航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jul. 25 2019 Vol. 30 No.07 1-7

飞机防冰表面材料研究进展

李小飞[1,*]，洪时泉[2]，周进[1]，张睿[1]，黄小彬[2]
1. 中国航空研究院，北京 100012
2. 上海交通大学 航空航天学院，上海 200240

摘　要：结冰不仅给人们的日常生活带来诸多不便，而且影响飞机的飞行安全，甚至引起重大的经济问题和人身威胁。虽然飞机的防/除冰研究已经进行了数十年，但仍然需要开发出对环境无害、经济且有效的防冰策略。防冰表面材料可通过延长结冰时间和降低冰的附着力减轻甚至消除冰的积聚，是目前飞机防/除冰领域学科发展的前沿方向，制备高性能防冰表面材料具有十分重要的意义。本文综述了当前防冰表面材料的研究现状，对超疏水材料以及润滑层材料等应用于防冰领域的优劣势进行分析，并分析与展望了防冰材料的发展方向。

关键词：防冰；表面材料；超疏水；润滑层

中图分类号：V255　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.07.001

结冰是造成飞行事故的重要原因，是影响飞机飞行的六大气象因素之一。飞机结冰会严重影响飞机的空气动力性能，导致飞机操稳品质下降，影响航空发动机安全性能和飞行安全。据统计，2009—2017年，结冰导致了全球8%的严重飞行事故，20%的普通事故，造成了巨大的损失[1~5]。其中严重溢流结冰对飞机安全性的威胁尤其严重。如1994年Roselawn空难和2002年澎湖空难中，过冷大水滴环境(SLD)使得开启防冰系统的飞机仍然因严重结冰而坠毁。试飞显示，飞机在飞行过程中，过冷水流动到防冰系统防护区域之后才冻结，使其难以正常除去。该现象至今仍未得到合理解释，仍然威胁着飞机飞行安全。在一系列灾难事故和大国间航空产业全球激烈竞争的双重挑战和驱动下，2014年美国新结冰适航条款FAR 25.1420及2015年欧洲EASA 25.1420条款都将过冷大水滴(SLD)环境加入传感器防冰的要求。我国自主研发的大型客机C919即面临该条款的审查。飞机防/除冰研究已成为制约我国航空工业发展的重要因素之一[6~8]。目前，研究人员已采用各种方法来实现防冰或除冰目标，主要分为两类：一类是主动防冰系统，包括仿生功能化抗结冰表面等，它不允许在飞机表面的某些部分上完全产生冰；另一类是被动除冰系统，主要包括热力除冰、机械除冰和化学除冰等，它允许积聚少量的冰，因此需要在冰形成之后去除[9]。总体来说，被动抗结冰方法比较常规，但其存在效率低、能耗以及维护成本高的缺点，机械除冰过程中还可能会对飞机表面造成结构破坏。因此，基于飞机特别是民用客机的高安全性和可靠性的要求，传统的被动防/除冰技术具有一定的局限性。所以，有必要开发新型的主动防冰技术，其中仿生功能化抗结冰表面的研究与防冰表面材料制备受到研究者的持续关注[10]。防冰表面材料能从结冰源头上解决问题，达到防止结冰的目的，显示出了良好的工程应用前景，具有十分重要的社会、经济和国防安全意义[11]。

1 防冰材料研究进展

国内外对于防冰表面的研究主要包括低表面能表面与液体润滑层表面等。其中，低表面能表面主要是指超疏水表面，其防冰原理是通过增加冰的成核能垒[10~13]，降低水滴在表面的滞留时间，从而减少水滴在表面的结冰等[14~17]。液体润滑层表面与具有压力亚稳态(气–液–固体系)的超疏水表面不同，这些液体注入式润滑层能够产生稳定的固定润滑剂层(润滑剂–液–固体系)，可有效消除液体与基质之间的界面，形成全能涂层。它的主要存在形式包括油性液体润滑表面和水性液体润滑表面[10]。油性液体润滑表面的设计思路是通过在多孔粗糙表面浸入油性溶液构成不相容的界面。在

收稿日期：2019-05-06；退修日期：2019-06-10；录用日期：2019-06-18
*通信作者. Tel.：010-84936533　　E-mail：lixiaofei@cae.ac.cn
引用格式：Li Xiaofei, Hong Shiquan, Zhou Jin, et al. Review of anti-icing surface materials[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(07): 1-7. 李小飞，洪时泉，周进，等. 飞机防冰表面材料研究进展[J]. 航空科学技术，2019，30(07)：1-7.

飞机飞行过程中，环境中冷凝水滴通过从表面自然滑落而减少冰的形成。水性液体润滑表面的设计原理是依靠最外层表面冰吸热融化形成水或者吸湿性高分子材料吸收空气中的水汽形成液体润滑层，从而在一定程度上防止冰的形成。由于液体润滑表面能够产生稳定的润滑剂–液–固体系，能够在一定程度上减少基材表面与冰的直接接触，从而减小冰与表面之间的黏附力，在施加外力或者表面存在一定角度的倾斜后，形成的冰会直接从表面上脱落[18~20]。本文主要对这两种防冰表面对应的超疏水防冰材料和润滑层防冰材料研究进展进行分析，提出防冰材料研究方向。

1.1 超疏水防冰材料

大自然中有许多动植物，如荷叶、稻草、水黾及蝴蝶等，都具有神奇的超疏水特性（见图1）。德国伯恩大学的Neinhuis与Barholtt通过研究微观下荷叶表面的结构[21]，发现微–纳米双重结构和低表面蜡状物质的协同作用使荷叶表面具有良好的自清洁性能。

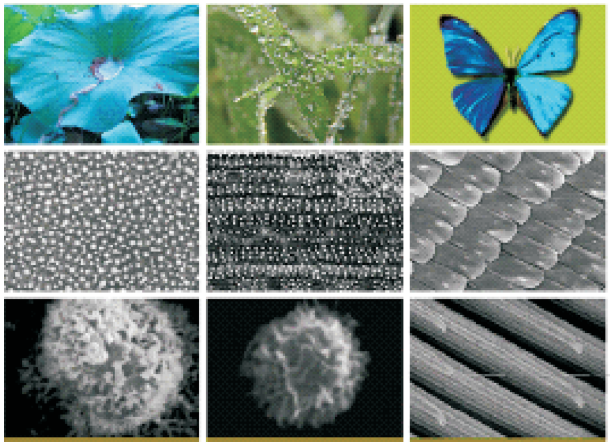


图1 自然界中的超疏表面以及其对应的微结构图片

Fig. 1 Superhydrophobic surface in nature and its corresponding microstructure picture

通过仿生的原理在粗糙结构表面上涂覆低表面能材料制备超疏水表面，其表面极难被水浸湿，即水滴的静态接触角>150°，滚动角<10°，超疏水表面因为表面的低表面能物质使水滴易于从超疏水表面滚落，并且由于其和水滴之间的接触面积极小，赋予了超疏水表面自清洁功能外，还可以应用在防霜以及防/除冰领域[22~26]。

超疏水表面的抗结冰性能与超疏水表面低温下的疏水性是相关的，超疏水表面的形貌结构与化学成分组成对表面防结冰性能都有很重要的影响[10]。通过选择合理的低表面能物质，例如，氟化合物里含有碳氟键，通过表面化学成分的调控提高材料表面的疏水以及疏冰性，减小超疏水表面的冰黏附力，同时有利于冷凝液滴在超疏水表面快速滚落或者冲击水滴在其表面的回弹，这为结冰问题提供了一个新的解决方案。

上海交通大学丁桂甫等利用相分离法制备了十八烷基三氯硅烷超疏水涂层(OTS SHS)（见图2(a)），通过防冰试验测试发现，涂覆OTS涂层可有效延缓结冰时间并降低冰黏附力[27]；Pradeep等用1H，1H，2H，2H-全氟辛基三乙氧基硅烷改性纤维素纳米纤维和高岭石制备水性超疏水材料（见图2(b)），表面经过化学改性处理后，表现出优异的疏水性和疏冰性，大大提高结冰延迟时间[28]。林童等使用基于氟化纳米颗粒，硅烷和表面活性剂的水性分散体制备超疏水涂料（见图2(c)），所制备的超疏水涂层接触角为165°，滚动角为4°，该表面具有较小的冰黏附强度。表面具有优异的机械性能和自修复性，提高了表面的防冰寿命[29]。

尽管超疏水表面确实可以延缓结冰时间，降低结冰量，减小冰附着力，但是超疏水材料的机械强度与使用寿命存在很大的问题，在经历多次的结冰—除冰试验之后，渗透到冰层中的微纳结构就会遭受破坏，不断循环导致材料表面失去超疏水的特性。而且，超疏水表面在低温高湿的环境下防冰性能较差，冰在粗糙表面的机械锚固作用使得冰在表面的附着力反而会增大。在结霜环境下，超疏水表面会很快失去其超疏水性能会变得很容易结冰[30]。超疏水表面在防/除冰领域仍然存在着很大的发展空间，通过设计制备机械强度好、使用寿命长的超疏水表面，将会为超疏水材料在防/除冰领域的工业化发展提供很大发展空间。

1.2 润滑层防冰材料

在自然界中，猪笼草的彩色唇叶表面能够储存水产生一层液体润滑膜，使停留在表面的动物滑进底部的消化系统。通过研究发现，彩色唇叶表面是由具有微观粗糙结构的亲水组分构成，进而受到这个现象的启发，如果能有效地隔离冰层和基底表面之间的相互作用，则对降低材料表面的冰黏附强度是非常有益的[11,31]。2011年，来自美国哈佛大学Wong课题组首次提出了一种基于猪笼草捕食效应的光滑液体灌注多孔表面（SLIPS），如图3所示，大大降低了冰在超润滑表面的黏附强度，引起了研究者的极大关注[32]。这种润滑层材料由多孔聚合物作为基底物质，通过毛细管作用力在聚合物微纳孔中吸附一定量的有机液体作为润滑层，结合了固体基质的机械稳定性和液体状特性以及润滑剂界面的分子平滑性。

Aizenberg等提出了构建SLIPS遵循三个原则：(1)润滑

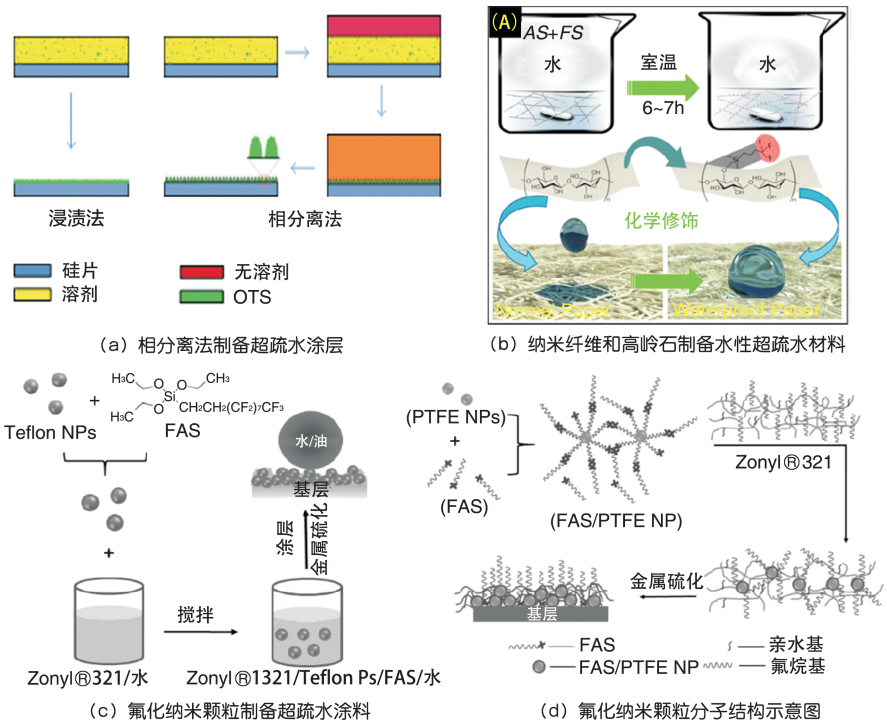


图2　超疏水防冰材料制备过程

Fig. 2　Preparation process of super-hydrophobic anti-icing material

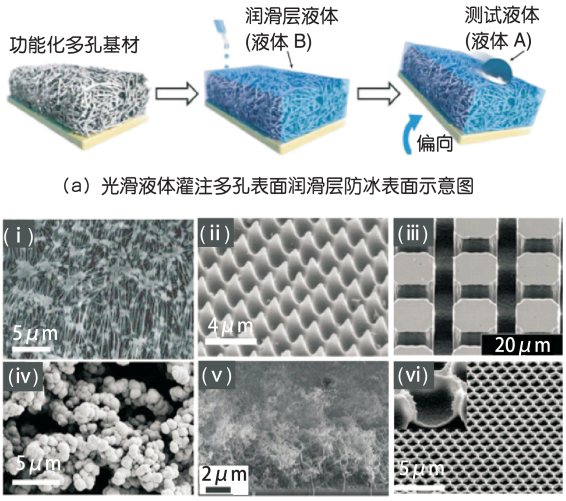


图3　润滑层防冰表面

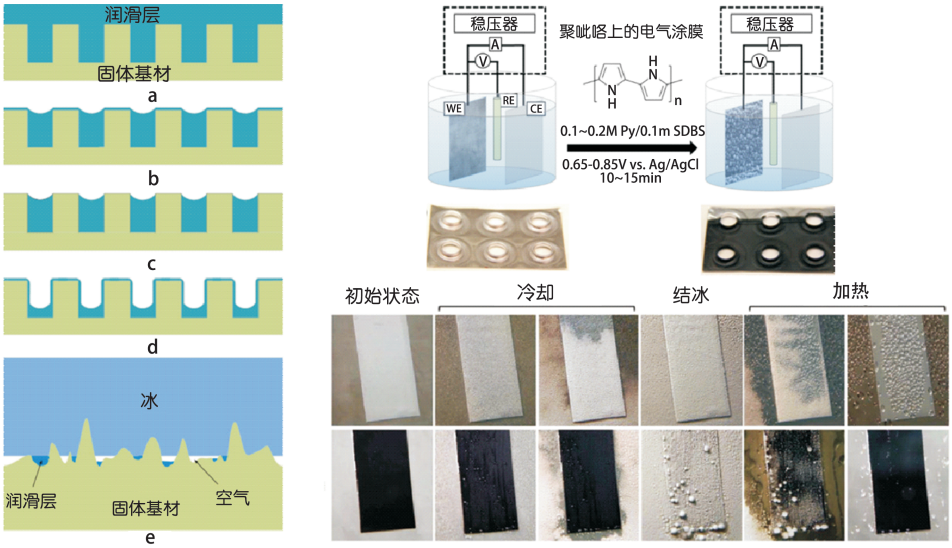
Fig. 3　Lubricating layer anti-icing surface

(i)多孔聚四氟乙烯；(ii)聚丙烯酸酯；(iii)硅纳米阵列；(iv)多孔聚(甲基丙烯酸丁酯-共聚-乙二醇二甲基丙烯酸酯)；(v)多孔硅氧烷纳米丝；(vi)反胶体单层

剂必须在结构中良好匹配并稳定黏附；(2)润滑剂和外部液体必须是不混溶的；(3)纳米复合粗糙结构构成的固体表面应优先被润滑剂而不是外部液体润湿。

清华大学杨颖课题组通过相分离与电喷射的方式，在具有分层微米结构的硅酮橡胶表面浸入液体润滑液，制备新型润滑层材料(见图4(a))，通过试验发现润滑液可以在毛细管作用力下覆盖整个表面的微纳米孔结构，以减少不均匀的冰成核和霜冻传播速度，具有良好的防冰特性[33]。Kim等研究了在工业级铝形成的SLIPS上霜和冰的形成(见图4(b))。由于SLIPS上的水成核减少和从其表面除去水，因此即使在2℃/min的高冷却速率下也未观察到结霜。同时，试验结果还表明带SLIPS涂层铝的冰黏合强度远低于未处理铝，使得冰的去除更容易[34]。zhu等通过将硅油掺入PDMS固化混合物中制备PDMS基液体润滑层[35]。该润滑层上的冰黏附拉伸强度可以降低至<100kPa，这是一个临界值，低于该临界值，冰的去除被认为是容易的。

中科院化学所王健君团队从分子层面对材料表面冰晶的形成过程展开了系统探究，通过试验结合理论模拟研究了冰晶成核、传递等环节的分子机制，开发了具有调控冰成核、抑制冰传递、降低冰黏附等不同功能的防冰高分子材料[11,36](见图5)。采用层层组装(LBL)的方式设计制备聚电解质刷表面(PEM)，通过改变聚电解质的种类，研究了离子对材料表面的过冷水成核和冰形成的影响，试验发现了离子特异性对过冷



（a）新型润滑层材料防冰过程示意图 （b）润滑层材料制备过程以及铝片与润滑层防冰性能对比

图4 润滑层制备示意图

Fig. 4 The preparation diagram of lubricating layer

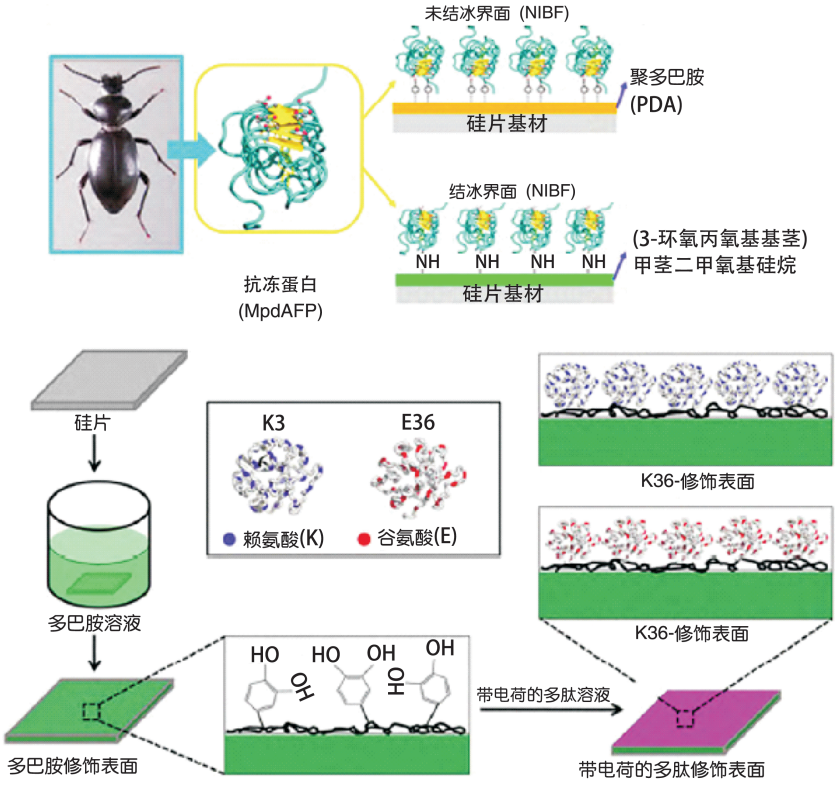


图5 防冰高分子材料

Fig.5 Anti-icing polymer material

水成核和结冰的影响。即材料表面上冰核的形成，必须有水分子向水簇表面扩散使其生长到临界尺度。该发现为过冷水中离子参与的成核和成冰行为提供了指导，为低冰黏附防冰表面材料的发展提供了新的方向[37~39]。

基于液体润滑层与冰层形成的固–液界面可以大大降低冰的黏附强度，同时润滑剂注入的表面对各种高表面和

低表面张力液体或复杂的液体混合物均具有优异的排斥性，表现出高稳定性、自修复性和良好的光学透明性。然而，在外部环境中，润滑液会在温度、重力等作用下逐渐挥发流失，使超润滑表面失去防冰性能，也会在多次除冰循环中随冰层的脱落而产生损耗，超润滑表面的稳定性仍是亟须解决的问题，因此如何保持超润滑表面的长效稳定依旧是一个新的机遇与挑战 [11,40]。

2 防冰表面材料发展趋势

如前所述，以超斥水为主要特征的防冰表面已被深入研究。现在研究尺度已由微米扩展到微米到纳米的多个尺度，显著提高了防冰表面的抗成核性能及稳定性，但工艺复杂性和结构脆弱性是其在航空领域应用的最大障碍。虽然润滑层有着不错的防冰效果和一定的自修复能力，但是这类材料表面的有机液体润滑层稳定性较差。在材料表面形成冰霜之后，润滑油会在毛细管力、重力和温度的作用下逐渐流失，从而失去防冰性能。因此，研究开发具有稳定性的、低冰黏附强度的防除冰材料，是飞机防冰表面材料未来的发展趋势。

在防冰表面材料的性能评价方面，现有研究多从静止状态下过冷水成核率及附着力降低角度评价其防冰性能，但实际上过冷水滴的撞击动力学与结冰相变过程高度耦合，材料特性对于过冷水壁面结冰及撞击结冰耦合的综合影响有待认知。同时，考虑到航空领域防冰材料的使用环境，其抗冲击、变形的能力对其耐久性有直接影响。这些都直接影响到防冰材料的设计。考虑当前研究进展，为了能有效地评估飞机表面材料防冰效能，应针对防冰材料性质综合影响过冷水滴结冰和耐久性的问题开展研究，掌握其规律和机理，为防冰表面材料设计提供依据。

3 结束语

综上所述，尽管防冰表面材料的研究已经取得了较好的进展，在飞机防/除冰技术方面有非常广泛的发展空间与应用前景。然而，由于目前的技术限制和成本问题，各种新型防冰表面的开发和制备大多处于实验室研究阶段，在实际应用中，仍然存在一定的问题，防冰的稳定性仍然需要进一步验证。今后的发展关键是需要深入研究超疏水表面和超润滑表面的防冰机理，从分子层面揭示冰晶的形成机制。通过技术创新与理论指导，探索工艺简单、成本低廉、稳定耐用，可大规模生产的防冰材料制备方法，实现新型防冰材料在航空航天工程的应用。另外，飞机复杂多变的飞行环境，为防冰材料的研发带来了挑战的同时也提供了发展方向，如朝着长效稳定、损伤自修复、绿色环保、智能感应等方向不断拓展。 AST

参考文献

[1] Gent R W, Dart N P, Cansdale J T. Aircraft icing. philosophical transactions of the royal society A: Mathematical[J]. Physical and Engineering Sciences, 2000(358):2873-2911.

[2] Mosher F R, Schaum D, Herbster C, et al. In analysis of causes of icing conditions which contributed to the crash of contentental flight 3407[C]//. 14th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2010:1-5

[3] Andrey J, Olley R. The relationship between weather and road safety: past and future research directions[J]. Climatological Bulletin, 1990, 24(3): 123-127.

[4] Andersson A K, Chapman L. The impact of climate change on winter road maintenance and traffic accidents in West Midlands, UK[J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43 (1): 284-289.

[5] Pike W S. Extreme warm frontal icing on 25 February 1994 causes an aircraft accident near Uttoxeter[J]. Meteorological Applications, 1995, 2(3): 273-279.

[6] Saeed F, Al-Garni A Z. Analysis method for inertial particle separator[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1150-1158.

[7] Kennedy K, Barriault M. Treatment kinetics of aircraft deicing fluid in an anaerobic baffled reactor[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, 6(1): 11-17.

[8] Hasanzadeh K, Laurendeau E, Paraschivoiu I. Quasi-steady convergence of multistep Navier-Stokes icing simulations[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(4): 1261-1274.

[9] Sunden B, Wu Z. On icing and icing mitigation of wind turbine blades in cold climate[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137 (5): 51203.

[10] 刘发堂. 具有抗结冰功能的超疏水表面的制备及其性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
Liu Fatang. Preparation and study of superhydrophobic materials with anti-icing ability[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology，2017. (in Chinese)

[11] 吕健勇，王健君. 防冰涂料研究进展[J]. 涂料技术与文摘，2014, 35(8):37-41.
Lv Jianyong, Wang Jianjun. Progress in anti-icing coatings[J].

Coatings Technology & Abstracts, 2014, 35(8): 37-41. (in Chinese)

[12] Kim M, Kim H, Lee K, et al. Frosting characteristics on hydrophobic and superhydrophobic surfaces: A review[J]. Energy Conversion and Management , 2017 , 138 : 1-11.

[13] Alizadeh A, Yamada M, Li R, et al. Dynamics of ice nucleation on water repellent surfaces[J]. Langmuir, 2012, 28 (6): 3180-3186.

[14] Tourkine P, Le Merrer M, Quéré D. Delayed freezing on water repellent materials[J]. Langmuir, 2009, 25(13): 7214-7216.

[15] Guo P, Zheng Y, Wen M, et al. Icephobic/anti-icing properties of micro/nanostructured surfaces[J]. Advanced Materials, 2012, 24(19): 2642-2648.

[16] He M, Wang J, Li H, et al. Super-hydrophobic surfaces to condensed micro-droplets at temperatures below the freezing point retard ice/frost formation[J]. Soft Matter, 2011, 7(8): 3993-4000.

[17] Boinovich L B, Emelyanenko A M. Anti-icing potential of superhydrophobic coatings[J]. Mendeleev Communications, 2013, 1(23): 3-10.

[18] Ma W, Higaki Y, Otsuka H, et al. Perfluoropolyether-infused nano-texture: a versatile approach to omniphobic coatings with low hysteresis and high transparency[J]. Chemical Communications, 2013, 49(6): 597-599.

[19] Men X, Shi X, Ge B, et al. Novel transparent, liquid-repellent smooth surfaces with mechanical durability[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 296: 458-465.

[20] Zhang J, Wang A, Seeger S. Nepenthes pitcher inspired anti-wetting silicone nanofilaments coatings: preparation, unique anti-wetting and self-cleaning behaviors[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(8): 1074-1080.

[21] Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. Annals of Botany, 1997, 79: 667-677.

[22] Ondat, Shibuichi S, Satoh N, et al. Super water repellent fractal surfaces[J]. Langmuir, 1996, 12(9): 2125-2127.

[23] 杨钦.工程实用性超疏水自清洁涂层防结冰行为及机理研究[D]. 重庆：中国科学院重庆绿色智能技术研究院，2017 .
Yang Qin. Anti-icing behaviors and mechanism of engineering superhydrophobic self-cleaning coatings[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green Intelligent Technology ,Chinese Academy of Sciences, 2017 . (in Chinese)

[24] 郭志光，刘维民．仿生超疏水表面的研究进展[J]. 化学进展，2006，18(6) : 721-726．
Guo Zhiguang, Liu Wenmin. Progress in biomimicing of superhydrophobic surface[J].Progress in Chemistry，2006，18(6) : 721-726．(in Chinese)

[25] Blossey R．Self-cleaning surfaces-virtual realities[J]．Nature Materials，2003(2) 301-306．

[26] 李艳春.适于飞机防/除冰的超疏水微结构的制备与研究[D]. 上海:上海交通大学，2013.
Li Yanchun. Research in preparing superhydrophobic microstructure for aircraft prevent/de-icing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2013. (in Chinese)

[27] Ge L, Ding G, Wang H, et al. Anti-icing property of superhy drophobic octadecyltrichlorosilane film and its ice adhesion strength[J]. Journal of Nanomaterials, 2013(10):1-5.

[28] Baidya A, Ganayee M A, Ravindran S J, et al. Organic solvent-free fabrication of durable and multifunctional superhydrophobic paper from waterborne fluorinated cellulose nanofiber building blocks[J]. ACS Nano, 2017(11): 11091−11099.

[29] Zhou H, Wang H, Niu H, et al. A waterborne coating system for preparing robust, self-healing, superamphiphobic surfaces [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(14): 1604261.

[30] Zhang K, Li X, Zhao Y, et al. UV-curable POSS-fluorinated methacrylate diblock copolymers for ice phobic coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 93: 87-96.

[31] 韦存茜.氟硅超浸润表面的构建及其在防污/防覆冰领域中的应用[D]. 杭州：浙江大学，2017
Wei Cunqian. Fabrication of fluorosilicone superwetting surfaces and application in anti-fouling and anti-icing coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)

[32] Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity [J]. Nature, 2011, 477: 443-447.

[33] Liu Q, Yang Y, Huang M, et al. Durability of a lubricant-infused electrospray silicon rubber surface as an anti-icing coating[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 68-76.

[34] Kim P, Wong T S, Alvarenga J, et al. Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost

performance[J]. ACS Nano, 2012, 6(8): 6569-6577.

[35] Zhu L, Xue J, Wang Y, et al. Ice-phobic coatings based on silicon-oil-infused polydimethylsiloxane[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(10): 4053-4062.

[36] Wang Y, Yao X, Wu S, et al. Bioinspired solid organogel materials with a regenerable sacrificial alkane surface layer[J]. Advanced Materials, 2017, 29(26): 1700865.

[37] Jin Y, He Z, Guo Q, et al. Control of ice propagation by using polyelectrolyte multilayer coatings[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2017, 56(38): 11436-11439.

[38] Meister K, Ebbinghaus S, Xu Y, et al. Long-range protein water dynamics in hyperactive insect antifreeze proteins[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110 (5): 1617-1622.

[39] Liu K, Wang C, Ma J, et al. Janus effect of antifreeze proteins on ice nucleation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(51): 14739-14744.

[40] Irajizad P, Hasnain M, Farokhnia N, et al. Magnetic slippery extreme icephobic surfaces[J]. Nature Communications, 2016, (7) 13395.

（责任编辑 王昕）

作者简介

李小飞(1980—)男，硕士，高级工程师。主要研究方向：航空防冰表面材料。

Tel: 010-84936533

E-mail:lixiaofei@cae.ac.cn

洪时泉(1994—)男，硕士。主要研究方向：超疏水/润滑层防冰材料。

Tel: 021-54747142

E-mail: shiquanhong@sjtu.edu.cn

Review of Anti-icing Surface Materials

Li Xiaofei[1,*], Hong Shiquan[2], Zhou jin[1], Zhang Rui[1], Huang Xiaobin[2]

1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Icing will not only bring inconvenience to people's daily life, but also affect the flight safety of aircraft, and even cause major economic problems and personal threats. Although aircraft anti-icing research has been going on for decades, there is still a need to develop an environmentally friendly, economical and effective anti-icing strategy. Anti-icing surface materials can reduce or even eliminate the accumulation of ice by prolonging the freezing time and reducing the adhesion of ice. It is the frontier direction of the development of this field. It is of great significance to prepare high-performance anti-icing surface materials. This paper reviews the current research status of anti-icing surface materials, analyzes the advantages and disadvantages of super-hydrophobic materials and lubricating layer materials used in anti-icing field, and prospects the development direction of anti-icing materials.

Key Words: anti-icing; surface materials; super-hydrophobic; lubricating layer

Received: 2019-05-06； **Revised:** 2019-06-10； **Accepted:** 2019-06-18

***Corresponding author.Tel. :** 010-84936533 **E-mail:** lixiaofei@cae.ac.cn