

文章编号: 0253-2239(2008)12-2388-06

微细光束固化的蒙特卡罗建模

王 翔 裴香涛 邵 鹏 黄文浩

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘要 光固化是光束与光敏树脂之间的光化学反应,其作用过程对光固化加工分辨率有着直接影响。基于光子输运理论,利用蒙特卡罗方法追踪光子在树脂中的运动轨迹,对曝光光束入射、传输过程进行抽样,建立了微细光束固化模型;利用遗传算法并结合光固化实验重构获得了树脂材料的光学参数;利用该固化模型,模拟计算了微细会聚紫外光束($\lambda=365\text{ nm}$)单点曝光固化过程和固化单元点的形状和大小,分析了不同曝光量对固化结果的影响规律,计算结果与实验结果一致。研究表明,该模型可以有效地对微细光束与光敏树脂作用的复杂过程进行仿真,并能对不同入射光和曝光工艺条件下的固化物进行模拟计算,为微细光固化机理的研究和工艺优化提供了基础。

关键词 微细加工; 光固化; 蒙特卡罗法; 遗传算法; 光子输运

中图分类号 TN23; O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2388

Monte Carlo Simulation Model of Micro Light Beam Solidification

Wang Xiang Pei Xiangtao Shao Peng Huang Wenhao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Light solidification is a photochemical reaction between the light beam and photosensitive resin, and has a direction relation with light solidification micro-machining resolution. First of all, the movement trajectory of photon in the resin was traced by Monte Carlo simulation. By sampling the exposure photon in the incident and transmission processes, micro light beam solidification model was constructed based on photon transportation theory. Secondly, optical parameters of the resin were reconstructed by combining the genetic algorithm and the curing results of experiment. Finally, the simulated calculation of single-point curing process ($\lambda=365\text{ nm}$), shape and size of solidified points was carried out, and the as-obtained curing rule was analyzed in different exposure energy. The simulation results agree well with the experimental results under same exposure parameters. Thus the model can effectively simulate the complicated process of the reaction between the micro beam light and the resin, predict the curing result with different curing conditions and provide a foundation for studying micro solidification mechanisms, and optimizing the technique.

Key words micro-machining; light solidification; Monte Carlo method; genetic algorithm; photon transportation

1 引 言

光成型(Stereo lithography)技术是一种利用紫外激光对液态光敏树脂的选择性曝光固化原理来加工零件的叠层制造技术,已在微细加工领域得到应用,并成为可进行任意三维微结构加工的微细光成型(Micro stereo lithography, MSL)技术。

对于微细光成型技术来说,应尽可能减小曝光

光束(光斑)的尺寸,使其达到微米级,并具有足够的曝光能量使得液态光敏树脂产生光固化反应,进而实现逐层扫描固化成型。因此,如何进一步提高固化单元点的加工分辨率是其关键技术之一。由光固化理论可知,其实质是曝光光束在液态光敏树脂中的能量传输和沉积过程,即曝光光束中的光子在液态光敏树脂中的被吸收或散射传输。当树脂吸收能

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-05-13

基金项目: 国家 863 计划(2006AA04Z311)资助课题。

作者简介: 王 翔(1964—),男,博士,副教授,主要从事光成型技术、微细加工技术等方面的研究。

E-mail: wxyf@ustc.edu.cn

量达到其临界相变值时将产生固化反应,故树脂内部沉积能量的大小和密度分布是影响加工分辨率的关键因素。这种通过能束曝光实现的光固化作用,可以看作是曝光光束中的光子与树脂体系中无规则分布的吸收粒子和散射粒子之间的相互作用,故可借鉴中子传输理论^[1]来研究光固化的作用过程。目前,国内外的许多学者在生物组织光学领域研究中已广泛应用蒙特卡罗方法^[2~4];在微细制造领域,中科院微电子所,山东大学及美国 UCLA 大学等学者分别利用蒙特卡罗方法对电子束曝光^[5,6]和掺杂陶瓷粉末的固化工艺优化^[7]等进行了研究。

本文利用蒙特卡罗方法对微细光束在光敏树脂中的复杂传输进行模拟,并在此基础上通过调整曝光参数,研究不同曝光条件对树脂中沉积能密度分布的影响,获得曝光沉积能的分布规律,旨在为提高微细光固化的加工分辨率提供一定的理论基础。

2 微细光束曝光的蒙特卡罗模拟

在紫外光固化技术中,曝光光束的光子在树脂中传输遵循 Beer-Lambert 法则作随机运动,直至耗尽能量或逸出树脂表面。虽然光子在树脂中的传输过程非常复杂,难以获得较好的解析解,但可以利用蒙特卡罗方法模拟光子在树脂中被吸收或散射的随机运动,进而通过随机数抽样和统计来获得光子的传输过程。

采用蒙特卡罗方法建立微细光束固化模型,首先作以下假设:1) 不考虑光子波动性和衍射偏振等影响;2) 液态光敏树脂看作是内部随机分布着球状粒子(吸收粒子和散射粒子)的液体;3) 由于作用光子数量巨大,为了便于追踪和统计计算,利用简单的方差减小技术,将大量的光子等效地看成是一个个“光子包”(Photon pack)。在确定光子作用模型后,便可以根据对光子包追踪的三步流程:入射,传输和统计来构建蒙特卡罗随机抽样模型。

2.1 光子包入射抽样

光子包入射到树脂的初始状态直接取决于曝光光束的分布形式,其状态可以由光子包的能量权值、空间位置和运动方向三个参数来表示。

经透镜会聚并将焦平面设置在树脂表面的曝光光束,其初始空间位置为树脂液面上圆形光斑区域,如图 1 所示。设以树脂液面为 XOY 平面建立直角坐标系,树脂液面与光轴的交点为坐标原点,以曝光光束前进方向为 Z 轴正向。从透镜通光口径 2R 内任一点 P 发出的光子包聚焦于光斑直径 2r_{min} 内任

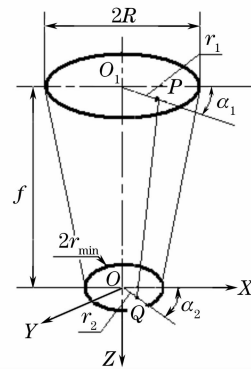


图 1 会聚光束光子包入射抽样

Fig. 1 Incident sampling of photon packets

一点 Q。

假设曝光物镜与树脂之间的光能传输无任何损失,可将 P 点的光子包能量初始权值取为 1,则 Q 点的初始取值也为 1。

光强为高斯分布的曝光光束,在光子包能量权值设定为 1 的基础上,可以通过将 P 点空间位置的抽样来实现,即 P 点的位置采用高斯分布抽样。设 P 点与 X 轴的夹角 $\alpha_1 \in [0, 2\pi]$,与光斑中心 O₁ 的距离 $r_1 \in [0, R]$,则位置可表示为

$$P_x = r_1 \cos \alpha_1, \quad P_y = r_1 \sin \alpha_1, \quad P_z = -f, \quad (1)$$

式中

$$\alpha_1 = 2\pi\xi_1, \quad r_1 = R \sqrt{-\ln \xi_2/2},$$

ξ_1, ξ_2 皆为 $[0, 1]$ 上的均匀分布。

由于树脂液面曝光光斑半径 r_{min} 远小于透镜通光口径 R,故 Q 点的位置可采用圆内均匀分布抽样,即表示为

$$Q_x = r_2 \cos \alpha_2, \quad Q_y = r_2 \sin \alpha_2, \quad Q_z = 0, \quad (2)$$

式中

$$\alpha_2 = 2\pi\zeta_1, \quad r_2 = r_{\min} \sqrt{\zeta_2},$$

ζ_1, ζ_2 皆为 $[0, 1]$ 上的均匀分布。

从 P 点发出经树脂液面 Q 点的入射光子包的运动方向,可用其与 X, Y, Z 三轴的方向余弦来表示:

$$\begin{cases} U_x = \frac{r_1 \cos \alpha_1 - r_2 \cos \alpha_2}{\sqrt{f^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}}, \\ U_y = \frac{r_1 \sin \alpha_1 - r_2 \sin \alpha_2}{\sqrt{f^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}}, \\ U_z = \frac{f}{\sqrt{f^2 + r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}}. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 光子传输抽样

光子包在树脂内部的传输是一系列被树脂粒子吸收和散射的过程。其中吸收过程可以通过光子包的传输步长和能量剩余权值来表征;散射过程则需

抽样光子包散射后的传输方向。

由于紫外光光固化作用时,光子包在树脂中能量的衰减规律满足 Beer-Lambert 法则的指数关系,则光子传输步长 s 可以由光子的平均自由程的累积概率分布抽样获得,即

$$s = -\frac{1}{\mu_t} \ln \xi, \quad (4)$$

式中 ξ 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数, μ_t 为总衰减系数。

光子包与树脂粒子碰撞时,由于吸收引起能量损失。传输过程中,光子包每移动一个步长,表征光子包能量的权值 W 将减小 ΔW , 剩余能量权值 W' 为

$$W' = \frac{\mu_s}{\mu_t} W, \quad (5)$$

式中 $\mu_t = \mu_a + \mu_s$, μ_a 为吸收系数,表示树脂中单位长度上一个光子被吸收的几率; μ_s 为散射系数,表示树脂中单位长度上一个光子被散射的几率。

光子包经过若干次吸收和散射后,当其权值小于某预先设定的阈值 W_0 时,可视该光子包的生存概率非常小,其对材料内部能量沉积贡献可以忽略不计;或当光子包逸出树脂液面(如图 1 所示, $Z < 0$),则终止该光子包追踪模拟过程。如果光子包没有被吸收且没有逃逸出边界,材料体系中的散射粒子将改变其传输方向,使其在体系中作随机运动。新的传输方向由光子包与散射粒子作用前的运动状态和新的散射角 θ 以及方位角 φ 决定。

为了便于描述光子包随机散射作用过程,在固定坐标系 XYZ 的基础上,建立一个与散射点相联系的正交活动坐标系^[8],如图 2 所示。假设光子从任一点 P 散射到 Q 点, PQ 即为步长 s 。以 Q 点为散射坐标系的原点, Z_1 轴取在 PQ 连线上,且与其

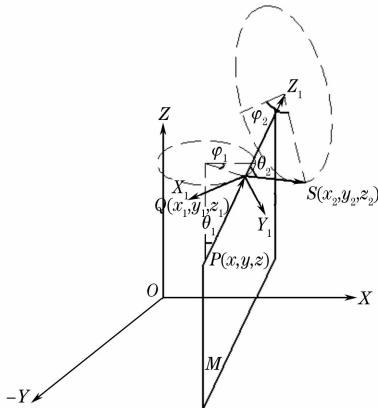


图 2 模拟光子传输的坐标系

Fig. 2 Coordinate system in the simulation of photon transportation

方向一致, X_1 轴取在散射锥体底面圆 Q 点的切线上,且沿方位角 φ_1 增大方向, φ_1 角为 PQ 在锥体底面投影与原 X 轴的夹角, Y_1 轴则位于包含 Z_1 轴且垂直于原坐标系 XY 面的平面 M 内。 Z_1 轴与 Z 轴之间的夹角 θ_1 即为散射角。对于下一次碰撞,再以 S 点为原点建立新的散射坐标系, Z_2 轴在 QS 方向上,由此便完成了光子包从一个散射点到另一个散射点的运动模拟。

设光子包散射前 P 点的方向余弦为 (U_x, U_y, U_z) , 则光子包散射后 Q 点的方向余弦 (U'_x, U'_y, U'_z) 可表示为^[9]

$$\begin{cases} U'_x = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-U_z^2}}(U_x U_z \cos \varphi - U_y \sin \varphi) + U_x \cos \theta, \\ U'_y = \frac{\sin \theta}{\sqrt{1-U_z^2}}(U_y U_z \cos \varphi + U_x \sin \varphi) + U_y \cos \theta, \\ U'_z = -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1-U_z^2} + U_z \cos \theta, \end{cases} \quad (6)$$

式中方位角 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 符合均匀分布; 散射角余弦值 $\cos \theta$ 的概率分布则由 Henyey-Greestein 相函数^[10] 决定,可表示为散射方向因子 g 的函数,其中散射方向因子 $g \in [0, 1]$ 为散射角余弦值 $\cos \theta$ 的平均值,以表征材料对光子的散射性质。

$$\cos \theta = \frac{(1+g^2) - (1-g^2)^2(1-g+2g\xi)^{-2}}{2g}, \quad (7)$$

式中 ξ 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。

则由散射前 $P(x, y, z)$ 点坐标、散射方向余弦和运动步长可得到散射后 $Q(x_1, y_1, z_1)$ 点的坐标,如(6)式。依次类推,完成对光子包传输过程的追踪:

$$\begin{cases} x_1 = x + U'_x s, \\ y_1 = y + U'_y s, \\ z_1 = z + U'_z s. \end{cases} \quad (8)$$

2.3 光子轨迹统计

统计全部光子的活动区域,是将以树脂液面为界的半无限平面空间划分为一系列空间单元网格,累计每个单元格中吸收的光子权值,得到光子在树脂中传输的沉积能分布。当单元格实际的吸收能量大于等于树脂的临界固化能量 E_c 时发生固化,统计所有可固化的单元格就可得到固化单元点的形状和大小。

3 遗传算法进行光学参数重构

追踪光子的作用区域和能量沉积状态,需要确定光子在材料体系中的总衰减系数,吸收系数或散

射系数以及散射的方向,再根据树脂体系对特定光子(波长)吸收产生固化反应的临界固化能量值的大小,就可实现对光子能量沉积的光固化建模计算。

利用自行研制的紫外光源(峰值波长 365 nm),通过多组正交实验测得^[11]实验用树脂材料(SCR300)的总衰减系数 μ_t 为 1.96 /mm;临界固化能量 E_c 为 0.29 mW/mm²。而由蒙特卡罗传输过程建模计算的(5)式和(7)式可知,还需确定树脂材料的散射系数 μ_s 和散射方向因子 g 。

3.1 光学参数重构

遗传算法模拟了自然选择和遗传中发生的复制、交叉和变异等现象,从任一初始种群出发,通过随机选择、交叉和变异操作,产生一群更适应环境的个体,使群体进化到搜索空间中越来越好的区域。这样一代一代地不断繁衍进化,最后收敛到一群最适应环境的个体,求得问题的最优解^[12,13]。其流程如图 3 所示,计算步骤为:

1) 确定需要重构的散射系数 μ_s 和方向因子 g 的取值范围,并将参数的取值范围采用二进制编码,映射到算法空间。

2) 随机产生 N 个初始串结构数据,每个串结构数据称为一个个体, N 个个体构成一个群体。遗传算法以这 N 个串结构作为初始点开始迭代。

3) 对于一个群体中的 N 个个体,分别进行蒙特卡罗模拟计算,得到固化单元点尺寸。

4) 调用评价函数即将模拟所得的固化单元点尺寸与实验值比较,计算该个体的适应度值,计算出每个个体被选择的概率,根据此概率进行选择,交叉和变异三个遗传操作产生新一代群体。

5) 重复3)~4)步,直到种群代数超出预先设定的繁衍代数或指定的结束条件(如适应度最高的几个个体适应度趋于相同),进行解码得到优化的参数。

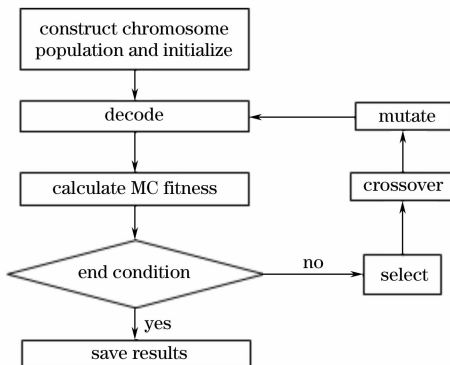


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

3.2 μ_s 和 g 两参数的联合重构

利用遗传算法来同时重构散射方向因子 g 和散射系数 μ_s 时,由于程序中 g 的取值范围为 $[0,1]$,故用 6 位码表示;对于散射系数 $\mu_s \in [0,1.96]$,取用 8 位码来表示。蒙特卡罗模拟的计算量 $N=5 \times 10^5$,取种群数为 40,遗传代数为 20 代,目标函数优化结果随遗传代数的变化见图 4,优化结果值趋于稳定。由于蒙特卡罗算法的统计涨落给遗传算法带来一定程度的不稳定性,图中局部存在有小的波动。经过优化的参数结果为散射系数 μ_s 为 0.29 /mm,各向异性因子 g 为 0.9094。

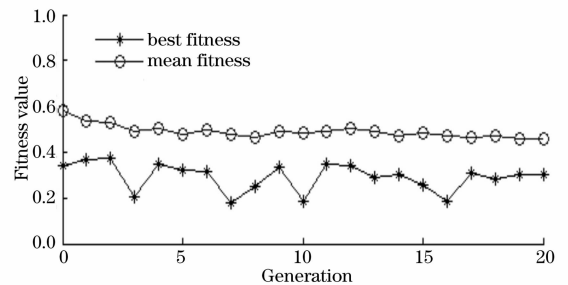


图 4 目标函数结果与遗传代数的关系

Fig. 4 Relation between fitness function value and number of generation

4 模拟结果和讨论

4.1 微细曝光的实验条件

实验采用高压汞灯自研制的紫外光光源。曝光显微物镜为 UV 级荧光物镜(25 \times ; NA=0.65;工作距 WL=0.6),实验原理简图如图 5 所示。为了能够实现树脂的自由深度固化,在树脂容器上方放置一块盖玻片,厚度为 0.15~0.17 mm(由于厚度很薄,经实验测定可忽略其对出射光的吸收),将液态树脂液面设置在物镜的焦平面上,通过实验测量得到其实际工作距 WL=750 μ m(物镜端面至其焦面的距离),聚焦所得光斑直径 $2r_{min}=9.5 \mu$ m。

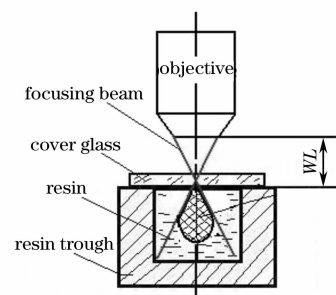


图 5 实验装置简图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

4.2 模拟和实验结果比较

为了尽可能减小蒙特卡罗算法所带来的统计涨落,追踪光子数目应取足够多。模拟中追踪 $N = 2 \times 10^6$ 个光子包,并设定统计模型单元网格为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。

在平均曝光功率 P 取为 $0.1 \mu\text{W}$,逐步增大曝光时间 T ,模拟所得的固化沉积能分布如图 6(a)所示;相同实验参数下如图 6(b),自左至右分别是曝光固化为 1 s、2 s、5 s 和 10 s 时所得的固化单元点照片。图 6(c)为曝光时间为 1 s 时固化单元点的扫描电镜(SEM)照片。实验测得固化单元高度和最小直径分别为 $36 \mu\text{m}$ 和 $9.4 \mu\text{m}$,而图 6(a)中对应的计算高度为 $42 \mu\text{m}$,最小直径为 $10.5 \mu\text{m}$ 。由于树脂材料基本特性的影响,其固化后有一定体积收缩,以及实验过程中曝光光源功率的波动,使得实验值均略小于模拟值。

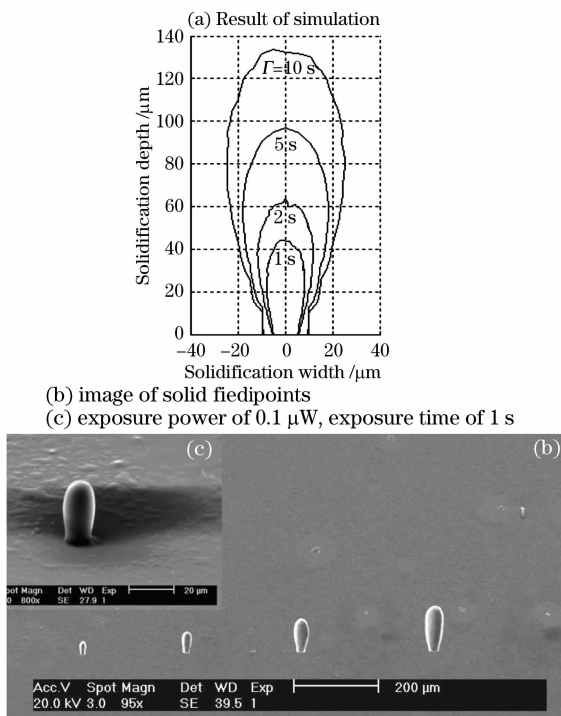


图 6 仿真和实验结果

Fig. 6 Results of simulation and experiment

不同曝光量(不同时间)的理论模拟曲线与实验结果比较如图 7 所示。计算结果和实验具有很好的一致性,固化单元高度和最小固化直径(焦平面)均随着曝光量的增加而增大;但最小固化直径的增大较小。另外,由固化单元的高度随曝光量变化的进一步实验可知,当曝光量持续增大(如增大曝光时间)时,如图 8 所示。固化单元高度将满足光固化的 Beer-Lambert 法则呈指数变化关系而趋于平稳。

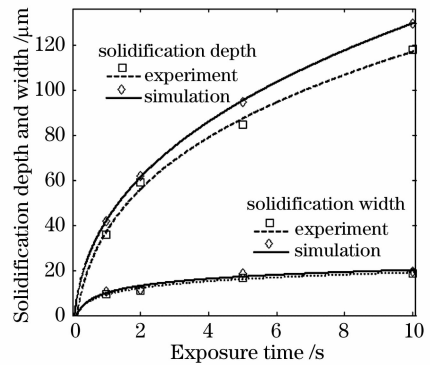


图 7 实验和模拟结果比较

Fig. 7 Numerical and experimental results comparison

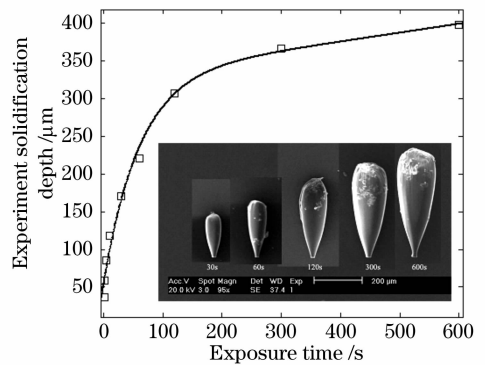


图 8 固化点高度与曝光时间的关系

Fig. 8 Experimental solidification depth versus exposure time

对于如图 5 所示将树脂液面设置为会聚曝光光束焦平面的光固化过程,光束(光子)将在树脂内部按照一定的发散角入射传输(锥度角的大小取决于曝光用显微物镜的数值孔径)。对于光强分布为高斯分布的曝光光束来说,在不同深度上光子沉积区域将由光强分布和 Beer-Lambert 法则共同决定。当沉积能量大于等于光敏树脂临界固化能量时,则该区域将实现固化。因此,固化单元的形变取决于曝光光束的光强分布,最小固化直径主要由聚焦光斑大小决定,固化单元高度则不仅取决于曝光量(曝光功率和曝光时间)的大小,还与曝光物镜的参数有关。

4.3 曝光参数对加工分辨率的影响

在物镜数值孔径和实际工作距确定的情况下,改变光束在树脂液面的曝光功率或曝光时间,均会影响单元点的分辨率。当曝光功率 P 从 $0.05 \mu\text{W}$ 依次增大到 $0.5 \mu\text{W}$,单元点高度和直径与曝光功率的关系,如图 9 所示。当曝光量达到临界值后,固化点的深度和直径随曝光量的增大而增大,增大速度趋于平缓,且深度方向随曝光量增大的速度相对较快。从图 9 还可以看到,当曝光功率相同时,曝光时

间增长,相应的固化点尺寸也较大。

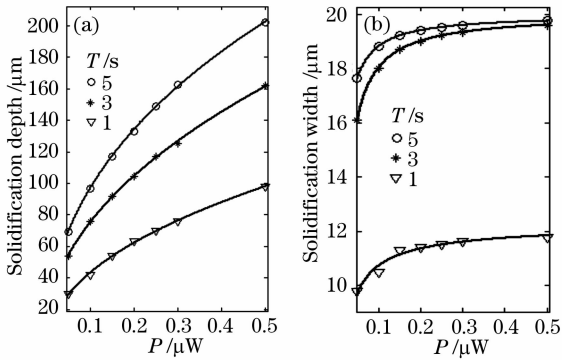


图 9 不同曝光时间固化点尺寸与曝光功率的关系

Fig. 9 Size of solidified cell as a function of exposure power, in different exposure time

5 结 论

在对光固化机理分析的基础上,基于蒙特卡罗方法,建立了微细光束固化仿真模型,详细介绍了模型中各参量的确定及算法实现。结合遗传算法,联合重构得到树脂材料的散射系数 μ_s 为 $0.29/\text{mm}$ 和散射方向因子 g 为 0.9094 。利用该模型模拟了固化单元点的深度和最小直径随曝光量的变化规律,并进行了固化实验研究。对比分析表明,该模型与实验结果有着很好的一致性。由于本文给出的光固化蒙特卡罗计算模型,基于变量的随机分布抽样,因此可以对不同入射条件下的光子输运过程进行仿真,具有很好的移植性和普适性,从而为有效地利用曝光能量,优化曝光系统提供设计依据并为光固化机理的研究提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 Pei Lucheng, Zhang Xiaozhe. *Monte Carlo Method and Applications in the Particle Transmission* [M]. Beijing: Science Press, 1980. 182~190
- 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 182~190
- 2 Zhu Dan, Wu Guiling, Luo Qingming *et al.*. Photonics diffusion for small source-detector separations of tissue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 638~642

- 朱 方, 吴龟灵, 骆清铭等. 生物组织中光子微区扩散理论研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 638~642
- 3 Ju Shan, Deng Yong, Luo Qingming *et al.*. Monte Carlo simulation of polarization gating for superficial tissue detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1465~1469
- 鞠 珊, 邓 勇, 骆清铭等. 浅表组织后向散射检测中偏振门的蒙特卡罗研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1465~1469
- 4 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Incoherent radiation of amplifying Random media[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 364~369
- 叶云霞, 范滇元. 增益随机散射介质中的非相干辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 364~369
- 5 Ren Liming, Chen Baoqin, Tan Zhenyu. Studies of energy dissipation distribution in low-energy electron beam lithography by Monte Carlo method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(3): 512~518
- 任黎明, 陈宝钦, 谭震宇. Monte Carlo 方法研究低能电子束曝光沉积能分布规律[J]. *物理学报*, 2002, **51**(3): 512~518
- 6 Song Huiying, Zhang Yulin, Wei Qiang *et al.*. Monte Carlo simulation of high-energy electron beam exposure in resist [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(12): 1219~1224
- 宋会英, 张玉林, 魏 强等. 高能电子束对抗蚀剂曝光的 Monte Carlo 模拟[J]. *高能物理与核物理*, 2005, **29**(12): 1219~1224
- 7 Sun C, Zhang X. Experimental and numerical investigations on microstereolithography of ceramics[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(8): 4796~4802
- 8 Sun Wei, Ying Jinpin, Li Jiang *et al.*. Monte Carlo method study of light propagation in tissues [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 97~101
- 孙 威, 应金品, 李 江等. 用蒙特卡罗方法研究生物组织中的光分布[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 97~101
- 9 Wang L H, Jacques S L. MCML-Monte Carlo modeling of photon transport in multi-layered tissues[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**(2): 131~146
- 10 S. L. Jacques, C. A. Alter, S. A. PrahI. Angular dependence of He-Ne laser light scattering by human dermis[J]. *Lasers Life Sci.*, 1987, **1**(2): 309~333
- 11 Ma Desheng, Wang Xiang, Wu Changchang *et al.*. Theoretical analysis and experimental research of solidification shapes for stereo photo lithography [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(18): 1650~1653
- 马德盛, 王 翔, 邬昶畅等. 光成形的光固化理论分析与实验研究[J]. *中国机械工程*, 2004, **15**(18): 1650~1653
- 12 Zhang Hang, Sailing He, Chen Xiaohu *et al.*. Application of genetic algorithm in inverse problem of photon propagation in scatter media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1026~1034
- 张 航, Sailing He, 陈小虎等. 遗传算法在散射介质光输运逆问题研究中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1026~1034
- 13 Mu Kejun, Zhou Xiaojun, Ren Guorong *et al.*. Reconstruction of parameters of fiber gratings from time-delay characteristics using the genetic algorithm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 688~693
- 穆柯军, 周晓军, 任国荣等. 用遗传算法从时延特性重构光纤光栅参数[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 688~693