

文章编号 1004-924X(2012)09-2006-08

## 超声处理对 UV-LIGA 工艺中 SU-8 胶溶胀的影响

杜立群<sup>1,2\*</sup>, 刘亚萍<sup>2</sup>, 李永辉<sup>2</sup>, 李成斌<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连, 116024;

2. 大连理工大学 辽宁省微纳米及系统重点实验室, 辽宁 大连, 116024)

**摘要:**首次将超声处理引入 UV-LIGA 工艺中,研究了超声处理对 SU-8 胶模溶胀的影响,并探讨了其影响机理,从而获得了减小胶模溶胀及提高电铸微器件尺寸精度的方法。试验研究了超声处理对显影过程及电铸过程中 SU-8 胶模溶胀的影响,分析了不同超声时间下 SU-8 胶表面亲水性的变化趋势,并计算了不同超声时间下胶模的溶胀去除率。讨论了超声处理对不同结构微器件尺寸精度的影响。试验结果表明:SU-8 胶模在显影过程中的溶胀不明显,并且超声处理对显影过程中胶模的溶胀影响很小,其主要影响 SU-8 胶模在电铸过程中的溶胀。随着超声时间的增加,胶模溶胀及其表面亲水性均呈现先减小后增大的趋势。当超声时间为 10 min 时,胶模溶胀最小,其溶胀去除率  $\alpha$  值可高达 70%,并且超声处理后电铸微器件的尺寸误差与结构尺寸无关。根据超声波的机械断键作用与聚合物吸水机理,从亲水性和内应力两个方面,探究了 SU-8 胶模溶胀随超声时间的增加而变化的原因。文中提出的减小 SU-8 胶溶胀的方法不依赖于工艺参数也不会增加掩模图形设计的复杂性,是一种实用的减小 SU-8 胶溶胀的新方法。

**关键词:**超声处理;SU-8 光刻胶;溶胀;电铸;UV-LIGA

**中图分类号:**TN305.7;TB559 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.2006

## Effect of ultrasonic treatment on SU-8 swelling in UV-LIGA technology

DU Li-qun<sup>1,2\*</sup>, LIU Ya-ping<sup>2</sup>, LI Yong-hui<sup>2</sup>, LI Cheng-bin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory for Precision & Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of  
Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

\* Corresponding author, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn

**Abstract:** Ultrasonic treatment was originally introduced into UV-LIGA technology in this paper. The effect of ultrasonic treatment on SU-8 swelling was researched, and ultrasonic mechanism of SU-8 swelling was explored. Then, a novel method to reduce SU-8 swelling and improve the dimensional precision of an electroformed microstructure was obtained. In experiments, the effect of ultrasonic treatment on the SU-8 swelling during the development and electroforming process was respectively studied, the surface hydrophilicity of SU-8 photoresist in different ultrasonic time was analyzed, and the SU-8 swelling removal ratio in different ultrasonic time was calculated. Furthermore, the effect of

收稿日期:2012-03-20;修订日期:2012-05-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075057,50675025)

ultrasonic treatment on the dimensional precisions of different micro devices was discussed. The experimental results indicate that the SU-8 mould swelling in development process is not obvious, and the ultrasonic treatment has a little effect on the SU-8 mould swelling during development process. The effect of ultrasonic treatment on the SU-8 mould swelling mainly occurs in the electroforming process, and the SU-8 swelling and its surface hydrophilicity both decrease first and increase afterwards with increasing the ultrasonic time. By 10 min ultrasonic treatment, the SU-8 swelling removal ratio is up to 70%, and the dimensional error of electroformed microstructure is independent on the structure of SU-8 mould. Moreover, the reason that SU-8 swelling behavior varies with increasing ultrasonic time was explained based on the ultrasonic mechanical scission of polymer chain and water absorbing mechanism. In conclusion, the presented method to reduce the swelling of SU-8 resist mould does not depend on the process parameters and not increase the complexities of mask layouts, and is a practical method.

**Key words:** ultrasonic treatment; SU-8 photoresist; swelling; electroforming; UV-LIGA

## 1 引言

高聚物 SU-8 光刻胶由 IBM 公司于 1995 年推出并已市场化。它是一种负性、环氧树脂型、近紫外线光刻胶,具有良好的物理、机械、光学性质以及耐化学腐蚀性和热稳定性<sup>[1]</sup>。基于 SU-8 胶的 UV-LIGA 技术已广泛地应用于微机电系统 (Micro-electro-mechanical Systems, MEMS) 中<sup>[2]</sup>。在 UV-LIGA 电铸工艺中,光刻后的 SU-8 胶常用作电铸的胶模以制作高深宽比的金属微器件<sup>[3-4]</sup>。但是由于 SU-8 胶在电铸过程中的溶胀,电铸出的金属微器件尺寸往往小于掩模图形的设计尺寸,而且微器件的侧壁呈现很大的倾斜角<sup>[5-7]</sup>。例如,在热压用镍模具的电铸过程中,掩模板上图形设计线宽为 90.7  $\mu\text{m}$ ,但是电铸后铸层线宽只有 75.9  $\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。SU-8 胶溶胀问题的存在严重影响并制约了电铸后微器件的尺寸精度和深宽比的提高。为解决这一问题,一些研究者开展了相关的研究工作。朱神渺等人研究了后烘温度对 SU-8 光刻胶热溶胀性的影响,指出后烘温度越低, SU-8 胶的溶胀变形越大,较高的后烘温度可以减小 SU-8 胶的溶胀<sup>[6]</sup>。Ru Feng 等人研究了工艺条件对固化后 SU-8 胶性质的影响,提出可以通过延长后烘时间提高固化 SU-8 胶交联度来减小其对环境湿度的敏感性<sup>[8]</sup>。但是后烘温度过高或者后烘时间过长都会导致 SU-8 胶模产

生较大的内应力,内应力过大易使 SU-8 胶层开裂,严重时会从基底上脱离<sup>[10]</sup>。刘冲等通过对掩模板增设隔离带等辅助结构减小 SU-8 胶模周围的光刻胶体积,提高了电铸出的镍模具的尺寸精度<sup>[7]</sup>。虽然辅助结构能够很好地降低线性结构的侧壁偏移,但却导致圆弧形结构的侧壁倾斜更加严重。此外,在掩模图形密集、复杂、线宽很小的情况下,增设辅助结构会变得很困难。公开发表的文献表明:已有的研究工作主要集中在优化工艺参数和掩模设计上,这些研究依赖于试验条件且不具有普遍性。因此,探索一种实用化的减小 SU-8 胶溶胀的方法对微器件尺寸精度的提高及高深宽比结构的制作具有重要意义。

本文首次将超声处理引入 SU-8 胶模的制作工程中,研究了 UV-LIGA 电铸工艺中超声处理对 SU-8 胶溶胀的影响,并且分析了超声作用对 SU-8 胶溶胀的影响机理。本文的研究成果可以为 SU-8 胶模溶胀方面的研究提供理论和实验方面的指导。

## 2 SU-8 胶模的溶胀现象

SU-8 光刻胶单体分子中含有 8 个环氧基,通过光酸催化交联反应可以生成高交联度的聚合物。交联后的 SU-8 胶分子呈三维网状结构,并且分子链中含有大量羟基。基于聚合物薄膜中溶剂传输理论, SU-8 胶的溶胀是由溶剂分子渗透进入交联网络内部形成的<sup>[9]</sup>。早期的研究表明聚合

物吸液量与时间成单一指数关系<sup>[10]</sup>。在基于 SU-8 胶的 UV-LIGA 工艺中,与电铸时间相比 SU-8 胶模的显影时间很短,因此从理论上讲,显影过程中 SU-8 胶模的溶胀不明显。在实际应用中,由于曝光过程中的光衍射现象以及显影过程中 SU-8 胶的溶胀,电铸前 SU-8 胶模的尺寸略小于掩模设计尺寸。然而,电铸出的微结构尺寸与设计尺寸却相差很大,因此从理论上推断,电铸过程中 SU-8 胶模的溶胀是影响电铸微器件尺寸精度的主要因素。

图 1 为 SU-8 胶模在 UV-LIGA 电铸工艺中的溶胀示意图。图中  $l$  和  $w$  分别表示 SU-8 胶模理想的胶高和胶宽,  $W_{dp}$  表示显影后 SU-8 胶模顶部宽度,  $l$  表示显影后胶模沟道宽度,  $h$  和  $d$  分别表示电铸后铸层高度和顶部宽度,  $W_{design}$  表示掩模板图案设计线宽。红色区域表示 SU-8 胶模在显影过程中的溶胀,蓝色区域表示胶模在电铸过程中的溶胀。定义  $\delta_1$  为 SU-8 胶模在显影过程中的尺寸误差,  $\delta_1 = W_{dp} - w = W_{design} - l$ ;  $\delta_2$  为胶模在电铸过程中的尺寸误差,  $\delta_2 = l - d$ ;  $\delta$  为电铸出微器件的尺寸误差,  $\delta = d - W_{design}$ 。由于 SU-8 胶模受基底的约束,基底界面处胶模溶胀偏移量为 0,因此,溶胀后的胶模顶部宽度较大,铸层呈现上窄下宽的锥形结构。

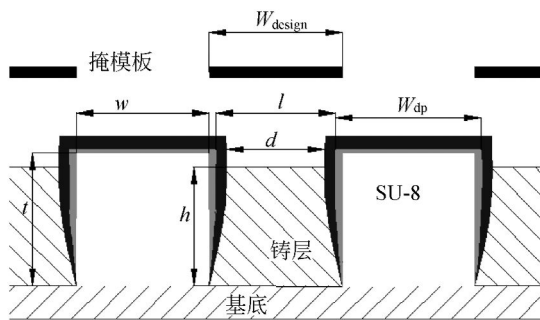


图 1 UV-LIGA 工艺中 SU-8 胶模溶胀示意图

Fig. 1 Schematic of SU-8 swelling in UV-LIGA process

### 3 超声试验

#### 3.1 掩模板的设计

试验中使用的掩模图形呈光栅式排列,图案线宽与间隔的宽度均相同,如图 2 所示。图 2 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别表示线宽为 50, 100, 200 和

400  $\mu\text{m}$  的掩模图形。标记点 1, 2, 3 为与之对应的 SU-8 胶模上的 3 个测量点,其中位置 3 处两侧 SU-8 胶体积最大,位置 2 处次之,位置 1 处最小且两侧胶宽相同。

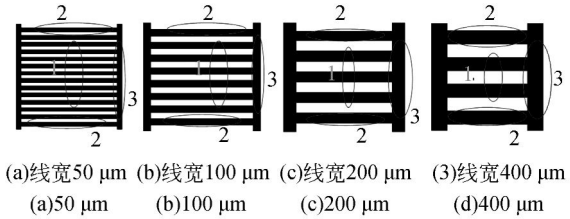


图 2 掩模图形

Fig. 2 Photo of masks with different line widths

#### 3.2 试验步骤

试验中选取镍板作为基底,使用 SU-8 2015 (Micro Chem Crop. USA) 制作胶模。试验中使用的超声设备为实验室自主研制的<sup>[11]</sup>。工作频率为 20 kHz,输入功率在 0~500 W 之间可调。由于内应力一般在显影之后释放,导致显影后的 SU-8 胶层有时会出现微裂纹、图形扭曲甚至是胶体脱落等现象<sup>[11]</sup>。因此,超声处理安排在后烘之后显影之前进行。具体工艺步骤如下:

(1) 依次分别用丙酮、乙醇超声清洗镍基底各 20 min,然后用去离子冲洗干净并烘干。

(2) 在镍基底上旋涂 SU-8 光刻胶,转速为 800 r/min,时间为 18 s,得到厚度约为 60  $\mu\text{m}$  的胶层。

(3) 前烘:先以 65  $^{\circ}\text{C}$  烘 40 min 后,再以 85  $^{\circ}\text{C}$  烘 40 min,最后冷却至室温。

(4) 曝光:紫外曝光波长为 365 nm,曝光剂量为 400  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,时间为 5 min。

(5) 后烘:温度为 85  $^{\circ}\text{C}$ ,时间为 1.5 min,然后冷却至室温。

(6) 超声处理:将带有 SU-8 胶模的镍基板用螺栓固定在超声工作台上,然后调节输入功率至 125 W。

(7) 显影:搅拌显影 5.5 min。

(8) 电铸:电铸时间为 6.5 h,电铸温度为 50  $^{\circ}\text{C}$ 。电铸液的主要参数及成分见文献[5]。

试验中电铸出的镍结构及其测量点如图 3 所示。图中颜色较亮部分为镍铸层,较暗区域为 SU-8 胶模,测量点 1, 2, 3 与图 2 中掩模上的标记位置相对应。

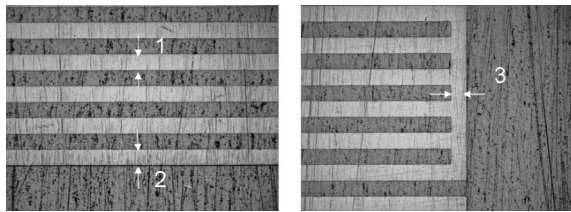


图 3 电铸镍结构局部光学显微镜照片

ig. 3 Local top views of the electroformed Ni-structures

## 4 结果及讨论

### 4.1 超声对显影过程中 SU-8 胶模溶胀的影响

在不同胶模线宽和不同测量位置下,  $\delta_1$  值与超声处理时间的关系如图 4 所示。图中(a)、(b)、(c)、(d)分别表示 SU-8 胶模理想线宽为 400、200、100 和 50  $\mu\text{m}$  时在显影过程中的尺寸误差  $\delta_1$ 。每一组线宽胶模均分别进行了 5, 10, 15 以及

20 min 超声处理, 超声功率均为 125 W, 频率为 20 kHz。比较图 4(a)~(d)中 0 min 时的  $\delta_1$  值可知: 对于未超声样本来说, 不同线宽的 SU-8 胶模在 3 个测量位置处的显影误差  $\delta_1$  值均很小; 此外, 对于每一个测量位置来说,  $\delta_1$  值随胶模线宽的增加变化很小, 这说明胶模线宽对显影误差  $\delta_1$  影响很小。因此, 在本试验条件下, 未经过超声处理的 SU-8 胶模在显影过程中的溶胀不明显。对于超声样本来说, 测量位置 1 处两侧胶模体积最小, 测量位置 3 处两侧胶模体积最大, 然而在相同的超声时间下, 3 个测量位置处的显影误差  $\delta_1$  值基本不变, 因此超声时间对 SU-8 胶溶胀的影响与胶模体积无关。在同一个测量位置处, 不同超声时间下的  $\delta_1$  值几乎一样, 而且对于每一种胶模线宽来说, 不同超声时间下的  $\delta_1$  值也几乎一样, 因此, 超声时间对 SU-8 胶模在显影过程中的溶胀影响很小。

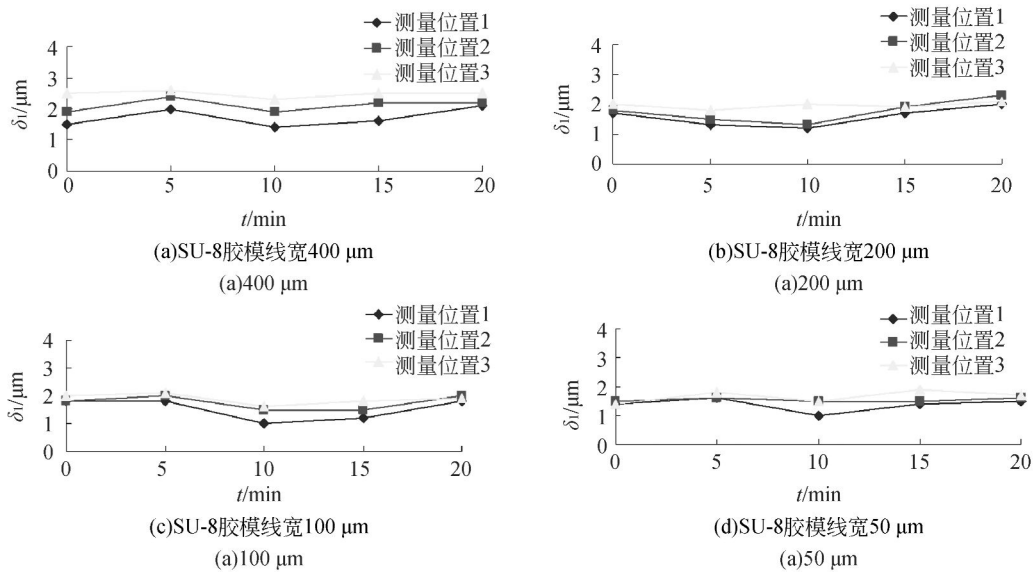


图 4 超声时间对  $\delta_1$  值的影响

Fig. 4 Relation between  $\delta_1$  and ultrasonic time

### 4.2 超声对电铸过程中 SU-8 胶模溶胀的影响

超声处理时间与  $\delta_2$  值的关系如图 5 所示。图中掩模线宽为 400  $\mu\text{m}$ , 将电铸后镍结构进行磨削, 测量并计算测量位置 1 处胶模高度分别为 50, 40 和 20  $\mu\text{m}$  处的  $\delta_2$  值。测量高度越低, 表示该测量位置越接近基底, 考虑到基底对 SU-8 胶

模的束缚作用, 越靠近基底胶模的溶胀越不明显, 因而  $\delta_2$  值越小。同一测量高度处, 10 min 之前,  $\delta_2$  值随着超声时间的增加不断减小; 10 min 之后,  $\delta_2$  值随着超声时间的增加不断增大, 因此 10 min 时的  $\delta_2$  最小, 说明 10 min 是减小 SU-8 胶模在电铸过程中溶胀的最佳超声时间。此外,

20 min 时  $\delta_2$  值比未超声时要大,说明 20 min 超声处理增大了 SU-8 胶模的溶胀。此外,与图 4 (a)中 0 min 时胶模在显影过程中的误差  $\delta_1$  相比, $\delta_2$  值要大的多,因此 SU-8 胶模在电铸过程中的溶胀是影响 UV-LIGA 工艺中微器件尺寸精度的主要因素。

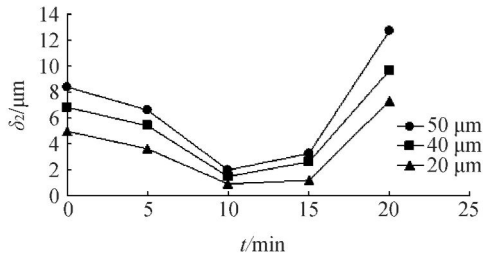


图 5 超声时间与  $\delta_2$  的关系

Fig. 5 Relation between  $\delta_2$  and ultrasonic time

超声处理后胶模在电铸过程中的溶胀误差  $\delta_2$  与胶模线宽的关系如图 6 所示。图中所用掩模线宽分别为 50, 100, 200 和 400  $\mu\text{m}$ , 超声处理时间均为 10 min。从图中可以看出,对于不同线宽的胶模,电铸误差  $\delta_2$  的值几乎无变化。因此,对于不同线宽的胶模来说,10 min 超声处理均可以大大减小其在电铸过程中的溶胀。

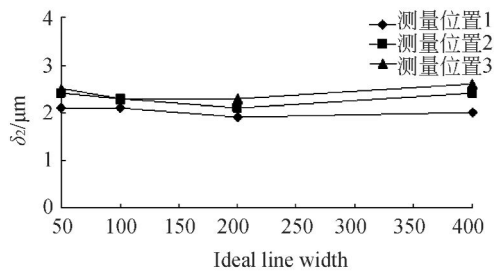


图 6 超声处理后的  $\delta_2$  与胶模线宽的关系

Fig. 6 Relation between  $\delta_2$  and line width of resist mould

试验结果表明, SU-8 胶模在电铸过程中的溶胀是影响微器件尺寸精度的主要因素,而且超声处理对 SU-8 胶模溶胀的影响主要发生在电铸过程中,因此,忽略胶模在显影过程中的溶胀。为了进一步研究 UV-LIGA 工艺中超声处理对 SU-8 胶模溶胀的去除作用,定义  $\alpha$  为超声处理后 SU-8 胶模的溶胀去除率,  $\delta_{\text{ultrasonic}}$  为未超声处理时的胶模尺寸误差,  $\delta_{\text{ultrasonic}}$  为超声处理后的胶模尺寸误差,  $\alpha = (\delta_{\text{ultrasonic}} - \delta_{\text{ultrasonic}}) / \delta_{\text{ultrasonic}}$ 。  $\alpha$  越大,超

声减小 SU-8 胶模溶胀的效果越好,电铸后微器件尺寸精度越高。当掩模线宽为 400  $\mu\text{m}$  时,在胶模高度 50  $\mu\text{m}$  处,不同超声时间下 3 个测量点处  $\alpha$  值如图 7 所示。 $\alpha$  值随超声时间的增加先增大后减小,10 min 时  $\alpha$  值最大。以测量点 1 为例,此时  $\alpha$  值高达 70%,说明经过 10 min 超声处理后胶模在 UV-LIGA 电铸工艺中的溶胀现象变得不明显,铸出的微器件尺寸精度得到很大提高。20 min 时  $\alpha$  值为负,表示此时超声处理反而增大了胶模的溶胀。

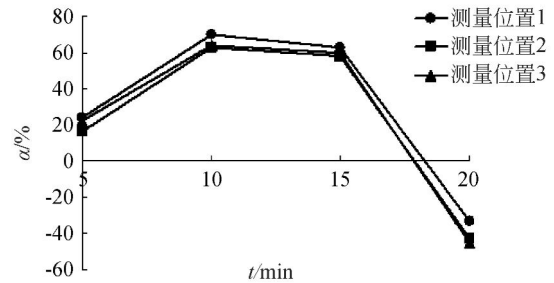


图 7  $\alpha$  与超声时间的关系

Fig. 7 Relation between  $\alpha$  and ultrasonic time

#### 4.3 SU-8 胶模表面接触角分析

为了探究超声处理对 SU-8 胶溶胀的影响机理,采用液滴形貌分析仪 (DSA100, KRÜSS GmbH),以电铸液为测试液,对不同超声时间处理下的 SU-8 胶模的接触角进行测试,结果如表 1 所示。0 min 表示超声处理前的 SU-8 胶模与电铸液的接触角。5, 10 和 15 min 超声处理后 SU-8 胶模与电铸液的接触角比超声前分别增加了 1.8, 9.4 和 7.4°,说明超声处理后 SU-8 胶模对电铸液的亲和能力下降。电铸液的主要成分为去离子水,因此,5, 10 和 15 min 超声处理降低了 SU-8 胶模的表面亲水性。其中,10 min 超声处理后 SU-8 胶模与电铸液的接触角增加最多,说明胶模的表面亲水性下降的最厉害。然而,20 min 超声处理后 SU-8 胶模与电铸液的接触角比超声前减少了 6.3°,说明 20 min 的超声处理使得 SU-8 胶模表面亲水性增加。因此,不同超声时间对 SU-8 胶模与电铸液的亲和能力有很大的影响。并且超声处理时间对 SU-8 胶模表面亲水性的影响规律与 SU-8 溶胀去除率随超声时间的变化趋势保持一致,这为探究超声时效对 SU-8 胶模溶胀的影响机理提供了实验依据。

表1 不同超声时间下SU-8胶模与电铸液的表面接触角  
Tab.1 Contact angle between SU-8 and electroforming solutions in different ultrasonic time

超声处理时间/min	0	5	10	15	20
表面接触角/(°)	68.1	69.9	77.5	75.5	61.8

## 5 机理分析

交联聚合物在溶胀平衡时的体积与聚合物中亲水性基团的含量及亲水能力、聚合物交联密度及聚合物链中固定电解质含量等结构因素有关,并且在很大程度上,交联聚合物的吸水量取决于聚合物中亲水基团的含量,因为亲水基团起到扩展分子链中三维网状结构和产生渗透压的作用<sup>[12-14]</sup>。交联反应后的SU-8胶分子结构中既有亲水性基团羟基又含有疏水基团芳香烃基。如图8(a)所示,电铸液中的溶剂水分子会与SU-8胶表面亲水基团进行水合作用,形成氢键,高分子网束随之扩展,亲水性的离子基团水解成为移动的离子,这样,SU-8胶分子网络内部和外部之间产生了离子浓度差,从而产生了内外的渗透压,在渗透压的作用下,水分子向SU-8胶网络结构中渗透,同时进入网络中的水又与内部亲水基团形成氢键,于是进一步有基团的水解和渗透压差,所以水源不断进入SU-8胶网络,表现为SU-8胶的溶胀现象。

超声波在媒介中传播时会引发介质的交替压缩与伸张,构成了压力的周期性变化,引起媒介点振动,使得媒介的质点产生位移、加速度等,从而对媒介造成强大的机械作用。超声波引发的强机械作用会使大分子物质中的共价键断裂,从而导致高分子物质的降解<sup>[15-16]</sup>。因此,超声处理交联固化后的SU-8胶模时会使得其分子链中的化学键断裂,并且键能低的羟基首先断裂。当超声处理时间较短时,SU-8胶分子链中羟基断裂的数目较少,SU-8胶表面亲水性变化不明显,进而电铸过程中胶模对电铸液的亲和能力变化很小,表现为超声处理对SU-8胶溶胀效果不明显。因此,经过5 min超声处理后的SU-8胶的表面亲水性与未超声样本相比几乎一样,并且电铸后SU-8胶模的溶胀去除率低于20%。随着超声处理时间的增加,如图8(b)所示,SU-8胶分子链中羟基

数目不断减少,胶模内亲水基团含量大大减少,进而电铸过程中SU-8胶模对电铸液的亲和能力明显下降;同时,超声也可以去除SU-8胶模在发生交联反应时分子链网络中形成的缺陷<sup>[12]</sup>,随着分子链缺陷的消除,SU-8胶内自由体积减小,溶剂不容易在胶体内扩散,从而表现为胶模溶胀减小。因此,10 min超声处理后的胶模亲水性远小于超声前,并且胶模溶胀去除率高达70%。如果继续延长超声处理时间,如图8(c)所示,羟基断裂的同时SU-8胶分子链中能量较高的化学键也会发生断裂。交联点处的化学键断裂使得SU-8胶的交联密度降低,交联网络孔径变大,吸水率提高;芳香烃基中化学键的断裂使得SU-8胶分子中疏水基团含量减少,疏水基团对水分子的阻碍作用减弱,于是SU-8胶的亲水性增加。因此,20 min超声处理后SU-8胶模的溶胀比未超声时要大。此时,交联的SU-8胶分子仍然保持三维网络结构,所以其只能溶胀不能溶解。

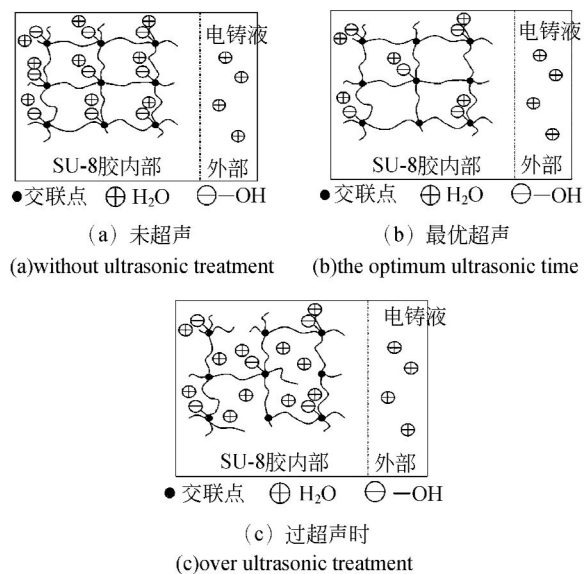


图8 不同超声时间下的SU-8胶模离子网络结构示意图

Fig. 8 Ion network of SU-8 photoresist in different ultrasonic time

SU-8胶的溶胀行为与其胶层中的内应力有着密切的关系,并且胶层内拉应力可以提高水分子在环氧树脂中的传输速率<sup>[17-18]</sup>。作者的前期研究已表明<sup>[11]</sup>:超声时效技术可以减小SU-8胶层中内应力,并且10 min是超声去应力的最优时间,SU-8胶层内应力去除率随超声时间的变化规

律与本试验中 SU-8 胶溶胀去除率的变化趋势保持一致。当超声时间较短时, SU-8 胶中交联网特征变化受超声振动影响较小, 胶层中内应力仍然很大, 内应力对溶剂分子传输的促进作用较强, 宏观表现为 SU-8 胶的溶胀现象十分明显。随着超声时间的增加, SU-8 胶层中内应力不断减小, 其对溶剂分子的传输作用不断减弱。经过 10 min 超声处理后, SU-8 胶层中内应力最低, 其对胶模吸湿的促进作用最弱, 因此 SU-8 胶的溶胀得到很大程度地降低。然而, 当继续延长超声时间时, SU-8 胶层中内应力相对于最优时间下的值开始增加, 其对溶剂分子传输的促进作用也开始增强, 最终导致胶模溶胀的越厉害。

## 6 结 论

UV-LIGA 工艺中, SU-8 胶模的溶胀发生在显影过程和电铸过程中。超声处理前后 SU-8 胶模在显影过程中的尺寸误差  $\delta_1$  相差很小, 并且不同超声时间下的  $\delta_1$  值变化不大, 因此超声处理对显影过程中 SU-8 胶模的溶胀影响很小。

超声处理主要影响 SU-8 胶模在电铸过程中

的溶胀。胶模在电铸过程中的尺寸误差  $\delta_2$  随着超声时间的增加呈现先增大后减小的趋势。10 min 是减小  $\delta_2$  的最优时间。但是继续延长超声时间, 例如 20 min 时,  $\delta_2$  值开始增大。

UV-LIGA 工艺中超声处理后 SU-8 胶模的溶胀去除率  $\alpha$  值随超声时间的增加先增大后减小, 10 min 时  $\alpha$  值最大高达 70%。超声处理改变了 SU-8 胶模的亲水性, 进而影响其在电铸过程中的溶胀。随着超声时间的增加, SU-8 胶的亲水性呈现先降低后增加的趋势, 这与 SU-8 胶的溶胀变化趋势一致。

超声处理影响 SU-8 胶模的溶胀, 其原因主要是由于超声波的强机械作用会使 SU-8 胶分子链中的化学键发生断裂。首先是键能低的羟基发生断裂, 随着超声波作用时间的不断增加, 交联点处的共价键和芳香烃基也会发生断裂。同时, 超声处理也可以去除 SU-8 胶模在发生交联反应时分子链网络中形成的缺陷, 随着分子链缺陷的消除, SU-8 胶内自由体积减小, 溶剂不容易在胶体内扩散, 从而表现为胶模溶胀减小。此外, 超声时效通过减小胶层内应力, 使得内应力对胶模吸湿的促进作用减弱, 从而减小胶模的溶胀。

## 参考文献:

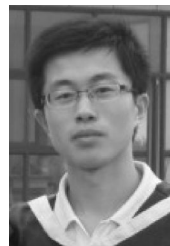
- [1] LORENZ H, DESPONT M, FAHRNI N, *et al.*. SU-8: a low-cost negative resist for MEMS [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1997, 7 (3): 121-124.
- [2] ZHANG J, TAN K L, GONG H Q. Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in micro-electro-mechanical systems (MEMS) [J]. *Polym. Test*, 2001, 20 (6): 693-70.
- [3] 杜立群, 刘海军, 秦江, 等. 微电铸器件铸层均匀性的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15 (1): 69-75.  
DU L Q, LIU H J, QIN J, *et al.*. Study on uniformity of micro-electroformed device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (1): 69-75. (in Chinese)
- [4] 黄新龙, 熊瑛, 陈光焱, 等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. *光学精密工程*, 2010, 18: 1152-1157.  
HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18: 1152-1157. (in Chinese)
- [5] DU L Q, LIU Y P, LI C B. Mechanism analysis of ultrasonic treatment on SU-8 swelling in UV-LIGA technology [J]. *Micro & Nano Letters*, 2011, 11, (6): 197-203.
- [6] 杜立群, 朱神渺, 刘冲. UV-LIGA 工艺中 SU-8 光刻胶的热溶胀性研究 [J]. *压电与声光*, 2008, 30 (5): 621-623.  
DU L Q, ZHU SH M, LIU CH. Study on the thermal swelling of SU-8 photoresist in UV-LIGA technique [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, 30 (5): 621-623. (in Chinese)
- [7] 刘冲, 李苗苗, 施维枝, 等. 基于 SU-8 厚胶光刻工艺的微电铸铸层尺寸精度控制新方法 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 179-185.  
LIU CH, LI M M, SHI W ZH, *et al.*. New method for dimensional precision control of electroformed parts by using micro electroforming technique with SU-8 thick photoresist [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47 (3): 179-185. (in Chinese)
- [8] RU F, RICHARD J F. Influence of processing con-

- ditions on the thermal and mechanical properties of SU-8 negative photoresist coatings[J]. *J. Micro-mech. Microeng.*, 2003, 13 (1): 80-88.
- [9] ZHOU Z, HUANG Q, LI W, *et al.*. The swelling effects during the development processes of deep UV lithography of SU-8 photoresist: theoretical study, simulation and verification[C]. *IEEE Conf. Proc. Sensor*, 2007: 325-328.
- [10] 刘嵩, 万震, 金益芬. 高吸水性聚合物吸液模型及性能测试方法评述[J]. *高分子材料科学与工程*, 2002, 18 (4): 26-29.  
LIU S, WAN ZH, JIN Y F. Superabsorbent polymer analysis and network structure[J]. *Polymeric Materials Science & Engineering*, 2002, 18 (4): 26-29. (in Chinese)
- [11] DU, L Q, WANG Q J. Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer [J]. *Microelectron. Eng.*, 2010, 87 (12): 2555-256.
- [12] FAN X J, LEE S W R, HAN Q. Experimental investigations and model study of moisture behaviors in polymeric materials [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2009, 49: 861-871.
- [13] 陈雪萍, 翁志学, 黄志明. 高吸水性树脂的结构与吸水机理[J]. *化工新型材料*, 2002, 30 (3): 19-21.  
CHEN X P, WENG ZH X, HUANG ZH M. Structure and water absorbing mechanisms of superabsorbent resin [J]. *New Chemical Materials*, 2002, 30 (3): 19-21. (in Chinese)
- [14] ZHANG S, KONG Y, DING Y, *et al.*. Effect of polymeric structure on Corrosion Protection of Epoxy Coatings [J]. *Corros. Sci.*, 2002, 44 (4): 861-869.
- [15] 张志健. 超声辅助浸提机理与影响因素分析[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(4): 399-400.  
ZHANG ZH J. Analysis on mechanism and influencing factors of ultrasonic assisted extraction [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(4): 399-400. (in Chinese)
- [16] CHEN J, CHEN Y, LI H, *et al.*. Physical and chemical effects of ultrasound vibration on polymer melt in extrusion [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2010, 17(1): 66-71.
- [17] WOURTERS K, PUERS R. Diffusing and swelling in SU-8: insight in material properties and processing [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, 20 (9): 1-10.
- [18] LEE M C, PEPPAS N A. Models of moisture transport and moisture-induced stresses in epoxy composites [J]. *J. Compos. Mater.*, 1993, 27 (12): 1146-1171.

#### 作者简介:



刘亚萍(1987—),女,山东菏泽人,硕士研究生,2009年于烟台大学获得学士学位,主要研究方向为超声波在UV-LIGA加工技术中的应用。E-mail: yapingliu008@126.com



李成斌(1986—),男,山东日照人,硕士研究生,2010年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事微加工工艺方面的研究。E-mail: lich\_simon@163.com



李永辉(1986—),男,山东烟台人,硕士研究生,2009年于山东理工大学获得学士学位,主要从事微注塑成型模具的制作方面的研究。E-mail: liyonghui654321@163.com



#### 导师简介:

杜立群(1966—),女,黑龙江望奎人,教授,博士生导师,1988年、1991年、1999年于东北大学分别获得学士、硕士和博士学位。主要研究方向为微机电系统、微器件UV-LIGA加工技术、微模具制造及超声波应用。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn