

文章编号 1004-924X(2007)04-0453-07

微细光成型固化工艺参数优化

王翔,赵钢,马德盛,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:为了分析紫外光对液态光敏树脂进行曝光固化成型过程中工艺参数对固化物的形状和精度的影响,根据自行研制的实验系统的大量数据,对线形固化中的主要工艺参数进行了分析和优化。结果表明,在单层液态树脂膜厚 $30\ \mu\text{m}$,曝光光束功率 $0.15\ \mu\text{W}$,扫描速度 $15\ \mu\text{m/s}$ 以及工作距 $650\ \mu\text{m}$ 时能够得到具有较高精度线宽和线高的固化直线段,利用优化的工艺参数,成功实现了三维微小实体结构的成型制造。

关键词:微细加工;微细光成型;光固化;工艺优化

中图分类号:TN305.7 文献标识码:A

Optimization of solidification process parameters in micro stereo lithography

WANG Xiang, ZHAO Gang, MA De-sheng, HUANG Wen-hao

(*Department of Precision Machinery & Precision Instrument, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: For analysis on the effect of process parameters on the shape and precision of solidification in photosensitive resin solidification with UV light exposing, the main solidification process parameters are analyzed and optimized based on the experiment data got by self-made equipment. The high precision solidified line is obtained in the thickness of a single layer of liquid resin of $30\ \mu\text{m}$, the exposing power of $0.15\ \mu\text{W}$, the scanning speed of $15\ \mu\text{m/s}$ and the working length between objective lens and surface of resin of $650\ \mu\text{m}$. With the optimized process parameters, 3D micro structures are manufactured successfully.

Key words: micro fabrication; micro stereo lithography; light solidification; process optimization

1 引言

微细光成型(MSL; Micro Stereo Lithography)技术是一种利用紫外激光对液态光敏树脂进行曝光,使其发生固化反应,最终形成所需三维实体模型的先进制造技术^[1]。其基本原理是通过

选择性扫描固化获得二维平面实体,再通过高度方向的逐层叠加得到所需的立体结构。因此,扫描曝光成型的工艺参数选择是获得良好固化物的关键之一。本文通过分析激光功率、扫描速度和固化层厚度等参数对基本线形的固化影响,来优化相关参数,为三维微小结构的固化成型建立基础。

收稿日期:2006-06-23;修订日期:2006-08-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50275140, No. 50335050);安徽省自然科学基金(No. 050440102)

2 液态树脂层厚度的固化实验与分析

微细光成型法通过对液态光敏树脂进行逐层曝光固化,形成需要的形状,再将各固化层依次叠加形成所需的三维结构,如图 1 所示^[2]。

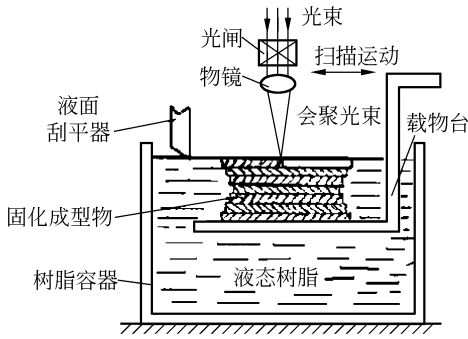


图 1 微细光成型法原理图

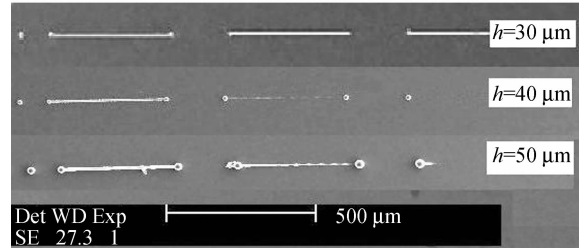
Fig. 1 Principal schema of micro stereo lithography

通常曝光光束在液态树脂深度方向的光强变化满足 Beer-Lambert 法则呈指数递减^[3],即液态树脂的固化深度(或固化物的高度)不仅与液态树脂材料的固化性质有关,还与曝光光束功率和扫描速度等曝光量有关,因此,每层液态树脂膜厚度(h)的大小对固化反应和固化线形都有直接影响,同时还会影响相邻两层之间的固化连接关系。

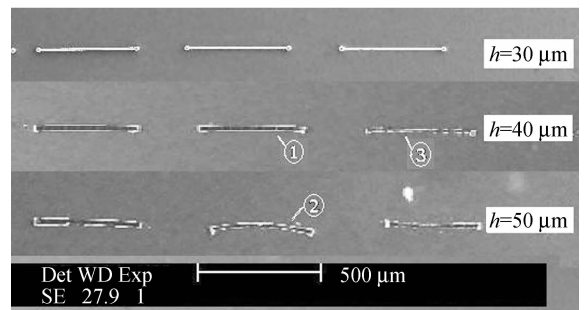
不同的紫外光固化树脂和曝光量,可以实现的固化深度不同。为了解液态树脂在曝光时可能发生固化反应的最小液态膜厚度和最大厚度,本文根据自制的实验装置和紫外光光源进行曝光固化。主要实验条件为:作为曝光光刻头的物镜的焦平面与树脂液面重合,扫描速度 $15 \mu\text{m/s}$,曝光光束功率为 $0.15 \mu\text{W}$ (为了能有效考察固化情况而取较大曝光量,故扫描速度和光源功率选取自制实验系统的极限值)。实验中的液态膜厚度每 $5 \mu\text{m}$ 为一个实验间隔,取值范围为 $5 \sim 70 \mu\text{m}$ 。

根据对实验固化结果的分析可知:当液态膜厚小于 $15 \mu\text{m}$ 时,即使增大曝光时间也难以使树脂发生固化反应;当膜厚小于 $30 \mu\text{m}$ 时,固化效率也较低;膜厚 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 时,有很好固化线段,且与载物台面粘结良好;而膜厚 $\geq 50 \mu\text{m}$ 的固化线宽增大,并有线段歪斜、位移等现象,通过 SEM 照片进一步观察,表明固化线段仅在两端点与载物台粘结,其它部分因有不完全固化,清(冲)洗时

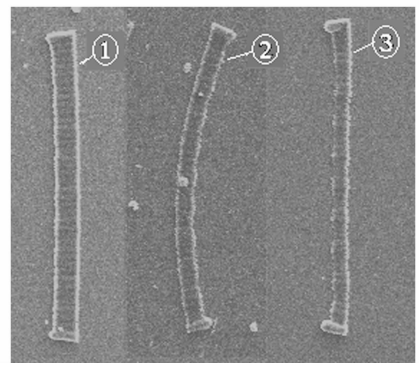
发生移动。可参见图 2(b)、(c)和图 5(e)所示的 SEM 照片。



(a) $P = 0.1 \mu\text{W}$



(b) $P = 0.15 \mu\text{W}$



(c) 图 b 部分固化线形放大图

(c) Magnified photos of some line shapes in Fig. (b)

图 2 不同曝光量的固化线形的 SEM 图片

Fig. 2 SEM photos of solidified line shapes with different exposure powers

根据紫外光固化理论,实验中液态膜厚度较小时,不能发生固化反应的现象是由紫外光固化树脂的光固化性质决定的,实验用“丙烯酸酯类”树脂属于“自由基光固化体系”,在光固化时,液面暴露在空气中,氧气对固化反应有“阻聚作用”^[4]。对于一定的树脂,其中的“光引发剂”和“光敏剂”成分一定,当膜厚较小时,光固化时必须形成大量

的自由基来克服氧气的不良影响,从而影响固化过程而不能发生固化反应;而液态膜厚度较大时,由于曝光量不足出现不完全固化。因此,针对本文研制实验系统,树脂液态膜厚的最佳值范围为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$ 。

3 曝光量对固化线形的影响分析

对于扫描曝光固化的微细光成型技术,曝光量对固化物的影响最为直接,反映曝光量大小的工艺参数主要有曝光光束功率和扫描速度两项。因此,本节结合上文液态膜厚度实验结果和实验系统的具体条件^[5],分别选取不同参数进行交叉实验,来分析曝光量的影响。主要实验条件分别有:物镜的焦平面与树脂液面重合;树脂液态膜厚分别取 $30, 40, 50\ \mu\text{m}$;曝光光束功率取 $0.1, 0.15\ \mu\text{W}$ (由于光源的调节能力有限,仅选取两个参数);扫描速度 $15, 20, 30, 40, 50\ \mu\text{m}/\text{s}$ (从制造的角度,扫描速度越大越好,故选取多个实验量)。

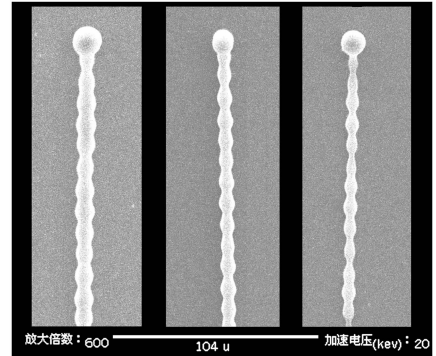
经大量实验,固化线形部分结果的 SEM 照片如图 2 所示。图 2(a)和(b)分别是曝光光束功率为 $0.1, 0.15\ \mu\text{W}$ 时,不同液态膜厚的固化线形,图中扫描速度自左至右分别为 $15, 20, 30\ \mu\text{m}/\text{s}$ (速度为 $40\ \mu\text{m}/\text{s}; 50\ \mu\text{m}/\text{s}$ 的固化线形由于较差或存在不连续固化线段而未予示出)。

由图 2(a)可知:在较低的光功率下曝光,扫描速度大,曝光量小,固化程度减小,甚至是不固化;液态树脂膜厚较大时,在临近载物台面处有未完全固化,在固化后的清洗时脱落而仅留下端点(线段两端点处曝光时间较长)。

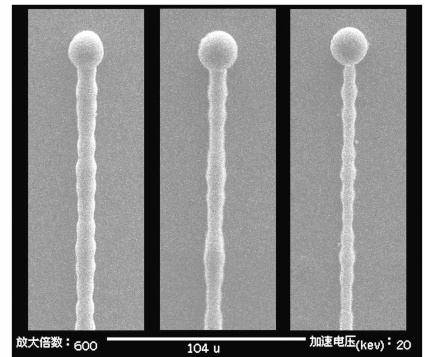
图 2(b)显示在曝光光束功率较高时,较快的扫描速度也有固化,同时,可以实现固化的深度(所得固化线形的高度)也较大,如图中在液态膜厚 $40\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 时也能得到固化线形;但是,其线段宽度有所增大,并发生歪斜、位移,且随着扫描速度的增大而越为显著。进一步分析可知,由于曝光量相对减少,线形在载物台面附近有不完全固化,清洗(显影)时倒下(因有端点固化存在而未被动掉),如图(c)所示,其中标记为①、②、③分别是图(b)中对应固化线段的放大的 SEM 照片。

同时由图 2 可知,液态树脂膜厚 $30\ \mu\text{m}$ 时的固化线形均较好,为了进一步了解固化线的精度,分别对它们进行分析,图 3 所示为不同光功率下

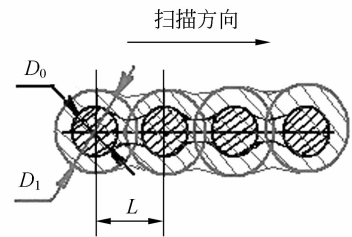
的放大线形。其中图 3(a)和(b)分别是 $0.1, 0.15\ \mu\text{W}$ 时的固化线形,且自左至右扫描速度分别是 $15, 20, 30\ \mu\text{m}/\text{s}$ 。由图可知,使用不同的曝光量(不同的曝光功率或扫描速度),都能得到较稳定的线形;但同时固化线段都存在有较均匀的“串珠状”,且不论是不同曝光功率的固化线段比较,还是同一功率下不同扫描速度之间的比较,均表现为曝光量越小,“串珠状”越显著。



(a) $P_1 = 0.1\ \mu\text{W}$



(b) $P_2 = 0.15\ \mu\text{W}$



(c) 固化重合度分析原理图

(c) Principle schema of solidification superposition analysis

图 3 不同曝光量固化线形的比较

Fig. 3 Comparison of solidified line shapes with different exposure powers

经进一步测量和分析,其串珠间距大致均为 $10\sim 11\ \mu\text{m}$ 。其量值与数控扫描系统硬件的脉冲当量($10\ \mu\text{m}$)对应(而应用系统分辨率是通过 10 倍细分后得到脉冲当量为 $1.0\ \mu\text{m}$)。即可以确认“串珠”是扫描运动爬行造成的,在停滞阶段曝光量增大,固化线宽增大,在快速跳跃阶段曝光量降低使固化线宽变小,随着扫描速度的增大,曝光量的影响越明显。进一步说明如图 3(c)所示,固化单元的直径随着曝光时间增大而增大,如图中的“ D_0 ”增大为“ D_1 ”。在扫描曝光时,由于爬行停滞使得固化线宽进一步增加的同时,在扫描方向上的“固化单元”的“重合度”也进一步增大,则固化线形的“串珠状”现象将显著减小。

4 光刻头工作距的影响分析

由上节的固化实验结果和分析可知,对于本研究的实验系统来说,由于光源功率有限,由滚动元件构成的扫描运动在微动、低速时的爬行对固化线段存在一定的影响,如何提高扫描固化线形的精度是实现三维微结构固化成型的关键。

根据对紫外光固化原理和逐点固化实验所得固化单元的分析^[6],会聚光束焦面和液态树脂液面之间的位置关系对固化物的形状和大小也有影响。为此,为了能方便地讨论和实验,预先定义:作为光刻头的物镜的底面至树脂液面的距离为光刻头工作距 WL (Working Length)。再通过对不同工作距下固化物的分析,来探索光刻头工作距对固化线形精度的影响。

一般地,工作距(WL)与液面之间关系有如图 4 所示的几种情形。

图 4(a)为工作距 $WL > f$ (即焦面在液面上方)时不同膜厚(h)的固化单元分析图。对于一定的曝光量,不同膜厚下,固化单元形状为液面处较大,与载物台面的连接(固化粘接)很小,且当膜厚较大时,固化单元与载物台面甚至是不能粘接,在曝光固化后的清洗将无法获得固化线段,故而不能应用。

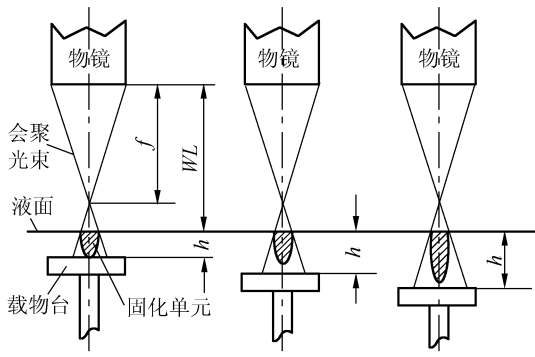
图 4(b)是工作距 $WL = f$ (即焦面与液面重合)时,液态膜厚自左至右由小到大排列的三种情

形。当膜厚较小时,固化单元为“正圆台形”,但存在上节的“串珠状”不均匀线形;当膜厚增大,就有可能出现固化单元与载物台粘接不可靠和不连接的可能。因此,该扫描曝光方法也是不可靠的。

图 4(c)为工作距 $WL < f$ (即焦面位于液面下方)时的固化分析图。自左至右,当膜厚较小时(左图),位于载物台面处的光斑较小,光强较大而易固化粘接,在液面处光斑大而使固化单元呈“上大下小倒圆台形”;当膜厚较大时(中间图),载物台面上的光斑较左图情形小,光强较大也能固化粘接,而在液面处的光斑较大,不能完全固化,使得实际固化单元的高度小于液态膜厚,不利于三维的成型;如膜厚进一步增大,将得到图示(右图)“瓶形”的固化单元,其原因是曝光时载物台面处光强较大而固化,在液面附近,由于光强分布是在中心最大,当达到树脂的临界固化能量就会固化反应。因此,如选取适当的工作距 WL 和液态树脂膜厚,该扫描曝光方案有望得到较好的固化线形。

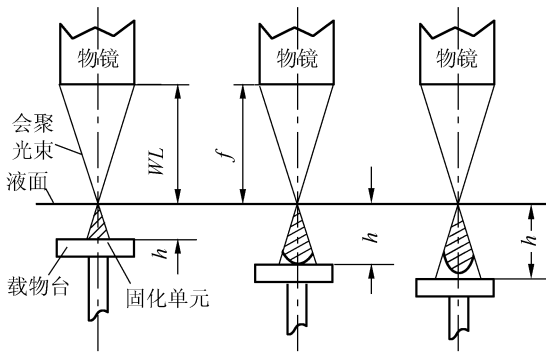
为此,对焦面与树脂液面不同位置(焦面在液面下 $0\sim 150\ \mu\text{m}$ 范围)的固化实验表明,当工作距为 $650\ \mu\text{m}$ 左右时有较稳定和均匀固化线形。图 5 是曝光光束功率 $0.15\ \mu\text{W}$,不同膜厚和扫描速度的固化线段的 SEM 图片。图(a)、(b)是膜厚 $30\ \mu\text{m}$,扫描速度 $15\ \mu\text{m/s}$ 和 $20\ \mu\text{m/s}$ 的固化线形的局部图。图(c)、(d)是膜厚 $40\ \mu\text{m}$,扫描速度 $15\ \mu\text{m/s}$ 和 $20\ \mu\text{m/s}$ 的固化线形的局部图。图(e)是膜厚为 $50\ \mu\text{m}$,扫描速度 $30\ \mu\text{m/s}$ 的固化线形。

由图可知,线段端点(实验时故意增大曝光时间)的固化形状(图 5(a))呈现“蘑菇形”,且液态膜厚较大时($h = 40\ \mu\text{m}$,图 5(c))其尺寸较小;对线形来说,则不再是“蘑菇形”,而为较均匀的固化线形(与载物台面连接处较大,上部较小,其原因是越靠近液面光斑直径越大,由于光强分布的存在,光轴附近能得到较好的固化),其结果与图 4(c)左、中两种情形的分析完全吻合。而图 5(e)固化线段的端点为典型的“瓶状”,也与图 4(c)右图分析一致;同时可以看出,其固化线形在载物台面附近有明显的不完全固化,在清洗时倒下(因有端点固化存在而未被冲掉),也与前文的不同膜厚



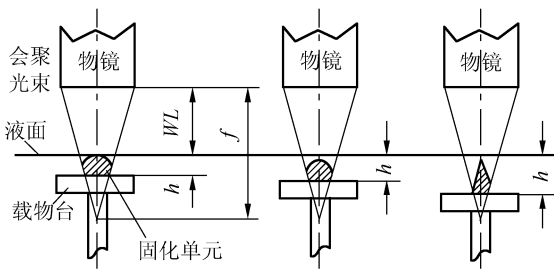
(a) 焦面在液面上方的固化分析

(a) Solidification analysis of focus above liquid surface



(b) 焦面与液面重合时的固化分析

(b) Solidification analysis of focus on liquid surface



(c) 焦面位于液面内部的固化分析

(c) Solidification analysis of focus below liquid surface

图 4 焦面与液面以及载物台位置的关系分析

Fig. 4 Relationship of focus plane, resin surface and stage position

固化分析和曝光量固化分析相同,即在膜厚较大和曝光量不足时,固化线段存在不完全固化以及与载物台面无法实现固化粘结的特点。

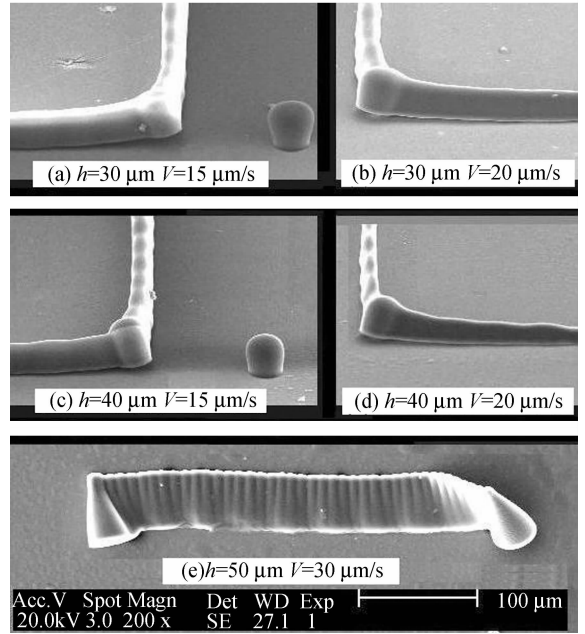


图 5 工作距 $WL = 650 \mu\text{m}$, $P = 0.15 \mu\text{W}$ 时固化线形的 SEM 照片

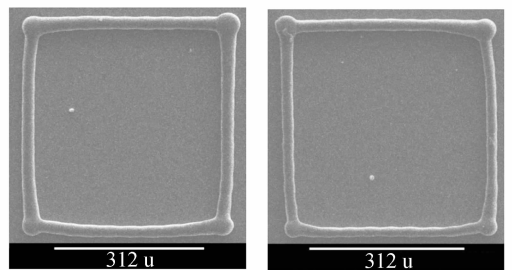
Fig. 5 SEM photos of solidified line shapes ($WL = 650 \mu\text{m}$, $P = 0.15 \mu\text{W}$)

5 线型精度分析及三维模型固化

5.1 直线线型固化实验与分析

根据上节分析和实验结果,当焦面在树脂液面以下,能稳定地得到线宽和线高都较均匀的固化线段。为了进一步了解固化线形线宽和线高及精度,下面以直线段为例来进行固化实验分析。

直线条段固化实验条件是:光刻头的工作距 $650 \mu\text{m}$, 液态膜厚 $30 \mu\text{m}$ 。曝光光束功率 $0.15 \mu\text{W}$, 扫描速度分别为 $15, 20 \mu\text{m/s}$; 同时,为了提高测量数据的有效性和便于了解连续扫描曝光对线形的影响,实验扫描图形选取为四边形



(a) $V = 15 \mu\text{m/s}$ (b) $V = 20 \mu\text{m/s}$

图 6 直线段固化的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photos of line-shaped solidification

(为了提高线形与载物台的粘结,在四个顶点处仍适当延长曝光时间),不同扫描速度的实验固化样品的 SEM 图片分别如图 6 所示,线宽和线高及其精度如表 1 所示。

表 1 固化直线段的宽度 B 和高度 H

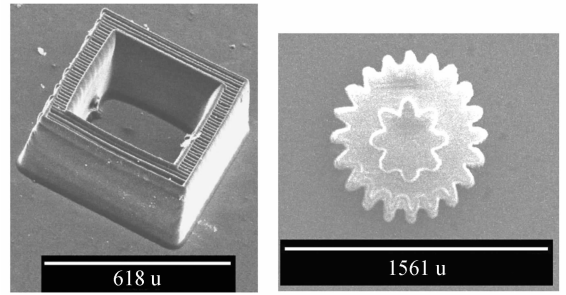
Tab. 1 Width (B) and height (H) of solidified line

膜厚度 h (μm)	扫描速 度 V ($\mu\text{m/s}$)	B (μm)		H (μm)	
		均值	平均 误差	均值	平均 误差
30.0	15.0	24.0	2.0	25.8	0.4
	20.0	19.0	1.9	24.9	0.6

由表 1 可知,液态膜厚为 $30\ \mu\text{m}$,扫描速度在 $15\ \mu\text{m/s}$ 和 $20\ \mu\text{m/s}$ 时均有较好的固化精度;实际在大量实验中,由于光源出射功率的波动,选取扫描速度 $15\ \mu\text{m/s}$ 时固化线形的综合指标较好。

5.2 三维实体模型的固化

通过前文的大量实验研究,基本获得了可以进行三维实体模型层叠固化所需要的各种工艺参数和成型方法。根据上节表 1 中不同扫描速度实际固化线高,在三维 CAD 模型离散等高截交时,选取的层厚为 $25\ \mu\text{m}$,利用本课题组研制的系统便可以通过扫描曝光固化得到所需的三维实体模型,如图 7 所示。图 7(a)为空腔方锥体,外形尺寸 $600\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ (底边 $600\ \mu\text{m}$),锥体角 15° ,层叠层数 15,壁厚 $70\ \mu\text{m}$ 。图 7(b)为塔形双联齿轮,其中大齿轮齿数 20,模数 $0.05\ \text{mm}$,



(a) 空腔方锥体 (b) 塔形双联齿轮
(a) Square cone with (b) Tower-shaped double
chamber inside layer gears

图 7 微小尺度的三维固化模型的 SEM 图片
Fig. 7 SEM photos of 3D micro solidified model

外形最大直径为 $1\ 000\ \mu\text{m}$,固化高度为 $50\ \mu\text{m}$ 。

6 结 论

本文通过大量实验,对利用微细光成型法来制造三维微小模型的主要工艺参数进行了分析和优化。实际应用的实验系统和紫外光固化树脂,其逐层固化的每层液态树脂膜厚度应为 $30\ \mu\text{m}$ 左右;在扫描曝光时,其光刻头的工作距取值为 $650\ \mu\text{m}$;曝光光束功率为 $0.15\ \mu\text{W}$,扫描速度为 $15\ \mu\text{m/s}$ 时得到的固化直线段的宽度和高度的精度较好。同时,经过对线形固化特征的分析,利用优化的工艺参数成功实现了几种三维实体微小结构的固化成型。

参考文献:

- [1] 早野诚治. 光造形のバイオニア[J]. *Optronics*, 2000, 4: 158-165.
HAYANO S. Pioneer of rapid prototyping technology[J]. *Optronics*, 2000, 4: 158-165. (in Japanese)
- [2] 沈连官, 王翔, 邓益民. 激光光刻成型法在微型机械研究中的应用[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(2): 11-15.
SHEN L G, WANG X, DENG Y M. Application of laser photoforming technology in machining of micromachines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(2): 11-15. (in Chinese)
- [3] 李善君, 纪才圭. 高分子化学光原理及应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
LI SH J, JI C G. *Light Chemistry Principle and Applications of Polymers* [M]. ShangHai: Fudan University Press, 1993. (in Chinese)
- [4] 王德海, 江禄. 紫外光固化材料—理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
WANG D H, JIANG L. *UV Curing Materials—Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 王翔, 沈连官, 胡玉禧, 等. 微光成型法微细光束紫外光源的研制[J]. *光学技术*, 2001, 27(5): 469-471.
WANG X, SHEN L G, HU Y X, et al.. Research and manufacture of lamp-house of micro-beam of ultraviolet light in micro stereo lithography[J]. *Opt. Tech.*, 2001, 27(5): 469-471. (in Chinese)

- [6] 马德盛,王翔,邬昶畅,等.光成型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.
MA D SH, WANG X, WU C CH, *et al.*. Theoretical analysis and experimental research of solidification shape for stereo photo lithography[J]. *Chin. Mech. Eng.*, 2004,15(18):1650-1653. (in Chinese)
- [7] 李勇,郭旻,周兆英.特种微型机械加工技术[J].光学精密工程,2000,8(3):287-291.
LI Y, GUO M, ZHOU ZH Y. Overview of non-traditional micromachining technologies[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):287-291. (in Chinese)
- [8] 姚振强,YAO Y L,王飞.先进激光制造技术研究进展[J].机械工程学报,2003,39(12):57-61.
YAO ZH Q, YAO Y L, WANG F. Progress in advanced laser assisted manufacturing technology[J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2003,39(12):57-61. (in Chinese)
- [9] 蒋中伟,袁大军,祝安定,等.双光子三维微细加工技术及实验系统的开发[J].光学精密工程,2003,11(3):234-238.
JIANG ZH W, YUAN D J, ZHU A D, *et al.*. 2-photon 3-D microfabrication technology and its experimental system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(3):234-238. (in Chinese)
- [10] ZHANG X,JIANG X N, SUN C. Micro-stereo lithography of polymeric and ceramic microstructures[J]. *Sensor Actuator A*,1999,77:147-156.

作者简介:王翔(1964—),男,安徽合肥人,中国科学技术大学精密机械与精密仪器系副教授,博士,主要研究方向为微型机械及微细制造技术,光成型技术,机电一体化技术。E-mail:wxyf@ustc.edu.cn