

文章编号 1004-924X(2012)12-2696-08

柔性 MEMS 减阻蒙皮设计及其制作工艺

李 勇*, 李文平, 朱效谷

(1. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:提出了一种电解水式驻留微气泡减阻的柔性机电系统(MEMS)蒙皮技术,研究了蒙皮结构设计以及加工工艺。设计了一种包含柔性基层、金属电极图案层和微凹坑阵列层的三层式蒙皮结构,提出了两种基于 MEMS 工艺的制作方法。分别采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和 SU-8 胶材料制作了微凹坑阵列层,并对其关键工序进行了实验研究。以 SU-8 胶为微凹坑阵列材料制作了柔性 MEMS 蒙皮样件。所制样件中,圆柱形驻气凹坑的直径为 $40\ \mu\text{m}$ 、深度为 $50\ \mu\text{m}$ 、密度为 $6.25 \times 10^4/\text{cm}^2$ 、样件总厚度为 $90\ \mu\text{m}$,可弯曲并贴附于截面直径为 $28\ \text{mm}$ 的圆柱体表面而不损坏。结果显示了 MEMS 减阻蒙皮工艺的可行性,证明将电解水式驻留微气泡的柔性减阻蒙皮设计与 MEMS 工艺有机结合,是一种航行体表面减阻的有效技术途径。

关键词:减阻蒙皮;柔性 MEMS;微气泡;微凹坑;SU-8 胶;聚二甲基硅氧烷(PDMS)

中图分类号:TN405,U661.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2696

Design and fabrication of flexible MEMS anti-drag skin

LI Yong*, LI Wen-ping, ZHU Xiao-gu

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: liyong@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: A novel flexible Microelectromechanical System(MEMS) anti-drag skin was proposed based on the drag reduction with lingering-micro-bubble generated by electrolysis, and the fabrication of flexible MEMS anti-drag skin was designed. The MEMS skin composed of a flexible substrate layer, a metal electrode layer and a micro-well-array layer was designed, and two process routes based on MEMS were developed for the skin fabrication. Then, the polydimethylsiloxane(PDMS) and SU-8 were used to fabricate the micro-well-array layer, respectively. Several key steps in these processes were studied and a specimen was fabricated using SU-8. The specimen has a thickness of $90\ \mu\text{m}$ and contains 6.25×10^4 cylindrical wells with a depth of $50\ \mu\text{m}$ and a diameter of $40\ \mu\text{m}$ per square centimeter. It can be bent and attached on a $\Phi 28\ \text{mm}$ cylinder without damage. Results demonstrate that the MEMS is feasible to realize the anti-drag skin and the flexible MEMS anti-drag skin offers a novel way to reduce the skin friction of vehicles in water.

Key words: anti-drag skin; flexible Microelectromechanical Systems(MEMS); micro bubble; micro well; SU-8; polydimethylsiloxane(PDMS)

收稿日期:2012-09-15;修订日期:2012-10-19.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20110002110077)

1 引 言

表面摩擦力(Skin friction)是指流体和有相对运动物体表面的摩擦力。水中航行体在航行时,受到的表面摩擦阻力占总阻力的比重很大。高速船的摩擦阻力占总阻力的 40%~50%,中低速船舶的摩擦阻力达总阻力的 70%~80%,水下航行器的表面摩擦阻力占总阻力的 70%以上。因此,减小表面摩擦阻力是减小航行体阻力,实现节能降耗、提高航速的有效途径。长期以来,如何减小摩擦阻力一直是减阻技术中的重点和热点,目前已相继形成了表面修形、聚合物添加剂减阻、气幕减阻、仿生减阻、壁面振动减阻以及超疏水减阻等减阻技术。其中,气幕减阻技术是利用水与空气密度、黏度的差别,在航行体表面通入空气,形成一层薄的气液两相混合流,通过混合流密度、黏度以及流动模式的改变来减少船体的摩擦阻力^[1]。该技术实现方式如下,在航行体表面加工出孔阵列,航行时通过控制气源对阵列孔的注气速度,在航行体表面形成气幕。自 70 年代起,俄罗斯及美国等国对该减阻技术进行了不少实验研究,指出气幕减阻的效果受到阵列孔尺寸、航行体航行速度以及注入气体流量等因素影响。俄罗斯学者 Dunishev 采用平板喷气的方法对微气泡减阻进行了实验研究,实验得到的最大减阻效果高达 80%^[2]。之后,美国学者 Madavan 对平板表面注入微气泡有效减小了摩擦阻力,同样获得了最高为 80%的减阻量^[3]。海军工程大学董文才教授课题组是国内最早进行气幕减阻研究的团队,他们对 3 种艇型及不同喷气方式的模型进行了试验,取得了总阻力减少 25% 以上的结果^[4]。

但上述气幕减阻中的微气泡通常通过注入生成,工作时大量的微气泡被水流带走,而大量地补充气泡使能耗增加。2009 年,清华大学李勇等^[5]提出一种新型的驻留微气泡减阻技术方案,有望实现气泡稳定驻留不流失,在降低气泡补充的能耗方面有较大的优势。通过在航行体表面布置内置电极的微凹坑阵列,利用电解水反应产生稳定驻留的微气泡,变固-液界面为固-气-液界面,具有较大的减阻潜力。

美国德州大学 Stephani^[6]提出了采用“被困气泡”(trapped-bubbles)减小摩擦阻力的技术,使电解水反应产生的微小气泡被困在凹坑中,形成表面滑移区域,从而实现减阻。实验试件的制备工艺如下:先在 254 mm×381 mm×1.587 5 mm 的刚性铝基板上喷涂底漆及绝缘环氧涂料,而后机械钻削出 $\Phi 1.143$ mm×0.762 mm 的阵列盲孔。初步实验显示,在流速为 0.3 m/s 的水流环境中 70% 的电解气泡实现了驻留。

MEMS 技术尤其是柔性 MEMS 技术的发展为驻留微气泡减阻试件的结构设计与工艺设计提供了新的思路。1985 年,Stanford 的 Barth^[7]在制备硅温度传感器阵列时,第一次采用了“硅岛”(Si island)工艺。之后,加州理工大学的 Fukang Jiang 等人在制备柔性剪切力传感器时,对“硅岛”柔性 MEMS 技术进行了完善,并提出了通用的“硅岛”工艺^[8]。“硅岛”柔性 MEMS 技术很好地继承了传统的硅基工艺,但由于传感器单元采用的依然是硬质硅基底,所制备试件的柔性受到一定的限制。聚合物基柔性 MEMS 技术是制备柔性 MEMS 试件的另一条思路,该技术以聚合物薄膜作为试件的柔性基底,以实现试件的柔性化。芮岳峰^[9]等人采用聚酰亚胺薄膜作为基底制备的柔性生物微电极阵列,展示了良好的柔性。

本研究以实现柔性减阻蒙皮为目标。提出了一种具有驻留微气泡减阻功能的减阻蒙皮原理与结构设计,并探索了采用聚合物基柔性 MEMS 工艺制作柔性减阻蒙皮的途径。分别采用聚酰亚胺和 SU-8 光刻厚胶制备蒙皮微凹坑层,实验研究了柔性 MEMS 减阻蒙皮的工艺可行性。

2 柔性减阻蒙皮原理结构设计

柔性减阻蒙皮的原理结构设计如图 1 所示,减阻蒙皮主要由微凹坑阵列以及内置的微细电极构成,蒙皮结构具有一定的柔性,能够贴附在具有一定曲率的航行体表面来减小航行体航行阻力。对于某些特殊的航行体,可以通过合理设计蒙皮在航行体表面的贴附区域,以及控制不同区域蒙皮的工作状况来影响航行体的受力情况,从而实现航行体的特定动作。

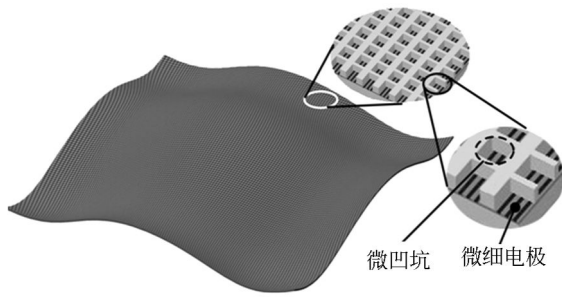
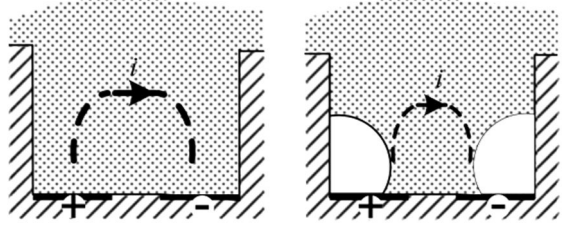


图 1 柔性减阻蒙皮示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anti-drag flexible skin

当对减阻蒙皮凹坑内的微细电极施加合适的电压时,凹坑内的水开始发生电解反应,在电极附近产生电解氢气/氧气,如图 2(a)所示。随着反应继续,气泡在凹坑内持续生长,逐渐覆盖电极部分表面,而未气泡覆盖的电极区域反应继续进行,如图 2(b)所示。电解电极表面完全被气泡覆盖后,电解的水路被切断,如图 2(c)所示,反应被阻隔,气泡将不再生长,只是调节自身的形态以实现驻留。稳定驻留的气泡改变了界面状态,



(a) 对电解电极加载电压,产生电解电流
(a) Electrolytic current generated by loading voltage upon electrodes

(b) 电极气泡覆盖部分电极,电流变小
(b) Turning current smaller by covering the part of electrode with bubbles



(c) 电解气泡覆盖微凹坑,阻隔反应
(c) Blocking reaction by covering the well with bubble

图 2 电解水式驻留微气泡减阻示意

Fig. 2 Anti-drag principle of lingering micro-bubble generated by electrolysis

变固-液界面为固-气-液界面,达到降低摩擦阻力的效果。同时,该驻留微气泡还具有自适应恢复功能,当驻留气泡受到水流冲刷等因素而发生脱落或收缩到一定程度后,电解水反应的水路将重新连接上,反应再次进行,气泡生长直至覆盖凹坑,切断水路,阻隔反应。

上述电解水式驻留微气泡减阻的柔性蒙皮结构的实现,涉及电化学反应、流体力学分析优化和蒙皮结构材料特性等基础理论问题,特别是取决于微细加工和柔性化关键工艺。近年来 MEMS 制造技术的发展为柔性减阻蒙皮的实现提供了可行的工艺途径,基于 MEMS 工艺设计的柔性 MEMS 减阻蒙皮的结构方案如图 3 所示。该蒙皮由微凹坑阵列层、金属电极图案层和柔性基层组成,其中金属电极图案层包括内部电解电极以及外部引线端子两部分。基于初步的流体力学理论分析,微凹坑阵列层的单个凹坑横截面特征尺寸设计为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 量级,凹坑的深宽比为 1。减阻蒙皮结构的材料一方面需要有利于减阻功能的实现,同时应具有微细加工的可行性,本文以聚酰亚胺作为基底材料实现蒙皮柔性,金属电极选择铂材料以避免电化学反应腐蚀,而微凹坑阵列的制作分别采用 PDMS 材料的模具复制工艺和采用 SU-8 胶材料的光刻加工工艺。

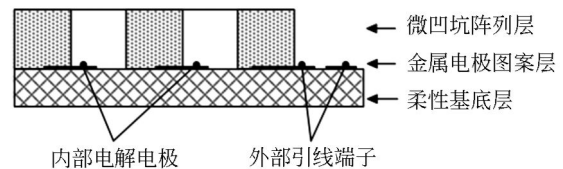


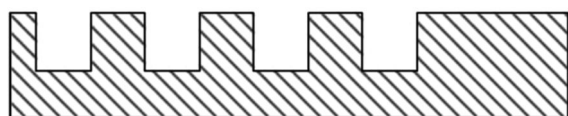
图 3 MEMS 减阻蒙皮结构方案设计
Fig. 3 Layout of anti-drag flexible MEMS skin

3 PDMS 微凹坑阵列的模具复制工艺

减阻蒙皮结构的材料直接影响气泡的驻留和最终的减阻效果。疏水材料能够为微气泡提供更大的表面张力,从而更有利于实现微气泡的驻留。PDMS(Polydimethylsiloxane, 聚二甲基硅氧烷)具有本征的疏水特性和高度的柔性,适合作为本减阻蒙皮的微凹坑阵列层材料。由于 PDMS 的物理和化学特性稳定,采用刻蚀加工微凹坑结构难度较大,同时 PDMS 具有很好的流动性和脱膜

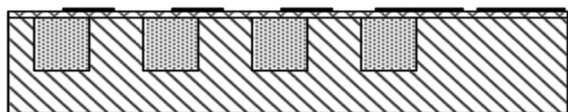
性,因此在本减阻蒙皮的加工工艺中选用模具复制的方式来制备 PDMS 微凹坑阵列层^[10-12]。

图 4 所示为减阻蒙皮试件的制作流程。选用单晶硅片作为模具,首先采用 ICP 刻蚀(Inductively Coupled Plasma)工艺对其刻蚀,刻蚀深度为 50 μm ,形成与减阻蒙皮试件的微凹坑阵列层互补的微凸柱阵列模具,如图 4(a);向微凸柱阵列模具中填充 PDMS 并加温固化,形成略低于模具上表面 1 μm 的 PDMS 膜层,然后采用旋涂-固化工艺制备一层 4 μm 厚的聚酰亚胺层,使用甩胶-光刻-溅射-剥离工艺在聚酰亚胺层制备一层金属 Ti/Pt 图案层,形成微细电极和外部引线端子,



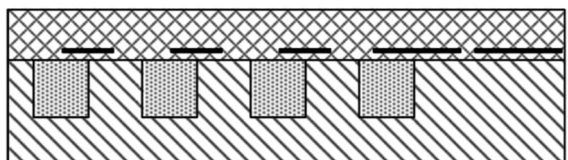
(a) ICP 刻蚀制备硅模具

(a) Fabricating Si mold using ICP etching



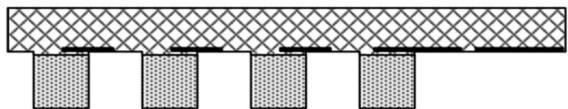
(b) 填充 PDMS,依次制备聚酰亚胺与金属图案层

(b) Filling PDMS, fabricating PI/Pt layer



(c) 制备聚酰亚胺柔性基底

(c) Fabricating PI flexible substrate layer



(d) 释放柔性试件,RIE 刻蚀聚酰亚胺层

(d) Releasing flexible specimen, etching PI layer by RIE

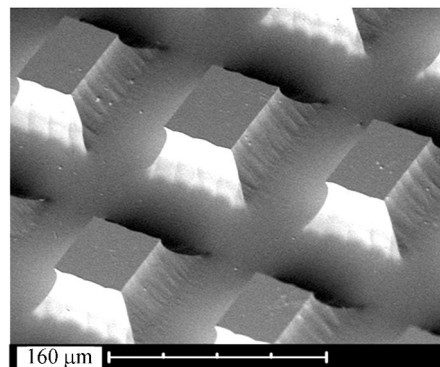


图 4 PDMS 模具复制的工艺流程

Fig. 4 Fabrication process using PDMS

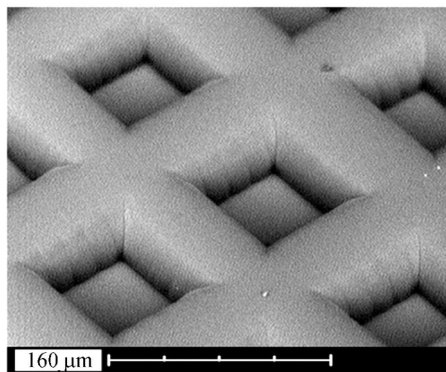
种子层 Ti 的厚度为 20 nm,金属 Pt 的厚度为 180 nm,如图 4(b);旋涂 30 μm 厚的聚酰亚胺胶液并加温固化,形成第二层聚酰亚胺层,如图 4(c);将制备好的试件从硅模具上剥落下来,采用 RIE 干法刻蚀去除覆盖金属电极图案层上的聚酰亚胺,使电解电极以及外部引线端子裸露出来,如图 4(d)所示。

上述工艺中 PDMS 对模具的填充和从硅模具中的脱模是需要考虑的关键工艺。选用 Sylgard 184 型 PDMS 及其固化剂(Dow Corning Corp., USA),将 PDMS 预聚物(PDMS 单体与固化剂质量比以 10 : 1 的混合溶液)充分搅匀后涂覆在硅模具上,然后将其放入真空箱中抽真空处理,完全去除 PDMS 溶液内的气泡后,加温固化并将 PDMS 薄膜从硅模具上剥离下来。实验结果如图 5 所示,表明 PDMS 具有较好的模具填充能力和微细结构的复制能力。



(a) ICP 刻蚀制备的硅模具

(a) Si mold made by ICP etching



(b) 模具复制的 PDMS 微凹坑阵列

(b) PDMS micro-well array

图 5 PDMS 填充与复制实验

Fig. 5 Experiments of PDMS filling and duplicating

在聚酰亚胺薄膜衬底上制备金属电极图案层是另一关键工序。金属 Pt 具有很强的化学稳定性,能抵抗电化学反应而不损耗,因此被选作电解电极的材料。单步工序实验时,首先采用旋涂-固化方法在硅衬底上制备一层聚酰亚胺薄膜,然后采用光刻-溅射-剥离的方法在聚酰亚胺衬底上制备一层厚度为 180 nm 的金属 Pt 图案层。为增强金属 Pt 与基底的黏附力,在溅射金属 Pt 前,先溅射了一层厚度为 20 nm 的金属 Ti 作为种子层。图 6 所示为实验制备的线宽为 $30\ \mu\text{m}$ 的金属 Pt 线条,结果表明,聚酰亚胺薄膜上的金属 Pt 图案线条连续、轮廓清晰,能够牢靠的黏附其上。

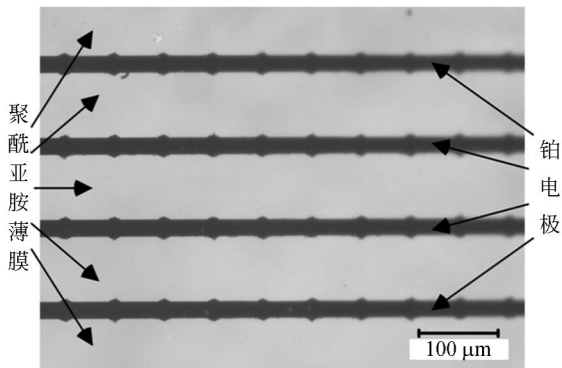
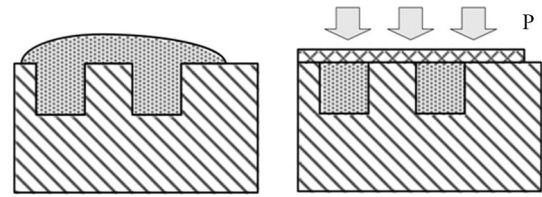


图 6 聚酰亚胺薄膜上的微细铂电极

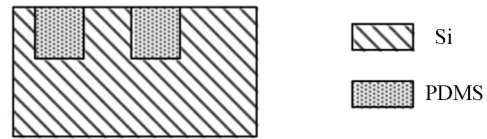
Fig. 6 Micro Pt electrodes on PI

制备略低于模具上表面 $1\ \mu\text{m}$ 的 PDMS 膜层是该工艺的一个难点。工艺实验中,首先将液态 PDMS 涂覆在硅模具上,并对其进行抽真空处理以除去模具中的气泡,使 PDMS 填充充分,如图 7(a);然后采用挤压法,排挤去除多余的 PDMS 胶液,如图 7(b);最后,加温固化,如图 7(c)。实验结果表明,挤压法不能完全去除硅模具上表面的 PDMS 液胶。固化后,模具上表面存在留膜,留膜厚度为 $3\sim 8\ \mu\text{m}$,具体尺寸与挤压力的大小相关。由于留膜厚度较小,可采用化学刻蚀的方法去除,有文献报道用四丁基氟化铵(TBAF)与 N-二甲基酰胺(NMP)混合液(两者的体积比为 1:3)作刻蚀剂对 PDMS 进行湿法刻蚀^[13]以及 CF_4/O_2 的混合气体对 PDMS 进行干法刻蚀^[14]。本文的研究中,两种刻蚀方法均未能取得良好效果:干法刻蚀实验中,没有得到明显的刻蚀效果,湿法刻蚀实验中,刻蚀速度缓慢,且随着刻蚀的进行,反应逐渐变缓,并最终留有一层无法刻蚀的薄膜。由于该留膜将覆盖住减阻蒙皮凹坑内的电解电极,

从而阻碍电解水反应。



a) 涂覆 PDMS 胶液 (b) 挤压法去除多余 PDMS 胶液
(a) Coating PDMS (b) Extruding redundant PDMS



(c) 加温固化

(c) Heating and curing

图 7 PDMS 的填充方法

Fig. 7 Filling method of PDMS

采用 PDMS 模具复制的方法制备减阻蒙皮的优势在于批量制作工艺性好且 PDMS 具有本征疏水特性有利于实现减阻功能。工艺实验研究探讨了酰亚胺薄膜上制备微细金属 Pt 电极的可行性,PDMS 的模具填充以及微凹坑复制的能力。目前模具上表面的留膜仍是制约该工艺的问题,需进一步探索研究去除留膜的可行方法。

4 SU-8 胶微凹坑阵列的光刻制作工艺

SU-8 胶是一种负性、环氧树脂型、近紫外线光刻胶。由于其对近紫外光范围内的光吸收度较低,曝光时整个光刻胶层能够获得均匀一致的曝光量,因此采用 SU-8 胶可以制得侧壁垂直和深宽比大的厚膜图形^[15]。同时,SU-8 胶还具有良好的物理性能、稳定的化学性能,被应用于制备含有大深宽比结构的 MEMS 器件中^[16-18]。本减阻试片的微凹坑阵列层较厚,且其中的微凹坑结构深宽比较大,因此选择 SU-8 胶用于制备微凹坑阵列结构。

图 8 所示为减阻蒙皮试件的制作流程。基底为单晶硅或者多晶硅,采用多次旋涂-加温固化的方法在基底上制备一层 $400\ \mu\text{m}$ 的 PDMS 中间

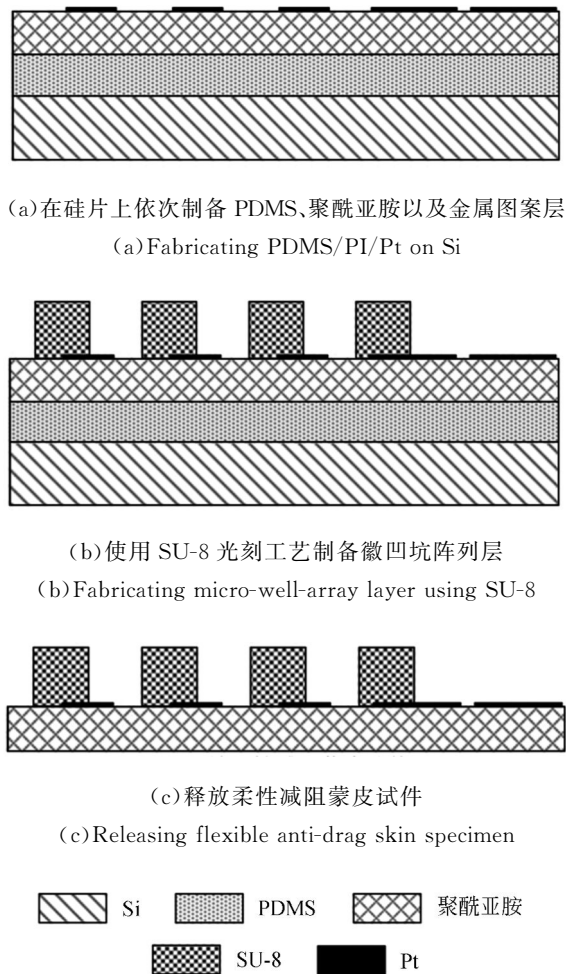


图 8 使用 SU-8 胶制备减阻蒙皮试件的工艺流程
Fig. 8 Fabrication process of anti-drag skin specimen using SU-8

夹层,用于试件制备后的最终剥离;然后通过旋涂-固化方式在 PDMS 层上旋涂 $40\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺胶;使用甩胶-光刻-溅射-剥离工艺在聚酰亚胺层制备一层金属 Ti/Pt 图案层,形成微细电极和外部引线端子,种子层 Ti 的厚度为 $20\ \text{nm}$,金属 Pt 的厚度为 $180\ \text{nm}$,如图 8(a)。旋涂一层 $50\ \mu\text{m}$ 厚的 SU-8 2025 胶 (Microchem Corp., USA),对其进行紫外曝光,显影坚膜后形成微凹坑阵列,如图 8(b),SU-8 胶光刻分为旋涂、前烘、光刻、后烘、显影以及坚膜 6 个阶段。旋涂时,先在 $500\ \text{r/min}$ 的转速下保持 $5\ \text{s}$,然后升至 $1\ 700\ \text{r/min}$ 保持 $30\ \text{s}$;前烘、后烘以及坚膜的温度设置均为先在 $65\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱力烘焙 $1\ \text{min}$,然后移至 $95\ ^\circ\text{C}$ 的热板上烘焙 $6\ \text{min}$;选用波长为 $350\ \text{nm}$ 的紫外光作为曝光光源,曝光剂量为 $230\ \text{mJ/cm}^2$;显

影时,将显影容器置于超声槽内,辅助以超声振动,显影时间为 $310\ \text{s}$ 。最后将制备好的试件从 PDMS 中间剥离层处剥离下来,如图 8(c)所示。

图 9 所示为采用 SU-8 胶制备的减阻蒙皮试件,微凹坑阵列层中单个凹坑的截面形状为圆形,截面直径为 $40\ \mu\text{m}$,凹坑密度为每平方米 6.25×10^4 孔,如图 9(a)。凹坑内置的微细 Pt 电极线条宽度为 $40\ \mu\text{m}$,从图中可以看出轮廓清晰、线条连续。将减阻蒙皮试件裁成 $15\ \text{mm}\times 60\ \text{mm}$ 的长条单元,如图 9(b)。测量得到该减阻蒙皮试件的厚度约为 $90\ \mu\text{m}$,将其贴附在截面直径为 $28\ \text{mm}$ 的圆柱体表面,如图 9(c)所示,显示出良好的柔性。

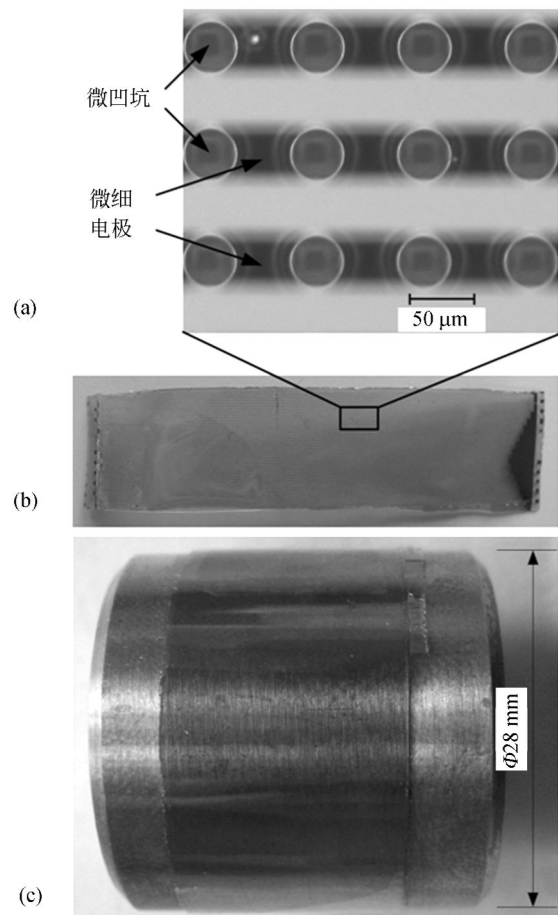


图 9 采用 SU-8 胶制备的减阻蒙皮试件 (a)显微镜下试片结构 (b)柔性试片 (c)试片贴附在圆柱体表面

Fig. 9 Specimen of SU-8 flexible anti-drag skin (a) Micrograph of specimen (b) Photograph of specimen (c) Specimen attached on a cylinder

5 结 论

提出了一种电解水式驻留微气泡减阻的柔性 MEMS 蒙皮技术方案,通过电解水生成稳定驻留的微气泡,从而改变航行体的界面状态,变固-液界面为固-气-液界面,达到降低摩擦阻力的效果。将电解水式驻留微气泡减阻原理与 MEMS 工艺有机结合,设计了一种 3 层式柔性 MEMS 蒙皮结构并进行了工艺设计和实验研究。

对 PDMS 的复制能力和在聚酰亚胺表面进行铂的剥离工艺进行了实验验证。实验表明,PDMS 具有良好的微结构复制能力;同时通过剥离工艺在聚酰亚胺表面制备出的宽度为 $30\ \mu\text{m}$ 的铂电极图案线条连续,能牢靠黏附于基底上。

参考文献:

- [1] 董文才,郭日修.气幕减阻研究进展[J].船舶力学,1998,2(5):73-78.
DONG W C, GUO R X. Research progress of air injection drag reduction [J]. *Academy of Naval Engineering*, 1998,2(5):73-78. (in Chinese)
- [2] DUNISCHEV Y N, EVSEEV A R, SOBOLEV V S, et al.. Study of gas-saturated turbulent streams using a laser Doppler velocity meter [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1975, 16(1):114-119.
- [3] MADAVAN N K, DEUTSCH S, MERKLE C L. Reduction of turbulent skin friction by micro bubbles [J]. *The Physics of Fluids*,1984, 27(2):356-363.
- [4] 董文才,郭日修,陈小玲,等.滑翔艇气层减阻试验[J].中国造船,2002,43(4):13-18.
DONG W C, GUO R X, CHEN X L, et al.. Experimental study on resistance reduction of planning craft by air injection [J]. *Ship Building of China*, 2002, 43(4):13-18. (in Chinese)
- [5] 陈旭鹏,李勇,朱效谷,等.柔性 MEMS 减阻蒙皮及其制造方法:中国,ZL200910079713.0 [P]. 2009-7-22.
CHEN X P, LI Y, ZHU X G, et al.. Flexible MEMS anti-drag skin and its fabrication: China, ZL2200910079713.0 [P]. 2009-7-22.
- [6] STEPHANI K A, GOLDSTEIN D B. An examina-

tion of trapped bubbles for viscous drag reduction on submerged surfaces [J]. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2010, 132(4): 041303-1-9.

在聚酰亚胺表面制备出铂电极图案的基础上,设计了采用 SU-8 光刻厚胶制备微凹坑阵列的工艺。制作出厚度为 $90\ \mu\text{m}$ 的柔性试件,试件中圆柱形凹坑深度 $50\ \mu\text{m}$,直径为 $40\ \mu\text{m}$,凹坑密度为每平方厘米 6.25×10^4 个。试件可贴附在截面直径为 $28\ \text{mm}$ 的圆柱体表面,显示出良好的柔性。

将电解水式驻留微气泡的柔性减阻蒙皮设计与 MEMS 工艺有机结合,开拓出一种航行体表面减阻的创新技术途径。MEMS 工艺为实现微气泡自适应的柔性减阻蒙皮提供出可行的工艺方法。但由于驻留微气泡减阻技术涉及交叉学科,尚需要从流体力学、材料以及 MEMS 加工工艺等多方面对减阻蒙皮材料、结构做进一步深入的理论和实验研究。

- [7] BARTH P W, BERNARD S L, ANGELL J B. Flexible circuit and sensor arrays fabricated by monolithic silicon technology [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1985, 32(7):1202-1205.
- [8] JIANG F K, LEE G B, TAI Y C, et al.. A flexible micro machine-based shear-stress sensor array and its application to separation-point detection [J]. *Sensors and Actuators: A-Physical*, 2003, 79(3): 194-203.
- [9] 芮岳峰,王亚军,刘景全,等.基于 Parylene 的柔性生物微电极阵列的制作[J].纳米技术与精密工程,2011,9(5):422-426.
RUI Y F, WANG Y J, LIU J Q, et al.. Fabrication of parylene-based flexible microelectrode arrays [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011,9(5):422-426. (in Chinese)
- [10] KIM E, XIA Y N, WHITESIDES G M. Polymer microstructures formed by moulding in capillaries [J]. *Nature*, 1995, 118: 5722-5731.
- [11] KIM E, XIA Y N, WHITESIDES G M. Micro-molding in capillaries: applications in materials science [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1996, 118 (24): 5722-5731.
- [12] XIA Y N, KIM E, WHITESIDES G M. Micro-molding of polymers in capillaries: applications in microfabrication [J]. *Chemistry of Materials*,

- 1996, 8(7): 1558-1567.
- [13] BALAKRISNAN B, PATIL S, SMELA E. Patterning PDMS using a combination of wet and dry etching [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19:047002-1-7.
- [14] GARRA J, LONG T, CURRIE J, *et al.*. Dry etching of polydimethylsiloxane for microfluidic systems [J]. *American Vacuum Society*, 2002, 20(3): 975-982.
- [15] BOGDANOV A L, PEREDKOV S S. Use of SU-8 photoresist for very high aspect ratio x-ray lithography [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(6): 81-95.
- [16] LORENZ H, DESPONT M, FAHRNI N, *et al.*. High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, 64(1): 33-39.
- [17] 黄新龙,熊瑛,陈光焱,等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速开关[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1152-1158.
- 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(5): 1152-1158. (in Chinese)
- [18] 褚金奎,陈兆鹏,张然. 集成铜金属压阻层的 SU-8 胶悬臂梁微力传感器的制作[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2935-2940.
- CHU J K, CHEN ZH P, ZHANG R. Microfabrication of SU-8 cantilever micro-force sensor integrated by copper piezoresistance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2935-2940. (in Chinese)

作者简介:



李 勇(1962—),男,河南方城人,博士,研究员,博士生导师,1982 于哈尔滨工业大学获得学士学位,1987 年、1991 年于日本新岛大学分别获得硕士、博士学位,主要从事柔性 MEMS 蒙皮微流体控制系统,微细电火花和电化学加工以及单点金刚石刀具超声振动辅助超精密切削加工方面的研究。E-mail: liyong@mail. tsinghua. edu. cn



朱效谷(1985—),男,江苏启东人,博士研究生,2007 年于清华大学获得学士学位,主要从事柔性 MEMS 减阻蒙皮的设计与制作方面的研究。E-mail: sxg03@mails. tsinghua. edu. cn



李文平(1987—),男,湖南永兴人,硕士研究生,2009 年于武汉大学获得学士学位,主要从事柔性 MEMS 减阻蒙皮的设计与制作方面的研究。E-mail: wenping297@163. com