

LED 圆筒太阳花散热器设计与实验

唐帆, 郭震宁

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 为了提高发光二极管(LED)的散热能力,基于烟囱效应,在传统太阳花散热器外侧加装圆筒壁,形成特殊的烟囱结构。运用 Solidworks 软件构建三维模型,用其插件 Flow Simulation 进行热仿真,并以散热器翅片数 12 个、最大直径 70 mm、高度 40 mm 为基础模型参数,进行优化研究。研究表明,在翅片数为 20 个、最大直径为 85 mm、高度为 65 mm 时,LED 圆筒太阳花散热器的散热效果最好。此时,LED 的最高温度为 48.98 °C,比优化前降低了 13.05 °C。当功率为 8,12,16,19 W 时,LED 芯片的最高温度都满足 LED 工作的安全要求。对功率为 8 W 的 LED 散热器样品的实验测试结果表明,4 个监测点的实际温度与仿真所得温度的平均误差为 4.8%,在允许范围内,验证了研究的正确性。在功率为 32 W 时,配备圆筒太阳花散热器的芯片最高温度仍满足低于 125 °C 的技术要求,并比配备传统太阳花散热器的芯片温度低 6.44 °C。所设计的 LED 圆筒太阳花散热器为解决大功率 LED 散热问题提供了一个新的途径。

关键词 光学器件; 散热; 圆筒太阳花散热器; 正交优化; 烟囱效应; 最高温度

中图分类号 TN312 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.092303

Design and Experiment of LED Cylindric Sunflower Radiator

Tang Fan, Guo Zhenning

Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In order to improve the cooling capacity of light emitting diode (LED), based on the principle of the chimney effect, the cylinder is added to traditional sunflower radiator to form a special chimney structure. We build a three-dimensional model by adopting Solidworks, and use its plug called Flow Simulation to simulate the model. The model with the number of fins of 12, the maximum diameter of 70 mm and the height of radiator of 40 mm is optimized. Studies have shown when the number of fins is 20, the maximum diameter is 85 mm and the height of radiator is 65 mm, LED cylindric sunflower radiator have the best cooling capacity. At the moment, the optimized highest temperature of LED is 48.98 °C, which is reduced by 13.05 °C. The temperature of the LED can meet the security requirements when the power of the LED chips are 8, 12, 16, 19 W. The LED radiator sample with the power of 8 W is experimentally tested. The results show that the average error between the actual temperature of the 4 monitoring points and the simulated temperature is 4.8%, which is within the allowable range. It confirms the correctness of the simulation steps. When the power is 32 W, the highest temperature of the LED chips still meet the technical requirements of less than 125 °C. Which is 6.44 °C lower than that of the traditional sunflower radiator. In conclusion, the designed LED cylindric sunflower radiator can provide a new way to solve the heat dissipation problem of high power LED.

Key words optical devices; heat dissipation; cylindric sunflower radiator; orthogonal optimization; chimney effect; highest temperature

OCIS codes 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

收稿日期: 2017-03-21; **收到修改稿日期:** 2017-04-26

基金项目: 福建省科技计划引导性重点项目(2016H0022)、华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1400201001)

作者简介: 唐帆(1990—),男,硕士研究生,主要从事 LED 散热设计方面的研究。E-mail: 304462588@qq.com

导师简介: 郭震宁(1958—),男,博士,教授,主要从事半导体发光器件及 LED 光学设计和散热设计方面的研究。

E-mail: znguo@hqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

凭借其高智能性、节约能源、光设计多样化^[1-4]等优点,白光发光二极管(LED)已成为第4代照明光源。由于大功率LED的电光转换效率不高,约80%的工作能量转化为热量,因此如果不能及时将热量散出,会使LED结温升高,从而降低其发光效率且减少使用寿命^[5-6]。因此,散热是制约LED发展的关键问题^[7]。

为了提高LED的散热能力,国内外的学者进行了大量研究。Dialameh等^[8]等研究发现等截面翅片直角中,翅片的高度和长度的比值、高度和宽度的比值都会影响散热器的散热性能。Culham等^[9]研究发现随着散热器翅片数量增多,热阻会降低,但是存在下限,当达到下限时,继续增加翅片数量并不能使热阻降低。李中等^[10]对一款大功率LED太阳花散热器进行了设计,并对散热器的肋片数量、铝板直径和铝板厚度进行了优化,为该散热器的结构优化提供了参考。李杨等^[11]对三维发光LED灯片进行了散热设计,通过优化及对比灯板结构和芯片排布方式,使灯片的散热效果得到大幅度提升。唐柳青等^[12]设计并优化了一种曲线型散热器结构,使经过优化后的LED灯具温度下降了7.1℃,且减小了对生产工艺的要求。研究表明,利用烟囱效应^[13],将烟囱结构加入到LED散热器的设计中,可以加快散热器附近的空气流动速度,从而加强其散热能力。烟囱结构散热器的散热原理在于:LED芯片工作时产生热量,热量经由基板与散热器最后传递到空气中,周围空气吸收热量温度升高密度减小,与烟囱通道上方空气形成密度差,产生由下至上的浮力,从而沿着烟囱通道上升,并从上面的通风口排出,产生的负压将新的冷空气继续吸入烟囱通道,形成烟囱效应,使烟囱通道中的对流换热系数提高,增强了自然对流散热效果,从而使散热器的散热能力得以提升。但传统的烟囱结构中,气体会在散热器内流动产生涡流,导致空气流通受阻^[14],热量不能及时排出。

本文基于烟囱效应,通过3D建模软件Solidworks构建模型,用其插件Flow Simulation进行散热模拟仿真。在传统LED太阳花散热器的外侧加入圆筒,使整个散热系统形成多个特殊的直筒式的烟囱结构,避免空气在普通烟囱结构的灯体中形成涡流。然后用正交实验法对圆筒太阳花散热器的最大直径、烟囱高度和翅片数进行优化研究。

2 理论与模型建立

2.1 理论基础

所设计LED散热器散热系统中,LED光源产生的热量通过基板、导热硅胶、散热器传输到环境中,其中从光源到散热器的热量传输以导热的方式发生,从散热器到环境的热量传输以自然对流及热辐射的方式发生。在散热系统稳态传热时,传热路径上热流量 P 处处相等。散热系统的总热阻为:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \quad (1)$$

式中 R_1 为LED光源的热阻, R_2 为导热硅胶热阻, R_3 为基板热阻, R_4 为散热器热阻。

在导热过程中,有:

$$P = \frac{A\lambda}{\delta}(t_1 - t_2), \quad (2)$$

式中 P 为热流量, A 为导热面积, λ 为导热率, δ 为导热厚度, t_1 、 t_2 分别为高温侧和低温侧温度。由(2)式可得:

$$R = \frac{\delta}{A\lambda} = \frac{t_1 - t_2}{P}. \quad (3)$$

整个散热系统自身发生导热并与环境发生自然对流及热辐射,系统的传热方程式为:

$$P = A_2 k (t_3 - t_4), \quad (4)$$

式中 A_2 为系统的传热面积, k_2 为复合传热系数, t_3 、 t_4 分别为LED光源的温度、环境温度。

类似地,系统的总热阻 R 可以表示为:

$$R = \frac{t_3 - t_4}{P}, \quad (5)$$

R 既包括系统自身的导热热阻也包括与环境发生换热的热阻。在本设计的结构中,系统总热阻是衡量系统散热性能的主要指标,系统热阻网络构成如图1所示,对系统整体以 R 进行评价。

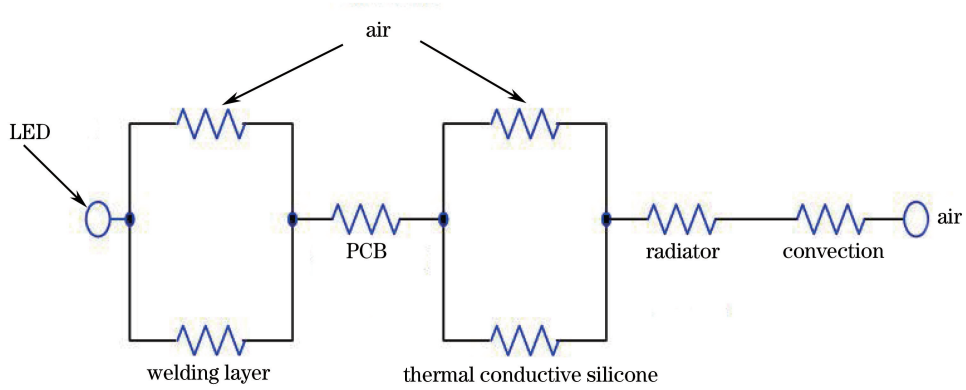


图1 系统热阻

Fig. 1 Thermal resistance of the system

2.2 模型建立

所设计的 LED 圆筒太阳花散热器由 LED 光源、印刷电路板(PCB)、散热器组成,其中散热器的壁厚为 1 mm,如图 2 所示。

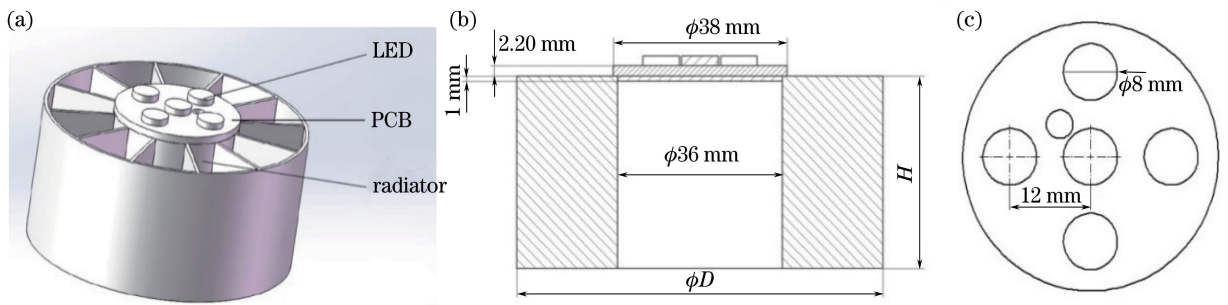


图2 散热器示意图。(a)基础模型;(b)剖视图;(c)芯片分布

Fig. 2 Schematic of the radiator. (a) Foundation model; (b) cutaway view;

(c) distribution of the chip

LED 在基板上均匀分布,并与散热器连接。为了使热仿真更加快速,简化了模型中对仿真结果影响不大的部分。将 LED 芯片设置为高度为 2 mm 的圆柱体,其导热系数为 $46 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。选用铝基板,其横向导热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,纵向导热系数为 $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;散热器的材料为铝合金 6061,热导率为 $236 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。将芯片设置为体积热源,总功率为 8 W,热电转换系数取 80%,故发热功率为 6.4 W,将室温设置为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。设置模拟的初始网格精度为 4,设置模型整体为精度为 8 的局部初始网格,并进行网格独立性验证,确定其计算结果可信。

对圆筒太阳花散热器基础模型进行深入优化,基础模型参数为:最大直径 $D=75 \text{ mm}$,烟囱高度 $H=45 \text{ mm}$,翅片数 $N=16$ 。在此参数下,LED 的最高温度 T 为 $62.03 \text{ }^\circ\text{C}$,总热阻 $R=6.96 \text{ K}/\text{W}$ 。

3 正交优化实验和讨论

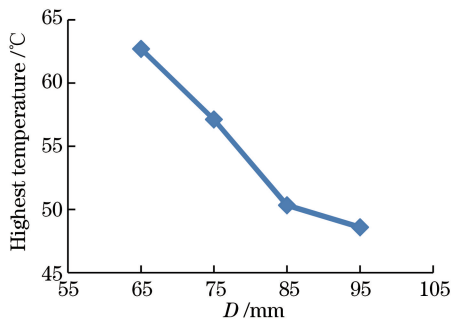
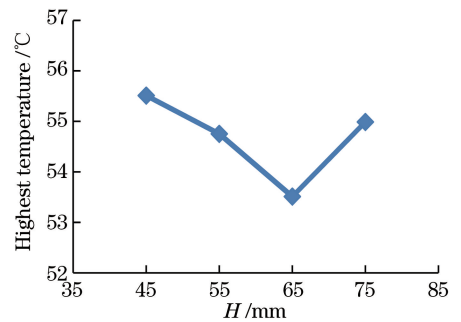
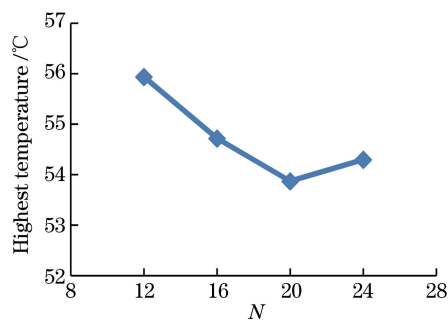
3.1 实验设计与结果

采用正交实验对最大直径 D 、烟囱高度 H 和翅片数 N 三个变量的组合进行研究。根据 LED 散热器的基本条件,确定 D 、 H 和 N 的约束范围为: $65 \text{ mm} \leq D \leq 95 \text{ mm}$, $45 \text{ mm} \leq H \leq 75 \text{ mm}$, $12 \leq N \leq 24$ 。以正交表 $L_{16}(4^3)$ 中的数据建立相应模型,并代入仿真软件计算,可得到最优散热参数组合及 T 和系统总热阻 R 的数值。

通过对正交实验数据结果的各项参数取均值,整理可得 D 、 H 、 N 三个参数对 T 的影响趋势,如图 3~5 所示。

表 1 正交实验 $L_{16}(4^3)$ 设计Table 1 Orthogonal experiment $L_{16}(4^3)$ design

Number	D /mm	H /mm	N	T / $^{\circ}\text{C}$	R / ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
1	65	45	12	64.13	6.90
2	65	55	16	62.69	6.67
3	65	65	20	61.37	6.46
4	65	75	24	62.66	6.67
5	75	45	16	57.61	5.88
6	75	55	12	58.07	5.95
7	75	65	24	55.93	5.61
8	75	75	20	56.91	5.77
9	85	45	12	51.73	4.96
10	85	55	24	50.04	4.69
11	85	65	20	48.98	4.53
12	85	75	16	50.55	4.78
13	95	45	24	48.56	4.46
14	95	55	20	48.21	4.41
15	95	65	16	47.74	4.33
16	95	75	12	49.83	4.50

图 3 最高温度随 D 的变化Fig. 3 Relationship between the highest temperature and D 图 4 最高温度随 H 的变化Fig. 4 Relationship between the highest temperature and H 图 5 最高温度随 N 的变化Fig. 5 Relationship between the highest temperature and N

3.2 分析与讨论

从图 3 可得出, D 从 60 mm 增加到 85 mm 的过程中, T 由 62.71 $^{\circ}\text{C}$ 快速降低到 50.33 $^{\circ}\text{C}$, 降低了 12.38 $^{\circ}\text{C}$ 。当 D 继续增加到 95 mm, T 下降速度变得缓慢, 只下降了 1.74 $^{\circ}\text{C}$ 。分析出现这种现象的原因在于: D 的增加使烟囱通道的通风口增大, 通风口大小对烟囱效应强度有着重要的影响。当通风口很小时, 由于边界阻力作用^[15], 烟囱通道内的空气流动很缓慢, 不能引入充足的空气通过对流换热带走散热器上的热量, 故烟囱效应不明显。当 D 继续增大时, 烟囱通风口变得过大, 而通风口过大^[16]或过小都会降低空气的流量和烟囱效应的效果, 从而使散热器的散热效果变弱。同时, D 的增加还会增加散热器空间占比及重量,

为了尽可能使 T 变低,同时又使散热器的重量不至于过重,取 $D=85$ mm。

从图 4 可以看出,当 H 从 45 mm 增加到 65 mm 时,随着 H 的增加, T 迅速下降。当 H 继续增加时, T 反而上升。研究其原因在于:当 H 在 65 mm 以下时,随着 H 的增加,烟囱效应效果不断增强,从而散热器的散热能力不断提高;当 H 超过 65 mm 时,空气会在烟囱通道内产生回流现象^[17],导致热量滞留在烟囱通道内,同时阻碍了新的冷空气继续进入通道,反而削弱了烟囱效应的强度。当 H 由 65 mm 增加到 75 mm 时,散热器重量增长了近 15.4%,但 T 反而上升了 1.48 °C,故取 $H=65$ mm。

从图 5 可以得出,当翅片数 N 的变化范围为 12 到 20 时,随着翅片数的增加, T 呈近直线下下降趋势。当翅片数继续增加时, T 反而上升。分析其原因在于:当翅片数在 20 以下时,随着翅片数的增加,散热器参与空气换热的面积增加,散热能力增强。当翅片的数目增加到 20 个以上时,相邻散热片之间的距离变得过小,不利于空气流动^[18],反而降低了散热效果。

牛顿冷却定律为:

$$\phi = \lambda S \Delta T, \quad (6)$$

式中 ϕ 为产热功率, λ 为物体表面的对流换热系数, S 为物体散热表面积, ΔT 为物体表面温度与环境温度差值。

由牛顿冷却定律可以看出,散热器表面积和对流换热系数的增加,可以使通过对流换热带走的热量增加。这也说明,虽然翅片数的增加使散热表面积增加,但这样降低了对流换热系数,反而对流换热不能快速带走热量,故取翅片数为 20 个。

由上述研究可知,当 $D=85$ mm, $H=65$ mm, $N=20$ 时,散热器的综合散热性能最好,此时 $T=48.98$ °C, $R=4.53$ K/W, T 相比于优化前降低了 13.05 °C, R 降低了 2.43 K/W。散热器周围的空气速度流动迹线分布如图 6 所示,其温度场分布如图 7 所示。

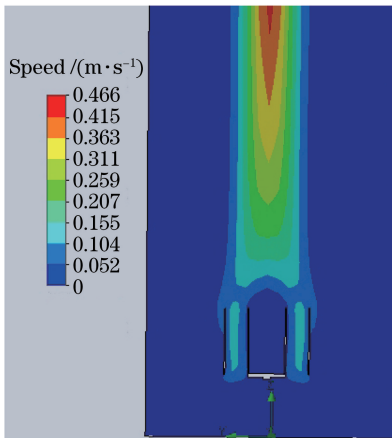


图 6 空气速度流动迹线分布

Fig. 6 Distribution of the air speed flow trace

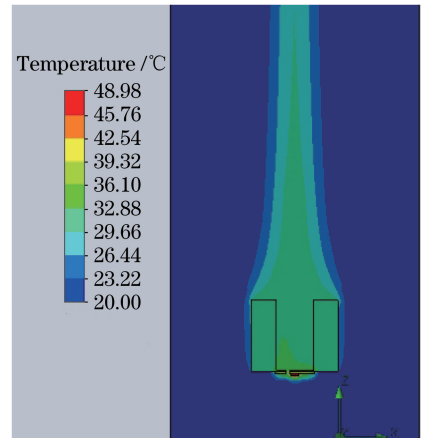


图 7 温度场分布

Fig. 7 Distribution of the temperature field

3.3 不同功率时 LED 芯片最高温度变化及与传统翅片散热器对比

以上述研究为基础,探究不同功率下 T 的变化,如表 2 所示。

表 2 不同功率时 LED 最高温度变化

Table 2 Comparison of the highest temperature of LED with different powers

P /W	8	12	16	19	24	28	32
Highest temperature /°C	48.98	61.73	74.16	83.32	98.38	110.28	122.04

从表 2 可以看出,随着功率的提高, T 不断上升。当功率为 8,12,16,19 W 时, T 都低于芯片的安全结温 85 °C^[19],LED 可以安全地进行工作。当功率达到 32 W 时, T 仍可满足最大温度低于 125 °C 的技术要求。

取输入功率为 32 W,在设计参数相同的前提下,对所设计圆筒太阳花散热器和去除圆筒后的传统太阳花散热器进行温度模拟,对比二者差别,如图 8 所示。从图 8 可以发现圆筒太阳花散热器的最高温度比传统太阳花散热器低 6.44 °C。由此可见,烟囱效应明显提高了散热器的散热性能。

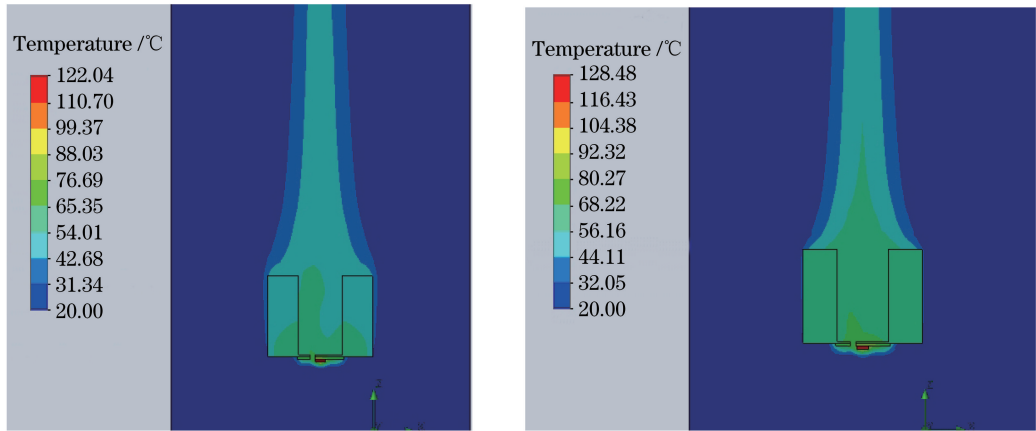


图 8 温度对比。(a)圆筒太阳花散热器;(b)传统太阳花散热器

Fig. 8 Contrast of temperature. (a) Cylindric sunflower radiator; (b) traditional sunflower radiator

4 实物模型实验

通过对芯片输入功率为 8 W、烟囱高度 $H=65$ mm、 $D=85$ mm、翅片数 $N=20$ 个的实物模型进行实验检测,来验证研究的正确性。实物样品由机械加工制得的铝制散热器和芯片及基板组成,其中基板和散热器之间由导热硅胶连接。

实验选用设备 DC-source Konstanter SSP1000-52 提供电压,选用设备 Agilent 34970A 进行温度监测,选用设备 Oven UNE400 为实验样品提供 20 °C 的恒定工作温度环境。测试样品和实验测试平台如图 9(a)和(b)所示。实验在封闭温控箱内进行,将工作温度控制在 20 °C,然后将芯片在额定工作电压下不间断点亮 90 min 后,测取各监测点温度读数。

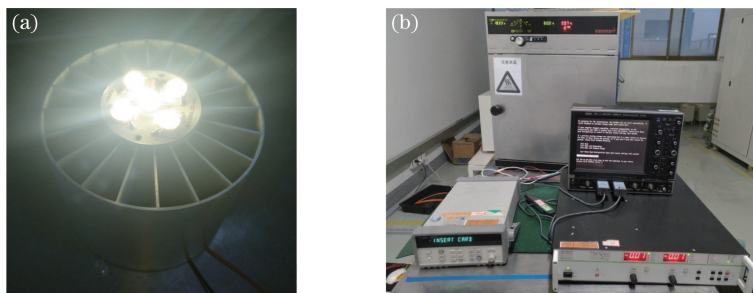


图 9 (a)测试样品;(b)实验测试平台

Fig. 9 (a) Test sample; (b) experimental test platform

从表 3 各测量点的温度对比结果可以看到:基板表面两个点实测与仿真得到的温度温差在 2.1 °C 之内,误差不超过 5.5%;散热器表面两个点实测与仿真得到的温度温差在 1.6 °C 之内,其中最大误差为 5.2%。4 个监测点实际测量的温度与仿真得到的温度基本一致,平均误差为 4.8%,在允许范围内,验证了仿真结果的准确性。

表 3 各测量点温度对比

Table 3 Comparison of the temperature of measurement points

Test point	Measured temperature /°C	Simulation temperature /°C	Difference /°C	Relative difference /%
Point 1 of substrate surface	40.30	38.21	2.09	5.5
Point 2 of substrate surface	42.18	40.39	1.79	4.4
Point 1 of radiator surface	34.24	32.97	1.27	3.9
Point 2 of radiator surface	31.69	30.13	1.56	5.2

5 结 论

基于烟囱效应,在传统太阳花散热器的外侧加入圆筒,使整个系统形成多个独立的烟囱通道。先后对圆筒太阳花散热器的最大直径、烟囱高度、翅片数进行了优化,得到的最佳设计参数为:最大直径 $D=85$ mm,烟囱高度 $H=65$ mm,翅片数 $N=20$ 。此时,LED芯片的最高温度为 48.98 °C,系统总热阻 $R=4.53$ K/W,最高温度比优化前降低了 13.05 °C。当工作环境温度为 20 °C,输入功率小于等于 19 W时,LED芯片的最高温度都低于LED工作安全结温 85 °C。当功率为 32 W时,LED仍可满足最大温度低于 125 °C的技术要求,并比配备传统太阳花散热器的芯片的最高温度低 6.44 °C。经过对功率为 8 W的样品进行实验测试发现,4个监测点的实际温度与仿真所得温度的平均误差为 4.8% ,在允许范围内,验证了研究的正确性。本设计的LED圆筒太阳花散热器,突破了传统太阳花散热器的构造形式,散热效果更好,可为解决大功率LED散热问题提供新的途径。

参 考 文 献

- [1] Yang Chu, Jin Shangzhong, Shao Maofeng, *et al.* Research on LED performance of glass substrate with COB packaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 012304.
杨 初, 金尚忠, 邵茂丰, 等. 玻璃基板COB封装的LED性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 012304.
- [2] Mueller-Mach R, Mueller G O. White-light-emitting diodes for illumination [C]. Symposium on Integrated Optoelectronics. International Society for Optics and Photonics, 2000: 30-41.
- [3] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, *et al.* Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(2): 160-175.
- [4] Tian Lixin, Wen Shangsheng, Huang Weiming, *et al.* Study on the heat sink structure and heat transfer effect of liquid cooling system for high power LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0323003.
田立新, 文尚胜, 黄伟明, 等. 大功率LED液冷热沉结构与换热效果研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0323003.
- [5] Liny C, Nguyen T, Zhou Y, *et al.* Materials challenges and solutions for the packaging of high power LEDs [C]. International Microsystems, Packing, Assembly Conference, Taiwan, China: IEEE, 2006: 177-180.
- [6] Liu Chao, Fu Rengli, GuXiguang, *et al.* The structure of chip scale package for LED light sources and its thermal performance analysis based on numerical simulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122301.
刘 超, 傅仁利, 顾席光, 等. 芯片级LED封装光源结构散热性能的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 122301.
- [7] Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes[C]. IEEE Intersociety Conf. Thermal Phenomena, Hawaii: IEEE, 2002: 113-120.
- [8] 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(17): 2371-2379.
- [9] Culham J R, Muzychka Y S. Optimization of plate fin heat sinks using entropy generation minimization[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2): 159-165.
- [10] Li Zhong, Li Yong, Tang Yingge, *et al.* Structure optimization of radiation-shaped heat sink for high power LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 102201.
李 中, 李 勇, 汤应戈, 等. 大功率LED太阳花散热器的结构优化[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 102201.
- [11] Li Yang, Zou Jun, Zhu Wei, *et al.* Study on thermal dissipation and measurement of three-dimensional light-emitting LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112203.
李 杨, 邹 军, 朱 伟, 等. 三维发光LED灯片散热设计和测试研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112203.
- [12] Tang Liuqing, Yu Guiying, Tang Wei, *et al.* Thermal design of LED luminaires based on uniform distribution of heat flow field[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(6): 78-84.
唐柳青, 余桂英, 唐 玮, 等. 基于LED灯具热流场分布均匀化的散热设计[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 78-84.
- [13] Zhu Peng. The enhancement of heat dissipation of high power LED lamp with chimney effect[D]. Shenyang: Dalian University of Technology, 2014.

- 朱 鹏. 基于烟囱效应对大功率 LED 灯的强化散热[D]. 沈阳: 大连理工大学, 2014.
- [14] Chen Qiyong, He Chuan, Gao Yuanyuan. Numerical study on natural convection of high-power LED street lamp heat sink[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(4): 498-505.
陈启勇, 何 川, 高园园. 大功率 LED 路灯散热器自然对流的数值研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(4): 498-505.
- [15] Li Benhong, Liu Hailin. Analysis of the chimney effect in thermal design of high-power LED lamps radiator [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(2): 221-224.
李本红, 刘海林. 烟囱效应在大功率 LED 灯具散热器设计中的影响分析[J]. 电子器件, 2014, 37(2): 221-224.
- [16] Liu Hailin. Optimal design of the components in high-power LED lamps thermal package [D]. Ningbo: Ningbo University, 2013.
刘海林. 大功率 LED 灯具散热封装组件的优化设计[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [17] Li Jing, Ji Shengtao, Liu Jianyong, *et al.* Analysis on the stack effect of cooling device of electronic components [J]. Electronics & Packaging, 2011, 11(6): 36-40.
李 静, 姬升涛, 刘建勇, 等. 电子元件散热装置的烟囱效应分析[J]. 电子与封装, 2011, 11(6): 36-40.
- [18] Zeng Hai. Heat dissipation design for LED and optical design for omnidirectional light [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2013.
曾 海. LED 散热设计与全方向灯光学设计[D]. 厦门: 华侨大学, 2013.
- [19] Liu Jiao, Liu Juanfang, Chen Qinghua, *et al.* Thermal management of novel 12 W LED bulb for the substitution of 100 W incandescent bulb [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(7): 866-871.
刘 娇, 刘娟芳, 陈清华, 等. 替代 100 W 白炽灯的新型 12 W LED 球泡灯的散热性能研究[J]. 发光学报, 2014, 35(7): 866-871.