

双光子聚合外齿轮组微加工

崔联合

江阴职业技术学院机电工程系, 江苏 江阴 214405

摘要 文章介绍了用自制双光子聚合加工系统对不同曝光时间下的外齿轮组的微加工成型性进行了研究。在 photomer3015 材料内实现了外齿轮组的双光子聚合微加工, 通过扫描电镜(SEM)分析了外齿轮组的微观形貌。结果表明, 随着曝光时间的增加, 齿轮组成型性变得较好; 曝光时间增加时, 总加工时间增加。当激光功率为 0.3 mW, 曝光时间为 10 ms 时, 成功实现了齿厚为 2 μm 、分辨率为 1.0 μm 的外齿轮组的双光子聚合微细加工。

关键词 激光技术; 双光子聚合; 外齿轮组; 微细加工; photomer3015

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP52.051403

Outer Gear Sets Micro-Fabrication by Two-Photon Polymerization

Cui Lianhe

Mechanical Engineering Department, Jiangyin Polytechnic College, Jiangyin, Jiangsu 214405, China

Abstract The micro-fabrication process of the homemade two-photon polymerization fabrication system is introduced, and the formability of the external gear set is studied at different exposure time. The two-photon polymerization micro-fabrication of the outer gear sets are realized in the photomer3015, and the microstructure of the gear sets is analyzed through scanning electron microscope (SEM). The results show that with the increase of exposure time, the formability of the gear sets is better. When the exposure time increases, the total fabrication time also increase. When the laser power is 0.3 mW and the exposure time is 10 ms, the two-photon polymerization micro-fabrication of the outer gear set with the tooth thickness of 2 μm and a resolution of 1.0 μm is successfully manufactured.

Key words laser technique; two-photon polymerization; outer gear set; micro-fabrication; photomer3015

OCIS code 230.3990; 140.3380; 160.4760

1 引言

双光子吸收是一种非线性光学现象, 在强光激发下, 介质通过一个虚拟分子同时吸收两个光子, 从基态跃迁到两倍光子能量的激发态的过程^[1]。双光子光聚合微加工是将激光聚焦到光敏聚合物材料里, 利用脉冲诱发的激发光聚合形成材料固化, 通过控制聚焦光束空间位置的移动来实现微结构的三维加工^[2]。

近年来, 许多专家和学者对双光子吸收技术进行了研究, 并将双光子光聚合技术引入到微细三维立体加工领域中^[3-5]。1998年 Witzgall 等^[6]用双光子光聚合技术制作出各种三维微观结构, 空间分辨率达到微米级。Cumpston 等^[5]于 1999 年制作了悬臂支撑结构和具有光子带隙的三维微器件。2001 年, Kawata 等^[7]制作了 10 μm 长, 7 μm 高的公牛模型。2002 年法国 Irene Wang 制造出分辨率为纳米级的 1 欧元硬币^[8]。

双光子光聚合技术(TPP)是随着双光子技术的发展而产生的。由于其在信息存储、微细纳米加工和生物医药等领域存在着巨大的应用潜力, 欧美国家对此高度关注, 并已投入巨资进行研究^[9]。齿轮是微机电装置中一类典型零件, 采用双光子聚合技术制备可以达到微米级甚至亚微米级精度的齿轮具有现实意义。介绍自制双光子聚合加工系统的组成和工作原理, 并用该系统加工制备外啮合齿轮组, 以研究在不同参数下齿轮组的成型性和齿廓表面的微观表面形貌。

收稿日期: 2014-12-26; 收到修改稿日期: 2015-01-25; 网络出版日期: 2015-03-29

基金项目: 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划(2012)

作者简介: 崔联合(1968—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事材料成形和机械加工等方面的研究。

E-mail: cuijianhe@126.com

2 双光子聚合微加工系统

结合微纳米技术和显微镜技术,自行开发的双光子聚合微加工系统如图1所示。激光和光学调制器规格如表1所示。微加工系统主要包括以下几个部分:1)双光子激发源。系统采用双频Nd:YAG绿光激光器,最大输出功率为200 mW,平均输出功率为26 mW,激光中心波长532 nm,重复频率130 kHz,脉冲宽度小于等于30 ns,脉冲能量为200 nJ;2)共焦显微镜系统。激光进入显微镜后,经滤光、能量衰减、扩束后,利用一个大数值孔径(NA)物镜(油浸物镜,NA为1.3)对光束进行聚焦。激光在该位置就可以诱导材料发生双光子激发;3)曝光控制系统。该系统由三维移动PI P-545毫微XYZ压电平台和光路开关组成,该扫描平台是一个由压电陶瓷(PZT)驱动的纳米定位装置,平台行程范围为200 μm ×200 μm ×200 μm 。平台安装在最大行程为50 mm×50 mm的双轴平台上。平台的扫描步距为1 nm,扫描线性度为0.03%。快速响应光路开关(开启延时小于2 ms,关闭延时小于1 ms)可确保准确的曝光时间和精度;4)实时监测系统。CCD摄像头和监视器被用来实时监控系统的加工过程,倒置显微镜型号为OLYMPUS IX51,可用来进行焦点的快速定位;5)软件控制系统。三维模型切片分割后,由控制软件处理成数据,以生成可识别的指令,再驱动压电平台。软件控制系统具备以下功能:根据实际加工条件可进行多项参数设置,如扫描方式、曝光时间、层叠方式等;控制光束扫描和光闸通断,以实现加工材料在所设计位置上进行双光子激发聚合反应。

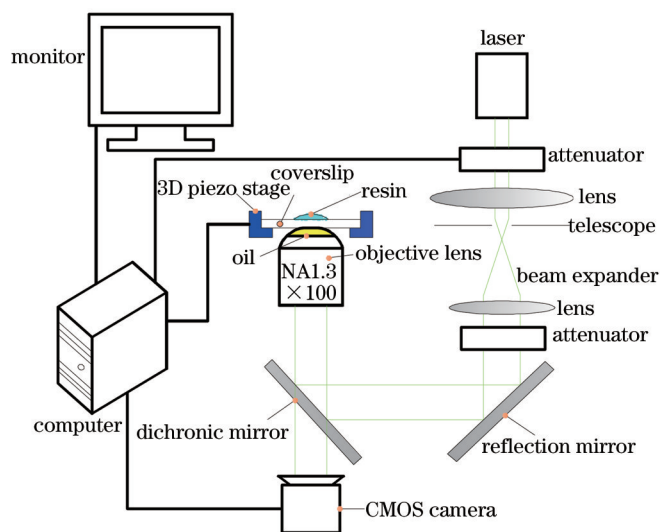


图1 TPP微制造系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of TPP micro-fabrication system

表1 激光和调制器规格

Table 1 Specifications of laser and modulator

Laser	Peak power /W	Average power /mW	Repetition rate /kHz	Pulse energy /nJ	Optics-modulator	Optical input/output polarizations
Nd:YAG micro-laser	200	26	130	200	Acousto-optical modulator	Linear

实验时,经校准后的激光从上端射入,经过反射后被物镜聚焦到光敏树脂内,激光强度的控制通过调节衰减器实现,通过调整光束扩展器光束尺寸,可扩大激光光束。光敏树脂位于盖玻片表面,盖玻片固定在三维移动轴上,计算机发送指令给控制器,驱动三维移动轴的运动。当光束射入显微镜时,采用一只分光镜来反射特定光波,利用该光波在显微镜物镜里的激光进行树脂微制造。显微镜底部安装互补金属氧化物半导体(CMOS)照相机,利用CMOS照相机可以实时监测整个TPP微细加工过程。

3 实验

实验所用材料为photomer3015,为一种无机-有机混合聚合物。photomer3015双光子引发剂化学成份是双酚A环氧丙烯酸酯,分子量为452,粘度为85000cP,延伸率为6%,折射率 $n=1.541$,photomer3015双光子引发剂分子可有效地使聚合物与激光的起始点在可见光波长(500~650 nm)范围内。所要制备的大、

小齿轮齿数分别为 15、10, 模数为 0.8, 压力角为 20° , 小齿轮内孔直径为 $2.5 \mu\text{m}$, 键槽宽度为 $1.2 \mu\text{m}$; 大齿轮内孔直径为 $3.5 \mu\text{m}$, 键槽宽度为 $1.6 \mu\text{m}$ 。表 2 为大、小齿轮基本几何要素。

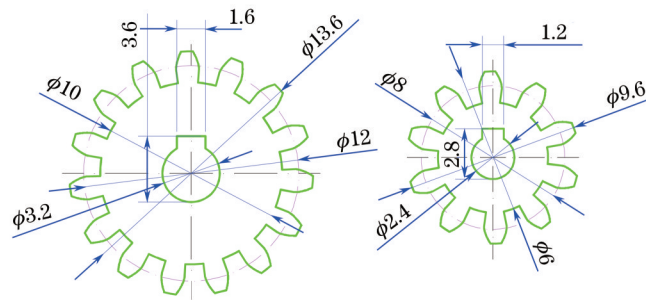


图 2 齿轮组 CAD 图

Fig.2 Gear set CAD figure

表 2 齿轮组基本几何参数(单位: μm)Table 2 Basic geometric parameters of gear set (unit: μm)

Name	Addendum	Dedendum	Pitch diameter	Addendum diameter	Dedendum diameter	Tooth pitch	Tooth thickness	Reference center distance
Small gear	0.8	1	8	9.6	6	2.512	1.256	20
Big gear			12	13.6	10			

在进行 TPP 微制造期间, 先准备激光扫描轨迹数据, 每个数据点是零件立体像素的位置。激光以平面方式扫描并结合光束作逐点加工, 直到同一高度加工完毕, 再纵向进给加工下一层面。

激光逐层累计加工, 即利用这种“积分”式^[10]的加工形式最终得到三维微型结构, 实现复杂实体的微制造。从设计到立体结构加工完毕, 该系统完全依靠 CAD/CAM 技术来实现: 先设计三维立体结构模型; 再对其进行层切处理, 转化为一系列层状平面, 每一层面含有立体结构对应高度截面上的轮廓信息。结构设计信息和加工信息都包含在系统的 CAD/CAM 软件之内^[11]。接着, 制造产品, 激光焦点按轨迹数据点使树脂成型; 其次将基片浸泡在丙酮溶剂中, 以处理未聚合的树脂和去除临界点干燥溶剂; 最后给基片表面涂层并拍摄 SEM(JEOL JSM-7000F)照片。具体过程如图 3 所示。

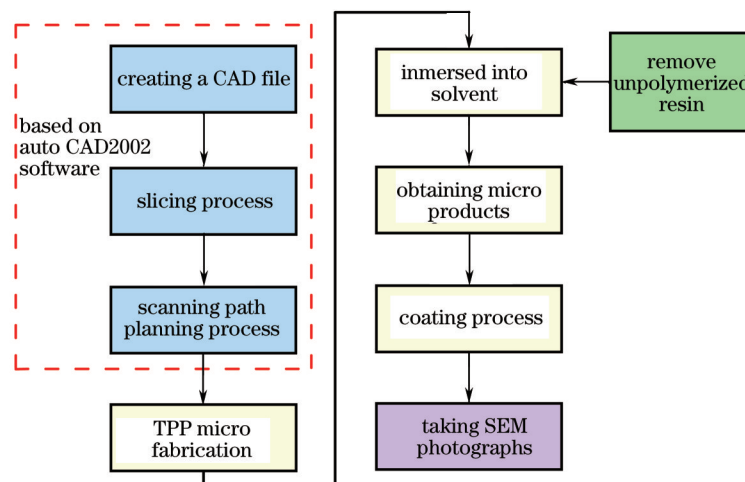


图 3 双光子微加工过程

Fig.3 Overall process flow of TPP micro fabrication

为获得激光扫描轨迹数据, 本制造系统^[12](NTUMFS)包含一套 CAD 模型分割和激光路径规划软件系统, 可对立体像素尺寸、覆盖率、层厚、额外补偿层、壳层间距等参数进行设置。图 4 为实验齿轮组路径规划过程。首先, 使用商业 CAD 软件建立三维 CAD 模型。第二, 对模型进行垂直分切以获得轮廓线。最后, 轮廓线被转化成压电平台将要移动的轨迹。

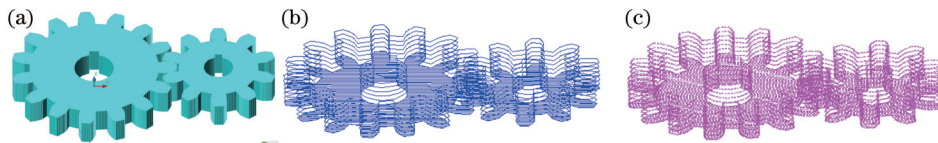


图4 齿轮组路径规划过程。(a) CAD模型;(b)切片轮廓线;(c)扫描路径

Fig.4 Planning process of gear set. (a) CAD model; (b) slicing contours; (c) scanning paths

在TPP微制造过程中,影响双光子光聚合加工制件质量的因素有很多^[13],如激光功率、曝光时间、材料以及工作台定位精度等。本实验在固定其他参数的情况下,以不同曝光时间制备外齿轮组。通过SEM照片对齿轮成型性和微观形貌进行分析,据此达到优化工艺参数的目的。

4 结果与讨论

在本实验中激光功率为0.3 mW、像素重叠比率为30%、物镜数值孔径为1.3,曝光时间如表3所示。图5为在不同曝光时间下制备的外齿轮组SEM照片。从图5可知,加工时间在6~10 ms时,齿轮轮廓较为清晰。曝光时间为4 ms时,齿轮轮廓较为模糊,层叠现象很明显;当曝光时间为6 ms时,沿齿厚方向,齿廓有明显转动错位现象,相互啮合的齿粘结很严重;曝光时间为8 ms时,部分齿廓错位现象有所改善,但存在羽片状残留聚合物;当曝光时间达到10 ms时,齿轮组内孔键槽清晰可见,相互啮合的齿廓可以分辨,齿轮内孔尺寸和形状也比前两组规整,齿廓饱满,所制备的齿轮组较为理想;当曝光时间为12 ms时,轮廓层叠更加严重,齿面呈直线状,齿底聚合物为圆形状。从实验结果看,当曝光时间小于6 ms或大于10 ms时,齿轮无法成型,微加工过程无法进行。这是由于当曝光时间过小时,每个点的光通量会过小^[13],以致不能激发双光子聚合反应发生;而当曝光时间过大时,光能量过大,这会造成热爆炸现象发生,致使加工停止。由文献[14]可知,在同一激光功率下,光敏材料聚合速率随曝光时间增大而减小,聚合速率越慢,光敏材料聚合越充分;聚合速率越快,则产生缺陷的可能性就越大。当延长曝光时间时,引发剂的浓度将随之降低,产生的自由基可能会因为已经形成的聚合物而难以传递。因此,在较短的曝光时间内计算出来的聚合速率比曝光时间长的要大得多。所以,本实验曝光时间选定在10 ms为宜。

表3 不同曝光时间下外齿轮组实验参数

Table 3 Outer gear set experimental parameters under different exposure time

Serial number	Lateral voxel size / μm	Voxel overlap ratio /%	Layer thickness / μm	Exposure time /ms	Total machining time /s
1	0.1	30	0.3	4	521
2	0.1	30	0.3	6	717
3	0.1	30	0.3	8	900
4	0.1	30	0.3	10	1085
5	0.1	30	0.3	12	1123

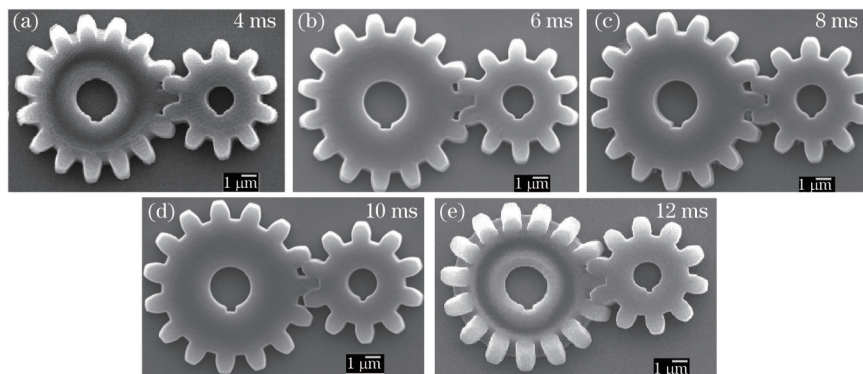


图5 不同曝光时间下外齿轮组SEM照片

Fig.5 SEM photos of outer gear set under different exposure time

图6为曝光时间与总加工时间关系图。从图6和表3可知,随着曝光时间的增加,总加工时间在增加,加工速度在下降。以中间3组实验结果来看,当曝光时间为6 ms时,总加工时间为717 s;当曝光时间为8 ms

时,总加工时间增加到 900 s,时间增长了 25.5%;而当曝光时间达到 10 ms 时,与曝光时间为 6 ms 时的总加工时间相比,总加工时间增长了 51.32%。

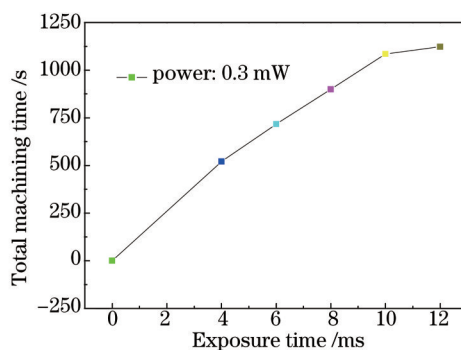


图 6 曝光时间与总加工时间关系

Fig.6 Relationship between exposure time and total machining time

5 结 论

用商用 CAD 软件设计齿轮组并用自制的双光子聚合系统来制备齿轮,材料为具有 0.3%光敏引发剂的 Photomer3015。实验时,固定激光功率、覆盖率等参数,通过改变曝光时间来制备齿轮组:1) 随着曝光时间增加,齿轮组成型性变得更好;2) 曝光时间增加时,总加工时间增加;3) 曝光时间为 10 ms 时,齿轮组轮廓清晰规整。

参 考 文 献

- Li Zitao, Li Yaming. Progress in organic two-photon absorption materials[J]. Chemical Research, 2006, 17(2): 102-107.
李子涛, 李亚明. 有机双光子吸收材料研究进展[J]. 化学研究, 2006, 17(2): 102-107.
- Y H Hsueh. Micro Manufacturing System for Two-Photon Polymerization with Automatic Focus and Tilt Correction [D]. Taipei: National Taiwan University, 2013.
- Ming Zhou, Lipeng Liu, Qixun Dai, *et al.*. Microfabrication technology by femtosecond laser direct scanning using two photon photo polymerization[C]. SPIE, 2004, 5645(6): 240-247.
- H Misawa, H Sun, S Juodkazis, *et al.*. Microfabrication by femtosecond laser irradiation[C]. SPIE, 2000, 3933: 246-260.
- B H Cumpston, S P Ananthavel, S Barlow, *et al.*. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and micro fabrication[J]. Nature, 1999, 398(6722): 51-54.
- G Witzgall, R Vrijen, E Yablonovitch, *et al.*. Single-shot two-photon exposure of commercial photoresist for the production of three-dimensional structures[J]. Opt Lett, 1998, 23: 1745-1747.
- S Kawata, H Sun, T Tanaka, *et al.*. Finer features for functional micro devices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697-698.
- I Wang, M Bouriaud, P L Baldeck, *et al.*. Three-dimensional microfabrication by two-photon-initiated polymerization with a low-cost micro laser[J]. Opt Lett, 2002, 27(15): 1348-1350.
- Wang Tao, Shi Mengquan, Li Xue, *et al.*. Progress in two-photon polymerization and its application[J]. Photographic Science and Photo Chemistry, 2003, 21(3): 223-230.
王 涛, 施盟泉, 李 雪, 等. 双光子光聚合技术及其研究进展[J]. 感光科学与光化学, 2003, 21(3): 223-230.
- Chen Xiaoliang, Ren Naifei, Wang Qun. Femtosecond laser two-photon polymerization 3d micro-fabrication technology and system research[J]. Machinery, 2006, 44 (498): 27-30.
陈小亮, 任乃飞, 王 群. 飞秒激光双光子聚合三维微细加工技术及系统研发[J]. 机械制造, 2006, 44 (498): 27-30.
- C L Tseng. Design and Fabrication of Micro Devices by Two-Photon Polymerization Technology[D]. Taipei: National Taiwan University, 2011.
- Wu Dong. Two-Photon Polymerization Micro-Fabrication by Femtosecond Laser[D]. Jilin: Jilin University, 2005: 18-23.
吴 东. 飞秒激光双光子聚合微纳加工[D]. 吉林: 吉林大学, 2005: 18-23.
- T Watanabe, M Akiyama, K Totani, *et al.*. Photo responsive hydrogel microstructure fabricated by two-photon initiated polymerization[J]. Adv Funct Mater, 2002, 12(9): 611-615.
- Wang Yulan, Chen Weiqiang, Dong Xianzi, *et al.*. Novel organic salts as two-photon polymerization photo initiator: synthesis and properties[J]. Photographic Science and Photo Chemistry, 2007, 25(5): 350-356.
王雨兰, 陈卫强, 董贤子, 等. 新型有机盐光引发剂的双光子聚合特性研究[J]. 感光科学与光化学, 2007, 25(5): 350-356.

栏目编辑: 宋梅梅