

基于有限元分析的高功率电子模块热管理与机械强度协同设计

丁晓阳

中国电子科技集团公司第五十四研究所，河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060010

摘 要： 针对高功率电子模块在工作过程中产生大量热量导致器件性能下降甚至失效的问题，构建有限元分析模型对模块进行热-力耦合仿真。通过优化器件结构布局与封装材料参数，实现热管理与机械强度的协同设计。在保障热量有效传导与散逸的同时，提升模块在热应力作用下的结构稳定性。仿真结果显示，合理设计能够显著降低器件内部温升与热应力峰值，提高模块运行的可靠性与寿命，为高功率电子系统提供有效的热-力设计方案。

关 键 词： 高功率电子模块；有限元分析；热管理；机械强度；协同设计

Collaborative Design of Thermal Management and Mechanical Strength for High-Power Electronic Modules Based on Finite Element Analysis

Ding Xiaoyang

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract： To address the issue of performance degradation or even failure of high-power electronic modules due to excessive heat generation during operation, a finite element analysis model is constructed to perform thermal-mechanical coupling simulations on the modules. By optimizing the structural layout of the components and the parameters of the packaging materials, a collaborative design of thermal management and mechanical strength is achieved. This design ensures effective heat conduction and dissipation while enhancing the structural stability of the modules under thermal stress. Simulation results indicate that rational design can significantly reduce internal temperature rise and peak thermal stress in the components, thereby improving the reliability and lifespan of module operation. This provides an effective thermal-mechanical design solution for high-power electronic systems.

Keywords： high-power electronic modules; finite element analysis; thermal management; mechanical strength; collaborative design

引言

随着功率电子技术的快速发展，高集成度和高功率密度电子模块被广泛应用于电动汽车、电力电子设备等领域。然而，功率器件在运行中所产生的高热通量，不仅影响系统效率，还可能引发封装结构损伤，降低模块可靠性。如何在有效散热的同时保障结构稳定性，已成为当前工程设计中的关键挑战。通过有限元分析开展热管理与机械强度的协同设计，有望实现性能与可靠性的双重优化，为工程应用提供科学依据。

一、高功率电子模块热与力耦合失效机理分析

高功率电子模块在持续高功率密度条件下运行时，内部会产生大量热量。若散热不及时或设计不合理，芯片结温迅速升高，不仅降低器件性能，还可能导致热击穿和系统失效。尤其在大功率场景中，器件往往处于极限热负荷边缘，温度梯度大，局部过热现象严重，使得材料间热膨胀不一致的问题更加突出。热量积聚造成封装结构受热变形，加剧了焊点、键合线、导热层等薄弱

部位的热应力集中，成为触发器件损坏的主要原因之一。因此，深入理解热与力相互作用下的失效机制，是实现模块高可靠性设计的基础^[1]。

从材料层级来看，不同封装材料的热导率、热膨胀系数和杨氏模量存在明显差异，在热循环过程中形成复杂的热-力耦合场。芯片与基板之间、焊料层与封装体之间的界面是应力集中的核心区域，易发生剥离、裂纹甚至疲劳破坏。特别是在快速启动、频繁开关或外部环境波动剧烈的工况下，瞬态热应力峰值可

能数倍于稳态条件下的载荷，导致结构应力远超材料屈服强度。

在实际设计中，若仅依赖经验或单一物理场分析，难以全面揭示耦合失效的本质过程。有限元分析作为一种多物理场耦合仿真手段，可在温度场、应力场之间建立精细的映射关系，辅助工程师识别高风险区域与失效路径。通过对器件运行全过程进行热-力联合仿真，可以准确评估不同结构布局、材料选择与热控策略对模块热应力行为的影响，避免局部设计优化带来的整体性能退化问题。理解热力耦合失效机理，不仅有助于提升单个模块的可靠性，也为系统级热-力协同设计提供理论支撑与工程指导^[2]。

二、有限元建模方法及热-力分析参数设置

有限元建模是实现高功率电子模块热-力协同分析的关键步骤，决定了后续仿真结果的准确性与工程指导价值。构建模型时需充分考虑模块内部的多层封装结构，包括芯片层、焊料层、基板层、导热介质以及外壳材料等，建立精细的三维几何结构和材料划分。由于各功能层之间存在明显的热物性与力学性能差异，必须在建模初期就对各材料属性进行精确定义，如热导率、比热容、密度、弹性模量、泊松比及热膨胀系数等。此外，接触界面也是建模的重点之一，应引入热接触电阻与机械接触行为的边界设置，以真实还原芯片封装内部的传热与应力传递路径。考虑到高功率工作条件下的非线性热应力响应，网格划分需兼顾计算效率与局部精度，尤其在应力集中区应适当加密，提高仿真结果的分辨能力^[3]。

在热分析方面，边界条件设置直接影响热场分布的合理性。高功率电子模块通常处于强制对流或自然对流环境中，需根据散热器类型和流体速度设定对流换热系数，并设定外壳与环境之间的辐射热传导边界。同时，模块内部热源的设置应基于器件额定功率密度与实际工作电流、电压条件，通过热源函数精确加载芯片表面或体积内部。此外，若考虑瞬态热效应，还需输入合理的时间步长和总模拟时长，以观察热量积聚、传导与散逸过程中的动态演变。仿真中可获取温度云图、热流矢量图与最大结温数据，为进一步结构应力分析提供热场输入。值得注意的是，在高功率工作场景下，温度梯度对应力分布影响显著，因此热仿真结果需具备空间分辨率高、边界拟合真实的特点，才能为力学分析提供准确的初始条件。

进行热-力耦合分析时，需在有限元平台中建立多物理场之间的耦合关系，将热场计算结果作为载荷传递至结构力学模块。应力分析中，应重点关注器件在温度载荷下产生的热膨胀变形与应力集中区域，评估材料是否超出屈服极限或产生塑性变形。通过分析各关键结构的位移分布、主应力、剪应力与应变能密度，可识别可能发生失效的高风险部位。实际仿真过程中还需考虑热循环载荷、封装预应力、安装固定约束等因素的叠加影响，提升

模型对现实工况的覆盖能力。在模拟复杂载荷作用下的非线性响应时，需采用渐进式求解方法并引入材料非线性本构模型，以避免求解发散或物理失真^[4]。仿真结果不仅可用于验证热设计方案的有效性，还能为器件结构优化提供反馈依据，实现从“热控优先”向“热-力协同”的设计范式转变。

三、热管理策略对温升控制的影响研究

在高功率电子模块运行过程中，大量电能转化为热能使得芯片结温迅速升高，温升问题成为限制模块性能和寿命的关键因素。有效的热管理策略不仅可降低器件温度，还能缓解由热梯度引发的热应力集中，提高整个模块的结构稳定性与长期可靠性。不同的热管理方式对温升控制效果存在明显差异，常见策略包括提高材料热导率、优化结构布局、增强散热路径、设置冷却系统等。有限元热分析可作为评价各策略有效性的基础手段，通过仿真模拟不同设计下的温度分布与热流路径，量化温升变化趋势，为热设计提供科学依据。例如，在模块设计中引入高导热界面材料，可显著提升芯片与散热结构之间的热耦合效率，从而减少结温与壳温之间的温差，减缓局部过热现象^[5]。

从材料角度来看，导热性能是影响模块整体热阻的关键因素。采用高热导率的陶瓷基板（如氮化铝、氮化硅）替代传统氧化铝材料，能有效提高散热能力，降低芯片区域温度。同时，焊料层和填充材料的导热性也对温升控制起到决定性作用，特别是在高频开关器件中，导热胶、TIM等界面材料的热阻占比高于50%。因此，在材料选型阶段，应优先选用低热阻、高稳定性的复合导热介质，以保障热流快速穿透多个封装层向外传导。此外，模块整体结构布局的优化也是提升热管理能力的重要手段。通过调整芯片排布方式、减小功率密集区域、优化热流通道，可实现热量在模块内部的均匀分布，避免局部热点的形成。

冷却系统设计是主动热管理策略的核心，尤其在高热流密度应用中，采用强制对流散热、液冷冷板、喷流冷却等方式已成为常规选择。冷却方式的选择需根据模块功率等级、尺寸限制与运行环境进行匹配。在有限元仿真中，可以分别对自然对流与强制对流进行建模，并通过设置换热边界条件分析其对温升控制的具体影响。仿真结果表明，在同等热源条件下，强制对流可将最大结温降低20%以上，大幅提升模块安全工作裕度。进一步地，采用液冷冷却结构，尤其是微通道冷板等先进技术，能够实现大面积快速热交换，为未来更高功率密度模块提供散热保障^[6]。

四、机械强度设计在热应力控制中的作用

在高功率电子模块中，机械强度设计对于控制热应力、提升结构可靠性具有至关重要的作用。由于不同材料在热环境下的热膨胀特性存在显著差异，热循环过程中产生的热应力往往集中于

界面位置与几何突变区域，极易引发裂纹、剥离、翘曲等结构失效问题。合理的机械强度设计不仅能够提高模块在热载荷下的结构稳定性，还能有效调节内部应力分布，使其远离材料屈服极限，从而降低失效风险。在热—力耦合仿真中，通过精细分析结构在热载荷下的应力响应，发现模块常见失效区域集中于芯片与焊料层、基板与铜层之间，若材料强度不足或界面结合薄弱，即使温度不高，也可能因局部应力峰值引发破坏。因此，结构层级的强度设计不应作为热管理的附属条件，而应与热设计协同进行，共同保障模块的长期可靠运行。

在结构设计中，首先需选取力学性能稳定、热循环疲劳寿命高的材料，尤其是在焊点、键合线、填充胶等微小连接区域，应重点考虑其弹性模量、剪切强度与疲劳性能。弹性模量的选择直接影响热变形协调能力，例如在芯片与基板之间添加中间缓冲层或使用低模量导热材料，有助于释放热应力，减缓界面应变集中。此外，在器件布局上，应尽量避免尖角、孔洞等应力集中结构，采用圆角过渡、对称布置等结构优化手段，使热应力在各功能层之间逐步衰减，避免因局部强化导致整体结构脆弱的问题。在模块封装过程中，通过设置预压装配、强化边缘加固结构等手段，也能有效提升整体机械强度，抑制热胀冷缩带来的结构翘曲与脱层现象。特别是在器件反复通断、高频震动或环境变化频繁的应用场景中，结构强度冗余设计成为保障其热应力控制能力的关键因素^[7]。

有限元热—力耦合仿真为机械强度设计提供了定量分析手段，通过构建材料本构模型与边界加载路径，可模拟实际工况下各部位的应力分布与变形状态。仿真结果显示，在热源功率一定的前提下，结构强度优化可显著降低芯片热应力峰值及基板变形量，提升封装完整性。例如，对比分析不同厚度铜层或不同热膨胀系数填充材料对结构应力的影响，可发现强度分布均匀、材料匹配度高的结构在热循环后表现出更好的稳定性与疲劳抗力。此外，通过参数化建模与敏感性分析，可以识别关键结构尺寸对应力响应的控制权重，指导工程师在设计阶段进行尺寸调整与材料替换，从根本上实现“结构分担热应力”的设计目标^[8]。

五、热管理与结构强度的协同优化设计方案

在高功率电子模块的设计过程中，热管理与结构强度往往被视为两个相对独立的设计方向，但实际工程应用表明，两者间存在复杂而密切的耦合关系。热管理追求高效散热，往往强调导热性能优越的材料和结构形式；而结构强度设计则关注材料匹配性、力学承载能力与热应力释放路径的合理性。如果仅强调散热而忽视结构强度，可能导致热应力集中、材料疲劳失效；反之，过度强化结构而牺牲导热路径，又会引发局部过热、功率器件性能衰退。因此，构建一种热管理与结构强度协同优化的设计方法，能够在实现高效散热同时保证模块结构稳定性，成为提升

高功率电子模块可靠性与寿命的关键策略。协同优化不仅是参数调整，更是一种设计思维的融合，即在材料、结构、工艺等多个维度上协调各项性能指标，推动多物理场设计的系统化发展^[9]。

实现热—力协同优化，需依托于高精度有限元仿真平台，构建涵盖热传导、热膨胀、力学响应与材料失效等因素的多物理场模型。在建模过程中，首先对模块进行三维几何建构，明确各功能层的材料属性、边界条件与热源分布，通过稳态与瞬态热分析获取温度场分布，再将其作为载荷输入至结构力学模块，分析热应力与变形行为。在此基础上，可引入参数化设计手段，对材料厚度、几何尺寸、界面形态等关键参数进行变量定义，并通过灵敏度分析识别对热应力影响最大的设计变量。接着，借助多目标优化算法（如响应面优化、遗传算法等），对目标函数（如最大结温、应力峰值、变形量）进行全局优化搜索，寻求热性能与结构强度的最优平衡点。该过程不仅能实现设计效率提升，还可避免传统依靠经验逐步试错的低效路径，为工程实际提供高可靠性的设计方案。

例如，在某 SiC 功率模块设计中，研发团队采用 ANSYS Workbench 进行热—力耦合优化。初始设计中芯片中心结温高达 173℃，焊料层最大剪应力超过 45 MPa，存在失效风险。仿真模型首先建立芯片—焊料—DBC 基板—散热器的全结构层级，设置功率热源、对流换热边界与材料热膨胀本构关系。通过调整 DBC 铜层厚度与焊料层弹性模量，结合热导胶界面优化，系统结温下降至 152℃，焊料层应力降低约 30%。同时，优化铜层布局避免了应力集中，实现了热性能与结构可靠性的协同提升。最终方案通过红外热像验证热分布一致性，并以应力测试片确认焊接区域应力分布匹配仿真预测。如图 1 所示。

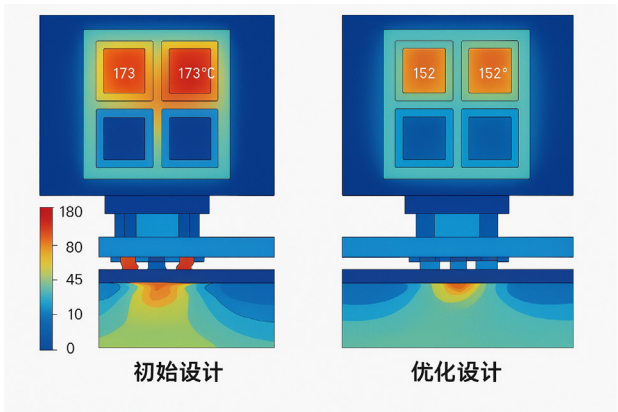


图1 SiC 功率模块设计前后对比图

该类优化策略也可因应用场景差异而灵活调整。在高频高热环境中，应选用导热性与抗热疲劳能力兼优的复合材料；在结构振动显著的装备中，则应强化边界支撑区域，降低器件应变与裂纹扩展速率。结构布局方面应避免热桥或冷桥形成，增强热应力缓释通道^[10]。采用分层协同设计法，可将热控聚焦于散热路径通畅与导热层配置，将结构优化集中于几何应力平滑与固定点布置，从系统维度统筹协调各模块性能。最终通过红外成像、应力

片分析及热应变监测等手段对优化模型进行验证，确保热—力预测结果与实际环境响应相一致，从而显著提升模块在复杂工况下的稳定性与可靠性，体现协同设计的工程优势。

六、结语

高功率电子模块在高热流密度和复杂载荷条件下的可靠运行，离不开热管理与机械强度的协同设计。通过有限元多物理场

建模与仿真，可系统分析热与力耦合机制，优化材料选型、结构布局与冷却策略，实现温升控制与结构稳定性的同步提升。协同优化方法不仅提升模块在热循环与机械应力下的耐久性，也为高集成度、高可靠性电子系统的设计提供了理论支撑与技术路径，具有广泛的工程应用前景与现实价值。

参考文献

- [1] 谢天赐. 某型水下目标模拟器高功率密度驱动技术研究 [D]. 北华航天工业学院, 2024.DOI:10.27836/d.cnki.gbhht.2024.000097.
- [2] 牛海君, 银军. 一种宽带高功率放大器的设计与实现 [J]. 通讯世界, 2024, 31(05): 4-6.
- [3] 王广来. 基于石墨嵌入式 SiC 功率模块封装的结构设计与优化 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.000606.
- [4] 刘响黎. 大功率碳化硅功率模块多芯片并联封装集成方法 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.001188.
- [5] 史海林, 张军, 黄栋, 等. 高功率密度 DC/DC 电源模块结构与封装 [J]. 电子工艺技术, 2024, 45(03): 10-12+20.DOI:10.14176/j.issn.1001-3474.2024.03.003.
- [6] 陈鸿. 低感叠层电路功率模块封装技术及其开关特性研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2024.DOI:10.27049/d.cnki.gglde.2024.001519.
- [7] 雷霖. 智能功率模块栅极驱动电路的研究 [D]. 贵州大学, 2024.DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2024.003159.
- [8] 岳嘉瑞. 高功率微波对 MOSFET 集成电路的损伤仿真研究 [D]. 西安石油大学, 2024.DOI:10.27400/d.cnki.gxasc.2024.000921.
- [9] 陈兴, 张超, 陈东博, 等. 一种三维集成的 Ku 波段高功率 T/R 模块 [J]. 半导体技术, 2024, 49(06): 569-574.DOI:10.13290/j.cnki.bdtjs.2024.06.010.
- [10] 殷超, 解鹏程, 刘彬, 等. 高功率密度电力电子模组热特性研究与试验 [J]. 高压电器, 2024, 60(12): 143-151.DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.016.