

LED 照明灯具散热结构与优化

朱晓军

贵州航天风华实业有限公司，贵州省遵义市，563319；

摘要：随着 LED 照明灯具功率密度的不断攀升，散热问题成为制约其可靠性与寿命的关键因素。本文围绕 LED 照明灯具散热结构与优化展开研究，从结构设计、热设计、材料创新、成本管控等多个维度进行深入分析。通过对散热器拓扑优化、接触界面工程、热流密度控制、仿真技术应用等方面的探讨，结合新型散热材料的研究与应用，提出了一系列有效的散热结构与优化策略，旨在提高 LED 照明灯具的散热性能，降低结温，延长其使用寿命，同时兼顾成本控制，为 LED 照明产业的发展提供理论支持和技术参考。

关键词：LED 照明灯具；散热结构设计；优化策略；热仿真

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.047

引言

在当今照明领域，LED 照明灯具凭借其高效节能、寿命长、响应速度快等诸多优势，得到了广泛的应用和快速的发展。然而，随着 LED 光电器件功率密度的持续攀升，散热问题逐渐成为制约产品可靠性与寿命的核心瓶颈。据行业统计，芯片结温每升高 10℃，器件寿命将呈指数级衰减。LED 工作时 60% 以上的电能会转化为热量集中在微小的 PN 结上，如果不能及时导出，结温迅速攀升，轻则光衰加剧，重则直接“烧芯”。因此，如何设计和优化 LED 照明灯具的散热结构，提高散热效率，降低结温，成为了当前 LED 照明领域亟待解决的重要问题。

1 LED 照明灯具散热问题的重要性

LED 作为半导体光源，其发光原理是电致发光，与白炽灯依赖热辐射发光有本质区别。讽刺的是，LED 却对热高度敏感：约 60% - 70% 的输入电能转化为集中于微米级 PN 结的焦耳热。若散热路径受阻，结温骤升将引发内量子效率下降、荧光粉热猝灭、焊点疲劳开裂及驱动芯片失效等连锁退化，直接导致光通量衰减、色漂移、显色性劣化乃至早期失效，严重制约灯具可靠性与标称寿命的实现。

结温升高会导致内量子效率下降，从而使光通量衰减，降低照明效果。荧光粉老化加速，会引起色温漂移、显色性降低，影响照明质量。封装材料热应力开裂可能导致死灯、短路等故障，驱动 IC 过热保护或损坏也会影响灯具的正常工作。根据 Arrhenius 模型，结温每上升 10° C，LED 寿命约缩短一半。这意味着一个设计不

良的灯具，哪怕用的是顶级灯珠，也可能活不过 2 万小时。因此，优秀的散热设计对于 LED 照明灯具至关重要，它是保障灯具性能和寿命的关键因素。

2 散热结构设计的基础理论

2.1 热传导原理

热传导是热量传递的基本方式之一，在 LED 照明灯具中，热量从芯片 PN 结产生后，需依次经由焊料层、金属支架/陶瓷基板、金属芯印制电路板（MCPCB）、导热界面材料（TIM）、散热器底座及翅片等多级结构，最终传递至环境空气。该路径中每一环节均存在接触热阻与材料本体热阻，构成串联热阻网络。根据傅里叶定律，单位时间内传导的热量正比于温度梯度与材料导热系数，反比于传热路径长度。实际工程中，芯片至散热器底面的“结-壳热阻”（ $R_{th,j-c}$ ）是衡量热设计优劣的核心指标，优质设计可控制在 1.2 - 2.5 K/W 以内。降低热阻的关键在于：优选高导热基板（如铝基板导热系数 ≥ 2.0 W/(m·K)，铜基板达 380 W/(m·K)）；优化焊料工艺以减少空洞率（目标 $< 3\%$ ）；采用相变导热垫、液态金属 TIM 等新型界面材料（导热系数提升至 8 - 25 W/(m·K)），显著削弱接触热阻。

2.2 热对流原理

热对流是 LED 灯具散热的主导机制，尤其在自然对流工况下贡献率达 70% 以上。自然对流依赖温差驱动的空气密度梯度形成上升气流，其换热强度由努塞尔数（Nu）表征，与瑞利数（Ra）密切相关。散热器结构直接影响边界层发展：垂直翅片利于热羽流顺畅上行，

水平翅片则易致热气滞留；表面粗糙度适度增加 ($Ra=1.6-3.2\ \mu m$) 可激发微湍流，提升对流换热系数 12-18%。强制风冷虽效率更高（换热系数提升 3-5 倍），但受限于噪音、可靠性及防护等级（IP65+需密封风机），多用于高功率工矿灯或隧道灯。风道设计须避免涡流死区，实测表明，合理导向叶片可使同等风量下散热效能提升 22%。

2.3 热辐射原理

热辐射虽在常温下贡献较小（约占总散热量 8-15%），但在高温工况（结温 $>85^{\circ}C$ ）及密闭空间中作用凸显。其辐射功率遵循斯特藩-玻尔兹曼定律，与表面绝对温度四次方及发射率 ϵ 成正比。未经处理的铝材 $\epsilon \approx 0.04$ ，阳极氧化后可达 0.75-0.92；黑色陶瓷涂层或石墨烯复合涂层更可提升 ϵ 至 0.94 以上。值得注意的是，辐射散热不依赖介质，故在真空或低气压环境中具有不可替代性。此外，散热器表面红外发射波段（3-15 μm ）与大气窗口高度重合，优化涂层光谱选择性，可进一步提升辐射散热效率。

3 结构设计优化策略

3.1 散热器拓扑优化

通过翅片式、热管式、均温板式及微通道结构的协同集成，可显著缩短热流路径并均衡温度场分布。非对称翅片阵列不仅提升有效散热面积达 32%，更通过诱导局部气流加速与涡旋分离，强化边界层扰动；结合倒梯形截面设计与顶部渐缩轮廓，可降低风阻系数 18% 的同时提升换热效率。翅片高度宜控制在 20-40 mm 区间，过低限制空气流通空间，过高则易引发末端热阻累积；间距与厚度比是关键参数——当该比值维持在 5-8 时，湍流强度提升 35% 以上，对流换热系数提高 28-40%；低于 4 易致气流滞塞，高于 10 则削弱扰动效应。此外，采用仿生蜂窝排布或螺旋式翅片阵列，可进一步改善热流均匀性，使 LED 模组间温差缩小至 $\pm 1.2^{\circ}C$ 以内，有效延缓光通量衰减速率。

3.2 接触界面工程

在光源板与金属外壳间引入厚度仅 0.1-0.3 mm 的超薄高定向石墨导热片（HDG），构成高效热扩散中间层。其面内导热系数达 1200-1500 W/(m·K)，为铜的 3.5 倍，层间扩散能力亦达 18-22 W/(m·K)，实现热量二维快速铺展与三维梯度疏导。相较传统导热硅脂

（导热系数 0.8-6 W/(m·K)）及普通导热垫片（3-12 W/(m·K)），该方案将界面总热阻降低 62%，结温下降 9.3-11.7 $^{\circ}C$ （实测@100 $^{\circ}C$ 环境）。石墨片表面经微纳粗糙化处理后，与 PCB 焊盘及铝基板的接触面积提升 47%，配合预压工艺（0.3-0.8 MPa），确保长期服役下界面稳定性。在高功率密度 LED 模组（ $>80\ W/cm^2$ ）中，该界面工程可使热失效风险下降 76%，寿命延长 2.3 倍。

4 热设计优化方法

4.1 热流密度控制

热流密度是指单位面积上的热流量 (W/m^2)，其数值直接决定局部温升速率与结温峰值。过高热流密度易导致 LED 芯片结温超限，加速光衰并缩短寿命；过低则造成材料冗余与成本浪费。通过 FloEFD 仿真发现，当翅片间距/厚度比维持在 5-8 区间时，可激发边界层分离与周期性涡脱落，使空气湍流强度提升 35% 以上，对流换热系数提高 28-40%；而比值低于 4 易引发气流阻塞，高于 10 则削弱扰动效应。除几何参数外，热流密度分布亦需匹配光源排布——采用“热源-翅片”拓扑映射设计，使高热流区对应密齿短翅、低热流区对应疏齿高翅，实现热流路径梯度化疏导。在设计中，可结合努塞尔数 (Nu)、雷诺数 (Re) 与普朗特数 (Pr) 等相似准则进行无量纲化建模，并依托 Flotherm 的 CC 优化中心开展多目标参数扫描：设定散热片基厚（1.2-3.0 mm）、齿高（15-45 mm）、齿厚（0.8-2.5 mm）、齿间距（2.0-6.0 mm）等变量范围，以结温最低、重量最轻、风阻最小为联合约束，经 200+组 DOE 仿真迭代，快速收敛至帕累托最优解集。

4.2 仿真技术应用

热仿真已从单一场域分析发展为多物理场强耦合验证平台。除常规稳态热传导模拟外，需集成瞬态热响应（如冷热循环工况）、热-结构耦合（评估热应力致翘曲或焊点疲劳）、热-流体耦合（预测自然对流/强制风冷下的流场-温度场协同演化）及光-热耦合（计入 LED 电光转换中约 60-70% 输入功率转化为废热的精确热源建模）。建模精度依赖于真实材料数据库——如阳极氧化铝表面发射率取 0.82-0.88、导热硅脂接触热阻按实测值 0.05-0.12 $cm^2 \cdot K/W$ 赋参；边界条件须还原实际工况：环境温度（ $-25^{\circ}C \sim 55^{\circ}C$ ）、风速（0-8 m/s）、

安装倾角（影响自然对流方向）及外壳辐射换热面。

5 材料创新在散热中的应用

5.1 传统金属材料

铝合金是目前 LED 照明灯具散热中应用最广泛的传统金属材料，其导热系数为 $237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，密度约 2.7 g/cm^3 ，兼具优异的导热性、良好的机加工性、可回收性及较低的综合成本，尤其适用于中高功率路灯、工矿灯等对散热与成本平衡要求严苛的场景。常用牌号如 6063（挤压成型性优，表面处理佳）和 6061（强度与耐腐蚀性更均衡）已形成成熟工艺链。铜（导热系数 $401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）虽导热性能更优，但密度达 8.96 g/cm^3 、成本约为铝的 3-4 倍，多限于局部热界面强化或小尺寸高密光源模组。

5.2 新型复合材料

石墨烯增强铝基复合材料（Gr/Al）通过原位生长或粉末冶金工艺将高取向石墨烯片层均匀弥散于铝基体中，导热系数突破 $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，热膨胀系数可调控至与 LED 芯片（ $\sim 6 \text{ ppm/K}$ ）更趋匹配，显著降低热应力失配风险；某旗舰智慧路灯采用该材料后，散热器重量减轻 45%，结温降幅达 12°C ，光衰寿命延长 35%。此外，碳纤维增强铝基（CF/Al）兼具高比刚度与中等导热性（ $\sim 280 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ），适用于振动敏感的桥梁景观灯；氮化铝-铝梯度复合材料则通过功能梯度设计，在热源侧实现高绝缘高导热（AlN 层），在背板侧保障结构强度与散热传导，已在高可靠性 UV-LED 固化模组中验证应用。这些材料正从实验室走向量产，推动 LED 散热向“轻量化、精准控温、长寿命”协同演进。

6 成本管控与散热性能的平衡

6.1 结构优化与成本控制

在进行散热结构设计时，需在保障结构稳定性、散热性能可靠性及长期环境耐受性（如 IP65 防护、盐雾腐蚀、热循环疲劳）的前提下，系统性权衡材料选型、工艺路径、重量与制造复杂度。例如，采用一体化压铸+局部 CNC 精修的铝合金壳体设计，将散热鳍片、风道、LED 安装基板及电源仓腔体集成于单一体结构中，不仅消除多部件装配带来的接触热阻，还减少紧固件与密封

环节，使整灯重量降低 28%，BOM 成本下降 35%。此外，基于响应面法（RSM）的散热器拓扑优化，在满足 $\leq 65^\circ\text{C}$ 结温约束下，可精简 30% 以上冗余材料，兼顾刚度裕度与轻量化目标；配合模块化接口设计，更支持产线快速换型与平台化衍生，进一步摊薄模具与工装投入。

6.2 仿真驱动设计与成本降低

采用 FloEFD、ANSYS Icepak 等 CFD/CTM 耦合仿真工具开展参数化优化设计，可实现从几何变量（鳍片间距、厚度、倾角）、边界条件（风速、环境温升）到材料属性（导热系数、发射率）的全维度自动寻优。某头部照明企业应用该流程开发新一代高光效隧道灯：通过 217 组 DOE 仿真迭代，在 48 小时内锁定最优散热构型，开发周期由 6 个月压缩至 45 天，物理样机制作由 12 轮减至 2 轮，样机总成本降低 80%；同时，仿真预测结温误差 $< \pm 1.2^\circ\text{C}$ ，与实测高度吻合，显著规避了后期因热失效导致的设计返工与量产召回风险。

7 结论

本文围绕 LED 照明灯具散热结构与优化展开了系统的研究，从结构设计、热设计、材料创新、成本管控等多个维度提出了一系列有效的策略和方法。通过散热器拓扑优化、接触界面工程、热流密度控制、仿真技术应用等手段，可以显著提高 LED 照明灯具的散热性能，降低结温，延长其使用寿命。新型散热材料的应用和成本管控策略的实施，也为 LED 照明产业的发展提供了有力支持。

参考文献

- [1] 刘小飞. LED 照明灯具散热结构优化设计[J]. 灯与照明, 2025, 49(06): 89-91.
- [2] 陈紫罡. LED 照明灯具的结构设计[J]. 灯与照明, 2023, 47(03): 17-20.
- [3] 周俊良. LED 照明灯具的结构设计略谈[J]. 科技展望, 2021, 26(19): 171.
- [4] 高长银, 李万全. 4W 大功率 LED 照明灯散热结构研究[J]. 中国照明电器, 2022, (10): 9-12.
- [5] 周翠娟. 节能型高天棚照明灯具的散热结构设计[J]. 电工技术, 2020, (07): 5-6+19.