论 文

采用PDMS芯模微电铸成形镍微齿轮

周波^{1,2}, 吴有智^{1*}, 苏博^{2*}, 孟军虎², 韩杰胜², 张兴凯²

1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000

* E-mail: youzhiwu@163.com; bosu@licp.cas.cn

收稿日期: 2017-11-07; 接受日期: 2018-03-21; 网络版发表日期: 2018-12-04

国家自然科学基金(批准号: 51705509)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划和甘肃省自然科学基金(批准号: 17JR5RA320)资助项目

摘要 以 $\Phi 3.60\text{ mm} \times 0.18\text{ mm}$ 的微齿轮作为模板, 先用软刻蚀技术制备聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性模具, 通过将PDMS模具黏附在石墨基片上与在PDMS模具表面喷金制备成两种不同的芯模, 再采用微电铸技术成形镍微齿轮. 通过对在两种不同芯模上制备的镍微齿轮的结构完整性、铸层的生长方式和物相组成进行对比, 分析芯模对微电铸成形的影响. 结果表明: 表面喷金的PDMS芯模可以精确复制微齿轮模板的微结构. 相比于在喷金的PDMS芯模上微齿轮的逐层生长, 在石墨基片上微齿轮是以外延的方式生长, 在微齿轮中易产生裂纹等缺陷. 两种芯模上制备的镍微齿轮晶粒尺寸基本相同, 但相比于将PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模, 在喷金的PDMS芯模上成形的镍微齿轮(200)晶面择优取向增强, (111)晶面择优取向减弱, 且残余应力更小.

关键词 微电铸, 软刻蚀, 微结构, 微齿轮, PDMS

1 引言

微电铸技术具有复制精度高、低成本、可成形复杂形状微结构和纳米晶金属材料等优点^[1,2], 但现有微电铸技术使用的芯模制备工艺繁琐、制作周期长, 且使用寿命短、成本高昂, 这些缺点严重制约了微电铸技术在微成形制造领域的广泛应用. 目前微电铸技术中通常使用的芯模由光刻或离子刻蚀技术制备的微结构黏附在导电基片上制成^[3], 如将光刻胶SU-8光刻蚀制备的微结构黏附在金属基片上用作芯模, 首先其制备过程中需要大型、昂贵的光刻设备, 其次SU-8微结构中存在的较大内应力^[4]与其在微电铸液中的溶胀现

象会影响微型零件的成形精度^[5], 而且SU-8微结构的去除困难^[6]. 因此, 新型微电铸芯模的制备成为微电铸技术发展的关键.

软刻蚀技术是利用弹性聚合物材料复制和转移原始模板表面微纳结构的一系列微纳成形技术^[7], 聚二甲基硅氧烷(PDMS)是软刻蚀技术中最常用的弹性聚合物材料, 其具有低成本、耐腐蚀、经久耐用、可精确复制模板表面微纳结构等优点^[8,9], 常被用来制备微流体器件和模具^[10-12]. 目前, 用软刻蚀技术制备的PDMS模具也开始少量地应用于微电铸, 如BONNAS等用表面沉积了石墨的PDMS模具作为芯模, 石墨涂层不仅导电, 还在脱模过程中起到脱模剂的作用^[13];

引用格式: 周波, 吴有智, 苏博, 等. 采用PDMS芯模微电铸成形镍微齿轮. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 182-188

Zhou B, Wu Y Z, Su B, et al. Fabrication of nickel micro gears by microelectroforming using PDMS molds (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 182-188, doi: 10.1360/N092017-00383

Liu等人^[14]通过在复制有微结构的PDMS模具表面喷金以实现模具的导电性, 后用微电铸技术成功制备了镍微齿轮. 在复制有微结构的PDMS模具表面喷涂一层石墨或金属使其导电作为微电铸芯模, 其缺点是在脱模过程中, 由于尺寸效应, 微结构与芯模间的强界面粘着容易导致导电涂层脱落或遭到破坏, PDMS芯模的使用寿命短, 仅能使用一次.

本文使用软刻蚀技术成形PDMS模具, 然后用PDMS模具制备成两种不同的芯模, 再用微电铸技术成形镍微齿轮. 其中, 与传统的微电铸芯模类似, 一种芯模由PDMS模具黏附在石墨基片上制成. 石墨基片不仅具有良好的导电性, 而且使得成形后的微齿轮易于从石墨基片上剥离, 可避免对微齿轮结构的损伤^[15]. 另一种芯模为表面经过喷金处理的PDMS模具. 通过对成形的镍微齿轮的结构完整性、铸层的生长方式和物相组成进行研究, 对基于两种不同芯模的微电铸技术进行对比.

2 实验

2.1 材料

PDMS(Sylgard 184, Dow Corning), 镍片(纯度大于99.99%), 石墨基片(尺寸为 $\Phi 25.10 \text{ mm} \times 5.20 \text{ mm}$), 微齿轮模板为白铜微齿轮(以镍为主要添加元素的铜基合金, 尺寸为 $\Phi 3.60 \text{ mm} \times 0.18 \text{ mm}$, 齿根宽为 $130 \mu\text{m}$, 如图1所示), 瓦特液($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 300 g/L ; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 60 g/L ; H_3BO_3 , 40 g/L ; 十二烷基磺酸钠, 0.2 g/L ; 糖精, 4 g/L).

2.2 芯模的制备

石墨基片的前处理: 分别用1000, 2000, 5000目砂纸将石墨基片打磨抛光, 以降低石墨基片的表面粗糙

图1 白铜微齿轮模板的表面形貌. (a) 微齿轮模板; (b) 齿结构

度; 将抛光好的石墨基片放入去离子水中超声清洗5 min, 取出后用去离子水反复冲洗以去除表面残留物; 将石墨基片吹干待用. 芯模的制备流程分为PDMS模具的制备和芯模的制备两步(如图2所示).

PDMS模具的制备: 将微齿轮模板在丙酮和去离子水中分别超声清洗5 min, 吹干后放置在石墨基片上(图2(a)); 将PDMS预聚体和固化剂按体积比10:1均匀混合, 放置在真空箱中除尽其中的气泡; 把PDMS混合液均匀浇注在微齿轮周围, 待微齿轮周围被PDMS混合液填充完全, 放置在真空箱中除尽气泡; 在 100°C 下固化30 min, 冷却至室温(图2(b)).

芯模的制备: 用镊子将微齿轮模板从PDMS芯模中取出(图2(c))后即可直接作为第一种芯模(由黏附在石墨基片上的PDMS模具和石墨基片制成); 将从石墨基片上剥离下来的PDMS模具表面喷金后制得第二种芯模(图2(d')).

2.3 微齿轮的制备

本实验分别用以上两种不同的芯模作为阴极在瓦特液中微电铸成形镍微齿轮: 将镍片和芯模分别放置在CHI660D电化学工作站的辅助电极和工作电极, 两极的间距为4 mm; 将瓦特液放置在油浴锅中, 使温度保持在 50°C ; 将瓦特液的pH调整到4.0, 在电流密度为 2 A/dm^2 的条件下进行直流微电铸(图2(d)和(e)); 微电

图2 (网络版彩图)采用PDMS芯模微电铸成形镍微齿轮的工艺流程. 采用石墨基片表面黏附有PDMS模具的芯模微电铸成形镍微齿轮: (a)~(c) PDMS模具的制备; (d) 微电铸; (e) 脱模; (f) 镍微齿轮. 采用PDMS表面喷金的芯模微电铸成形镍微齿轮: (a)~(c) PDMS模具的制备; (d') 喷金; (e') 微电铸; (f') 脱模

铸20 h后, 将镍微齿轮从PDMS芯模中取出(图2(e)和(f)); 使用5000目砂纸对镍微齿轮表面进行打磨抛光, 去除镍微齿轮表面黏附的PDMS和杂质.

2.4 表征

采用JSM-5600LV型扫描电子显微镜观察微齿轮模板、PDMS模具黏附在石墨基片上组成的芯模和镍微齿轮的表面形貌; 采用FEG-450热场发射型扫描电子显微镜观察喷金PDMS芯模表面形貌; 采用Bruker D8 Discover型高分辨X射线衍射仪分析镍微齿轮的物相组成和残余应力, 其中管电压为40 kV, 管电流为40 mA, 扫描速率为10°/min. 测试残余应力时选择Ni(111)面作为衍射面, 扫描模式为侧倾模式, 扫描的起始角和终止角分别为43°和47°, 侧倾角 ψ 分别取0°, 11.25°, 22.50°, 33.75°和45.00°.

3 结果与讨论

3.1 芯模

图3(a)和(b)是软刻蚀制备的PDMS模具黏附在石墨基片上组成的芯模, 可以看出, PDMS可精确复制微

图3 (网络版彩图)将PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模及其表面元素分布

齿轮模板的齿结构, 但不能复制得到微齿轮模板中心处的圆形微凸和孔结构. 从其表面元素分布可以看出, 在将微齿轮模板取出后仅漏出圆形微凸所在处的石墨基片, 而在微齿轮微凸处之外的其他地方形成PDMS薄层, 这主要是因为在使用PDMS复制微齿轮模板时PDMS的流动造成.

图4(a)和(b)是软刻蚀制备的PDMS模具经过表面喷金处理制得的芯模, 可以看出, 喷金制备的芯模结构更加完整, 微结构的尺寸也可被精确复制. 在将微齿轮模板取出后, 不仅可精确复制微齿轮模板的齿结构, 微齿轮模板中心处的圆形微凸和孔结构也被精确复制. 这主要是因为, 在芯模的制备过程中, 由于不需要露出导电的石墨基片, 可在微齿轮模板的周围和中心轴孔处浇注PDMS, 即可完整地复制微齿轮结构. 从其表面元素分布可以看出, PDMS模具表面喷金时, 无法在芯模型腔处进行精确的喷金处理, 整个PDMS模具表面都会有导电层覆盖.

图4 (网络版彩图)PDMS表面喷金制成的芯模及其表面元素分布

图5 (网络版彩图)镍微齿轮的表面形貌与元素分布。(a)~(c) 采用石墨基片表面黏附有PDMS模具的芯模成形的镍微齿轮;(a')~(c') 采用PDMS表面喷金的芯模成形的镍微齿轮

3.2 镍微齿轮

图5是在两种芯模上微电铸成形的镍微齿轮。图5(a)是在由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模上成形的镍微齿轮,可以看出虽然微齿轮的齿结构完整,但由于PDMS模具的不完整,未能制得微齿轮的圆形微凸和孔结构,其内部还存在裂纹。图5(a')是在喷金的PDMS芯模上成形的镍微齿轮,可以看出制得的微齿轮结构非常完整。由于喷金的PDMS芯模精确复制了微齿轮模板中心处的圆形微凸和孔结构,通过这种方法制备的芯模结构非常完整,因此在喷金的PDMS芯模上微电铸成形的镍微齿轮结构完整无缺陷,微齿轮中心的圆形微凸和孔结构也可被精确复制。但在脱模过程中,由于镍微齿轮与芯模间的强界面粘着,一方面使得PDMS芯模容易被破坏,部分PDMS黏附在镍微齿轮表面难以去除;另一方面容易导致PDMS芯模表面的金在脱模过程中随着微齿轮脱落,需要经过后续的打磨抛光将其去除。

图5(b)和(b')是镍微齿轮的齿结构,可以看出在两种芯模上均可精确制得微齿轮的齿结构。然而在脱模时,由于镍微齿轮容易从石墨基片上剥离,齿结构未

发生破坏。而喷金的PDMS芯模上在脱模过程中少量PDMS黏附在镍微齿轮表面。从图5(c)和(c')镍元素的分布可以看出,在石墨基片上进行微电铸可得独立的微零件,而由于喷金时整个PDMS模具表面都会有导电层覆盖,在微电铸微齿轮时镍会在整个表面生长,导致喷金的PDMS芯模上无法得到独立的微齿轮。因此,使用由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模更适合微图案的微电铸制备,而喷金的PDMS芯模适合微电铸成形三维的微型零件。

3.3 生长方式

图6是两种不同芯模上制得的镍微齿轮的啮合,可以看出石墨基片上成形的微齿轮齿结构中有明显的裂纹,而在喷金的PDMS芯模上制得的微齿轮齿结构完整无缺陷。

微齿轮的质量与在芯模中铸层的生长方式相关。在由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模上成形微齿轮时,首先在裸露出来的石墨基片上形核生长,随后以外延生长的方式填充PDMS芯模的微齿轮结构(图7(a))。由于电流的边缘效应,电力线容易在芯模齿结构的尖角、边缘处密集,而齿结构中部电力线相对稀疏^[1],导致齿结构边缘处铸层的生长速率大于齿结构中部铸层的生长速率,从而在齿结构中形成封闭的裂纹^[16]。而在喷金的PDMS芯模上微电铸成形微齿轮时,由于整个芯模表面导电,在微电铸过程中铸层以逐层生长的方式填充芯模(图7(b)),避免了裂纹等缺陷

图6 两种不同芯模上制得的镍微齿轮的啮合。(a) 采用石墨基片表面黏附有PDMS模具的芯模成形的镍微齿轮;(b) 采用PDMS表面喷金的芯模成形的镍微齿轮

图7 (网络版彩图)不同芯模上微电铸微齿轮的生长方式。(a) 石墨基片表面黏附PDMS模具的芯模; (b) PDMS表面喷金的芯模

的产生。

3.4 芯模对镍微齿轮物相组成的影响

图8为在不同芯模上成形的镍微齿轮的XRD谱。图中 44.6° 、 51.9° 和 76.5° 处3个峰分别对应镍的(111)、(200)和(220)晶面衍射峰。由XRD谱可知, 在由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模和喷金的PDMS芯模上制得的微齿轮在晶粒尺寸和晶面择优取向会有区别。

根据X射线理论, 在晶粒尺寸小于100 nm时, 衍射峰宽化会随着晶粒尺寸变小变得显著, 考虑样品的吸收效应及结构对衍射线型的影响, 样品的晶粒尺寸可以用Debye-Scherrer公式计算^[17,18]。

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

式中, D_{hkl} 表示沿垂直于晶面(hkl)方向的晶粒直径; k 表示Scherrer常数; λ 表示X射线波长; θ 表示布拉格衍射角; β 表示衍射峰的半高宽。根据公式的计算结果, 在

图8 (网络版彩图)不同芯模上制得的镍微齿轮XRD谱

由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模和喷金的PDMS芯模上成形的镍微齿轮的平均晶粒尺寸分别为16.9和18.1 nm。

对微齿轮的微观结构做进一步分析, 晶面的织构系数可用 $T_{c(hkl)}$ 表示如下^[19]。

$$T_{c(hkl)} = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{\sum I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, $I_{(hkl)}$, $I_{0(hkl)}$ 分别为镍微齿轮和标准镍片(hkl)晶面的衍射强度, $T_{c(hkl)}$ 值越大, 则对应晶面择优取向程度越高。根据公式计算结果, 在由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模上(111)、(200)和(220)晶面的织构系数分别为20.2%、66.9%和12.9%。在喷金的PDMS芯模上(111)、(200)和(220)晶面的织构系数分别为10.2%、84.3%和5.5%, 表明与石墨基片相比, 在喷金的PDMS芯模上微电铸的镍微齿轮(200)晶面生长取向明显增强, (111)晶面生长取向减弱。对于面心立方金属, 晶体的内应力与(hkl)和(100)晶面的夹角大小线性相关^[14]。因此, 可以根据(hkl)和(100)晶面的角度来估算镍微齿轮中的残余应力。由计算得(111)、(200)和(220)与(100)晶面的夹角分别为 54.7° 、 0° 和 45° , 其中(200)晶面与(100)晶面的夹角最小, 随着(200)晶面择优取向的增加, 镍微齿轮中的残余应力会逐渐减小。根据织构系数的变化, 相比于由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模上微电铸的镍微齿轮, 在喷金的PDMS芯模上得到的镍微齿轮中残余应力更小。

图9为不同芯模上成形镍微齿轮的Ni(111)衍射面在不同的 ψ 角下的XRD谱。根据X射线宏观残余应力测试原理, 测量不同的 ψ 角对应的衍射角 2θ , 采用式(3)~(5)求出 2θ 对 $\sin^2\psi$ 的斜率, 进而计算出残余应力^[20,21]。

$$\sigma = K \cdot M, \quad (3)$$

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cot \theta_0, \quad (4)$$

$$M = \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)}, \quad (5)$$

式中, K 表示应力常数; M 表示 2θ 对 $\sin^2\psi$ 的变化斜率; E 表示材料的弹性模量; ν 表示材料的泊松比; θ_0 表示无应力状态下的布拉格衍射角; θ 表示与入射线成 ψ 角的布拉格衍射角; ψ 表示试样表面法线与衍射晶面法线的夹角。根据式(3)~(5)的计算结果, 在由PDMS模具

图 9 (网络版彩图)不同芯模上微电铸成形的微齿轮中的残余应力. (a) 石墨基片表面黏附PDMS模具的芯模; (b) PDMS表面喷金的芯模

黏附在石墨基片上制成的芯模和喷金的PDMS芯模上成形的镍微齿轮中的残余应力分别为 -191.15 和 -121.73 MPa. 相比于由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模, 在喷金的PDMS芯模上微电铸成形的镍微齿轮中残余应力更小, 这与根据织构系数变化推测的结果一致.

4 结论

(1) 由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模不能完整地制备镍微齿轮, 但可以得到独立的微型零件, 适合微图案的微电铸成形. 在喷金的PDMS芯模上微电铸成形的镍微齿轮结构完整无缺陷, 但需要后续

的打磨抛光, 以去除黏附在镍微齿轮表面的PDMS和金涂层.

(2) 在由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模中微电铸镍微齿轮时, 铸层通过外延的方式生长, 易在齿结构中产生裂纹; 在喷金的PDMS芯模上微电铸微齿轮时, 铸层通过逐层生长的方式生长, 微结构完整无缺陷.

(3) 与由PDMS模具黏附在石墨基片上制成的芯模相比, 在喷金的PDMS芯模上微电铸成形的镍微齿轮(200)晶面择优生长取向明显增强, (111)晶面择优生长取向减弱. 两种芯模上制备的镍微齿轮的晶粒尺寸分别为 16.9 和 18.1 nm, 但在喷金的PDMS芯模上制备的镍微齿轮中残余应力更小.

参考文献

- 1 李冠男, 黄成军, 罗磊, 等. 微电铸技术及其工艺优化进展研究. *微细加工技术*, 2006, 6: 1-5
- 2 Shen C J, Zhu Z W, Zhu D. A bulk of uniform nanocrystalline copper with superior comprehensive mechanical properties electroformed in an ultra-low sulfate concentration bath without additives. *Mater Sci Eng-A*, 2017, 704: 238-245
- 3 Wang K, He B, Li M, et al. Fabrication of biomimetic wet adhesive pads with surface microstructures by combining electroforming with soft lithography. *Surf Eng Appl Electrochem*, 2012, 48: 99-104
- 4 Du L, Wang Q. Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer. *Microelectron Eng*, 2010, 87: 2555-2560
- 5 Du L Q, Zhang B Z, Liu Y P. Reducing SU-8 hygroscopic swelling by ultrasonic treatment. *Nano-Micro Lett*, 2010, 2: 197-203
- 6 Dentinger P M, Clift W M, Goods S H. Removal of SU-8 photoresist for thick film applications. *Microelectron Eng*, 2002, 61-62: 993-1000
- 7 Xia Y, Whitesides G M. Soft lithography. *Angew Chem Int Ed*, 1998, 37: 550-575
- 8 Qin D, Xia Y, Whitesides G M. Soft lithography for micro- and nanoscale patterning. *Nat Protoc*, 2010, 5: 491-502
- 9 Chen X, Qu N, Li H, et al. Electrochemical micromachining of micro-dimple arrays using a polydimethylsiloxane (PDMS) mask. *J Mater Process Tech*, 2016, 229: 102-110
- 10 Mogi K, Sugii Y, Yamamoto T, et al. Rapid fabrication technique of nano/microfluidic device with high mechanical stability utilizing two-step soft lithography. *Sens Actuat B-Chem*, 2014, 201: 407-412

- 11 Hwang Y, Paydar O H, Candler R N. 3D printed molds for non-planar PDMS microfluidic channels. *Senss Actuat A-Phys*, 2015, 226: 137–142
- 12 Su B, Zhang A, Meng J, et al. Soft lithography of ceramic microparts using wettability-tunable poly(dimethylsiloxane) (PDMS) molds. *J Micromech Microeng*, 2016, 26: 075001
- 13 Bonnas S, Ritzhaupt-Kleissl H J, Haußelt J. Electrophoretic deposition for fabrication of ceramic microparts. *J Eur Ceramic Soc*, 2010, 30: 1159–1162
- 14 Liu J, Hassanin H, Ni Z, et al. Production of high-precision micro metallic components by electroforming process. *Mater Manufact Process*, 2017, 32: 1325–1330
- 15 Makarova O V, Mancini D C, Moldovan N, et al. Microfabrication of freestanding metal structures using graphite substrate. *Senss Actuat A-Phys*, 2003, 103: 182–186
- 16 Wang F, Ren X, Zeng P, et al. Dynamics of filling process of through silicon via under the ultrasonic agitation on the electroplating solution. *Microelectron Eng*, 2017, 180: 25–29
- 17 李瑞乾, 梁军, 初青伟. 氯化胆碱-乙二醇低共熔溶剂中电沉积纳米晶镍. *中国有色金属学报*, 2014, 24: 1839–1845
- 18 Xue Z, Lei W, Wang Y, et al. Effect of pulse duty cycle on mechanical properties and microstructure of nickel-graphene composite coating produced by pulse electrodeposition under supercritical carbon dioxide. *Surf Coatings Tech*, 2017, 325: 417–428
- 19 Aruna S T, Lashmi P G, Seema H M. The effect of additives on the properties of electrodeposited Ni-zircon composite coatings. *RSC Adv*, 2016, 6: 11185–11192
- 20 Song C, Du L, Li X, et al. Residual stress modeling and analysis for micro electroforming layer. *Microsyst Technol*, 2017, 23: 4709–4716
- 21 Song C, Du L, Qi L, et al. Residual stress measurement in a metal microdevice by micro Raman spectroscopy. *J Micromech Microeng*, 2017, 27: 105014

Fabrication of nickel micro gears by microelectroforming using PDMS molds

ZHOU Bo^{1,2}, WU YouZhi¹, SU Bo², MENG JunHu², HAN JieSheng² & ZHANG XingKai²

¹ School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

² State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Nickel micro gears of a diameter of 3.60 mm and a thickness of 0.18 mm are prepared by soft lithography and microelectroforming. Two different molds are used; one is composed of a polydimethylsiloxane (PDMS) mold which is adhered onto a graphite substrate, the other one is a PDMS mold coated with Au. The PDMS molds are firstly replicated from a micro gear master by soft lithography. Then the nickel micro gears are microelectroformed in the molds in a Watt's solution. The structural integrity, growth of layers and phase compositions of the nickel micro gears are investigated by scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results show that micro gears of high integrity can be fabricated by using the Au-coated PDMS mold. Compared with the high quality micro gear deposited layer by layer in the Au-coated PDMS mold, cracks are easily formed in the micro gear which is epitaxially grown in the mold that consists of the PDMS mold and the graphite substrate. The micro gears have similar grain sizes, however, the micro gear prepared in the Au-coated PDMS mold has smaller residual stress.

microelectroforming, soft lithography, microstructure, micro gear, PDMS

doi: [10.1360/N092017-00383](https://doi.org/10.1360/N092017-00383)