

磁响应聚二甲基硅氧烷阵列表面水滴的定向去除

田永图, 张 洋, 李泓颀, 来 华, 成中军

(哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001)

摘要 利用模板赋形和表面修饰方法, 制备了具有磁响应性的聚二甲基硅氧烷(PDMS)柱状阵列(SMPA). 该柱状阵列具有超疏水及低黏附特性, 在外加磁场作用下表现出可逆弯曲形变, 且弯曲程度随外加磁场强度和柱状阵列中磁性粒子含量的增加而增大. 在磁场作用下, 柱状阵列弯曲能够挤压结构内的水滴, 迫使其从表面跳离. 研究表明, 当柱状阵列表面尺寸一致时, 与静态结构相比, 磁响应动态结构可以实现更小水滴在表面的去除. 同时, 水滴离开的方向和体积与柱状阵列的结构参数和弯曲角度紧密相关. 基于磁场作用, 水滴跳离的体积大小和方向可以实现智能调控.

关键词 超疏水; 聚二甲基硅氧烷柱状阵列; 磁响应; 水滴跳离

中图分类号 O631; O647 文献标志码 A doi: 10.7503/cjcu20240220

Directional Removal of Water Droplets by Magnetic Responsive Polydimethylsiloxane Arrays

TIAN Yongtu, ZHANG Yang, LI Hongjie, LAI Hua*, CHENG Zhongjun*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract In this paper, superhydrophobic low-adhesive magnetically responsive polydimethylsiloxane (PDMS) columnar arrays (SMPA) were prepared by combination of template method and surface modification. The columnar arrays can undergo reversible bending deformation under the action of the magnetic field, and the degree of bending will increase with the increase of the strength of the applied magnetic field and the increase of the content of magnetic particles in the columnar arrays. The findings indicate that, when the surface area of the columnar arrays remains constant, the dynamic magnetic response structure exhibits enhanced capability in removing smaller water droplets from the surface compared to its static counterpart, and droplets departure direction and volume are closely related to the structural parameters and bending angle of the columnar arrays. Based on the magnetic field, smart control of droplets jumping in both departing direction and droplets volume can be achieved.

Keywords Superhydrophobicity; Polydimethylsiloxane columnar arrays; Magnetic responsiveness; Droplets jumping

液体在固体表面的去除在微流体技术^[1,2]、雾滴收集^[3-5]、冷凝传热^[6-9]和表面自清洁^[10]领域具有广泛的应用. 在过去的十几年中, 受自然界中众多超浸润现象的启发, 例如荷叶表面“出淤泥而不染”的特性^[11]、水龟腿部的超疏水性^[12]、猪笼草口边沿表面的连续定向水输送^[13]、蜘蛛丝上的雾滴定向运动^[14]和仙人掌刺上的雾气收集^[15,16]等, 研究人员制备出许多仿生功能结构表面, 并且在水滴去除领域

收稿日期: 2024-04-30. 网络首发日期: 2024-07-05.

联系人简介: 成中军, 男, 博士, 教授, 主要从事超浸润界面材料方面的研究. E-mail: chengzhongjun@iccas.ac.cn

来 华, 女, 博士, 讲师, 主要从事表面浸润性调控方面的研究. E-mail: laihuahit@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 22075061)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.22075061).

展现了一定的应用价值。目前已研究分析出多种水滴跳离机制,例如多个水滴聚结诱导跳离^[17,18]、各向异性结构引导水滴定向跳离^[19,20]及外场刺激强化水滴跳离^[21-24]等。然而,这些报道大多侧重于优化表面结构或化学成分^[25],聚焦优化水滴的跳离过程,导致难以从根本上进一步提高水滴离开表面的效率。

近年来,超疏水低黏附性的表面作为水滴操控平台受到了广泛关注。在超疏水表面上,利用聚结诱导水滴合并释放多余表面能,被认为是自发去除水滴的有效方法之一^[26-28]。Gou等^[29]报道了一种受水黾腿部刚毛启发的非对称棘轮结构的各向异性表面,可同时实现不同尺寸的水滴的跳离,提高了水滴去除效率。然而,这一策略存在明显的不足之处,利用聚结诱导水滴合并实现的水滴跳离需要严格经历水滴的成核、生长至接触、合并及跳离等4个阶段^[30],这一过程需要一定的时间,且水滴的凝聚跳离是被动过程,从而大大限制了水滴去除效率的进一步提升。最近,Yan等^[20]和Chu等^[31]通过构建凹槽结构来实现单个水滴的跳离,虽然这种策略省去了水滴聚结诱导的过程,但对于单个水滴的跳离而言,依然是被动的,水滴需要达到一定的体积才能实现跳离去除。即不论是在超疏水阵列上通过两个水滴聚并引起的水滴去除,还是设计凹槽结构实现单个水滴的去除,这些策略所使用的表面都是静止结构,对于水滴的去除始终是一个被动过程,水滴脱离的尺寸受到固体表面结构的限制。同时,难以按需实现水滴去除的方向和体积大小,这对于微流体操控^[32]和雾滴定向收集^[25]也十分重要。目前,很少有关于基于主动策略在超疏水表面上实现水滴快速跳离的报道。

本文通过3D打印、模板赋形和表面修饰的方法,制备出具有超疏水磁响应性的聚二甲基硅氧烷(PDMS)柱状阵列(SMPA)。基于动态弯曲的性能,超疏水柱状阵列结构内的水滴受到挤压可实现更小水滴的跳离,提高了水滴去除效率;同时,动态柱状阵列可以实现水滴的多方位跳离,为水滴去除方向的按需调控提供了新的思路。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

PDMS和固化剂,道康宁(美国)有机硅化学有限公司;磁性钕铁硼(NdFeB),麦格昆磁国际贸易(天津)有限公司;1H,1H,2H,2H-全氟癸基三氯硅烷(纯度96%)、疏水气相纳米二氧化硅(Hydrophobic-260型,纯度99.8%,粒径7~40 nm,比表面积260 m²/g)、正己烷(分析纯)和无水乙醇(分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

Octave Light R1 70 μm型3D打印机,东莞八度光科技有限公司;YP-B20002型电子天平,上海光正医疗仪器有限公司;DHG-9075A型电热恒温鼓风干燥箱和DZF-6092型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;AF-P-DX型单反相机,日本Nikon公司;SU8010型扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司;JC2000D5型接触角测量仪,上海中晨数字技术设备有限公司;EX-10200型定量充磁机,上海先达电子磁力有限公司;TD8620型手持式数字特斯拉计,长沙天恒测控技术有限公司;CP70-HD型高速摄像机,湖南科天健光电技术有限公司。

1.2 实验过程

利用3ds Max软件(Autodesk)设计柱状阵列结构模型,然后利用3D打印机制备柱状阵列负模板;将PDMS和固化剂以质量比1:10混合均匀,倾倒在制备的负模板上,在真空干燥箱中脱气处理30 min,随后在85 °C的电热恒温鼓风干燥箱中加热固化90 min,完成固化后脱模得到PDMS模板;将PDMS模板在充满1H,1H,2H,2H-全氟癸基三氯硅烷的真空环境中静置12 h,获得低表面能的PDMS模板,并作为下一步复形制备磁性柱状阵列所需的模板;将PDMS和固化剂以质量比1:15混合均匀,加入不同量的NdFeB(NdFeB在混合体系中的质量分数分别为10%,30%,50%和70%),充分搅拌混合均匀后,在真空干燥箱中脱气处理30 min;将上述脱气后的复合材料浇筑在低表面能的PDMS模板上,在真空干燥箱中脱气处理60 min,再于85 °C的电热恒温鼓风干燥箱中加热固化100 min,脱模,得到含磁性粒子的柱状阵列。将此柱状阵列置于定量充磁工作台上,设置充磁机电压为800 V,充磁完成后获得

磁响应PDMS柱状阵列(MPA);将制备好的MPA浸泡在疏水性纳米SiO₂分散体溶液(0.16 g疏水性纳米SiO₂和40 mL正己烷混合溶液)中,以80 W的功率超声处理20 min;随后,在85 °C的电热恒温鼓风干燥箱中加热15 min,最终得到SMPA.

2 结果与讨论

2.1 柱状阵列的形貌表征及表面润湿性

图1示出了MPA和SMPA的光学照片和SEM照片.从图1(A)可以看出,MPA呈黑色且不透明,这是因为其内部的NdFeB颗粒为黑色且不透明.从图1(B)和(D)可以很明显地观察到阵列由整齐排列的规则圆柱体组成,表面及底部呈现网格状,这是由于3D打印机分辨率精度导致的像素纹(实验所使用的3D打印机精度为70 μm).圆柱的直径为800 μm,相邻圆柱之间的距离为1100 μm,进一步放大可以观察到柱状阵列的表面无特殊结构[图1(C),(E)].从图1(F)可以看出,柱状阵列的结构与修饰前相比并没有改变;从图1(G)和(I)可以看出,圆柱直径及柱间距仍分别约为800 μm和1100 μm;进一步放大可以观察到表面结构与修饰前相比发生显著改变,圆柱侧面和顶部均不再为光滑表面,而是由直径约为20 nm的SiO₂颗粒堆积形成的粗糙表面[图1(H),(J)].

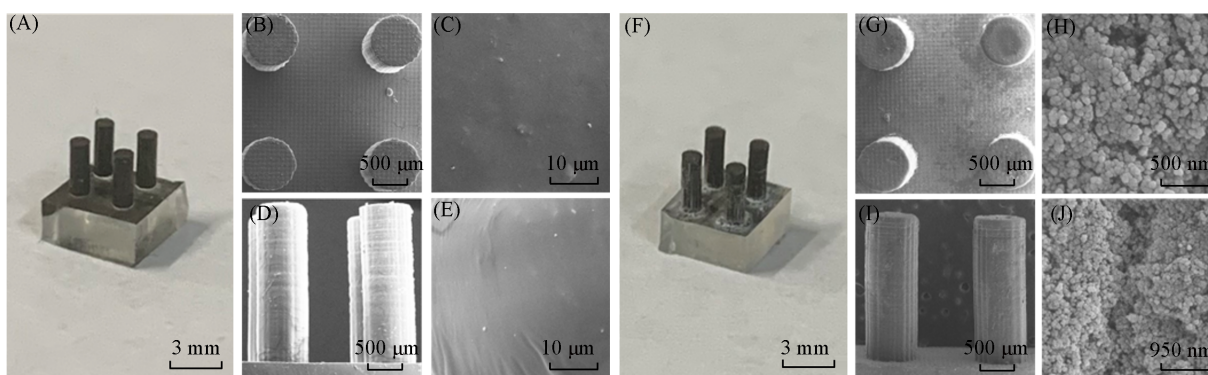


Fig. 1 Optical photos(A, F) and SEM images(B—E, G—J) of MPA(A—E) and SMPA(F—J)
(B, C, G, H) Top view; (D, E, I, J) side view.

利用接触角测量仪分别测量MPA和SMPA的接触角(CA)和滚动角(SA).结果显示,修饰纳米SiO₂前后柱状阵列的润湿性有显著差异(测试过程选用超纯水作为测试水滴,水滴的体积为6 μL):未修饰纳米SiO₂的MPA的水接触角约为111.7°[图2(A)],虽然是疏水表面,但由于表面的黏附力高,当柱状阵列旋转90°处于竖直状态时,水滴也不会掉落[图2(B)];而修饰过纳米SiO₂的SMPA的水接触角大于150°,滚动角小于10°,表现出超疏水及低黏附特征[图2(C),(D)].从图2可以看出,水滴与柱状阵列接触界面中存在大量空气,表明柱状阵列表面修饰疏水纳米SiO₂前后的润湿性差异可以根据Cassie-Baxter润湿模型进行解释^[33,34].由于PDMS与疏水纳米SiO₂表面均呈疏水性,MPA和SMPA浸润性的差异主要源于表面结构的不同.从图1可以看出,SiO₂修饰后的SMPA表面形成了新的纳米结构,与未修饰纳米SiO₂的MPA相比,这些纳米结构中存在的空气在水滴与基底之间形成气垫层,使水滴只能与纳米结构接触,从而有效减小液/固界面的接触面积,增大了水滴在表面的接触角,同时降低了水滴

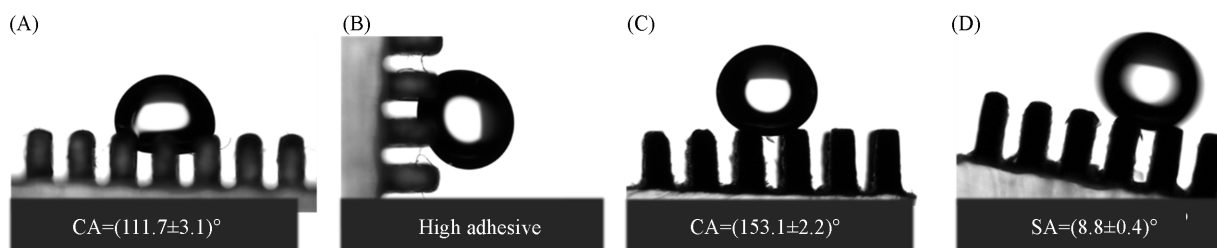


Fig. 2 Contact angles(A, C) and rolling angles(B, D) of water droplets on MPA(A, B) and SMPA(C, D)

与表面间的黏附力。

2.2 SMPA 的磁响应弯曲变形

SMPA 在外加磁场的作用下发生弯曲形变,并在磁场消失时立即恢复形变[图3(A)],表现出优良的磁响应特征。为了量化SMPA的弯曲程度,引入弯曲角度(β)概念[图3(B)],图3(C)示出SMPA的高度(H)和间距(S)。图3(D)示出不同NdFeB质量分数的SMPA的 β 与外加磁感应强度(B , mT)的关系。可以看出,当不添加NdFeB时,无论 B 如何变化,SMPA不发生弯曲。对于含NdFeB的SMPA, β 随 B 的增加而增大。在 B 相同的情况下,SMPA的 β 随NdFeB含量的增加而增大。当NdFeB的含量为70%时,可以实现大角度弯曲。然而进一步增加NdFeB的含量时,由于NdFeB周围PDMS复合材料黏合剂不足,SMPA在制备过程中容易发生结块现象,难以固化和脱模。因此,本文选择NdFeB质量分数为70%的SMPA进行后续实验。

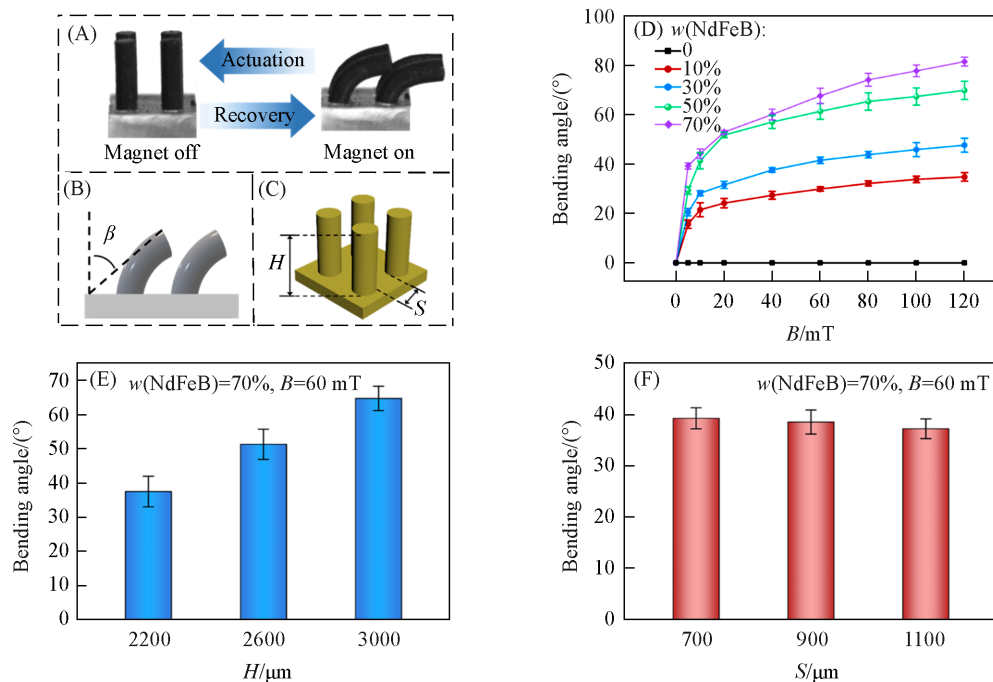


Fig. 3 Magnetic response bending performance of SMPA

- (A) Reversible bending of SMPA; (B) schematic diagram of bending angle of SMPA; (C) structural parameters of SMPA; (D) bending angles of SMPA under different magnetic flux densities (B) with different magnetic particle NdFeB contents; (E) bending angles of SMPA under different pillar height (H); (F) bending angles of MPSA under different spacing (S).

实验中还发现,柱状阵列的 β 与阵列的 H 和 S 有关。SMPA的 β 随 H 的变化情况如图3(E)所示。可以看出,在 B 和NdFe含量相同的情况下,SMPA的 β 随着 H 的增加而增大,表明增加SMPA的 H 可以更有效地提高其弯曲程度。SMPA的 β 随 S 的变化情况如图3(F)所示。可以看出,在 B 和NdFe含量相同的情况下, S 的变化对SMPA的弯曲程度影响不大。

此外,SMPA的弯曲变形具有优良的稳定性。在SMPA弯曲形变循环20次后(B 从0到60 mT之间来回转变),其 β 值保持稳定[图4(A)]。同样,SMPA在经过多次的响应弯曲后,其表面润湿性基本不变,依然表现出超疏水及低黏附特性[图4(B)]。

2.3 水滴在SMPA上的跳离去除

对比了在有外加磁场作用下水滴在SMPA上的跳离情况。实验结果表明,在没有外加磁场的情况下(以高度 H 为3000 μm ,间距 S 为700 μm 柱状阵列表面为例),要实现水滴从柱状阵列表面跳离,其体积需要不断增大,当水滴体积达到7.5 μL 时,水滴才可以自发从柱状阵列顶部跳离,即在没有外加磁场的情况下,水滴从SMPA表面跳离的最小体积为7.5 μL 。需要强调的是,在这种情况下水滴只能够从SMPA顶部跳离[图5(A)]。在受到外加磁场作用时,随着磁场强度的增大,SMPA逐渐发生弯

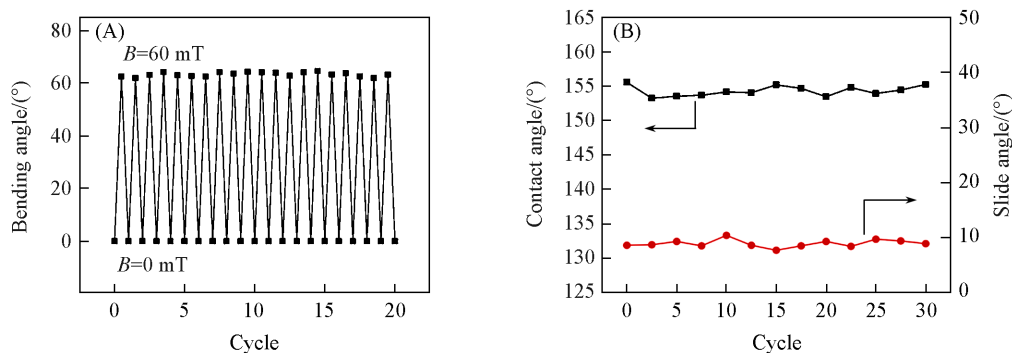


Fig. 4 Response bending angles(A) and surface wettability(B) of the SMPA during multiple(20 or 30) cycles between the magnetic flux densities of 0 and 60 mT

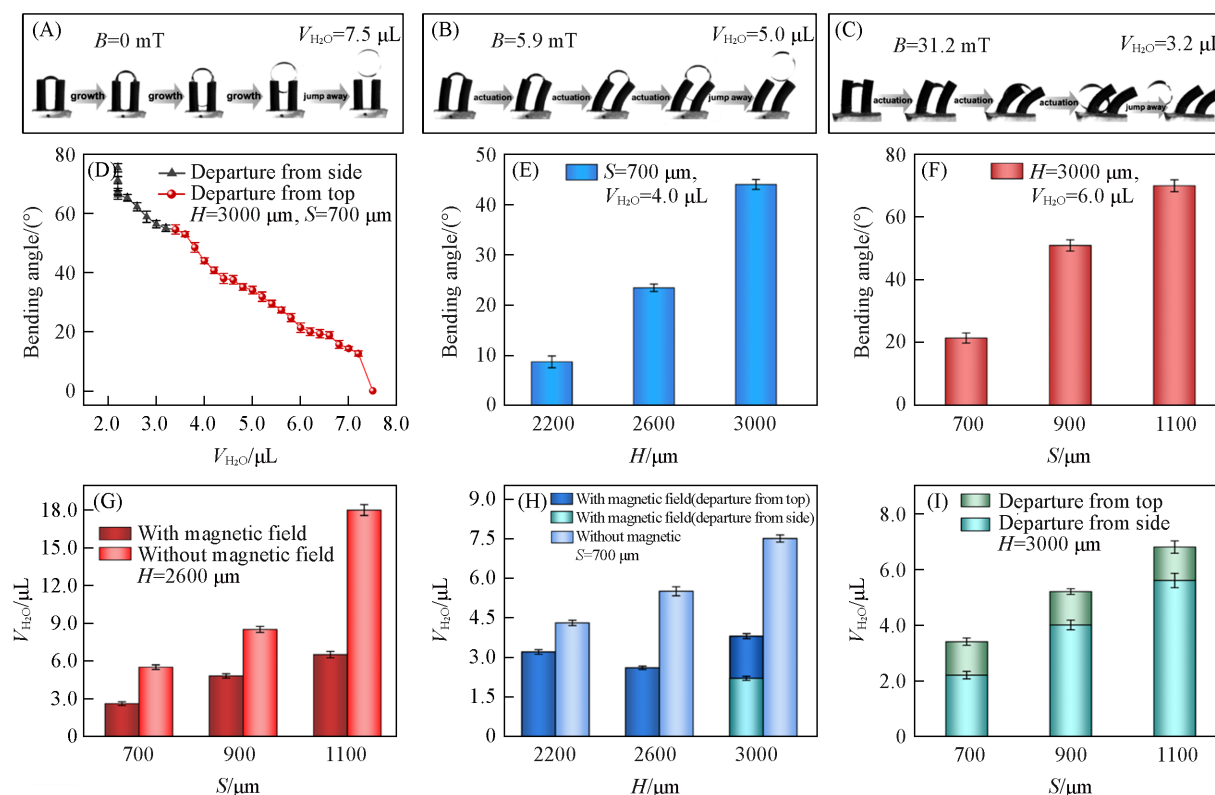


Fig. 5 Droplets removal ability of SMPA

(A) Process of a water droplet (7.5 μL) jumping out of the vertical arrays; (B) process of a water droplet (5.0 μL) jumping from the top of the arrays under the action of the magnetic field; (C) process of a water droplet (3.2 μL) jumping from the side of the arrays under the action of the magnetic field; (D) dependence of pillar bending angle on the droplets volume; (E, F) the bending angle required to remove the same volume of droplets for SMPA with different height (E) or spacing (F); (G, H) the minimal droplet volume that can be removed on arrays with different spacing (G) or height (H) before and after applying magnetic field; (I) the minimal droplet volume that can be removed from different direction on the arrays with different spacing and fixed $H(3000 \mu\text{m})$.

曲, 当 $B=5.9$ mT 时, 体积为 $5.0 \mu\text{L}$ 的水滴便可以从 SMPA 顶部跳离 (此时 $\beta=32.8^\circ$) [图 5(B)]. 这就意味着, SMPA 在弯曲时可以使体积较小的水滴从顶部发生跳离. 同时, 在实验中还发现, 当水滴的体积更小时 (如 $3.2 \mu\text{L}$, 此时外加磁场强度为 31.2 mT, $\beta=56.1^\circ$), 水滴不再从 SMPA 顶部跳离, 而是从 SMPA 的侧面发生跳离, 并且跳离的方向与 SMPA 的弯曲方向相反 [图 5(C)]. 上述结果表明, 在外加磁场作用下, 不但可以实现更小体积水滴从 SMPA 表面的去除, 同时随着水滴体积的变化, 可以实现从顶部及侧面两个方向的跳离.

探究了 SMPA 的 β 和跳离水滴体积之间的定量关系. 由图 5(D) 可见, 水滴跳离的体积越大, SMPA

($H=3000\ \mu\text{m}$, $S=700\ \mu\text{m}$)所需的弯曲程度就越小. 此外, 水滴的跳离去除与 SMPA 结构的尺寸也密切相关. 由图 5(E)可见, 当 SMPA 的 S 保持为 $700\ \mu\text{m}$ 且柱子间空隙内水滴的体积固定为 $4.0\ \mu\text{L}$ 时, 随着 H 的增加, 水滴跳离所需的 β 也增大. 同样地, 当 $H=3000\ \mu\text{m}$ 且柱子间空隙内的水滴体积固定为 $6.0\ \mu\text{L}$ 的情况下, 水滴跳离所需的 β 随 S 的增加而增大[图 5(F)]. 即对于窄间距及高的柱状阵列结构, 要实现同样体积水滴的去除, SMPA 需要发生更大的弯曲变形.

本文还对比了施加磁场与未施加磁场的情况下, 水滴在不同参数的 SMPA 上的跳离情况. 由图 5(G)可见, 在 H 一致的情况下($H=2600\ \mu\text{m}$), 随着 S 的增加, 无论是否施加磁场, 水滴能够从表面离开所需的最小体积均逐渐增大. 与未施加磁场的情况相比, 施加磁场时, 水滴能够从 SMPA 表面跳离所需的体积均显著减小. 同样地, 在 S 一致($S=700\ \mu\text{m}$)的情况下, 随着 H 的增加, 在未施加磁场的情况下, 水滴能够从 SMPA 表面离开所需的最小体积逐渐增大[图 5(H)]. 在施加磁场的条件下, 水滴能够从 SMPA 表面离开所需的体积逐渐减小(对于 $H=3000\ \mu\text{m}$ 的 SMPA, 此处指的是从侧面跳离液滴的体积). 需要注意的是, 在 $H=3000\ \mu\text{m}$ 的情况下, 水滴在弯曲的 SMPA 上的跳离出现了两种不同的方式, 即水滴从柱状阵列顶部跳离的最小体积为 $3.4\ \mu\text{L}$, 但当水滴体积为 $2.2\sim 3.4\ \mu\text{L}$ 时, 便会从柱状阵列的侧面发生跳离. 进一步考察了 $H=3000\ \mu\text{m}$ 的 SMPA 发生水滴从侧面跳离这一特殊现象[图 4(I)], 发现水滴从侧面跳离的最小体积和从顶部跳离的最小体积均随着 S 的增加而增大.

2.4 水滴在 SMPA 上的去除机理分析

研究结果表明, 与未施加磁场的情况相比, SMPA 在磁场作用下能够实现更小水滴的跳离. 为了深入理解其内在机制, 本文对水滴去除机理进行了分析. 在未施加磁场的情况下, 柱状阵列结构不会发生弯曲变形. 当水滴体积较小时, 其被完全限制在柱状阵列结构中[图 6(A₁), (B₁)], 由于水滴自身重力的影响, 水滴的顶部接触角(θ_t , °)略大于其底部接触角(θ_b , °)[图 5(A)中小体积水滴静止在柱状阵列凹槽时, $\theta_t=150.2^\circ$, $\theta_b=147.3^\circ$]. 此时, 水滴顶部界面的曲率半径(R_t , μm)略小于底部界面的曲率半径(R_b , μm), 水滴上、下表面曲率半径的不对称会使得水滴自身产生拉普拉斯压力差(ΔP_L , Pa):

$$\Delta P_L \approx 2\gamma \left(\frac{1}{R_b} - \frac{1}{R_t} \right) \quad (1)$$

式中: γ (N/m) 为水滴的表面张力. 因为 R_b 略大于 R_t , 水滴自身产生向下的 ΔP_L , 和水滴自身重力(G)方向一致, 此时水滴保持静止状态. 随着水滴体积的增加, 在柱状阵列结构形成的限制空间中, 水滴会受到挤压变形, 其上表面逐渐向柱状阵列顶部延伸. 当水滴顶部界面的三相接触线接触到柱状阵列顶部边缘时, 顶部接触角的基线会从圆柱的侧面过渡到其顶部的水平面. 此时, 接触角从原来的 θ_t 变为 θ_t^* [图 6(A₂), (B₂)]. 由于柱状阵列顶部边缘与水滴的接触线会对水滴形成钉扎效应, 随着水滴体积的进一步增大, 水滴顶部快速横向膨胀, 从而不断增大 R_t . 与此同时, 水滴底部的 θ_b 和 R_b 基本保持不变, 这就导致水滴上下表面产生较大的不对称形变[图 6(A₃), (B₃)]. 这一形变的出现会使得水滴自身产生向上的 ΔP_L , 当 ΔP_L 大于水滴重力(G)时, 水滴即可跳离柱状阵列表面[图 6(A₄), (B₄)].

当施加磁场时, SMPA 会发生弯曲, 显著降低了阵列间的空间体积. 随着柱状阵列弯曲程度的增加, 阵列间的空间体积随之减小. 因此, 当单个水滴置于柱状阵列结构中时, 在阵列的弯曲变形作用下, 水滴受到柱状阵列的挤压, 迫使其顶部界面向柱状阵列顶部移动[图 6(C₁—C₂)]. 当柱状阵列弯曲程度达到一定程度时, 水滴顶部会突出柱状阵列表面, 从而形成与图 6(A₃)类似的状态[图 6(C₃)], 水滴上下两端形成 ΔP_L , 随着柱状阵列弯曲程度进一步增大, 水滴更多部分会突出柱状阵列表面, 从而进一步提高 ΔP_L . 当 ΔP_L 大于水滴重力时, 水滴即可从表面实现跳离[图 6(C₄)]. 从以上分析可以理解, 柱状阵列弯曲形变能够有效降低阵列间的空间体积, 从而能够使得更小体积的水滴从表面实现去除.

在 SMPA 的 H 较大(如 $H=3000\ \mu\text{m}$)的情况下, 水滴不仅能够从其顶部跳离, 还能从侧面跳离. 这可能是因为: 当水滴的体积较小(比如 $3.2\ \mu\text{L}$)时, 随着柱状阵列的弯曲变形, 水滴同时受挤压变形, 但由于 H 值较大, 水滴即使达到最大变形也无法突破顶部[图 6(D₁)和(D₂)]. 因此, 水滴只能从侧面突破柱状阵列结构. 同时, 随着柱状阵列的弯曲变形, 不同方向上柱状阵列间的距离会发生不同的变

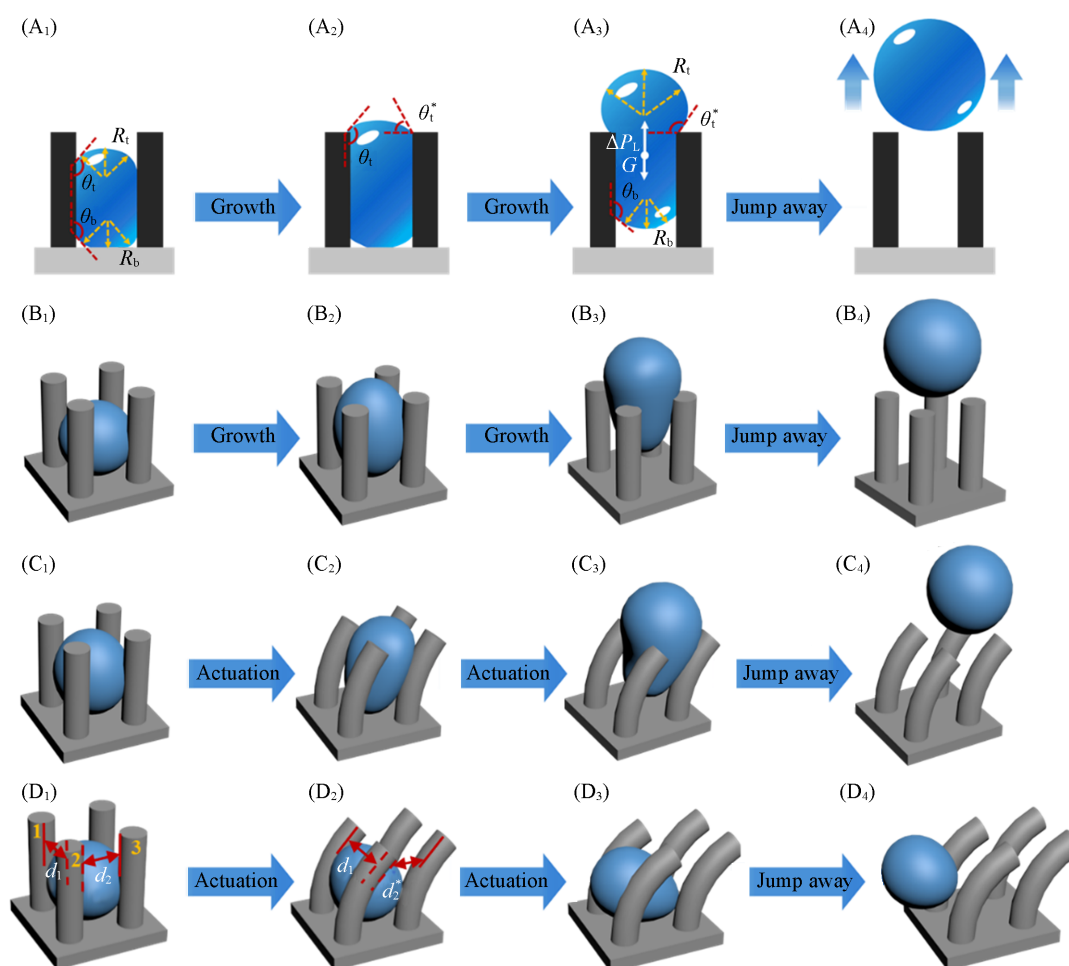


Fig. 6 Analysis of the droplets departure from SMPA

(A₁—A₄) Schematic diagram of the process of droplets departure from the vertical groove (front view); (B₁—B₄) the process of droplets departure from the vertical groove (perspective field of view); (C₁—C₄) the process of the droplets jumping out of the groove under the external magnetic field (departure from the top); (D₁—D₄) the process of the droplets jumping out of the groove under the external magnetic field (departure from the side).

化. 垂直于柱状阵列弯曲方向的柱1和柱2间距 d_1 不会发生显著改变, 而平行于弯曲方向的柱2和柱3间距 d_2 则会显著减小[图6(D₂)中 d_2^*]. 由此可知, 柱状阵列变形后垂直于柱状阵列变形方向的柱间距较大, 因此受挤压的水滴从柱1和柱2间突破[图6(D₃)]. 与前面类似, 当突破的水滴形成不对称形态时, 产生的 ΔP_L 将迫使水滴最终离开柱状阵列表面[图6(D₄)]. 当水滴体积较大(如 $5.0 \mu\text{L}$)时, 水滴在柱状阵列弯曲形变挤压下, 其顶部能够突破柱状阵列上表面, 因此较大体积水滴则从柱状阵列顶部跳离表面.

3 结 论

提出了一种能够实现水滴跳离的智能调控动态结构方案, 并对其进行了定性与定量验证. 结果显示, 与传统的超疏水静态结构相比, SMPA 动态结构能够显著减小水滴离开表面的体积, 水滴实现跳离所需的最小体积随着柱状阵列 β 的增大而减小. 同时, 当水滴体积一定时, 随着 SMPA 的 H 和 S 的增大, 需要更大的 β 才能实现水滴的去除. 在实验中还发现了 $H=3000 \mu\text{m}$ 的 SMPA 会使得水滴产生两种不同的跳离方式, 当水滴体积大于等于 $3.4 \mu\text{L}$ 时, 水滴从 SMPA 的顶部跳离, 当水滴体积小于 $3.4 \mu\text{L}$ 时, 水滴从 SMPA 的侧面跳离. 制备的 SMPA 具有对水滴去除方式的磁响应调控能力, 有望在水滴运输、雾滴收集、微化学反应器等多个领域实现应用.

参 考 文 献

- [1] Zhang X. D., Ben S., Zhao Z. H., Ning Y. Z., Li Q., Long Z. Y., Yu C., Liu K., Jiang L., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, 33(20), 2212217
- [2] Wang X. N., Wang B. H., Lai H., Cheng Z. J., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2023**, 39(1), 151—158
- [3] Lin Y., Hu Z. Y., Zhang M. X., Xu T., Feng S. L., Jiang L., Zheng Y. M., *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, 28(49), 1800163
- [4] Jarimi H., Powell R., Riffat S., *Int. J. Low-Carbon Technol.*, **2020**, 15(2), 253—276
- [5] Liu J., Guo H. Y., Zhang B., Qiao S. S., Shao M. Z., Zhang X. R., Feng X. Q., Li Q. Y., Song Y. L., Jiang L., Wang J. J., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55(13), 4265—4269
- [6] Gao S. W., Wu S. C., Gulfam R., Deng Z. L., Chen Y. P., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **2023**, 217, 124641
- [7] Marcinichen J. B., Wu D., Paredes S., Thome J. R., Michel B., *Appl. Energy*, **2014**, 114, 179—191
- [8] Wen R. F., Xu S. S., Ma X. H., Lee Y., Yang R. G., *Joule*, **2018**, 2(2), 269—279
- [9] Adera S., Alvarenga J., Shneidman A. V., Zhang C. T., Davitt A., Alzenberg J., *ACS Nano*, **2020**, 14(7), 8024—8035
- [10] Zhao S., Peng Y., Liu C. H., Qiu Y. T., Li Y. B., *Chem. J. Chinese Universities*, **2023**, 44(12), 20240409 (赵双, 彭云, 刘春华, 丘依婷, 李亿保. 高等学校化学学报, **2023**, 44(12), 20240409)
- [11] Feng L., Li S., Li Y., Li H., Zhang L., Zhai J., Song Y., Liu B., Jiang L., Zhu D., *Adv. Mater.*, **2002**, 14(24), 1857—1860
- [12] Gao X., F., Jiang L., *Nature*, **2004**, 432(7013), 36
- [13] Chen H., Zhang P., Zhang L., Liu H., Jiang Y., Zhang D., Han Z., Jiang L., *Nature*, **2016**, 532(7597), 85—89
- [14] Zheng Y., Bai H., Huang Z., Tian X., Nie F. Q., Zhao Y., Zhai J., Jiang L., *Nature*, **2010**, 463(7281), 640—643
- [15] Ju J., Bai H., Zheng Y., Zhao T., Feng R., Jiang L., *Nat. Commun.*, **2012**, 3, 1247
- [16] Peng Y., He Y., Yang S., Ben S., Cao M., Li K., Liu K., Jiang L., *Adv. Funct. Mater.*, **2015**, 25(37), 5967—5971
- [17] Hou H. M., Wu X. M., Hu Z. F., Gao S. H., Dai L. Y., Yuan Z. P., *Colloid Surf. A, Physicochem. Eng. Asp.*, **2023**, 675, 132127
- [18] Liu C. T., Zhao M. R., Zheng Y. L., Cheng L. Y., Zhang J. L., *Langmuir*, **2021**, 37(3), 983—1000
- [19] Di Novo N. G., Bagolini A., Pugno N. M., *ACS Nano*, **2024**, 18(12), 8626—8640
- [20] Yan X., Qin Y. M., Chen F. P., Zhao G. L., Sett S., Hoque M. J., Rabbi K. F., Zhang X. Q., Wang Z., Li L. N., Chen F., *Miljkovic N.*, *ACS Nano*, **2020**, 14(10), 12796—12809
- [21] Yan X. Z., Li J., Li L. C., Huang Z. Y., Wang F. P., Wei Y., *Appl. Phys. Lett.*, **2016**, 109(16), 161601
- [22] Wu D., Zhang Z., Zhang Y. Y., Jiao Y. L., Jiang S. J., Wu H., Li C. Z., Zhang C. C., Li J. W., Hu Y. L., Li G. Q., Chu J. R., Jiang L., *Adv. Mater.*, **2020**, 32(48), 2005039
- [23] Zhang H. Q., Zhao G. L., Wu S. W., Alsaid Y., Zhao W. Z., Yan X., Liu L., Zou G. S., Lv J. Y., He X., Wang J., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **2021**, 118(18), e2100978118
- [24] Lee S. H., Seong M., Kwak M. K., Ko H., Kang M., Park H. W., Kang S. M., Jeong H. E., *ACS Nano*, **2018**, 12(11), 10693—10702
- [25] Wang B., Zhou X. C., Guo Z. G., Liu W. M., *Nano Today*, **2021**, 40, 101283
- [26] Miljkovic N., Enright R., Nam Y., Lopez K., Dou N., Sack J., Wang E. N., *Nano Lett.*, **2013**, 13(1), 179—187
- [27] Liu F. J., Ghigliotti G., Feng J. J., Chen C. H., *J. Fluid Mech.*, **2014**, 752, 22—38.
- [28] Yan X., Zhang L. C., Sett S., Feng L. Z., Zhao C. Y., Huang Z. Y., Vahabi H., Kota A. K., Chen F., Miljkovic N., *ACS Nano*, **2019**, 13(2), 1309—1323
- [29] Gou T., Liu T., Su Y. P., Li J., Guo Y. Y., Huang J. B., Zhang H. D., Li Y., Zhang Z. Y., Ma Y. J., Zhang Z. Y., Gao X. F., *Chem. Eng. J.*, **2022**, 427, 130887
- [30] Boreyko J. B., Chen C., *Phys. Rev. Lett.*, **2009**, 103(18), 184501
- [31] Chu F. Q., Yan X., Miljkovic N., *Langmuir*, **2022**, 38(14), 4452—4460
- [32] Zhang P., Bachman H., Ozcelik A., Huang T. J., *Annu. Rev. Anal. Chem.*, **2020**, 13(1), 17—43
- [33] Murakami D., Jinnai H., Takahara A., *Langmuir*, **2014**, 30(8), 2061—2067
- [34] Lü T., Cheng Z. J., Lai H., Zhang E. S., Liu Y. Y., *Chem. J. Chinese Universities*, **2016**, 37(7), 1351—1356 (吕通, 成中军, 来华, 张恩爽, 刘宇艳. 高等学校化学学报, **2016**, 37(7), 1351—1356)

(Ed.: W, K, M)