

大功率 LED 透镜热学特性分析

许丹丹¹, 胡学功^{1,2*}

¹中国科学院工程热物理研究所传热传质研究中心, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以 100 W 向下照射的 LED 灯为研究对象, 计算了在单纯导热、热辐射和导热耦合以及对流、热辐射和导热耦合 3 种情况下透镜的温度及热应力分布, 并对透镜外表面特征点的温度变化进行了测量。研究了透镜封闭腔内空气热对流和表面热辐射对透镜温度分布的影响, 分析了表面发射率对透镜中心温度的影响以及热膨胀系数对最大热应力的影响。实验结果表明: 热对流对透镜温升的影响不足 1%, 热辐射对透镜中心温升的影响为 13.3%。透镜中心温度随光源及透镜表面发射率近似呈线性变化, 最大热应力也随热膨胀系数呈线性变化。最大热应力集中在透镜的边角处, 而最大变形总位移却位于透镜中心。因此, 在大功率 LED 透镜设计过程中, 在满足光学要求的前提下, 可考虑涂覆低发射率的涂层来降低透镜温度。同时, 为减小热应力及热变形, 应尽量避免边角结构, 选择热膨胀系数较小的材料。

关键词 光学器件; LED 透镜; 热辐射; 温度分布; 热应力

中图分类号 TN312.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1023001

Thermal Analysis of High-Power LED Lens

Xu Dandan¹, Hu Xuegong^{1,2*}

¹Research Center for Heat and Mass Transfer, Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A downward-illuminated 100 W LED was studied herein, and its temperature and thermal stress distributions were calculated under three conditions: pure thermal conduction, thermal radiation and thermal conduction coupling, and convection, thermal radiation, and thermal conduction coupling. The following factors were evaluated: temperatures of the characteristic points on the lens' external surface; the effects of air convection in the closed cavity of lens and surface radiation on the lens' temperature distribution; the effect of surface emissivity on the central temperature of the lens; the effect of the thermal expansion coefficient on the maximum thermal stress. Results show that thermal convection produces a negligible rise in temperature (less than 1%), whereas surface radiation results in a 13.3% temperature rise at the lens' center. The temperature of the lens' center varies approximately linearly with the light source's emissivity and the lens surface area, whereas the maximum thermal stress varies linearly with the thermal expansion coefficient. The maximum thermal stress is concentrated at the lens' corners, whereas the maximum total deformation displacement is concentrated at its center. Therefore, when designing high-power LED lenses, a low-emissivity coating should be considered to reduce the lens' temperature while still satisfying the optical requirements. To reduce thermal stress and deformation, a material with a small thermal expansion coefficient should be used and the lens' corners should be avoided.

Key words optical devices; LED lens; thermal radiation; temperature distribution; thermal stress

OCIS codes 230.1150; 230.3670; 120.3620; 120.2810

1 引 言

随着节能减排环保理念的普及, LED 因其高效

节能、寿命长等特点在室内外照明、道路照明指示灯等领域展现出巨大潜力^[1-2]。尽管 LED 灯具的广泛使用会降低大量的能耗, 但在其工作过程中仍有约

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-06-11; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403200)

* E-mail: xuegonghu@iet.com

80%的输入功率将转化为热量并累积在 LED 器件中,如果热量不能及时有效地散出,将导致结温升高、光效降低和热应力集中等现象,进而造成器件变形,可靠性以及寿命下降等问题^[3-5]。因此,对大功率 LED 进行热管理尤为重要。

目前,对于 LED 灯具热管理的研究主要集中在 LED 光源芯片部位结温和热应力两部分^[6-10]。费翔等^[11]利用自行研制的结温测试系统对大功率 LED 的结温、热阻,以及发光特性进行了测量研究,结果表明结温对光辐射功率有直接影响。刘一兵等^[12]在分析功率 LED 受热效应影响的基础上,指出采用导热性能优良的封装材料是提高散热效率的重要途径。朱旭平等^[13]在未考虑热辐射及热对流影响的情况下,采用有限元软件得到了 1 W LED 瞬态温度场和应力场,并指出 LED 热应力的产生主要是由各层封装材料之间的热力学性能参数不同而引起的。陈焕庭等^[14]通过建立多芯片 LED 热学模型,研究分析了器件内部各层材料的温度特性和 LED 热阻内部芯片之间的热耦合效应。上述研究忽略了透镜空气腔内的热对流和热辐射的影响,而只考虑了透镜与基板之间的导热,造成研究结果与实际有差异。实际上,在 LED 工作过程中会有部分热量从透镜中散出,但透镜通常是由散热能力较差的塑料或者玻璃材料组成。功率越大,LED 整体温度越高,随着时间的推移,透镜中的热量不断积累,温度持续升高,当超过一定温度阈值时,透镜等相关组件就会发生热变形,进而影响 LED 的光分布,甚至造成透镜失效。因此,准确计算大功率 LED 工作过程中透镜的温度和热应力至关重要。

综上所述,本文以向下照射的 100 W LED 灯为研究对象,计算了透镜表面温度分布和热应力,并对透镜外表面特征点温度进行了实验验证。主要研究了透镜封闭腔内空气热对流及表面热辐射对透镜温度分布的影响,并分析了表面发射率对透镜温度的影响,热膨胀系数对透镜最大热应力及最大总变形位移的影响,本文研究旨在为大功率 LED 透镜设计及选材提供理论指导。

2 计算模型

2.1 物理模型

向下照射的 LED 灯的外观结构如图 1(a)所示,主要包括:1)直径 160 mm,高 90 mm 的太阳花铝散热器;2)与散热器相连的直径 160 mm,厚

5 mm 的散热基板;3)大小为 38 mm × 38 mm × 1.4 mm 的 COB (Chip On Board) 光源;4)直径 78 mm,光束角 120° 的高硼硅玻璃透镜。光源安装在透镜内部的散热基板中心,透镜与散热基板构成封闭空气腔,以下简称透镜封闭腔,光源与散热基板之间涂覆导热硅脂以减小界面热阻。图 1(b)为 LED 透镜内部结构模型。

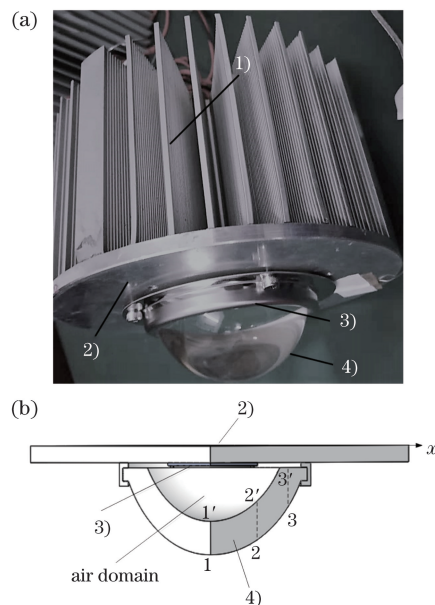


图 1 LED 灯的物理模型。(a)LED 灯的外观照片;
(b)透镜内部结构模型

Fig. 1 Physical model of LED. (a) Exterior photograph of LED; (b) interior structure model of lens

2.2 计算模型与控制方程

LED 光源的输入电功率为 100 W,环境温度为 20 °C,考虑到透镜封闭腔内空气的热对流及热辐射,空气的自然对流控制方程应满足质量守恒、动量守恒、能量守恒。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; u 、 v 、 ω 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u\omega)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v\omega)}{\partial z} = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\omega)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\omega}{\partial z^2}\right) + (\rho - \rho_0)g, \quad (4)$$

式中： μ 为动力黏度； p 为压力； ρ_0 为参考密度； g 为重力加速度。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \rho\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + \omega\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{\lambda}{c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \quad (5)$$

式中： T 为温度； λ 为导热系数； c_p 为恒压热容。

考虑到表面辐射的影响，将表面辐射换热量作为导热方程源项，加入到固体能量方程的源项中，随温度变化进行迭代求解。根据传热理论，具有内热源的大功率 LED 瞬态温度分布应满足

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \phi, \quad (6)$$

式中： c 为材料比热； λ 为导热系数； ϕ 为热源功率， $\phi = Q_{\text{is}} + Q_r$ ，其中 Q_{is} 为光源产热项， Q_r 为辐射换热源项。

稳态温度分布应满足

$$0 = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \phi. \quad (7)$$

透镜封闭腔内所有界面均为漫射表面，表面净辐射量等于投入到该表面的热量与自身发射热量之差，即

$$Q_r = \varepsilon A \left(\int_{\Omega=2\pi} I d\Omega - \sigma T^4 \right), \quad (8)$$

式中： ε 为表面发射率； A 为面积； Ω 为立体角； I 为辐射强度； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

根据弹塑性力学理论，大功率 LED 由于温度梯度产生的热应力为

$$S = E\alpha(T - T_0), \quad (9)$$

式中： E 为弹性模量； α 为热膨胀系数； T_0 为参考温度。

为了减少计算量，结合模型的对称性，取模型的 1/4 进行计算。将光源的产热功率 Q_{is} 作为面热源，其由光学实验测得，详见 3.1 节。将透镜与散热基板之间的胶圈以及光源与散热基板之间的导热硅脂视为热薄层结构。模型与外界空气接触的界面简化为自然对流边界，对流换热系数取 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。根据支撑结构的位置，应力场在散热基板上表面设置固定约束。计算中所用材料的参数如表 1 所示。

表 1 计算所用材料参数

Table 1 Material parameters used in calculation

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Capacity $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Young's modulus E / GPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion $/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$
High borosilicate glass	2203	1.38	703	73.1	0.17	3.3
Aluminium	2700	201	900	69	0.33	23.4
Gallium nitride	6150	130	483	210	0.17	7.75
Thermal grease	2810	2.5	705	/	/	/
Air	1205	0.026	1005	/	/	/

3 实验方案

3.1 光学实验

采用如图 2 所示的光学实验装置得到计算模型中所需的热功率 Q_{is} ：LED 灯置于积分球中，并由直流电源给 LED 供电，设定 LED 的电流 I 和电压 U ，确保 LED 工作过程中 I 和 U 没有明显漂移，相应的输入功率为 $P_e = I \cdot U$ 。由积分球测出 P_e 下的输出光功率 P_1 ，就可计算得出 LED 的热功率 Q_{is} ：

$$Q_{\text{is}} = P_e - P_1. \quad (10)$$

3.2 测温实验验证

由于热电偶的吸光转热效应特别明显^[15]，所以

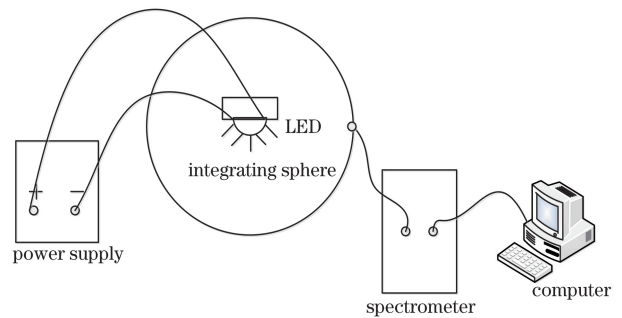


图 2 光学实验装置

Fig. 2 Optical experimental device

不能用于测量 LED 工作过程中透镜表面的温度。为保证测量结果的准确性，采用红外成像仪来进行

测量,并对比分析温度的计算值与透镜外表面点 1 和点 3 的测量值,如图 1(b)所示。

测温前,校准透镜表面发射率,研究温度范围内,透镜的发射率变化甚微,取平均值为 0.92。测温时,将直流稳流稳压电源的电流、电压分别设置为 1.9 A 和 52.7 V,相应输入功率为 100 W,启动 LED 后,间隔 10 min 测温一次,得到点 1 和点 3 处的温度随时间的变化情况。图 3 为温度的测量值与计算值随时间的变化趋势及 LED 启动 40 min 稳定后的红外测温图。由图 3(a)可知,计算值和测量值的相对误差保持在 8% 以内,验证了计算模型的准确性,表明该模型可以用来计算透镜温度分布。

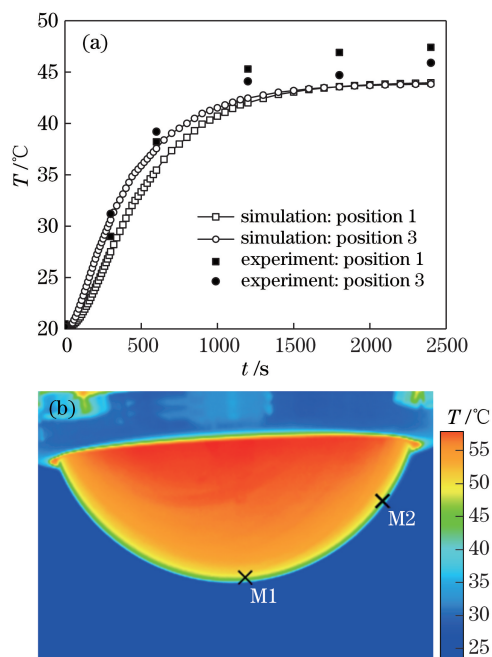


图 3 测量值与计算值对比(a)及红外测温图(b)

Fig. 3 Comparison between experimental and calculation results (a) and thermal infrared images (b)

4 结果与分析

4.1 透镜稳态温度分布

图 4(a)为 $y=0$ 截面透镜内表面温度随 x 变化曲线图,在单纯导热情况下,透镜内表面温度随 x 的增大而升高,中心温度明显低于边缘温度,其原因是温度较高的散热基板与透镜内表面边缘接触,如图 1(b)中 3' 附近。而在辐射和导热耦合,以及对流、辐射和导热耦合两种情况下,温度随 x 的增大先降低后升高,耦合热辐射后透镜中心温度从 42.1 $^\circ\text{C}$ 升高到了 45.3 $^\circ\text{C}$,热辐射对内表面中心温升的影响为 13.3%,边缘温度不受热辐射的影响。在耦合热对流后,整个透镜内表面温度仅变化了

0.1 $^\circ\text{C}$,是由于热源位于透镜封闭腔顶部,上部空气温度较高,下部温度较低。热空气较轻,向上攀升,冷空气较重,向下流动。随着时间的推移,在透镜上部会产生回流区,导致越来越多的热空气积聚在透镜顶部,造成内部空气的流动性变差,因此,对于透镜封闭腔内的换热,仅考虑热辐射和导热的影响即可。

透镜内表面的辐射换热间接影响着透镜外表面的温度。图 4(b)给出了 $y=0$ 截面透镜外表面温度随 x 变化曲线图,在单纯导热情况下,透镜外表面温度随 x 的增大而升高,中心温度明显低于边缘温度。而在辐射和导热耦合情况下,随 x 的增加温度变化不大,中心温度略高于边缘温度。由图 4 可知,在研究范围内的辐射与导热耦合情况下,透镜表面的温度分布更均匀。

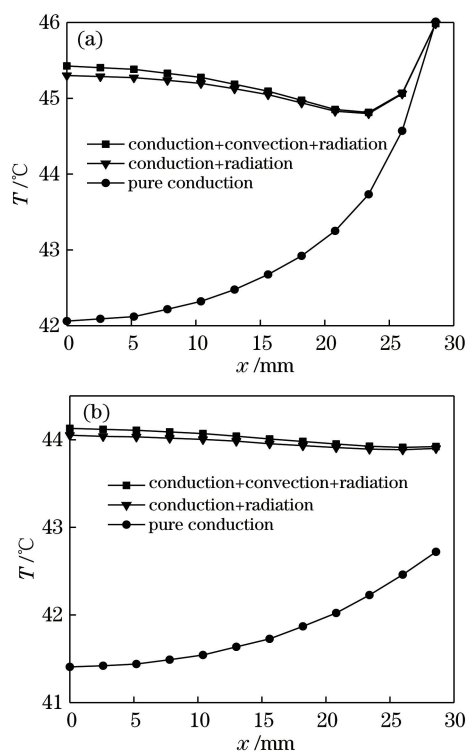


图 4 透镜表面温度随 x 变化曲线图。

(a)内表面;(b)外表面

Fig. 4 Variation of surface temperature of lens with x .

(a) Inner surface; (b) external surface

4.2 透镜瞬态温度分布

图 5(a)为透镜内表面 1'、2' 和 3' 位置的温度随时间变化曲线图。由图可知,LED 启动后透镜温度不断升高,约 1500 s 后趋于稳定。在初始阶段,辐射与导热耦合情况下的温升速度与纯导热情况下的温升速度基本相同。当时间到达 250 s 后,辐射与导热耦合情况下的温升速度明显高于纯导热情况下

的升温速度,其中在位置 1' 和 2' 处尤为明显。纯导热情况下,位置 3' 的温度始终高于位置 1' 和 2',而在辐射与导热耦合情况下,从时间达到 1500 s 起,位置 1' 和 2' 处温度达到并开始超过位置 3' 的温度。图 5(b) 透镜外表面 1、2、3 点的温度随时间的变化趋势与内表面一致。由图可知,随着 LED 启动时间的推移,光源及散热基板温度升高,透镜封闭腔内传热过程中热辐射的作用逐渐增大。

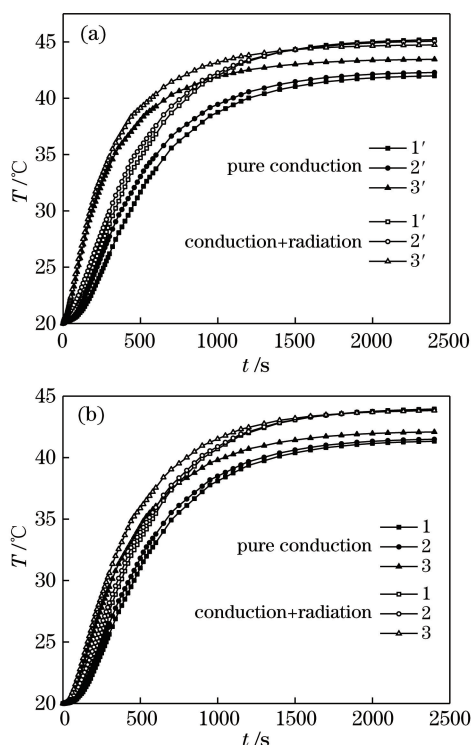


图 5 透镜表面温度与时间的关系曲线。
(a) 内表面; (b) 外表面

Fig. 5 Variation of surface temperature of lens with t .

(a) Inner surface; (b) external surface

4.3 发射率的影响

由图 6 可知,透镜内表面中心温度随表面发射率呈近似线性变化,发射率由 0 增到 1 时,光源温度升高了 3.9 °C, 占总温升的 15%。发射率由 0 增到 1 时,透镜温度升高了 3.5 °C, 占总温升的 13.7%。由于散热基板对透镜内表面中心微元面的角系数小,故而透镜内表面中心温度几乎不受散热基板发射率的影响。因此,在大功率 LED 设计过程中,在保证光学要求的前提下,可以采取对光源或透镜表面涂覆低发射率的涂层材料的方式来达到降低透镜温度的目的。

4.4 热应力分布

透镜最大热应力和变形总位移 d 随 x 的变化规律如图 7、8 所示,最大热应力集中在透镜内表面

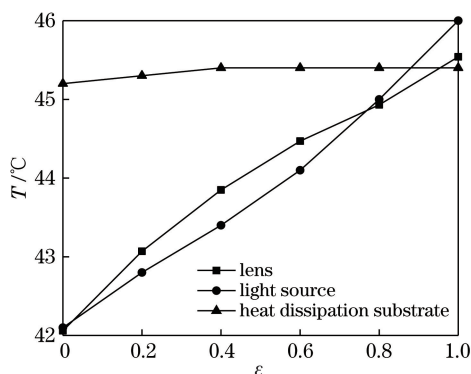


图 6 透镜内表面中心温度随发射率 ϵ 变化

Fig. 6 Variation of central temperature of lens inner surface with ϵ

边缘,即透镜与散热基板的界面附近,应力最大值为 8.9 MPa,究其原因内表面边缘温度分布不均匀,再加上散热基板的外在约束,各质点相互制约,使其不能完全自由伸缩而产生了较大的热应力。透镜的总位移随 x 的增大而减小,最大位移量为 0.01 mm,发生在透镜中心,其成因是固定约束设置在散热基板的的上表面,各结构变形量叠加积累,最终使最大位移传递到了透镜中心。

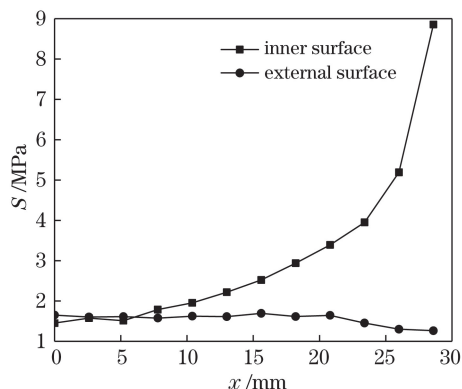


图 7 透镜热应力随 x 的变化情况

Fig. 7 Variation of thermal stress of lens with x

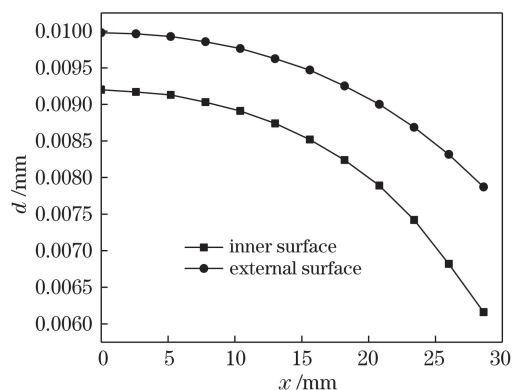


图 8 透镜总位移随 x 的变化情况

Fig. 8 Variation of total displacement of lens with x

透镜最大热应力和最大总位移随热膨胀系数的增加呈线性分布,如图 9 所示。本文使用的高硼硅玻璃的热膨胀系数仅为 $3.3 \times 10^{-6}/\text{K}$,其他常用的透镜材料如 PC 和 PMMA 的热膨胀系数则高达 $60 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,可以预知,采用 PC 或者 PMMA 等材料制作的透镜,热应力及最大总位移将远远大于高硼硅玻璃透镜。因此,设计透镜时,在满足光学需要的情况下,应尽量避免边角结构,使透镜温度分布均匀,以减少透镜局部热应力过大可能造成的影响。在 LED 功率较大,透镜温度较高时,应尽量采用热膨胀系数小的材料,如高硼硅玻璃,以减少热变形对光分布的影响。

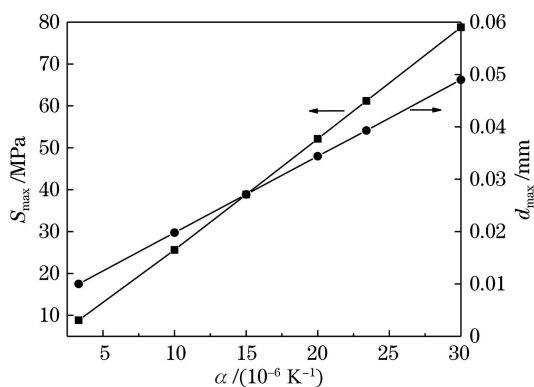


图 9 最大热应力和最大总位移随 α 的变化情况

Fig. 9 Variations of maximum thermal stress and maximum total displacement with α

5 结 论

对功率为 100 W 向下照射的 LED 透镜的稳态和瞬态温度分布及热应力进行了计算,并实测了特征点温度随时间的变化情况,与计算结果的对比分析显示计算值与测量值的相对误差在 8% 以内。研究分析了透镜封闭腔内热辐射和热对流对温度的影响,发射率对透镜温度的影响,以及热应力随透镜热膨胀系数的变化情况。

实验结果表明:透镜传热过程中导热方式始终起主要作用,随着 LED 启动时间的推移,LED 光源及散热基板的温度逐渐升高,热辐射的作用也逐渐增大,耦合热辐射后透镜中心温度从单纯导热情况下的 $42.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到了 $45.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,热辐射对内表面中心温升的影响为 13.3%。而热对流对透镜内表面温升的影响却不足 1%,可以忽略。为了准确计算 LED 工作过程中透镜表面温度,还需考虑热辐射与导热耦合作用。透镜中心温度随着光源和透镜表面发射率的增大近似呈线性升高,因此,在大功率

LED 透镜设计过程中,在满足光学要求的前提下,为降低透镜温度,可考虑涂覆低发射率的涂层材料。

最大热应力集中在温度梯度较大的部位,即透镜与散热基板接触面的边角附近,其应力最大值为 8.9 MPa,透镜的最大总位移量为 0.01 mm,发生在透镜中心。最大热应力和最大总位移随热膨胀系数的增加呈线性变化。为了避免透镜局部热应力过大及总变形位移过大对结构和光分布造成的影响,在保证光学及耐温特性的前提下,大功率 LED 透镜设计过程中应尽量减少边角结构,使透镜温度分布更加均匀,且应采用热膨胀系数较小的透镜材料。

参 考 文 献

- [1] Luo X B, Hu R, Liu S, *et al.* Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 56: 1-32.
- [2] Weng C J. Advanced thermal enhancement and management of LED packages[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(3): 245-248.
- [3] 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.
- [4] Chen H T, Tan S C, Hui S Y. Color variation reduction of GaN-based white light-emitting diodes via peak-wavelength stabilization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3709-3719.
- [5] Chen H, Zhou X L, Tang W, *et al.* Thermal design of high power remote phosphor white LED package[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(1): 97-102.
陈华, 周兴林, 汤文, 等. 大功率远程荧光粉型白光 LED 散热封装设计[J]. 发光学报, 2017, 38(1): 97-102.
- [6] Zou S P, Wu B X, Wan Z P, *et al.* Effect of current-temperature stress on the reliability of GaN LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(1): 124-129.
邹水平, 吴柏禧, 万珍平, 等. 电-热应力对 GaN 基白光 LED 可靠性的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(1): 124-129.
- [7] Li J S, Yang Q X, Niu P J, *et al.* Analysis of thermal field on integrated LED light source based on COMSOL multi-physics finite element simulation[J]. Physics Procedia, 2011, 22: 150-156.

- [8] Liou B H, Chen C M, Horng R H, *et al.* Improvement of thermal management of high-power GaN-based light-emitting diodes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(5): 861-865.
- [9] Juntunen E, Tapaninen O, Sitomaniemi A, *et al.* Effect of phosphor encapsulant on the thermal resistance of a high-power COB LED module [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(7): 1148-1154.
- [10] Maaspuro M, Tuominen A. Thermal analysis of LED spot lighting device operating in external natural or forced heat convection[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(3): 428-434.
- [11] Fei X, Qian K Y, Luo Y. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED[J]. *Journal of 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.
- [12] Liu Y B, Huang X M, Liu G H. Research of heat release technology of based on power-LED[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2008, 19(1): 69-73.
刘一兵, 黄新民, 刘国华. 基于功率型 LED 散热技术的研究[J]. *照明工程学报*, 2008, 19(1): 69-73.
- [13] Zhu X P, Yu G Y, Ding S S, *et al.* Transient temperature field and thermal stress of high power LED[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 132-137.
朱旭平, 余桂英, 丁纾姝, 等. 功率型 LED 瞬态温度场及热应力分布的研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(2): 132-137.
- [14] Chen H T, Chen F C, He Y, *et al.* Analysis of thermal characteristics of a multichip light-emitting diodes device[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 751-756.
陈焕庭, 陈福昌, 何洋, 等. 多芯片 LED 器件热学特性分析[J]. *发光学报*, 2018, 39(5): 751-756.
- [15] Chen Q, Ma Y P, Yu X J, *et al.* Phosphor temperature overestimation in high-power light-emitting diode by thermocouple [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(2): 463-466.