

照明用大功率 LED 射灯散热建模研究

陈杰^{1,2}, 陈忠¹, 李小红², 沈亚锋², 熊敬康², 王阳夏²

(1. 厦门大学 物理学博士后流动站, 福建 厦门 361005;

2. 厦门华联电子有限公司, 福建 厦门 361008)

摘要: 散热问题是 LED 灯具成为新一代照明光源亟待解决的关键问题之一。提出一种 LED 灯具散热建模方法: 选用 LED 射灯作为代表产品进行散热建模研究, 采用三维造型软件建立 LED 灯具产品三维模型, 然后导入有限元流体热分析软件 (CFD) 进行热仿真。研究散热仿真过程中的热阻设置、热量载荷计算和边界条件设定等关键问题, 并求解 LED 射灯的工作温度分布情况; 将仿真分析结果与实验室测试数据进行对比分析研究。研究结果表明, 运用该方法可以对室内照明 LED 灯具进行较为准确的散热分析, 仿真温度误差在 4 °C 左右, 仿真结果对灯具开发设计具有重要参考价值。

关键词: 照明; LED 射灯; 散热; 建模; 仿真

中图分类号: TN312.8; TN305.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2013) 01-0060-05

Heat Dissipation Modeling Research of High Power LED Spot Lamp for Lighting

Chen Jie^{1,2}, Chen Zhong¹, Li Xiaohong², Shen Yafeng², Xiong Jingkang², Wang Yangxia²

(1. Postdoctoral Flow Station of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Hualian Electronics Co., Ltd., Xiamen 361008, China)

Abstract: Heat dissipation is one of the key problems need to be solved for LED lamps as a new generation of lighting light. A heat dissipation modeling method was presented for the LED lamp. The LED spot lamp was selected for dissipative research, 3D models were established by modeling softwares, then the models were transferred into finite element thermal analysis software (CFD) for simulation. Several key aspects such as thermal resistance setting, heat load calculation and boundary conditions were considered in the analysis process, and the simulation result was compared with laboratory test data. The results show that the method can be used for accurate thermal analysis simulation of indoor LED lighting, with the temperature error less than 4 °C, and the simulation result is of a great reference value for lighting design.

Key words: lighting; LED spot lamp; heat dissipation; modeling; simulation

EEACC: 4260D

0 引言

发光二极管 (light emitting diode, LED) 是 21

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAE01B10); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2011AA03A109)

E-mail: chenjie@xmhl.com.cn

世纪最具发展前景的新型冷光源, 由于其节能、环保、绿色无污染照明, 使得 LED 成为当今世界上替代传统光源的新一代光源。在节能和环保两大需求的强力推动下, LED 的应用已从早年的指示、显示和装饰逐步走向照明领域, 道路 LED 照明、景观 LED 照明及其他的各类户外商用 LED 照明, 近些年得到大力的发展和推广。而同样作为通用照

明的室内 LED 照明, 必将成为 LED 照明灯具另一个表演舞台。目前已面市的室内照明用 LED 灯具产品主要有 LED 射灯、LED 筒灯、LED T8 灯管、LED 球泡灯等类别, 部分灯具所使用的 LED 器件功率可达 1 W, 2 W 及以上, 工作电流从几十毫安到几百毫安, 有的甚至达到 1 A 及以上^[1]。

LED 作为照明有一个共性的应用难题——散热, 目前的 LED 仅有 15% ~ 30% 的光电转换效率, 其余的能量转化为热量, 以 1 W 芯片 (面积 1 mm × 1 mm) 计算, 热流密度超过 80 W/cm², 若灯具 LED 芯片中的热量不能有效散发, 会使 LED 芯片 pn 结温度过高, 导致发光效率降低、芯片发射光谱发生红移、色温质量下降、荧光粉的转换效率降低^[2], 使用寿命下降甚至可使 LED 永久失效等问题^[3]。很多 LED 灯具产品给出基于灯具外壳的测量温度相对于环境温度差异的温升指标, 用这种方法来衡量灯具散热性能存在一定的局限性^[4]。对 LED 路灯散热仿真分析的研究已有很多, 且都取得不少具有实践性的研究成果^[5-7]; 但在 LED 室内照明灯具方面, 可查阅的文献研究还比较少^[8-10]。因此, 注重对室内照明 LED 灯具进行计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 散热建模仿真, 分析影响散热的关键因素, 在灯具的产品结构优化、材料优选等方面都具有重要的工程应用意义和指导作用。

1 散热原理及主要方法

热量的传递主要有 3 种方式: 热传导、热对流和热辐射^[11]。经研究发现, 热传导主要发生于 LED 灯具内部即从热量发源处 (pn 结及电源) 传递到散热器的过程中, 而热对流和热辐射则主要发生在散热器和外壳表面处。

当前 LED 散热方案分为被动散热和主动散热, 被动散热方案如自然散热、热管技术、均温板技术、回路热管技术; 主动散热如风冷散热、微通道热沉散热、半导体制冷散热等^[12]。这些散热方案结构相对较大, 在道路照明如 LED 路灯、LED 隧道灯等体形较大的灯具上面可作为有效的方法, 但室内照明 LED 灯具受其体积大小、外观要求、工作环境的限制影响, 更多的还是采用自然散热。

LED 灯具除了 LED pn 结热量外, 还有一部分热量来自于电源, 此处产生的热量通过电源板、电源套筒等零件与外围空气进行热交换。

2 LED 灯具散热建模几个关键问题

2.1 热阻计算

热阻 (R_{th}) 是指热量在热通道上遇到的阻力, 公式定义为热通道的温差 (ΔT) 与热通道上的耗散功率 (P) 之比^[13], 见式 (1); 也可通过材料导热系数 (K) 来计算^[14], 见式 (2)。

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad (1)$$

$$R_{th} = \frac{L}{AK} \quad (2)$$

式中: L 为热通道路径的长度; A 为热通道有效横截面积。

热阻可分为导热热阻和接触热阻。当热量在同一物体内部以热传导的方式传递时, 遇到的热阻称为导热热阻。当热量流过两个相接触固体的交界面时, 界面本身对热流呈现出明显的热阻, 称为接触热阻; 产生接触热阻的主要原因是, 任何外表上看来接触良好的两物体, 直接接触的实际面积只是交界面的一部分, 其余部分都是缝隙, 热量依靠缝隙内气体的热传导和热辐射进行传递, 而它们的传热能力远不及一般的固体材料。

图 1 所示为铝 6061 (Al6061) 的导热系数随温度变化曲线图, 从图中可以看出, 它的导热系数随材料温度呈非线性变化, 说明其热阻是动态变化的; 但是在 300 K (27 °C) 以上时, 导热系数基本趋于稳定, 也可认为此时热阻基本保持不变。LED 照明灯具材料的工作温度基本在室温以上, 也就是高于 300 K, 所以通常在 CFD 热仿真过程, 只需给定对应的稳态热阻即可, 如可将 Al6061 的导热系数设定为 155.5 W/(m · K)。表 1 列出部分常用材料的导热系数参照表 (数据来源于 MatWeb 网上材料数据库^[15])。

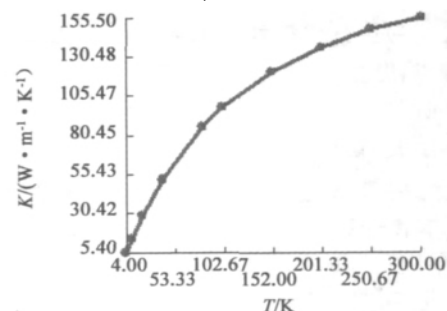


图 1 Al6061 导热系数曲线

Fig. 1 Thermal conductivity coefficient curve of Al6061

表 1 常用材料导热系数

Tab. 1 Thermal conductivity coefficients of commonly used materials

材料名称	$K / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Al6063	201
Al6061	155
ADC12	163
Al1060	200
Al5052	138
PBT	0.274
PC	0.189
玻璃	0.749 8
陶瓷	1.495
环氧	0.2

对于部分热通道材料层因其厚度很小, 在建模过程中可不体现出来, 而采用等效面接触热阻替代, 便于散热建模 CFD 仿真分析。例如:

①采用回流焊工艺将 LED 光源焊接到铝基板上, LED 光源灯珠与铝基板间设置接触热阻。回流焊层主要材料成分为锡 (96%), 厚度一般为 0.1~0.15 mm, 导热系数为 60 W/(m·K)。

②如图 2 所示, 铝基板由导电层、导热绝缘层和金属基层构成, 导电层厚度微小、导热率好, 因此可忽略不计; 主要热阻由导热绝缘层决定, 导热绝缘层厚度小、导热率差, 而金属基层厚度大、导热好, 若二者按同一材料体设置, 仿真结果将会出现较大偏差。

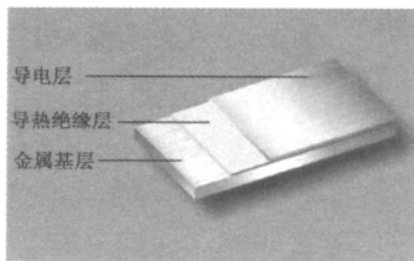


图 2 铝基板结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the aluminum substrate

因此, 为仿真模拟计算的需要, 将铝基板绝缘层与回流焊锡层的热阻进行换算成一等效热阻 ($R_{等效}$), 计算公式为

$$R_{等效} = R_{锡} + R_{绝缘层} \quad (3)$$

$R_{等效}$ 可用等效导热系数 ($K_{等效}$) 来表示, 而 $K_{等效}$ 可按式计算

$$K_{等效} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{K_i}} \quad (4)$$

式中: K_i 为各热通道层材料导热系数; h_i 为各通道厚度。文中灯具采用贝格斯铝基板 (绝缘层厚度 0.076 mm、导热系数 1 W/(m·K)), 则等效导热系数 $K_{等效}$ 为

$$K_{等效} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{K_i}} = \frac{0.076 + 0.15}{\frac{0.076}{1} + \frac{0.15}{60}} = 2.96 \quad (5)$$

因此, ①和②通道层可综合设置为厚度 0.226 mm、导热系数为 2.96 W/(m·K)。

③铝基板通过导热硅脂与散热器连接, 此通道层设置成面接触热阻, 厚度为 0.5 mm、导热系数为 1.5 W/(m·K) 即可。

2.2 热载荷设定

热源有两种表现形式: 体热源和面热源。通过仿真计算, 两种形式的热源对于 CFD 散热仿真分析差别并不是很大, 如图 3 所示。

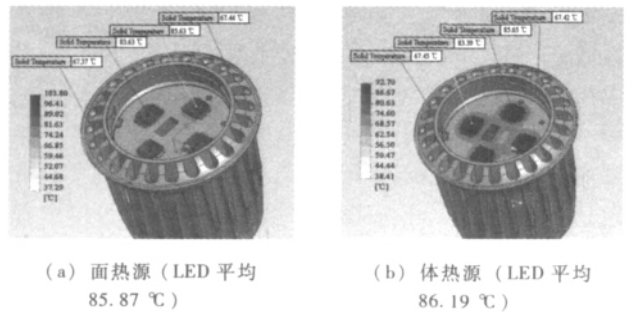


图 3 热源载荷设置

Fig. 3 Heat sources loading

热载荷计算是散热仿真过程中的重要一环, 它的取值将影响整个仿真温度场的变化, LED 灯具的热载荷主要分布在两个区域: 光源 LED 和电源。

当前照明用 LED 的光电转换效率 (η_{LED}) 约 30%, 亦即 70% 左右的 LED 输入功率 (P_{LED}) 转换成热量, 则 LED 发热量 (Q_{LED})

$$Q_{LED} = P_{LED}(1 - \eta_{LED}) \quad (6)$$

式中, 根据所使用 LED 芯片的光电转换效率, η_{LED} 取值为 0.3。

另外, 根据电源效率 ($\eta_{电源}$) 评估, 由灯具输入总功率 ($P_{灯}$) 减去 P_{LED} 求得电源消耗总功率 ($P_{电源}$), 进而可求出电源发热量 ($Q_{电源}$)

$$P_{电源} = P_{灯} - P_{LED} \quad (7)$$

$$Q_{电源} = P_{电源} \times (1 - \eta_{电源}) \quad (8)$$

式中, $\eta_{电源}$ 一般取 0.7~0.9, 根据所采用的电源工作效率, $\eta_{电源}$ 取值为 0.8。

2.3 材料表面热辐射系数的设定

不同材料的热辐射系数是不相同的，即使是同种材料不同表面处理工艺，其热辐射系数也不尽相同^[16]，因此在 CFD 散热仿真时，必须明确材料及其表面处理情况。图 4 给出的是同一灯具，不同散热器表面辐射系数（压铸铝 ADC12 0.7；ADC12 0.88）的散热仿真结果比较。观察图 4 中散热器多点仿真温度值和最高温度值可以发现，辐射系数的差异最终会影响到整个 LED 灯具温度场分布情况。

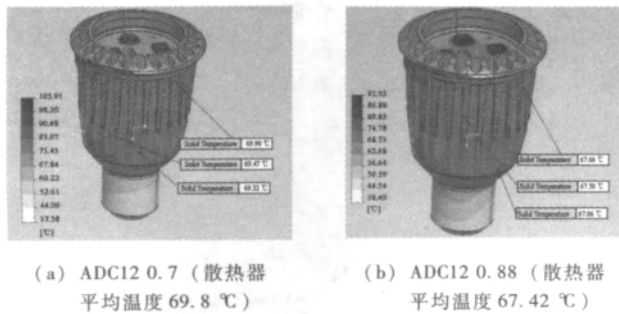


图 4 辐射系数实验
Fig. 4 Radiation coefficient experiment

3 实验测量与仿真

3.1 实验室测量

实验室测量设备采用 8 通道测温仪 TP700，搭建的 LED 灯具实验室温度测量平台如图 5 所示。测量环境为无人走动恒温密闭实验室。连续点亮 PAR16 和 PAR30 射灯 2 h 和 4 h 后读取室温下各测量点温度数据，如表 2 和表 3 所示。

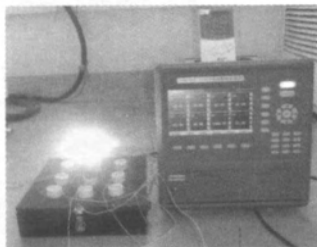


图 5 实验室温度测量平台
Fig. 5 Laboratory temperature measurement platform

表 2 PAR16 实验室测量温度

Tab. 2 Laboratory measurement temperatures of PAR16

测量点	点亮 2 h 温度 $\theta_{2h}/^{\circ}\text{C}$	点亮 4 h 温度 $\theta_{4h}/^{\circ}\text{C}$
散热器 1	67.8	68.3
散热器 2	67.6	68.1
散热器 3	64.4	64.8
套筒 1	56.7	56.79
套筒 2	41.9	43.4
光源铝基板	72.9	72.9

表 3 PAR30 实验室测量温度

Tab. 3 Laboratory measurement temperatures of PAR30

测量点	点亮 2 h 温度 $\theta_{2h}/^{\circ}\text{C}$	点亮 4 h 温度 $\theta_{4h}/^{\circ}\text{C}$
散热器 1	65.7	65.8
散热器 2	66.8	66.7
散热器 3	63.59	64.09
套筒	48.79	49.59
LED1	72.3	71.9
LED2	71.0	71.0

3.2 散热仿真结果

利用 CFD 仿真软件可以完成参数化模型建立、网格生成及其优化、边界参数设定和热阻计算、温度场求解计算等基本功能，全面分析 LED 灯具的热传导、热对流及热辐射，分析求解 LED 灯具内外的温度场和流场等。其仿真结果的可视化输出，可以观察到模型的详细尺寸和参数，以及各种分析结果（包括温度场、流场、压力场的截面云图、等温/等压面、动态气体/液体粒子流等），非常适合于目前 LED 照明灯具散热模型仿真。CFD 散热仿真时将室温和固体初始温度均设置为 29 °C，PAR16 及 PAR30 的仿真结果如图 6 和图 7 所示。

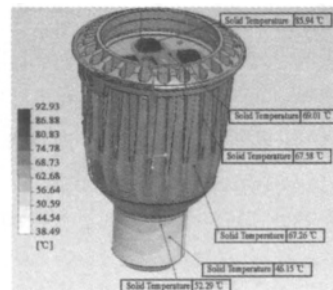


图 6 PAR16 射灯仿真结果
Fig. 6 Simulation results of PAR16

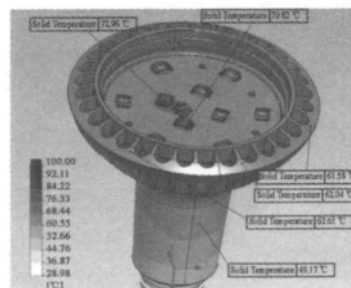


图 7 PAR30 射灯仿真结果
Fig. 7 Simulation results of PAR30

3.3 对比分析

在实验室温度测量点附近选择仿真温度结果如表 4 和表 5 所示，分别与表 2 和表 3 中的测量点温度值（取平均值）进行比较。

表4 PAR16 仿真温度与实验测量温度对比

Tab. 4 Comparisons of simulation temperatures and laboratory measurement temperatures of PAR16

测量点	仿真温度 $\theta_s / ^\circ\text{C}$	实验室测量温度 $\theta_l / ^\circ\text{C}$
散热器 1	67.26	68.05
散热器 2	67.58	67.85
散热器 3	67.26	64.6
套筒 1	52.29	56.75
套筒 2	46.15	42.65
光源铝基板	69.01	72.9

表5 PAR30 仿真温度与实验测量温度对比

Tab. 5 Comparisons of simulation temperatures and laboratory measurement temperatures of PAR30

测量点	仿真温度 $\theta_s / ^\circ\text{C}$	实验室测量温度 $\theta_l / ^\circ\text{C}$
散热器 1	62.04	65.75
散热器 2	62.58	66.75
散热器 3	61.58	63.84
套筒	47.15	49.17
LED1	70.82	72.1
LED2	72.96	71.0

通过表4和表5的比较可以得出,仿真温度与实验室测量温度误差最大也仅有 4.17°C ,最小为 0.17°C ,说明本文所建立的LED射灯散热模型比较符合实际散热情况,仿真精度比较高。同时,通过仿真发现灯具电源工作温度过高,在后续产品开发过程中有针对性地解决电源散热问题,提升LED照明灯具产品的工作可靠性。

4 结语

利用CFD计算机热仿真软件进行LED照明灯具散热分析,在准确建模的情况下,可在产品开发设计的初期,就能较准确地了解灯具产品中关键零部件的实际工作温度情况,对工作温度过高的灯具产品或零部件进行散热结构优化设计和材料优选,使得产品设计能满足客户的应用需求,从而在提升产品的质量和性能同时,大大缩短产品开发周期和研发成本。

参考文献:

- [1] 卢文全,张仲生. 新型大功率白光LED组件[J]. 中国照明电器,2007,6(6):761-765.
 [2] 张成敬,王春青. 一种大功率白光LED灯具的封装热

设计研究[J]. 电子工艺技术,2007,28(5):257-261.

- [3] 毛兴武,张艳雯,周建军,等. 新一代绿色光源LED及其应用技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
 [4] 张万路,江磊,江程,等. LED道路照明灯具散热系统分析[J]. 中国照明电器,2009(2):6-10.
 [5] 张琦,陈旭. LED路灯热分析及散热结构设计[J]. 电子与封装,2009,9(5):44-50.
 [6] 庄四祥,张跃宗,梁鸣娟,等. 大功率LED路灯的散热结构设计和参数化研究[J]. 电子设计工程,2011,19(4):66-69.
 [7] DIALAMEH L, YAGHOUBI M, ABOUALI O. Natural convection from an array of horizontal rectangular thick fins with short length[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28:2371-2379.
 [8] 马湘君,吴礼刚,戴世勋,等. 大功率LED筒灯散热分析[J]. 照明工程学报,2011,22(6):18-21.
 [9] 饶连江. 基于ANSYS的LED灯具热分析[J]. 照明工程学报,2010,21(1):53-57.
 [10] LIN M T, CHANG C C, HORNG R H, et al. Heat dissipation performance for the application of light emitting diode [C] // Proceedings of Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS. Italy, Rome, 2009:145-149.
 [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京:高等教育出版社,2006.
 [12] 杨光. 道路照明中大功率LED路灯散热方案的研究[J]. 照明工程学报,2010,21(1):40-47.
 [13] 陈元灯. LED制造技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
 [14] 房华,李阳. 大功率LED的热量分析与设计[J]. 现代显示,2010(79):67-70.
 [15] Matweb [EB/OL]. [2012-11-08]. <http://www.matweb.com/>.
 [16] 吴中林,徐华斌,占美琼. 大功率白光LED应用中的辐射散热技术研究[J]. 上海第二工业大学学报,2011,28(3):204-206.

(收稿日期:2012-08-22)



作者简介:

陈杰(1983—),男,福建仙游人,博士,工程师,现为厦门大学和厦门华联电子有限公司联合培养博士后,主要研究方向为逆向工程、三维建模技术、LED散热技术研究等。