

激光与光电子学进展

双重响应柔性微结构阵列的飞秒激光增材制造(特邀)

文天豪[†], 张永来^{*†}, 万嘉怡, 韩冬冬

吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 具有刺激响应形变功能的微结构能够通过外界刺激信号获取能量,进而发生机械形变,在自动化技术、微小机器人技术、微流控芯片等领域具有巨大的前沿应用潜力。然而,现有的智能微结构的研制很大程度上依赖于智能材料及其成型技术,不仅受限于为数不多的材料体系,而且局限在单一的刺激响应形变。基于此,提出利用飞秒激光双光子增材制造技术在形状记忆薄膜上加工蛋白质微结构阵列的新方法,实现了微结构阵列尺寸和周期的双重响应形变。微结构阵列在热处理下被机械拉伸定性,实现了结构周期的调控,该过程可在热刺激下恢复;同时,牛血清白蛋白微结构可以在不同 pH 值的条件下表现为可逆的溶胀和收缩形变。智能材料与形状记忆基底相结合可以赋予微结构阵列更加复杂可控的双重响应形变。本文制备了微结构阵列和微透镜阵列,展示了双重响应下的结构变化和功能调谐,为智能化微结构阵列在微流控系统中的应用作出了有益的探索。

关键词 飞秒激光直写; 微透镜; 蛋白质; 微纳加工

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/L0P232610

Femtosecond Laser Additive Manufacturing of Dual-Responsive Microstructure Arrays on Flexible Substrates (Invited)

Wen Tianhao[†], Zhang Yonglai^{*†}, Wan Jiayi, Han Dongdong

College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China

Abstract Microstructures with stimulus-responsive deformation capabilities can convert external stimulation signals to generate mechanical deformation, holding significant potential for frontier applications in automation technology, micro-robotics, and microfluidic chips. However, the development of intelligent microstructures relies on smart materials and shaping technologies, which are not only limited to a few material systems but also confined to single-stimulus responsive deformation. This work proposes a novel approach to fabricate protein microstructure arrays on shape-memory thin films using femtosecond laser two-photon additive manufacturing technology, achieving dual-responsive deformation of microstructure array size and period. Initially, the microstructure array is mechanically stretched and characterized under heat treatment, enabling control of the structural period, which can be restored under thermal stimulation. Simultaneously, bovine serum albumin microstructures exhibit reversible swelling and contraction deformation under different pH conditions. Combining smart materials with shape-memory substrates imparts more complex and controllable dual-responsive deformation to the microstructure array. This study offers beneficial exploration for the application of intelligent microstructure arrays in microfluidic systems.

Key words femtosecond laser direct writing; micro-lens; protein; micro/nano-fabrication

1 引言

作为一种前沿微纳增材制造技术,飞秒激光双光子聚合加工在微纳器件制备和研究领域得到了广泛关注^[1-6]。飞秒激光双光子聚合主要基于飞秒激光与材

料间的非线性相互作用:时间尺度上,超短的脉冲可以有效抑制加工过程中热效应对精度的影响;空间上,光学非线性、化学非线性和材料非线性作用过程使得该技术能够不受光学衍射极限制约,实现纳米精度结构成型。基于飞秒激光双光子聚合的增材制造技术具有

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2023-12-17; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4600400)、国家自然科学基金(61935008, T2325014)

通信作者: *yonglaizhang@jlu.edu.cn

[†] 共同第一作者

高精度、真三维、无需掩模、可集成等系列优点,能满足各类构型复杂三维微纳结构的制备需求,在微型化、集成化、智能化系统中具有重要应用。起初的飞秒激光双光子聚合加工仅仅局限于光聚合物,所得微结构的材料组成单一。经过 30 余年的飞速发展,飞秒激光双光子增材制造技术已经被证明可以用于加工聚合物材料^[7-16]、功能化新型聚合物基材料^[17-20]、金属等无机材料^[21-23]、纳米材料^[24-26]、蛋白质生物材料等各类功能材料体系。适用材料种类的不断扩增进一步扩大了该技术的应用范围。如今,飞秒激光双光子聚合加工在生物医学工程^[27-28]、微机械系统^[29]、光学系统^[30-32]、智能微系统等前沿领域已经展现出非常广泛的应用前景。

例如,智能微系统的研发目前依赖智能材料及其高精密成型技术,基于智能材料体系构建微结构阵列是实现智能微系统驱动与执行功能的重要途径。具有刺激响应形变功能的微结构能够通过外界刺激信号获取能量,进而发生机械形变,在自动化技术、微小机器人技术、微流控芯片等领域具有巨大的前沿应用潜力。然而,现有的智能微结构的研制不仅受限于为数不多的材料体系,而且局限在单一的刺激响应形变,难以实现复杂形变、多重响应、可调谐的智能化微结构的制备。针对上述难题,本文提出利用飞秒激光双光子增材制造技术在形状记忆薄膜上加工蛋白质微结构阵列的新方法,实现了微结构阵列尺寸和周期的双重响应形变。首先,微结构阵列在热处理下被机械拉伸定性,实现结构周期的调控,该过程可在热刺激下恢复;同

时,牛血清白蛋白微结构可以在不同 pH 值的条件下表现为可逆的溶胀和收缩形变。智能材料与形状记忆基底相结合可以赋予微结构阵列更加复杂可控的双重响应形变。本文制备了微结构阵列和微透镜阵列,展示了双重响应下的结构变化和功能调谐,为智能化微结构阵列在微流控系统中的应用作出了有益的探索。

2 实验部分

2.1 结构设计

飞秒激光双光子增材制造的微纳米结构模型均使用 3DMAX 软件设计绘制。然后将设计好的微纳结构转换成 STL 文件。在飞秒激光双光子增材制造过程中,需要设置激光加工的功率、扫描步长、每个体素的曝光时间。圆柱阵列中每个圆柱的尺寸为:直径为 $5\ \mu\text{m}$;高为 $3\ \mu\text{m}$ 。每个微柱之间的横向与纵向距离均为 $10\ \mu\text{m}$ 。

2.2 制备方法

形状记忆薄膜上的圆柱微结构阵列制备过程包括以下步骤,如图 1 所示。首先,利用聚乙烯醇(PVA)作为牺牲层,使用质量分数为 4% 的 PVA 水溶液以 4000 round/min 的转速持续 20 s,旋涂到玻璃基板上,然后使用烘箱在 $80\ ^\circ\text{C}$ 下烘烤 2 min,重复以上操作两到三次,以保证制备的膜具有满足拉伸条件的厚度,薄膜的厚度为 $270\sim 300\ \text{nm}$ ^[33]。然后将形状记忆聚合物材料(tBA-AUD)同样以旋涂的方式覆盖于牺牲层表面,紫外光照 8 min,使形状记忆聚合物材料固化为薄

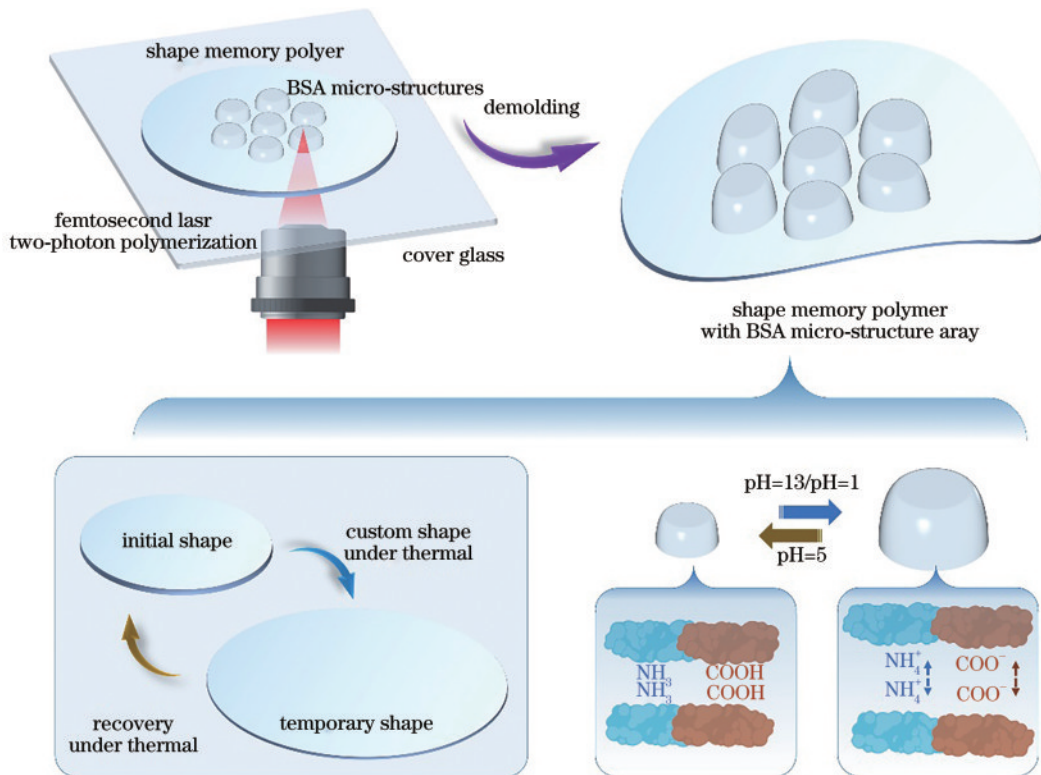


图 1 双重响应柔性微结构阵列的飞秒激光增材制造

Fig. 1 Femtosecond laser additive manufacturing of dual-responsive microstructure arrays on flexible substrates

膜。其次,使用牛血清白蛋白(BSA)作为单体,亚甲基蓝(MB)作为光引发剂按一定配比混合形成实验所用的光刻胶。将适量BSA和MB溶解在超纯水中,形成由600 mg/mL BSA和0.6 mg/mL MB组成的黏性蛋白质水凝胶。并将制备好的凝胶在4 °C暗箱中静置24 h,使配置的光刻胶充分混合。在BSA微纳结构的制备过程中,先将BSA水凝胶滴到已具有牺牲层的形状记忆薄膜上,并使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)腔来减缓凝胶中水分的蒸发。激光束由中心波长为800 nm的飞秒激光器产生。然后利用60倍油浸物镜(数值孔径为1.4)将飞秒激光紧密聚焦到水凝胶内部并进行逐点三维扫描,平均激光功率为25 mW,扫描步长为200 nm,每个体素的曝光时间为1000 μ s。三维扫描完成后,将整个样品置于超纯水中显影5 min,得到一层带有圆柱微结构阵列的形状记忆薄膜。并利用扫描电子显微镜(JSM7500, JEOL公司,日本)观察微观形貌。

3 分析与讨论

3.1 圆柱阵列的热处理拉伸响应

本工作是在tBA-AUD薄膜表面上加工BSA微纳结构。tBA-AUD薄膜是一种热响应形状记忆聚合物。将tBA-AUD薄膜置于80 °C环境下,拉伸至固定形状保持该拉伸状态8 s,并拿出降温至室温。将拉伸后的tBA-AUD薄膜再次置于80 °C环境下,拉伸后的tBA-AUD薄膜将会恢复至未拉伸的状态。分别研究拉伸定形的tBA-AUD薄膜在30、40、50、60、70、80、90、100 °C环境下的恢复情况。在tBA-AUD薄膜上标定一个1 cm \times 1 cm的正方形,经过一维拉伸后,正方形改变为1.5 cm \times 1 cm的长方形,分别置于上述温度下1 min,用来观察tBA-AUD薄膜在该温度下恢复到拉伸前状态的情况。在30、40、50、60、70 °C环境下,tBA-AUD薄膜仍保持拉伸后的形状。在80、90、100 °C环境下,tBA-AUD薄膜恢复到拉伸前的形状。图2(a)为在tBA-AUD薄膜表面加工的BSA微柱阵列的光学显微镜照片。每个小柱的直径约为5 μ m,每个微柱之间的横向与纵向距离均为10 μ m。图2(b)、(c)分别为对tBA-AUD薄膜在80 °C环境下分别进行一维拉伸和二维拉伸的光学显微镜照片。从图2(b)、(c)可以观察到,经过一维拉伸,每个微柱之间的距离在拉伸方向变为约20 μ m。经过二维拉伸,各个微柱之间中心的间隔都增加为18 μ m。拉伸状态的tBA-AUD薄膜恢复至室温状态后,tBA-AUD薄膜可以保持拉伸的状态。将拉伸后的形状记忆薄膜重新放入80 °C环境,圆柱阵列恢复到最初的间隔,如图2(d)所示。

为了进一步观察形状记忆聚合物tBA-AUD薄膜在80 °C下拉伸后结构的微观结构变化。对一维拉伸和二维拉伸后的形状记忆聚合物tBA-AUD薄膜进行扫描电子显微镜(SEM)表征(图3)。图3(a)为形状记

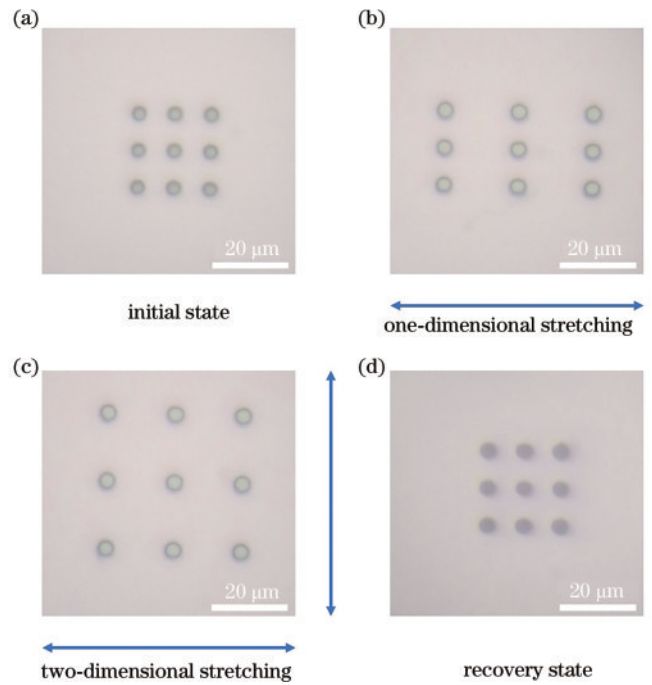


图2 热处理拉伸。(a)未拉伸时的初始状态;(b)仅在一维方向上拉伸;(c)在二维方向上拉伸;(d)热刺激响应复原
Fig. 2 Stretching under thermal. (a) Initial state; (b) one-dimensional stretching; (c) two-dimensional stretching; (d) thermal response recovery

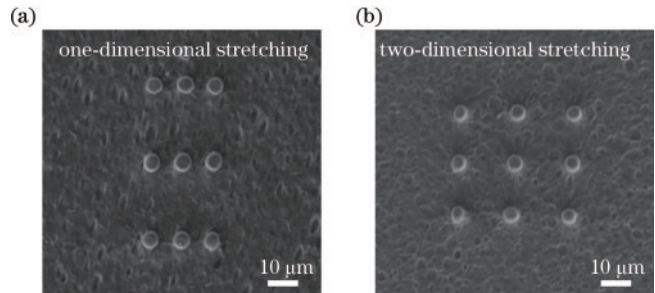


图3 BSA微柱阵列拉伸后扫描电子显微镜照片。
(a)一维拉伸;(b)二维拉伸

Fig. 3 SEM images of BSA micro-pillars when the tBA-AUD films are stretched. (a) One-dimensional stretching; (b) two-dimensional stretching

忆聚合物tBA-AUD薄膜进行一维拉伸后固定形状的SEM照片。从SEM照片可以观察到,在一维拉伸方向微柱间距变大。图3(b)为形状记忆聚合物tBA-AUD薄膜进行二维拉伸后固定形状的SEM照片。从SEM照片可以观察到,在二维拉伸方向微柱间距均匀变大。值得注意的是,BSA微柱的直径并未发生明显变化。这可以用于复合结构的双响应,即形状记忆聚合物tBA-AUD薄膜的热响应、BSA微柱的pH响应。

3.2 圆柱阵列的pH值响应

进一步,研究了BSA微柱结构在不同pH下的响应特性。图4(a)为BSA微柱阵列在pH为1的环境下光学显微镜照片。图4(b)为BSA微柱阵列在pH为5

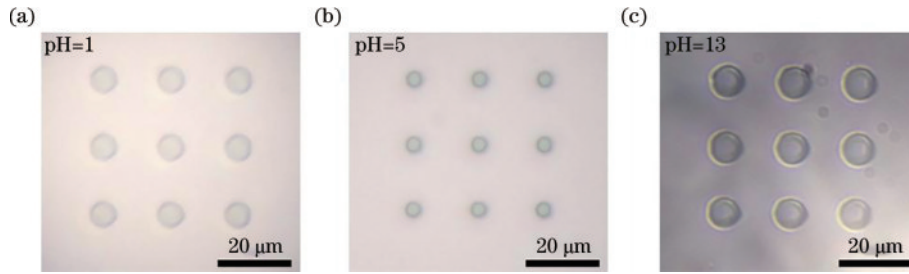


图 4 BSA 的 pH 值响应。(a)pH=1;(b)pH=5;(c)pH=13

Fig. 4 pH response of BSA micro-pillars. (a) pH=1; (b) pH=5; (c) pH=13

的环境下的光学显微镜照片。图 4(c)为 BSA 微柱阵列在 pH 为 13 的环境下的光学显微镜照片。可以看到,在 pH 为 5 的环境下,BSA 微柱发生收缩。当 BSA 微柱周围的环境的 pH 为 1 或者 13 时,BSA 微柱发生膨胀。BSA 微结构从 pH 为 5 的溶液环境到 pH 为 13 的环境时,其变形响应时间约为 2 s。BSA 在不同 pH 下的响应机理为:BSA 是由许多氨基酸残基组成的大分子蛋白质。这些氨基酸中的一部分带有离子化的官能团,如羧基和氨基,它们在特定的 pH 环境下可以接受或释放质子。这导致了 BSA 分子的电荷状态发生变化。BSA 的 pH 溶胀原理基于这种可逆的电荷状态变化和电荷排斥效应^[34]。

3.3 微透镜阵列的双重响应

根据上述的基本原理和实验流程,将圆柱阵列替

换为微透镜阵列进行飞秒激光双光子增材制造,就可以实现温度和 pH 对微透镜阵列成像能力的双重调控,如图 5 所示。首先,利用飞秒激光双光子增材制造技术在形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜表面加工 BSA 微透镜阵列。利用 BSA 的 pH 响应特性,调控 BSA 的微观形状,从而调节微透镜阵列的成像效果。然后在一定温度下均匀拉伸衬底形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜,可以将 BSA 微透镜阵列中每个微透镜的间距拉大,并结合 BSA 的 pH 响应特性,进一步调节微透镜阵列的成像效果。最后,升高形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜 BSA 微透镜阵列周围温度,形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜将恢复至未拉伸时的初始状态。因此,在形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜表面加工 BSA 微透镜阵列,可以通过温度和 pH 协同控制微透镜阵列的成像效果。

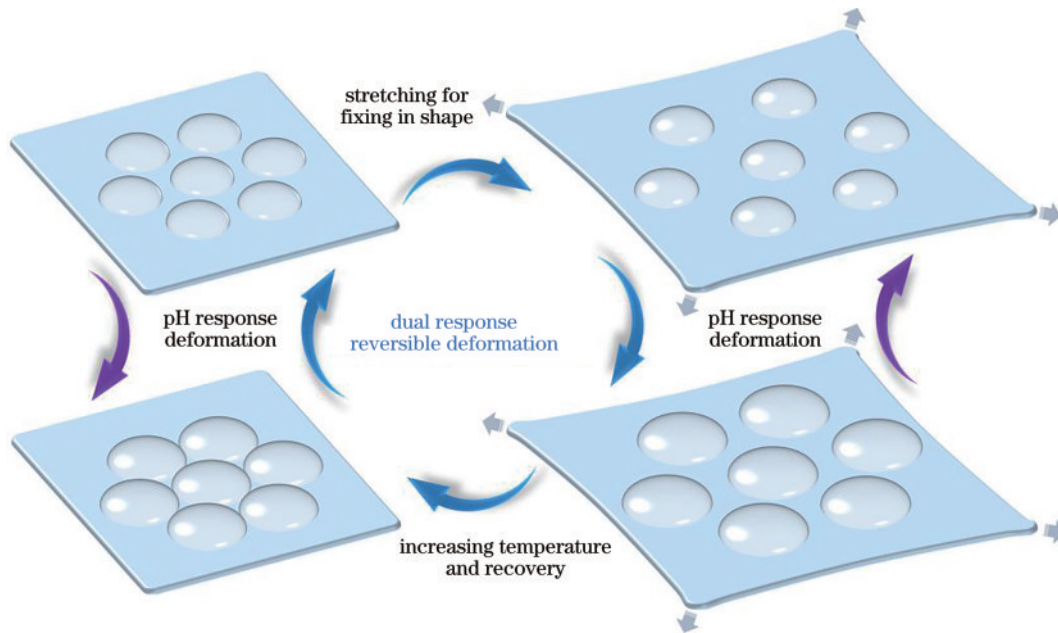


图 5 微透镜阵列的双重响应

Fig. 5 Dual response micro-lens array

为了进一步研究形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜表面加工 BSA 微透镜阵列在形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜拉伸前和拉伸后形状的对比如,我们分别对 tBA-AUD 薄膜拉伸前后表面的 BSA 微透镜阵列进行扫描电子显微镜观察(图 6)。图 6(a)为未拉伸时 BSA

微透镜阵列的 SEM 图像。其中,每个微透镜的直径约为 8 μm,边缘的 6 个微透镜距离中心的透镜距离为 11 μm。图 6(b)为形状记忆聚合物 tBA-AUD 薄膜处于拉伸状态下 BSA 微透镜阵列的 SEM 图像。每个微透镜的直径仍约为 8 μm,未发生明显形变。而边缘的

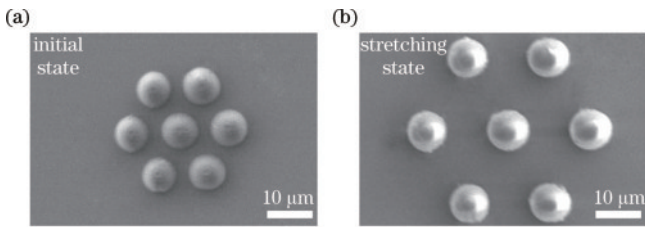


图 6 BSA 微透镜阵列拉伸前后的 SEM 图像。(a) 未拉伸状态; (b) 拉伸状态
Fig. 6 SEM images of BSA micro-lens. (a) Unstretched state; (b) stretched state

6 个微透镜距离中心的透镜距离为 14 μm。因为形状记忆聚合物 tBA-AUD 衬底薄膜是均匀拉伸的, 所以边缘的 6 个微透镜距离中心的透镜距离几乎一致。

在确保形状记忆聚合物定型的基础上, 在微透镜阵列周围滴入不同 pH 值的溶液会使 BSA 发生溶胀和收缩现象, 引起视场角和焦距的变化。利用如图 7(a)

所示的光学系统拍摄 BSA 微透镜在不同状态时的成像照片。图 7(b) 为形状记忆聚合物未拉伸状态下, BSA 微透镜阵列周围溶液的 pH 为 5 时的光学显微镜照片。BSA 微透镜阵列在 pH 为 5 的环境会使透镜收缩, 导致通过微透镜阵列仅能观察到部分的、不完整的像。图 7(c) 为形状记忆聚合物未拉伸状态下, BSA 微透镜阵列周围溶液的 pH 为 13 时的光学显微镜照片。BSA 微透镜阵列在 pH 为 13 的环境会使透镜溶胀, 相比于图 7(b), 通过微透镜阵列可以观察到更多的图像。图 7(d) 为形状记忆聚合物处于拉伸状态下, BSA 微透镜阵列周围溶液的 pH 为 5 时的光学显微镜照片。BSA 微透镜阵列在 pH 为 5 的环境会使透镜收缩, 导致通过微透镜阵列仅能观察到部分的、不完整的像。但是, 如图 7(e) 所示, 当 BSA 微透镜阵列周围溶液更换成 pH 为 13 的溶液时, BSA 微透镜阵列在 pH 为 13 的环境会使透镜溶胀, 使得通过微透镜阵列可以观察到较完整的像。

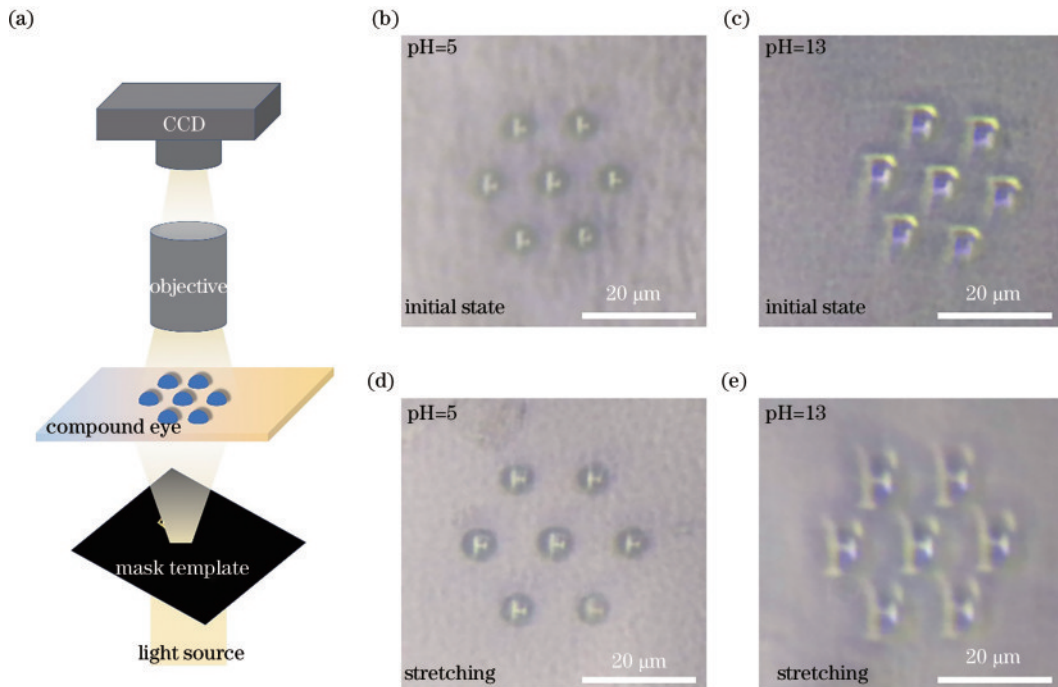


图 7 BSA 微透镜阵列双重响应光学显微镜照片。(a) 光学系统成像示意图; (b) 未拉伸状态, pH=5; (c) 未拉伸状态, pH=13; (d) 拉伸状态, pH=5; (e) 拉伸状态, pH=13

Fig. 7 Dual response optical microscope photograph of BSA micro-lens array. (a) Schematic diagram of optical system imaging; (b) unstretched state, pH=5; (c) unstretched state, pH=13; (d) stretched state, pH=5; (e) stretched state, pH=13

4 结 论

提出利用飞秒激光双光子增材制造技术在形状记忆薄膜上加工 BSA 微结构阵列的新方法, 实现了微结构阵列尺寸和周期的双重响应形变。首先, 微结构阵列在热处理下被机械拉伸定性, 实现结构周期的调控, 该过程可在热刺激下恢复。同时, BSA 微结构可以在不同 pH 值的条件下表现出可逆的溶胀和收缩形变。智能材料与形状记忆基底相结合可以赋予微结构阵列

更加复杂可控的双重响应形变。制备了微结构阵列和微透镜阵列, 展示了双重响应下的结构变化和功能调谐, 为智能化微结构阵列在微流控系统中的应用作出了有益的探索。

参 考 文 献

[1] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(8):

- e16133.
- [2] Somers P, Liang Z H, Johnson J E, et al. Rapid, continuous projection multi-photon 3D printing enabled by spatiotemporal focusing of femtosecond pulses[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 199.
- [3] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers: reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.
- [4] Wu D, Xu J, Niu L G, et al. In-channel integration of designable microoptical devices using flat scaffold-supported femtosecond-laser microfabrication for coupling-free optofluidic cell counting[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(1): e228.
- [5] 王锁成, 董世运, 闫世兴, 等. 飞秒激光制备金属表面微纳结构及其技术应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(17): 1700005.
Wang S C, Dong S Y, Yan S X, et al. Fabrication of micro/nano structures on metal surfaces by femtosecond laser and its technical applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 1700005.
- [6] 廖常锐, 李博哲, 邹梦强, 等. 光纤集成微纳结构器件的双光子聚合制备及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306005.
Liao C R, Li B Z, Zou M Q, et al. Optical fiber integrated micro/nano-structured device fabricated by femtosecond laser induced two-photon polymerization and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306005.
- [7] Chen Q D, Lin X F, Niu L G, et al. Dammann gratings as integratable micro-optical elements created by laser micromanufacturing via two-photon photopolymerization [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21): 2559-2561.
- [8] He Y, Huang B L, Lu D X, et al. "Overpass" at the junction of a crossed microchannel: an enabler for 3D microfluidic chips[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(20): 3866-3869.
- [9] Ku J F, Chen Q D, Zhang R, et al. Whispering-gallery-mode microdisk lasers produced by femtosecond laser direct writing[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2871-2873.
- [10] Lin X F, Chen Q D, Niu L G, et al. Mask-free production of integratable monolithic micro logarithmic axicon lenses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(8): 1256-1260.
- [11] Nakanishi S, Shoji S, Kawata S, et al. Giant elasticity of photopolymer nanowires[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6): 063112.
- [12] Takada K, Kaneko K, Li Y D, et al. Temperature effects on pinpoint photopolymerization and polymerized micromicrostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 041902.
- [13] Wang J, He Y, Xia H, et al. Embellishment of microfluidic devices *via* femtosecond laser micromanufacturing for chip functionalization[J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(15): 1993-1996.
- [14] Wu D, Chen Q D, Niu L G, et al. 100% fill-factor aspheric microlens arrays (AMLA) with sub-20-nm precision[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(20): 1535-1537.
- [15] Wu D, Chen Q D, Niu L G, et al. Femtosecond laser rapid prototyping of nanoshells and suspending components towards microfluidic devices[J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(16): 2391-2394.
- [16] Wu D, Wu S Z, Niu L G, et al. High numerical aperture microlens arrays of close packing[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(3): 031109.
- [17] Tian Y, Zhang Y L, Ku J F, et al. High performance magnetically controllable microturbines[J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(21): 2902-2905.
- [18] Tian Y, Zhang Y L, Xia H, et al. Solvent response of polymers for micromachine manipulation[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, 13(11): 4835-4838.
- [19] Wang J, Xia H, Xu B B, et al. Remote manipulation of micronanomachines containing magnetic nanoparticles[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 581-583.
- [20] Xia H, Wang J, Tian Y, et al. Ferrofluids for fabrication of remotely controllable micro-nanomachines by two-photon polymerization[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(29): 3204.
- [21] Guo L, Xia H, Fan H T, et al. Femtosecond laser direct patterning of sensing materials toward flexible integration of micronanosensors[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1695-1697.
- [22] Xu B B, Ma Z C, Wang H, et al. A SERS-active microfluidic device with tunable surface plasmon resonances[J]. *ELECTROPHORESIS*, 2011, 32(23): 3378-3384.
- [23] Xu B B, Zhang R, Liu X Q, et al. On-chip fabrication of silver microflower arrays as a catalytic microreactor for allowing in situ SERS monitoring[J]. *Chemical Communications*, 2012, 48(11): 1680-1682.
- [24] Guo L, Shao R Q, Zhang Y L, et al. Bandgap tailoring and synchronous microdevices patterning of graphene oxides[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(5): 3594-3599.
- [25] Xu B B, Zhang R, Wang H, et al. Laser patterning of conductive gold micromicrostructures from nanodots[J]. *Nanoscale*, 2012, 4(22): 6955-6958.
- [26] Xu B B, Zhang Y L, Zhang R, et al. Programmable assembly of CdTe quantum dots into microstructures by femtosecond laser direct writing[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 1(31): 4699-4704.
- [27] Sun Y L, Dong W F, Niu L G, et al. Protein-based soft micro-optics fabricated by femtosecond laser direct writing [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): e129.
- [28] Sun Y L, Dong W F, Yang R Z, et al. Dynamically tunable protein microlenses[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(7): 1558-1562.
- [29] Gu C L, Zuo Z, Luo D P, et al. Passive coherent dual-comb spectroscopy based on optical-optical modulation with free running lasers[J]. *PhotonIX*, 2020, 1(1): 7.
- [30] Choi H, Kim J, Kim W, et al. Realization of high aspect ratio metalenses by facile nanoimprint lithography using water-soluble stamps[J]. *PhotonIX*, 2023, 4(1): 18.
- [31] He M F, Zhang Z M, Cao C, et al. Single-color

- peripheral photoinhibition lithography of nanophotonic structures[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 25.
- [32] 杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500005. Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500005.
- [33] Mori T, Wang H, Zhang W, et al. Pick and place process for uniform shrinking of 3D printed micro- and nano-architected materials[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5876.
- [34] 胡昕宇, 马卓晨, 韩冰, 等. 飞秒激光制备蛋白质智能软体执行器[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402001. Hu X Y, Ma Z C, Han B, et al. Femtosecond laser fabrication of protein-based smart soft actuators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402001.