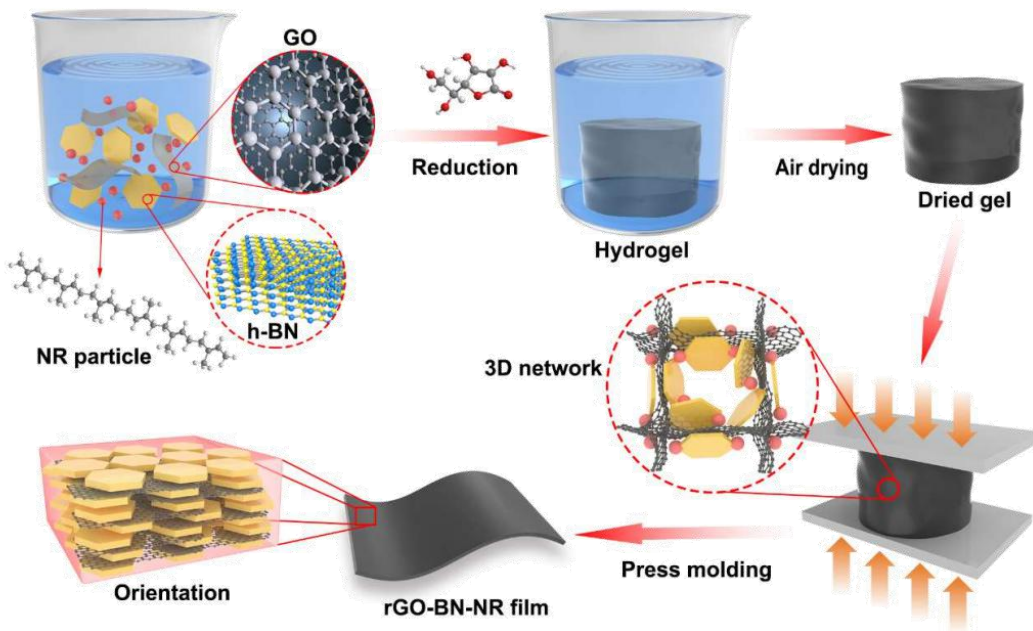


图 3-6. rGO-BN-NR 薄膜制备过程示意图

2020 年，中南大学 Chaoke Zhou 教授团队研究了在 Cr 修饰的 Cu 泡沫模板上使用化学沉积法将金刚石沉积在模板表面，之后使用气压渗入的方式与 Al 基基体进行反应得到 3D 金刚石导热材料[9]。得益于金刚石高的本征热导率，复合物的热导率在金刚石的添加量在 4.6 vol.% 的含量下达到  $315.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，比纯 Al 的热导率高了 54%。致密的 3D 金刚石网络可形成高效的导热通道，减少声子界面散射，在金属基材料中构建 3D 金刚石导热网络的研究方法可能为设计和制备高效热管理填充材料打开了新的大门。

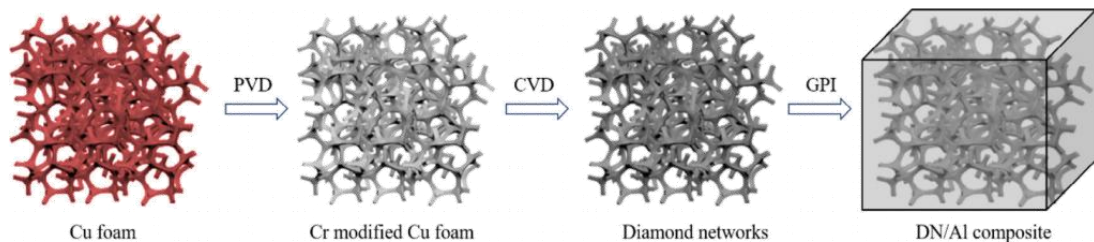


图 3-7. 金刚石/铝复合物的制备过程示意图。

2021 年，北京大学 Shulin Bai 教授团队研究了一种经济、简便操作的 3D 打印方法制备了石墨烯垂直填充的热塑性聚氨酯（TPU）复合材料[10]。复合材料的制备过程如图所示。研究表明，当石墨烯含量为 45 wt% 时，打印出来的垂直排列结构材料表现出高达  $12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  的贯穿面导热系数，而此导热系数是材料水平方向结构的 8 倍。由于石墨烯具有良好的取向度和精细控制打印参数实现的多尺度致密结构，因而获得了优异的导热系数。同时，作

者利用有限元仿真证实了各向异性热导设计对高热导复合材料的重要影响。

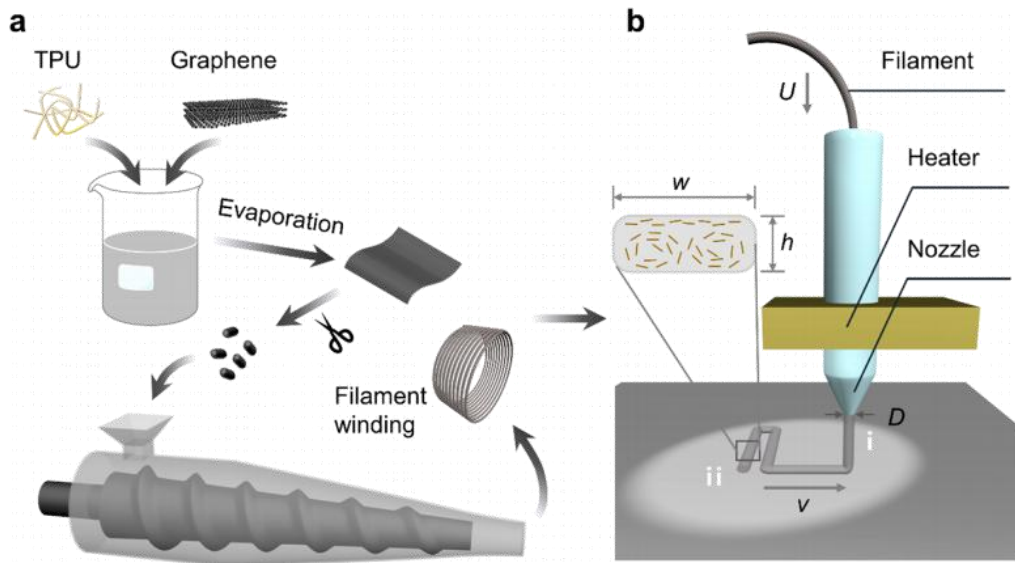


图 3-8. (a) 石墨烯/TPU 长丝合成示意图。(b) 石墨烯/TPU 的典型 FDM 印刷工艺石墨烯片倾向于在挤出过程中对齐并重新定向，最终形成不对称排列的结构（图 b 中的插图）。U-进给率决定喷嘴内挤出体积流量；w-沉积长丝的宽度；h-沉积长丝的高度；D-喷嘴直径；V-打印头速度。

## 第四章 细分市场的导热材料需求和应用

此版块内容为收费内容，下文展示具体领域。如需购买，可联系工作人员。此版块将包含以下内容：

- 1) 细分行业市场规模
- 2) 细分行业头部企业在用导热材料具体型号、相关性能参数
- 3) 细分行业头部企业导入导热材料使用的测试评定方法
- 4) 细分行业头部企业重点关注的材料特征
- 5) 细分行业头部企业材料需求趋势
- 6) 细分行业头部企业导热材料当前主要供应链

具体调研内容，可根据需求进行调整。

您可选择购买如下某个或全部细分行业的调研报告：

### 4.1 导热界面材料在新能源汽车、储能行业的应用

### 4.2 导热界面材料在通信行业的应用

### 4.3 导热界面材料在电源、光伏行业的应用

### 4.4 导热界面材料在智能手机、笔记本电脑、可穿戴设备上的应用

## 第五章 国内典型企业及产品介绍

此版块内容为收费内容，如需购买，可联系工作人员。此版块将包含以下内容：

- 1) 公司规模、发展历史
- 2) 股东结构
- 3) 主要产品类别、产品特征、产品实际评测
- 4) 营业额、主要客户群体
- 5) 知识产权分析
- 6) 前景预测

调研具体内容依据客户需求可做调整。



## 参考文献

1. Kang, J. S., Li, M., Wu, H., Nguyen, H. & Hu, Y. Experimental observation of high thermal conductivity in boron arsenide. *Science* 361, 575–578 (2018).
2. Li, S. et al. High thermal conductivity in cubic boron arsenide crystals. *Science* 361, 579–581 (2018).
3. Tian, F. et al. Unusual high thermal conductivity in boron arsenide bulk crystals. *Science* 361, 582–585 (2018)
4. Cui, Y. et al. Flexible thermal interface based on self-assembled boron arsenide for high-performance thermal management. *Nature Communications*, 12:1284 (2021).
5. Guo Y, Ruan K, Shi X, et al. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review. *Composites Science and Technology*, 2020, 193: 108134.
6. Xu Y, Kraemer D, Song B, et al. Nanostructured polymer films with metal-like thermal conductivity. *Nature communications*, 2019, 10(1): 1-8.
7. Kim G H, Lee D, Shanker A, et al. High thermal conductivity in amorphous polymer blends by engineered interchain interactions. *Nature materials*, 2015, 14(3): 295-300.
8. Xu Y, Wang X, Zhou J, et al. Molecular engineered conjugated polymer with high thermal conductivity. *Science advances*, 2018, 4(3): eaar3031.
9. Li J, et al. Advanced flexible rGO-BN natural rubber films with high thermal conductivity for improved thermal management capability. *Carbon*, 2020, 162: 46-55.
10. Zhang L et al. Construction of 3D interconnected diamond networks in Al-matrix composite for high-efficiency thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 380:122551.
11. Guo H, et al. Highly Thermally Conductive 3D Printed Graphene Filled Polymer Composites for Scalable Thermal Management Applications. *ACS Nano*, 2021, 15(4).
12. ZELLER R, POHL R. Thermal conductivity and specific heat of noncrystalline solids. *Physical Review B*, 1971, 4(6): 2029.
13. PLAWSKY J L. *Transport phenomena fundamentals*. CRC press, 2020.
14. BARTLETT M D, KAZEM N, POWELL-PALM M J, et al. High thermal conductivity in soft elastomers with elongated liquid metal inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(9): 2143-8.

15. Qinwei Wei, et al. Superhigh Electromagnetic Interference Shielding of Ultrathin Aligned Pristine Graphene Nanosheets Film. *Advanced materials*, 2020, 32, 1907411.

16. Dehai Yu, et al. A Super-Stretchable Liquid Metal Foamed Elastomer for Tunable Control of Electromagnetic Waves and Thermal Transport. *Advanced Sciences*, 2020, 7, 2000177.

17. Shasha Wang, et al. Strong yet tough graphene/graphene oxide hybrid films. *Carbon*, 2021, 179, 469-476.

## 报告编写成员（按字母排序）

### 专家组：

北京有色金属研究总院	郭 宏
工信部电子五所	孔叔钊
上海大学	王金合
中国科学院电工研究所北院	徐 菊
中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室	虞锦洪
中国科学院深圳先进技术研究院	曾小亮
上海工程技术大学	张恒运

### 编撰组：

陈继良 刘则轩 王 娜 邢 阔

### 调研组：

韩 洋 孙 萌 孙平娥 肖 斌 谢金芳

## 报告组织单位

中电标协热管理行业工作委员会

## 报告支持单位

深圳市八达威科技有限公司

四川力久律师事务所

热设计网

更多信息与合作请关注公众号及网站



中电标协热管理行业工作委员会



热设计网

中电标协热管理行业工作委员会网址：[www.tmwc-cesa.com](http://www.tmwc-cesa.com)

热设计网网址：[www.resheji.com](http://www.resheji.com)



霍 湘  
(編輯)

# 作 者



劉則軒



邢 闊



韓 洋



郭宏

# 風 采



張恒運



陳繼良



孔叔鈞



曾小亮



王金合