

大功率 LED 荧光粉硅胶点涂工艺的 三维格子 Boltzmann 模拟^{*}

李 岚, 郑 怀, 罗小兵

(华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为实现蓝光 LED(light emitting diode) 芯片向白光 LED 照明的转化, 大功率 LED 封装工艺流程中存在一个关键的环节——荧光粉涂覆, 即通过点涂方式将荧光粉硅胶涂覆于 LED 芯片周围. 荧光粉硅胶涂覆工艺是一个两相流动过程, 它直接决定了荧光粉硅胶层的几何形貌及物理特性, 并影响 LED 最终的光学和热学性能; 因此对其中流动过程物理机制的理解有利于提升荧光粉涂覆质量, 实现高性能 LED 产品. 基于格子 Boltzmann 方法, 建立荧光粉硅胶流动模型, 并应用该模型研究了在平坦表面和方形凸起结构两种封装形式上的荧光粉硅胶点涂成形流动过程. 结果表明: 格子 Boltzmann 方法能够准确地模拟荧光粉点涂流动过程; 在平坦表面上荧光粉硅胶液滴接触线与液滴直径之比 (dL/D) 和相对时间(t/T) 成幂函数关系.

关键词: 荧光粉硅胶点涂工艺; 流动模拟; 格子 Boltzmann 方法

中图分类号: O359⁺.1 文献标志码: A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.03.004

引 言

大功率发光二极管(LED) 具有电光转换效率高、使用寿命长、节能环保、体积小等优点, 若能取代传统照明方式, 将得到十分显著的节能效果. 随着相关技术的迅猛发展, LED 已经应用到日常生活的各个方面, 如景观照明、路灯、隧道灯、汽车照明、各种尺寸背光源(液晶电视、液晶显示器、手机屏) 等, 目前正在朝着室内照明等通用照明市场迈进^[1-4].

白光 LED 中最重要的一个工艺是荧光粉涂覆工艺, 其具体流程如图 1 所示. 荧光粉硅胶流体从点涂机器中流出, 在表面张力等作用下在芯片表面铺开, 经过固化过程, 最终形成荧光粉硅胶层. 从图 1 中可以看出, 涂覆成形过程本质上是一个两相流动和传热过程, 荧光粉层最终的几何形貌由这一过程决定, 而荧光粉层形貌又决定了 LED 的最终光学性能.

格子 Boltzmann 方法(LBM) 具有微观本质和介观的特点, 适合描述两相之间微观相互作用, 因此, LBM 广泛应用于两相流动的模拟中. Dupuis 等^[5] 利用三维 LBM 自由能模型模拟了液滴在各向同性和各向异性表面上的流动过程. Yan 等^[6] 提出了一种综合 Inamuro 等^[7] 和 Bri-

^{*} 收稿日期: 2013-10-23; 修订日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51376070); 教育部博士点基金(20100142110046)

作者简介: 李岚(1989—), 女, 山东人, 硕士生(E-mail: lilan321@hust.edu.cn);

罗小兵(1974—), 男, 武汉人, 教授, 博士, 博士生导师(通讯作者, E-mail: Luoxb@hust.edu.cn).

ant 等^[8]的方法,并利用此方法模拟了在大气液相密度比情况下,液滴在固体表面的流动过程.

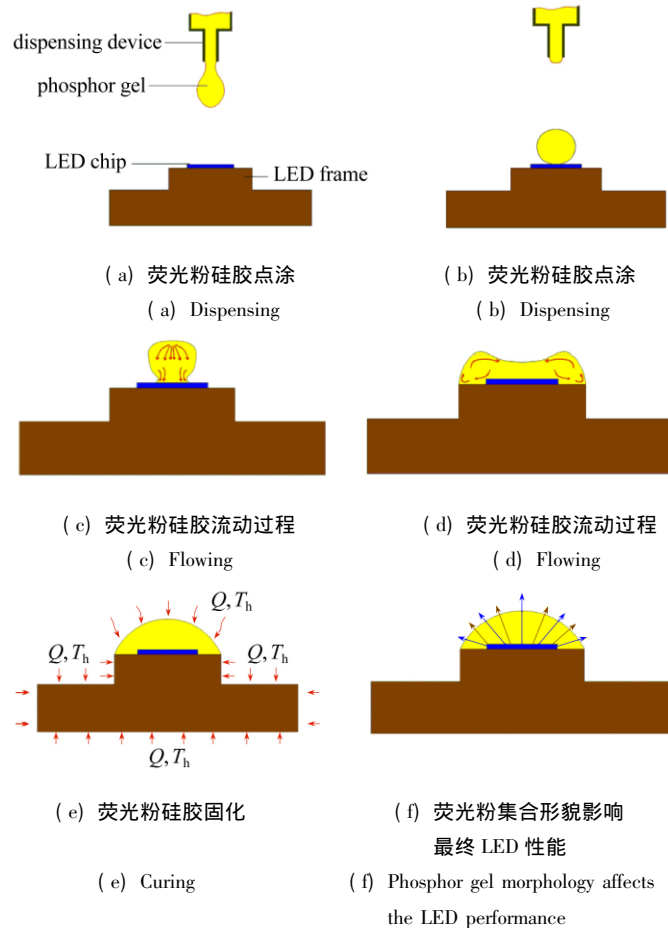


图 1 LED 荧光粉硅胶点涂和成形过程

Fig. 1 Schematic diagrams of phosphor gel dispensing & shaping process in LED

本文利用格子 Boltzmann 方法,建立荧光粉硅胶流动模型,对 LED 荧光粉硅胶点涂工艺进行三维模拟;模拟结果表明格子 Boltzmann 方法能够正确模拟荧光粉硅胶点涂这一流动过程,并能准确预测荧光粉硅胶点涂成形过程及最终形貌.

1 荧光粉硅胶点涂工艺 LBM 模型建立

1.1 格子 Boltzmann 方法

采用一种被广泛应用的 LBM 伪势模型(Shan-Chen 模型)^[9-11]对荧光粉硅胶点涂工艺进行模拟;该模型基于均场理论,利用伪势函数直接刻画粒子之间相互作用,从而导出非理想状态方程.

三维模拟中采用 D3Q19 模型,其离散速度矢量如图 2 所示,每一个格子点分为 19 个离散速度方向.

该模型的演化方程为

$$f_{ki}(x + e_i dt, t + dt) - f_{ki}(x, t) = -\frac{1}{\tau_k} [f_{ki}(x, t) - f_{ki}^{eq}(x, t)], \quad (1)$$

式中, k 表示不同组分, i 表示不同离散速度方向, τ_k 是第 k 类组分的松弛时间, $f_{ki}(x, t)$ 为第 k 类组分的密度分布函数, $f_{ki}^{\text{eq}}(x, t)$ 是第 k 类组分的平衡态分布函数, 其表达式为

$$f_{ki}^{\text{eq}} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{u^2}{2c_s^2} \right], \quad (2)$$

其中, ω_i 为权系数,

$$\omega_i = \begin{cases} 1/3, & i = 0, \\ 1/18, & i = 1, 2, \dots, 6, \\ 1/36, & i = 7, 8, \dots, 18. \end{cases}$$

流体的宏观密度和宏观速度为

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i^{\text{eq}}(x, t), \quad (3)$$

$$\rho(x, t) \mathbf{u}(x, t) = \sum_i f_i^{\text{eq}}(x, t) \mathbf{e}_i + \tau \mathbf{F}. \quad (4)$$

其中, \mathbf{F} 表示作用在流体上的全部外力之和, 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_\sigma + \mathbf{F}_l + \mathbf{F}_g, \quad (5)$$

其中, \mathbf{F}_σ 表示流体粒子之间的相互作用力, \mathbf{F}_l 表示流体与固体壁面之间的作用力, \mathbf{F}_g 表示重力。

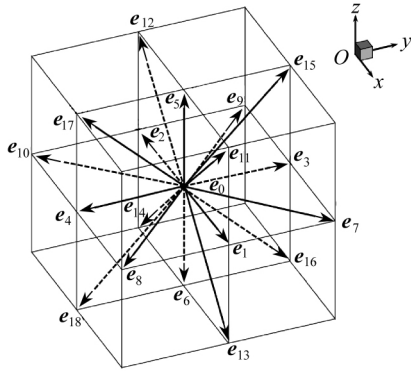


图2 D3Q19 模型离散速度矢量示意图

Fig. 2 Schematic of discrete velocity vectors in D3Q19 model

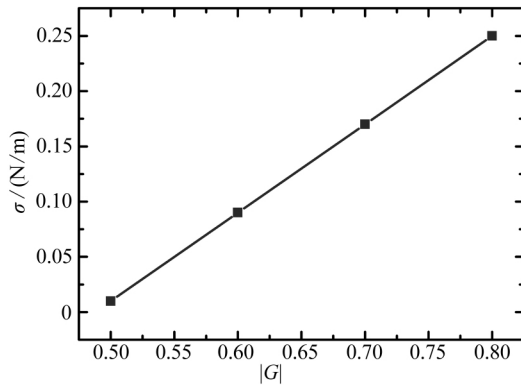


图3 表面张力系数 σ 与参数 G 的关系

Fig. 3 Relationship between surface tension coefficient σ and parameter G

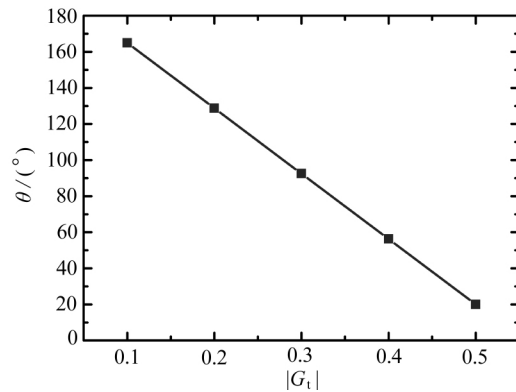


图4 接触角 θ 与参数 G_l 的关系

Fig. 4 Relationship between contact angle θ and parameter G_l

Shan-Chen 模型中假设流体粒子之间存在非局部的相互作用, 相应的势函数为

$$V(x, x') = G_{\sigma\sigma} \psi^\sigma(x) \psi^\sigma(x'). \quad (6)$$

根据相互作用势, 流体粒子之间的相互作用力可以表示为

$$\mathbf{F}_\sigma(x) = -\psi^\sigma(x) \sum G_{\sigma\sigma} \psi^\sigma(x + \mathbf{e}_i) \mathbf{e}_i, \quad (7)$$

其中, $\psi(x)$ 为有效密度函数, 取 $\psi(x) = 1 - e^{-\rho(x)}$; $G_{\sigma\sigma}$ 称为 Green 函数, 决定了组分之间相互作用的强度. 在 D3Q19 模型中, 其取值为

$$G(x, x') = \begin{cases} G, & |\mathbf{e}_i| = 1, \\ G/2, & |\mathbf{e}_i| = \sqrt{2}, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases}$$

G 是控制相互作用强度的参数,其正负决定了两者之间是相互吸引还是相互排斥,而数值大小则反映了表面张力系数的大小。 G 的值决定了流体的表面张力, G 与表面张力系数 σ 的关系如图 3 所示。

在 Shan-Chen 模型中,引入流体与固体节点之间的作用力:

$$F_i(x) = -\rho(x) \sum G_i s(x + e_i) e_i, \quad (8)$$

对于流体节点, $s = 0$; 对于固体节点 $s = 1$ 。

G_i 是控制流体与固体壁面之间相互作用强度的参数,其数值大小反映了接触角的大小,接触角 θ 越小,润湿性能越好,接触角 θ 越大,润湿性越差。 G_{ii} 与接触角 θ 的关系如图 4 所示。

流体同时还受到重力 F_g 的作用:

$$F_g(x) = g\rho(x), \quad (9)$$

式中, g 为重力常数。

1.2 物理模型的建立

分别模拟在平坦固体表面和方形凸起结构上对荧光粉硅胶点涂流动过程,其物理模型示意图如图 5 所示。

对于小尺寸实际情况的模拟,假设格子单位与实际单位的转化关系为 $1l_u = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。选取 $100l_u \times 100l_u \times 100l_u$ 立方体计算区域,荧光粉硅胶液滴直径 $D = 20l_u$,图 5(b) 中方形凸起边长为 $26l_u$,高度为 $5l_u$ 。空间水平方向采用周期性边界,荧光粉硅胶液滴与铜基板的碰撞处采用反弹格式处理。初始时刻,荧光粉硅胶液滴刚好与铜基板表面接触。荧光粉硅胶表面张力和其在铜基板上的接触角通过表面张力仪和接触角仪测试获得,分别为 0.027 N/m 和 20° ,另外,采用粘度计测量了 22.3°C 下硅胶粘度为 $4.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。将实验测得的参数与格子单位进行转换,计算参数为

$$\rho_G = 1.0, \rho_L = 1.0, G = 0.521, G_{iG} = -0.018, G_{iL} = -0.4997,$$

$$\tau_G = \tau_L = 1.0, g_G = -0.0003, g_L = -0.00252,$$

其中,下标 G 和 L 分别代表空气和荧光粉硅胶液体。



图 5 荧光粉硅胶点涂工艺物理模型

Fig. 5 Physical model of phosphor gel coating technology

2 结果及讨论

2.1 平坦表面上荧光粉硅胶点涂工艺

平坦表面的荧光粉点涂工艺在 LED 封装中最为常见,在表面张力作用下,荧光粉硅胶形貌会发生一系列地变化,如图 6 所示,其流动过程主要分为撞击、铺展和稳定成形 3 个阶段,图中 t 为时间步长。

荧光粉硅胶液滴从点涂机器中流出后,首先与铜基板发生碰撞,在惯性力和表面张力的作

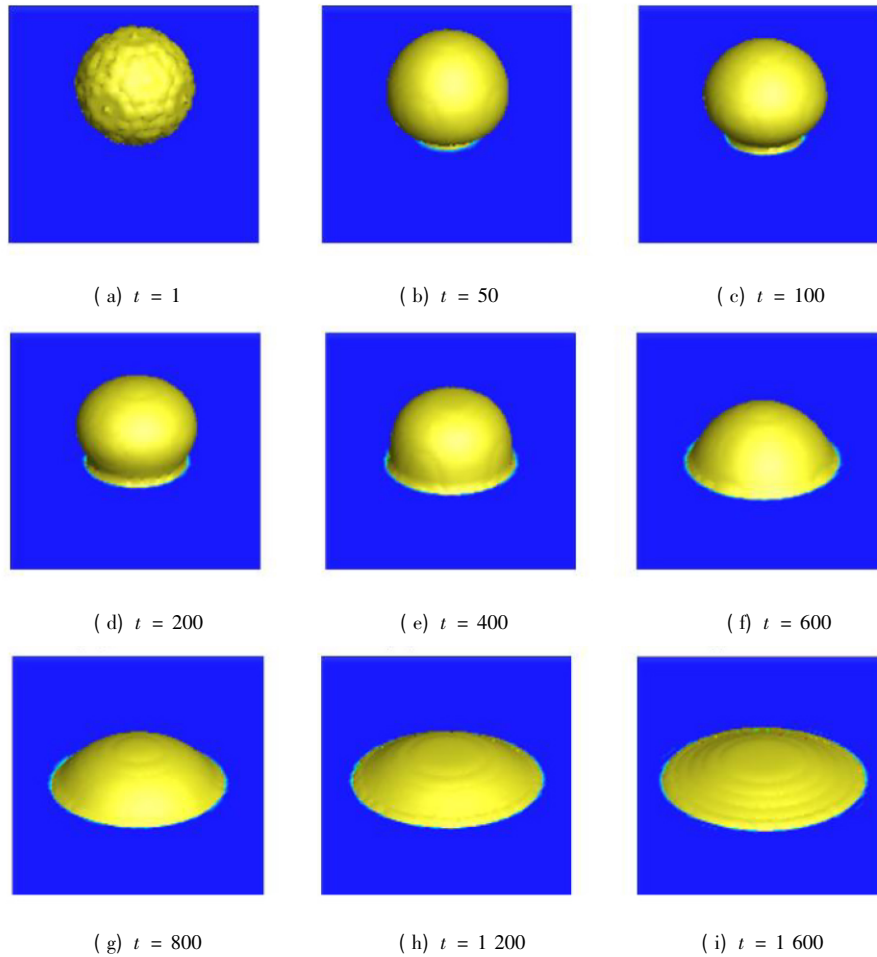


图 6 平坦表面上荧光粉硅胶点涂工艺过程中荧光粉硅胶形貌变化

Fig. 6 Phosphor gel morphology changed during the coating process on flat surface

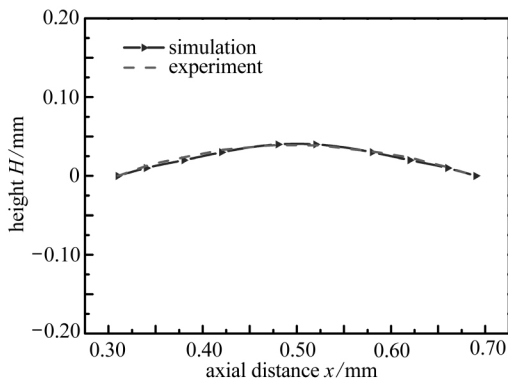


图 7 荧光粉硅胶形貌模拟与实验结果对比

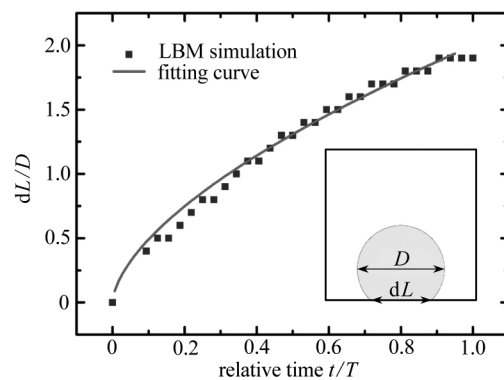
Fig. 7 Phosphor gel morphology comparison
between simulation and experiment

图 8 液滴接触线与直径之比随相对时间变化关系

Fig. 8 Change of droplet contact line length to
droplet diameter ratio with time

用下,其上部仍然保持球状,只有下部与铜基板接触,这一阶段发生在荧光粉硅胶与铜基板接触后很短的时间内,称为撞击阶段,如图 6(b)、(c)、(d) 所示;随着时间的推移,在最小表面自

由能的驱动下, 荧光粉硅胶流体在铜基板表面逐渐铺开, 与基板之间的接触面积不断增加, 这一过程为铺展阶段, 如图 6(e) (f) (g) 所示; 随后, 荧光粉硅胶的形貌变化逐渐停止, 最终在基板上形成一稳定的球帽状荧光粉硅胶层, 如图 6(h) (i) 所示, 其中图 6(i) 即为模拟得到的荧光粉硅胶的最终形貌. 根据计算结果绘制出荧光粉硅胶层的几何轮廓图如图 7 中三角点及其曲线所示, 与实验中利用高速摄像机测得荧光粉硅胶层几何形貌, 即图中虚线对比可知, 模拟结果与实验结果能够很好地吻合.

在荧光粉涂覆液滴铺展过程中, 荧光粉硅胶液滴与基板在中心轴线方向上的接触线随时间的变化规律如图 8 所示. 图中纵坐标表示液滴接触线与液滴直径的比值 (dL/D), 其中 dL 为液滴与基板接触线的长度, D 为初始时刻液滴的直径; 横坐标表示相对时间 (t/T), 其中 t 为时间, T 为铺展过程总时间; 液滴接触线与液滴直径之比 (dL/D) 与相对时间 (t/T) 的函数关系符合: $(dL/D) \sim (t/T)^{0.6}$.

2.2 方形凸起结构上荧光粉硅胶点涂工艺

在 LED 封装中常常利用凸起结构边缘滞止效应, 来对荧光粉胶的形貌进行控制. 阶段边缘滞止效应表现为液体流动到凸起结构边缘时将被限制在边缘处而不再向外铺展.

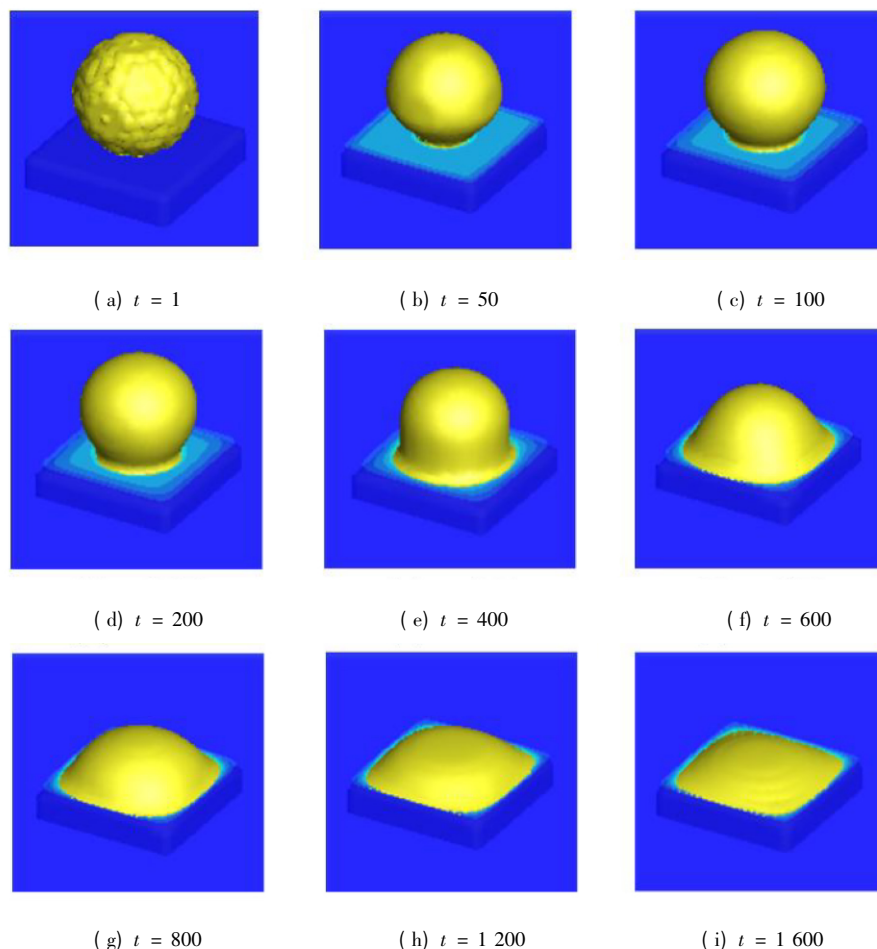


图 9 方形凸起结构荧光粉硅胶点涂工艺过程中荧光粉硅胶形貌变化

Fig. 9 Phosphor gel morphology changed during the coating process on square projection

图 9 为荧光粉硅胶在方形凸起结构上点涂过程中不同时刻的形貌图; 在开始阶段荧光粉

硅胶的形貌与图 6 平板上液滴的形貌相同,图 9(b) (c) (d) 为荧光粉硅胶液滴的撞击阶段;随着时间推移,液滴进入铺展阶段,如图 9(e) 所示,当液滴接触线到达边缘时荧光粉硅胶将被限制在阶梯边缘之内,如图 9(f) 所示;液滴未到达边缘的对角线方向将进一步铺展,如图 9(g) (h) 所示. 最终,荧光粉硅胶的形貌将不再变化,液滴被限制在方形凸起结构之上,如图 9(i) 所示.

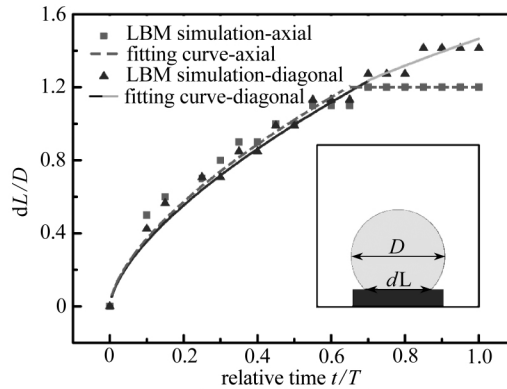


图 10 液滴接触线与直径之比在水平轴线及对角线方向随相对时间变化关系

Fig. 10 Variation of droplet contact line length to droplet diameter ratio in axial and diagonal directions with the relative time

由图 9 可知,在凸起结构上荧光粉硅胶流动过程可以分两个阶段:第一阶段荧光粉硅胶向各个方向均匀铺展,第二阶段,荧光粉硅胶接触线到达边缘后开始滞止,这种趋势从水平轴线上过渡到对角线上.图 10 表示水平轴线方向和对角线方向接触线随着时间的变化关系.水平轴线方向在液滴未到达边缘时,液滴接触线与液滴直径之比 (dL/D) 与相对时间(t/T) 的变化规律与其平板点涂过程相一致,即: $(dL/D) \sim (t/T)^{0.6}$;而对角线方向上,荧光粉硅胶未铺展到任何边缘时,其变化规律和水平轴线方向上一致,当接触线在水平轴线方向上接触边缘后,其关系符合 $(dL/D) \sim (t/T)^{0.48}$.

3 结 论

本文建立了荧光粉硅胶流动格子 Boltzmann 模型,并应用该模型对荧光粉硅胶点涂工艺进行了模拟;研究了在平坦表面和方形凸起结构两种封装形式上荧光粉硅胶点涂成形流动过程.分析表明,采用格子 Boltzmann 方法能够正确地模拟荧光粉硅胶点涂这一流动过程;在平坦表面上荧光粉硅胶液滴接触线与液滴直径之比 (dL/D) 与相对时间(t/T) 成指数关系,即: $(dL/D) \sim (t/T)^{0.6}$;当液滴被阶梯边缘限制时,在水平轴线方向液滴接触线不再随时间变化,而在对角线方向两者的关系为: $(dL/D) \sim (t/T)^{0.48}$.

参考文献(References):

- [1] LIU Sheng, LUO Xiao-bing. *LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing* [M]. USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Zukauskas A, Shur M S, Caska R. *Introduction to Solid-State Lighting* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2002.
- [3] Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, Nakamura S. Prospects for LED lighting [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 180-182.

- [4] HU Run , YU Shan , ZOU Yong , ZHENG Hai , WANG Fei , LIU Sheng , LUO Xiao-bing. Near-/mid-field effect of color mixing for single phosphor-converted light-emitting diode package [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* , 2013 , **25**(3) : 246-249.
- [5] Dupuis A , Yeomans J M . Lattice Boltzmann modeling of droplets on chemically heterogeneous surfaces [J]. *Future Generation Computer Systems* , 2004 , **20**(6) : 993-1001.
- [6] Yan Y Y , Zu Y Q . A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows on partial wetting surface with large density ratio [J]. *Journal of Computational Physics* , 2007 , **227**(1) : 763-775.
- [7] Inamuro T , Ogata T , Tajima S , Konishi N . A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences [J]. *Journal of Computational Physics* , 2004 , **198**(2) : 628-644.
- [8] Briant A J , Papatzacos P , Yeomans J M . Lattice Boltzmann simulations of contact line motion in a liquid-gas system [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London , Series A* , 2002 , **360**(1792) : 485-495.
- [9] SHAN Xiao-wen , CHEN Hu-dong. Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components [J]. *Physical Review E* , 1993 , **47**(3) : 1815-1819.
- [10] Shan X , Doolen G . Multi-component lattice-Boltzmann model with interparticle interaction [J]. *Journal of Statistical Physics* , 1995 , **81**(1) : 379-393.
- [11] SHEN Sheng-qiang , BI Fei-fei , GUO Ya-li. Simulation of droplets impact on curved surfaces with lattice Boltzmann method [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 2012 , **55**(23/24) : 6938-6943.

3-Dimensional Lattice Boltzmann Simulation of Phosphor Jel Dispensing Process in Light Emitting Diodes

LI Lan , ZHENG Huai , LUO Xiao-bing

(School of Energy and Power Engineering , Huazhong University of Science and Technology ,
Wuhan 430074 , P. R. China)

Abstract: To get white light emission , it's common to use a blue LED (light emitting diode) chip to be coated with yellow emitting phosphor jel via a dispensing process. The phosphor jel dispensing process is of two-phase flow , which decides the morphology and properties of the phosphor gel , thus strongly influences both optical and thermal performances of the resulting LEDs. It is important to describe the dispensing process accurately and improve the coating quality. Based on the lattice Boltzmann method (LBM) , a flow model of phosphor gel was established to simulate the dispensing process. The dispensing and shaping processes of phosphor gel on flat surface and square projection were analyzed respectively. Results show that LBM simulates the dispensing process of phosphor gel accurately and predicts the morphology well. The droplet contact line length changes as a power function of the droplet diameter on flat surface. The simulation results provide a theoretical basis for the optimization of the phosphor gel dispensing process.

Key words: phosphor dispensing process; flowing simulation; lattice Boltzmann method

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51376070)