

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210429003

超疏水性聚合物表面宏观结构对液滴撞击行为影响*

李晓宇 李昱鹏 霍磊 雷明凯

(大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024)

摘要: 超疏水性表面的液滴撞击是普遍存在的现象,研究具有不同尺寸和形状宏观结构的超疏水性表面对液滴撞击行为和接触时间的影响,对于其潜在应用具有重要的理论指导作用。采用等离子体纳米织构化方法在平整与具有矩形、半圆形和三角形宏观结构的聚乙烯表面上制备超疏水性纳米线结构,通过高速摄像机观察超疏水性聚乙烯表面的液滴撞击行为,分析撞击液滴的形状演变和接触时间变化。研究表明:超疏水性聚乙烯表面的矩形、半圆形和三角形宏观结构可显著改变液滴的撞击行为,液滴铺展后回缩过程的缩减加速了超疏水性表面液滴的弹离,有效降低了超疏水性表面的固液接触时间。超疏水性聚乙烯表面的矩形、半圆形和三角形宏观结构尺寸小于液滴直径时,均可造成高速撞击液滴分裂,液滴的分裂回弹导致固液接触时间进一步降低,接触时间最低可达到约 4.8 ms。疏水性表面的宏观结构有利于固液接触时间降低,具有宏观结构的疏水表面展现出抗水滴高速撞击的去润湿性能。

关键词: 超疏水性、宏观结构、接触时间、撞击行为

中图分类号: TG156;TB114

Effect of Macrostructures on Impacting Behaviors of Water Droplets on Superhydrophobic Polymer Surfaces

LI Xiaoyu LI Yupeng HUO Lei LEI Mingkai

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Impact of droplet is a common phenomenon on the superhydrophobic surfaces. To study the effect of macrostructures with different morphologies and sizes of the superhydrophobic surfaces on the contact behaviors and contact time of water droplets during impacting is the potential applications of the superhydrophobic surfaces. The plasma nanotexturing was used to fabricate the superhydrophobic polyethylene (PE) surfaces with rectangle, semicircle and triangle macrostructures. The impacting processes of water droplets at different impact speed on the superhydrophobic PE surfaces were investigated by a high-speed camera and the evolution of the solid-liquid contact behaviors and contact time during impacting of water droplets were analyzed. The results showed that the rectangle, semicircle and triangle macrostructures on the superhydrophobic PE surfaces remarkably changed the contact behaviors of water droplets during impacting. The elimination of the retraction process of water droplets after spreading accelerated the rebound of water droplets to decrease powerfully the solid-liquid contact time on the superhydrophobic surfaces. The breaking of water droplets into small droplets during impacting was observed on the superhydrophobic surfaces with the rectangle, semicircle and triangle macrostructures smaller than the diameters of droplets. The rebounding of small droplets resulted in a further reduction in the solid-liquid contact time that can reach ~4.8 ms. The macrostructures on the superhydrophobic PE surfaces benefit to reduce the solid-liquid contact time. The superhydrophobic surface with macrostructures exhibits antiwetting property under the impacting droplet at a high speed.

Keywords: superhydrophobic; macrostructure; contact time; contact behavior

* 国家自然科学基金资助项目(51975086, 52111530043, 51611530706)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51975086, 52111530043, 51611530706).

20210429 收到初稿,20210919 收到修改稿

0 前言

自然界中超疏水性表面通常由微纳结构和低表面能材料复合而成^[1],具有超疏水性的表面展现出自清洁、抗润湿、减阻、防冰等优异性能^[2-4]。在大多数情况下,液滴与固体表面为动态接触方式。当液滴撞击荷叶表面时,液滴会从荷叶表面弹起并向荷叶的中心部分滚动,在滚动的过程中会带走荷叶表面的灰尘保持荷叶保持清洁^[5]。高空中飞行的飞机穿过冷空气层时,冷空气层中的液滴会撞击飞机表面涂层,液滴的回弹可降低液滴在飞机表面结冰的概率,有利于飞机顺利飞过冷空气层^[6]。其中,液滴撞击是常见的固液接触行为^[7]。当液滴撞击超疏水性表面时,通常发生铺展、回缩以及弹起等过程^[8],展现出特殊的接触行为,撞击液滴开始与超疏水性表面接触直至从表面离开经历的时间被定义为固液接触时间。在撞击的过程中,液滴与超疏水性表面发生动能、热能、势能以及黏附功等能量的转换和耗散。液滴与超疏水性表面撞击过程中接触时间的减小有利于降低液滴在超疏水性表面撞击过程中的能量耗散,从而促进液滴从超疏水性表面的完全回弹。因此研究超疏水性表面液滴撞击接触行为和接触时间的重要因素具有重要的意义^[6,9-10]。

当液滴以一定速度撞击平整超疏水性表面时,液滴可以从表面发生回弹并完全弹起。BIRD等^[11]将半径为1.33 mm去离子水滴以1.2 m/s撞击具有氟硅烷的超疏水性铝表面,液滴在超疏水性铝表面铺展,回缩并完全回弹,液滴与超疏水性铝表面的接触时间约为12.4 ms。PENG等^[12]将分散均匀的聚四氟乙烯和环氧树脂颗粒溶液旋涂在聚合物表面形成超疏水性表面。液滴以0.22 m/s速度撞击此超疏水性表面发生完全回弹,液滴与超疏水性表面的接触时间约为12.0 ms。液滴在超疏水性表面可以发生完全回弹,并且液滴与超疏水性表面的接触时间较短,然而超疏水性表面的液滴接触时间并不能完全满足实际应用需要,仍高于实际应用所需的时间尺度。例如,当飞机穿越高空冷空气层,空气层中的冰晶可以在飞机外表迅速结冰,冻雨容易在高压线上结冰形成冰挂导致电塔负重增加,因此降低超疏水性表面的液滴接触时间,有利于抑制飞机及高压线上的结冰,保证其安全运行^[13]。

近些年,研究发现在超疏水性表面构造宏观结构,可改变液滴撞击时的固液接触时间。

GAUTHIER等^[14]将不同直径的镍丝(25~250 μm)固定在铝基底上,通过喷雾法用氟硅烷进行喷涂改性,从而使得铝基底和镍丝表面具有超疏水性。当液滴以0.2~1.5 m/s速度撞击超疏水性铝表面时,液滴与表面的接触时间约为13 ms,不随着液滴速度增加而改变。当液滴撞击具有直径为100 μm镍丝的铝表面时,随撞击速度的增加,液滴与表面接触时间降低,可达到7 ms。BIRD等^[11]研究发现,液滴在具有脊状结构的蓝蝴蝶翅膀以及旱金莲叶子表面的接触时间明显低于没有脊状结构的接触时间,并进行了仿生试验研究,即在铝表面铣削出宏观三角形结构,采用分步阳极氧化法进行抛光和刻蚀,随后沉积氟硅膜制备具有超疏水性的表面结构。直径为1.33 mm的液滴以速度1.2 m/s撞击超疏水性铝平面的接触时间 $t_c = 12.4$ ms,相同尺寸和速度液滴撞击具有三角形结构的超疏水性铝表面时接触时间为 $t_c/\sqrt{2}$ 。沈一洲等^[15]在Ti₆Al₄V上铣出三角形脊状结构并经过水热法制备超疏水性表面。液滴撞击单个三角脊状结构的接触时间为7.6 ms,液滴撞击三个和两个交叉的三角脊状结构的接触时间分别为5.8 ms和5.5 ms。综上所述,超疏水性表面的宏观结构可改变撞击液滴的动态行为,从而极大降低固液接触时间,因此深入探索不同宏观结构和尺寸对固液接触时间的影响具有重要意义。

聚合物材料在电力传输设施及飞行器表面涂层具有广泛应用,其中固体表面的疏水性防护是其重要应用之一^[16-17]。制备具有超疏水性表面可以降低液滴在固体表面结冰危害,而固体表面的结冰行为与液滴的接触时间密切相关。具有宏观结构的超疏水性表面有利于降低液滴与固体表面的接触时间。因此,研究超疏水性聚合物表面宏观结构,对其固液界面接触行为的影响具有潜在的实用意义。等离子体纳米织构技术是一步无模板刻蚀构造微纳米结构表面的有效方法,可实现纳米线、纳米锥、纳米柱等表面织构的调控^[18-20],并赋予聚合物材料表面新的性能,例如超疏水性、抗反射性、减阻等。本文采用热压法在聚乙烯(PE)表面制备不同形貌和不同尺寸的宏观结构,采用容性耦合等离子体纳米织构技术对具有宏观结构的PE表面进行氧等离子体处理和氟碳膜沉积,制备具有纳米织构的超疏水性表面。研究了具有不同尺寸和不同形貌宏观结构的超疏水性PE表面撞击液滴的接触行为和接触时间,分析了超疏水性表面撞击液滴的弹离形状变化对接触时间的影响。

1 试验方法

1.1 样品准备

在不锈钢块上分别铣出 $1.75\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 和 $0.5\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 的矩形、半径为 0.25 mm 的半圆及边长为 0.5 mm 的等边三角形等具有不同尺寸宏观结构。将平整的 PE 板放在具有宏观结构的不锈钢表面上,采用热压法在 PE 板表面热压成型出不同形貌的宏观结构。将带有宏观结构的 PE 板切割成尺寸为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 的样品,对 PE 样品分别进行酒精、丙酮和去离子水清洗 20 min ,然后将清洗好的样品在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥箱中烘干 3 h ,放入恒温干燥箱中备用。

1.2 等离子体纳米织构方法

射频容性耦合等离子体反应腔室通过两步法在聚乙烯板上制备纳米织构化表面^[19-20]。反应腔室内部由两个平行相距 110 mm 的直径为 200 mm 的平面不锈钢电极组成,上电极接地,下电极连接射频源。聚乙烯基板并排放置在下电极上。第一步,机械泵将反应腔室中压强抽至 0.1 Pa ,随后开启分子泵将其压强抽至 4 mPa ,随后将 99.9% 纯氧气以 50 sccm (mL/min , 标况毫升每分钟) 流速通入反应腔室中,反应腔室内部压强维持在 18 Pa 。在射频功率 200 W 下进行持续时间 15 min 对聚乙烯表面进行氧等离子体处理;第二步,氧等离子体处理后的聚乙烯表面进行氟碳膜等离子体沉积。将 99.9% 纯八氟环丁烷气体以流速为量 40 sccm 通入反应腔室中,反应腔室气压稳定并保持在 8.8 Pa 。射频功率 200 W 下进行持续时间 1 min 的八氟环丁烷等离子体沉积对聚乙烯基体表面处理。最后得到具有疏水性纳米织构聚乙烯表面。

采用 ZEISS SUPRA-55 VP 型场发射扫描电子显微镜观察等离子体纳米织构化 PE 表面的微观形貌。

1.3 水滴润湿性和撞击测试

将 PE 样品放在水平样品台,通过针头将 $4\text{ }\mu\text{L}$ 去离子水滴在 PE 样品表面,液滴的接触角(CA)和滚动角(SA)通过 Data Physics OCA 20 接触角测试仪器测量^[19-20]。将 $4\text{ }\mu\text{L}$ 去离子水滴放置在处于水平的 Data Physics OCA 20 试验台上的 PE 样品表面,通过控制 Data Physics OCA 20 接触角测试仪器的软件控制试验台旋转,当液滴发生滚动时试验台的旋转角度为 PE 样品滚动角,测量样品表面三个不同位置的接触角和滚动角,计算其平均值。

2 结果与讨论

利用等离子体纳米织构技术,氧等离子体刻蚀 15 min 在 PE 表面制备出纳米线结构, C_4F_8 等离子体聚合 1 min 在纳米线表面沉积具有低表面能的氟碳膜。图 1 给出了氧等离子体刻蚀 15 min 和 C_4F_8 等离子体聚合沉积 1 min 的超疏水性 PE 表面的 SEM 照片。PE 表面形成随机分布的纳米线结构,其中纳米线的直径约为 $100\pm 20\text{ nm}$,纳米线长度为 $2.1\pm 0.4\text{ }\mu\text{m}$,纳米线之间的间距为 $1.2\pm 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。纳米线顶端占样品表面投影面积的比例约为 $36.8\pm 3.8\%$ 。具有纳米线的 PE 表面的静态接触角(CA)为 $155.3\pm 0.6^\circ$,滚动角为 $5.2^\circ\pm 0.9^\circ$ 。液滴的

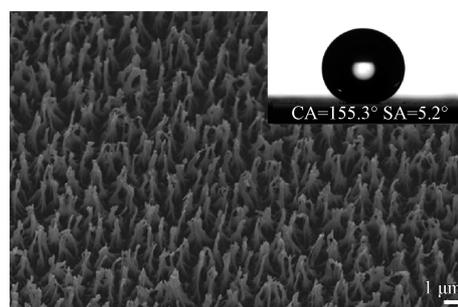


图 1 氧等离子体刻蚀 15 min 和 C_4F_8 等离子体聚合沉积 1 min 的超疏水性 PE 表面的 SEM 照片

Fig. 1 Scanning electron micrographs (SEM) of superhydrophobic PE surfaces under the oxygen plasma treatment for 15 min and then C_4F_8 plasma polymerization deposition for 1 min

采用 Data Physics OCA20 接触角测量仪控制微量注射器针头注射 1.76 mm 液滴,液滴通过重力滴落,撞击在 PE 基体表面的宏观结构上,液滴撞击过程通过高速摄像机 (Phantom V310 High-speed Camera) 进行拍摄,拍摄帧数为 10 000 帧/s,试验装置示意图如图 2 所示。液滴撞击视频采用 Tracker

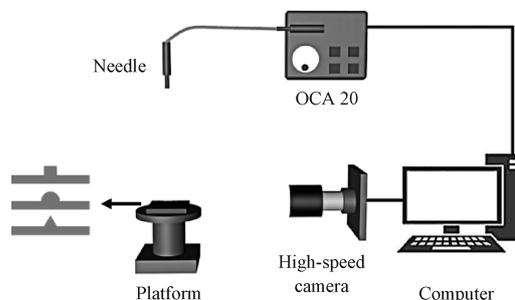


图 2 液滴撞击具有矩形、半圆形和三角形宏观结构超疏水性 PE 表面的试验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup for water droplets impacting on the superhydrophobic PE surfaces with rectangle, semicircle and triangle macrostructures

软件进行分析,视频截图采用 Image J 软件进行分析。前进角和后退角分别为 $157.9^\circ \pm 1.8^\circ$ 和 $154.5^\circ \pm 2.1^\circ$,接触角滞后通过液滴的前进角和滞后角差值计算,为 $3.4 \pm 1.2^\circ$ 。具有纳米线和氟碳膜的 PE 表面展现出 Cassie 态超疏水性。

图 3a 给出了平整超疏水性 PE 表面的速度 1.35 m/s 液滴撞击过程侧面照片。设定液滴与表面初始接触时间为 0 ms , 2.0 ms 后液滴在超疏水性表面铺展到最大直径,液滴呈扁平状,随后液滴开始回缩,在 9.8 ms 时液滴以竖直拉长形状离开表面。图 3b 和 3c 给出了具有宽矩形和窄矩形结构超疏水性 PE 表面的速度 1.35 m/s 液滴撞击过程侧面照片。当液滴以相同速度撞击到具有宽矩形结构的超疏水性表面时,液滴开始铺展,在 3.0 ms 时液滴铺展到最大铺展直径,液滴在中间呈尖端。随后液滴

中间部分开始与矩形发生分离,随时间增加液滴两端也与表面分离。当时间为 6.0 ms 时,液滴整体与表面完全分离,液滴保持水平展开形状。液滴撞击具有窄矩形结构表面时,在 3.0 ms 时液滴铺展直径达到最大值,液滴的两端上翘并且液滴中间呈圆弧形。随时间增加,液滴的中间部分与窄矩形开始分离,当时间为 5.0 ms 时,液滴分裂成两部分,两部分小液滴分别完全离开表面。液滴与具有宽矩形结构超疏水性表面的接触时间为 6.0 ms ,低于平整超疏水性表面的接触时间 9.8 ms ,宽矩形结构的宽度与液滴初始直径相当,液滴反弹时呈对称展开形状,未完全回缩,降低了固液接触时间。窄矩形结构的宽度小于液滴直径,在相同的撞击速度下,液滴分裂成两部分离开表面,液滴与表面的接触时间进一步降低至 5.0 ms 。

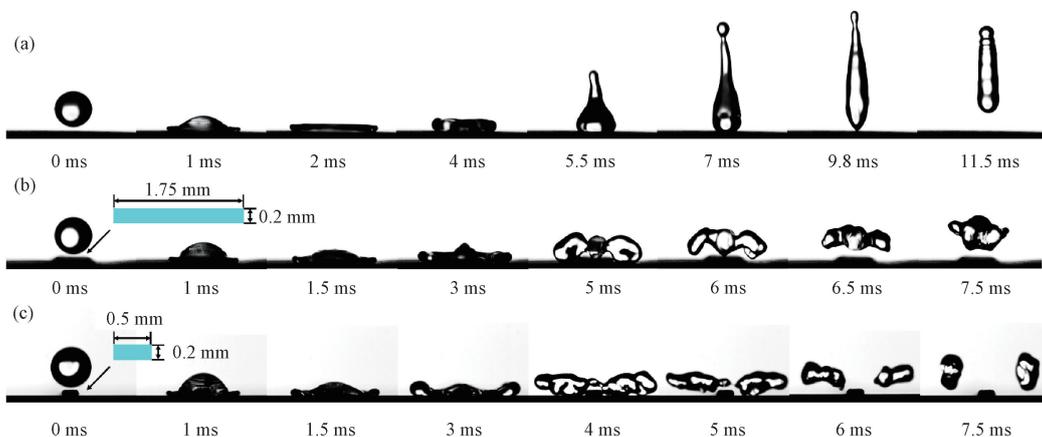


图 3 在平整、具有宽矩形和窄矩形结构的超疏水性 PE 表面上速度 1.35 m/s 液滴撞击过程侧面照片
Fig. 3 Sequential photographs of a droplet impacting at 1.35 m/s on superhydrophobic PE surfaces with or without macrostructures: (a) Plane surface, (b) Wide rectangle macrostructure, and (c) Narrow rectangle macrostructure

图 4 给出了不同撞击速度下液滴与平整、具有宽矩形结构和窄矩形结构的超疏水性 PE 表面的接触时间。当液滴撞击平整超疏水性 PE 表面时,液滴与表面的接触时间基本维持在 10.0 ms 左右,随着撞击速度增加变化不大,如图 4a 所示。液滴以 $0.2 \sim 1.1 \text{ m/s}$ 速度撞击具有宽矩形结构超疏水性 PE 表面,液滴与表面的接触时间约为 9.0 ms ,液滴以竖直拉长形状离开表面。液滴撞击速度超过 1.1 m/s ,液滴与超疏水性表面的接触时间降低至 5.8 ms 左右,液滴以水平展开形状离开表面,如图 4b 所示。当液滴撞击具有窄矩形结构超疏水性 PE 表面时,随撞击速度增加液滴与表面的接触时间分成四个阶梯段,即:当液滴撞击速度小于 0.4 m/s 时,液滴与表面的接触时间约为 14.2 ms ;当速度为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 时,接触时间约为 10.8 ms ,液滴离开

表面时都为竖直拉长形状;当速度为 $0.6 \sim 0.95 \text{ m/s}$ 时,接触时间降低至 7.5 ms ,液滴以水平展开形状离开表面;当速度超过 1.0 m/s 时,接触时间达到 6.3 ms ,液滴分裂成两部分离开表面,如图 4c 所示。液滴撞击超疏水性表面,液滴在表面先铺展至最大铺展直径,然后经过回缩过程,最后弹跳离开表面,超疏水性表面保持 Cassie 态,完全回弹液滴与超疏水性表面的接触时间满足 $t_c \propto (\rho d^3 / \sigma)^{1/2}$ [8],其中 ρ 为液滴密度, d 为液滴直径, σ 为液滴表面张力,因此不同撞击速度下液滴与超疏水性表面的接触时间约为定值。超疏水性表面的宽矩形宽度与液滴初始直径相近,当撞击表面的液滴速度小于 1.1 m/s 时,液滴经历铺展和回缩过程,弹跳离开的液滴为竖直拉长形状,矩形结构对液滴撞击行为影响较小,撞击过程液滴形态变化与在平整超疏水性表面上相

似,如图 4b 中 I 所示。当液滴撞击速度高于 1.1 m/s 时,液滴铺展后未发生回缩过程,直接以水平展开形状离开表面,有效降低了与表面的接触时间,如图 4b 中 II 所示。在高速撞击条件下,超疏水性表面的宏观矩形结构改变了撞击液滴与表面的接触过程,液滴回缩时间的节省引起液滴与表面接触时间的降低。液滴撞击具有窄矩形结构超疏水性表面,速度小于 0.6 m/s 时,撞击过程液滴经历的形态

变化与在平整超疏水性表面上相似,接触时间较长。液滴撞击速度为 0.6~1.0 m/s 时,液滴铺展后未发生回缩,直接以水平展开形状离开表面,接触时间降低,如图 4c 中 II 所示。液滴撞击速度高于 1.0 m/s 时,液滴铺展后发生分裂,两部分小液滴分别离开表面,如图 4c 中 III 所示。矩形结构宽度的减小造成高速撞击液滴的分裂,进一步降低了液滴与超疏水性表面的接触时间。

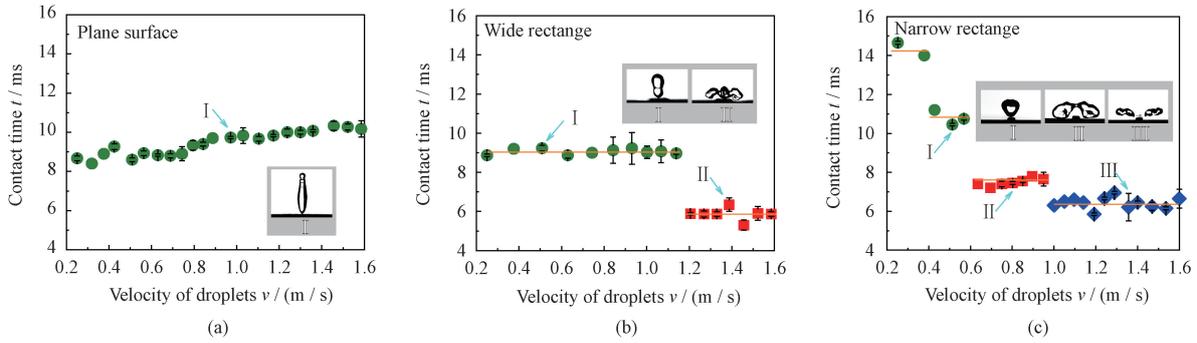


图 4 不同撞击速度下液滴与平整、具有宽矩形结构和窄矩形结构的超疏水性 PE 表面的接触时间
 Fig. 4 Contact time of water droplets at different impact speed on superhydrophobic PE surfaces with or without macrostructures: (a) plane surface, (b) Wide rectangle macrostructure, and (c) Narrow rectangle macrostructure

超疏水性表面液滴的撞击行为不仅与宏观结构的尺寸相关,而且还受宏观结构形状的影响,不同形状的宏观结构也会引起液滴与超疏水性表面的接触时间变化。图 5 为在具有半圆形和三角形结构的超疏水性 PE 表面上速度 1.35 m/s 液滴撞击过程侧面照片。液滴与半圆形接触时设定为 0 ms,随后液滴快速铺展,3.0 ms 后液滴的铺展直径达到最大值,

然后液滴开始分裂,5.5 ms 时分裂成两部分小液滴与表面分离,如图 5a 所示。液滴撞击具有三角形的超疏水性表面,3.0 ms 时液滴的铺展直径达到最大值,随后分裂成两部分小液滴,4.5 ms 时离开表面,如图 5b 所示。由图 5 可看出,具有半圆形和三角形宏观结构的超疏水性表面展现出相似的液滴撞击行为。

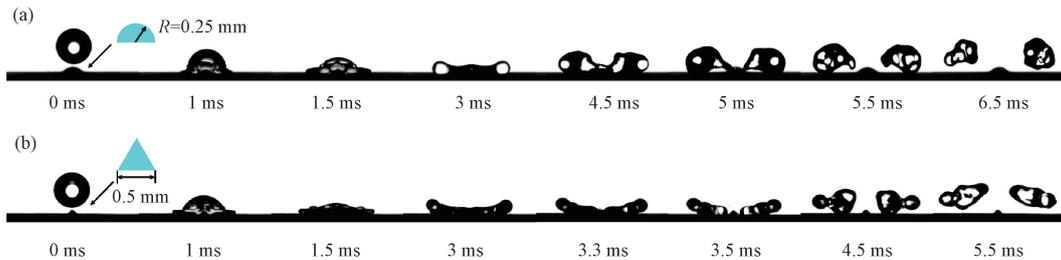


图 5 在具有半圆形和三角形结构的超疏水性 PE 表面上速度 1.35 m/s 液滴撞击过程侧面照片
 Fig. 5 Sequential photographs of a water droplet impacting at 1.35 m/s on superhydrophobic PE surfaces with macrostructures: (a) Semicircle macrostructure and (b) Triangle macrostructure

图 6 为不同撞击速度下液滴与具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性 PE 表面的接触时间。液滴撞击具有半圆形结构超疏水性表面,当液滴速度为 0.2~0.4 m/s 时,液滴与表面的接触时间约为 10 ms。当液滴速度为 0.4~1.0 m/s 时,接触时间下降至 6.2 ms 左右。当液滴速度大于 1 m/s 时,接触时间达到 5.3 ms 左右。液滴撞击具有三角形结

构超疏水性表面,当液滴速度为 0.2~0.4 m/s,液滴与表面的接触时间约为 9.1 ms。当液滴速度为 0.4~0.8 m/s 时,接触时间下降至 7.2 ms 左右。当液滴速度大于 0.9 m/s 时,接触时间达到 4.8 ms 左右。由此可见,随液滴撞击速度增加,液滴与具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性表面的接触时间都呈阶梯式降低趋势,与液滴撞击具有窄矩形结构

的超疏水性表面时类似。

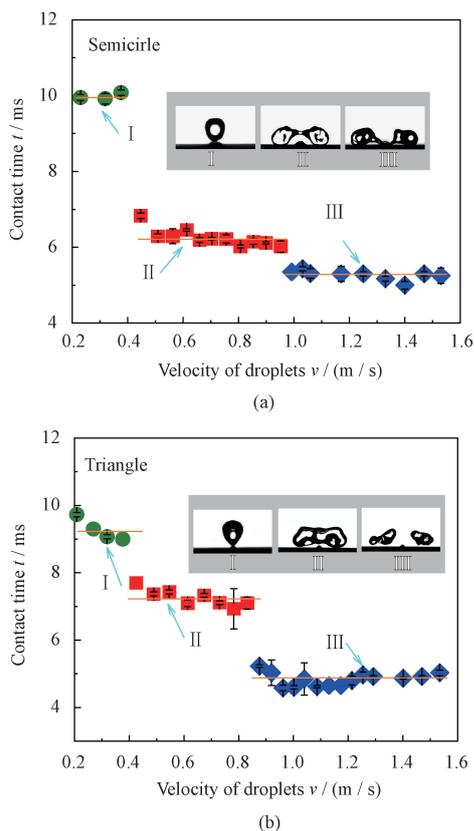


图6 不同撞击速度下液滴与具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性PE表面的接触时间

Fig. 6 Contact time of water droplets at different velocity impact on superhydrophobic surfaces with macrostructures; (a) semicircle macrostructure and (b) triangle macrostructure

当液滴以较低速度撞击具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性表面时,液滴经历铺展和回缩过程,以竖直拉长形状弹跳离开,撞击行为和接触时间与在平整超疏水性表面上相似,如图6a和图6b中I所示。当液滴以中等速度撞击具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性表面时,液滴铺展后未发生回缩,以水平展开形状离开表面,接触时间降低,如图6a和图6b中II所示。当液滴高速撞击具有半圆形结构和三角形结构的超疏水性表面,液滴铺展后发生分裂,两部分小液滴分别离开表面,接触时间进一步降低,如图6a和图6b中III所示。因此,在具有半圆形和三角形的超疏水性表面上,液滴撞击行为相类似,接触时间变化趋势相同。

图7为具有不同宏观结构超疏水性表面弹离的液滴形态与撞击速度关系图。液滴撞击平整超疏水性表面,在不同撞击速度下,液滴离开表面时都为竖直拉长形状。超疏水性表面宽矩形结构的宽度与液滴直径相近,液滴撞击速度增加造成离开表面的液

滴形状会由竖直拉长形状转变为水平展开形状,弹离液滴的形状转变对应于一个确定的撞击速度阈值。当液滴撞击宽矩形结构速度小于1.2 m/s时液滴以水平展开形状离开具有宽矩形疏水性PE表面。超疏水性表面的窄矩形结构的宽度、半圆形结构的直径和三角形结构的底边均低于液滴直径,随液滴撞击速度增加,离开表面的液滴形状都经历由竖直拉长形状转变为水平展开形状,再转变到分裂成小液滴,弹离液滴的两类形状变化都分别对应于两个撞击速度阈值。当液滴撞击速度小于0.4 m/s时液滴以竖直拉长形状离开具有宏观结构疏水性表面,当液滴撞击速度约为0.4 m/s至1 m/s时液滴以水平展开形状离开疏水性平面,当液滴的撞击速度大于1 m/s时液滴分裂成小液滴离开具有宏观结构的疏水性表面。在一定撞击速度阈值下,固液接触时间相近,超过某一撞击速度阈值时,弹离液滴形状与固液接触时间的改变相对应。

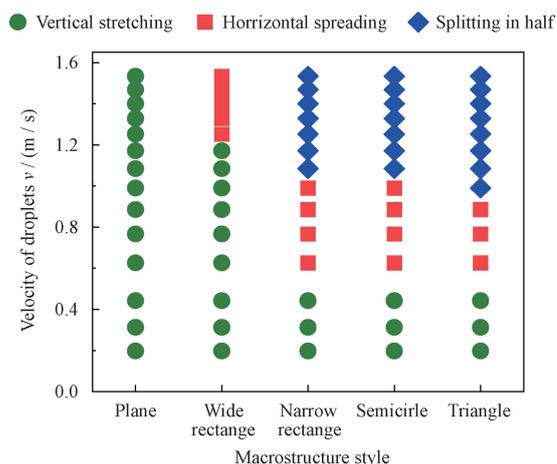


图7 具有矩形、半圆形和三角形宏观结构超疏水性表面的液滴弹离形状与撞击速度关系

Fig. 7 Rebounding form of water droplets at different impact speed on the superhydrophobic PE surfaces with rectangle, semicircle and triangle macrostructures

液滴铺展系数($\beta = D_{\max}/D_0$)是描述液滴在疏水性表面接触行为的参数之一,其中 D_{\max} 为液滴在疏水性表面的最大铺展直径, D_0 为液滴原始直径。当液滴高速撞击到超疏水性表面时,液滴动能克服其表面张力在超疏水性表面发生铺展,随后在表面张力作用下发生回缩和回弹。撞击液滴的韦伯数(We)与速度的平方成正比即 $We = \rho R v^2 / \gamma$,其中 ρ 为液滴密度, R 为液滴的半径, v 为液滴的撞击速度, γ 为液滴的表面张力。ZHAO和BIANCE等^[7,21]分别研究发现,当撞击液滴的半径小于液滴的毛细半径($\kappa^{-1} = (\gamma/\rho g)^{1/2}$)时液滴撞击超疏水性表面,液滴

的铺展系数(β)与韦伯数(We)存在关系,即 $\beta \propto We^{1/4}$,其中 g 为重力加速度。图8给出了平整超疏水性PE表面与具有矩形、半圆形和三角形宏观结构超疏水性PE表面的液滴 We 与铺展系数(β)的拟合关系。当液滴撞击平整超疏水性PE表面时,随液滴撞击速度增加, β 和 We 都随之增大, β 与 We 的拟合关系为 $\beta = 0.98We^{1/4}$,符合 $\beta \propto We^{1/4}$ 。液滴撞击具有矩形结构、半圆形结构和三角形结构的超疏水性PE表面,尽管液滴的铺展系数都高于平整超疏水性表面的铺展系数,但随 We 增加铺展系数展现出相似的增大趋势。在具有不同矩形宽度的超疏水性表面,液滴的铺展系数相近。由此可见,液滴撞击超疏水性表面,液滴撞击动能克服液体表面张力发生铺展,虽然在表面宏观结构影响下液滴发生较大铺展,但液滴铺展形态未发生特殊变化。在撞击具有不同宏观结构的超疏水性表面,液滴的回弹形状存在较大变化,液滴的回弹形状的转变与固液接触时间的变化密切相关。撞击液滴铺展后,液滴未发生回缩直接回弹可有效降低接触时间,回弹液滴发生分裂可进一步缩短接触时间。

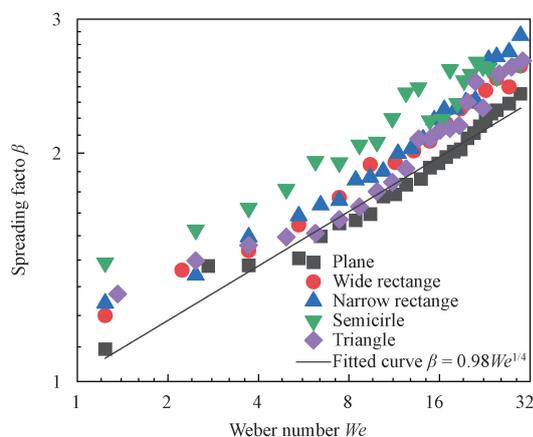


图8 平整超疏水性PE表面与具有矩形、半圆形和三角形宏观结构超疏水性PE表面的撞击液滴铺展系数(β)与韦伯数(We)的拟合关系

Fig. 8 Fitting curve of the spreading factors (β) as a function of Weber number (We) of water droplets impacting on the plane superhydrophobic PE surfaces and the PE surfaces with macrostructures including rectangle, semicircle and triangle

3 结论

(1) 采用等离子体纳米织构化方法改性可以在具有不同宏观结构的聚合物基体上获得具有超疏水性的表面。

(2) 宏观结构导致液滴回缩过程的缩减加速了超疏水性表面液滴的弹离,有效降低了超疏水性表

面的固液接触时间。因此,超疏水性聚乙烯表面的矩形宏观结构可显著改变液滴的撞击过程及有效降低了超疏水性表面的固液接触时间。

(3) 当宏观结构的尺寸小于液滴时,具有小尺寸不同形貌宏观结构的超疏水性表面均可导致高速撞击液滴分裂,液滴的分裂有利于固液接触时间降低,接触时间最低可达到4.8 ms左右。

参 考 文 献

- [1] EDER M, AMINI S, FRATZL P. Biological composites-complex structures for functional diversity [J]. *Science*, 2018, 362 (6414): 543-547.
- [2] KHOJASTEH D, KAZEROONI M, SALARIAN S, et al. Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 42(25): 1-14.
- [3] HWANG G B, PATIR A, PAGA K, et al. Buoyancy increase and drag-reduction through a simple superhydrophobic coating [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(22): 7588-7594.
- [4] GEYER F, D'ACUNZI M, SHARIFI A, et al. When and how self-cleaning of superhydrophobic surfaces works [J]. *Science Advances*, 2020, 6(3): eaaw9727-eaaw9738.
- [5] SAMADA M A, TAFESHI V H, MOHAMEL G, et al. Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2012, 340(1): 18-34.
- [6] DE P D, DOLATABADI A. Effect of superhydrophobic coating on the anti-icing and deicing of an airfoil [J]. *Journal of Aircraft*, 2016, 54(2): 490-499.
- [7] ZHAO B Y, WANG X, ZHANG K, et al. Impact of viscous droplets on superamphiphobic surfaces [J]. *Langmuir*, 2017, 33 (1): 144-151.
- [8] ARIA A, GHARIB M. Physicochemical characteristics and droplet impact dynamics of superhydrophobic carbon nanotube arrays [J]. *Langmuir*, 2014, 30(23): 6780-6790.
- [9] HAO C L, LIU Y, CHEN X M, et al. Bioinspired interfacial materials with enhanced drop mobility: From fundamentals to multifunctional applications [J]. *Small*, 2016, 12 (14): 1825-1839.
- [10] JIANG X F, XU E L, WU G G, et al. Drop impact on superhydrophobic surface with protrusions [J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 212(2): 115351-115359.
- [11] BIRD J C, DHIMAN R, VARANASI K K, et al. Reducing the contact time of a bouncing drop [J]. *Nature*, 2013, 503(7476): 385-388.
- [12] PENG C Y, CHEN Z Y, TIWARI M. All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance [J]. *Nature Materials*, 2018, 17 (4): 355-360.
- [13] 郑伟, 陆正奇, 徐婉笛, 等. 美国空军气象局冻雨预报系统对三次冻雨事件及电线积冰厚度的模拟 [J]. *科学技术与工*

- 程, 2020, 20(6): 2494-2499.
- ZHENG W, LU Z Q, XU W D, et al. Simulation analysis on the three freezing rain episodes and the wire icing thickness by using the airforce weather agency freezing rain forecast system [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2494-2499. (in Chinese)
- [14] GAUTHIER A, SYMON S, CLANET C, et al. Water impacting on superhydrophobic macrottextures [J]. Nat Commun, 2015, 6(1): 8001-8007.
- [15] SHEN Y Z, JIANG T, HUANG T, et al. Approaching the theoretical contact time of a bouncing droplet on the rational macrostructured superhydrophobic surfaces [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(11): 111604-111609.
- [16] 孙博阳, 陈哲, 谢傲, 等. 高碳黑含量聚丙烯电力电缆屏蔽材料 [J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1625-1632.
- SUN B Y, CHEN Z, XIE A, et al. Highly filled polypropylene/carbon black shielding materials for power cables [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1625-1632. (in Chinese)
- [17] 刘立武, 赵伟, 兰鑫, 等. 智能软聚合物及其航空航天领域应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 1-17.
- LIU L W, ZHAO W, LAN X, et al. Soft intelligent material and its applications in aerospace [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5): 1-17. (in Chinese)
- [18] LI Y P, LIU X, LI X Y, et al. Universally applicable fabrication technique for biomimetic nanocone arrays on flexible polymer substrates for anti-reflection functionality [J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2019, 7(4): 41003-41014.
- [19] LI Y P, LI X Y, ZHU X P, et al. Polymer surface textured with nanowire bundles to repel high-speed water drops [J]. Langmuir, 2018, 34(20): 5871-5879.
- [20] LI X Y, LI Y P, MUZAMMIL I, et al. Antireflection and antiwetting functionalities of plasma-nanotextured polymer surfaces with biomimetic nanopillars [J]. Plasma Processes and Polymers, 2020, 17(11): e2000050-e2000064.
- [21] BIANCE A L, CHEVY F, CLANET C, et al. On the elasticity of an inertial liquid shock [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 554: 47-66.
-
- 作者简介:** 李晓宇, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为材料表面工程。
E-mail: xyli@dlut.edu.cn
- 雷明凯 (通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料表面工程。
E-mail: surfeng@dlut.edu.cn