

LED 照明灯具散热器结构优化设计

郭森林 周志强 高 贺

浙江凯耀照明有限责任公司 浙江 海宁 314400

摘要: 随着LED照明技术的广泛应用, 散热问题成为制约性能提升与寿命延长的关键因素, 本文聚焦LED照明灯具散热器结构优化设计。首先分析LED芯片发热特性、散热对灯具性能的影响及不同场景散热要求, 剖析现有散热器结构问题。接着阐述优化设计原则, 包括高效散热、轻量化、结构紧凑、可靠性与耐久性。随后提出优化策略, 涵盖材料选择、外形设计及内部结构改进等方面。通过系统研究, 为提升LED照明灯具散热性能、延长使用寿命提供理论支持与实践指导。

关键词: LED照明灯具; 散热器结构; 优化设计

引言: LED照明凭借节能、环保、寿命长等优势广泛应用, 但LED芯片工作时会将部分电能转化为热能, 若热量无法及时散发, 会导致芯片结温升高, 引发光衰加剧、发光效率下降、寿命缩短等问题。不同应用场景, 如室内、室外、工业照明, 对散热要求各异。现有散热器结构存在材料选择不当、外形设计不合理、内部结构有缺陷等问题, 影响散热效果。因此, 开展LED照明灯具散热器结构优化设计研究, 对提升灯具性能、推动LED照明行业发展具有重要意义。

1 LED照明灯具散热需求分析

1.1 LED芯片的发热特性

LED芯片作为照明核心部件, 工作时遵循能量转换定律, 将输入电能转化, 一部分转化为光能实现照明, 另一部分则转化为热能^[1]。从微观层面看, 在半导体材料的PN结区域, 电子与空穴复合时, 并非所有能量都能以光子形式释放, 部分能量会以晶格振动即热的形式散失, 这是LED芯片发热的根本原理。发热量与多种因素紧密相关。电流大小是关键因素之一, 当通过LED芯片电流从100mA增加到500mA时, 单位时间内参与复合的电子-空穴对增多, 能量转换产生的热能从约0.1W大幅上升至0.5W。功率对发热量也有直接影响, 功率从1W增大到5W时, 单位时间内输入电能增多, 在能量转换比例相对固定下, 转化为热能的数量从约0.3W增多至1.5W。而且, 不同类型、结构的LED芯片, 因材料特性、制造工艺差异, 在相同电流和功率条件下, 发热量也会不同。例如, 一些采用新型材料和先进工艺制造的高功率LED芯片, 在功率为10W、电流为1000mA工作时, 发热量可达3W, 虽发光效率提高, 但高负荷工作时发热问题仍不容忽视。

1.2 散热对LED照明灯具性能的影响

散热状况对LED照明灯具性能起着决定性作用。若散

热不良, LED芯片产生的热量无法及时有效散发出去, 会导致芯片结温持续升高。结温升高会引发一系列严重问题, 光衰加剧便是其中之一, 当结温从60°C升高到100°C时, LED芯片内部材料性能发生变化, 光输出效率降低, 灯具亮度在1000小时内可能从初始亮度的100%逐渐减弱至80%。发光效率也会随之下降, 结温每升高20°C, 发光效率可能下降5%, 更多的电能被转化为热能而非光能, 造成能源浪费。长期处于高温状态, 还会加速芯片材料老化, 在结温为100°C时, LED芯片的使用寿命可能从50000小时缩短至20000小时, 增加更换成本。同时, 高温环境会使灯具内部其他电子元件性能不稳定, 降低整个照明系统的可靠性, 增加故障发生概率。

1.3 不同应用场景下的散热要求

室内照明、室外照明、工业照明等不同应用场景, 对LED照明灯具散热有各自特殊要求。室内照明环境相对稳定, 环境温度适宜, 通风条件较好, 但考虑到室内空间对灯具美观和紧凑性要求, 散热设计需在有限空间内高效散热, 一般室内灯具散热面积设计在100-500平方厘米之间, 避免散热结构过大影响灯具整体造型和安装。室外照明面临复杂多变环境, 昼夜温差大, 可能遭遇高温暴晒或低温寒冷天气, 还要承受风雨侵蚀。这就要求散热设计不仅要具备良好散热性能, 还要有较高防护等级, 防护等级需达到IP65及以上, 防止水分、灰尘等进入灯具内部影响散热和元件正常工作。工业照明通常应用于大型厂房、车间等场所, 环境温度较高, 且可能存在大量粉尘、有害气体等。散热设计需重点考虑如何在恶劣环境下快速有效散发热量, 工业照明灯具散热设计需保证在环境温度为40°C时, 能将芯片结温控制在80°C以内, 同时要保证散热结构的耐腐蚀性和易清洁性, 以确保灯具长期稳定运行。

2 现有LED照明灯具散热器结构问题剖析

2.1 常见散热器结构类型

在LED照明灯具领域,常见散热器结构类型丰富多样^[2]。翅片式散热器凭借众多平行排列的翅片增大散热面积,空气流经翅片时带走热量,结构相对简单,成本较低,在中小功率(功率小于5W)LED灯具中应用广泛,一般翅片数量在10-50片之间。热管式散热器利用热管内工质的相变实现高效热量传递,能快速将LED芯片热量传导至远离热源的区域,散热效率高,常用于高功率(功率大于10W)LED照明场景,热管数量根据功率大小在1-5根之间。均温板式散热器通过内部真空腔体的毛细结构,使工作液体在蒸发和冷凝过程中实现热量均匀分布,具备出色的均温性能,可有效降低LED芯片局部高温达10-20℃,提升灯具整体散热效果。

2.2 结构设计中存在的不足

材料选择上存在诸多问题。部分散热器选用导热性能欠佳的材料,导致热量在传导过程中损耗较大,无法及时将LED芯片产生的热量散发出去,影响散热效率。一些材料虽导热性能良好,但成本过高,增加了LED照明灯具的生产成本,降低了市场竞争力。还有部分材料与LED芯片热膨胀系数差异较大,在温度变化时,两者膨胀或收缩程度不同,易产生热应力,长期使用可能导致芯片与散热器接触不良,甚至损坏芯片。外形设计不合理也较为突出。不合理的外形设计会阻碍空气自然流动,使散热通道不畅,空气无法充分与散热器表面接触,降低了散热效果。而且,部分散热器外形设计未能充分考虑散热面积的充分利用,存在散热面积闲置的情况,无法有效发挥散热器的最大散热潜能。内部结构方面同样存在缺陷。一些散热器内部结构设计过于复杂,增加了热量传导路径上的热阻,不利于热量快速传导和散发。复杂的内部结构还可能导致加工难度增大,生产成本上升,且在实际使用中容易出现故障,影响散热器的稳定性和可靠性。

3 LED照明灯具散热器结构优化设计原则

3.1 高效散热原则

高效散热是LED照明灯具散热器结构优化设计的核心原则。LED芯片在工作时,电能并非完全转化为光能,还有相当一部分转化为热能^[3]。若这些热量不能及时散发出去,会导致芯片结温急剧升高。而结温的升高会引发一系列不良后果,如光衰加剧,使得灯具的亮度随使用时间延长而逐渐降低;发光效率下降,更多的电能被浪费在产热上,降低了能源利用效率;寿命缩短,高温会加速芯片内部材料的老化,减少灯具的使用年限。因此,散热器结构优化设计必须确保能够快速、有效地将LED芯片

产生的热量散发出去。这要求合理设计散热器的散热通道,使空气能够顺畅地流经散热器表面,增强热对流效果;优化散热表面的形状和纹理,增加散热面积,提高热辐射能力;选用导热性能优异的材料,降低热量在传导过程中的损耗,从而全方位降低芯片结温,保障LED照明灯具的性能稳定。

3.2 轻量化原则

在满足散热要求的前提下,轻量化是散热器结构优化设计的重要考量。随着LED照明技术的广泛应用,灯具的安装场景日益多样化,包括天花板、墙壁、移动设备等。过重的散热器会增加灯具整体重量,给安装带来诸多不便,尤其是在一些对承重有严格要求的场所,如高空安装的灯具,过重可能导致安装结构不稳定,存在安全隐患。在运输过程中,较重的散热器也会增加运输成本。因此,通过优化散热器结构,采用新型轻质材料,如高导热性的铝合金复合材料等,在保证散热性能的同时,尽量减轻散热器的重量,降低灯具整体重量,提高安装的便捷性和运输的经济性。

3.3 结构紧凑原则

结构紧凑是现代LED照明灯具散热器结构优化设计的必然趋势。如今,消费者对灯具的美观性和集成度要求越来越高,希望灯具在满足照明功能的同时,能够节省空间,与各种装修风格相融合。紧凑的散热器结构可以减小灯具的体积,使灯具更加小巧精致,提高灯具的集成度。这不仅有利于灯具在有限的空间内安装,还能提升灯具的整体美观度。通过合理布局散热器的内部结构,优化翅片的形状和排列方式,减少不必要的空间占用,实现散热器结构的小型化和紧凑化。

3.4 可靠性与耐久性原则

可靠性与耐久性是散热器结构优化设计不可或缺的原则。LED照明灯具通常需要在各种复杂的环境条件下长期使用,如高温、低温、潮湿、腐蚀等。散热器作为灯具的关键部件,必须能够承受这些环境条件的影响,保证在长期使用过程中性能稳定。这就要求在设计散热器结构时,充分考虑材料的耐腐蚀性、抗疲劳性等性能,采用合适的表面处理工艺,如阳极氧化处理,将散热器的防护等级提高至IP67及以上,提高散热器的防护等级。同时,优化散热器的结构设计,避免出现应力集中等薄弱环节,确保散热器在长期热胀冷缩循环(循环次数达10000次以上)过程中不会出现变形、开裂等问题,从而保证LED照明灯具的可靠运行和长久使用寿命。

4 LED照明灯具散热器结构优化设计策略

4.1 材料选择优化

在LED照明灯具散热器设计中,材料选择至关重要。高导热材料能快速将LED芯片产生的热量传出去,降低芯片结温^[4]。铜和铝是常见的高导热金属材料,铜导热性能极佳,导热系数可达 $400\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,但成本较高且密度大,会增加散热器重量;铝导热性稍逊于铜,导热系数约为 $200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,不过成本低、重量轻,在大规模应用中更具优势,常用于对成本和重量有要求的中低功率(功率小于 8W)LED灯具散热。石墨烯、碳纳米管等新型高导热材料,导热性能远超传统金属材料,石墨烯导热系数可高达 $5000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,且具有独特的物理化学性质,然而目前制备工艺复杂、成本高昂,多应用于对散热要求极高、成本敏感度低的高端LED照明领域(功率大于 20W)。材料复合与涂层处理也是提升散热性能的有效手段。通过材料复合技术,将不同导热性能的材料结合,可发挥各自优势。例如,将高导热的铜与轻质的铝复合,既能保证良好的导热性,导热系数可达 $300\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,又能减轻散热器重量达 20% 。在散热器表面进行涂层处理,能提高辐射散热能力。一些特殊涂层可增强散热器对红外线的辐射,使辐射散热比例提高 $10\%\sim 15\%$,使热量更高效地散发到周围环境中。

4.2 外形设计优化

翅片形状与布局对散热效果影响显著。不同翅片形状,如矩形、三角形、梯形等,在空气流动和热量交换方面表现各异。矩形翅片加工简单,但空气流动阻力相对较大;三角形翅片能引导空气更顺畅地流动,减少涡流产生;梯形翅片则在散热面积和空气流动性能间取得较好平衡。翅片的间距、高度、厚度等参数也需精心设计,合理的间距在 $2\sim 5$ 毫米之间,可保证空气充分流经翅片,适当的高度在 $10\sim 30$ 毫米之间和厚度在 $0.5\sim 2$ 毫米之间能增加散热面积且不影响空气流动。同时,翅片的合理布局能提高空气流动效率,如采用错列布局可增强空气扰动,提升散热效果达 $15\%\sim 20\%$ 。流线型外形设计可减少空气流动阻力。当空气流经散热器时,流线型设计能

使空气更顺畅地绕过散热器,提高周围空气的流动速度,增强对流散热效果,尤其适用于风冷散热的LED照明灯具,可使风冷散热效率提高 $20\%\sim 30\%$ 。

4.3 内部结构改进

热管技术优化应用可提升热量传导效率。热管利用内部工质的相变实现高效热量传递,在散热器中合理布置热管,如确定合适的数量、位置和倾斜角度,能快速将LED芯片热量传导至散热区域。热管数量为 $4\sim 6$ 根,倾斜角度在 $15^\circ\sim 30^\circ$ 时,散热效果较佳^[5]。均温板技术引入散热器可实现热量快速均匀分布。均温板通过内部毛细结构使工作液体循环,将局部高温迅速扩散至整个板面,提高散热均匀性。

结束语

LED照明灯具散热器结构优化设计是一项复杂且关键的工作。通过对散热需求的分析、现有结构问题的剖析,明确了优化设计原则,并从材料选择、外形设计、内部结构改进等方面提出具体策略。合理选择材料可提升导热与散热能力,优化外形设计能增强空气流动与散热面积利用率,改进内部结构有助于热量快速传导与均匀分布。这些策略相互配合,能有效提升散热器性能,保障LED照明灯具稳定运行,为LED照明技术的进一步发展奠定坚实基础。

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(6):89-91.
- [2]邓家生.LED照明灯具散热器结构与优化[J].模型世界,2022(18):34-36.
- [3]刘共升,胡兴,张文华.基于室内大功率LED灯具的散热装置设计与优化[J].中国照明电器,2024(8):104-107.
- [4]张权.基于防眩光需求的LED筒灯结构与优化[J].光源与照明,2025(6):31-33.
- [5]刘敏,胡建秋,缙从军.一种嵌入式LED筒灯散热优化设计方法研究与实现[J].中国照明电器,2025(7):49-57.