

表面功能化

覆冰损伤后天然超疏水表面
湿润性恢复机理研究

胡琴, 杨航, 蒋兴良, 舒立春

(重庆大学 雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站, 重庆 400044)

摘要: **目的** 针对目前缺乏超疏水表面损伤后的湿润性恢复机理, 揭示覆冰损伤后天然超疏水表面湿润性的恢复机理, 以期制备自恢复超疏水表面提供理论依据。**方法** 将荷叶置于低温低压人工试验室中, 在不同“覆冰-脱冰”循环损伤次数后, 使用共聚焦显微镜分别测量样品的湿润性、粗糙度, 分别评价荷叶植株在“覆冰-脱冰”损伤后的湿润性及表面粗糙度的恢复过程, 根据恢复过程特征分析恢复机理。**结果** 经“覆冰-脱冰”循环处理后的样品, 其静态接触角降至 $105.34^{\circ}\sim 123.07^{\circ}$, 滚动角增至 $39.5^{\circ}\sim 70.2^{\circ}$, 表面算术平均高度 (S_a) 降至 $3.123\sim 2.624\ \mu\text{m}$, 表面均方根高度 (S_q) 降至 $3.542\sim 3.113\ \mu\text{m}$; 对于“覆冰-脱冰”循环损伤 1 次的荷叶植株, 在 48 h 后其静态接触角恢复到 150° 以上。滚动角在 24 h 后降至 10° 以下。经 3 次“覆冰-脱冰”循环 (约 72 h) 后, 静态接触角、滚动角恢复到初始值。经过 5 次“覆冰-脱冰”循环损伤后, 荷叶无法完成恢复过程, 部分恢复湿润性后逐渐枯萎。**结论** 荷叶表面的静态接触角和滚动角恢复过程由表皮细胞重新扩张、表皮蜡层恢复 2 个因素决定。植株存活且表面局部损伤后, 其静态接触角和滚动角都完全恢复, 静态接触角更依赖于植物细胞和表皮蜡层所形成的微观粗糙度, 而滚动角更依赖于微观粗糙度之上的纳观粗糙度, 即滚动角比静态接触角更依赖于纳观粗糙度的恢复。

关键词: 覆冰环境; 超疏水; 湿润性; 恢复机理

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)09-0306-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.09.026

Wettability Recovery Mechanism of Natural Superhydrophobic
Surface after Icing Damage

HU Qin, YANG Hang, JIANG Xing-liang, SHU Li-chun

(National Observation and Research Station for Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: In order to reveal the wettability recovery mechanism of the natural superhydrophobic surface after icing damage, lotus leaves were placed in a low-temperature and low-pressure artificial laboratory for the icing experiment. The icing test temperature was set to $-5\ ^{\circ}\text{C}$ and the wind speed was 1 to 3 m/s. The living lotus leaves were damaged by the cycle of "icing and deicing", and then recovered at room temperature. Wettability and roughness of the samples were measured by optical

收稿日期: 2022-09-05; 修订日期: 2022-12-20

Received: 2022-09-05; Revised: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51977016, 52077020)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51977016, 52077020)

引文格式: 胡琴, 杨航, 蒋兴良, 等. 覆冰损伤后天然超疏水表面湿润性恢复机理研究[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 306-312.

HU Qin, YANG Hang, JIANG Xing-liang, et al. Wettability Recovery Mechanism of Natural Superhydrophobic Surface after Icing Damage[J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 306-312.

contact angle meter, digital tilt angle meter and 3D confocal microscope, respectively, to evaluate the wettability and surface roughness recovery process of lotus leaves after "icing and deicing" damage, and to analyze the recovery mechanism according to the characteristics of the recovery process. The static contact angle (WCA) decreased to 105.34° - 123.07° , the slip angle (SA) increased to 39.5° - 70.2° , the arithmetic average surface height (S_a) decreased to 3.123 - $2.624 \mu\text{m}$, and the root mean square height (S_q) decreased to 3.542 - $3.113 \mu\text{m}$, respectively. The wettability and roughness varied greatly from the initial values when a single "icing and deicing" cycle was carried out. As the number of cycles increased, the change gradually slowed down. In the subsequent action, the anchoring effect was not as strong as in the first cycle, so the surface roughness was not reduced as much as in the first cycle, and the change of wettability was not significant. For lotus leaves damaged once by the cycle of "icing and deicing", the WCA recovered to more than 150° after 48 hours. The SA dropped below 10° after recovery for 24 hours. About 72 hours after three cycles of "icing and deicing", WCA and SA returned to their initial values. After five cycles of "icing and deicing" damage, lotus leaves could not complete the recovery process. Although the absolute values of the surface roughness parameters are different after different cycles of "icing-deicing" damage, the recovery of surface roughness generally has an exponential function recovery process with time, which is consistent with the typical solid diffusion model. In particular, after multiple cycles of more severe damage, wettability has a short and sharp recovery phase at the initial stage, implying that there is a factor independent of diffusion, which is considered to be the cells re-expanded, and most living cells exhibit a weak temporal power-law viscoelastic deformation under mechanical loading. The shape of the cells can be recovered over time after the removal of the mechanical load. The viscoelasticity problem at the supracellular level can be explained by long-term mechanisms, with timescales ranging from tens of minutes to hours. The recovery process of WCA and SA on the lotus leaf surface is determined by two factors: the epidermal cells expanded again and the epidermal wax layer recovered. After plant survival and local surface damage, both WCA and SA are fully recovered. WCA is more dependent on the microscopic roughness formed by plant cells and the epidermal wax layer, while SA is more dependent on the nano-roughness attached to the microscopic roughness. SA is more dependent on the restoration of nano-roughness than WCA.

KEY WORDS: icing environment; superhydrophobicity; wettability; recovery mechanism

结构物表面覆冰是自然界中一种常见的现象,覆冰现象可能对输电线路、杆塔、风力发电机^[1-3]等设备造成损害,妨碍设备运行,降低设备设施的使用效率,甚至造成巨大的安全隐患。覆冰灾害不仅威胁着人们的生命安全,而且还会造成巨大的经济损失。例如,2008年初,我国南方地区出现了很强的寒潮,遭遇到有气象记录以来最严重的大范围持续低温雨雪冰冻天气,这次寒潮波及全国14个省570个县,覆冰导致铁塔折断、倒塌,并出现断线和覆冰闪络故障,造成超过1150亿元的经济损失^[4-5]。风力发电机叶片覆冰现象会导致负荷增加、气动性能下降^[6],不均匀覆冰会导致叶片不稳定,叶片不稳定会使风机过度振动和损坏,从而出现安全问题^[7],严重时会导致风力发电设备停运。

在过去几十年里,科学家们进行了大量研究,以提高结构物表面的除冰功能,大致可以分为2种主要的防除冰策略:主动式和被动式。主动式防除冰方法主要通过外界能量防除冰,现有的主动式防除冰的方法主要包括化学^[8]、加热^[9-10]和机械作用^[11]等。这些方法通常具有设计复杂、能耗高、应用成本高、耗时长等缺点。被动方法是对主动方法的一种改进策略,指基于表面修饰的物理和化学方法^[12]。由于无须供能和主动触发,以超疏水表面为代表的被动防冰方法受

到越来越多的关注,在结构物表面涂覆憎水性/超疏冰涂层以自主防止覆冰成为一种解决表面覆冰的重要方式。研究人员对不同植物蜡体系的疏水性能做了大量工作,受到生物的启发,科学家们通过制备仿生功能界面材料,模仿生物的特性,以解决该问题。例如,受到荷叶效应^[13]的启发,科学家们制备了超疏水表面。不论选用何种材质、制备方法,若要得到超疏水表面必须满足2个条件,一是表面具有微纳米粗糙结构,二是表面具有低表面能物质,二者缺一不可^[14]。在日常使用时,材料表面这些精细的多尺度凸起结构受到外力后,容易出现坍塌或分解,另外,超疏水表面还易吸附环境中的灰尘和污垢,使其表面能变高,从而导致超疏水性能失效^[15]。为了更广泛、长久地使用超疏水材料,研究稳固耐久的超疏水表面是一个重要方向^[16]。为了获得稳固耐久的超疏水表面,通常需要复杂精巧的设计,通过增强微纳米结构与基体之间的结合力可提高材料表面超疏水稳定性能。这种传统设计方式只能被动承受材料表面的轻微损坏,一旦处于稍微苛刻的使用环境,其表面的超疏水性能依然会失效。为了解决该问题,研究人员制备了具有自修复功能的超疏水涂层。自修复指借助可逆的化学反应,在不添加任何修复剂的情况下,通过材料本身或外界刺激使材料完成修复过程。在电力系统中,常用的室

温硫化硅橡胶材料 (RTV) 是一种典型的具备自修复功能的材料, 在覆冰后会暂时丧失憎水性^[17-18], 但在覆冰-脱冰周期结束后, 其憎水性会恢复, 在下次覆冰前, RTV 将部分恢复憎水性, 从而起到延缓覆冰的作用。尽管 RTV 在损伤后的憎水性存在恢复现象, 但恢复过程较缓慢, 在 1 次覆冰期内的后几次覆冰过程中, 通过 RTV 的憎水性延缓覆冰的作用有限。

尽管学界已制备出各种各样的自修复超疏水表面, 但对天然超疏水表面的湿润性恢复机理尚不太清楚。以荷叶为代表的植物叶片在轻微受损后, 其表面湿润性会随着时间的延长逐渐恢复。为了探究天然超疏水表面的湿润性恢复机理, 有研究人员将三叶草叶片进行等离子体处理, 观察存活和死亡的三叶草叶片表面湿润性的恢复过程^[19]。此外, 有学者研究了甘蓝蜡质表面的润湿特性, 以及机械损伤后蜡质表面随时间的恢复特性^[20]。尽管目前已有少量关于天然超疏水表面湿润性恢复过程和机理的研究, 但均未涉及“覆冰-脱冰”这类特殊的损伤情况, 超疏水表面的湿润性机理仍不明晰, 对于制备自修复超疏水表面无法起到指导作用。

探索荷叶超疏水性能在覆冰-脱冰循环损伤后湿润性的恢复过程, 揭示荷叶表面超疏水性能的恢复机理, 对快速恢复超疏水性能涂层的制备可以起到指导作用, 可极大提高超疏水材料的耐久性能和使用寿命, 也是解决现有涂层在覆冰环境下实际使用时超疏水性能失效问题的一个重要发展方向。

1 实验

1.1 实验装置

低温低压人工试验室内部的长度为 3.8 m, 内径为 2 m, 最低温度可达 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低气压能达到 34.6 kPa, 能产生的最大模拟风速为 3 m/s。该气候室使用国际电工委员会 (IEC) 推荐的喷嘴, 可产生直径为 10~100 μm 的水滴, 参考 IEEE 1783TM—2009 控制水流, 并进行覆冰测试。

1.2 测量装置

采用 SDC-100 光学接触角仪和数显倾角仪测量润湿性。静态接触角 (WCA) 和滚动角 (SA) 采用 20 μL 去离子水 (当表面疏水性太强而无法放置微小水滴时, 可采用更大的体积) 测试, 该模块可以自动选择检测基线, 并测量 WCA。通过缓慢倾斜样品直到水滴移动, 以测量 SA。在测量时, 至少随机选择 3 个不同的位置, 并取其平均值。在测量过程中, 要求实验室温度稳定在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

使用 Olympus 公司的 LEXT OLS4000 3D 共聚焦显微镜测量样品的粗糙度。需要强调的是, 由于生物系统的天然分散性, 在不同植株的荷叶之间存在较大

偏差。为了减少叶面不同部位和制样时间的影响, 实验选取荷叶表面根茎间的中心位置, 经切片后立即测量其粗糙度。在荷叶表面损伤前, 得到粗糙度参数的初始值。选取的表面粗糙度参数为表面算术平均高度 (S_a) 和表面均方根高度 (S_q), 它们是 ISO 25178 中规定的标准粗糙度参数。

1.3 方法

在低温低压气候室中进行覆冰环境模拟实验。将覆冰实验温度设置为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 覆冰的电导率为 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 水滴直径为 80~100 μm , 风速为 1~3 m/s。由于荷叶植株对低温的耐受性较差, 所以将荷叶植株的根部放在保温箱中进行保温, 只将荷叶暴露在覆冰环境中进行覆冰, 同时将荷叶表面倾斜 45° , 如图 1 所示。将整株荷叶放入人工气候室中, 在覆冰 10 min 后取出植株, 并在室温 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下进行自然脱冰, 脱冰时间为 10 min, 在 10 min 后覆冰完全脱落, 该过程为一个“覆冰-脱冰”循环。为了讨论“覆冰-脱冰”循环次数对恢复荷叶湿润性的影响, 对 3 个荷叶植株样品分别进行了 1、3、5 次除冰循环。

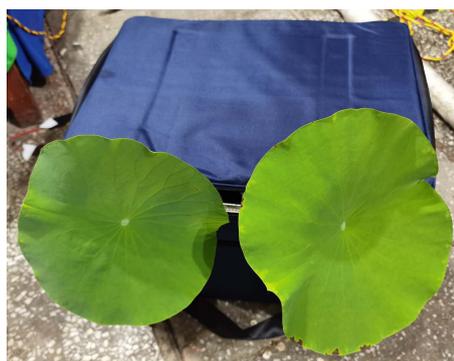


图 1 荷叶植株保温布置
Fig.1 Lotus leaf plant insulation layout

在完成覆冰-脱冰循环损伤实验后, 每隔一段时间将荷叶切片, 并进行湿润性和粗糙度测试, 测试的时间间隔逐渐增加 (2、4、6、8、24、48、96、120 h...), 直到测量结果达到超疏水定义或连续 3 次测量不再变化为止。将荷叶切片背面用双面胶固定在载玻片上, 分别测量其水静态接触角和滚动角。为了从微观上了解润湿性变化的原因, 同时测量其粗糙度。

2 结果及分析

2.1 覆冰-脱冰循环损伤后湿润性和粗糙度的变化

覆冰-脱冰循环对于荷叶表面是一个复杂的损伤过程。通过覆冰-脱冰循环后, 3 个样品的湿润性测试结果如图 2 所示。为了便于分析, 将 3 个样品的初始测量结果的平均值作为初始值。覆冰-脱冰循环 1

次的样品, 其静态接触角降至 123.07° , 表明此时荷叶表面失去了超疏水性, 但仍具有疏水性, 其滚动角增至 39.5° 。经过 3 个循环的样品, 静态接触角降至 111.56° , 滚动角升至 65.1° , 疏水性进一步下降。经过 5 次循环损伤后的样品, 其静态接触角降至 105.34° , 滚动角则升至 70.2° 。从以上结果可以看出, 覆冰-脱冰循环次数越多, 静态接触角的下降幅度越大, 滚动角的增加幅度越大。

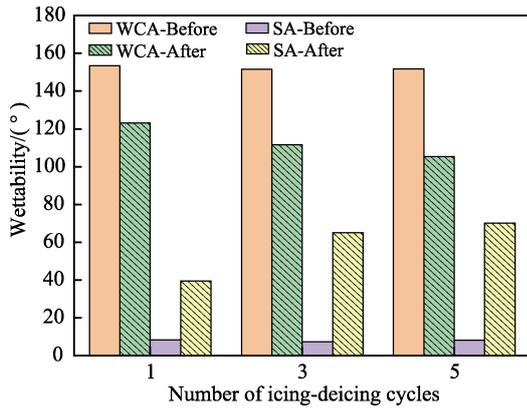


图 2 覆冰-脱冰循环后湿润性测试结果
Fig.2 Wettability test results after icing-deicing cycle

经 1、3、5 次覆冰-脱冰循环损伤后的样品, 荷叶的 S_a 分别降至 3.123 、 2.982 、 $2.624 \mu\text{m}$, 下降幅度分别为 27.56% 、 30.91% 、 33.99% ; S_q 分别降至 3.542 、 3.221 、 $3.113 \mu\text{m}$, 下降幅度分别为 25.1% 、 26.36% 、 31.10% 。 S_a 和 S_q 的绝对值随着循环次数的增加而减小。同时, 覆冰-脱冰循环次数越多, S_a 和 S_q 的下降幅度越大。测试结果如图 3 所示。

值得注意的是, 当进行 1 次覆冰-脱冰循环时, 荷叶的润湿性和粗糙度与初始值相比变化很大。随着循环次数的增加, 变化幅度逐渐减缓。可能的原因: 1 次覆冰-脱冰循环中荷叶细胞被挤压, 发生收缩; 表皮蜡层在脱冰过程中被破坏。在这 2 个因素的共同作用下荷叶的表面粗糙度降低。在随后的循环中, 锚定作用不如第 1 次强, 细胞也未继续收缩, 因此表面粗糙度的降低幅度不如第 1 次循环, 润湿性变化也不显著。

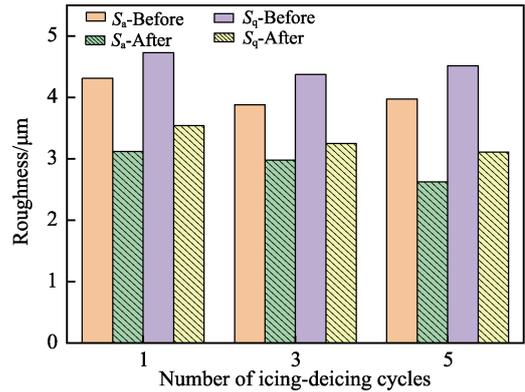


图 3 覆冰-脱冰循环后粗糙度测试结果
Fig.3 Roughness test results after icing-deicing cycle

2.2 覆冰-脱冰循环损伤后湿润性和粗糙度的恢复

不同覆冰-脱冰循环次数下荷叶润湿性的恢复过程如图 4 所示。为了便于比较, 图 4 中还显示了初始值, 五角星表示每个植株样本的初始值。

对于覆冰-脱冰循环 1 次损伤的荷叶植株, 在 48 h 恢复后荷叶的静态接触角完全恢复到 150° 以上。滚动角在脱冰损伤后开始恢复, 并在 24 h 后恢复, 降至 10° 以下。此时, 自洁性能完全恢复。值得注意的是, 在 1 次覆冰-脱冰循环损伤后的情况下, 滚动角在静态接触角之前完成恢复。

经 3 次覆冰-脱冰循环 (约 72 h) 后, 表面静态接触角完全恢复到初始值, 滚动角也恢复到初始值。值得注意的是, 在 3 次覆冰-脱冰循环损伤的情况下, 静态接触角在损伤后短时间内存在一个快速恢复阶段。荷叶经过 5 次覆冰-脱冰循环损伤后无法恢复, 部分恢复湿润性后逐渐枯萎。原因是低温导致植物死亡, 不能再为表面形态的恢复提供能量和合成恢复所需的蜡。

为了更好地了解荷叶在不同损伤后的表面形貌特征, 呈现了共聚焦显微镜测试结果的 4 种重要状态: 初始状态 (损伤前)、损伤完成 (0 h)、短时间恢复 (6 h) 和稳定状态, 如图 7 所示。需要注意的

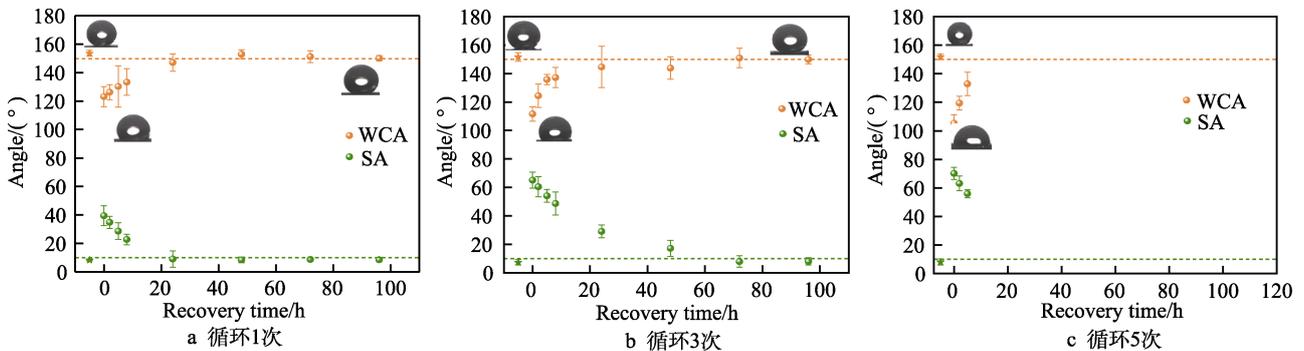


图 4 覆冰-脱冰循环 1、3、5 次后湿润性的恢复过程
Fig.4 Wettability recovery process after 1, 3 and 5 cycles of icing-deicing:
a) 1 cycle; b) 3 cycles; c) 5 cycles

是, 荷叶植物在经 5 次覆冰-脱冰周期后逐渐死亡, 因此针对 5 次覆冰-脱冰循环的共聚焦显微镜测试结果, 选择恢复 24 h 的图像作为稳定状态时的图像。

从损伤前的共聚焦图像(图 5)可以看出, 表面的柱状突起在初始状态下比较圆润。观察 0 h 时的图像发现, 在覆冰-脱冰循环后, 柱状突起的高度急剧下降, 且变得更加突兀和陡峭。尽管 3 个样品基于生物系统的原因, 其初始值略有不同, 但覆冰-脱冰循环次数越多, 粗糙度越小。随着恢复时间的增加, 其表面突起的形貌逐渐变得圆润。

由于植物蜡在受损后逐渐从角质层中迁移出来, 形成了表皮蜡层, 外层蜡层恢复, 运动速度逐渐降低, 因此恢复速度也逐渐降低。荷叶表面静态接触角的恢复过程在不同损伤类型后呈现指数特征。

不同损伤类型的恢复过程不同。在 3 次覆冰-脱冰循环情况下, 荷叶的静态接触角有一个快速恢复阶段, 而 1 次覆冰-脱冰循环则不存在快速恢复阶段。造成这种差异的主要原因是荷叶中表皮蜡所形成的粗糙度结构附着于植物细胞之上。荷叶的表皮细胞在严重的多次覆冰-脱冰循环下被压缩并变平。损伤后

荷叶的表皮细胞再次扩展, 导致微米级粗糙度急剧增加。虽然 1 次覆冰-脱冰循环可以去除表皮蜡晶体, 但细胞在恢复过程中重新扩展的因素不明显, 因此未出现剧烈的初始恢复阶段。

3 机理分析

文献[21]报道了植物表面受损后湿润性和粗糙度的恢复过程, 在再生实验中表皮蜡层完全被去除后, 导致这些部位的蒸腾速率较高, 更多的蜡移到表面, 重建屏障, 使其具有与周围地区相同的渗透性。当蜡的成分与蜡层最初形成时基本相同时, 就会形成基本相同的蜡晶体微观形态。文献[22]中研究了 17 种不同物种蜡膜的形成, 蜡膜形式有 2 种: 同心层和条纹层, 作者认为活体植物表面蜡膜的再生是一个高度动态和相对快速的过程。研究表明, 大多数植物能够填补表皮蜡层的空洞, 蜡膜的形成过程是蜡分子自组装成层状结构的过程。文献[20]观察了机械损伤后甘蓝叶片表面的恢复情况, 研究发现, 甘蓝叶片的损伤导致其润湿性能恶化。这主要是由于蜡质结构的破坏, 导致微粗糙度降低。在损伤后, 静态接触角和动

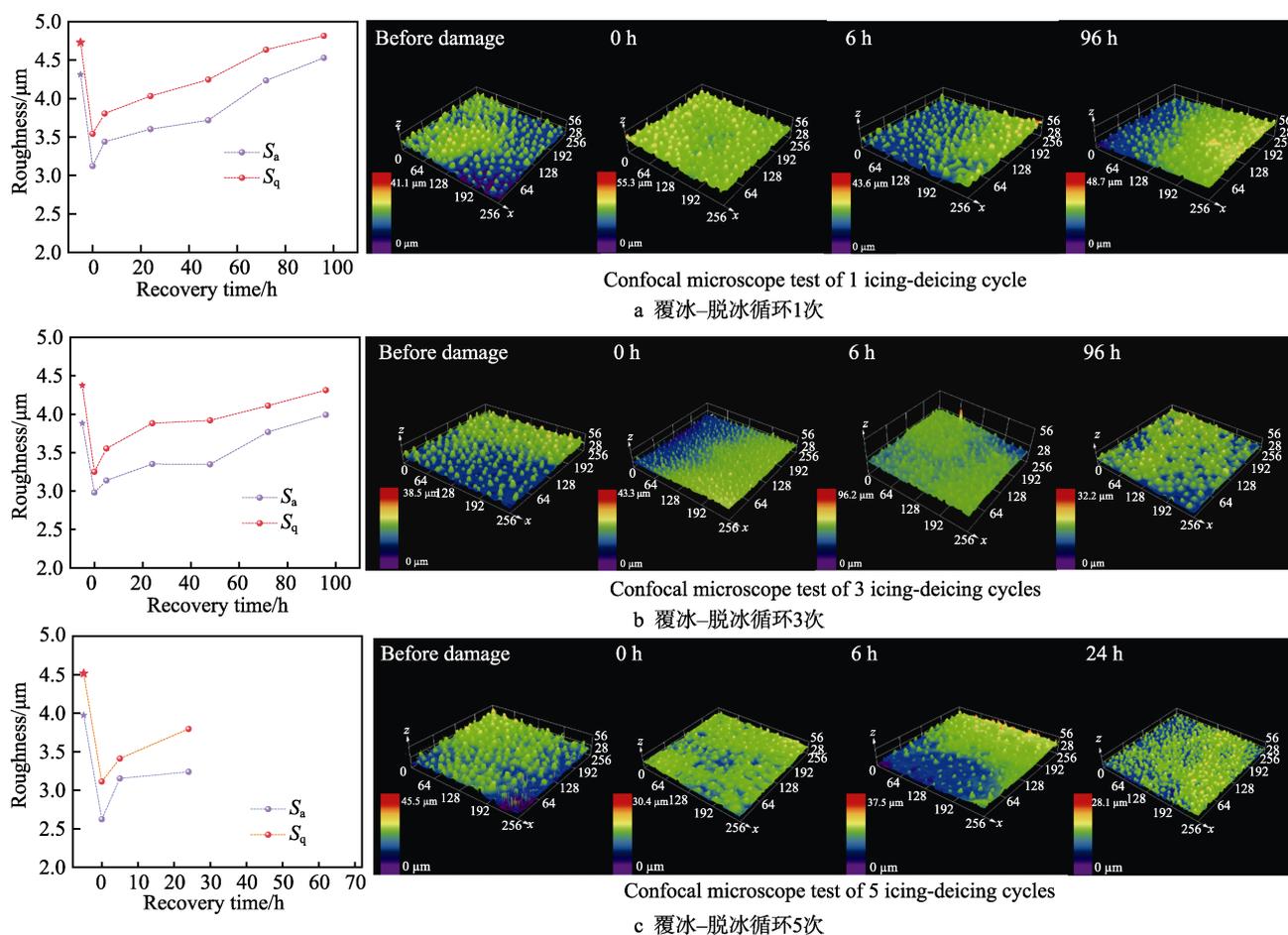


图 5 覆冰-脱冰循环 1、3、5 次后表面粗糙度的恢复过程及典型共聚焦图像

Fig.5 Surface roughness recovery process after 1, 3 and 5 cycles of icing-deicing and typical confocal image: a) 1 cycle of icing-deicing; b) 3 cycles of icing-deicing; c) 5 cycles of icing-deicing

态接触角均能完全恢复, 但恢复速率不同。植物细胞的恢复先于蜡晶结构的恢复, 因此湿润性由双尺度的表面粗糙度决定。

从本文的结果来看, 尽管不同次数的覆冰-脱冰循环损伤后表面粗糙度参数下降的绝对值不同, 但表面粗糙度的恢复总体上均为随时间呈指数型函数“先快后慢”特征的恢复过程, 这种特性符合典型的固体扩散模型, 即荷叶表面表皮蜡在“覆冰-脱冰”循环损伤中被去除, 表面和内部的植物蜡浓度梯度导致这些部位的蒸腾作用速率增加, 导致表皮蜡的再生和补充。随着表皮蜡的再生和补充, 内外植物蜡浓度梯度降低, 蒸腾作用速率下降, 湿润性恢复的速度随着时间的增加逐渐减缓。

如图 4 所示, 在不同“覆冰-脱冰”循环次数下 0~8 h 的湿润性测试结果表明, 静态接触角的恢复在损伤情况更严重的多次“覆冰-脱冰”循环损伤后, 湿润性在恢复初始阶段存在一个短暂且剧烈的恢复阶段, 而在“覆冰-脱冰”循环 1 次损伤情况下, WCA 的恢复过程较损伤情况更严重的多次“覆冰-脱冰”循环更平缓, 这意味着存在一个独立于蜡质扩散之外的作用时长为数小时的因素。在机械载荷作用下, 大多数活细胞表现出弱时间幂律的黏弹性变形。在去除机械载荷后, 细胞的形状可以随着时间的延长而恢复^[23]。超细胞水平的黏弹性问题可通过长时间机制解释, 时间尺度在数十分钟至数小时之间。可以认为导致湿润性短暂且剧烈恢复的原因是细胞在“覆冰-脱冰”循环损伤后的重新扩展。

通过观察发现, 荷叶表面的滚动角恢复到初始状态的时间不早于静态接触角的恢复时间, 而且 SA 的恢复过程并未出现剧烈恢复阶段, 可认为造成 WCA 剧烈恢复的细胞重新扩展, 并未对 SA 的恢复过程产生影响, 因此可以认为影响 WCA 和 SA 的主要因素是不同层次的粗糙度。荷叶表面的分级粗糙度由表皮细胞和微米级表皮蜡晶体构成, 受损后荷叶首先由被挤压的表皮细胞重新扩展, 同时表皮蜡晶体再生形成微米级的表面结构, 然后表皮细胞重新扩展过程结束, 表皮蜡在微米级结构上继续再生, 形成纳米级表面结构。微观结构的恢复通常快于纳观结构, 可以认为 WCA 和微观结构的相关性更高, 而 SA 主要由纳观结构决定。

4 结论

1) 随着覆冰-脱冰循环次数的增加, 荷叶的表面粗糙度和湿润性下降程度越严重。覆冰-脱冰循环损伤后表面突起被破坏, 导致粗糙度急剧下降, 且突起会变得陡峭, 随着恢复时间的增加, 突起会重新生长, 并恢复圆润。

2) 荷叶表皮细胞和表皮蜡共同形成了一个具有

微观和纳观粗糙度特征的层次结构。覆冰-脱冰循环损伤导致荷叶表面润湿性能恶化, 主要是由于表皮细胞受到挤压及表皮蜡结构的破坏, 从而降低了粗糙度。荷叶表面的 WCA 和 SA 的恢复过程由这 2 个因素决定: 表皮细胞重新扩张、表皮蜡层恢复。

3) 植株存活且表面局部损伤后, 其静态接触角和滚动角都完全恢复。WCA 更依赖于植物细胞和表皮蜡层所形成的微观粗糙度, 而 SA 更依赖于微观粗糙度之上的纳观粗糙度。即 SA 的恢复比 WCA 的恢复更依赖于纳观粗糙度的恢复。

参考文献:

- [1] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.
LI Zai-hua, BAI Xiao-min, ZHOU Zi-guan, et al. Prevention and Treatment Methods of Ice Coating in Power Networks and Its Recent Study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [2] AZIMI Y A, ALLAHDINI A, MAGHSOUDI K, et al. Potential Anti-Icing Applications of Encapsulated Phase Change Material-Embedded Coatings; A Review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101638.
- [3] 舒立春, 李瀚涛, 胡琴, 等. 自然环境叶片覆冰程度对风力机功率损失的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5599-5605.
SHU Li-chun, LI Han-tao, HU Qin, et al. Effects of Ice Degree of Blades on Power Losses of Wind Turbines at Natural Environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5599-5605.
- [4] 陆佳政, 彭继文, 张红先, 等. 2008 年湖南电网冰灾气象成因分析[J]. 电力建设, 2009, 30(6): 29-32.
LU Jia-zheng, PENG Ji-wen, ZHANG Hong-xian, et al. Icing Meteorological Genetic Analysis of Hunan Power Grid in 2008[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(6): 29-32.
- [5] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.
HUANG Xin-bo, LIU Jia-bing, CAI Wei, et al. Present Research Situation of Icing and Snowing of Overhead Transmission Lines in China and Foreign Countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28.
- [6] 李瀚涛, 舒立春, 胡琴, 等. 考虑覆冰粗糙度影响的风力发电机叶片气动性能数值仿真[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2253-2260.
LI Han-tao, SHU Li-chun, HU Qin, et al. Numerical Simulation of Wind Turbine Blades Aerodynamic Performance Based on Ice Roughness Effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2253-2260.
- [7] WEI Ke-xiang, YANG Yue, ZUO Hong-yan, et al. A Review on Ice Detection Technology and Ice Elimination Technology for Wind Turbine[J]. Wind Energy, 2020, 23(3):

- 433-457.
- [8] TALALAY P, LIU Ning, YANG Yang, et al. Ice Drills Recovery Using Chemical Deicers[J]. *Polar Science*, 2019, 19: 49-56.
- [9] IBRAHIM Y, KEMPERS R, AMIRFAZLI A. 3D Printed Electro-Thermal Anti- or De-Icing System for Composite Panels[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 166: 102844.
- [10] DALAWAI S P, SAAD ALY M A, LATTHE S S, et al. Recent Advances in Durability of Superhydrophobic Self-Cleaning Technology: A Critical Review[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 138: 105381.
- [11] LV Jian-yong, SONG Yan-lin, JIANG Lei, et al. Bio-Inspired Strategies for Anti-Icing[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(4): 3152-3169.
- [12] CHO H, LEE J, LEE Sang-min, et al. Durable Superhydrophilic/Phobic Surfaces Based on Green Patina with Corrosion Resistance[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, 17(10): 6786-6793.
- [13] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological Surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [14] CHEN Zhi-feng, LI Guang-ji, WANG Li-ying, et al. A Strategy for Constructing Superhydrophobic Multilayer Coatings with Self-Cleaning Properties and Mechanical Durability Based on the Anchoring Effect of Organopolysilazane[J]. *Materials & Design*, 2018, 141: 37-47.
- [15] BARTH WAL S, LIM S H. A Durable, Fluorine-Free, and Repairable Superhydrophobic Aluminum Surface with Hierarchical Micro/Nanostructures and Its Application for Continuous Oil-Water Separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 618: 118716.
- [16] ZHANG Cheng-jiao, LIANG Fang-hua, ZHANG Wei, et al. Constructing Mechanochemical Durable and Self-Healing Superhydrophobic Surfaces[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(2): 986-994.
- [17] 蒋兴良, 李鑫, 张志劲, 等. 绝缘子表面雨淋覆冰粘接力及其影响因素研究[J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3464-3469.
- JIANG Xing-liang, LI Xin, ZHANG Zhi-jin, et al. Research of the Glaze Cohesive Force on Insulator Surface and Its Influencing Factors[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3464-3469.
- [18] 肖雄, 王建国, 吴照国, 等. 等离子体作用后硅橡胶憎水性恢复及憎水迁移特性研究[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(S1): 433-439.
- XIAO Xiong, WANG Jian-guo, WU Zhao-guo, et al. Study on Hydrophobicity Recovery and Hydrophobicity Transfer of Plasma Treated Silicone Rubber[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S1): 433-439.
- [19] WANG Xiao-long, LIU Xin-jie, ZHOU Feng, et al. Self-Healing Superamphiphobicity[J]. *Chemical Communications*, 2011, 47(8): 2324-2326.
- [20] RICH B B, POKROY B. A Study on the Wetting Properties of Broccoli Leaf Surfaces and Their Time Dependent Self-Healing after Mechanical Damage[J]. *Soft Matter*, 2018, 14(38): 7782-7792.
- [21] NEINHUIS C, KOCH K, BARTHLOTT W. Movement and Regeneration of Epicuticular Waxes through Plant Cuticles[J]. *Planta*, 2001, 213(3): 427-434.
- [22] KOCH K, BHUSHAN B, ENSIKAT H J, et al. Self-Healing of Voids in the Wax Coating on Plant Surfaces[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, 367(1894): 1673-1688.
- [23] FABRY B, MAKSYM G N, BUTLER J P, et al. Scaling the Microrheology of Living Cells[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(14): 148102.

责任编辑：彭颀