

# 无散热器 LED 异形灯设计与实验

唐 帆 郭震宁 林介本 张佳宁 李建鹏

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** 为了降低发光二极管(LED)灯具的重量和生产成本,根据烟囱效应原理,设计了一种无散热器的 LED 异形灯。利用 Solidworks 软件建立三维模型,通过其插件 Flow Simulation 进行热仿真。并以烟囱高度为 30 mm,烟囱通道直径为 20 mm 的参数为基础模型,研究不同烟囱高度和烟囱通道直径对 LED 异形灯最高温度的影响。仿真结果表明:对于烟囱高度和烟囱通道直径都为 45 mm,基板重量为 35.86 g 的 LED 异形灯,当输入功率为 6, 8, 10 W 时,其最高温度都低于芯片的安全结温 85 °C,可满足 LED 安全工作的要求。对 8 W 的 LED 异形灯进行实验验证,结果表明 LED 异形灯的最高温度为 73 °C,与仿真结果仅相差 2.06 °C,验证了仿真的正确性。所设计的无散热器 LED 异形灯不仅可以很好地满足 LED 散热要求,而且重量轻、成本低、制造简单。

**关键词** 光学器件; 散热; 异形灯; 烟囱效应; 最高温度

**中图分类号** TN312 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0923002

## Design and Experiment of Special-Shaped LED Lamp Without Radiator

Tang Fan Guo Zhenning Lin Jieben Zhang Jianing Li Jianpeng

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 reduce the weight and production cost of light emitting diode (LED) lamps, a special-shaped LED lamp without radiator is designed based on the principle of the chimney effect. A three-dimensional model is built by Solidworks software, and its plug-in called Flow Simulation is used to simulate the model. Based on the model that the height of chimney is 30 mm and diameter of chimney is 20 mm, the influences of different heights and diameters of chimney on the highest temperature of the special-shaped LED lamp are studied. Simulation results show that for the special-shaped LED lamp with the chimney height of 45 mm, chimney diameter of 45 mm and substrate weight of 35.86 g. The highest temperatures of the LED are all lower than security junction temperature of 85 °C, when the input powers are 6, 8, 10 W, which meets the security requirements. The experiment of special-shaped LED lamp with the power of 8 W is carried out. The result shows that the highest temperature of the special-shaped LED lamp is 73 °C, which is only 2.06 °C higher than the simulation results. It confirms the correctness of the simulation. In conclusion, this special-shaped LED lamp without radiator not only has the ability to well satisfy the heat dissipation requirements of LED, but also has the light weight, a low cost and a simple manufacturing process.

**Key words** optical devices; heat dissipation; special-shaped lamp; chimney effect; highest temperature

**OCIS codes** 230.1150; 230.2090; 230.3670; 230.5170

## 1 引 言

第 4 代光源白光发光二极管(LED),具有节能、体积小、环保、寿命长等优点。随着 LED 芯片功率的不断提高,如果产生的热量不能及时排出,LED 芯片的结温则会不断升高,使其使用寿命缩短并且发光效率降低<sup>[1]</sup>。因此,LED 的快速散热是大功率 LED 发展面临的关键问题<sup>[2]</sup>。

**收稿日期:** 2016-03-24; **收到修改稿日期:** 2016-06-06

**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)

散热器设计的优劣对 LED 灯具散热能力起着决定性的作用<sup>[3]</sup>。目前大多数提高 LED 灯具散热性能的研究,都是通过 LED 灯具中加入散热器,增加散热器与空气接触的面积或者改善散热器结构,从而提高 LED 灯具的散热能力。何凡等<sup>[4]</sup>设计了一种新型散热器结构,该散热器利用高导热纯铝材料,采用叠片方式成型,能够很好地满足大功率 LED 散热要求。王乐等<sup>[5]</sup>提出了一种平行翅片型散热器,通过对翅片进行开缝改进,从而达到消除局部环流和改善散热器自然对流换热性能的目的。向建化等<sup>[6]</sup>对大功率 LED 太阳花相变散热器进行了数值优化研究,分析了中心孔直径和翅片参数的改变对散热器性能的影响,并得出最佳方案。研究表明,在 LED 灯具散热设计中添加烟囱结构,可以在结构中产生烟囱效应<sup>[7]</sup>,有效地强化自然对流,提高散热能力。胡明钰等<sup>[8]</sup>提出了大功率 LED 片式板上芯片(COB)光源夹持式的散热方案,并根据烟囱效应,提出在散热器中合理设计流道来增强片式 COB 光源模组自然对流强度的方法。但是,散热器的使用在提高 LED 灯具的散热能力的同时,也会增加 LED 灯具的重量并提高生产成本。

本文基于烟囱效应原理,利用 Solidworks 软件构建 LED 异形灯的三维模型,通过插件 Flow Simulation 对所构建的模型进行散热模拟仿真,设计了一种特殊的结构,从而省略散热器,降低灯具散热成本和重量。

## 2 理论与模型建立

### 2.1 理论基础

所设计的 LED 异形灯的总热阻  $R$ <sup>[9]</sup>为

$$R = R_{jc} + R_{cs}, \quad (1)$$

式中  $R_{jc}$  为 LED 芯片热阻,  $R_{cs}$  为基板热阻。LED 异形灯的辐射传热量很低,所以其辐射传热热阻不予考虑,从而,基板热阻  $R_{cs}$  为

$$R_{cs} = R_j + R_k, \quad (2)$$

式中  $R_j$  为基板自身导热热阻,  $R_k$  为基板与空气的对流换热热阻。热阻计算公式为

$$R = \frac{T - T_\infty}{P}, \quad (3)$$

式中  $T$  为 LED 芯片最高温度,  $T_\infty$  为环境温度,  $P$  为芯片产热功率。

联立(1)~(3)式可得

$$R_k = \frac{T - T_\infty}{P} - R_{jc} - R_j, \quad (4)$$

要求 LED 工作时芯片最高温度  $T$  小于  $85\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty$  由环境温度决定,根据 LED 芯片功率,光电转换效率取 20%,可求得芯片产热功率  $P$ ,  $R_{jc}$  和  $R_j$  由于各厂家生产工艺选材不同而存在差异,但可从厂家提供的产品手册查出,均为定值。将上述各值代入(4)式算出  $R_k$ 。  $R_k$  和对流换热系数及基板表面积有关:

$$S = \frac{1}{hR_k}, \quad (5)$$

式中  $h$  为对流换热系数,  $S$  为基板表面积。

为提供基板足够的表面积  $S$ ,则需要增大基板的大小。基板的大小增加,意味着成本的提高。根据(5)式,当  $R_k$  确定时,  $S$  与  $h$  成反比,而通过烟囱效应可以有效增强基板表面的空气流动,从而增大  $h$ ,减小  $S$ ,达到降低生产成本的目的。

### 2.2 模型建立

设计了一款基于烟囱效应的无散热器 LED 异形灯,由 LED 光源、基板、光学灯罩和灯头组成。其灯头为 E27 标准灯头,电源在灯头内。基板为特殊的空心圆柱状,其中间的空心部分形成烟囱通道,LED 光源产生的热量通过基板传递到烟囱通道内的空气中。空气吸收热量,温度上升,密度减小,与上部冷空气形成温度差,产生浮力,进而上升,并沿着烟囱通道从上面排出,产生的负压又会使新的冷空气继续流入烟囱通道,形成烟囱效应,从而增大通风通道中的对流换热系数,增强自然对流散热,提高 LED 异形灯的散热能力。所设计的 LED 异形灯如图 1 所示。

为了更加迅速地进行热仿真,在构建模型的时候简化了一些对仿真结果影响不大的部分,如图 1(b)所

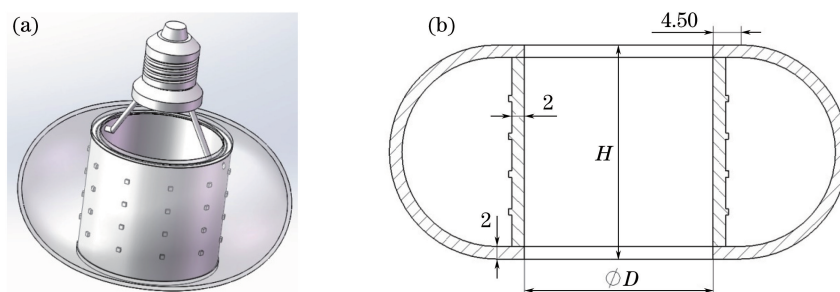


图1 LED异形灯的示意图。(a)完整LED异形灯;(b)热仿真简化图

Fig. 1 Schematic diagram of special-shaped LED lamp. (a) Complete special-shaped LED lamp; (b) simplified graph of thermal simulation

示(单位: mm)。LED芯片的尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ ,在基板上均匀布置有 $4\times 10$ 阵列,由于电源和灯头在异形灯主体外部,对仿真影响不大,故将其省略。

### 3 热仿真

利用软件对所构建三维模型进行热仿真。灯罩采用玻璃材质,导热系数设置为 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,基板采用铝基板,横向导热系数设置为 $100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,纵向导热系数设置为 $2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

将LED光源设置为体积热源,输入功率为 $6\text{ W}$ ,光电转换系数取 $20\%$ ,则发热功率为 $4.8\text{ W}$ ,模拟的环境温度设置为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。初始网格精度设置为4,将异形灯整体设置为精度为8的局部初始网格。

以烟囱通道高度 $H=30\text{ mm}$ ,直径 $D=20\text{ mm}$ 的LED异形灯模型为基础,进行深入的研究和优化。在此参数下,经软件热仿真得出LED异形灯最高温度为 $131.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,铝基板重量 $M=7.47\text{ g}$ 。

## 4 仿真结果和讨论

### 4.1 烟囱高度对散热效果影响

首先,通过调整烟囱通道的高度 $H$ ,来探究烟囱高度对LED异形灯散热能力的影响。保持烟囱通道直径 $D=20\text{ mm}$ 不变,烟囱高度 $H$ 取 $30\sim 60\text{ mm}$ ,利用软件模拟出了不同烟囱高度下LED异形灯芯片最高温度的变化。9种烟囱高度的模拟计算结果如图3所示。

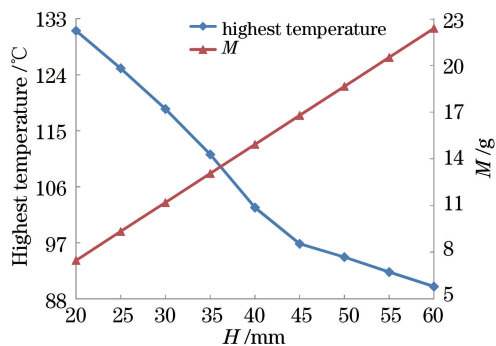


图2 最高温度和基板重量 $M$ 随高度 $H$ 的变化

Fig. 2 Highest temperature and substrate weight  $M$  change with height  $H$

如图2所示,在烟囱通道直径 $D=20\text{ mm}$ 条件下,当烟囱通道高度 $H$ 变化范围为 $20\sim 45\text{ mm}$ 时,随着 $H$ 的增加,LED异形灯芯片最高温度呈快速下降趋势。当烟囱高度继续增加时,最高温度下降趋势变得缓慢。出现这种现象的原因在于:烟囱高度 $H$ 在 $45\text{ mm}$ 以下时,烟囱效应的强度随着高度的增加而增强,从而LED异形灯的散热能力不断增强,使LED芯片的最高温度降低;当烟囱高度超过 $45\text{ mm}$ 时,空气会在烟囱通道内产生回流现象<sup>[10]</sup>,导致热量在烟囱通道内滞留,不能及时排出,也影响了新的冷空气继续进入烟囱通道,不能形成快速、畅通的自然对流,反而减弱了烟囱效应的强度,影响了散热效果。从图2还可以看出,

随着  $H$  的增加,基板重量  $M$  呈直线增加趋势。当  $H$  由 45 mm 增加到 60 mm 时,基板的重量从 16.79 g 增加到 22.38 g,增加了近 33%,但 LED 芯片的最高温度只下降了 6.87 °C。这说明,虽然  $H$  的增加,使基板的重量增大,也使基板与空气接触的换热面积增大,但由于  $H$  高度的过高使烟囱效应减弱,反而 LED 芯片的最高温度下降不明显。在实际应用中,烟囱通道高度的增加也会使耗材和重量增加,安全性降低,材料造价和运输成本大大提高。因此,为了使 LED 芯片最高温度尽可能低,同时又使散热器重量尽可能小,取  $H = 45$  mm。此时,LED 芯片的最高温度为 96.85 °C,基板的重量为 16.79 g。

#### 4.2 烟囱通道直径对散热效果的影响

在 4.1 节的研究前提下,进一步对烟囱通道直径进行优化。以烟囱通道高度  $H = 45$  mm,直径  $D = 20$  mm,基板重量  $M = 16.79$  g 为基础,改变烟囱通道直径  $D$  来调整烟囱通道大小。经模拟仿真计算,得到了  $D$  在 20~60 mm 变化范围下,相应的 LED 芯片的最高温度及基板重量  $M$  值,其结果如图 3 所示。

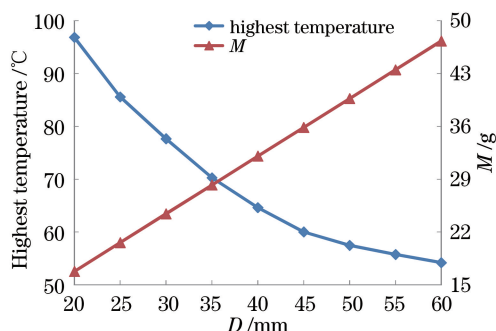


图 3 最高温度和基板重量  $M$  随直径  $D$  的变化

Fig. 3 Highest temperature and substrate weight change with diameter  $D$

由图 3 可以看出, $D$  从 20 mm 增加到 45 mm 的过程中,LED 芯片的最高温度迅速降低,分别降低了 11.27,7.92,7.39,5.64,4.63 °C。当  $D$  从 45 mm 继续增加到 60 mm,LED 芯片的最高温度由 60.00 °C 降低到 54.19 °C,仅降低了 5.81 °C。出现此现象的原因是,当  $D$  在 20 mm 以下时,烟囱通道很小,由于烟囱通道的边界阻力作用<sup>[11]</sup>,通道内空气流动不明显,不足以引入足够空气来通过对流传热降低散热器温度,烟囱效应不明显。当  $D$  在 20~45 mm 范围时,空气流量的增大,提高了烟囱通道表面的对流换热系数,同时也增大了其散热表面积。根据牛顿冷却定律

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

式中  $\phi$  为热功率, $\lambda$  为物体表面的对流换热系数, $S$  为物体散热表面积, $\Delta T$  为物体表面温度与环境温度差值,可以看出,对流换热系数的增加,可以增加对流传热带走的热量,从而使 LED 芯片的最高温度降低。当  $D$  继续增加到 60 mm 时,由于烟囱通道直径过大,LED 光源产生的热量不足以使通道中大量空气快速上升,从而降低通道内空气的流速,使对流换热系数减小。从图 3 还可以看出, $M$  随  $D$  的增加呈直线上升趋势。但是,当  $D$  增加到 60 mm 时, $M$  也仅为 47.31 g。由此说明,在一定范围内,随着通风口的增大,LED 异形灯的温度快速下降。故取  $D = 45$  mm,此时 LED 异形灯芯片的最高温度为 60.00 °C,基板重量为 35.86 g。

由上述研究可知,当烟囱高度  $H = 45$  mm,烟囱直径  $D = 45$  mm 时,LED 异形灯的散热性能最好。此时,基板重量  $M = 35.86$  g,LED 异形灯附近的空气速度分布如图 4 所示,其温度场分布如图 5 所示。

如图 4 所示,LED 热源工作产生热量,使周围的空气温度升高,产生温度差,进而提供空气上升的浮力,空气进入烟囱通道并顺着通道向上排出,带走热量,提高 LED 异形灯的散热性能。由图 5 可见,LED 异形灯工作时产生的热量先从 LED 芯片传导到铝基板上,再由铝基板传递到空气中。

#### 4.3 不同功率的 LED 异形灯温度变化

以上述研究为基础,探究不同功率下无散热器的 LED 异形灯最高温度的变化,其结果如表 1 所示。

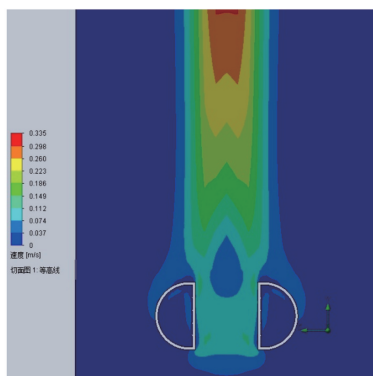


图 4 空气速度分布

Fig. 4 Distribution of air speed

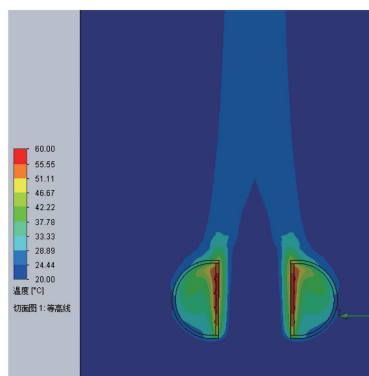


图 5 温度场分布图

Fig. 5 Distribution of temperature field

表 1 不同功率 LED 异形灯最高温度的变化

Table 1 Changes of the highest temperature of special-shaped LED lamp with different powers

Power /W	6	8	10	12	14
Temperature /°C	60.00	70.94	81.34	91.27	100.84

从表 1 可以看出,当工作的环境温度为 20 °C,功率为 6,8,10 W 时,LED 异形灯最高温度都低于芯片的安全结温 85 °C<sup>[12]</sup>。与市场中的 LED 异形灯相比,所设计的 LED 异形灯有如下优势:

- 1) 散热效果好,环境温度为 20 °C 时,在无散热器的条件下,功率为 6,8,10 W 的 LED 异形灯最高温度都低于芯片的安全结温 85 °C,满足 LED 安全工作要求;
- 2) 重量轻、成本低,因为没有散热器,大量减少了 LED 灯具的重量与加工成本;
- 3) 制造简单,因为没有散热器,所以无需复杂传统的散热器开模铸造,并且省略了将基板安装在散热器上的加工步骤。

## 5 实验验证

为了证实以上研究的正确性,通过实物实验测量输入功率为 8 W 的 LED 异形灯的温度,其中测试样品的输入电流 360 mA。采用 1 台兆信 PS-3003D 直流电源供应器和 2 个 TM-902C 温度测试仪对 LED 异形灯进行温度测试。测试样品、温度监测点、实验测试平台及测试结果如图 6 所示。经过实验测量,LED 异形灯的最高温度为 73 °C,与仿真结果仅相差 2.06 °C,误差为 2.9%,在允许范围内,验证了研究的正确性。

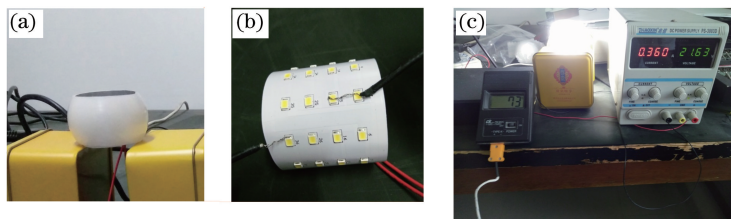


图 6 实验测试平台及温度监测点。(a)测试样品;(b)温度监测点;(c)实物测试平台及测试结果

Fig. 6 Experimental test platform and temperature test points. (a) Test sample;  
(b) temperature monitoring points; (c) experimental test platform and result

## 6 结 论

基于烟囱效应,设计了一种新型的无散热器的 LED 异形灯。先后对烟囱通道的高度和直径进行了优化,得到的最佳设计参数为: $H=45\text{ mm}$ , $D=45\text{ mm}$ ,此时基板的重量为 35.86 g。热仿真结果表明,当 LED 异形灯工作的环境温度为 20 °C,功率为 6,8,10 W 时,其最高温度都低于芯片的安全结温 85 °C。通过对 8 W 的 LED 异形灯的实物进行实验测试,测得其最高温度为 73 °C,与仿真结果仅相差 2.06 °C,验证了研究

的正确性。这款无散热器的 LED 异形灯具有散热效果好、重量轻、成本低、制造简单的优点,可以被大量生产并且为解决大功率 LED 灯具散热问题提供了新途径。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Y 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, 2006: 1-4.
- 2 Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: light emitting diodes [C]. IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002: 113-120.
- 3 Li Juhua. Thermal design and simulation of LED lamps [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011.  
李菊华. LED 灯具热设计与仿真 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.
- 4 He Fan, Chen Qinghua, Liu Juanfang, *et al.* Thermal analysis of high mast integrated LED lamp with new heatsink structure of laminated pure aluminum plate [J]. Chinese Journal of Luminescence. 2014, 35(6): 742-747.  
何 凡, 陈清华, 刘娟芳, 等. 集成芯片 LED 场地照明灯新型叠片散热器热分析 [J]. 发光学报, 2014, 35(6): 742-747.
- 5 Wang Le, Wu Ke, Yu Yibo, *et al.* Study on LED array heat radiator improvement under natural convection [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(3): 338-342.  
王 乐, 吴 珂, 俞益波, 等. 自然对流条件下 LED 阵列散热器改进研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 338-342.
- 6 Xiang Jianhua, Zhang Chunliang, Chen Sheng, *et al.* Numerical optimization of phase-change radiator for high-power LED [J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2015, 14(2): 61-65.  
向建华, 张春良, 陈 胜, 等. 大功率 LED 太阳花相变散热器数值优化研究 [J]. 广州大学学报(自然科学版), 2015, 14(2): 61-65.
- 7 Zhu Peng. The enhancement of heat dissipation of high power LED lamp with chimney effect [D]. Dalian: 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]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- 8 Hu Mingyu, Wu Yiping, Yang Zhuoran. Thermal design of high power plate LED COB lighting source [J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(2): 63-68.  
胡明钰, 吴懿平, 杨卓然. 大功率 LED 片式 COB 光源散热设计 [J]. 电子工艺技术, 2015, 36(2): 63-68.
- 9 Tang Fan, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* Thermal design and experiment of LED bulb using chimney effect [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(5): 624-630.  
唐 帆, 郭震宁, 林介本, 等. LED 球泡灯的烟囱效应散热设计与实验 [J]. 发光学报, 2016, 37(5): 624-630.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.