

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.028

阵列式大功率LED灯散热分析与优化*

廖绍凯¹, 梅甫良^{1*}, 林广平¹, 魏坛霖²

(1. 嘉兴学院 建筑工程学院, 浙江 嘉兴, 314001; 2. 创正防爆电器有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 针对石油化工场所灯具的散热安全问题, 对阵列式大功率LED灯的散热性能进行了系统研究。基于传热学的基本理论, 通过数值仿真和曲线拟合, 建立了灯具在非稳态下的温度场模型, 得到了芯片结温与灯体材料、吸热盘散热片和外壳散热片面积的定量关系; 进而建立了以降低芯片结温为目标的优化模型并求解, 得到了该LED灯散热结构的优化参数。根据散热结构的尺寸, 制作了LED灯具样品, 对样品进行了温度试验, 得到了灯体表面温度。研究表明, 仿真结果和试验结果基本一致, 所提出的阵列式芯片布置、优化的散热结构设计有效地降低了灯具的结温。

关键词: 热分析; 大功率LED灯; 仿真; 优化

中图分类号: TM923; TP391.9 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-290-05

Thermal analysis and optimization of array high-power LED lamp

LIAO Shao-kai¹, MEI Fu-liang¹, LIN Guang-ping¹, WEI Tan-lin²

(1. College of Civil Engineering & Architecture, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

2. Chuangzheng explosion proof & Electric Appliance Co., Ltd. Jiaxing 314000, China)

Abstract: Aiming at the cooling safety problem of the lamp in petrol-chemical field. The cooling properties of array high power LED lamp was analyzed systematically. Basing on basic theory of heat transfer, through numerical simulation and curve fitting, the temperature field model of the LED lamp was established in non-steady state, the quantitative relationship between chip temperature and light material, area of endothermic plate and shell heat sinks was calculated, and an optimization model which aimed to reduce chip temperature was set up, then optimized parameters of this LED lamp cooling structure was got. According to the dimensions of the cooling structure, the LED lamp sample was made, and working temperature of the sample was tested. The results indicate that the numerical simulation result is consistent with tested data, and the lamp junction temperature can be reduced significantly by array chips arrangement and optimized cooling structure.

Key words: thermal analysis; high power LED light; simulation; optimization

0 引 言

LED作为新型高效固体光源之一, 具有寿命长、节能和环保等显著优点, 它是人类照明史上继白炽灯、荧光灯、高压气体放电灯问世以后的又一次飞跃。随着LED性能的不提高, 其在石油、化工、电力、医药、铁路、船舶等应用领域不断拓展^[1], 但仍有许

多关键技术有待突破, 尤其在散热方面。LED工作时所加电能的85%以上会转换成热量, 若疏导不力, 芯片温度将急剧升高, 从而对LED材料的发光特性及寿命产生有极大影响, 一般温度每升高10℃, 将导致光衰5%~8%并且寿命减半的严重后果^[2]。

目前, 国内外普遍采用是通过改变LED基板材料、封装结构、工艺和其他辅助工具带走热量的方法来试图解决LED的散热问题^[3]。从散热方式来分主要

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 嘉兴市科技计划资助项目(2012BZ5003)

作者简介: 廖绍凯(1983-), 男, 浙江嘉兴人, 讲师, 主要从事数值模拟方面的研究。E-mail: liaoshaokai@163.com

通信联系人: 梅甫良, 男, 博士, 教授。E-mail: flmei2005@126.com

有主动散热和被动散热两种。在主动散热方面, Lan Kim^[4]、Moo Whan Shin^[5]分别做了用热虹吸管冷却LED的试验。然而,传统的热虹吸管由于是汽液同道,热管弯曲效能剧降。而应用在大功率LED领域,热管必须经受弯曲,所以传统的热管也不能够有效地解决大功率LED的散热问题。在被动散热方面,孙首群等^[6]基于微单元时变换热系数法分析计算了新型驱动器散热器的性能。饶连江等^[7]研究了集成式LED灯具的散热器结构设计。赵敏等^[8-9]对影响LED灯具散热性能的结构几何因素进行了仿真分析,并进行了参数优化设计。在LED散热设计中,翅片散热器由于结构简单,便于加工,较好的散热效果得到了广泛的应用。

考虑到笔者所研究的LED灯具应用在石油、化工场所,故本研究选择翅片散热的方式作为研究对象,同时采用阵列方式排布LED芯片。通过数值仿真,分析灯体材料、散热片的位置、表面积对芯片结温的影响;然后对灯具进行优化设计,并进行产品试制;最后对产品进行温度试验,对比分析试验数据和仿真结果。

1 LED 散热模型

1.1 灯体结构

本研究将设计一款用于石油、化工场所的大功率防爆LED路灯,由实际的大小和亮度的需求,拟设计的灯具外观如图1所示。灯体的外观由灯壳和钢化玻璃盖组成,内部布置了吸热盘、铝基板以及60颗1W的标准LED芯片。根据图1尺寸,在ANSYS软件中建立几何模型。

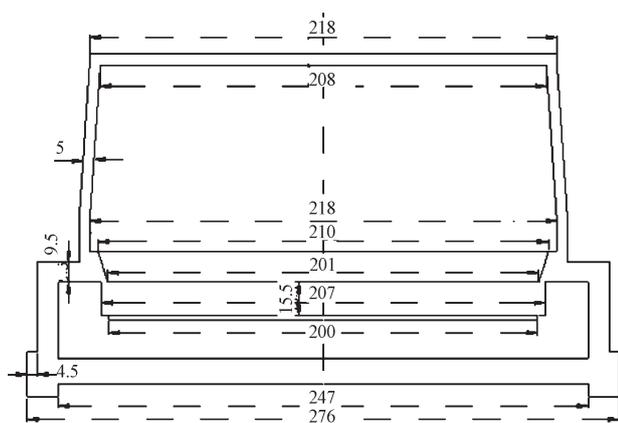


图1 LED灯具初始结构设计(尺寸单位:mm)

有限元模型中省略了LED封装的塑料部分、硅胶、细导线、孔洞、倒角等对灯体散热的影响。事实上,改变不同封装填充材料对热导温度的降低影响不大;其次,热沉与铝基板、铝基板与吸热盘通过硅胶导

热,元件结合十分紧密,一般硅胶结合厚度在微米量级,为便于分析,可以忽略硅胶的影响;再者,孔洞、倒角等细部结构对灯具温度场的影响甚小。

1.2 热源

灯具的热源为LED芯片,由于LED芯片只能将少数电能转化为光能,而剩下约85%的能量将转换为热能,随着芯片功率的不断增加,灯具亮度不断增加,芯片结温和灯具温度却不断升高,灯具的寿命也不断减少。为解决灯具寿命和亮度这对矛盾,本研究采用1W的标准LED芯片,阵列式排布60颗在铝基板上,排列方式为在直径40mm、85mm、130mm和175mm的圆周上分别均匀布置6、12、18和24颗芯片。在增大灯具总功率的同时,将热源分散在铝基板上,使芯片均匀散热,降低芯片结温。该模型中芯片的发热量取输入功率的85%,即为0.85W,芯片尺寸为1mm×1mm×1mm,则发热率为0.85W/mm³。在此不考虑芯片级热阻对结温的影响,芯片的导热系数取一个较大值。

1.3 边界条件

灯具通过热传导和热交换的形式将热量散热到空气中。热传导的优劣取决于系统级热阻,将作详细探讨,热交换的优劣取决于对流系数和空气环境温度。然而灯体与空气的热交换系数很难精确给出,根据以往文献,通常空气热交换系数的经验公式如下:

内部空腔:

$$h = 2.5 + 4.2v \quad (1)$$

外表面:

$$h = (2.5 \sim 6.0) + 4.2v \quad (2)$$

式中: h —空气热交换系数; v —空气流速。

考虑到试验时灯具置于试验箱中,处于室内封闭环境,因此灯具的外部热交换系数取为5W/m²·k,灯具内部空腔的热交换系数取为2.5W/m²·k,灯具的环境温度取为50℃。

2 数值算例及优化设计

本研究参照图1所示尺寸,建立有限元模型。因为芯片尺寸较小,为提高计算精度,本研究采用20节点的六面体单元solid90,同时按照上一节中的参数定义芯片发热率和环境参数。现分别讨论灯体材料、吸热盘散热片和外壳散热片对芯片结温的影响,然后根据讨论的结果对灯具进行结构优化设计。

2.1 灯体材料对结温的影响

灯体材料对结温的影响体现在其导热系数对结温的影响,从定性分析来说,导热系数越大,热阻越小,导热能力就越强,结温越低。从定量计算来说,本

研究选择了常见的一些金属材料(如表1所示)进行温度场数值计算,得到了与其结温的关系(如图2所示)。

表1 常见金属材料的导热系数

材料	铅	铁	锌	镁	铝	金	铜
导热系数 $K/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	40	80	120	156	237	317	401

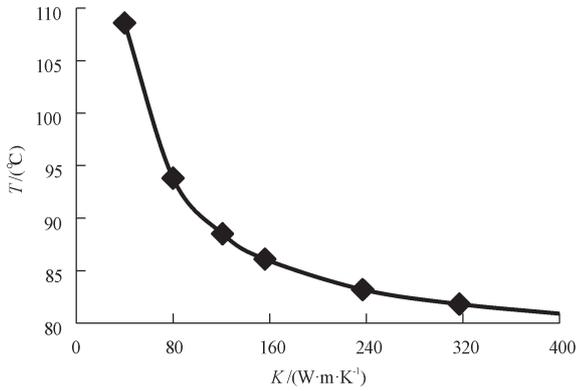


图2 芯片结温与导热系数的对应关系

从图2可以看出,芯片结温虽导热系数呈指数递减,并趋近于80℃,为便于设计人员的使用,将数值计算得到的数据进行指数拟合,拟合方程如下:

$$T = 29.73e^{-0.009K} + 80 \quad (3)$$

式中: T —芯片结温, K —导热系数。

由式(3)可知,当选用金、铜为灯体材料时,其结温能得到有效地降低,但其成本相对较高,而且不易于机械加工;当选用铁时,其结温相对较高,因此综合考虑选择铝作为灯体材料,散热效果较好,且易于材料成型加工。

2.2 吸热盘散热片对结温的影响

芯片的热量主要以热交换的形式传入空气,因此可通过增加灯体与空气的热交换面积,达到降低芯片结温的目的。灯体与空气的接触面为外壳和内部空腔,传统的灯具散热结构设计,往往基于工程师个人的经验布置外壳和内部空腔的散热翅片,难以保证其设计是可行和优化的。本研究将数值传热分析引入散热翅片的设计过程,分别研究在内部吸热盘和外壳设计散热翅片对结温的影响。

吸热盘上的翅片布置一般分为两种形式,一种是环向布置,另一种是径向放射状布置。现笔者采用铝为灯体材料,在前面的结构模型基础上,吸热盘先布置环向翅片,然后布置放射状翅片进行数值分析。翅片设计如图3所示,分别数值仿真了图3(a~f)共计6个模型,得到了其芯片结温与增加的翅片面积的对对应关系如图4所示。

从图4可以看出,芯片结温随着散热翅片的增加

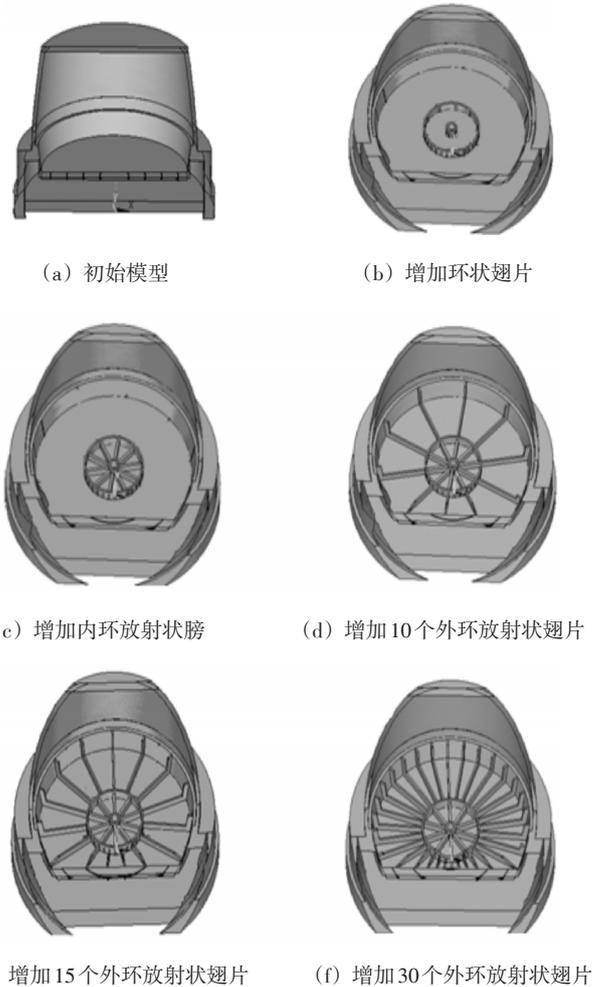


图3 吸热盘散热翅片设计图

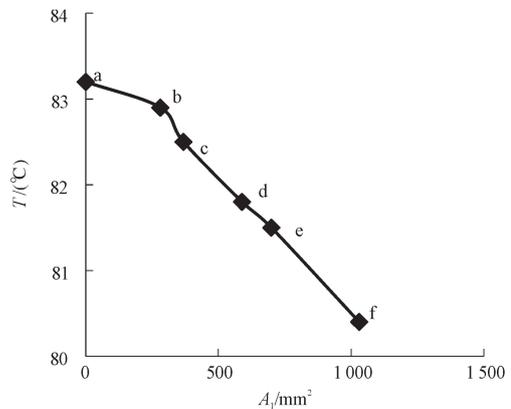


图4 芯片结温随翅片面积增加的对对应关系

而比例减少,但环向翅片和放射状翅片对结温的降低效果有所不同,图4中从(a)~(b)为环向翅片对结温的降低情况,从(c)~(f)为放射状翅片对结温的降低情况,很明显,后者的斜率大于前者的斜率,意味着放射状的翅片对结温的降低效果优于环状翅片。为便于设计人员的使用,将数值计算得到的数据进行线性拟合,拟合方程如下:

$$T = 83.45 - 0.0028A_f \quad (4)$$

式中: T —芯片结温, A_1 —吸热盘翅片的面积。

2.3 外壳散热片对结温的影响

本节研究在外壳表面增加散热翅片对芯片结温的影响。考虑到在内部空腔部分对应的外壳表面需要放置接线盒,不适宜布置散热片,因此笔者在靠近灯盖处的外壳表面布置散热翅片。通过前面的分析布置放射状的翅片散热效果较好,故本研究在外壳表面沿着圆周上布置放射状翅片,在此讨论基于图3(f)模型的基础上均匀布置10、20、30和40片翅片对结温的降低情况。外壳增加10片散热片的模型如图5所示。数值计算得到的芯片结温随外壳翅片面积增加的对对应关系如图6所示。

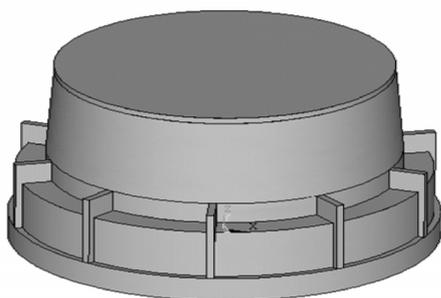


图5 外壳增加10片散热片模型

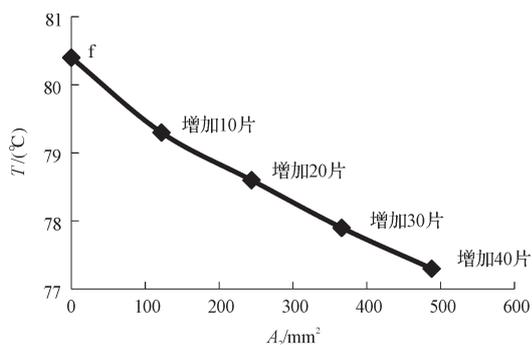


图6 芯片结温随翅片面积增加的对对应关系

从图6可以看出,芯片结温随着散热翅片的增加而比例减少,为便于设计人员的使用,将数值计算得到的数据进行线性拟合,拟合方程如下:

$$T = 80.22 - 0.006 2A_2 \quad (5)$$

式中: T —芯片结温, A_2 —外壳翅片的面积。

结合式(4,5)可以看出,外壳散热片的增加对芯片结温的降低要优于吸热盘上的散热片,这是因为外表面的热交换系数大于内部空腔的热交换系数。

2.4 LED灯优化设计

从前面的分析可以看出,首先,单选用导热系数大的材料,并不能持续降低芯片结温;其次,无论是内部散热片和外壳散热片的增加都能逐渐降低芯片结温,但翅片的个数受加工工艺的限制,不可能无限地增加,相反密集的布置散热翅片,会使得边界层的粘

滞作用增强,导致对流不能充分进行,散热效果反而更差;最后,考虑到外壳表面的布局,如接线盒和其他辅助部件的放置,外壳表面的散热片无法均匀的布置。因此,本研究最终优化的模型为在图3(f)的基础上,在环向不均匀的对称布置30片散热翅片,并在外壳顶部布置6片散热片,最终的LED灯优化模型和数值仿真的结果如图7所示。

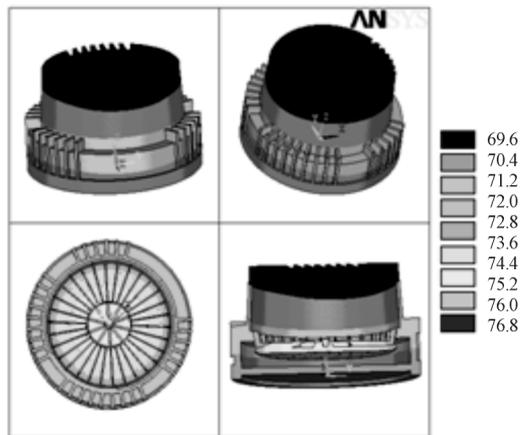


图7 LED灯优化模型及温度分布(温度单位:°C)

从图7可以看出,灯具的最高温度出现在芯片处,大小为76.8 °C,相比于前面的模型,芯片结温进一步降低。最低温度出现在灯壳的顶部,大小为69.7 °C,温差为7.1 °C。通过观察整体的温度云图,灯具温度场基本均匀,可见芯片的热量经过有效的疏导,传入到空气中,降低了芯片结温,进而延长灯具的使用寿命。

3 温度试验

本研究利用现代加工技术对最终优化后的模型进行同尺寸样品制作,采用额定功率为1 W的LED芯片,共计60颗阵列式布置在铝基板上,样品如图8所示。现笔者对其进行稳态温度试验,以对比分析和验证仿真计算的结果。温度试验采用灯具的整机试验,

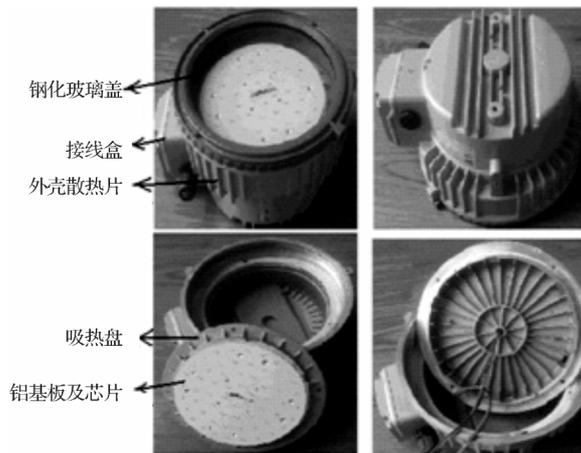


图8 阵列式大功率LED灯

样品置于50℃的恒温试验箱中,通以220V的电压,连续运行至温度稳定,然后用温度计测试灯具外壳表面处的温度值,温度试验结果如表2所示。

表2 温度试验结果及对比

项目	环境温度 / (°C)	外壳表面 最高温度 / (°C)	接线盒 温度 / (°C)	钢化玻璃 盖温度 (°C)	芯片 温度 (°C)
温度试验	50, 密闭	72.7	67.8	67	/
仿真模拟	50, 密闭	72.1	69.7	70.6	76.8
绝对误差	0	0.6	1.9	3.6	/
相对误差	0%	0.8%	2.8%	5.4%	/

从表2可以看出,温度试验和仿真模拟的结果存在一定的误差,这是由测试设备、测试环境、有限元模型的简化(接线盒、孔洞、倒角、硅胶的简化)和接触热阻的忽略(吸热盘与灯壳、灯盖与灯壳之间的接触热阻)等所导致的,但总体来说误差相对不大,可忽略其简化等带来的误差,从而大大减少了仿真模拟的工作量。因此所采用的仿真设计基本能准确地反应产品的温度分布,定性分析和定量计算的结果可指导企业对灯具进行散热结构的改进和优化。

4 结束语

为满足石油、化工场所的灯具对散热较高要求,本研究对LED灯具的散热进行了理论分析和仿真计算。首先,通过传导路径的分析,灯具的热阻由系统级、板级和系统级热阻组成,主要探讨了系统级热阻对芯片结温的影响。其次,通过数值仿真得到了有热源的第三类边界热传导方程的数值解,并得到了如下结论:

(1) 芯片结温随灯体材料导热系数的增加呈指数递减的趋势;

(2) 芯片结温随吸热盘散热面积和外壳散热面积

的增加呈线性递减的趋势;

(3) 吸热盘上放射状布置散热片优于环向布置的散热效果;

(4) 外壳散热片的散热效果优于吸热盘散热效果。

最后,根据理论分析,本研究对灯具进行了优化设计和样品制作,并对灯具进行整机温度试验,测得了灯具外壳表面几处代表性的温度值,与仿真计算的结果对比表明,所采用的数值模型能准确地反映样品的温度分布情况,也表明优化方案有较好的散热效果,有助于延长灯具的寿命。

参考文献(References):

- [1] 卢有祥. LED的发展与应用[J]. 光电技术, 2008, 49(1): 14-21.
- [2] 胡志华, 向建化. 大功率LED相变热沉的传热性能研究[J]. 机械设计与制造, 2010(9): 94-97.
- [3] NARENDRAN N, GU Y M. Life of LED-based white light sources[J]. *IEEEJ Disp Tech*, 2005, 1(1): 167-171.
- [4] KIM L, CHOI J, JANG S H, et al. Thermal analysis of LED array system with heat pipe[J]. *Thermo chemical Acta*, 2007(455): 21-25.
- [5] SHIN M W. Thermal design of high-power LED package and system[J]. *Proceeding of SPIE*, 2006, 6355: 9-21.
- [6] 孙首群, 卢华阳, 翰琳, 等. 新型驱动器散热器散热性能仿真与优化[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(11): 2721-2824.
- [7] 饶连江. 基于ANSYS的LED灯具热分析[J]. 照明工程学报, 2010, 21(1): 53-58.
- [8] 赵敏, 陈志平, 张巨勇, 等. 大功率LED灯的热分析与热设计[J]. 机电工程, 2012, 29(2): 220-223.
- [9] 沈忠良, 卢冰, 李恩文, 等. 大功率LED强化散热技术进展[J]. 轻工机械, 2013, 31(2): 107-112.
- [10] 阎军, 孙兴盛. 半导体照明灯具典型散热结构分析与优化[J]. 固体力学学报, 2010(31): 285-293.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

廖绍凯, 梅甫良, 林广平, 等. 阵列式大功率LED灯散热分析与优化[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 290-294.

LIAO Shao-kai, MEI Fu-liang, LIN Guang-ping, et al. Thermal analysis and optimization of array high-power LED lamp[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(2): 290-294.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>