



超声处理减小 SU-8 胶层内应力的研究

杜立群^{①②*}, 王启佳^②, 张晓蕾^②

① 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连, 116024;

② 大连理工大学辽宁省微纳米及系统重点实验室, 大连, 116024

* E-mail: duliquan@dlut.edu.cn

收稿日期: 2009-11-24; 接受日期: 2010-08-19

国家自然科学基金(批准号: 50675025)资助项目

摘要 目前, SU-8 胶层中过大的内应力, 已经成为制约 SU-8 胶结构稳定性和实现更高深宽比的瓶颈问题之一。然而, 已有的研究工作都集中在工艺参数的优化和掩模板的设计上, 而且无法推广使用。本文旨在利用超声时效技术减小 SU-8 胶层中的内应力。讨论了利用超声时效技术减小 SU-8 胶层中内应力的机理。以改进的 Stoney 公式为基础, 建立了轮廓法测量 SU-8 胶层内应力的计算模型。实验研究了超声时效技术在减小 SU-8 胶层中内应力方面的作用。讨论了工作台振幅、输入功率和时效时间等重要参数对超声时效效果的影响, 并且对比分析了超声时效实验前、后 SU-8 胶层中的内应力值。研究结果表明, 选择合适的实验参数, 超声时效技术可以有效地减小 SU-8 胶层中的内应力, 该技术在非金属应力去除方面具有一定的实用价值。

关键词

超声时效
SU-8 光刻胶
内应力
轮廓法

高聚物 SU-8 光刻胶是一种基于 EPON SU-8 环氧树脂的负性、近紫外光刻胶。它具有优良的物理、机械以及抗化学腐蚀等性能, 因此 SU-8 光刻胶已经成为制作高深宽比 MEMS 器件的一种理想材料^[1]。然而, SU-8 胶层中内应力的存在, 极大地限制了 MEMS 结构的制作。内应力不仅会导致 SU-8 胶层出现裂纹、破坏结构的图形质量, 还会影响胶层与基底的结合强度。这些现象会随着胶层变厚而恶化。内应力已经成为制约 SU-8 胶结构稳定性和实现更高深宽比的瓶颈问题之一^[2]。为解决这一问题, 一些研究者开展了相关的工作。然而, 从公开发表的文献来看, 已有的研究工作都集中在工艺参数的优化和掩模板的设计上, 而且极大地依赖实验条件^[3~8]。这些方法只适合特定的微器件, 无法推广使用。因此, 探索一种新的减小 SU-8 胶内应力的方法对高深宽比结构的制作具有重要意义。

研究表明在降低金属内应力方面, 超声时效是一种非常重要的技术。它在降低内应力的同时, 也提高了金属材料的疲劳强度^[9~11]。然而, 目前还未见文献报道, 利用超声时效技术来改善 SU-8 胶层内应力状况。

本文利用自行研制的超声时效设备对 SU-8 光刻胶进行超声时效处理。并通过测量超声时效实验前、后 SU-8 胶层中内应力的变化情况, 来评估超声时效的效果。

1 超声时效去除 SU-8 胶层内应力的机理

SU-8 胶层中的内应力主要产生在后烘冷却阶段。在后烘阶段, SU-8 胶分子发生交联, 并使胶层结合在基底上。以硅基底为例, 由于 SU-8 胶的热膨胀系数 (50 ppm/K) 远大于硅基底的热膨胀系数 (2.3 ppm/K),

因此 SU-8 胶的收缩受到基底的限制, 胶层内出现较大的拉应力, 并使硅基底发生弯曲. SU-8/Si 结构变形情况如图 1 所示.

SU-8 胶的体积收缩是由分子交联引起的. 超声时效技术正是通过改变交联网的特征来达到减小 SU-8 胶层中内应力的目的. 这一过程主要体现在 3 个方面^[12~14].

1) 交联网缺陷的去除. 对于一个理想的交联网来说, 连接在两个交联点之间的分子链应该是单一且规则的, 如图 2(a)所示. 然而, 在实际的交联网中往往存在着很多缺陷. 例如, 两条分子链相互搭接, 如图 2(b), 或是单一分子链的“打结”现象, 如图 2(c)所示. 这些缺陷都会造成宏观上的体积收缩, 从而导致内应力的增加, 而且对于提高 SU-8 胶结构强度没有任何帮助.

分子链间相互搭接和单一分子链的“打结”, 都是由分子间作用力引起的. 分子间作用力的作用能比化学键能小 1~2 个数量级. 在进行超声时效的过程中, 注入 SU-8 胶层中的超声能量, 主要转化为热能和机械能. 热能表现为温度的升高. 通过利用红外热像仪 (FLIR A40 Infrared Thermometer, USA) 对 SU-8 胶层的测量, 可以得到 SU-8 胶层的温度从 26℃ 迅速上升, 并最终稳定在 44℃ 左右. 温度升高使分子热运动加快, 这在一定程度上减小了分子间的作用力,

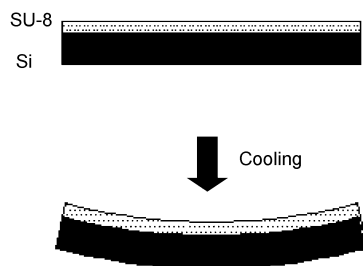


图 1 SU-8/Si 结构弯曲示意图

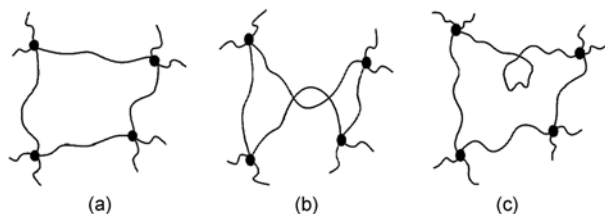


图 2 交联网缺陷的局部示意图

(a) 理想结构; (b) 缺陷 1; (c) 缺陷 2

再配合以振动形式表现的机械能, 即可消除交联网的缺陷, 从而降低胶层中的内应力.

2) 交联网的均化. 在 SU-8 胶交联固化的过程中, 往往不会形成理想的单一三维交联网状结构. 而是会形成几个大的交联网, 这些交联网之间会发生互穿, 从而形成互穿聚合物网络, 或是几个大的交联网简单地堆叠在一起. 这两种情况都会使交联网形成互相盘绕的联合体. 超声时效技术使超声能量以振动的形式作用在这一联合体上, 使互穿的交联网发生松动, 使堆叠的交联网分离开, 从而达到降低内应力的目的.

3) 交联网的局部破坏. 在超声时效的过程中, 当交联网中的一些分子链拥有足够的能量时, 就会发生断裂. 这在一定程度上破坏了交联网的结构. 部分分子链的断裂释放了 SU-8 胶层中的内应力, 使 SU-8 胶形成了新的稳定结构, 并且不会对结构强度造成太大影响.

当超声振动的频率在 20 kHz 以上时, SU-8 胶分子的能量会在短时间内迅速上升. 因此利用超声时效技术可以在较短的时间内达到消除 SU-8 胶内应力的目的.

2 SU-8 胶层内应力计算方法

测量薄膜内应力的常用方法有 3 种. 拉曼光谱法和 X 射线衍射法仅适用于晶体材料的内应力测量. 在后烘冷却阶段, SU-8 胶大分子发生交联固化从而形成不规则的交联网. 因此, 基底曲率法更适合于 SU-8 光刻胶内应力的测量.

基底弯曲的程度反映了胶层应力的大小, Stoney 公式给出了二者之间的关系^[15]

$$\sigma_{\text{St}} = \left(\frac{E_s}{1 - \nu_s} \right) \times \frac{t_s^2}{6Rt_f} \quad (1)$$

式中下标 s 和 f 分别对应于基底和薄膜, t 为厚度, R 为基底的曲率半径, E 和 ν 分别是基底的弹性模量和泊松比. 而未经特殊处理的硅片均存在一定的初始曲率, 考虑到这种初始曲率, Stoney 公式被修正如下^[16]

$$\sigma_{\text{St}} = \frac{E_s t_s^2}{6(1 - \nu_s)t_f} \times \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (2)$$

式中 R_0 , R 分别代表薄膜涂覆前后基底的曲率半径. (2) 式表明, 通过测量涂膜前后基底曲率半径的变化,

就可以计算出薄膜中的内应力.

Stoney 公式不依赖薄膜的杨氏模量和泊松比等物理参数, 但是 Stoney 公式成立的假设条件是薄膜厚度远小于基底厚度. 然而, SU-8 胶作为一种厚光刻胶, 其旋涂厚度一般达到几十甚至几百微米, 与硅基底的厚度相当. 在薄膜厚度与基底厚度可比的情况下, Atkinson 对 Stoney 公式进行了修正^[17]

$$\sigma_{st} = \left(\frac{1}{1+\delta} \right) \times \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s) t_f} \times \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right). \quad (3)$$

式中 $\delta = \frac{t_f}{t_s}$, 是薄膜与基底的厚度比. (3)式可以用来计算 SU-8 胶层中的内应力.

3 SU-8 胶层超声时效实验研究

3.1 实验设备

3.1.1 超声时效装置

超声时效实验所用的实验装置为自行研制的超声时效装置, 其整体结构如图 3(a)所示. 该设备包括超声波发生器、超声波换能器、超声波变幅杆, 以及用于固定实验样片的工作台, 如图 3(b)所示. 实验装置的工作频率为 20 kHz, 工作台的功率连续可调. 在超声时效的过程中, 超声波发生器将 50 Hz 的交流电信号转换为 20 kHz 的超声电振荡信号, 该信号通过超声换能器转换为频率为 20 kHz 的机械振动, 振动通过变幅杆放大振幅后传递到工作台上, 并带动被固定在工作台上的实验样片共同振动.

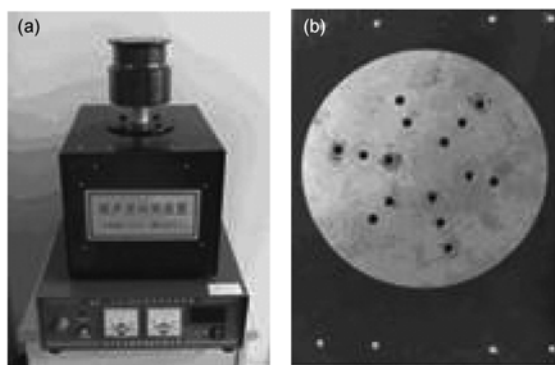


图3 自制的超声时效装置

(a) 整体图; (b) 工作台

3.1.2 夹具

如果置于工作台上的实验样片处于自由状态, 那么在超声时效的过程中, 实验样片将发生水平方向的运动. 制作夹具的主要目的, 就是限制实验样片的水平运动. 另外, 实验样片是 SU-8 胶层与硅片的双层结构, 而且硅片轻薄易碎, 因此要求夹具既要保证硅片装夹稳定, 又不能破坏 SU-8 胶层的表面结构. 为此采用环形夹具(厚度 2 mm)均匀固定样片边缘, 并且在环形夹具外围底部增加了略高于实验样片(厚度大约 300 μm)的凸台(厚度 380 μm). 在超声时效实验中共用到了 2 种夹具, 其具体结构如图 4 所示. 夹具的材料为 PMMA, 并且通过螺栓将实验样片固定在工作台上, 图 5 为样片装夹方式的简明示意图.

3.2 实验过程

研究表明, SU-8 胶层中的内应力主要产生于后烘冷却阶段, 并且在显影之后释放, 有时出现微观裂纹、扭曲, 甚至是胶体脱落现象. 因此, 超声时效实验安排在后烘之后显影之前.

实验选择(100)晶相、1.5 inch 大小的硅片, 并且采用 2075 SU-8 光刻胶(MicroChem Corporation, USA). 在实验之前, 利用电感测微仪测量硅片的厚度, 并且

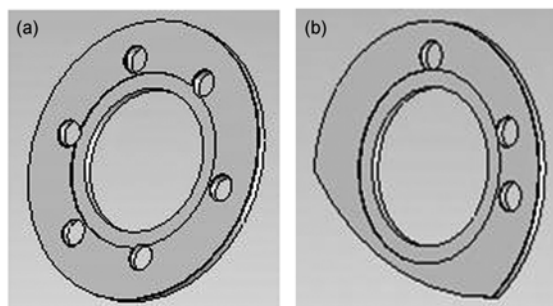
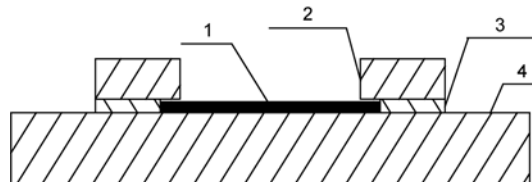


图4 两种 PMMA 夹具

(a) 夹具 1; (b) 夹具 2



1. 样片; 2. 环形夹具; 3. 环形凸台; 4. 工作台

图5 样片装夹示意图

用轮廓仪 (Surfcorder ET4000M, Kosaka Laboratory Ltd. Japan) 测量硅片表面的初始曲率, 测量结果如图 6 所示.

实验的工艺过程如下.

- 1) 采用标准清洗工艺清洗硅片, 并将硅片烘干;
- 2) 匀胶, 最大转速为 1500 r/min, 然后将实验样片置于水平表面放置 20 min, 使其自平整;
- 3) 前烘, 将实验样片置于水平热板上, 85℃, 75 min, 然后将其冷却至室温;
- 4) 曝光 5 min, 曝光剂量 400 mJ/cm²;
- 5) 后烘, 将实验样片置于水平热板上, 85℃, 5 min, 然后将其冷却至室温;
- 6) 用轮廓仪测量 SU-8 胶表面轮廓, 测量结果如图 7 所示;
- 7) 将实验样片置于工作台上进行超声时效处理;
- 8) 用轮廓仪测量 SU-8 胶表面轮廓, 测量结果如图 8 所示;
- 9) 显影;
- 10) 用电感测微仪测量胶厚.

3.3 实验结果

在甩胶之前, 利用电感测微仪测得硅片的平均

厚度为 230±5 μm. 在显影之后, 利用电感测微仪, 测得 SU-8 胶层的平均厚度为 70±10 μm. 影响超声时效效果的主要因素, 如工作台的振幅、输入功率和时效时间等, 将分别进行讨论.

3.3.1 振幅的影响

为了获得超声时效装置工作台表面的振幅分布情况, 根据实际尺寸, 建立了工作台的 ANSYS 有限元分析模型. 建模采用的单元为 SOLID45, 该单元有 UX, UY 和 UZ 三个自由度, 实体分析所需的 CUP 时间少, 却仍然能够获得足够精确的结果, 且分析结果不会受体积锁死的影响. 工作台的材料为钢, 其具体的材料参数如表 1 所示. 对实体建模进行模态分析和谐响应分析, 其分析结果如图 9 所示.

表 1 钢的材料性能参数

Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)
210	0.3	7850

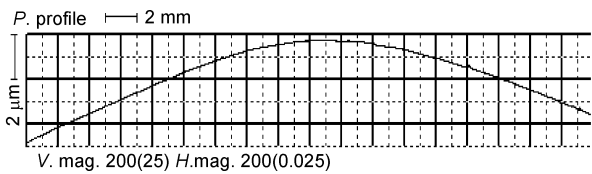


图 6 硅片的初始表面轮廓

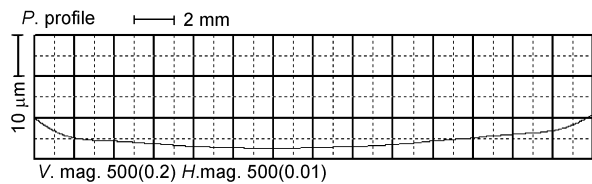


图 7 超声时效实验前 SU-8 胶表面轮廓

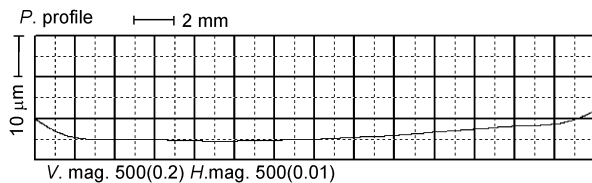


图 8 超声时效实验后 SU-8 胶表面轮廓

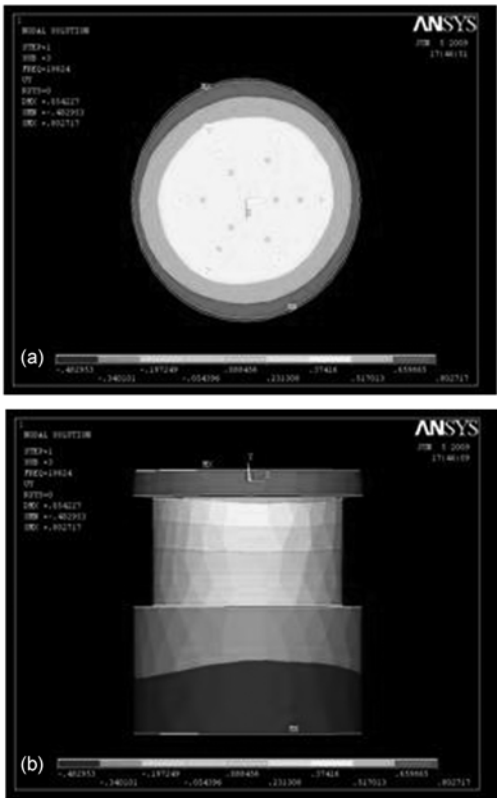


图 9 工作台振动分布情况
(a) 工作台表面; (b) 工作台台身

从图 9 可以看出, 超声时效装置的工作台上大致呈现 3 种振幅, 分别是 15, 17 和 19 μm . 另外, 利用电容拾振器对工作台表面的振幅进行了测量. 其测量结果表明, 工作台内部和边缘的振幅分别为 11 和 15 μm . 对比仿真结果和测量结果, 虽然两者在数值上存在一定差距, 但是工作台表面振幅的变化趋势是一致的, 均是从中间到边缘依次增大. 因此, 在实验过程中, 为了讨论振幅的影响, 要将样片分别固定在工作台的不同位置上, 如图 10 所示. 保持输入功率为 64 W, 时效时间分别为 5, 10, 15 和 20 min.

可以根据(3)式计算出内应力值. σ_1 和 σ_2 分别表示超声时效前后的应力值. σ_k 表示超声时效前后的应力差, $\sigma_k = \sigma_1 - \sigma_2$. 利用应力消除率 k 来评定超声时效去除 SU-8 胶层中内应力的效果, $k = \sigma_k / \sigma_1$. SU-8 胶表面 3 条互成 60°角的轮廓测量线的分布如图 11 所示. 轮廓仪的探针沿着图 11 所示的测量线划过, 就可以得到 SU-8 胶表面轮廓线, 而得到轮廓线就可以计算出相应的内应力值. 之所以选择通过圆心的不同位置的 3 条测量线, 是因为 SU-8 胶表面并非完全平整. 取 3 条测量线, 分别得到不同测量线的内应力值, 并计算出各内应力值的平均值, 将平均值作为整个 SU-8 胶层的内应力值, 并分别将其填入表 2~5 中. 这样做可以尽量减少由于胶面不平整而造成的误差.

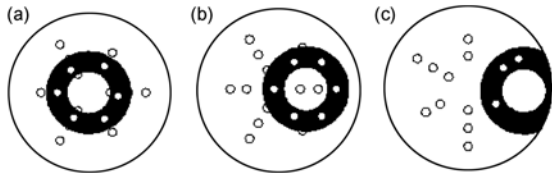


图 10 样片在工作台上的位置
(a) A 位置; (b) B 位置; (c) C 位置

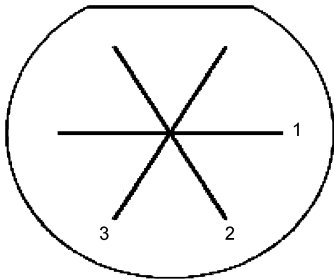


图 11 SU-8 光刻胶表面轮廓测量线

3.3.2 输入功率(激励电流)的影响

通过调节超声时效装置的激励电流可以改变其输入功率, 两者的具体关系如表 6 所示. 在实验过程中, 选择使用 0.2, 0.3 和 0.4 A 这 3 种激励电流. 同时, 保证实验样片一直固定在工作台上的 A 位置, 如图 10(a)所示, 时效时间分别为 5, 10, 15 和 20 min. 不同输入功率下超声时效前后平均应力对比情况, 如表 7~10 所示.

表 2 不同振幅下超声时效前后平均应力对比表(5 min)

Position	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
A	4.30	4.11	0.19	4.4
B	13.93	12.77	1.16	8.3
C	14.87	12.52	2.35	15.8

表 3 不同振幅下超声时效前后平均应力对比表(10 min)

Position	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
A	6.53	5.97	0.56	8.6
B	12.32	10.47	1.85	13.7
C	17.26	13.94	3.33	18.4

表 4 不同振幅下超声时效前后平均应力对比表(15 min)

Position	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
A	7.69	7.44	0.25	3.9
B	13.93	12.87	1.06	7.6
C	14.87	12.87	2.00	13.4

表 5 不同振幅下超声时效前后平均应力对比表(20 min)

Position	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
A	11.22	10.93	0.29	2.5
B	13.93	13.03	0.90	6.5
C	14.87	13.35	1.52	10.2

表 6 输入功率参数

Excitation current (A)	0.2	0.3	0.4
Voltage (V)	320	340	360
Power input (W)	64	102	144

表 7 不同输入功率下超声时效前后平均应力对比表(5 min)

Power input (W)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
64	4.72	4.47	0.25	5.2
102	6.85	6.12	0.73	10.6
144	10.49	8.80	1.69	16.2

表 8 不同输入功率下超声时效前后平均应力对比表(10 min)

Power input (W)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
64	6.53	5.97	0.57	8.6
102	21.14	17.18	3.96	18.1
144	3.65	2.72	0.93	26.6

表 9 不同输入功率下超声时效前后平均应力对比表(15 min)

Power input (W)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
64	7.69	7.44	0.25	3.9
102	7.22	6.84	0.38	5.3
144	13.53	12.02	1.51	11.2

表 10 不同输入功率下超声时效前后平均应力对比表(20 min)

Power input (W)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
64	11.22	10.93	0.29	2.5
102	8.94	8.56	0.38	4.2
144	13.53	12.22	1.31	9.7

3.3.3 超声时效时间的影响

超声时效的效果与时效时间密切相关. 在实验过程中, 超声时效的时间分别选定为 5, 10, 15 和 20 min. 保持输入功率为 64 W, 分别将实验样片固定在工作台上的 A, B, C 三个位置, 不同时效时间不同振幅下超声时效前后平均应力对比情况, 如表 11~13 所示.

始终将实验样片固定在工作台上的 A 位置, 并分别改变输入功率 64, 102 和 144 W, 不同时效时间不同输入功率下超声时效前后平均应力对比情况, 如表 14~16 所示.

4 分析与讨论

以上实验结果表明, 超声时效技术可以在一定程度上减小 SU-8 胶层中的内应力. 下面从时效时间、振幅和输入功率 3 方面加以讨论.

4.1 时效时间

不同振幅与功率下, 应力消除率与时效时间的关系, 分别如图 12, 13 所示. 在 10 min 之前, 应力消除率 k 随着时间的增长而增大. 在 10 min 时, 应力消除率 k 达到最大值. 从 10 到 15 min, 应力消除率 k 随着时间的增长而减小. 但是, 当时效时间超过 15 min 时, 应力消除率 k 趋于稳定.

在 SU-8 胶交联网络中, 通常有几条分子链连接在一个交联点上, 这种结构叫做交联单元, 如图 14 所示.

表 11 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(A 位置)

Time (min)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
5	4.30	4.11	0.19	4.4
10	6.53	5.97	0.57	8.6
15	7.69	7.44	0.25	3.9
20	11.22	10.93	0.29	2.5

表 12 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(B 位置)

Time (min)	σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	σ_k (Mpa)	k (%)
5	13.93	12.77	1.16	8.3
10	13.93	12.46	1.47	10.6
15	13.93	12.87	1.06	7.6
20	13.93	13.03	0.90	6.5

表 13 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(C 位置)

Time (min)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
5	14.87	12.52	2.35	15.8
10	14.87	11.10	3.77	25.4
15	14.87	12.87	2.00	13.4
20	14.87	13.35	1.52	10.2

表 14 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(64 W)

Time (min)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
5	4.30	4.11	0.19	4.4
10	6.53	5.97	0.57	8.6
15	7.69	7.44	0.25	3.9
20	11.22	10.93	0.29	2.5

表 15 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(102 W)

Time (min)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
5	6.97	6.14	0.83	11.9
10	8.62	6.62	2.00	23.2
15	7.22	6.84	0.38	5.3
20	8.94	8.56	0.38	4.2

表 16 不同时效时间下超声时效前后平均应力对比表(144 W)

Time (min)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_k (MPa)	k (%)
5	13.53	11.73	1.80	13.3
10	13.53	9.46	4.07	30.1
15	13.53	12.02	1.51	11.2
20	13.53	12.22	1.31	9.7

SU-8 胶作为一种高聚物, 其具有粘弹性的特点. 因此选择用 Maxwell 模型来描述交联单元的力学行为, 该模型由一个弹簧和一个粘壶串联而成, 由弹簧来表征弹性特点, 而由粘壶来表征粘性特点. 然而, 当超声振动作用于交联单元上时, 由于振动频率过高, 使得

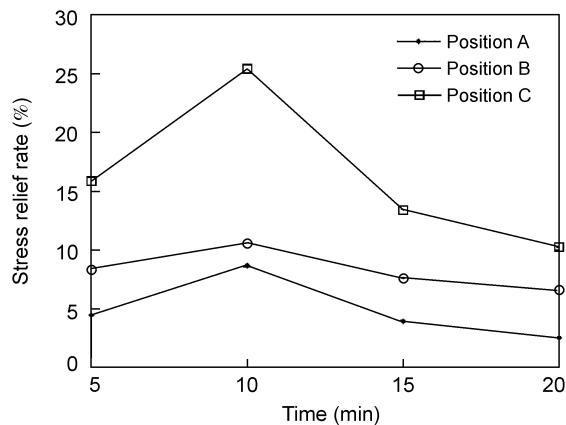


图 12 不同振幅下应力消除率与时效时间的关系

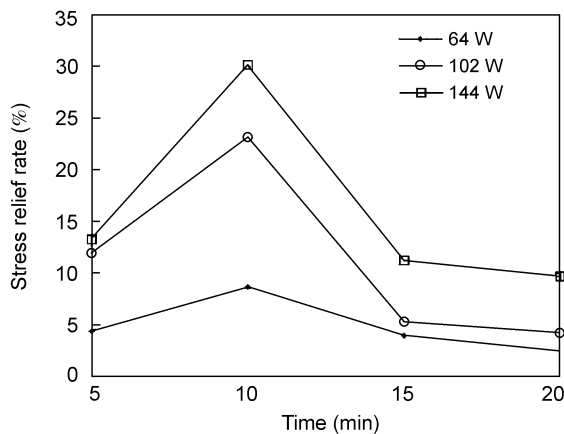


图 13 不同功率下应力消除率与时效时间的关系

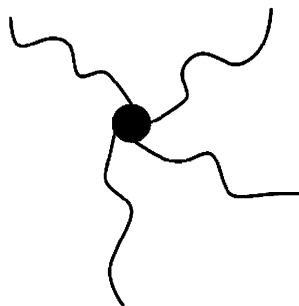


图 14 交联单元

粘壶根本来不及有任何流动产生. 另外, 在后烘冷却阶段过后, 交联单元处于玻璃态, 其主要显示弹性. 因此, Maxwell 模型可以简化为一个弹簧质量系统.

由图 12, 13 观察可知, 曲线上 5 到 10 min 这一阶段, 在超声振动的作用下, 交联单元以其交联点为中心, 返回到平衡位置. 因此 SU-8 胶层中的内应力

持续降低, 应力消除率 k 一直增大. 从 10 到 15 min 这一阶段, 由于超声能量持续注入到 SU-8 胶层中, SU-8 交联网发生均化并且部分交联网的缺陷被去除, 这使得部分交联点之间的距离发生了改变, 从而一些交联单元发生变形. 因此表征这些交联单元的弹簧质量系统的刚度发生了改变, 这就造成处于平衡位置的部分交联单元的共振频率发生了变化. 这些交联单元在超声振动的作用下, 又离开了平衡位置, 因而 SU-8 胶层中的内应力有增大的趋势, 应力消除率 k 有所下降. 当时效时间超过 15 min 之后, 这两种作用达到平衡, SU-8 胶层中的内应力逐渐稳定, 因此曲线趋于平缓, 应力消除率 k 变化不大.

4.2 振幅和输入功率(激励电流)

不同超声时效时间下, 振幅和输入功率与应力消除率的关系, 分别如图 15, 16 所示. 从以上两图可

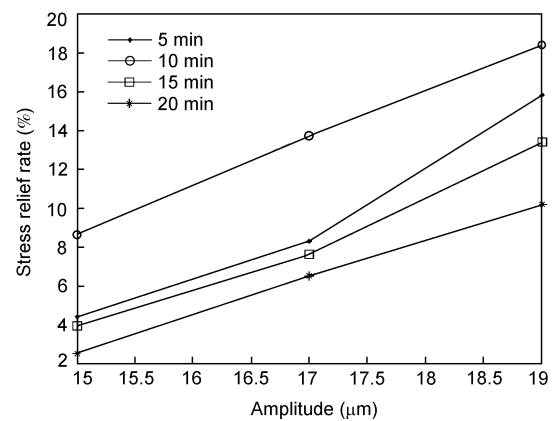


图 15 不同时效时间下应力消除率与振幅的关系

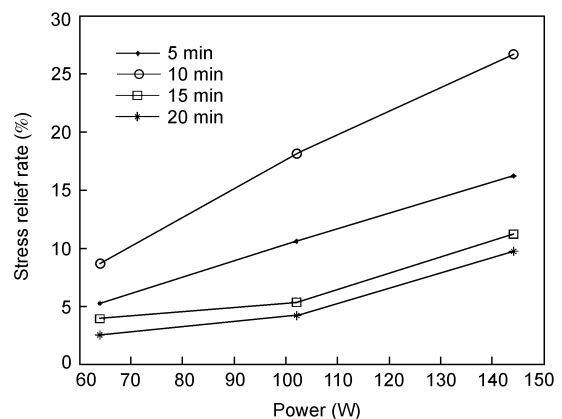


图 16 不同时效时间下应力消除率与输入功率的关系

以看出, 应力消除率 k , 随着振幅和输入功率的增大而增加. 振幅的增大和输入功率的增加都会提高超声振动的能量. 这会使 SU-8 胶层内分子热运动更加快速且剧烈. 因此, 应力消除率 k 持续提高, 曲线一直呈现上升趋势.

5 结论

本文讨论了超声时效去除 SU-8 胶层内应力的机理, 实验研究了超声振动对 SU-8 胶内应力的影响. 实验结果表明, 超声振动可以减小 SU-8 胶层中的内

应力. 在现有的实验条件下, 多组实验结果表明, 最佳的超声时效时间为 10 min, 当时效时间超过 15 min 时, 超声时效的效果就不再明显. SU-8 胶层的应力消除率 k 随着振幅和输入功率的增大而增加.

超声时效技术在金属去应力方面已经有数十年的应用. 然而将该技术应用于微观领域, 特别是降低聚合物 SU-8 胶层中的内应力才刚刚起步, 对于不同影响因素的优化组合还有待研究, 因此参数优化和超声时效技术在具体微结构制作过程中的应用, 将是下一步工作方向.

参考文献

- 1 张立国, 陈迪, 杨帆, 等. SU-8 胶光刻工艺研究. 光学精密工程, 2002, 10: 266–269
- 2 Li B, Chen Q F. Low-stress ultra-thick SU-8 UV photolithography process for MEMS. Microlith Microfab Microsyst, 2005, 4: 043008
- 3 Chang H K, Kim Y K. UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shape etch hole. Sens Actuators A-Phys, 2000, 84: 342–350
- 4 杜立群, 朱神渺. 微机电系统中 SU-8 厚光刻胶的内应力研究. 光学精密工程, 2007, 15: 1377–1382
- 5 Lorenz H, Despont M, Fahrni N, et al. High-aspect-ratio, ultra thick, negative-tone near UV-LIGA photoresist and its applications for MEMS. Sens Actuators A-Phys, 1998, 64: 33–39
- 6 Williams D J, Wang W J. Study on the post-baking process and the effects on UV lithography of high aspect ratio SU-8 microstructures. Microlith Microfab Microsyst, 2004, 3: 563–568
- 7 张金娅, 陈迪, 朱军, 等. 超厚 SU-8 负胶高深宽比结构及工艺研究. 功能材料与器件学报, 2005, 11: 251–254
- 8 明平美, 朱荻, 胡洋洋, 等. 基于 UV-LIGA 技术制造微结构器件试验研究. 中国机械工程, 2006, 17: 2216–2219
- 9 王东坡, 曹军辉, 霍立兴, 等. 承载超声冲击方法改善高应力比加载条件管接头疲劳性能. 机械工程学报, 2006, 42: 144–148
- 10 He W, Cheng X Y, Shen R J. Research on high-frequency vibratory stress relief for small assembly. In: Proceedings of 1st IEEE-NEMS. Chicago: IEEE, 2006, 1428–1431
- 11 He W, Ma Z Y, Wang X L. Technology of quantitative analysis on vibratory stress relief based on ultrasonic time-of-arrival method. Chin J Mech Eng (English Edition), 2005, 18: 461–463
- 12 Kubenz M, Ostrzinski U, Reuther F, et al. Challenges of processing thick and ultra-thick photoresist films. In: Proceedings of SPIE, 2003, 5039: 1272–1280
- 13 Ochi M, Yamashita K, Shimbo M. The mechanism for occurrence of internal stress during curing epoxide resins. J Appl Polym Sci, 1991, 43: 2013–2019
- 14 Shimo M, Ochi M, Shigeta Y. Shrinkage and internal stress during curing of epoxide resins. J Appl Polym Sci, 1981, 26: 2265–2277
- 15 Klein A C. How accurate are Stoney's equation and recent modifications. J Appl Phys, 2000, 88: 5487–5489
- 16 安兵, 张同俊, 袁超, 等. 用基片曲率法测量薄膜应力. 材料保护, 2003, 36: 13–15
- 17 Lorenz H, Laudon M, Renaud P. Mechanical characterization of a new high-aspect-ratio near UV-photoresist. Microelectron Eng, 1998, 41-42: 371–374