

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171009004

# 基于磁流变弹性体膜的可控疏水表面制备与表征

肖允恒<sup>1</sup>, 张红辉<sup>1,2</sup>, 杨泽达<sup>3</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 廖昌荣<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对目前超疏水表面制备工艺复杂、成本高等问题, 采用工艺简单的磁场调控方法, 基于磁致链化效应, 将磁性颗粒-聚二甲甲基硅氧烷复合材料薄膜前驱体在外加均匀磁场作用下固化, 得到具有微纳粗糙结构的可控疏水性磁流变弹性体膜(MREF)。利用扫描电子显微镜(SEM)和接触角测量仪对其表面形貌和润湿性进行表征分析。结果表明, 制备的磁流变弹性体膜具有随机分布的微米级山状突起结构, 通过控制制备磁场强度可以改变表面粗糙度特征, 水滴接触角从110°提高到158.2°, 呈现超疏水特性。进一步研究表明, 通过控制磁性颗粒粒径尺度、磁性颗粒质量分数、薄膜厚度等因素, 可以构建不同表面特征的磁流变弹性体膜, 进而实现对表面疏水性的调控。

**关键词:** 磁流变弹性体膜; 超疏水; 羰基铁粉; 微观结构; 磁特性

中图分类号: O647.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0008-07

## Preparation and Characterization of Tunable Hydrophobic Surfaces Based on Magnetorheological Elastomer Film

XIAO Yun-heng<sup>1</sup>, ZHANG Hong-hui<sup>1,2</sup>, YANG Ze-da<sup>3</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, LIAO Chang-rong<sup>1,2</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044; 3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Aim at the complex and costly preparation of the superhydrophobic surfaces, a magnetic regulation method was proposed by a straightforward process. Based on the chaining of magnetic particles, the magnetorheological elastomer film (MREF) was fabricated to form rough micro-structures and tunable hydrophobicity under the magnetic field. Consisting of polydimethylsiloxane and dispersive carbonyl iron particles, the MREF was characterized using scanning electronic microscopy (SEM) and contact angle instrument. The result show that the micrometer-sized mountainous protrusions are randomly distributed at the surface of MREF, the contact angle increases from 110° to 158.2°, with different magnetic intensity in the preparation, which designates a status of superhydrophobicity. Further investigations show that film thickness, particle size and weight ratio are significant to the tunability of hydrophobicity for the prepared MREF surfaces.

**Keywords:** magnetorheological elastomer film (MREF); superhydrophobic; carbonyl iron; microstructure; magnetic properties

## 0 引言

人类对超疏水的认识源于自然界, 荷叶<sup>[1]</sup>及昆虫翅膀<sup>[2]</sup>的自清洁性、水黽在水面自由行走<sup>[3]</sup>等,

都归因于其表面特殊微结构和低表面能物质。受此启发, 具有自清洁<sup>[4-5]</sup>、抗结冰<sup>[6]</sup>、微流体传输<sup>[7]</sup>、油水分离<sup>[8-9]</sup>及流动减阻<sup>[10-11]</sup>等特性的仿生超疏水

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2018-02-06

网络出版日期: 2018-03-12 12:39; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180312.1238.008.html>

通讯作者: 张红辉(1977—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 智能结构与系统; E-mail: hhzhang@cqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51205426, 51575065)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51205426, 51575065)

引文格式: 肖允恒, 张红辉, 杨泽达, 等. 基于磁流变弹性体膜的可控疏水表面制备与表征[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 8-14.

XIAO Y H, ZHANG H H, YANG Z D, et al. Preparation and characterization of tunable hydrophobic surfaces based on magnetorheological elastomer film[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 8-14.

表面受到人们广泛关注。

研究<sup>[12-13]</sup>表明, 材料表面润湿性主要由表面的表面能、粗糙度和微观结构共同决定, 其中材料低表面能是疏水性的前提条件, 表面粗糙度和微观结构则是控制性因素。近年来, 国内外提出的表面微观结构构建方法有: 机械加工法<sup>[14]</sup>、刻蚀法<sup>[15-16]</sup>、模板法<sup>[17]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[18]</sup>、自组合法<sup>[19]</sup>、沉积法<sup>[20-21]</sup>、静电颗粒吸附法<sup>[22]</sup>、微乳液法<sup>[23]</sup>和一步法<sup>[24]</sup>等, 它们都可获得超疏水特性表面, 但总体具有实验设备要求高、操作复杂, 成本高, 难以进行大面积制备且环境不友好等问题。

磁流变弹性体薄膜 (Magnetorheological elastomer film, MREF) 是一种新型的智能复合材料, 一般由非磁性聚合物基体和微米或纳米级的磁性颗粒构成, 经溶液配制、辅助制模等步骤制备成膜。韩国浦项工科大学 Sanghee Lee 等人<sup>[25]</sup>制备了 150  $\mu\text{m}$  厚并经氟化处理的磁流变弹性体薄膜, 通过改变外界磁场条件实现 MREF 表面的润湿性和粘附性的可逆动态变化, 但是制备过程未经固化, 其表面的超疏水特性脱离磁场后不能保持。为了研究工艺简便的超疏水薄膜物理制备方法, 得到稳定长久超疏水性的 MREF, 文中在磁流变材料可控特性研究基础上, 基于磁致链化效应, 通过磁场调控磁性颗粒的方法构建表面粗糙微观结构, 得到超疏水磁流变弹性体薄膜样本。进一步研究 MREF 表面的形貌特征和润湿特性, 分析影响润湿性的因素, 优化 MREF 制备工艺, 使其脱离磁场条件后仍具有超疏水特性, 有望更易通过物理手段获得具有超疏水特性的薄膜, 对基于超疏水特性的工程应用具有重要价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

MREF 由聚合物基体和微米或纳米尺寸磁性颗粒构成。聚合物基体采用 SYLGARD 184 聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS, 美国 DOW CORNING 公司), 由预聚物 A 与固化剂 B 两组分构成; 磁性颗粒采用羰基铁粉 ( $\text{Fe} \geq 99\%$ , 广州金属冶金有限公司)。

### 1.2 样品制备

图 1 为 MREF 制备过程, 将 PDMS 的两组分

预聚物 A 和固化剂 B 按质量比 10 : 1 完全混合, 加入羰基铁粉达到质量分数 30%, 搅拌器缓慢搅拌 30 min; 经超声波振荡器去泡, 得到 PDMS 与羰基铁粉的混合物, 视为 MREF 前驱体; 用无水乙醇冲洗 430 不锈钢模板 ( $\Phi$  30 mm, 厚度为 20、60、120、200 和 300  $\mu\text{m}$ ), 将 MREF 前驱体浇注在不锈钢基体 ( $\Phi$  50 mm, 厚度 2 mm), 在成膜工具辅助下采用刮刀涂覆法制得薄膜样品; 在温度 60  $^{\circ}\text{C}$  及匀强磁场条件下固化 4 h, 得到 MREF 样品。

为便于控制磁场大小, 研究不同固化磁感应强度对 MREF 表面疏水性的影响, 采用直流电源励磁线圈产生磁场, 该装置 (见图 2) 产生的磁感应强度采用特斯拉计进行标定。并采用热风机向控制温度的封闭盒内鼓风, 温度传感器和显示装置监测温度情况。

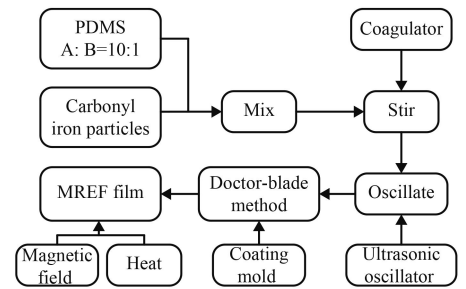


图 1 MREF 制备流程图

Fig.1 Flow chart for MREF preparation

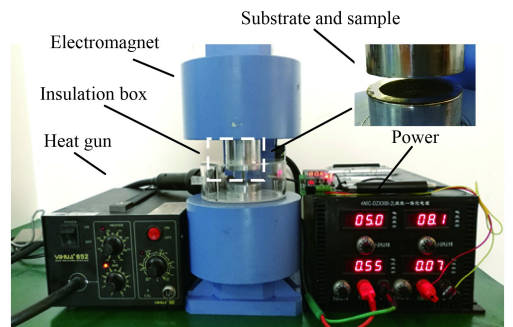


图 2 MREF 制备设备

Fig.2 Preparation equipment of MREF

### 1.3 试样表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, EVO18, Carl Zeiss Microscopy) 分析观察薄膜表面微观结构。用光学接触角测量仪 (GBX, France) 在室温条件 (20  $^{\circ}\text{C}$ ) 测量表面的疏水特性, 液滴体积为 5  $\mu\text{L}$ , 在薄膜表面 5 个不同位置进行多次测量, 测量结果取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面微观形貌

图3为不同磁感应强度作用下制备 MREF 的表面 SEM 形貌,其中, MREF 样品为选用羰基铁粉粒径  $5\ \mu\text{m}$ 、质量分数 30%、薄膜厚度  $60\ \mu\text{m}$ ,施加不同磁感应强度的作用下制备。在 MREF 固化过程中,无外加磁场时,薄膜表面光滑,羰基铁粉分散均匀(见图3(a));磁感应强度达到 166 mT 时,薄膜内均匀分散的羰基铁粉发生团簇,形成

小的团簇体,并在薄膜表面沿磁场方向形成不规则的小山状突起结构,但其高度较小,分布较稀疏(见图3(b));当磁感应强度达到 260 mT 时,表面长出更多的微米级山状突起结构,且分布密集(见图3(c));当磁感应强度达到 352 mT 时,山状突起进一步增高变粗(见图3(d))。

进一步采用不同的放大倍数对磁感应强度为 260 mT 条件下的薄膜样品表面进行观察,如图4所示。其中,图4(a)为低倍率下观测到的 MREF 表面整体形貌,可以看出薄膜表面随机分布有微

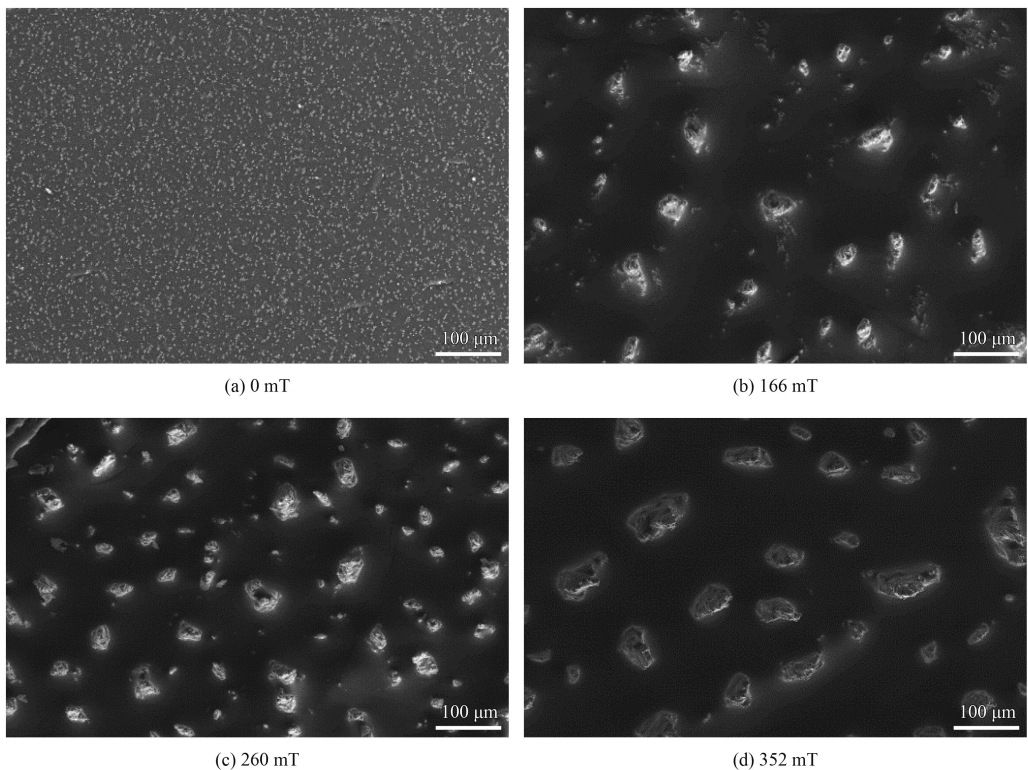


图3 不同磁场强度下 MREF 表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of MREF under different applied magnetic fields

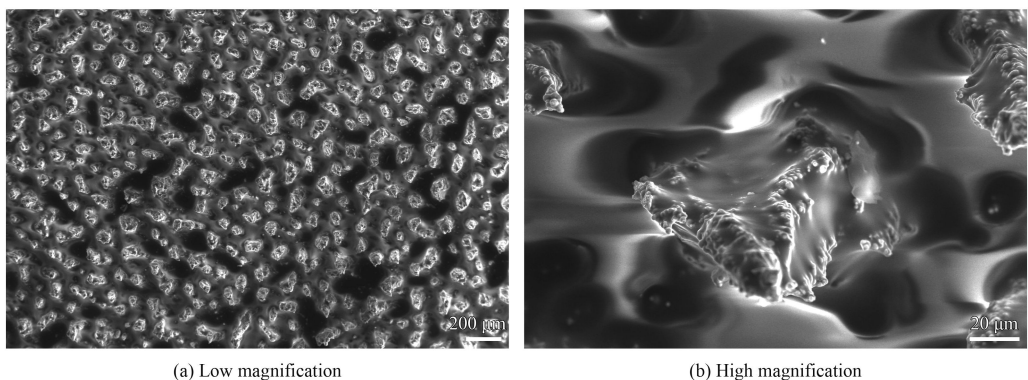


图4  $B=260\ \text{mT}$  时不同放大倍数下 MREF 的表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of MREF under different magnification at 260 mT

米级的山状突起结构, 且分布较密集; 图 4(b) 为高倍率下显示单个突起结构形貌, 可以看出突起顶部直径约为  $20\ \mu\text{m}$ , 到山谷基部高度为  $50\sim 70\ \mu\text{m}$ , 且突起结构表面也长有亚微米级的凹凸粗糙结构, 形成微观复合的表面粗糙度特征。

## 2.2 微观粗糙结构形成机理

在薄膜固化过程中, 当未施加制备磁场时, 由于羰基铁颗粒受到的表面分子层间的相互排斥能与重力势能相当, 颗粒均匀且分散分布于聚合物基体中, 薄膜表面光滑。当施加均匀磁场时, 薄膜中的铁磁性颗粒被磁化, 粒子磁矩平行于外磁场方向。在磁场下羰基铁颗粒相互之间作用的磁力是粒子运动的主要驱动力。

每个磁化的颗粒被看作是一个平行于外磁场方向的磁偶极子, 相邻的磁偶极子之间产生相互作用。图 5(a) 所示, 邻近磁偶极子垂直磁场方向排布, 因相互排斥而远离; 图 5(b) 所示, 邻近磁偶极子沿着磁场方向平行排布, 因相互吸引而靠近, 磁性颗粒沿磁场方向排成链状结构, 并发生团簇聚集现象。薄膜中所有的羰基铁颗粒相互之间都存在这种相互作用, 其作用力与磁场强度成正比。当磁感应强度较小时, 粒子间相互作用较弱, 磁性颗粒主要受自身重力作用, 未在薄膜表面形成链状突起结构; 当磁感应强度变大时, 粒子间相互作用较强, 磁性颗粒在磁力的作用下形成链状团簇, 在薄膜表面沿着磁场方向形成山状聚集突起结构, 且具有随机分布特征。因此, 磁感应强度越大, 铁磁性粒子间的相互作用力越强, 聚集成的链状团簇体越大, 薄膜表面表现出的山状突起结构变粗变高, 进而可通过改变磁场改变薄膜表面的微观结构及表面粗糙度。

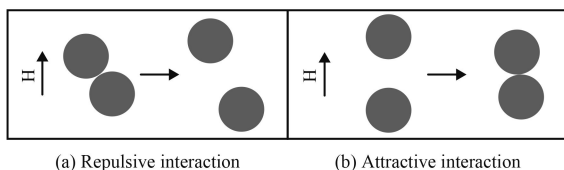


图5 磁场中磁性颗粒运动过程

Fig.5 Movement process of magnetic particles in a magnetic field

## 2.3 润湿性

利用接触角测量仪对 MREF 表面与水的接触角  $\theta$  进行测量, 测得接触角与磁感应强度的变化

关系如图 6 所示。其中, 薄膜制备使用的羰基铁粉粒径为  $5\ \mu\text{m}$ 、质量分数 30%, 薄膜厚度  $60\ \mu\text{m}$ , 磁感应强度采用 0、53、114、166、205、260、316 和  $352\ \text{mT}$ 。结果表明, 当磁感应强度为  $0\ \text{mT}$  时, 样品表面接触角等于 PDMS 表面的本征接触角  $110^\circ$ ; 当制备磁感应强度为  $260\ \text{mT}$  时, 接触角达到最大值  $156.7^\circ$ ; 随着制备磁感应强度的变化,  $260\ \text{mT}$  附近是磁感应强度对 MREF 表面静态接触角影响的分水岭, 为试验制备 MREF 超疏水表面的临界磁感应强度值。

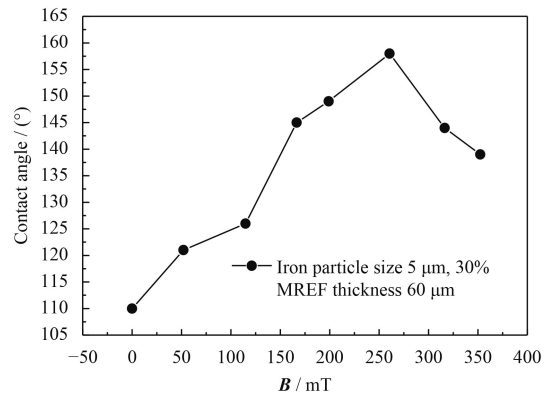


图6 接触角随磁感应强度的变化

Fig.6 Change of surface contact angle with the magnetic induction strength

图 7 所示为薄膜表面水滴光学显微形貌, 其中, 图 7(a) 为光滑 MREF 表面疏水状态, 接触角为  $110^\circ$ ; 图 7(b)~(d) 显示出具有微纳米粗糙结构的 MREF 表面疏水状态。图 7(b) 为薄膜表面突起结构较小且分布稀疏时的疏水状态, 接触角为  $146.1^\circ$ , 较图 7(a) 的接触角已经有显著提高; 图 7(c) 为表面突起结构分布密集时的超疏水状态, 接触角达  $156.7^\circ$ ; 图 7(d) 为表面突起结构尺度较大时的疏水状态, 接触角为  $135.2^\circ$ 。

润湿性是固体表面的重要性质, 描述润湿性的物理参数为液滴在固体表面的接触角。根据

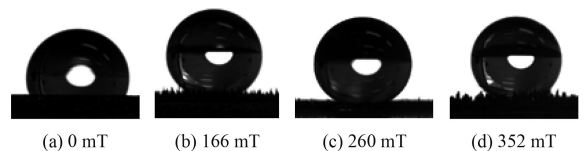


图7 不同磁场强度条件下所制备薄膜表面上的水滴光学显微形貌

Fig.7 Optical microscopy images of water droplets on the surface under different applied magnetic induction strength

Cassie-Baxter 模型, 水滴在粗糙微观结构表面的接触角, 与液固界面实际接触的面积分数 ( $f_s$ ) 及液气界面实际接触的面积分数 ( $f_v$ ) 有关, 如图 8 所示, 这种关系用 Cassie-Baxter 润湿方程<sup>[26]</sup>表示如下:

$$\cos \theta_C = f_s \cos \theta_Y - f_v \quad (1)$$

其中  $f_s + f_v = 1$ ,  $\theta_Y$  为理想表面接触角或称 Young's 接触角,  $\theta_C$  为实际表面的表观接触角。由上式可知, 液固界面分数 ( $f_s$ ) 能够减弱化学成分对接触角的影响, 即  $f_s$  越小, 实际界面液气接触面积越大,  $\theta_C$  越接近  $180^\circ$ , 超疏水状态越明显;  $f_s$  越大, 实际界面液气接触面积越小,  $\theta_C$  越接近  $\theta_Y$ 。

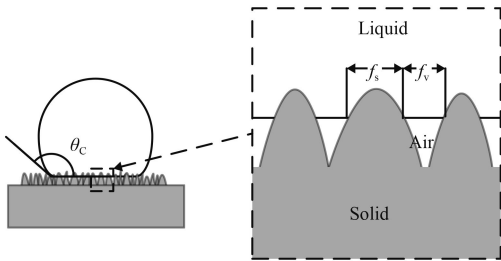


图 8 粗糙表面固-气-液接触示意图

Fig.8 Schematic diagram of solid-liquid-air interface for rough surface

在实际的制备薄膜过程中, 改变施加磁场强度可以改变薄膜表面的粗糙结构。由样本表面微观结构的观测可知, 薄膜表面随机分布着不规则的微米级突起结构, 微米级的突起结构表面又分布着不规则的凹坑和突起状结构, 这些粗糙结构使得液滴在薄膜表面的接触呈现多样化。薄膜试样的粗糙结构可以轻易捕获大量的空气, 在表面形成一层空气膜。因此, 液体和固体界面的接触由固、液两相接触转变为固、液、气三相复合接触。

当磁感应强度为 0 时, MREF 表面为光滑、平坦表面, 当将水滴释放到薄膜表面时, 水滴将在表面进行铺展, 即固、液界面逐渐取代固气界面, 此时  $f_s = 1$ ,  $\theta_C = \theta_Y = 110^\circ$ , 为 Young 润湿状态。当在制备时施加磁场时, 薄膜表面形成复合粗糙结构, 在固液界面之间形成气膜,  $f_s$  减小,  $f_v$  增大, 水滴悬浮在表面微结构上,  $\theta_C$  随着磁感应强度的增大而增大, 此时处于 Cassie-Baxter 润湿状态。当磁感应强度较大时, 磁性颗粒的团簇显著, 形成的山状突起结构尺度变大, 水滴的相

对半径减小而陷入山状突起间的凹槽, 使得  $f_s$  增大,  $f_v$  减小, 从而  $\theta_C$  随着磁感应强度的增大而减小, 即水滴的润湿状态逐渐趋于 Wenzel 润湿状态。因此, 表面微纳结构的变化可以导致非复合和复合润湿状态之间的转变, 得出水滴接触角随着磁感应强度先增大后减小, 且采用临界磁场强度作用下构建微米级粗糙结构可在 MREF 表面获得超疏水性。

## 2.4 羰基铁粉粒径及含量对超疏水性的影响

在磁感应强度 260 mT、薄膜厚度 60  $\mu\text{m}$  条件下, 采用不同粒径羰基铁粉并改变其质量分数制备 MREF 样品, 其表面接触角变化如图 9 所示。粒径为 0.5、5 和 10  $\mu\text{m}$  的羰基铁粉, 在合适的质量分数下的接触角都大于  $150^\circ$ , 其中 0.5  $\mu\text{m}$  粒径羰基铁粉在质量分数为 20% 时, 接触角为  $158.2^\circ$ ; 5  $\mu\text{m}$  粒径的羰基铁粉在质量分数为 30% 时, 接触角为  $156.7^\circ$ ; 10  $\mu\text{m}$  粒径的羰基铁粉在质量分数为 40% 时, 接触角为  $152.4^\circ$ 。当羰基铁粉粒径为 15  $\mu\text{m}$  时, 表面接触角最大  $141.1^\circ$ , 此时质量分数为 40%。可见, 不同粒径的羰基铁粉对所制备表面的接触角影响很大, 粒径越小, 实现大接触角时的质量分数越低。经分析认为, 羰基铁粉质量分数相同时, 粒径越小, 颗粒数量越多, 在薄膜表面团簇体就越密集, 并且山状结构尺度较小, 表面接触角更大。显然大尺寸的磁性颗粒不适合于表面超疏水性。

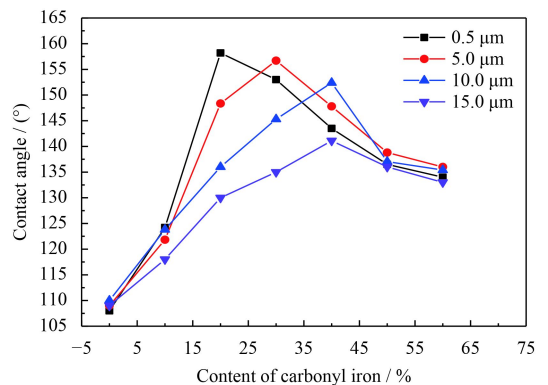


图 9 接触角随羰基铁粉含量的变化

Fig.9 Change of contact angle with different concentration of carbonyl iron particles ( $B=260$  mT, MREF thickness of 60  $\mu\text{m}$ )

## 2.5 薄膜厚度对表面超疏水性的影响

磁感应强度 260 mT、羰基铁粉质量分数 30% 时, 采用不同粒径的羰基铁粉, 通过改变薄膜厚

度制备 MREF 表面, 其接触角如图 10 所示。不论羰基铁粉粒径多少, 当膜厚为 60  $\mu\text{m}$  时, 表面接触角都有较好表现; 且羰基铁粉粒径为 0.5 和 5  $\mu\text{m}$  时可达到超疏水状态, 即使薄膜厚度在 20  $\mu\text{m}$  时接触角仍然较大。当膜厚超过 60  $\mu\text{m}$  并继续增大, 表面接触角都呈下降趋势, 但羰基铁粉粒径越小, 表面接触角越大的趋势没有改变。

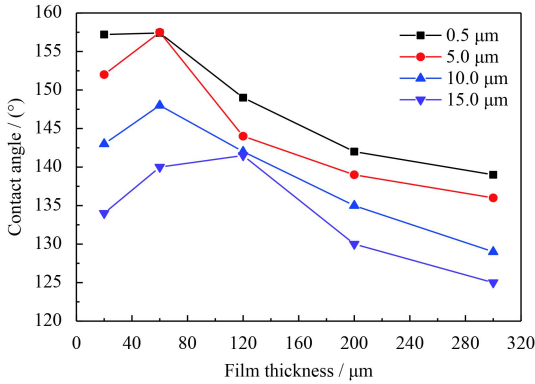


图 10 接触角随薄膜厚度的变化

Fig.10 Change of contact angle with different film thickness ( $B=260\text{ mT}$ , 30% carbonyl iron)

## 2.6 薄膜结合强度

MREF 与载体的结合强度是超疏水薄膜得以工程应用的重要前提之一, 通过垂直拉伸试验对不同厚度 MREF 与不锈钢载体的结合能力进行评价。将固化有 MREF 的不锈钢板固定在电子拉压力试验机 (型号 AGS-500N) 上, 用粘胶剂将薄膜表面粘接在直径为 10 mm 试柱上, 然后在试柱的另一端施加拉伸载荷。所测出不同厚度的 MREF 结合强度如图 11 所示, 薄膜厚度在 20~120  $\mu\text{m}$  时, 结合强度大于 63.6 MPa, MREF 与不

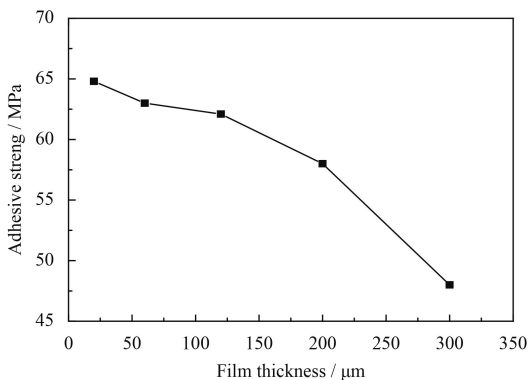


图 11 薄膜厚度与结合强度的关系

Fig.11 Relationship between film thickness and adhesive strength

锈钢载体结合能力较好; 随着厚度的增加结合强度减小, 薄膜更容易脱落。该测试说明在 MREF 呈现超疏水特性时, 其与 430 不锈钢载体结合能力较好。

## 3 结论

(1) 基于 MREF 的可控疏水表面制备方法与工艺, 对制备的 MREF 表面山状突起微结构的形成机理和表面疏水性进行研究, 在相同的羰基铁粉颗粒粒径、含量和薄膜厚度的情况下, 随着磁场强度的增大, 表面突起结构尺寸由小变大, 分布由稀疏变密集, 水滴接触角呈现先增加后减小的变化趋势。

(2) 羰基铁粉粒径、羰基铁粉含量和表面膜厚等因素对所构造表面的疏水性能有重要影响。当采用 0.5  $\mu\text{m}$  粒径的羰基铁粉、质量分数为 20%, 薄膜膜厚为 60  $\mu\text{m}$ , 固化磁感应强度为 260 mT 时, MREF 接触角达到 158.2 $^\circ$ , 呈现超疏水性。通过结合强度测试, MREF 与载体具有较好的结合能力。

(3) 表面微观结构的构建与磁场引起铁磁颗粒的磁致链化效应有关, 该方法为简易、低成本制备超疏水表面的研究提供了基础, 辅以低表面能修饰能够取得更综合的超疏水性能。

## 参考文献

- [1] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [2] FENG L, LI S, LI Y, et al. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[M]. 2002, 14: 1857.
- [3] JIANG L, YAO X, LI H, et al. "Water strider" legs with a self-assembled coating of single-crystalline nanowires of an organic semiconductor[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(3): 376-379.
- [4] SASMAL A K, MONDAL C, SINHA A K, et al. Fabrication of superhydrophobic copper surface on various substrates for roll-off, self-cleaning and water/oil separation[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(24): 22034-22043.
- [5] LESLIE D C, WATERHOUSE A, BERTHET J B, et al. A bioinspired omniphobic surface coating on medical devices prevents thrombosis and biofouling[J]. *Nature Biotechnology*, 2014, 32(11): 1134.
- [6] LEE M, YIM C, JEON S. Communication: anti-icing charac-

- teristics of superhydrophobic surfaces investigated by quartz crystal microresonators[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2015, 142(4): 041102.
- [7] TANG X, SI Y, GE J, et al. In situ polymerized superhydrophobic and superoleophilic nanofibrous membranes for gravity driven oil-water separation[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(23): 11657.
- [8] CAO Y, ZHANG X, TAO L, et al. Mussel-inspired chemistry and Michael addition reaction for efficient oil/water separation[J]. *Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(10): 4438.
- [9] YONG J, YANG Q, CHEN F, et al. Reversible underwater lossless oil droplet transportation[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2015, 2(2): 1400388-1-6.
- [10] WATANABE K, UDAGAWA H. Drag reduction of non-newtonian fluids in a circular pipe with a highly water-repellent wall[J]. *Aiche Journal*, 2000, 47(2): 225-238.
- [11] DANIELLO R J, WATERHOUSE N E, ROTHSTEIN J P. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(8): 085103-1-8.
- [12] BARTHOLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [13] CHENG Z, LIN F, LEI J. Tunable adhesive superhydrophobic surfaces for superparamagnetic microdroplets[J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 18(20): 3219-3225.
- [14] ZHU L, FENG Y Y, YE X Y, et al. Tuning wettability and getting superhydrophobic surface by controlling surface roughness with well-designed microstructures[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2006, S130-131(130): 595-600.
- [15] JIN M, FENG X, FENG L, et al. Superhydrophobic aligned polystyrene nanotube films with high adhesive force[J]. *Advanced Materials*, 2010, 17(16): 1977-1981.
- [16] YIN B, FANG L, HU J, et al. A facile method for fabrication of superhydrophobic coating on aluminum alloy[J]. *Surface & Interface Analysis*, 2012, 44(4): 439-444.
- [17] KHORASANI M T, MIRZADEH H, KERMANI Z. Wettability of porous polydimethylsiloxane surface: morphology study[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 242(3-4): 339-345.
- [18] VENKATESWARA R A, KULKARNI M M, BHAGAT S D. Transport of liquids using superhydrophobic aerogels[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2005, 285(1): 413.
- [19] WANG J, LI D, GAO R, et al. Construction of superhydrophobic hydromagnesite films on the Mg alloy[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2011, 129(1-2): 154-160.
- [20] TAVANA H, AMIRFAZLI A, NEUMANN A W. Fabrication of superhydrophobic surfaces of n-hexatriacontane[J]. *Langmuir*, 2006, 22(13): 5556-5559.
- [21] ZHI C, HAO L, CHEN A, et al. A rapid one-step process for fabrication of superhydrophobic surface by electrodeposition method[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 59(4): 168-171.
- [22] TAKESHITA N, PARADIS L A, ONER D, et al. Simultaneous tailoring of surface topography and chemical structure for controlled wettability[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2004, 20(19): 8131-8136.
- [23] YANG T, TIAN H, CHEN Y. Preparation of superhydrophobic silica films with honeycomb-like structure by emulsion method[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2009, 49(2): 243-246.
- [24] 孔令豪, 陈新华, 张平余. 一步法制备磷铜网超疏水表面及其在油水分离中的应用[J]. *中国表面工程*, 2016, 29(3): 87-95.
- KONG L H, CHEN X H, ZHANG P Y. Fabrication of superhydrophobic phosphor-copper mesh via one step method and application in oil-water separation[J]. *China Surface Engineering*, 2016, 29(3): 87-95 (in Chinese).
- [25] LEE S, YIM C, KIM W, et al. Magnetorheological elastomer films with tunable wetting and adhesion properties[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(35): 19853-6.
- [26] NOSONOVSKY M. On the range of applicability of the Wenzel and Cassie equations[J]. *Langmuir*, 2007, 23(19): 9919-9920.

(责任编辑: 常青)