

# 清华团队发现结冰融冰新现象，有望用于飞机机翼防除冰

“荷叶不沾水”现象和红酒摇晃时出现的“酒泪”现象，与超疏水抗结冰表面有什么关系？

日前，清华大学材料学院钟敏霖教授团队，以此为灵感，发现了超疏水表面结冰融冰的新现象，用超快激光研发出一种超疏水抗结冰表面，未来可用于飞机机翼抗结冰等重要应用。

1月19日，相关论文以《结冰融冰循环过程中液滴的自发去润湿转变》(Spontaneous dewetting transitions of droplets during icing & melting cycle)为题发表在Nature Communications上。

研究中，钟敏霖团队发现在超快激光制备的特殊微纳结构超疏水表面上，在结冰、融冰的循环过程中，会产生一种自发的润湿性状态转变现象。此前，该现象在现有润湿性理论和现实中被认为是不可能出现的。该团队不仅观察到了这一新现象，还系统解释了出现机理，提出了润湿性转变的三个前提条件，以及实现该转变的超疏水表面的制备方法。这一发现有助于克服荷叶不沾水优良特性难以广泛应用的障碍，有可能较好地解决超疏水表面用于航空抗结冰的难题。

在工业生产和实际生活中，结冰常常会带来极大的困扰，例如，输电线路结冰会严重影响电力传输，车窗、高铁轨道的结冰会影响运输安全，最为严重的是飞机在高空飞行时，机翼、螺旋桨等关键部件一旦结冰，会直接导致飞机升力系数降低，进而严重影响飞行安全，甚至会发生坠机事故。

为避免飞机高空结冰，目前常常采用电热、气热等主动式防除冰技术，但这类技术不可避免要消耗大量电能和热能，在高空恶劣气候条件下有时并不能完全地消除结冰危害。因此，研究并发展新的防除冰技术，对于解决飞机结冰问题意义十分重大。

近年来，受到荷叶不沾水自清洁

特性的启发，超疏水表面成为有望实现低能耗被动防除冰的最具前途的方法之一，然而抗结冰性能、远比荷叶的超疏水性能要求高。要想实现类似荷叶的不沾水特性，材料表面只需要丰富的微纳结构，以及较低的表面能即可。

但是，荷叶只生存于温暖的南方，或夏天较高温度的气候之下，冬天枯萎之后则回避了防结冰问题。人工制备的超疏水表面，要想在冬天低温结冰气候下获得抗结冰性能，则需要表面具有不易结冰、少结冰和易于除冰的特性。其中，在水滴降温结冰过程中，微纳结构会起正面和反面双重作用。

## 从荷叶不沾水到玫瑰花瓣的水滴粘附

通常来说，当温度在0℃以上时，液滴在超疏水表面上存在两种状态：像荷叶一样的不沾水低黏附状态（学术上称为Cassie状态）；以及像玫瑰花瓣一样的高黏附状态（学术上称为Wenzel状态）。

当液滴处于“荷叶状态”时，液滴被表面底部大量微纳结构包围，所形成的成干上万个小气囊所支撑，因此液滴与表面的实际接触面积很小。当温度降到0℃以下，超疏水表面具有不易结冰、少结冰和易于除冰的正面功能。

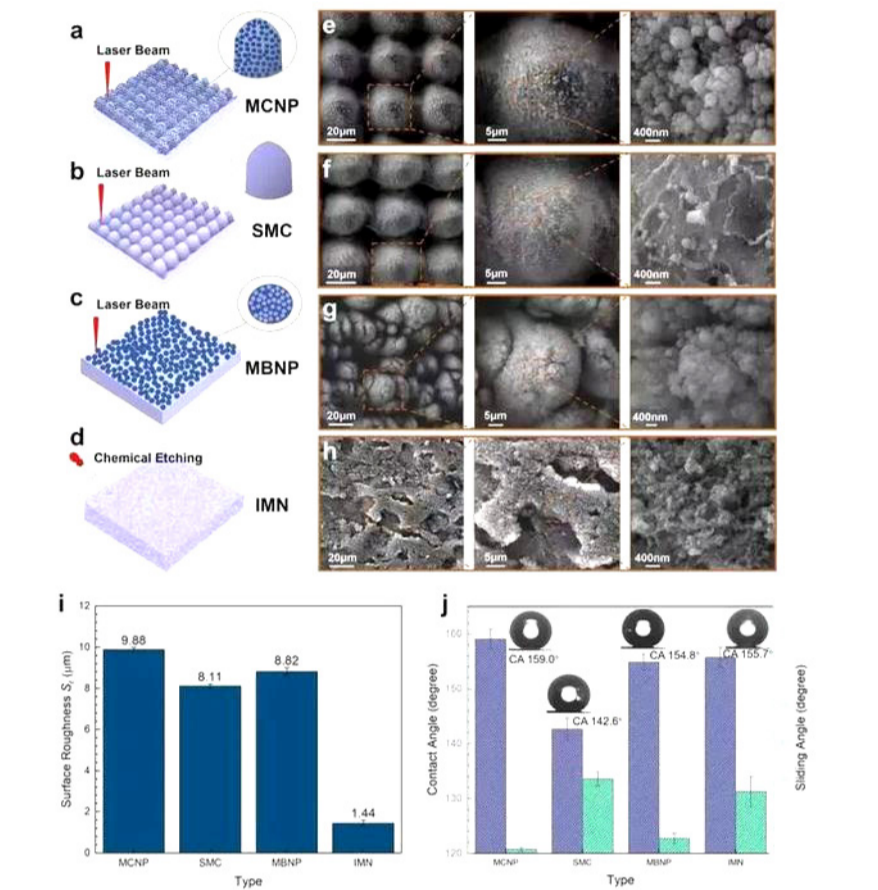
然而，常常由于温度下降、振动或压力等外界干扰，超疏水表面的液滴底部小气囊中的空气会从微纳结构中被挤出，使得液滴渗入到大量的微纳结构中，进而发生从荷叶低黏附状态、到玫瑰花瓣高黏附状态的转变。

此时，液滴深入底部的大量微纳结构之间，固液接触面积急剧增大，当温度降到0℃以下时，超疏水表面具有快速结冰、冰牢牢黏附于表面不易除冰的反面功能，会进一步恶化结冰危害。因此要想实现超疏水表面的防

除冰功能，需要液滴在超疏水表面处于低黏附的Cassie状态，而不是高黏附的Wenzel状态。

不过，当温度不断降低时，超疏水表面上的液滴最终会不可避免地由Cassie状态转变为Wenzel状态。同时，由于这两种状态之间存在较大能垒，即使在升温过程中，液滴也无法

Cassie状态的转变，那么将有效避免超疏水表面在多次结冰融冰过程中性能的下降、不易除冰反面功能的出现以及冰积雪等问题，对于超疏水表面的航空防除冰应用将具有重大的价值。但迄今为止，这种超疏水表面结冰融冰过程中的Wenzel到Cassie状态的自发转变没有出现。



跨越这一能垒并恢复到初始的Cassie状态，而这会导致超疏水表面的失效。该问题也成为阻碍超疏水表面难以广泛应用于抗结冰目的的主要挑战之一。假设液滴在结冰-融冰循环过程中能自发实现从Wenzel状态到

此次工作的学术价值在于，在由超快激光制备的、特殊微纳结构的超疏水表面的结冰融冰循环中，钟敏霖团队首次观察到从Wenzel状态自发恢复到Cassie状态的现象。他的团队对这一现象进行了系统性分析和验证，阐明了发生转变的内部机理。

同时，他们提出了实现此类转变需要满足的三个表面设计准则，可用于指导超疏水抗结冰表面的设计和制备，在一定程度上解决超疏水表面在结冰-融冰循环后性能不断下降并因残留液滴而导致疏冰性失效这一难题，这对超疏水表面用于航空抗结冰具有重要的工程价值。

## 提出实现结冰-融冰循环中Cassie态良好恢复的三个表面设计准则

一些自然界的动植物有着特殊的微纳结构，从而具有神奇功能。典型的如荷叶的不沾水自清洁特性、水

稻叶的定向润湿特性、壁虎的高黏性攀爬能力、鲨鱼的减阻快速游动特性，以及蝴蝶翅膀五颜六色的结构色特性等。

这些微纳结构蕴含大量自然奥秘、基础原理和重大应用价值，是仿生学与纳米科技研究的融合与交叉，而如何制备这些微纳结构则是制造领域的主要挑战。

此前，钟敏霖团队曾提出超快激光制备微米纳米结构的一些新方法，制备出微米柱阵列叠加纳米波纹、纳米颗粒、纳米菜花、纳米绒毛、纳米绒、纳米线、纳米球等一系列精致的微纳结构，形成了强大的超快激光制备纳米和微米结构的能力。

也开展了超快激光制备微纳结构在超疏水、高抗反射、高敏感性、界面结合力调控以及生物医学检测等五大领域的应用研究，制备出了比荷叶性能更好的大面积金属超疏水表面和超疏油表面，实现了超高的超疏水Cassie状态稳定性以及超低的冰粘附力，并研发了图案化的超疏水-超亲水表面，实现大面积、高集中度、高效率冷凝集水等。

从钟敏霖在超疏水和超疏水抗结冰领域的系统研究和布局来看，本次研究是其中的重要一环。目前制约超疏水表面难以广泛应用于抗结冰领域的主要原因在于：在降温、压力等外界影响下，超疏水表面液滴会逐渐渗入到微纳结构中，导致液滴从低黏附的Cassie态转变为高黏附的Wenzel态，并且在融化过程中无法实现Cassie态的完全恢复，从而导致了超疏水表面疏冰性能的丧失。

该现象也让很多人对于超疏水表面是否真正能用于防除冰产生了怀疑，因此有必要开展系统的基础性研究。基于此，钟敏霖团队开展了系统实验。

一次偶然的实验中，他们惊奇地发现，相较已有文献中所报道的大多数超疏水表面，在激光制备的微米柱-纳米颗粒超疏水表面上，液滴在结冰-融冰循环后可以自发地、近乎完全地恢复到最初的Cassie态。融化时这种自发的Cassie态恢复是之前未曾发现过的，并且对于预防超疏水表面再结冰和冰积雪具有重大的价值。

为了弄清其出现机理，更好地设计超疏水抗结冰表面，团队对超疏水表面上的液滴结冰与融冰过程进行了深入的探究。

一种新现象只在非常特殊的条件下出现，唯有非常系统的实验才能观察到，已算不易，而要想很好地解释这一新现象并总结规律则挑战更大。为此，钟敏霖博士研究生王立众查阅

了大量资料，最终在一本流体力学的教材中发现，红酒摇晃时出现的“酒泪”现象与实验中观察到的现象有相似之处。

因此他以此为出发点，建立了大量的理论模型，并开展了数值模拟，最终很好地解释了实验中所观察到的现象，并总结了实验规律，提出了实现结冰-融冰循环中Cassie态良好恢复的三个表面设计准则，用于指导超疏水抗结冰表面的设计。

最后，他的团队进行了不同温度、湿度、液滴尺寸、外界压力等多种条件下的结冰融冰测试以及多次结冰的耐久性测试，所获得的结果进一步证实了所总结的规律，同时也证实了新现象的普适性以及用超快激光制备出的这种表面具有良好的结冰融冰耐久性。

## 未来有望用于飞机机翼的超疏水防除冰

近年来，钟敏霖团队在超快激光微纳制造领域承担过许多国家级项目，已发表100多篇论文、申请20余项发明专利、形成50多项专门技术，并在一些关键领域实现了应用，他们在超快激光制备微纳结构以及功能化方面，特别是超疏水表面以及超疏水抗结冰表面已经有长期的研究与积累。

实际上，钟敏霖团队此前研制的大面积超疏水表面已具备优良的耐久性和稳定性，与有关单位合作进行了多年的冰风洞试验，证明该团队的超疏水表面在主动抗结冰条件下能显著降低飞机抗结冰能耗，完全消除溢流冰危害，具有优异的抗结冰效果。

而本次现象的发现、机理的解释、三个设计准则的提出，是本领域研究的一个重要进展，可以有效地指导超疏水抗结冰表面的设计与制备，在一定程度上有助于解决超疏水表面在结冰-融冰循环后性能不断下降及因残留液滴而导致疏冰性失效这一难题。

钟敏霖表示：“我们期待，经过进一步系统研究和验证，我们用超快激光制备的大面积高性能超疏水表面最终能应用于各类飞机机翼以及无人机等航空抗结冰领域，以及低温环境下各类防除冰如冷凝器防除冰、风电叶片防除冰、输电线路防冰等多个领域。”

对于后续计划，他表示超疏水表面有广泛的应用潜力，主要制约因素为耐久性和稳定性。该团队用超快激光制备的超疏水表面，已基本克服了耐久性和稳定性难题。超疏水表面用于抗结冰则挑战更大，在航空领域有极为重要的研究价值和应用潜力。

(航柯)

# 美国开发基于生物识别和机器学习技术的飞行训练系统

石峰

美国南卫理公会大学(SMU)与模拟器制造/训练服务提供商CAE公司合作，拟开发一种生物识别与机器学习技术相结合的创新方法，用于未来智能化飞行训练。该系统能够监测飞行员生理反应，实时提供更客观、自动化的训练效果实时测定结果，使飞行训练可定制、更高效。

长期以来，飞行训练始终依赖教员的主观观察和飞行后的分析，以确定学员对某一动作的熟练程度和掌握情况。创新的生物统计学为监测飞行员高负荷工作时的反应提供了一个独特的视角。SMU和CAE公司联合团队拟通过智能化手段，优化飞行训练效果。SMU AT&T虚拟中心研究团队持续开展了四年项目研究，开发测试使用生物识别与机器学习技术，来实现对学员情景意识和认知负荷感知情况的认知，以准确测定学员在飞行模拟器中对各种场景的反应。项目早期目标旨在支持美国国防部自动测定任务关键高认知结构(如情景意识)的任务需求，以加快复杂技能训练过程，支持多域作战概念实现。2019年，SMU和CAE公司联合团队首次演示了基于生物识别数据的机器学习技术，实时准确测定人员状态(情景意识、心理变化、工作强度等)的项目成果。

机器学习技术是对能够通过经验和采集数据自动改进算法的研究，是人工智能技术的组成部分。联合团队实施的项目可测定人员的多种物理反

应，如视觉凝视状态、瞳孔大小、心率等，以确定飞行测试人员的参与度、工作量、情景意识、压力疲劳状态等。项目研究结果证实，早期的自动生物识别测试结果与经验丰富的评估员的评估结果非常一致。因此，SMU团队认为，模拟训练中的生物识别技术测定结果同样能够达到客观、准确评价的效果。

SMU团队遭遇的主要难题是：如何证实使用生物识别技术能够量化测定/感知用户在学习/掌握一种高难度技能过程中达到的各种程度。研发团队拟突破实现采用可定制、自动化的手段展示习得过程的方法，推动该研究领域的进步。

SMU团队在试验中采集生物识别

数据的过程是在一个混合现实模拟场景中进行的，使用了集成眼动跟踪器的虚拟现实(VR)头盔。

CAE公司在生物识别传感和机器学习方面具备丰富知识和经验。对于项目所需的在动态、高风险场景(如航空场景)中实现实时测定情景意识这一高阶认知架构目标来说，通过机器学习等新技术的应用，能够有效识别学员感知方面的波动，进而对不良状态采取干预措施。通过实时训练复杂性适应研究，系统能够确保学员获得最适应的训练强度，提升训练效果，更有效、迅速地达到任务准备状态。

目前，SMU和CAE联合团队实施的大部分数据采集工作均通过重复测定试验进行。试验由40名具有不同



背景和经验丰富的学员参与，在受控环境中操控混合虚拟现实飞行模拟系统。该模拟系统使用VR构建军用战



斗机作战场景，融合了可视化、平显和高精度手部追踪技术。数据采集设备包括一部带有集成眼动跟踪器的VR头盔和一个腕式设备。眼动跟踪系统采集眼球凝视、瞳孔反应和眨眼等数据。腕式设备采集心率、皮肤电反应、皮肤电活动(EDA)和手腕加速度等数据。这些生物识别数据通过计算机分析进行关联，以确定学员的认知负荷、精神状态(工作负荷)、刺激或压力水平等。

试验显示，生物识别数据能够反映受试人员的诸多信息，如飞行阶段眼球凝视不佳时，说明学员工作负荷较高；眼球凝视状态较好时，说明学员注意力表现较好；眨眼较少或眨眼时间较短时，说明学员在执行任务过程中注意力集中；心率变化说明学员在执行任务过程中的心理变化。除了研究单一的生物识别统计数据，联合团队还进行了数据比较分析，以确

定不同参数之间是否有更高的关联性。

联合团队的研究成果对于测定飞行员的工作量也具有重要意义。利用生物识别技术和机器学习算法，研究人员可确定学员工作负荷情况。研究团队创造了一种自动化手段，能够客观地评估学员表现和飞行动作所需的“轻松程度”，进而测定飞行员的工作量，以及是否有多余的能力来执行额外的任务。

除了在实验室环境中进行试验测试外，SMU和CAE公司联合团队还在爱德华兹空军基地开展了基于生理传感器系统的外场试验，客观评估了飞行员的工作量。外场试验测试采用波音C-17A飞机完成了两个飞行测试，包括空中加油机动和横向偏移着陆，总共记录了33个机动动作，测试结果良好。该探索性外场测试表明，在真实飞行场景中，系统能够采集到比模拟器环境更高的工作负荷相关数据。

试验证明，在飞行训练场景中使用生物识别和机器学习技术可能最终会改变飞行员的训练方式。学员生理反应的数据记录可能比人员主观评估更能可靠地反映训练实效。虽然SMU和CAE公司联合团队的研究成果只在军用飞机平台上进行了试验验证，但这一过程和相关技术在民用航空中可能也适用，如凝视模式的监测，可能有助于训练提升飞行员在主动飞行路径监控、飞行模式选定和飞行员监控职责发挥等方面效能。