

# 微热管式汽车 LED 大灯的设计与散热研究

鲁祥友<sup>1\*</sup>, 戴林<sup>1</sup>, 鲁飞<sup>2</sup>, 方舒超<sup>1</sup>, 周可<sup>1</sup>

<sup>1</sup>安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;

<sup>2</sup>合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 在密闭狭小空间, 散热问题是制约大功率 LED 在汽车大灯领域发展的因素之一。提出了一种用于汽车 LED 大灯的以铜粉为烧结芯的平板微热管组散热装置, 针对车灯运行的不同工况, 研究了热阻、环境温度及翅片组上的对流换热系数等参数对散热器性能的影响, 最后进行了微热管车灯散热实验。结果表明: 正常工作环境下, 当 LED 灯的功率为 60 W 时, LED 结点温度为 67 °C, 散热器的热阻稳定在 0.61 K/W; 复杂环境和高功率工况下, LED 结点温度都低于 120 °C, 在翅片上的对流换热系数大于 80 W/(m<sup>2</sup> · K) 后, LED 结点温度趋于平稳。同时, 实验验证了散热器的性能, 在输出功率为 50 W 的情况下, 热管式散热器 LED 结点温度为 58 °C, 说明该新型热管式散热器能满足汽车 LED 大灯散热的要求。

**关键词** 光学器件; LED 大灯; 热管; 结点温度; 对流换热系数

**中图分类号** TN312+.8; TK172.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.112301

## Design and Heat Dissipation Research of Micro Heat Pipe Automobile LED Headlamp

Lu Xiangyou<sup>1\*</sup>, Dai Lin<sup>1</sup>, Lu Fei<sup>2</sup>, Fang Shuchao<sup>1</sup>, Zhou Ke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

<sup>2</sup> School of Automotive and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

**Abstract** In the confined space, heat dissipation problem is one of the factors that restrict the development of high power LED in automotive headlamps. A flat panel micro heat pipe group with copper powder as sinter core, is proposed as a radiator used in automobile LED headlamp. Under different working conditions of vehicle lights, the effects on the radiator performance of thermal resistance, ambient temperature, and convective heat transfer coefficient of the fin group are studied. Finally, the heat dissipation experiment of the micro heat pipe for vehicle light is conducted. The results show that, under normal working conditions, when the power of the LED lamp is 60 W, the junction temperature of the LED is 67 °C, and the thermal resistance of the radiator is stable at 0.61 K/W. Under complex and high power conditions, the junction temperature of LED is below 120 °C, and when the convective heat transfer coefficient of the fin is greater than 80 W/(m<sup>2</sup> · K), the junction temperature of LED tends to be stable. Meanwhile, the performance of the radiator is verified by experiments. When the output power is 50 W, the LED junction temperature of the heat pipe radiator is 58 °C, indicating that the new heat pipe radiator can meet the heat dissipation requirements of the LED headlamps.

**Key words** optical devices; LED headlamp; heat pipe; junction temperature; convective heat transfer coefficient

**OCIS codes** 230.1150; 230.3670; 230.2090; 230.0250

## 1 引言

随着汽车大灯照明领域对节能环保的要求越来越高, 广泛应用在汽车上的卤素大灯和氙气大灯即将被

淘汰, 以往只在高端汽车上采用的汽车 LED 大灯, 逐渐被应用于各类中低端车型。然而, 相比于 LED 转向灯及尾灯, LED 汽车大灯不仅功率大, 而且 80% 的功率被转换成热能, 因此, 在密闭狭小空间, 高效快速散热

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-05-04; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51606002)、大学生创新创业训练计划项目(201710878124)

\* E-mail: gaoyunwansu@ahjzu.edu.cn

是 LED 汽车大灯发展的关键技术之一<sup>[1-5]</sup>。

针对大功率 LED 灯散热问题,研究人员提出了很多解决方法,设计出了不同类型的散热结构。陈文林等<sup>[6]</sup>研究了三种不同结构的汽车前照灯散热装置,主要探讨了不同类型散热片和热沉的组合结构的散热效果,进而选择出一种良好的满足 LED 大灯散热要求的散热结构。李贺等<sup>[7]</sup>通过设计出一种 AlGaInP 材料 LED 热沉结构,改善了阵列芯片的散热性能。张冬云等<sup>[8]</sup>提出了一种满足大功率半导体散热要求的微通道热沉。Chen 等<sup>[9]</sup>实验讨论了一种用编织散热器散热的汽车 LED 前照明灯张开角度对散热性能的影响。唐帆等<sup>[10-11]</sup>提出了一种基于烟囱效应的异性 LED 灯的散热装置和 LED 异形灯蜂巢散热器,研究结果表明二者均可以满足一定功率的 LED 灯的散热要求。

研究人员也对基于热管技术用于大功率 LED 灯的散热作出了很多探讨。Wang 等<sup>[12]</sup>设计了一套基于热管散热的 LED 前照灯系统,结果发现利用热管散热的效果明显优于自然对流的散热效果,同时探讨了热管充液率与热管长度的关系。周驰等<sup>[13]</sup>对自然对流下 LED 集成芯片整体式热管散热器性能进行了实验研究。基于热管高效的散热特性,冯志伟等<sup>[14]</sup>提出了一种大功率 LED 排式热管散热器,并研究在自然对流下不同输出功率时大功率 LED 启动性能及均温性能,结果表明当输出功率在 70 W 以下时,该散热器可以满足 LED 散热需求。鲁祥友等<sup>[15]</sup>提出一种新型的 LED 回路热管散热装置,探讨了充液率、倾斜角度等对大功率 LED 大灯的启动性能、均温性、热阻等特性的影响。赵耀华等<sup>[16]</sup>研究了一种平板微热管在大功率 LED 散热器的冷却中的应用,结果表明该散热装置具有良好的热运输能力,在路灯和电池等散热中都可以应用。

Lai 等<sup>[17]</sup>提出了用液体冷却汽车 LED 大灯,有效提高了汽车大灯的散热效率。

本文结合热管技术设计出一种微热管式汽车 LED 大灯散热装置,所设计的散热装置同时具有热管快速高效散热和翅片表面快速对流散热的特点;针对车灯运行的不同工况,通过模拟实验研究了环境温度、热阻及对流换热系数等参数对散热器性能的影响,最后通过实验验证了散热装置的可行性。

## 2 汽车 LED 大灯散热装置结构原理、理论分析及实验条件

### 2.1 LED 大灯散热装置结构原理

图 1(a)为汽车 LED 大灯装置示意图,主要分为前端产热端和后端散热端。产热端被放入汽车大灯密封的大灯罩中,工作环境较差;散热端在大灯罩外与空气接触,同时,在汽车行驶中会有空气对流进一步加强散热效果。汽车 LED 大灯热管散热装置主要是四根微热管,热管前端(蒸发器)被镶嵌在导热棒的凹槽中,LED 芯片组通过导热硅脂粘合于热管前端两侧,热管后端(冷凝器)和导热棒一起被嵌入散热片组中,散热片组由多个阵列排布的散热翅片构成,同时,为了增加车灯在恶劣工况下的散热可靠性,在散热翅片阵列组一侧增加了一个小风扇。图 1(b)为散热器三大主要结构示意图:导热棒、热管及翅片组。热管为铜粉烧结芯平板微热管(铜粉吸液芯选取 99.5%纯度的铜粉,铜粉单体粒径控制在 75~160  $\mu\text{m}$ ,烧结吸液芯厚度为 1.6 mm),热管介质为丙酮,导热棒和翅片的材质为铝。

汽车 LED 灯工作产生的热量首先传递到热管蒸发器表面,蒸发器里面的工质丙酮受热气化,产生的蒸气经蒸汽管线进入冷凝器(冷凝器被嵌在翅片散热片组中)端与空气进行换热,气体工质冷凝后变成液

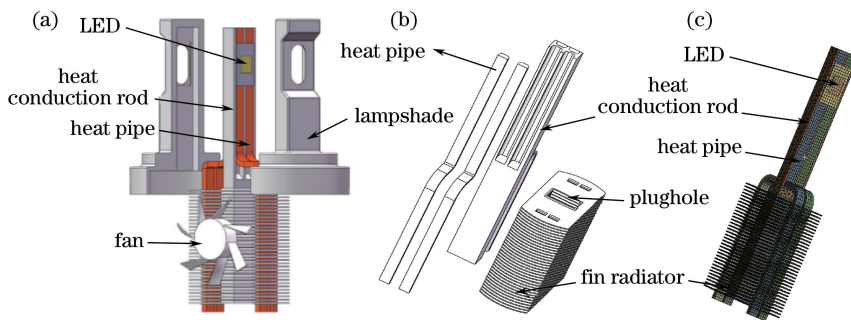


图 1 汽车大灯示意图。(a) LED 车灯结构;(b)散热器结构;(c)散热器网格划分图

Fig. 1 Automotive headlight diagram. (a) Automobile LED headlight structure; (b) radiator structure; (c) grid diagram of radiator

态工质,在系统吸液芯产生的毛细驱动力作用下通过液体管线回流到蒸发器端,如此循环往复。同时,导热棒直接将热量传递到散热翅片中,散热翅片外侧的风扇(依据车灯功率及其运行工况自动控制风扇的启停)强制对流换热,提高汽车 LED 灯换热效率。

## 2.2 散热结构理论分析

实验用汽车 LED 大灯散热装置的散热分为热管与导热棒的传热,散热翅片组的对流散热以及辐射散热。辐射散热主要包括 LED 灯芯的辐射热,翅片上的辐射热,热管和导热棒的辐射热。导热棒和热管装在灯罩中,外表面的温度较低可以不考虑辐射热<sup>[18]</sup>。热管和导热棒的传热量计算公式为

$$Q_D = \lambda \cdot s \cdot (T_c - T_\infty) / L, \quad (1)$$

式中, $Q_D$  为热管和导热棒上的综合功率, $\lambda$  为综合导热率, $s$  为散热器的传热面积, $T_c$  为导热棒 LED 基板接触温度, $T_\infty$  为环境温度, $L$  为导热棒的长度。

散热翅片表面主要为对流散热,其次为辐射热。翅片散热功率和散热器表面辐射功率表达式为

$$Q_L = h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty), \quad (2)$$

$$Q_C = d \cdot A \cdot (T_w - T_\infty), \quad (3)$$

式中, $Q_L$  为翅片散热功率, $Q_C$  为散热器表面辐射功率, $T_w$  为翅片表面温度, $A$  为翅片散热面积, $h$  为对流换热系数, $d$  为散热器表面材料辐射系数。

LED 灯芯辐射散热公式为

$$Q_F = \varepsilon \sigma s_1 (T_p^4 - T_\infty^4), \quad (4)$$

式中, $Q_F$  为辐射散热功率, $\varepsilon$  为材料表面辐射率, $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ , $T_p$  为 LED 灯芯表面温度, $s_1$  为 LED 灯芯的面积。

LED 总的功率为

$$Q = \alpha \cdot W_a, \quad (5)$$

式中, $Q$  为 LED 工作时的产热功率, $\alpha$  为 LED 产热

系数, $W_a$  为 LED 灯的实际功率。

理论计算得出:

$$(Q - Q_F) < (Q_L + Q_C) < Q_D < (Q_D + Q_L + Q_C). \quad (6)$$

因此,理论上该散热装置性能满足汽车 LED 大灯散热的要求。

## 2.3 汽车 LED 大灯散热装置的模拟实验条件

首先使用 SolidWorks 建立散热器的模型,导入 Ansys Workbench 进行稳态分析,为了简化模拟,实验不考虑灯芯和散热片的辐射散热,热管等效成导热率恒定的材料,忽略各部件接触热阻<sup>[16]</sup>。选择自动网格划分方式,划分结果如图 1(c)所示。LED 的灯芯光源为整体模型并定义为内部生热(Inter Heat Generator)。汽车行驶过程中,远光灯和近光灯交替使用时,对应的车灯功率随之改变,因此灯芯功率范围为 20~60 W;LED 灯的基板选 AlSiC 材料,导热系数设为 170 W/(m·K);导热棒材料为合金铝,导热系数为 200 W/(m·K);散热翅片组的材料为铝,导热系数为 203 W/(m·K),微热管的等效导热系数为 5000 W/(m·K);风扇强制空气对流换热系数取值范围为 30~100 W/(m<sup>2</sup>·K);实验环境温度取值范围为 10~60 °C。将导热棒的前端与热管前端考虑为第一类边界条件,导热棒后端、热管后端和散热翅片上考虑为第三类边界条件。各零部件直接接触面定义为完全接触传热(MPC)。

## 3 结果与分析

### 3.1 散热器热流密度和温度分布云图

将建立的模型导入仿真软件中,按要求设定模拟实验的条件。图 2 中给出了在环境温度为 20 °C,常见 40 W 前照车灯(产热系数为 80%及输出功率为 32 W)散热翅片上风扇高速运转时及对流换热系

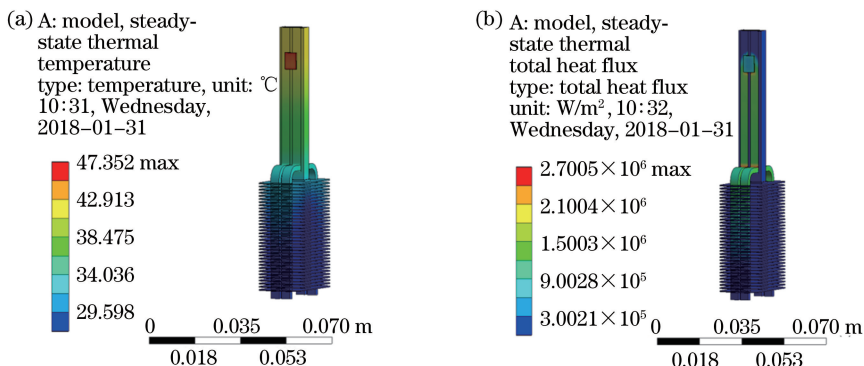


图 2 散热器的温度和热流密度云图。(a)温度云图;(b)热流密度云图

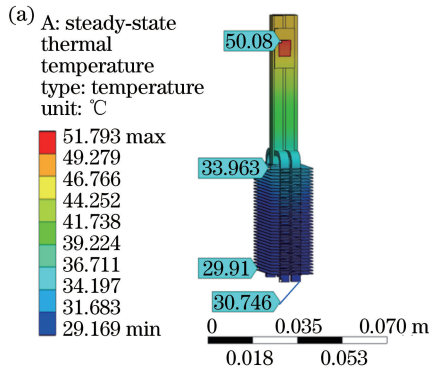
Fig. 2 Temperature and heat flux density of the radiator. (a) Temperature cloud image; (b) heat flux density image

数为  $90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时一组散热器的温度云图和热流密度分布图。

从图 2(a)可以看出,在模拟条件下,车灯 LED 芯片结点温度在  $47 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,远低于车灯 LED 工作时所要求的控制温度,散热器末端的最低温度约为  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。从图 2(b)中明显可以看出热管的热流密度比较大,说明车灯 LED 产生的热量大部分都可以经过热管导热传递到散热翅片再进入环境中。

### 3.2 输入功率对 LED 散热装置各结点温度的影响

汽车在正常的行驶过程中,远光灯和近光灯交



替使用,车灯功率随之改变。实验设置 LED 结点位置、散热翅片前端和末端及热管末端四个测试点,温度分别为  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 。环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在对流换热系数  $90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  下进行多组实验,结果如图 3 所示,当 LED 灯的功率在  $20 \sim 60 \text{ W}$  之间变化时,随着 LED 车灯输入功率的提高,散热装置各测试点温度逐渐上升。明显可以观察到  $T_1$  处温度上升速度较快,这一现象说明尽快把热量从 LED 芯片移走是关键,只有将热量从芯片结点移走,散热器才会及时地将热量散发到周围的环境中。

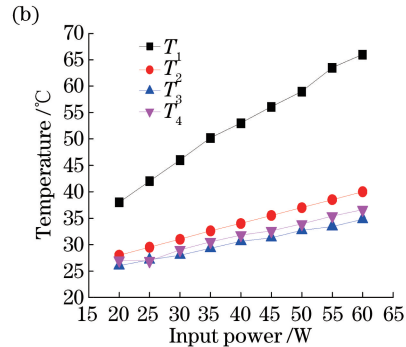


图 3 输入功率对 LED 散热装置各结点温度的影响。(a)测试点的温度;(b)输入功率与结点温度的关系

Fig. 3 Influence of input power on the junction temperature for LED heat dissipating device. (a) Temperature of test point; (b) input power versus junction temperature

### 3.3 车灯 LED 输入功率与热阻之间的关系

散热器的热阻是评价散热器性能好坏的重要参数,热阻越小,散热器导热、散热效果越好。散热器热阻计算公式为

$$R = (T_j - \bar{T}_h) / W, \quad (7)$$

式中, $R$  为热阻, $T_j$  为 LED 车灯的结点温度, $\bar{T}_h$  为散热翅片上的平均温度, $W$  为车灯输入功率。

图 4 为环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时,不同 LED 输入功率下热阻的变化曲线。分析图 4 可知:在小功率时,由于热管没有充分启动,热阻相对较大,随着功率的增大热阻迅速减小;到  $20 \text{ W}$  后,热阻的变化趋向平缓,在输入功率为  $60 \text{ W}$  时,热阻稳定在  $0.61 \text{ K}/\text{W}$  左右,说明热管充分启动,并平稳运行。

### 3.4 环境温度对 LED 车灯散热的影响

汽车车灯复杂工作环境主要包括:不同地域气候昼夜温差,汽车本身的前置发动机工作温度以及汽车灯罩内辐射温度等。如图 5 所示,选择的 LED 车灯环境温度范围为  $10 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在对流换热系数为  $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  情况下,讨论 LED 车灯输入功率与结点温度的关系。分析图 5 可知,由于 LED 灯结点允许的温度最高为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[11]</sup>,以环

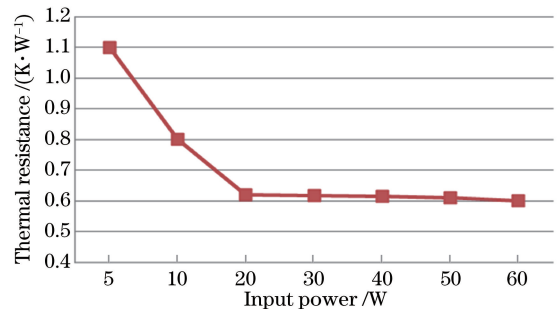


图 4 不同 LED 输入功率下的热阻变化趋势

Fig. 4 Change trend of thermal resistance at different LED input powers

境温度  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  为横坐标界限,同时以  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  的 LED 结点温度为纵坐标界限,在图 5 上作一个矩形框,框内是 LED 大灯正常工作区间,框外为 LED 大灯散热装置超负荷工作区间。统计发现在 LED 车灯正常工作工况下,散热器的散热能力仅仅达到其所能承担的最大散热能力的  $63.8\%$ ,即 LED 车灯即使在实验的最大负荷工况 ( $60 \text{ W}$ ) 下工作,其温度也没有超过 LED 灯结点温度允许的  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因此散热装置能满足  $60 \text{ W}$  以下汽车 LED 灯各种工作工况下的散热需求。

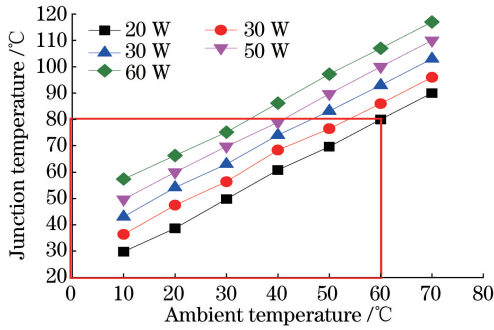


图5 结点温度与环境温度的关系

Fig. 5 Junction temperature versus ambient temperature

### 3.5 对流换热系数对 LED 车灯散热器的影响

LED 车灯散热器翅片上换热能力决定散热器能否快速地将 LED 车灯上产生的热量及时地排到空气中去,同时翅片也是热管的冷凝端,快速冷却便于热管介质的冷却循环。图 6 为不同的输入功率条件下 LED 车灯散热器对流换热系数对 LED 结点温度的影响曲线图。在相同的输入功率条件下,对流换热系数越大,越有利于 LED 结点温度的降低,但是,随着对流换热系数的增加,对流换热系数对 LED 结点温度的影响变小。当对流换热系数达到  $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,LED 结点温度下降趋于平缓,此时散热翅片的散热性能也达到了饱和状态,因此翅片上对流换热系数

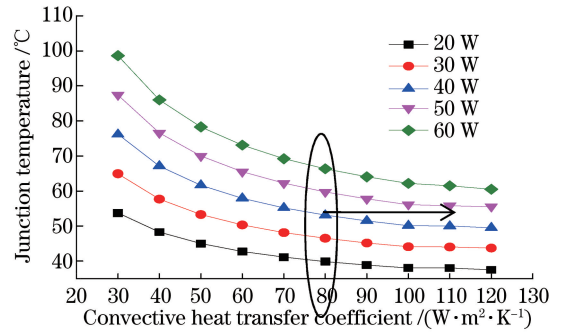


图6 结点温度与对流换热系数的关系

Fig. 6 Junction temperature versus convective heat transfer coefficient

综合达到  $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  的设计方案比较经济环保。同时,讨论结果表明,强对流方式在一定范围内会大大提高 LED 产品的散热能力,有助于提高散热效果。

### 3.6 车灯 LED 热管散热器性能的实验验证

采用的实验装置和实验平台如图 7 所示。实验条件与参数设置: $T_6$  为 LED 结点温度,采用管脚法进行测量; $T_5$  为散热翅片末端温度;LED 输出功率为  $50 \text{ W}$ ;微热管的尺寸为  $120 \text{ mm}$ (长) $\times 4 \text{ mm}$ (直径);散热翅片的有效对流面积都为  $0.035 \text{ m}^2$ ;LED 灯使用  $12 \text{ V}$  的恒流电压驱动。实验室的环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

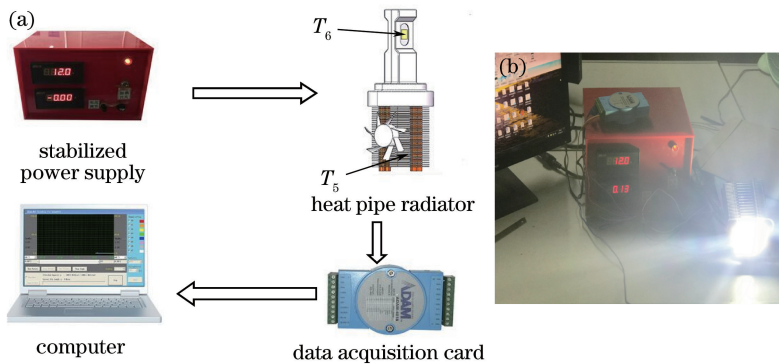


图7 实验装置示意图和实验平台。(a)实验装置示意图;(b)实验平台

Fig. 7 Schematic of the experimental apparatus and experimental platform. (a) Schematic of the experimental apparatus; (b) experimental platform

如图 8 所示,在输入功率为  $50 \text{ W}$  时,实验测得的热管式散热器 LED 结点温度为  $58 \text{ }^\circ\text{C}$ ,翅片散热器末端的温度为  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 。而且随着时间推移,热管散热器在测试点的温度  $T_5$  和  $T_6$  都趋于稳定。

## 4 结 论

提出了一种汽车 LED 大灯散热装置,探讨了热阻、环境温度及翅片组上的对流换热系数等参数对散热器性能的影响。结果表明:当大灯的功率为

$60 \text{ W}$  时,LED 结点温度为  $67 \text{ }^\circ\text{C}$ ,满足 LED 车灯对结点温度的控制需求;随着功率的增大,LED 散热装置热阻迅速减小,到  $20 \text{ W}$  以后,热阻的变化趋于平缓,稳定在  $0.61 \text{ K}/\text{W}$  左右;对流换热系数越大,越有利于 LED 结点温度的降低,但是,随着对流换热系数的增加,对流换热系数对 LED 结点温度的影响减小,因此翅片上对流换热系数综合达到  $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  的设计方案比较经济环保;实验验证了散热器的性能,在输入功率为  $50 \text{ W}$  的情况下,

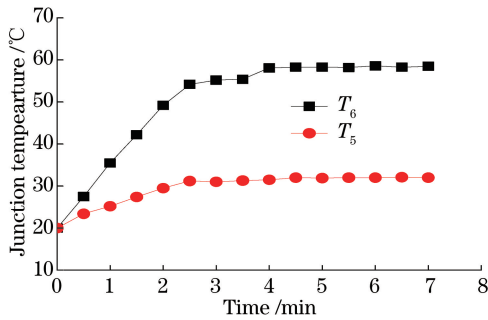


图8 实验LED大灯的各测点温度变化

Fig. 8 Temperature change of the test points of the LED headlamps in the experiment

热管式散热器LED结点温度稳定在58℃左右。研究表明将微型热管组引入LED车灯散热是一个很好的探讨方向。

### 参 考 文 献

- [1] Jung E D, Lee Y L. Development of a heat dissipating LED headlamp with silicone lens to replace halogen bulbs in used cars[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86: 143-150.
- [2] Wang J, Cai Y X, Zhao X J, *et al.* Thermal design and simulation of automotive headlamps using white LEDs[J]. *Microelectronics Journal*, 2014, 45(2): 249-255.
- [3] Yuan G C, Guo C F, Zou J, *et al.* Photoelectric performance of G4 lamp with LED light source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122303.  
袁焱晨, 郭春风, 邹军, 等. LED光源G4灯的光电性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122303.
- [4] Tsai C Y. Design of free-form reflector for vehicle LED low-beam headlamp[J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 1-13.
- [5] Liu C, Fu R L, Gu X G, *et al.* Structure of chip scale package for LED light source 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.
- [6] Chen W L, An Z, Liu C Y, *et al.* Design and analysis of high-power LED car headlamps radiator [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, 24(6): 101-105.  
陈文林, 安震, 刘晨阳, 等. 大功率LED汽车前照灯

散热装置的设计与分析[J]. *照明工程学报*, 2013, 24(6): 101-105.

- [7] Li H, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Thermal analysis of AlGaInP-based LED microarray[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0123001.  
李贺, 梁静秋, 梁中翥, 等. AlGaInP材料LED微阵列热学特性分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0123001.
- [8] Zhang D Y, Xie Y K, Li C Y, *et al.* Simulation and optimization of high power semiconductor laser microchannel heat sink[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0202008.  
张冬云, 谢印开, 李丛洋, 等. 高功率半导体激光器微通道热沉的模拟优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202008.
- [9] Chen S M, Chen K H, Li Z T, *et al.* Experimental investigation on the thermal performance of a light emitting diode headlamp with a flexible woven heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 1215-1222.
- [10] Tang F, Guo Z N. Design and experiment of LED cylindric sunflower radiator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092303.  
唐帆, 郭震宁. LED圆筒太阳花散热器设计与实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092303.
- [11] Tang F, Wang D, Guo Z N, *et al.* Thermal design and experiment for special-shaped LED lamp[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(3): 365-371.  
唐帆, 王丹, 郭震宁, 等. LED异形灯的散热设计与实验[J]. *发光学报*, 2017, 38(3): 365-371.
- [12] Zhao X J, Cai Y X, Wang J, *et al.* Thermal model design and analysis of the high-power LED automotive headlight cooling device[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 248-258.
- [13] Zhou C, Zuo D W, Sun Y L. Experimental investigation of integrated heat pipe heat sink for multi-chip LED module in natural convection [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(11): 1394-1400.  
周驰, 左敦稳, 孙玉利. 自然对流下LED集成芯片整体式热管散热器性能实验研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(11): 1394-1400.
- [14] Feng Z W, Zhang H, Xu H. Development and performance study on platoon-type heat pipe radiator for high power LEDs[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(2): 225-229, 234.  
冯志伟, 张红, 许辉. 大功率LED排式热管散热器

- 的开发及性能研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(2): 225-229, 234.
- [15] Lu X Y, Qian T T, Wang Y P, *et al.* Experiment study on the loop heat pipe for high-power LED cooling system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(10): 1843-1848.  
鲁祥友, 钱婷婷, 王晏平, 等. 大功率LED散热回路热管的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(10): 1843-1848.
- [16] Liang F, Zhao L Y, Zhang H, *et al.* Study on thermal dissipation of high-power LED lamps based on flat micro-heat pipe arrays[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(5): 107-111.  
梁锋, 赵连玉, 张慧, 等. 基于平板微热管阵列的大功率LED路灯散热研究[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(5): 107-111.
- [17] Lai Y, Cordero N, Barthel F, *et al.* Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5/6): 1239-1244.
- [18] Liu C Y, Yin M, Sun H R, *et al.* Research on thermal structure design of 90 W LED car headlamps [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(2): 137-141.  
刘晨阳, 尹默, 孙贺然, 等. 90 W汽车LED前照灯散热结构设计研究[J]. *照明工程学报*, 2015, 26(2): 137-141.