文章编号: 1004-0609(2012)07-1855-08

# 基于激光加工和自组装技术改性处理 铝镁合金的表面润湿性

#### 徐 喆,连 峰,张会臣

(大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院, 大连 116026)

摘 要:为制备具有更高机械强度和更长使用寿命的超疏水金属表面,利用激光加工技术在铝镁合金表面构建出 圆台凸起、圆台凹坑和正四棱台 3 种微结构。利用自组装技术在具有以上 3 种微结构的铝镁合金表面沉积自组装 分子膜(SAMs),采用扫描电镜、形貌分析仪和接触角测量仪对成膜后的铝镁合金表面进行形貌和接触角的表征与 测量。结果表明:沉积疏水的 FDTS 和 OTS 自组装分子膜时,接触角随微结构间距的增大而减小,随微结构高度 的增大而增大,最大接触角达 156°,形成超疏水铝镁合金表面;沉积亲水的 APS 自组装分子膜时,接触角随微 结构间距的增大而增大,随微结构高度的增大而减小,最小接触角接近 0°,形成超亲水铝镁合金表面;激光加工 和自组装技术可以大幅度改变铝镁合金的表面润湿性。

**关键词:** 铝镁合金; 微结构; 接触角; 激光加工; 自组装分子膜 中图分类号: TG174.4; O647.5 **文献标志码:** A

# Wettability of Al-Mg alloy based on laser modification and self-assembled monolayers

XU Zhe, LIAN Feng, ZHANG Hui-chen

(College of Transportation Equipment and Ocean Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to prepare super-hydrophobic metal surface with higher mechanical intensity and longevity of service, three surface textures including frustum of a cone, notch of taper hole and frustum of a pyramid, were manufactured on Al-Mg alloy with laser surface modification method, and the self-assembled monolayers (SAMs) was deposited on the textured surface with self-assembled method. Scanning electron microscopy, surface profiler and contact angle measurement were used to analyze the surface properties of specimens. The results show that after laser manufacturing and preparing hydrophobicity FDTS and OTS self-assembled monolayers, the contact angles tend to smaller as the increment of the spacing of surface texture, and tend to bigger as the increment of the height of surface texture. Maximum contact angle of 156° and the super-hydrophobic surface can be acquired. After laser manufacturing and preparing hydrophilic APS self-assembled monolayers, the contact angles tend to bigger as the increment of the spacing of surface texture. Maximum contact angle of 0° or so and the super-hydrophilic surface can be obtained. The wettability of aluminum-magnesium alloy surface can be adjusted by laser surface modification method and self-assembled monolayers.

Key words: Al-Mg alloy; texture; contact angle; laser modification; self-assembled monolayers

润湿性是材料表面的重要特征,它是由表面的微 观几何结构和表面的化学组成共同决定的。润湿性可 以用固体表面上的水接触角来衡量,通常把接触角小于 90°的固体表面称为亲水表面,大于 90°的表面称为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975036)

收稿日期: 2011-06-30; 修订日期: 2011-11-01

通信作者: 连 峰,教授,博士; 电话: 0411-84723319; E-mail: fengfeng0425@yahoo.com.cn

疏水表面,超过150°的表面称为超疏水表面。超疏水 表面在自清洁<sup>[1-2]</sup>、微流体和减阻涂层<sup>[3]</sup>等领域有着重 要的应用价值。目前,制备超疏水材料方面已经取得 了显著的进展<sup>[4-5]</sup>。铝系合金由于密度小,质量轻,散 热性能好,广泛应用于汽车、船舶、建筑、化工、 航空航天及机械制造工业中<sup>[6]</sup>。超疏水铝合金表面 的制备可极大地提高铝合金的使用性能,拓展铝 合金的使用范围<sup>[7-8]</sup>。李艳峰等<sup>[9]</sup>采用化学刻蚀的方 法制备出多晶铝合金基体上的超疏水表面,水滴与表 面的接触角达到156°。粟常红等<sup>[10]</sup>用喷砂打磨铝片, 得到微米尺度的粗糙结构,然后引入纳米二氧化硅颗 粒修饰表面,得到的仿荷叶多级结构表面的接触角达 到173°。然而,在铝合金表面构筑规整的表面微结构, 从而定量控制铝合金表面润湿性的研究尚未见报道。

在构筑规整表面微结构,定量控制表面润湿性的 研究中,都是建立"柱状"结构模型<sup>[11]</sup>。公茂刚等<sup>[12]</sup> 采用液相法制备了空间取向高度一致的 ZnO 纳米棒 阵列,水滴在 ZnO 纳米棒薄膜表面的接触角为 151°±0.5°。YOSHIMISTU 等<sup>[13]</sup>采用光刻技术在硅基 体表面上制备了规整的微米柱阵列,经氟烷基硅烷表 面修饰后,得到了接触角约150°的超疏水表面。但柱 状结构在受到外力时(如摩擦、冲击等)易折断,从而 影响表面润湿性。而对于上底面尺寸与柱状结构相同 的圆台和棱台结构,由于下底面的尺寸更大,因此结 构更坚固。但是关于构筑圆台和棱台结构,并探讨其 尺寸参数对润湿性影响的研究尚未发现。本文作者利 用激光加工技术在铝镁合金表面构筑圆台和棱台形微 结构,并采用自组装技术改变表面润湿性,定量研究 微结构的尺寸参数对铝镁合金表面润湿性的影响,为 制备具有更高机械强度和更长使用寿命的超疏水铝镁 合金表面提供理论依据和技术支持。

## 1 实验

#### 1.1 实验材料

实验所用铝镁合金购自上海锴欣金属材料有限公司,其成分如表1所示。成膜药品均购自加拿大Fluka公司,成膜分子名称及分子式等如表2所示。

#### 1.2 表面微结构的构筑

将厚度为 3 mm 的铝镁合金板材切割成 10 mm× 10 mm 的正方形,依次用 500<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1000<sup>#</sup>、1500<sup>#</sup> 砂纸研磨、抛光。然后将其依次放入丙酮、乙醇和超 纯水中超声清洗 3 min,去除表面杂质,取出后用 N<sub>2</sub>

#### 表1 铝镁合金的化学成分

 Table 1
 Chemical composition of aluminum magnesium alloy (mass fraction, %)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn
4.0-4.9	0.40	0.40	0.10	0.40-1.0
Cr	Zn		Ti	Al
0.05-0.25	0.25		0.15	Bal.

#### 表2 化学试剂

Table 2Chemical reagents

Name	Molecular formula	Purity/ %
1H, 1H, 2H, 2H- perfluorodecyltrichlorosilane (FDTS)	$CF_3(CF_2)_7(CH_2)_2SiCl_3$	97
Octadecyltrichlorosilane (OTS)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> SiCl <sub>3</sub>	95
3-aminopnpyltrimethoxysilane (APS)	(CH <sub>3</sub> O) <sub>3</sub> Si(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	97

吹干。采用激光打标机(武汉华工激光工程有限责任公司,HGL-LSY50F型)对其进行表面微结构加工。激光 波长为1064 nm,激光频率为5 kHz,输出电流为14A, 光照时间为1 ms,采用直径为1.6 mm 的光栅。在试 样表面加工圆台、棱台型微结构,间距分别为50、100、 150 和 200 μm。

#### 1.3 自组装分子膜的制备

将激光加工后的试样分别用丙酮、乙醇和超纯水 进行超声清洗,时间为 3 min,以除去表面的杂质, 取出后用高纯 N<sub>2</sub> 吹干。利用紫外光照射对铝镁合金 表面进行羟基化处理,照射时间为 120 min。用微量 注射器分别吸取 15 μL 的 FDTS、OTS 和 APS,滴入 1 mL 甲苯溶剂中,配制 FDTS、OTS、APS 3 种溶液, 将羟基化处理后的铝镁合金试样分别浸入 3 种所配溶 液中,置于真空干燥箱中反应 12 h,试样取出后,依 次用丙酮、乙醇、超纯水进行超声清洗,并用高纯 N<sub>2</sub> 吹干。将制备好的试样置于烘箱内,在 90 ℃保温处理 30 min。

#### 1.4 表面形貌观察与接触角的测量

采用荷兰的 Phillips XL30 型扫描电子显微镜和日本 KEENCE 公司生产的 VHX-600E 型超景深三维显微镜对试样表面形貌进行表征。采用德国的 Easy-Drop型接触角测量仪测定去离子水在试样表面的接触角,初始水滴体积为 2 μL。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 铝镁合金试样的表面形貌

经激光加工的表面三维形貌如图 1 和 2 所示,试 样表面均具有规则的微结构。当进行单点激光加工时, 对于小间距(50 µm),由于飞溅出的熔融物相互堆积而 形成高于表面的类似于圆台形凸起,如图 1(a)所示; 对于大间距(100、150 和 200 µm),相互堆积作用减小, 致使基底被熔化成圆台形凹坑,如图 1(b)所示;当进 行激光扫描网格加工时(夹角 90°),对于小间距,形成 高于基体表面的类似于正四棱台形结构,如图 2(a)所 示;对于大间距,形成上表面与基面等高的类似于正 四棱台形结构,如图 2(b)所示。

#### 2.2 试样表面的接触角

铝镁合金表面经过抛光后,其接触角为 74.7°,属 于亲水表面。经激光加工,其接触角接近 0°,形成超 亲水表面。经 FDTS、OTS、APS 3 种自组装分子膜 修饰的抛光表面的接触角为固有接触角 θ<sub>e</sub>。不同微结 构及间距的试样表面接触角的实际测量值如表 3 所 列,其变化趋势如图 3 所示。从表 3 可以看出,沉积 FDTS、OTS 自组装分子膜时试样的固有接触角 θ<sub>e</sub>均 大于 90°,因此,FDTS、OTS 自组装分子膜具有疏水 性质;而沉积 APS 自组装分子膜时试样的固有接触角 θ<sub>e</sub>均小于 90°,因此,APS 自组装分子膜具有亲水性 质。

从表 3 和图 3 可以看出, FDTS 和 OTS 自组装 分子膜修饰的试样的接触角随着微结构间距的增大而 减小,最大接触角达 156°,并且均形成疏水表面。而 APS 自组装分子膜修饰的试样接触角随微结构间距的 增大而增大,当间距为 50 μm 时,接触角接近 0°,形 成亲水或超亲水表面。沉积 3 种分子膜的表面疏水性 按大小顺序依次为: FDTS>OTS>APS。该结果可以 用带有微结构的粗糙表面上液滴接触角表征的两种模 式——Wenzel 模式和 Cassie 模式来解释。

#### 2.3 微结构数学模型的建立

Wenzel 模式认为液滴充满凹坑,属于完全的液固



#### 图1 圆台形凸起和圆台形凹坑形貌

Fig. 1 Topographies of frustum of cone (a) and notch of taper hole (b)





Fig. 2 Topographies of frustum of pyramid with small spacing (a) and big spacing (b)

Table 3   Water	contact angles of specin	nens				
Samula	$\mathbf{D}_{aliah}(\mathbf{A})/(0)$	Cussing	Water contact angle/(°)			
Sample	$POIISI(\theta_e)/($ )	Spacing	50 µm	100 µm	150 µm	200 µm
EDTC	100.9	Frustum of cone	156.0	123.6	115.2	108.7
FD15	109.8	Frustum of pyramid	155.1	150.8	124.5	118.6
OTC	100.5	Frustum of cone	152.5	115.7	104.6	98.8
015		Frustum of pyramid	150.8	123.1	114.2	107.7
ADC	57.2	Frustum of cone	0	23.5	39.5	45.3
Arð	57.2	Frustum of pyramid	0	0	26.6	28.4





图 3 圆台形和棱台形微结构试样的接触角



接触。如果以  $\theta_w$ 表示 Wenzel 模式下的表征接触角, rw表示粗糙度因子,即粗糙表面的实际接触面积与垂 直投影面积之比,则表征接触角可由式(1)计算<sup>[14]</sup>。

$$\cos\theta_{\rm w} = r_{\rm w}\cos\theta_{\rm e} \tag{1}$$

而 Cassie 模式认为当表面结构疏水性较强时,在 疏水表面上的液滴并不能填满粗糙表面上的凹槽,在 液滴下将有截留的空气存在。如果以 $\theta_c$ 表示 Cassie 模 式下的接触角, øs 表示液滴与固体的接触面积占复合 界面的面积分数,则表征接触角可由式(2)计算<sup>[15]</sup>。

$$\cos\theta_{\rm c} = -1 + \phi_{\rm S}(\cos\theta_{\rm e} + 1) \tag{2}$$

圆台形凸起、圆台形凹坑及棱台的各几何参数分 别如图4所示。图中以虚线框内的部分为一个周期。

对于圆台形凸起(见图 4(a)), P 为一个周期内两相 邻圆台间距,r、R分别为圆台上下底圆半径,h为圆 台高度。Wenzel 模式粗糙度因子 rw和 Cassie 模式的 接触面积分数øs可由式(3)和(4)计算。

$$r_{\rm w} = \frac{\pi (R+r)\sqrt{(R-r)^2 + h^2} + P^2 + \pi (r^2 - R^2)}{P^2}$$
(3)

$$\phi_{\rm S} = \frac{\pi r^2}{P^2} \tag{4}$$

对于圆台形凹坑(见图 4(b)),可由式(5)和(6)计算 出 $r_w$ 和 $\phi_s$ 。

$$r_{\rm w} = \frac{\pi (R+r)\sqrt{(r-R)^2 + h^2} + P^2 + \pi (R^2 - r^2)}{P^2}$$
(5)

$$\phi_{\rm S} = 1 - \frac{\pi r^2}{P^2} \tag{6}$$

对于正四棱台形微结构(见图 4(c)), d1、d2 分别表 示上下底面边长, h 表示棱台高度。可由式(7)和(8)计 算出 $r_w$ 和 $\phi_s$ 。

$$r_{\rm w} = \frac{2(d_1 + d_2)\sqrt{\frac{(d_2 - d_1)^2}{4} + h^2} + P^2 + d_1^2 - d_2^2}{P^2}$$
(7)

$$\phi_{\rm S} = \frac{d_1^2}{P^2} \tag{8}$$

根据测量得到的R、r、 $d_1$ 、 $d_2$ 、h和 P值(见表 4),



图 4 圆台凸起、圆台凹坑和棱台的几何参数

**Fig. 4** Geometry parameters for frustum of cone heave (a), notch of taper hole (b) and frustum of pyramid (c)

表4 参数测量值
----------

Table 4	Measurement	of para	meters	(µm)	
---------	-------------	---------	--------	------	--

计算出理论接触角  $\theta_{w}$ 、 $\theta_{c}$ ,并与实际测得的接触角  $\theta^{*}$ 进行比较,结果如图 5~7 所示。实际测量值大于 150° 的接触角均接近 Cassie 模式计算的接触角,而实际测 量值小于 150°的接触角更接近 Wenzel 模式计算的接 触角。对于 Wenzel 方程,由于 r≥1,所以表面微结构 能使亲水表面更亲水, 疏水表面更疏水。由表3可见, 抛光铝镁合金试样表面接触角为 74.7°,为亲水表面; 激光加工微结构后,试样表面接触角为0°,形成超亲 水表面。在抛光铝镁合金试样表面沉积 FDTS 和 OTS 自组装分子膜均使试样的接触角大于 90°, 变成疏水 表面,因此,微结构使得试样表面接触角更大,甚至 形成超疏水表面。而在抛光铝镁合金试样表面沉积 APS 自组装分子膜时,试样的接触角小于 90°,为亲 水表面,因此,微结构使得试样表面接触角更小。又 由于 FDTS 末端集团"一CF3"的表面能大大低于 OTS 的末端集团"一CH<sub>3</sub>"的表面能<sup>[16]</sup>,因此,沉积 FDTS 所得试样的接触角大于沉积 OTS 所得试样的接触角。

#### 2.4 微结构高度对接触角的影响

微结构的几何参数不仅对接触角有很大影响,而 且制约微结构的制备及其机械强度和寿命,其中高度 h 的影响尤为显著,因此以高度 h 作为单一变量研究 其对圆台凸起,圆台凹坑和棱台 3 种模型的表面接触 角的影响。设间距 *P*=50 μm,圆台凸起和圆台凹坑的

	asurement of pa	arameters (µm	)			
Р	r	R	$d_1$	$d_2$	h (frustum of cone)	<i>h</i> (frustum of pyramid)
50	10	25	22	50	50	36
100	42	12	50	100	45	31
150	42	12	100	150	45	31
200	42	12	150	200	45	31





Fig. 5 Contact angles of specimens with frustum of cone (a) and frustum of pyramid (b) with FDTS

上底圆半径 r 分别为 10 $\mu$ m、25 $\mu$ m, 棱台上底面  $d_1$ =20  $\mu$ m, 斜率固定, 高度 h 在 0~50  $\mu$ m 之间变化。计算 3 种微结构在沉积 FDTS、OTS、APS 自组装分子膜时 的表面接触角,结果如图 8~10 所示。

从图 8~10 可以看出, 3 种微结构在 Cassie 模式下的接触角与高度无关,且沉积同种分子膜的表面接触



图 6 圆台形和棱台形微结构沉积 OTS 试样的接触角

Fig. 6 Contact angles of specimens with frustum of cone (a) and frustum of pyramid (b) with OTS



图 7 圆台形和棱台形微结构沉积 APS 试样的接触角







Fig. 8 Contact angles of Wenzel model (a) and Cassie model (b) with FDTS



图 9 沉积 OTS 的 Wenzel 模式和 Cassie 模式接触角

Fig. 9 Contact angles of Wenzel model (a) and Cassie model (b) with OTS



**图 10** 沉积 APS 的 Wenzel 模式和 Cassie 模式接触角

Fig. 10 Contact angles of Wenzel model (a) and Cassie model (b) with APS

角按大小顺序为:圆台凸起>棱台>圆台凹坑。而对 于 Wenzel 模式而言,固有接触角 θ<sub>e</sub>>90°时(FDTS、 OTS),具有微结构的表面接触角随微结构高度的增大 而增大,且当 h<35 μm 时,接触角按大小顺序为:圆 台凹坑>棱台>圆台凸起。当 h>35 μm 时,接触角按 大小顺序依次为:棱台>圆台凹坑>圆台凸起。固有 接触角 θ<sub>e</sub><90°时(APS),具有微结构的表面接触角随 微结构高度的增大而减小,接触角按大小顺序为:圆 台凸起>棱台>圆台凹坑。由图 10 可知,当微结构具 有适当的几何参数,且使液滴处于 Cassie 状态时,表 面微结构的制备能使亲水的 APS 分子膜表现出疏水 性质。

# 3 结论

1) 利用激光加工在铝镁合金表面分别构建出圆

台凸起、圆台凹坑和正四棱台3种微结构。在微结构 表面分别沉积 FDTS、OTS、APS 自组装分子膜后, 表面接触角按大小顺序为: FDTS>OTS>APS。表面 接触角最大达 156°,形成超疏水铝镁合金表面。沉积 FDTS、OTS 自组装分子膜的表面接触角随微结构间 距增大而减小,沉积 APS 自组装分子膜的表面接触角 随微结构间距增大而增大。

2) 建立了 3 种微结构的数学模型,分别计算在 Wenzel 模式和 Cassie 模式下的理论接触角,并与实测 值比较。发现大于 150°的实测接触角接近 Cassie 模式 的计算值,而小于 150°的实测接触角接近 Wenzel 模 式的计算值。

3) 在 Wenzel 模式下,当固有接触角  $\theta_e > 90^{\circ}$ 时 (FDTS、OTS),具有微结构的表面接触角随微结构高 度的增大而增大;当固有接触角  $\theta_e < 90^{\circ}$ 时(APS),具 有微结构的表面接触角随微结构高度的增大而减小。

#### REFERENCES

- 赵 宁,卢晓英,张晓艳,刘海云,谭帅霞,徐 坚. 超疏水 表面的研究进展[J]. 化学进展,2007,19(6):860-871.
   ZHAO Ning, LU Xiao-ying, ZHANG Xiao-yan, LIU Hai-yun, TAN Shuai-xia, XU Jian. Progress in superhydrophobic surfaces
   [J]. Progress in Chemistry, 2007, 19(6): 860-871.
- [2] 康志新,赖晓明,王 芬,龙 雁,李元元. Mg-Mn-Ce 镁合 金表面超疏水复合膜层的制备及耐腐蚀性能[J]. 中国有色金 属学报, 2011, 21(2): 283-289.
  KANG Zhi-xin, LAI Xiao-ming, WANG Fen, LONG Yan, LI Yuan-yuan. Preparation of super-hydrophobic duplex-treated film on surface of Mg-Mn-Ce magnesium alloy and its corrosion resistance [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 283-289.
- [3] KANG Z X, YE Q, SANG J, LI Y Y. Fabrication of super-hydrophobic surface on copper surface by polymer plating
   [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4543-4547.
- [4] ZHANG Ling, SUN Jun-qi. Layer-by-layer codeposition of polyelectrolyte complexes and free polyelectrolytes for the fabrication of polymeric coatings [J]. Macromoleeules, 2010, 43(5): 2413–2417.
- [5] CHEN Ying-bo, KIM H. Preparation of superhydrophobic membranes by electrospinning of fluorinated silane functionalized poly(vinylidene fluoride) [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(15): 7073–7077.
- [6] 季 凯, 祖国胤, 姚广春. 一种新型可焊耐蚀 6×××系铝合 金材料[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 1907–1912.
  JI Kai, ZU Guo-yin, YAO Guang-chun. A novel welded and corrosion-resistant 6××× aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1907–1912.
- [7] FURSTNER R, BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces
   [J]. Langmuir, 2005, 21(3): 956–961.
- [8] SARKAR D K, FARZANEH M, PAYNTER R W. Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces [J]. Materials Letters,

2008, 62(8): 1226-1231.

- [9] 李艳峰, 于志家, 于跃飞, 霍素斌, 宋善鹏. 铝合金基体上超 疏水表面的制备[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(1): 6-10. LI Yan-feng, YU Zhi-jia, YU Yue-fei, HUO Su-bin, SONG Shan-peng. Fabrication of super-hydrophobic surfaces on aluminum alloy [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(1): 6-10.
- [10] 粟常红,肖 怡,崔 喆,刘承果,王庆军,陈庆民.一种多 尺度仿生超疏水表面制备[J]. 无机化学学报, 2006, 22(5): 785-788.

SU Chang-hong, XIAO Yi, CUI Zhe, LIU Cheng-guo, WANG Qing-jun, CHEN Qing-min. A simple way to fabricate multi-dimension bionic super-hydrophobic surface [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2006, 22(5): 785–788.

- [11] LI X M, REINHOUDT D, CREGO-CALAMA M. What do we deed for a superhydrophobic surface? A review on recent progress in the preparation of superhydrophobic surface [J]. Chemical Society Reviews, 2007, 36(8): 1350–1368.
- [12] 公茂刚, 许小亮, 曹自立, 刘远越, 朱海明. 两步法制备超疏 水 ZnO 纳米棒薄膜[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1885-1889.
  GONG Mao-gang, XU Xiao-liang, CAO Zi-li, LIU Yuan-yue, ZHU Hai-ming. Two-step growth of superhydrophobic ZnO nanorod array films [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1885-1889.
- [13] YOSHIMITSU Z, NAKAJIMA A, WATANABE T, HASHIMOTO K. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets [J]. Langmuir, 2002, 18: 5818–5822.
- [14] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Ind Eng Chem, 1936, 28: 988–994.
- [15] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces [J]. Trans Faraday Soc, 1944, 40: 546–511.
- [16] SRINIVASAN U, HOUSTON M R, HOWE R T, MABOUDIAN R. Alkyltrichloro-silane-based self-assembled monolayer films for stiction reduction in silicon micromachines [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1998, 7: 252– 260.

(编辑 何学锋)