

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0060-04

# 利用 1064 nm 激光的热塑膨胀式三维微结构制备

王乐妍 张冬仙 温正湖 章海军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 提出了一种基于 1064 nm Nd:YAG 激光光源的三维微结构制备技术。利用激光照射下热塑材料发生局部热融并沿光轴方向膨胀生长的特性,将热塑性材料置于封闭的液体环境中,当激光光源移除后,受周围液体冷却作用影响,膨胀部分迅速凝固成凸起形状,由此完成三维微结构制备。我们搭建了三维微结构制备实验系统,采用 1064 nm Nd:YAG 激光器作为制备光源,盛有样品的容器固定于二维扫描工作台上,以实现激光光斑与热塑性材料间的二维相对移动。利用实验系统完成了石蜡点状及线状微结构的制备,实验结果表明,微结构的直径取决于激光光斑的直径,微结构的高度与激光照射时间及激光功率大小成正比。此外对制备过程中温度因素的影响进行了实验研究。

**关键词** 光学微制造;激光光致加工;热塑膨胀;石蜡

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200835s2.0060

## Fabrication of Three-Dimensional Microstructures based on 1064 nm Laser-Induced Thermoplastic Expansion

Wang Leyan Zhang Dongxian Wen Zhenghu Zhang Haijun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A novel fabrication technology of three-dimensional (3D) microstructures by 1064 nm Nd:YAG laser irradiation is described. This technology employs an interesting phenomenon that a thermoplastic material melted by laser heating grows in liquid surrounding space. After switching off the laser irradiation, it immediately solidifies into a convex microstructure because of the heat release. The experimental setup of this fabrication technology has been developed, which utilizes a 1064nm Nd:YAG laser as light source, and an X-Y scanning stage to realize the relative movement between laser irradiation and thermoplastic material. Paraffin dots and lines have been manufactured with this experimental setup. The experimental results show, the width of paraffin dots is mostly determined by the size of focal spot, and their heights increase along with the extension of irradiation time or the enlargement of laser power. Initial research about the liquid temperature impacts on thermoplastic manufacturing results has been done.

**Key words** optical microfabrication; laser-induced manufacturing; thermoplastic expansion; paraffin

### 1 引 言

激光光致加工为微纳米三维结构制备提供了一种新的技术方法<sup>[1]</sup>,在微机械学、冶金学、集成光学、电子器件以及半导体加工、光电子学、传感器技术、化学工程等领域其有实际的应用价值及巨大的发展潜力<sup>[2,3]</sup>。与传统技术相比,激光光致加工使得微加工技术更为成本低廉、准确快速。目前应用中的微加工技术,如传统的紫外光刻、离子束刻蚀以及

LIGA 技术在许多领域得到了广泛应用<sup>[4,5]</sup>,然而这些技术需要昂贵的仪器及复杂的工艺过程,包括掩模、制模及胶合等,因此耗时较多。此外这些方法在可选材料及可制备结构的复杂程度上存在局限性。而激光光致加工,如双光子聚合技术在制备高分辨率微结构方面十分有效<sup>[6,7]</sup>。但该技术同样存在成本高及耗时长的问题。有些激光光致加工技术利用高功率的激光束,如飞秒激光脉冲,照射材料产生热形变的原理,但是这些方法需消耗较大的功率,且制

**基金项目:** 国家自然科学基金(50775205)和国家 863 计划(2006AA04Z237)资助课题。

**作者简介:** 王乐妍(1984),女,博士研究生,主要从事微结构制备方面的研究。E-mail: wly@zju.edu.cn

**导师简介:** 章海军(1965),男,教授,主要从事微纳米技术方面的研究。E-mail: zhanghj@zju.edu.cn (通信联系人)

备过程难以实现准确控制<sup>[8~11]</sup>。

因此提出了一种新型的三维微结构制备方法,利用 1064 nm Nd:YAG 激光器作用于石蜡或其他热塑性材料。该方法无需复杂的过程及昂贵的设备,即可完成点状或线状微结构的快速简便制备,是一种具有发展潜力的实时三维微结构制备方法。

## 2 原理与方法

### 2.1 基本原理

该制备技术的基本原理为,放置于盛有液体的密闭容器中的样品材料,在激光照射下将产生热膨胀效应。在激光照射下熔融的热塑性材料沿激光光轴方向生长,并迅速凝固成为较大高宽比的柱状结构,从而实现三维微结构的制备。如图 1 所示为该技术制备微结构的原理示意图。

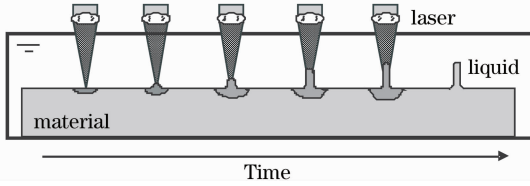


图 1 原理示意图

Fig. 1 Principle schematic

热塑性材料,例如石蜡、塑料、松香等,被放置在盛有液体的容器中,激光束穿过液体聚集在样品表面。热塑性材料因为吸收激光能量,产生局部温度升高,并导致微小热熔。受周围液体导热性质的影响,熔化的材料沿光轴方向生长为凸起形结构。当激光照射被去除后,在周围液体的冷却作用下,该凸起形状迅速固化,从而在样品表面形成了细小的微结构。

微结构的高宽比可通过不同的照射时间调节,从而分别制得点状或柱状微结构。如果采用扫描的激光光源,还可制得线形微结构或更为复杂的体型结构。

### 2.2 制备方法

三维微结构的尺寸大小主要由制备过程中的激光参数及液体环境温度决定。由于热熔主要发生在激光聚集光斑范围内,因此微结构的宽度基本取决于激光束焦点的直径。当激光器及光路部分选定后,微结构的宽度基本确定,而作为微结构的重要性参数:高宽比主要由微结构的高度决定。该方法制备所得的微结构高度随激光功率的增加或照射时间的延长而增加。此外,环境温度也是制备过程中的重要影响因素。

值得注意的是,激光参数及微结构尺寸之间存在非线性关系,激光参数的微小变化可能引起制备结果的较大差异。因此,对激光参数的准确控制是制备过程良好重复性的先决条件。

当采用扫描激光光源时可制得线状微结构,此时的制备结果取决于合适的扫描速率选择。

## 3 实验

利用该方法制备微结构的实验系统如图 2 所示。

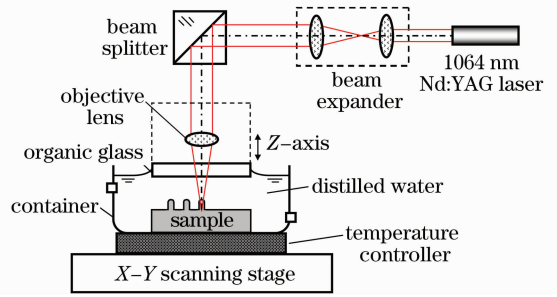


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

系统中采用 1064 nm Nd:YAG 激光器作为制备光源,激光器工作于连续模式,功率可调范围为 0~10 W。由激光器出射的光束首先经过准直处理,经分束镜改变方向后,再由焦距约为 30 mm 的单透镜进行聚集,最终照射在热塑性样品(本实验中为石蜡)的表面上。聚集后的激光光斑直径约为 100 μm。当制备高度不同的样品时,可在 Z 方向(竖直方向)调节单透镜的位置,以确保激光束准确地聚集于样品表面。

制备过程中石蜡样品被放置在盛有蒸馏水的容器底部中,该容器与步进电机驱动的 X-Y 扫描台相连,从而可实现激光光源与石蜡样品之间的二维相对移动。为了消除扫描等引起的轻微晃动对光斑定位的影响,设置与激光光路相连的透明有机玻璃片半浸没在水中,即使容器移动过程中引起液面的晃动,激光束的空气-玻璃-水-样品的光路也不会受到影响。同时由于水及有机玻璃均为透明介质,因此未聚集的激光束在穿透时不会受到介质的吸收影响。

实验中选用的热塑性样品固定在盛有蒸馏水的容器底部,并利用温度控制器来调节样品材料的温度。

实验中石蜡的熔点为 60~62 °C。在熔融石蜡中加入了 10% 的硬脂酸,然后将其浇筑于基底平台上。

## 4 结果与讨论

分别采用固定的激光光源及相对扫描的激光光源,进行了点状及线状微结构的制备,并对制备过程中的适宜参数进行了探讨。

### 4.1 点状微结构

图3所示为石蜡点状微结构的光学显微镜放大图,其中图3(a)为两个相邻的点状微结构,图3(b)为较大放大倍率下的另外一个点状微结构。所有的石蜡点均在 $50^{\circ}\text{C}$ 的液体环境下制备而成。图3(a)中两个离散的石蜡点在激光功率 $4.6\text{ W}$ 的条件下制得,激光照射时间为 $5\text{ s}$ 。图3(b)中所示的石蜡点在激光功率 $7.0\text{ W}$ 的条件下制得,激光照射时间为 $5\text{ s}$ 。

实验所得石蜡点状微结构的宽度约为 $800\text{ }\mu\text{m}$ ,且高度随激光照射时间的增加而增加。因此当采用更长的激光照射时间时,将制得更大高宽比的点状微结构。但从实验中发现,微结构高度和激光照射时间之间并非遵循严格的线性关系。此外,微结构的宽度主要由激光光斑直径决定,基本不受激光照射时间的影响。

从图3可见,通过激光光致热膨胀效应凸起的石蜡点状微结构与周围基底材料间具有明确的分界边缘,其中部分微结构在形状上的轻微不对称性是由于石蜡材料的非均匀性及激光光束质量因素引起的。实验研究过程表明,上述石蜡点状微结构的制备结果具有良好的可复制性。

### 4.2 线状微结构

通过采用步进扫描台平移石蜡样品的方式,可

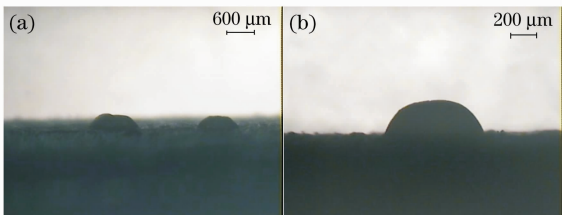


图3 石蜡点状微结构在不同放大倍率下的光学显微图片。(a) 激光功率 $4.6\text{ W}$ ,照射时间 $5.0\text{ s}$ 所得的两个离散石蜡点状微结构,(b) 激光功率 $7.0\text{ W}$ ,照射时间 $5.0\text{ s}$ 所得的石蜡点状微结构

Fig. 3 Optical microscope micrograph of paraffin dots with different magnifications. (a) Two adjacent paraffin dots fabricated by a laser irradiation of  $4.6\text{ W}$  and irradiation time of  $5.0\text{ s}$ , (b) another paraffin dot fabricated by a laser irradiation of  $7.0\text{ W}$  and irradiation time of  $5.0\text{ s}$

以制得线状微结构,如图4所示,图中所示石蜡线状微结构的制备条件均为激光功率 $7.0\text{ W}$ ,相对扫描速率 $500\text{ }\mu\text{m/s}$ 。图4(a)所示为一段石蜡线状微结构的起始点,可见其与周围基底材料之间的分界。图4(b)为石蜡线状微结构的斜视图,中间的缺陷是由于激光光源被障碍物屏蔽所造成的。图4(c)及图4(e)分别为两条不同的石蜡线形,图4(d)及图4(f)为图4(c)、图4(e)所对应的截面图。从这些显微图中可见,所得的石蜡线状微结构为基底平面上的突起结构,图4(e)中的线形可见明显的不平整,这是由于激光光源照射的不稳定性以及石蜡基底材料的非均匀性所引起的。

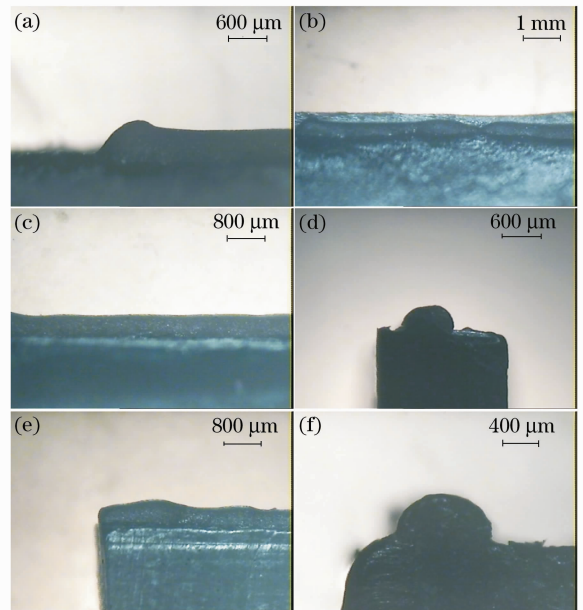


图4 石蜡线状微结构的光学显微镜放大图片。(a) 石蜡线状微结构的起始点,(b) 石蜡线状微结构的斜视图,(c),(e) 两条不同的石蜡线状微结构,(d),(f) 对应(c),(e)图中线状微结构的截面图

Fig. 4 Optical microscope micrograph of paraffin lines. (a) The starting point of a paraffin line, (b) oblique view of paraffin line, (c), (e) two different paraffin lines, (d), (f) sectional views of the paraffin lines in figure (c), (e)

### 4.3 液体温度因素

实验中所采用石蜡材料熔点为 $60\sim 62^{\circ}\text{C}$ ,因此在 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内调节浸没样品的蒸馏水的温度,进行了相应的制备实验。结果表明,适度加热的液体环境会对制备结果产生积极影响,而且存在着某一特定温度阈值,当周围的液体环境低于该温度范围时,样品无法发生激光光致热膨胀效应。对于本实验中的制备光源及样品,该温度值约为 $35^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 结 论

介绍了基于激光光致热塑膨胀的三维微结构制备技术,并进行了实验,验证了该方法的可行性。分别在 4.6 W 及 7.0 W 的激光功率下进行了石蜡点状及线状微结构的制备,相应的激光照射时间为 5.0 s,扫描速率为 500  $\mu\text{m/s}$ 。实验结果表明,微结构的直径取决于激光光斑的直径,微结构的高度与激光照射时间及激光功率大小成正比。以后的工作将致力于探讨更加适宜的激光参数以及对激光光斑的进一步聚焦,以获得更好的实验结果,制备具有更高分辨率的微结构。

## 参 考 文 献

- 1 Cui Zheng. Overview of micro/nanofabrication technologies and applications[J]. *Physics*, 2006, **35**(1): 34~39  
崔 铮. 微纳米加工技术及其应用概述[J]. *物理*, 2006, **35**(1): 34~39
- 2 J. Ihlemann, K. Rubahn. Excimer laser micro machining: fabrication and applications of dielectric masks [J]. *Applied Surface Science*, 2000, **154**: 587~592
- 3 S. Hashioka, H. Matsumura. 10 nm size fabrication of semiconductor substrates and metal thin lines by conventional photolithography [C]. *Microprocesses and Nanotechnology Conference*, 2000, (11~13): 184~185
- 4 Cheng Li, Wang Zhengyu, Zhu Yiyun *et al.*. Extremely ultraviolet lithography fabrication technology for nanometer ULSI devices[J]. *Semiconductor Technology*, 2005, **30**(9): 28~33  
成 立,王振宇,朱漪云 等. 制备纳米级 ULSI 的极紫外光刻技术[J]. *半导体技术*, 2005, **30**(9): 28~33
- 5 X. Kong, Y. Zhang. Development and applications of LIGA technology[J]. *MEMS Device & Technology*, 2005, **5**: 13~18
- 6 F. Korte, J. Korte, J. Serbin *et al.*. Three dimensional nanostructuring with femtosecond laser pulses[J]. *IEEE Trans. Nanotechnol*, 2004, **3**: 468~471
- 7 T. W. Lim, S. H. Park, D. Y. Yang *et al.*. Direct single-layered fabrication of 3D concavo-convex patterns in nanostereolithography[J]. *Appl. Phys. A*, 2006, **84**: 379
- 8 S. Chen, P. Costas. Photothermal displacement measurement of transient melting and surface deformation during pulsed laser heating[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15): 2093~2095
- 9 D. Day, M. Gu. Microchannel fabrication in PMMA based on localized heating by nanojoule high repetition rate femtosecond pulses[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(16): 5939~5946
- 10 E. N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang *et al.*. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 2023~2025
- 11 D. Kawamura, A. Takita, Y. Hayasaki *et al.*. Bump formation on a glass surface with a transparent coating using femtosecond laser processing[J]. *Appl. Phys. A*, 2006, **85**: 39~43