

doi:10.11933/j.issn.1007-9289.20191023001

# 仿生微织构与氟硅烷修饰对6061铝合金浸润性的影响

李杰<sup>1</sup>, 黄榕敏<sup>1</sup>, 王超磊<sup>2</sup>, 吴昊晨<sup>1</sup>, 张阳<sup>1</sup>

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 北京仿真中心 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

**摘要:** 利用激光辐射效应在铝合金表面构建仿生微织构, 通过自组装工艺在微织构表面实现氟硅烷改性处理, 制备得到特殊浸润性表面。利用扫描电镜、三维形貌仪、接触角测量仪对试样微观形貌和浸润性进行表征。测试与分析结果表明, 仿生微织构和氟硅烷修饰对构建特殊浸润性表面起到重要作用; 微织构的形貌差异、加工矩阵间距的变化均会影响试样表面对水接触角。通过数学模型的计算进一步证实, 仿生微织构表面具有的超疏水浸润状态符合 Cassie 模型预测。

**关键词:** 浸润性; 仿生微织构; 接触角; 氟硅烷修饰

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2020)02-0029-08

## Effects of Biomimetic Microtexture and Fluoroalkylsilane Modification on Wettability of 6061 Aluminum Alloy

LI Jie<sup>1</sup>, HUANG Rongmin<sup>1</sup>, WANG Chaolei<sup>2</sup>, WU Haochen<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>

(1. School of Materials and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Biomimetic microtexture was constructed on aluminum alloy substrate by laser irradiation. Subsequently, perfluorodecyltrichlorosilane were deposited on these surfaces by nanocoating technology through a self-assembly route to form special wettability aluminum alloy surface. Scanning electron microscope, surface profiler and contact angle measurement were used to analyse the surface properties, and wettability of specimens. The results indicate that biomimetic microtexture and SAMs play an important role in preparing superhydrophobic surface. Contact angle of the water droplet on the substrates is affected by type of microtexture in morphology and matrix pitch spacing. The calculation of the mathematical models further confirms that, the values of contact angle measurement are in accord with the Cassie model's prediction

**Keywords:** wettability; biomimetic microtexture; contact angle; fluoroalkylsilane modification

## 0 引言

自然生物界经亿万年的发展, 许多生物进化出独特的神奇功效。如能减少流体阻力的鲨鱼皮肤<sup>[1]</sup>, 能收集空气中水分的仙人掌<sup>[2]</sup>、蜘蛛网<sup>[3]</sup>, 能捕获昆虫的猪笼草<sup>[4]</sup>, 具有自清洁特性

的荷叶<sup>[5]</sup>、蝴蝶翅膀<sup>[6]</sup>、水龟腿<sup>[7]</sup>等。学界对这些生物进行研究表明, 生物体具有的特殊表面是赋予其神奇功效的决定性因素<sup>[1-7]</sup>。这些表面所具有的减阻、集水、超滑和自洁性能均与表面特殊浸润性密切相关。浸润性作为表征固体表面在液体浸润状态下固液气三相转变的能力, 其对

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-12-09

通信作者: 李杰(1984—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 微纳米摩擦学; E-mail: lijie0739@btbu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51975006, 51505006); 北京市委组织部优秀人才(2016000020124G026)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51975006, 51505006) and Talent Project of Beijing Municipal Party Committee Organization Department (2016000020124G026)

引用格式: 李杰, 黄榕敏, 王超磊, 等. 仿生微织构与氟硅烷修饰对6061铝合金浸润性的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 29-36.

LI J, HUANG R M, WANG C L, et al. Effects of biomimetic microtexture and fluoroalkylsilane modification on wettability of 6061 aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(2): 29-36.

固体表面液体流动和相变等性能具有重要影响<sup>[5]</sup>,使其在诸多重要的领域起到关键作用,如材料的防水与洗涤、工业粉末的泡沫浮选、润滑与摩擦、农作物对喷洒药物的吸收利用、油漆的流干性等<sup>[4,6-7]</sup>。现有研究表明,固体表面所具有的特殊浸润性是由固液气三相工况、固体表面微观形貌和固体材料的化学组成三者共同作用的结果,考虑到固液气三相在实际固体表面工况的近似一致,探究固体表面微观形貌、表面化学组分与表面浸润性的关系成为研究热点<sup>[8]</sup>。

激光表面织构化作为近些年发展起来的表面处理工艺<sup>[9]</sup>,其在涉及材料表面性能与界面效应方面具有广泛的应用潜力。激光具有瞬态高能量密度、可控性强,对材料形貌影响小等技术优势,使激光织构化在润滑与密封<sup>[10]</sup>、改善摩擦工况<sup>[11]</sup>、提高力学性能等方面<sup>[12]</sup>适合工业化微织构的加工与处理。现阶段,激光微织构对材料表面浸润性的研究已取得一定进展,如杨奇彪等<sup>[13]</sup>利用激光在硬质合金 YG3 表面构造出微凹坑阵列,研究凹坑形貌参数对接触角的影响,发现接触角与表面粗糙度值成正比关系。熊其玉等<sup>[14]</sup>利用激光对淬火 45# 钢表面进行 6 种微织构的构建,研究表面结构特征对表面接触角影响,发现微织构表面的浸润性优于原表面,且矩形微凹坑表面得到最优浸润性。Sciancalepore 等<sup>[15]</sup>对不锈钢 316 L 进行表面激光处理,得到不同类型微织构,研究了微织构对不锈钢表面润湿性的影响,发现只有特定的表面微结构才能有效降低表面浸润性,验证了获得疏水不锈钢表面的

可能性。

文中以轻金属 6061 铝合金作为研究对象。其具有质轻、耐蚀、传热良好、易加工成型和可焊接等优点,同时存在硬度偏低、耐磨性差、线膨胀系数较大等缺点。研究从仿生学角度出发,利用激光对铝合金进行织构化处理,获取具有不同仿生结构的表面微结构,通过氟硅烷进行表面修饰改性,来研究不同微织构对铝合金表面浸润性的影响。为具有特殊浸润性铝合金表面的开发制备及应用提供试验基础,以拓展铝材的应用领域。

## 1 试验

### 1.1 试验设备与试剂

基底材料为 6061 铝合金(上海益励金属材料有限公司),其组分如表 1 所示。用于激光微织构加工设备为 HGL-LSY50F 激光打标机(武汉华工激光工程有限责任公司);光学接触角测量仪为 XG-CAMB2 型(上海轩轶创析工业设备有限公司);形貌表征设备:三维超景深显微镜 VHX-600 型(日本 Keyence)、台式扫描电子显微镜 Phenom ProX(荷兰 Phenom World)、组分表征为 Phenom ProX 利用 EDS 进行样品分析;1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸基三乙氧基硅烷,简称氟硅烷,分子式为  $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7(\text{CH}_2)_2\text{SiCl}_3$ ,纯度为 97%(北京伊诺凯科技有限公司);溶剂为异辛烷,纯度 99%(北京伊诺凯科技有限公司);丙酮/乙醇,纯度 95%(北京伊诺凯科技有限公司);高压氮气,纯度 99.5%(北京北氧利来科技有限公司)。

表 1 6061 铝合金的组分

Table 1 Compositions of 6061 aluminum alloy (w/%)

Element	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
Content	0.15	0.40-0.80	0.70	0.15-0.40	0.15	0.04-0.35	0.25	0.15	Balance

### 1.2 仿生微织构的构建

利用激光打标机对铝合金试样进行表面微织构的过程如下:首先将试样经 800#, 1000#, 1500# 砂纸研磨处理后抛光,其后依次在丙酮、乙醇和去离子水中超声清洗 2 min,取出后用高纯  $\text{N}_2$  吹干,然后进行激光处理。激光打标机工作电压 220 V,输出功率为 20 W,激光波长 1064 nm,焦距  $f = 160$  mm,激光最优加工光斑直径约 25  $\mu\text{m}$ 。加工过程中通过计算机控制输出电流强度、光照时间

和光斑移动速率来控制激光辐射强度,利用计算机绘制加工矩阵来构建不同形貌的微织构。

### 1.3 氟硅烷改性修饰

利用超声波清洗机将具有表面微织构试样在丙酮、乙醇、去离子水中依次超声清洗 2 min,去除试样表面粘附杂质;将上述试样在波长 254 nm 的紫外灯下照射不少于 150 min,使试样表面充分羟基化;用微注射器抽取 150  $\mu\text{L}$  溶质氟硅烷加入 10 mL 溶剂异辛烷中,配制成反应溶

液;将上述羟基化后的试样浸入到反应溶液中,隔绝空气条件下静置 60 min,取出后依次经丙酮、乙醇、去离子水超声清洗,高纯 N<sub>2</sub> 吹干;将上述试样放置真空干燥箱 90 °C 下固化 60 min。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 仿生微结构形貌分析与表征

受自然生物界表面的启发,如何构建出类似

的微观形貌结构是仿生学研究的重点工作。考虑到激光辐射加工具有瞬态高温、可控性好、重复性高等诸多优点,铝合金试样表面利用激光来进行仿生学构建,以期改善铝合金试样的浸润性。研究中仿生微结构造型有 4 种,分别命名为“蜂巢型”、“尖顶型”、“凸台型”和“波浪型”。四型微结构依次对应图 1(a)~(d),每组图片分别为 SEM、三维形貌及加工矩阵示意图。

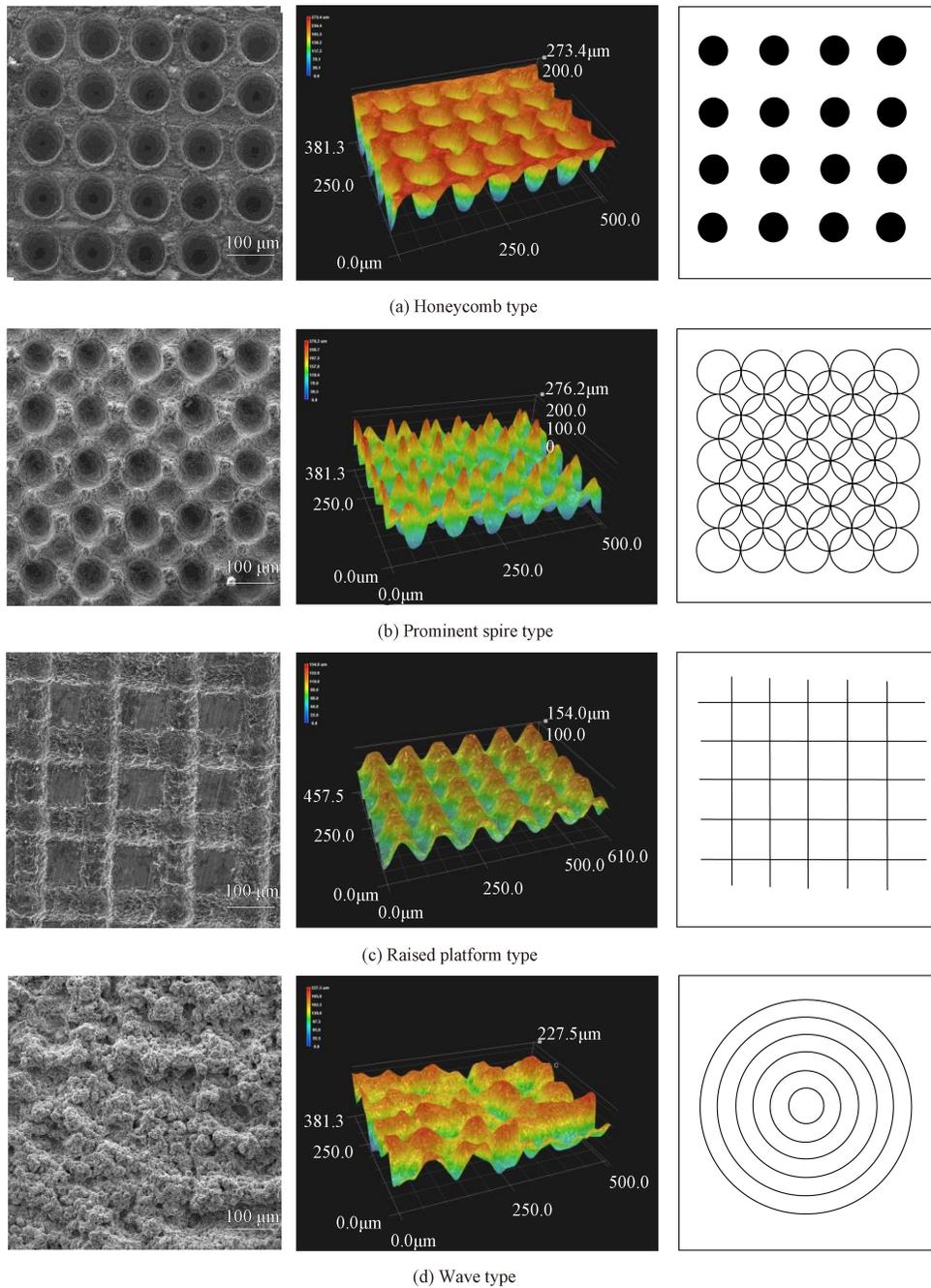


图 1 激光仿生微结构表面形貌

Fig. 1 Topographies of aluminum specimen by laser biomimetic manufacturing

图1(a)所示为点加工矩阵形成的蜂巢型微结构,通过计算机绘制点加工矩阵,控制激光辐射强度和调节点间距进而得到一系列具有明显点阵分布的微结构。试验过程中发现,单点加工形成的空洞直径一般约为 $75\ \mu\text{m}$ ,为保证形成空洞的形状完整性,点间距的设置值为 $80$ 、 $90$ 、 $100$ 、 $110$ 和 $120\ \mu\text{m}$ 。图示微形貌的点间距为 $100\ \mu\text{m}$ 。由SEM可见,该表面中存在的近似于圆形的孔洞是激光直接灼烧的结果,非直接灼烧表面得到存留,从三维形貌可见该微结构形貌类似于蜂巢结构。对蜂巢结构的进一步观察,在孔洞之间明显可见尺寸更小的附着物,推测其为铝合金在激光辐射灼烧作用下氧化物的生成及热作用下的形貌改变。

图1(b)所示为双层外切圆环矩阵叠加的尖顶型微结构。利用计算机绘制两层叠加的外切圆环矩阵,通过控制激光辐射强度和调节圆环的直径来实现具有明显特征微结构。设置加工圆环直径分别为 $100$ 、 $150$ 、 $200$ 、 $250$ 和 $300\ \mu\text{m}$ 。图示微形貌的圆环直径为 $100\ \mu\text{m}$ 。由三维形貌可见,微结构具有明显的尖顶结构,且尖顶的高度差异明显。尖顶的高度明显分为两类,即高尖顶一类,低尖顶一类,且呈现交叉分布的情况。通过对比SEM可见,单个圆环的中心为非直接灼烧表面,其存留部分最终形成高尖顶;四个圆环相互外切,其中心为非直接灼烧表面,其存留部分形成低尖顶。单个圆环在进行激光辐射过程中,其运动路线的起点和终点重合,所以在SEM中可见的圆形坑洞为圆环运行轨迹的起止点。由尖顶部分的SEM可见尺寸更小的附着物,推测为铝合金氧化物的生成及热应力造成的形变。

图1(c)所示为方形网格矩阵形成的凸台型微结构。该矩阵对应图形为相位差 $90^\circ$ 的两种线段集合。该微结构是激光辐射加工过程通过改变激光辐射强度和调节线段间距得到。设置加工直线间距分别为 $100$ 、 $150$ 、 $200$ 、 $250$ 和 $300\ \mu\text{m}$ 。图示微形貌的线段间距为 $150\ \mu\text{m}$ 。由三维形貌可见,线段所在的辐射区域形成了明显的沟槽,而非激光辐射区域的表面得到存留,形成了平台向上突起的微结构。在线段交叉的区域由于激光辐射的二次作用,其深度明显较大。由SEM可见,因氧化物生成和热应力的影响,在突起平

台的边缘可见尺寸更小的附着突起物。

图1(d)所示为同心圆环矩阵形成的波浪型微结构。该结构是通过改变激光辐射强度和调节相邻圆环之间的间距得到的。设置加工同心圆环间距分别为 $50$ 、 $100$ 、 $150$ 、 $200$ 和 $250\ \mu\text{m}$ 。图示形貌相邻圆环间距为 $50\ \mu\text{m}$ 。由三维形貌可见,圆环矩阵形成的三维形貌并不具有明显的规律性,推测为图示相邻圆环间距较小,造成相邻的加工点之间形成干涉,造成局部微结构规律性较差。由SEM可见较明显的弧形结构物,其上分布着尺寸不等的颗粒附着物,推测为热应力的影响和金属氧化物的生成。

激光辐射加工后试样微结构的组分表征用EDS进行样品分析。图2所示为铝合金表面微结构的EDS谱图。试样谱图中出现了较为明显O元素峰,证实经激光微结构后试样上有明显的氧化现象发生,推测其主要产物为原有元素的氧化物。

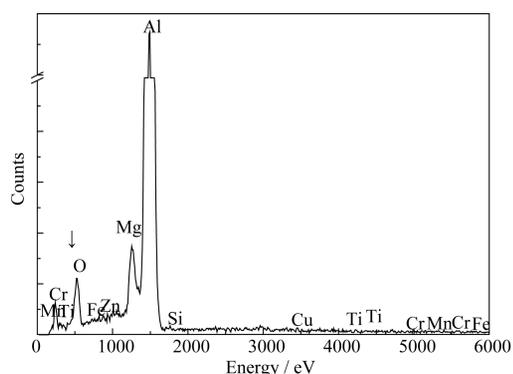


图2 铝合金表面微结构EDS分析

Fig. 2 EDS analysis of microtexture on aluminum specimen surface

## 2.2 浸润性表征与分析

接触角是表征固体表面浸润性的常用指标。为研究仿生微结构对铝合金试样表面浸润性的影响,依次对抛光处理的光滑基材试样、四型仿生微结构试样、经氟硅烷修饰试样进行静态接触角的测量。6061铝合金试样光滑基材的对水平均接触角约为 $56.8^\circ \pm 2^\circ$ ,验证了铝合金基材的亲水性,如图3(a)所示。利用氟硅烷修饰光滑基材后,测得其平均接触角为 $118.9^\circ \pm 2^\circ$ ,见图3(b)。该结果表明氟硅烷改性修饰使基材疏水性明显提升,通过自组装技术在铝合金试样表面发生一系列的脱水缩合反应<sup>[16]</sup>,氟硅烷试剂在试样表面形

成的长碳链和末端官能团三氟甲基(-CF<sub>3</sub>)对疏水性的提高具有重要意义,这与现有的研究结果相符<sup>[17]</sup>。对四型仿生微结构试样进行接触角测量,水滴在接触试样表面瞬间,迅速平铺于试样表面,接触角近乎 0°,呈明显超亲水性,如图 3(c)所示。对水滴在微结构试样表面迅速平铺呈现超亲水性的分析认为:一方面,激光辐射试样表面过程中激光发出高热迅速聚集于基材表面,能量扩散到微结构表层及内部,使基材表面能增大。根据定性规律相似相溶原理<sup>[18]</sup>,微结构表面在激光辐射作用下表面能逐渐升高而愈加接近于纯水的表面自由能,因此造成水滴的迅速铺展;另一方面,从微结构形貌图 1 可见,激光辐射的热作用使试样表面发生形变,裂纹和微小孔隙的存在会增大水滴的毛细吸附<sup>[19]</sup>,这会诱发基材微结构和水分子之间的范德华力增强<sup>[20]</sup>,从而诱发水滴的铺展,使其呈现超亲水性。利用氟硅烷试剂对四型仿生微结构试样进行改性修饰,得到接触角与加工矩阵间距的对应关系如图 4 所示。由图示数据可见,四型仿生微结构试样经氟硅烷修饰后,相比光滑基材(56.8°±2°)、经氟硅

烷修饰的光滑基材(118.9°±2°)、四型仿生微结构(近乎 0°),接触角数值明显增大。分析认为氟硅烷改性修饰对试样疏水性具有明显提升作用。仿生微结构和自组装分子膜对疏水性的提升具有明显的提升作用。得益于仿生微结构和自组装技术相结合,实现了铝合金基材由亲水(57.1°)向超亲水(仿生微结构表面接触角近乎 0°),再到疏水/超疏水的转变。

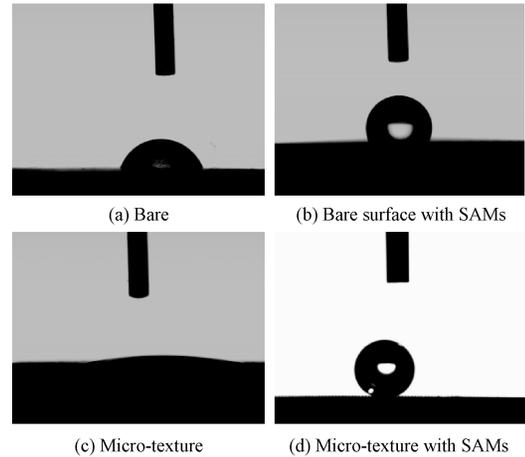


图 3 不同试样表面接触角状态

Fig. 3 Contact angles on different specimen surfaces

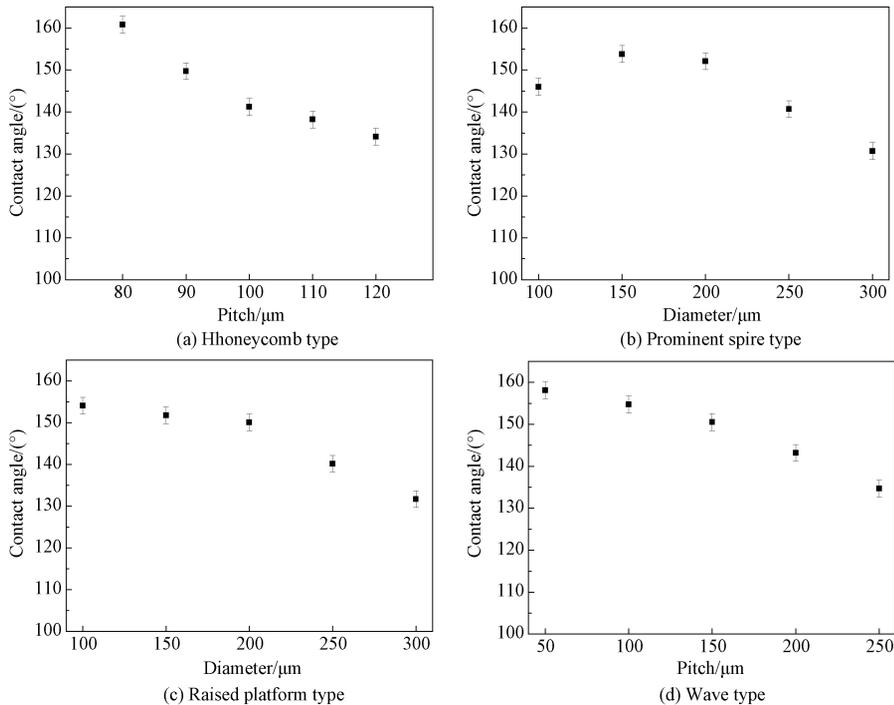


图 4 接触角与加工矩阵间距的对应关系

Fig. 4 Relationship between contact angles on surfaces specimen and laser manufacturing with different pitch

由接触角与加工矩阵间距的对应关系可见,四型仿生微结构试样经氟硅烷修饰后其静态接

触角较原基材普遍增大,接触角均在 130°以上,极值可达 160.8°±2°,见图 3(d)。同型微结构试

样表面接触角呈现出的变化趋势为接触角随加工矩阵间距的增加而减小(尖顶型稍有差异,呈现先增大后减小的趋势)。分析认为,微织构形貌和低表面能物质氟硅烷修饰的双重作用是试样呈现疏水性明显增大的主要原因。对同型微织构而言,接触角的变化趋势与微织构表面的微细粗糙程度相关,即加工间距差异造成微结构形貌不同。接触角的变化趋势可以通过以下两种经典接触模型加以解释。根据经典固液气三相接触模型可知,液滴在固体表面所处状态主要有两种类型:Wenzel模型<sup>[21]</sup>和Cassie模型<sup>[22]</sup>。Wenzel模型认为,液体在非光滑固体表面时,液滴能够进入到微观粗糙表面的微小间隙中,液滴此时具有的接触角与固体表面的粗糙程度相关,其接触角满足如下关系:

$$\cos\theta = r\cos\theta_0 \quad (1)$$

式中: $\theta_0$ 为本征接触角,即光滑表面上的接触角; $r$ 为粗糙因子,即实际接触面积与本征接触面积之比; $\theta$ 为表观接触角,即粗糙表面上的接触角。按照Wenzel模型预测可知,粗糙因子 $r$ 是影响液滴接触角的重要因素, $r$ 的数值必然大于1,因此随着固体表面粗糙程度的增加, $\cos\theta$ 的值会明显大于 $\cos\theta_0$ ,其会增强固体表面对液滴的亲疏性,使原本亲液性表面更亲液,疏液性表面更加疏液。对于同型微织构而言,加工矩阵间距不同,使其粗糙因子的数值随加工间距的增大而减小,故其接触角呈现下降的趋势。

与Wenzel模型的浸润状态不同,Cassie模型认为液滴在非光滑表面上并不能完全浸润微观粗糙表面的细小凹陷处,在液体和固体之间的凹陷处存在空气,此时液滴在固体表面的接触状态

是固液气三相复合接触状态,其接触角满足如下关系:

$$\cos\theta = f_g\cos\theta_g + f_s\cos\theta_s \quad (2)$$

式中: $f_g$ 和 $f_s$ 分别为气液接触面和固液接触面占整个接触面的面积百分比; $\theta_g$ 和 $\theta_s$ 分别为液体对空气、固体表面的本征接触角; $\theta$ 为表观接触角。由于 $\theta_g = 180^\circ$ , $f_g + f_s = 1$ ,所以式(2)可变换为:

$$\cos\theta = -1 + f_s(\cos\theta_s + 1) \quad (3)$$

由式(3)可知, $\cos\theta$ 与固液面积百分比 $f_s$ 成正比,对于疏水性固体而言,表观接触角 $\theta$ 随 $f_s$ 的增大而减小。按照Cassie模型预测可知,当液滴在非光滑表面上液滴与固体表面直接接触的面积占比越小,其接触角越大,固体表面疏水性越强。对此模型而言,加工矩阵间距的不同,直接影响微织构结构中固液接触面积的密集程度。随加工矩阵间距的增加,产生的凹陷位置的密集程度下降,从而造成固液接触面积的占比增加,因此,同型微织构试样接触角呈现出随加工矩阵间距增大而下降的趋势。

以上两种接触角状态模型的讨论结果是对接触角变化趋势的定性分析,且已有研究表明,通常液滴在固体表面上的状态模型往往符合其中之一。为定量分析接触角的变化趋势和接触角状态模型,考虑到四型微织构表面结构的差异性和数值计算的可操作性,以“蜂巢型”仿生微织构为例,研究其接触状态模型。图形的两种状态模型中关键参数 $r$ 和 $f_s$ 可由三维形貌和SEM数据测算获得,(利用Photoshop图像分析法测量)进而可以得到两种状态模型下,其理论接触角分布曲线与实测接触角数据点之间对应关系,如图5所示。

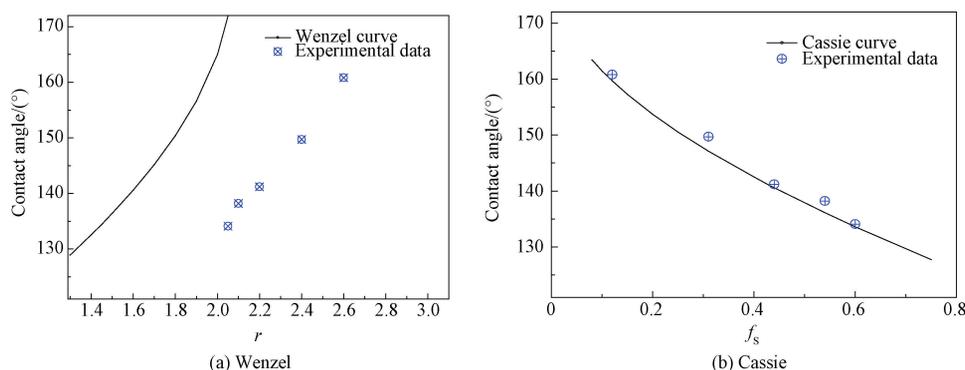


图5 试验数据与理论曲线对比

Fig. 5 Comparison of experimental data with theoretical curve

由图5实测数据点的分布与两种模型预测曲线比对可见,接触角数据实测值分布大致与Cassie模型理论曲线相一致。据Wenzel模型理论曲线可知,由微织构形貌测算出的粗糙因子 $r$ 均大于2,接触角实测值与该曲线理论接触角数值的相对误差极大。由此可知,水滴在仿生微织构铝合金基材上的浸润状态符合Cassie模型,即水滴在微织构表面的浸润状态是一种复合接触,水滴不能完全浸润微织构表面的微小裂隙结构。随激光加工间距增大,微织构表面上凹坑的坑深和孔径基本保持不变,水滴不容易进入到凹坑内部。但凹坑之间的间距会随加工间距的增加而增大,因此造成固液接触占比面积增加,因而接触角随之减小。与“蜂巢型”微织构试样相比,其余几型微织构的接触角变化趋势有着类似的原因。其中,“尖顶型”微织构出现先增大后减小的变化趋势,分析认为,“尖顶型”微织构表面的形成是由两层外切圆环双重作用的结果,在加工间距为100  $\mu\text{m}$ 时,激光辐射圆环路径造成环间尖顶的高度被降低,使微织构试样上的凹坑高度变小,其“气垫”结构形式下降。随着加工间距逐渐增大,激光辐射圆环路径对环间的尖顶的高度影响降低,此时的尖顶间距成为影响接触角的主导因素,因此随着加工间距增大后,接触角也呈现减小的趋势。

进一步分析实测数据点与理论曲线的分布,在Wenzel模型理论中,测算粗糙因子均大于2,其对应理论接触角远小于实测数值,验证了水滴浸润状态不能完全浸润微结构凹坑,因此其实际粗糙因子远小于测算值。在Cassie模型中,尽管实测数据点的分布基本符合理论曲线的预测,但每组数据均出现偏差,实测接触角与对应 $f_s$ 相比,均高于理论接触角。分析认为这与微织构表面的形貌结构相关, $f_s$ 的获取是对形貌的测算而来,考虑到实际微织构表面并非理想表面,在“蜂巢型”微织构的孔洞之间分布一些尺寸较小的附着物,这些亚微米微结构的存在客观上会增加 $f_s$ 的实际值,因此与理论曲线相比,试样表面的实测接触角数据偏大。由此可知,本研究制备得到的超疏水表面是由具有微米-亚微米级粗糙结构的仿生微织构和自组装分子膜具有的纳米级疏水基团<sup>[17]</sup>共同作用的结果。

### 3 结论

(1) 利用激光辐射构造仿生微织构与氟硅烷修饰制备得到疏水/超疏水表面。该过程实现了6061铝合金基材由亲水到超亲水再到疏水/超疏水的转变。

(2) 铝合金仿生微织构表面具有的微米-亚微米级粗糙结构和具有纳米级疏水基团的自组装分子膜层对超疏水表面的构建起到重要作用。

(3) 接触角的数值与微织构表面的形貌结构密切相关。利用形貌结构测算和理论分析表明,水滴在铝合金“蜂巢型”仿生微织构表面的浸润状态符合Cassie模型理论。

### 参考文献

- [1] TANVIR K M, MONTAGUT J, KIETZIG A. Drag on superhydrophobic sharkskin inspired surface in a closed channel turbulent flow[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95(10): 1934-1942.
- [2] JU J, BAI H, HUANG Z, et al. A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus[J]. Nature Communications, 2012, 3: 1247-1252.
- [3] ZHENG Y, BAI H, HUANG Z, et al. Directional water collection on wetted spider silk[J]. Nature, 2010, 463: 640-643.
- [4] BAUER U, GRAFE T U, FEDERLE W. Evidence for alternative trapping strategies in two forms of the pitcher plant, *Nepenthes rafflesiana*[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(10): 3683-3692.
- [5] BHUSHAN B, JUNG Y, KOCH K. Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2009, 367: 1631-1672.
- [6] SHAO C, CHI J, CHEN Z, et al. Superwetable colloidal crystal micropatterns on butterfly wing surface for ultrasensitive detection[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 546: 122-129.
- [7] GENZER J, EFIMENKO K. Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review[J]. Biofouling, 2006, 22(5): 339-360.
- [8] FENG L, LI S, LI Y, et al. Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial[J]. Advanced Materials, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [9] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 84-95.  
WANG J Q, WANG X L. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 84-95 (in Chinese).
- [10] WANG X, LIU J, WANG Y, et al. Fabrication of friction-reducing texture surface by selective laser melting of ink-printed (SLM-IP) copper (Cu) nanoparticles (NPs)[J]. Applied Surface Science, 2017, 396(28): 659-664.

- [11] KREITZBERG A, BRAILOVSKI V, SHEREMET'YEV V, et al. Effect of laser powder bed fusion parameters on the microstructure and texture development in superelastic Ti-18Zr-14Nb alloy[J]. *Shape Memory and Superelasticity*, 2017, 3(4): 361-372.
- [12] KUZNETSOV G V, FEOKTISTOV D V, ORLOVA E G, et al. Unification of the textures formed on aluminum after laser treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 469(1): 974-982.
- [13] 杨奇彪, 陈中培, 陈列, 等. 纳秒激光加工微凹坑对 YG3 表面浸润性的影响[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(3): 1-8.  
YANG Q B, CHEN Z P, CHEN L, et al. Effects of nanosecond laser-induced micro-pits on surface wettability of YG3[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(3): 1-8 (in Chinese).
- [14] 熊其玉, 董磊, 焦云龙, 等. 应用激光蚀刻不同微织构表面的润湿性[J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 304-313.  
XIONG Q Y, DONG L, JIAO Y L, et al. Wettability of surfaces with different surface microstructures textured by laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 304-313 (in Chinese)
- [15] SCIANCALEPORE C, GEMINI L, ROMOLI L, et al. Study of the wettability behavior of stainless steel surfaces after ultrafast laser texturing[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 352: 370-377.
- [16] NAKAGAWA T, SOGA M. Contact angle and atomic force microscopy study of reactions of n-alkyltrichlorosilanes with muscovite micas exposed to water vapor plasmas with various power densities[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36: 6915-6921.
- [17] MCHALE G, NEWTON M I. Frenkel's method and the dynamic wetting of heterogeneous planar surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, 206(1-3): 193-201.
- [18] TIAN F, LI B, JI B, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of consecutive extracts from *Galla chinensis*: The polarity affects the bioactivities[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(1): 173-179.
- [19] HONSCHOTEN J W, BRUNETTS N, TAS N R. Capillarity at the nanoscale[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(3): 1096-1114.
- [20] BICO J, TORDEUX C, QUÉRÉ D. Rough wetting[J]. *Europhysics Letters*, 2001, 55(2): 214-220.
- [21] WENZEL R N. Resistance of solid surface to wetting by water[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [22] QUÉRÉ D, LAFUMA A, BICO J. Slippery and sticky microtextured solids[J]. *Nanotechnology*, 2003, 14: 1109-1112.