

大功率 LED 太阳花散热器的结构优化

李中 李勇* 汤应戈 林樵健

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要 对一款大功率 LED 太阳花散热器(RHS)进行了热阻建模、工作温度测量和软件仿真。依据传热学基本原理建立热阻模型,采用数字温度表进行温度测量,借助专业电子产品热分析软件 Icepak 进行模拟仿真。在误差允许的范围内,散热器温度的实验值与理论值保持一致,证明了利用 Icepak 进行软件仿真的可行性与可靠性。在此基础上,运用控制变量法,以散热器最高工作温度为目标,利用 Icepak 软件对散热器的肋片数量、铝板直径和铝板厚度进行优化,为该散热器的结构优化提供了参考。

关键词 光学设计;大功率 LED;太阳花散热器;结构优化;微热管;Icepak 软件

中图分类号 TN318 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.102201

Structure Optimization of Radiation-Shaped Heat Sink for High Power LED

Li Zhong Li Yong Tang Yingge Lin Qiaojian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract We investigate a radiation-shaped heat sink (RHS) using equivalent thermal resistance model, working temperature measurement and software simulation. The thermal resistance model is based on principles of heat transfer. Two digital thermometers and the Icepak software are utilized to conduct temperature measurement and thermal simulation, respectively. The results of the measurement and simulation agree with each other, proving the feasibility and reliability of using Icepak to carry out thermal analysis. In order to decrease the working temperature of the heat sink, controlling variable method is adopted to optimize the number of its fins and the aluminium plate's diameter and thickness by Icepak, which can serve as a reference for the structure optimization of the RHS.

Key words optical design; high-power LED; radiation-shaped heat sink; structure optimization; micro heat pipe; Icepak software

OCIS codes 220.2945; 230.2090; 230.3670

1 引言

作为第四代照明光源,LED 具有绿色节能、安全无毒(不含汞等有害元素)、响应迅速、轻巧紧凑、安全可靠、使用寿命长等诸多优点^[1~3]。目前,LED 已被广泛应用于显示器背光源、信号和指示灯、工业设备、仪器仪表、装饰照明、汽车照明等领域^[4]。LED 在室内照明方面具有很强的适应性,与日光灯相比具有以下独特的优势^[5,6]:1) 灯管坚固;2) 无需启辉器和镇流器;3) 显色指数高,光色纯;4) 不发射紫外线;5) 可适应较大范围的电压波动;6) 光色丰富,控制灵活;7) 顺应柔性化和智能化的发展趋势。本文所研究的太阳花散热器即是针对室内照明用大功率 LED 筒灯而设计开发的。

散热问题是制约大功率 LED 大规模推广应用的瓶颈。目前,LED 的发光效率仅能达到 10%~20%,而 80%~90%的能量转化为热量^[7]。若热量不能及时有效地散发出去,芯片结温升高带来的热效应将引发荧

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-06-22; 网络出版日期: 2012-08-03

基金项目: 广东省大学生创新实验项目(S1010561008)资助课题。

作者简介: 李中(1990—),男,本科生,主要从事大功率 LED 的散热方面的研究。E-mail: middlelee@yahoo.cn

* 通信联系人。E-mail: meliyong@scut.edu.cn

光粉转换效率降低、芯片出射光子减少、发射光谱红移、色温质量下降、器件使用寿命缩短等一系列问题^[8,9]。因此,解决功率型 LED 的散热问题是发挥其节能优势、实现其在各产业领域广泛应用的关键。

LED 的散热可通过以下两种途径:1) 改善 LED 自身封装材料和结构,2) 设计开发外部热沉结构进行热控制。在现有的技术条件下,第二种方式更易于在短期实现市场化。张雪粉^[10]对三种常见形式的大功率 LED 散热器进行了对比分析,为大功率 LED 热沉结构的优化设计提供了参考。近年来,大功率 LED 热控制技术领域涌现了多种新型散热结构,如回路热管散热器^[11]、微通道制冷结构^[12]、半导体制冷结构等^[13~15]。铝金属具有较高的导热系数[如杜拉铝为 $169 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]且价格较金、铜等低,因此铝热沉是当前使用最多的 LED 热沉。有研究者指出,解决 LED 散热问题的关键不是寻找高热导率的材料,而是改变 LED 的散热结构或散热方式^[16]。微热管具有无需消耗动力、空间尺寸小、冷却能力高(当量热导率可达金属的 $10^3 \sim 10^4$ 倍)等优点,在大功率 LED 器件的热沉结构中应用日益普遍^[17,18]。

为满足设计开发人员降低设计成本、提高热沉可靠性、缩短产品上市时间的需求,各种有限元热分析软件应运而生,Icepak 便是典型的代表。戴炜锋等^[19]运用有限元热分析法对大功率 LED 的三维(3D)模型与真实器件进行了比较,证明了瞬态热分析结果与器件表面温度实测数据吻合较好。本文利用 Icepak 软件进行仿真,对散热器的肋片数量、铝板直径和铝板厚度进行优化,可为大功率 LED 太阳花散热器(RHS)的结构优化提供参考。

2 太阳花散热器的散热性能

所研究太阳花散热器的实物与 Icepak 模型如图 1 所示。为便于描述,将图 1(b)中由下至上的 3 部分分别称为基座、铝板和 LED 基板(基板)。基座由铝挤压而成,外表面经喷漆处理以增大其辐射率及耐腐蚀性,中部铝圈中嵌入了两根外径为 5 mm 的 U 型烧结式微热管。9 颗大功率 LED 在基板上呈圆形阵列分布,其总功率为 15 W。虽然各部件间的接触面在装配前已进行精加工,但实际上仍存在微观空气间隙,使模型热阻大大增加,故在其间添加石墨片或涂上导热硅脂。散热器模型的主要结构和尺寸参数如表 1 所示。

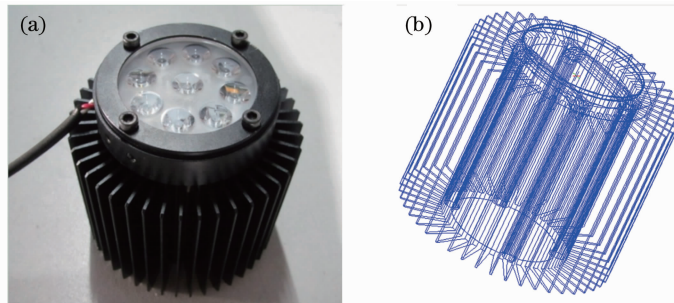


图 1 太阳花散热器。(a)实物;(b)Icepak 模型

Fig.1 RHS. (a) Material object; (b) Icepak model

表 1 太阳花散热器的结构和尺寸参数

Table 1 Structural and dimensional parameters of RHS

Parameter	Value	Parameter	Value
RSH outside diameter d_0/mm	80.2	RHS height h/mm	65.0
Al ring outside diameter d_1/mm	48.4	Al ring inside diameter d_2/mm	40.0
Number of fins	44	Fin shape	Trapezoid
Al plate thickness δ_1/mm	5.0	Al plate diameter d_3/mm	57.0
Baseplate thickness δ_2/mm	1.5	Baseplate diameter d_4/mm	46.0

2.1 建立热阻模型

热能传递有 3 种基本方式:热传导、热对流和热辐射。在太阳花散热器的散热模型中,各部件间通过热传导进行热量传递,铝板下表面、铝圈内壁和肋片根部主要通过热对流与周围环境进行热交换,而肋片表面的散热需要同时考虑热对流和热辐射两种散热方式。为建立有效的数学模型,将实物模型进行了合理的简化,将传热过程视为一维稳态导热。散热器工作过程中热量传递与散发的途径如图 2 所示。

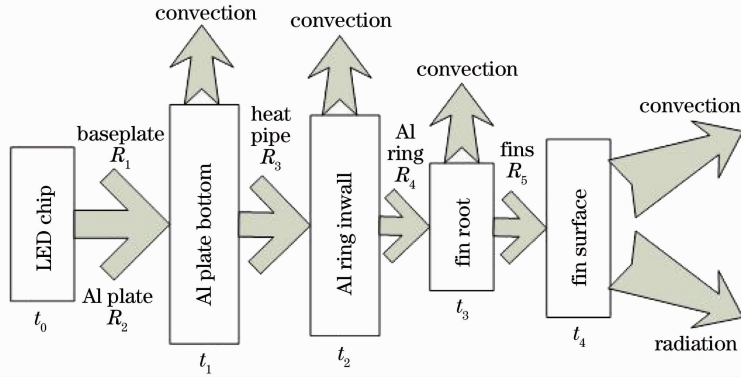


图2 太阳花散热器的传热与散热途径

Fig. 2 Heat transfer and dissipation route of RHS

图2中 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为LED芯片、铝板下表面、铝圈内壁、肋片根部和肋片表面的温度。由于微热管的导热系数很高,可忽略其导热热阻 R_3 ,认为 t_1 与 t_2 相等。芯片与基板的接触热阻 R_{01} 和基板与热沉的接触热阻 R_{02} 分别叠加到基板热阻 R_1 和铝板热阻 R_2 里。 R_1 、 R_2 的值可通过

$$R = \delta / A\lambda, \quad (1)$$

计算得到,式中 δ 为基板或铝板厚度, A 为二者截面积, λ 为材料热导率。 R_4 则可由

$$R = \ln(d_1/d_2) / (2\pi\lambda h), \quad (2)$$

计算得到。

对于梯形等截面肋片,由于其热阻计算较复杂,可将其等效为两个三角形肋片之差,通过查阅肋效率曲线计算其对流传热散热量 Φ_1 ^[20]。铝板下表面、中间铝圈及肋片根部与空气间对流传热值(分别记为 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4)可计算为

$$\Phi = \Delta t / R. \quad (3)$$

肋片向外界的辐射散热量 Φ_5 可运用斯忒藩-玻尔兹曼定律的经验修正公式及其角系数 X 计算:

$$\Phi = \epsilon A \sigma t^4, \quad (4)$$

$$X = 1 - \sin(\omega/2), \quad (5)$$

式中 ϵ 为物体发射率, A 为辐射表面积, σ 为黑体辐射常数, t 为物体的热力学温度, ω 为相邻肋片间的夹角。

LED芯片总的产热量 Φ_t (取总功率的85%)即为以上各项散热量之和:

$$\Phi_t = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5. \quad (6)$$

2.2 工作温度测量

温度测量采用两个配有型号为TP01的K型热电偶的数字温度仪进行,热电偶量程为0℃~250℃,误差为±1.5℃。为减小测量误差,测温时将灯具如图1(a)所示摆放,取下其配光镜,将两个热电偶与基板上两个位置对称的引脚焊在一起,取两个温度仪读数的平均值作为引脚处温度值。将整个测温装置置于温度恒定且无空气流动的房间内,室内温度为25℃,误差不大于0.5℃。在55min的时间内,共记录34个温度-时间数据,依此作出散热器的引脚温度随时间的变化曲线,如图3所示。由图3可知,通电后引脚温度迅速上升,随着时间延长其增速减小,从22min开始有短暂的负增长,37min以后达到稳态值62℃。

2.3 软件仿真

在UG NX6.0中进行散热器建模,将模型转换为.stp文件后导入Icepak 12.1中。将整个模型置于尺寸为200mm×200mm×215mm的cabinet中进行模拟仿真,依据温度测量时的外部环境设置基座与实验台接触的面

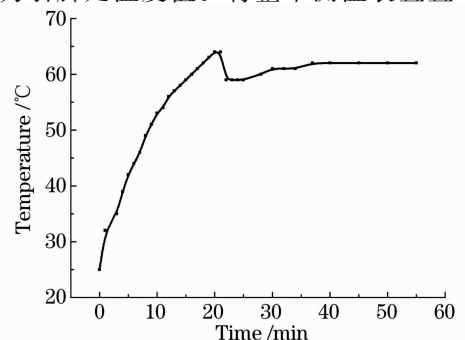


图3 太阳花散热器的引脚温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Curve of RHS's pin temperature variation with time

为绝热且气流不能穿过的平面,另外5个面为 opening。为了在满足计算精度要求的同时降低计算成本,在网格划分时将整个模型(包括 LED 芯片)创建为 assembly1,在 assembly1 中又将 9 颗 LED 创建为 assembly2,利用 Mesher-HD 网格划分器进行网格划分。设定辐射模式为离散辐射,将两引脚所在位置设为温度监测点,设置 200 步迭代,双精度求解。实际求解时间约 1 h,求解后模型表面的温度分布和监测点温度变化如图 4 所示。由图 4(a)可知,稳态下模型的最高温度为 62.66 °C。对图 4(b)局部放大可知监测点稳态温度为 59.23 °C,与实测值 62 °C 相差 2.77 °C,相对误差为 4.47%,可认为在误差允许范围内。

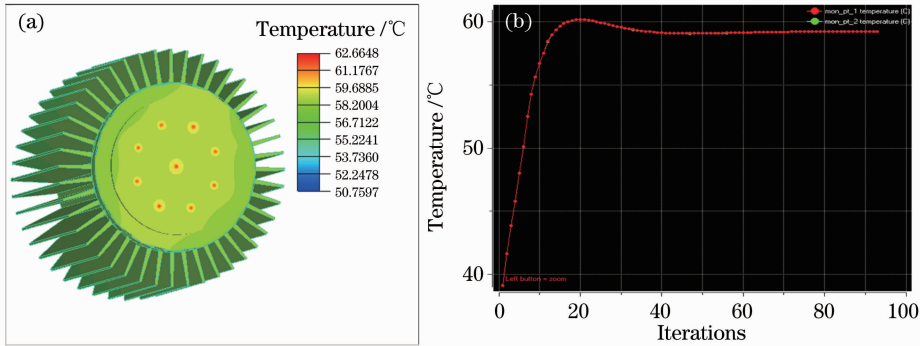


图 4 太阳花散热器表面温度分布(a)和监测点温度变化(b)

Fig. 4 (a) Surface temperature distribution and (b) temperature variation of monitor point of RHS

3 太阳花散热器的结构优化

由 2 节分析可知,用 Icepak 对太阳花散热器进行模拟仿真准确可靠的。在此基础上,运用控制变量法,依次分析肋片数量、铝板直径和铝板厚度对散热器散热效果的影响,为优化其结构提供参考。

考虑到图 1(a)所示筒灯实际工作时多安装于室内天花板上,在后续模拟中将重力方向设置为与 2.3 节中方向相反,6 个面均设置为 opening,将环境温度设置为 20 °C,其余设置不变。为便于描述,下文称 2.3 节中太阳花模型为 model0。

3.1 肋片数量的影响

保持散热器其他结构参数与 model0 相同,模拟其肋片数量在 20~46 变化时模型的工作状况。不同肋片数量时模型的最高工作温度如图 5 所示。由图 5 可知,model0 的肋片数量过多,将其减至 26 时可达到最佳散热效果,且减轻了模型重量,节省了材料,降低了生产成本。

由传热方程式 $\Phi = Ak(t_{f1} - t_{f2})$ 可知,传热量的大小与传热面积 A 及传热系数 k 密切相关。一方面,在基座上增加肋片是增加传热面积 A 的有效方法,有利于减小总面积热阻;另一方面,增加肋片也会增大固体导热热阻,削弱肋片间的空气流速,进而减小传热系数 k 的值。因此,增加肋片数量是否有利取决于以上两方面的共同作用。

当肋片数小于 26 时,前者起主要作用;而当肋片数大于 26 时,后者起主要作用。图 6 所示为太阳花散热器的肋片数量分别为 44(即 model0)和 26 时表面温度及周围空气流场分布。由图 6 可知,肋片数为 26 时散热器周围空气流速较高,这是此时散热器温度更低的重要原因。

3.2 铝板直径的影响

在太阳花散热器的其他结构参数与 model0 相同的情况下,分别模拟其铝板直径为 52,57,70 mm 时的散热性能,模拟结果如表 2 所示。

表 2 不同铝板直径时太阳花散热器的铝板质量及最高温度

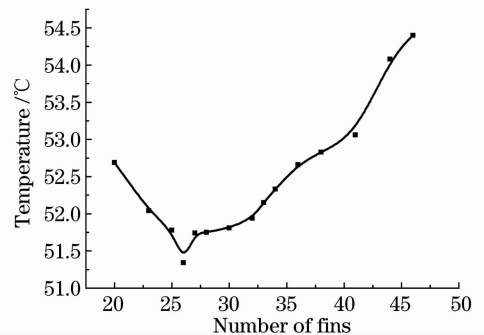


图 5 不同肋片数量时太阳花散热器的最高温度
Fig. 5 Highest temperature of RHS with different numbers of fins

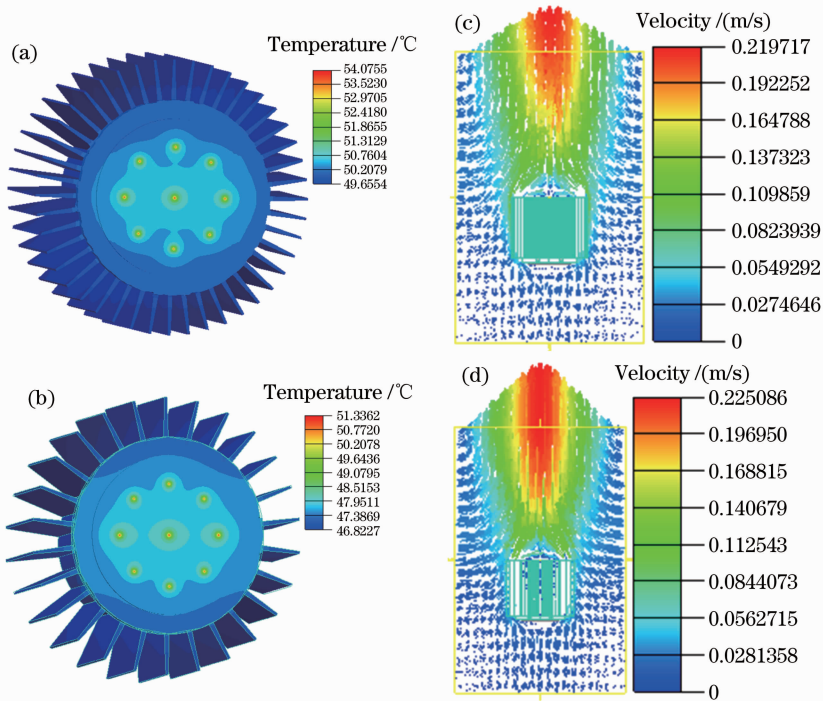


图 6 肋片数量为 44 (a),(b)和 26 (c),(d)时太阳花散热器的表面温度及周围空气流场

Fig. 6 Surface temperature and surrounding air flow field of RHS with (a), (b) 44 fins and (c), (d) 26 fins

Table 2 Al plate's mass and highest temperature of RHS with different plate diameters

Diameter of Al plate /mm	Mass of Al plate /g	Highest temperature /°C
52	26.81	53.864
57	32.33	54.076
70	49.83	54.256

由表 2 可知,随着铝板直径的增加,散热器温度呈上升趋势。虽然铝板直径的增加可增加传热面积,但同时也增大了导热热阻。此外,由于冷空气不断从肋片间穿过[图 6(b),(d)]而带走热量,铝板直径的增大阻挡了冷空气的进入,不利于对流传热的进行。因此,在铝板直径不小于基板直径的前提下,应尽可能减小铝板直径,这样既可增强太阳花散热器的散热能力,又有利于降低生产成本。

3.3 铝板厚度的影响

在散热器的其他结构参数与 model0 相同时模拟不同铝板厚度对其性能的影响。依次选用 3,5,10 mm 3 个铝板厚度值进行分析,其结果如表 3 所示。

表 3 不同铝板厚度时太阳花散热器的铝板质量及最高温度

Table 3 Al plate's mass and highest temperature of RHS with different plate thicknesses

Thickness of Al plate /mm	Mass of Al plate /g	Highest temperature /°C
3	18.55	54.098
5	32.33	54.076
10	53.00	53.695

根据表 3 可知,增加铝板厚度有利于提高散热器的散热性能。增大铝板厚度与增加铝板直径均同时造成传热面积与导热热阻增加,但前者不会阻碍冷空气从肋片间穿过。另外,前者主要增加了圆柱形铝板的侧面积,而后者主要增加了其端面积。从图 6(b),(d)可知,冷空气先从铝板侧面流过后进入肋片间的空隙,铝板侧面的空气流速高于端面。因此,增大铝板侧面积比增大其端面积更有利于热量的散发。在实际生产中,可考虑适当增加铝板厚度以增强其散热能力,但同时需考虑由此带来的铝板质量和材料成本的增加。

4 结 论

通过理论分析、温度实测和软件仿真对一款大功率 LED 太阳花散热器进行了散热性能研究,在此基础

上对其结构参数进行了优化。由 Icepak 模拟结果可知,该散热器的肋片数为 26 时散热能力最佳,且其散热性能随着铝板直径的减小和铝板厚度的增加而增强。为大功率 LED 太阳花散热器的结构优化设计提供了借鉴指导,但在实际生产中需同时考虑生产成本的影响,才能使生产效益最大化。

参 考 文 献

- 1 Wang Haiou, Li Guangan. Understanding lighting LED[J]. *China Light and Lighting*, 2004, (2): 1~3
王海鸥,李广安. 认识照明 LED[J]. 中国照明电器, 2004, (2): 1~3
- 2 M. Meneghini, G. Meneghesso. A review on the reliability of GaN-based LEDs[J]. *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, 2008, **8**(2): 323~331
- 3 A. Mills. Solid state lighting—a world of expanding opportunities at LED 2002[J]. *III-Vs Rev.*, 2003, **16**(1): 30~33
- 4 Wang Xiaoming, Guo Weiling, Gao Guo *et al.*. Gate of dawn-LED will illuminate the future[J]. *Advanced Display*, 2005, (7): 15~19, 41
王晓明,郭伟玲,高国等. LED-新一代照明光源[J]. 现代显示, 2005, (7): 15~19, 41
- 5 Tang Jidong, Tong Lei. A summary of interior LED lighting[J]. *Electrical Engineering Applications*, 2010, (3): 40~41
汤继东,童磊. 室内 LED 照明概述[J]. 电气工程应用, 2010, (3): 40~41
- 6 Tang Guoqing. Current situation of interior light emitting diode (LED) lighting[J]. *Lamps and Lighting*, 2009, (1): 11~12, 34
唐国庆. 发光二极管(LED)室内照明发展现状[J]. 光源与照明, 2009, (1): 11~12, 34
- 7 J. Petroski. Thermal challenges facing new generation light emitting diodes (LEDs) for lighting applications[C]. *SPIE*, 2002, **4776**: 215~222
- 8 S. Nakamura. Bright future for blue/green LEDs[J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1995, **11**(3): 19~23
- 9 Fei Xiang, Qian Keyuan, Luo Yi. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(3): 289~292, 299
费翔,钱可元,罗毅. 大功率 LED 结温测量及发光特性研究[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(3): 289~292, 299
- 10 Zhang Xuefen. A Study of Radiating of High Power LED and Design of Heat Sinks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. 26~65
张雪粉. 大功率 LED 散热研究及散热器设计[D]. 天津: 天津大学, 2007. 26~65
- 11 Lu Xiangyou, Hua Zezhao, Liu Meijing *et al.*. Measurement and analysis on thermal characteristics of high power LED based on heat pipe[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 5~8
鲁祥友,华泽钊,刘美静等. 基于热散热的大功率 LED 热特性测量与分析[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(1): 5~8
- 12 Yuan Liulin, Liu Sheng, Chen Mingxiang *et al.*. Thermal analysis of high power LED array packaging with microchannel cooler[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 712~716
袁柳林,刘胜,陈明祥等. 基于微通道致冷的大功率 LED 阵列封装热分析[J]. 半导体光电, 2006, **27**(6): 712~716
- 13 Tang Zhengwei, Huang Qiong, Zhao Zanliang *et al.*. An integrated high-power LED refrigerated by semiconductor[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 471~473, 543
唐政维,黄琼,赵赞良等. 一种采用半导体致冷的集成大功率 LED[J]. 半导体光电, 2007, **28**(4): 471~473, 543
- 14 J. Petroski. Understanding longitudinal fin heat sink orientation sensitivity for light emitting diode (LED) lighting applications[C]. Proc International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2003. 111~117
- 15 Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang *et al.*. Thermal analysis of LED array system with heat pipe[J]. *Thermo-Chimica Acta*, 2007, **455**(1-2): 21~25
- 16 Wang Jing, Wu Fugen. Key issues of improving cooling of high-brightness LED[J]. *Electronic Design Engineering*, 2009, **17**(4): 123~125
王静,吴福根. 改善大功率 LED 散热的关键问题[J]. 电子设计工程, 2009, **17**(4): 123~125
- 17 C. B. Sobhan, R. L. Rag, G. P. Peterson. A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes[J]. *International J. Energy Research*, 2007, **31**(6-7): 664~688
- 18 Li Yong, Li Pengfang, Zeng Zhixin. Micro heat pipe cooling solution for high power LED illuminator[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 052201
李勇,李鹏芳,曾志新. 大功率 LED 照明装置微热管散热方案分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 052201
- 19 Dai Weifeng, Wang Jun, Li Yuesheng. Transient thermal analysis of high-power LED package [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(3): 324~328
戴伟锋,王珺,李越生. 大功率 LED 封装的温度场和热应力分布的分析[J]. 半导体光电, 2008, **29**(3): 324~328
- 20 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer (Fourth Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009
杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009