

【特邀稿】

高速列车转向架防冰雪设计研究进展

郑强¹, 丁昊昊², 贺家豪¹, 王文健^{1,2}, 郭俊², 刘启跃²

(1.西南交通大学 唐山研究生院, 河北 唐山 063000;

2.西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘 要: 随着中国高寒地区铁路运输的发展, 高速列车在高寒、风雪、霜冻等恶劣环境中运行面临严峻的考验, 不仅会增加铁路系统的运营成本, 还直接影响到列车运行的安全性和稳定性。列车底部处于无封闭状态, 而且裸露在外的转向架结构又极其复杂, 造成在高寒地区运行的列车存在转向架结冰积雪等新问题, 目前尚无高效的解决方案。先对列车转向架区域结冰积雪状态、规律及形成机理进行了总结, 提出影响结冰积雪状态的主要因素, 包括雪粒在气流中的运动情况、转向架底部流场情况和转向架底部压差。详细阐述了国内外列车防冰雪及解决转向架积雪结冰问题在近年来的研究进展。随着新材料研发和表面技术水平的提高, 具有抗覆冰效果的超疏水表面功能涂层成为一种切实有效的措施。结合已有的金属基体表面降低冰雪附着强度和延缓结冰时间的研究成果, 整理出构造微/纳米粗糙结构及降低材料低表面能的具体方法, 探讨了超疏水材料在防冰雪方面的应用, 并以此基础提出了转向架防冰雪设计的研究方向。

关键词: 转向架; 高寒地区; 防冰雪; 流场结构; 超疏水; 低表面能; 微/纳米结构

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0064-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.010

Research Progress of Ice/Snow-Proof Design for High-speed Train Bogie

ZHENG Qiang¹, DING Hao-hao², HE Jia-hao¹, WANG Wen-jian^{1,2}, GUO Jun², LIU Qi-yue²

(1.Tangshan Graduate School, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China;

2.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: With the development of railway transportation in China's cold regions, high-speed trains face harsh climates such as cold, snowstorm and frost in winter, which will not only increase the operating cost of the railway system, but also directly affect the safety and stability of running train. There is no closed equipment at the bottom of the train, and the exposed bogie structure is extremely complicated. New issues such as ice and snow on bogies often appear when the train is running in cold regions, but there are no efficient measures to solve the problem. The conditions, laws and formation mechanism of ice and

收稿日期: 2020-03-19; 修订日期: 2020-06-05

Received: 2020-03-19; Revised: 2020-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51975489); 中国博士后科学基金面上项目(2019M663548); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682020CX29)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975489), Postdoctoral Science Foundation General Project of China (2019M663548), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682020CX29)

作者简介: 郑强(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究转向架防冰雪涂层设计。

Biography: ZHENG Qiang (1996—), Male, Master, Research focus: design of anti-ice/snow coating for bogie.

通讯作者: 王文健(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为轮轨系统服役行为。邮箱: wwj527@163.com

Corresponding author: WANG Wen-jian(1980—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: wheel-rail system service performance. E-mail: wwj527@163.com

引文格式: 郑强, 丁昊昊, 贺家豪, 等. 高速列车转向架防冰雪设计研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 64-74.

ZHENG Qiang, DING Hao-hao, HE Jia-hao, et al. Research progress of ice/snow-proof design for high-speed train bogie[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 64-74.

snow on high-speed train bogies were summarized, and the main factors affecting the conditions of ice and snow were put forward, including the motion circumstances of snow grains in the aura field, the flow field at the bottom of the bogie and the pressure difference at the bottom of the bogie. The recent research progress of domestic and abroad solutions to trains and bogies were also summarized in view of ice and snow problems. With the development of new materials and the improvement of surface technology, super-hydrophobic surface functional coatings with anti-icing and snow effect have become a practical and effective measure. Based on the existing research achievements of reducing the adhesion strength of ice and snow and delaying the freezing time on the metal substrate surface, the specific methods of manufacturing micro-nanostructure and reducing the low surface energy of materials have been sorted out. By discussing the application of super-hydrophobic materials in anti-icing and snow, the direction of anti-icing and snow design of bogies has been put forward.

KEY WORDS: bogie; cold regions; anti-ice/snow; flow structure; super-hydrophobic; low surface energy; micro-nanostructure

目前中国高速列车技术日益成熟,高安全性、高可靠性、高稳定性的形象早已众人皆知,成为中国的新名片。在高寒地区,中国的列车运行同样有条不紊。2012 年 12 月 1 日,世界上首条穿越高寒季节性冻土地地区的高速铁路——哈大铁路通车,纵贯东北三省,截至 2019 年 12 月 4 日,哈大高速铁路累计安全稳定运行 4320 万走行公里。此外,作为“八横八纵”高速铁路网最北“一横”的骨架——世界最长的高寒地区哈佳铁路在 2018 年 9 月开通,将两地旅行时间缩短了 3 小时 40 分,极大地便利了两地之间的经济合作与文化交流。面对高寒地区的高速列车面临低温、风雪、霜冻等恶劣天气的考验,我国已经积累了丰富的相关技术和运营经验,列车运行状况基本平稳,这为我国高寒地区及沿线市区经济发展做出突出贡献。但列车在高寒地区运行时不可避免地会遭受强对流天气的袭击,列车服役温度经常低至零下四十度,使转向架区域的结冰积雪现象极为频繁,暴露在列车底部的转向架区域结构相当复杂,在高速运行时会出现许多新的问题。L. KLOOW^[1]系统研究了北欧及日本铁道车辆冬季问题,现场调研结果显示:日本上越新干线高崎以北的山区间和瑞士阿尔卑斯山地区登山铁道的列车投入使用以来,相继经历过制动闸瓦片、牵引电机、齿轮箱积雪结冰等影响转向架正常使用的问题,在山区或隧道口尤为严重。虽然国内外开展的相关研究很多^[2-4],但目前尚无根本的解决措施。

列车转向架是保障铁路车辆运行平稳性和乘坐舒适性的重要部件,具有增加车辆载重、减少车体垂

直位移、改变列车运行方向等作用,满足铁路运输快速发展的需要。因此,对转向架区域进行系统的防冰雪设计,保障列车在高寒气候条件下仍能安全运行具有重要意义。本文归纳总结了列车转向架区域结冰积雪状况和规律、影响因素及形成机理,综述了国内外解决转向架结冰积雪问题在近年来的研究进展。此外,还探讨了通过制备超疏水防冰雪涂层来融冰除雪的研究方向。

1 高速列车转向架结冰积雪现象及成因分析

1.1 转向架区域结冰积雪状况与规律

为了减小高速行驶时的气动阻力及降低噪音,高速列车采用的是流线型结构设计,但转向架内部结构大都与外界环境直接相通^[5]。当列车长时间在大风降雪环境中高速运行时,由于气流运动、局部压差等原因,周围空气中的雪粒子不可避免地会进入转向架区域。图 1 给出了三种常见的转向架区域积雪结冰状态。根据高寒铁路段冬季运行过程中的实际情况,又可将转向架区域结冰积雪状况细分为五类,表 1 给出了 5 种状态冰层的厚度及特点。其中,牵引电机等产热部件主要是以局部少量冰雪状态为主,而产热部件附近部分会由于雪水融化后遇冷重新冻结,主要是以冰为主,冰层厚度普遍较厚;形成漩涡处构架及其他雪花停留部分主要为较厚的雪层覆盖状态。

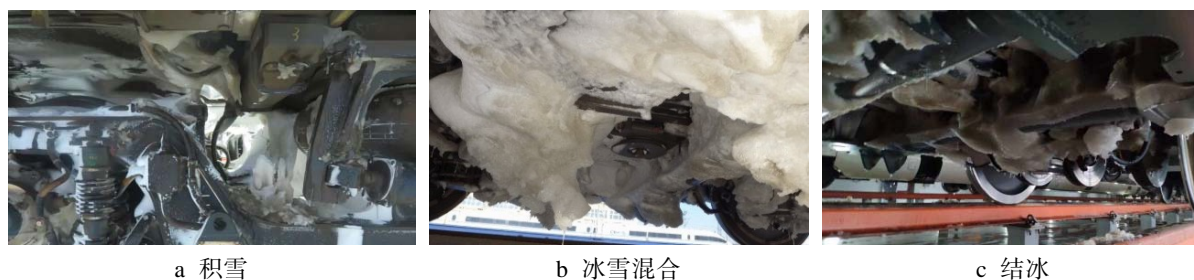


图 1 常见的转向架区域结冰积雪状态

Fig.1 Common freezing and snowing conditions in the bogie area: a) snowing; b) ice and snow mixed; c) icing

表 1 高速列车转向架区域积雪结冰状态分类^[4]

Tab.1 Classification of Snow and ice on bogie area of high-speed rail^[4]

Snow and ice state on bogie area of high-speed train	Characteristic	Ice thickness/mm
Class I	Ice	≥200
Class II	Mainly ice, a little snow	50~200
Class III	Mixed state of ice and snow	<50
Class IV	Mainly snow, a little ice	<50
Class V	A little bit of ice and snow locally	<50

1.2 影响转向架区域结冰积雪状态的因素

1.2.1 雪粒子在气场中的运动情况

转向架区域结冰积雪是雪粒子进入列车底部,并在转向架区域聚积、融化、再冻结的过程。但雪粒子大小不一,形态各异,据统计,雪花的式样有一万多种,主要是由级状、星状、柱状和针状四种基本形状组成^[6]。这些基本形状的雪花,互相组成了不同的花纹,甚至很复杂的雪花,高空中水蒸气的分布及温湿度的高低变化都会干扰雪花状态。影响雪粒子在气场中运动的参数因素包括粒子直径、摩擦速度、粒子密度等,随着下落过程中粒子直径、雪粒密度或者摩擦速度的不断变化,粒子的运动情况也随之变复杂,因此真实地模拟其运动轨迹比较困难^[7-8]。从力学角度分析,由于雪粒受浮力、气动阻力及自身重力等多力作用^[9],在下降过程中各种力共同作用,造成接触粘附并形成直径较大的颗粒,当降至列车底部区域时,雪粒会受到较大的气动力,在气流扰动的影响下产生较强的附着性,随气流流向转向架区域并逐渐形成堆积。

1.2.2 转向架底部流场情况

空间流线分布可以直观显示列车转向架区域气流的流向、流速及产生的漩涡状况^[9,11]。通过观察分析转向架底部流场分布,对提出可能结冰积雪的部位及转向架结冰积雪状态分布的研究具有十分重要的意义。以某型高寒列车三节车编组模型为例,整车分为头车、中间车和尾车,每节车上均安装有两个转向架,中间车上安装的是动车转向架,而头、尾车安装的是拖车转向架。从表 2 给出的描述可以看出,由于两者结构有明显差异,导致流场结构也有很大不同。从零件外形的角度来看,安装在动车转向架上的部件整体性更高,而拖车转向架内部有很多小的零部件及复杂结构,因此拖车转向架区域的流场结构的复杂程度比动车转向架区域要高得多,涡旋结构更多,流线方向变化更大^[10]。此外,由于重力的影响,在低速流场区域堆积雪粒的概率要比高速区高。因此,当雪粒在进入列车转向架附近低速流场后,发生堆积的现象更为常见。

中间车两个动车转向架区域虽然几何外形相似,但流场结构也有很大区别,如表 3 所示。同一转向架,中间车一位端要比二位端的阻力大得多,流场结构也更加复杂,流线形状更加多变。相比而言,中间车二位端受气动阻力的影响小,流场结构较简单,流线走向更加明确,产生的漩涡结构较小^[11]。

1.2.3 转向架底部压差

列车运行过程中遇到大风降雪天气时,会在头车一位端转向架产生较大的正压区,主要是气流直接上扬作用在运行方向前端转向架所致,此时雪粒子随气流快速运动不易粘附在转向架上。但经过正压区的气流不会停止流动,而是有一部分夹杂着雪粒子越过转向架前轴继续向转向架内部区域移动。转向架内部复

表 2 动车与拖车流场结构及流线方向比较

Tab.2 Comparison of flow field structure and streamline direction between power train and trailer

Locomotive type	Geometric shape	Flow field structure	Streamline direction
Trail train	Small and complex structure	More complex vortex structure and more small vortices, large airflow disturbance and the air flow speed of oblique inlet is higher than that of right angle	The streamline of oblique inlet is more complex than that of right angle inlet
Power train	Regular parts and strong integrity	Less vortex structure and more simple	More clear streamline direction

表 3 中间车(动车)一位端与二位端流场结构及流线方向比较

Tab.3 Comparison of flow field structure and streamline direction between middle train (power car) 'A' end of train and 'B' end of train

Locomotive type and location	Geometric shape	Flow field structure	Streamline shape
"B" end of Intermediate train	Regular parts and strong integrity	More complex vortex structure	Changeable shape of the joint between sleeper beam and bottom plate
"A" end of Intermediate train		Less vortex structure and more simple	More clear streamline shape than that of "B" end of Intermediate train

杂的结构会阻碍气流运动, 存在的极值较大, 低压区会限制气流运动速率, 从而增加雪粒子的粘附。中间车转向架附近由于气流扬起作用产生的影响不太明显, 存在的低压区差值相对均匀^[1,12]。因此, 在列车高速运行过程中, 受风雪两相的影响, 转向架底部气流的运动速率差别很大, 各区域存在较大的压力差, 低压区比高压区的积雪堆积总量占比更大, 严重的堆积现象影响转向架的正常使用, 使列车行车存在安全隐患。

1.3 转向架区域结冰积雪形成机理

高速列车在冬季降雪天气运行时产生的列车风和尾流, 会使转向架区域形成复杂的气流运动, 能将轨道上的积雪及周围雪粒卷入转向架内部, 随气流运动的雪粒会在内部低压区聚集、粘附, 进而形成堆积。在高速列车运行过程中转向架上的产热部件产生热量时, 会把堆积在这一区域的雪粒融化成雪水。雪水受重力作用就会顺着部件表面往下流动, 当流动到脱离热源的水雪碰到车底的冷气流时, 受附近的冷气流影响雪水又会被冻结成冰, 使转向架区域的结冰积雪随列车运行时间的增长越积越多, 最终导致列车启动瞬时力矩过大、平稳性降低、制动部件失效等, 恶化车辆动力学性能, 致使运行出现故障, 可能导致事故发生^[5,20]。同时, 对列车的设备维护及检修作业也造成很大挑战。

2 国内外转向架区域除冰雪方法及研究发展现状

2.1 传统方式

传统对转向架表面除冰融雪的方法有机械除冰法、化学除冰法和加热除冰法^[13-14]。机械法是通过机械器件直接除冰, 按作用方式分为振动式、击打式、铲刮式、水射式等类型。化学除冰法是将化学药剂喷洒在铁道车辆转向架表面, 利用除冰剂的化学成分使冰雪融化进行除冰。加热除冰法是最常用的一种方法, 它包括热风除冰法、热水除冰法、红外线加热除冰法和电磁加热除冰法。这些方式虽然行之有效, 但普遍存在着效率低下、污染环境、效果不佳等诸多缺陷, 并不是解决转向架除冰融雪问题的高效措施。

2.2 国外防冰雪技术应用

北欧、环北太平洋等地处高寒地区的国家铁路运输行业, 一直遭受着冬季转向架结冰积雪的难题, 各国的研究学者们在如何有效防止结冰积雪和快速融冰除雪等方面做了很多的科研工作, 开发了一些防冰雪和除冰雪的方法, 并配备了相应的设备设施, 来克服冬季高寒地区恶劣天气对铁路运输业的障碍。

为了缓解冬季高频极端天气对高速列车带来的

难题, 俄罗斯铁路部门采取了轨道除雪、预防积雪和车辆入库除雪等多种方法综合治理的方式^[4]。日本作为冬季多雪的国家, 处于频繁降雪区的新干线在应对许多次大的冰雪灾害中, 采取了各种措施来预防列车和隧道轨道积雪, 主要是对铁路车辆转向架进行抗高寒抗冰雪改造、轨道和隧道进行除雪、隧道内部预防冰溜等^[15]。而对于列车转向架区域的抗寒抗冰雪改造, 主要是将悬挂在车底的零件用钢板加以覆盖, 保证车底的大部分关键部件不受冰雪的影响而导致机械性能下降。此外, 还对一些电气设备和发热部件进行了防水处理, 从源头上解决水滴遇冷重新结冰造成设备故障。对于铁道线路和隧道的融雪除冰问题, 设置了流雪沟自然导出融化雪水, 并利用除雪车、热水喷淋装置、热力式融冰设备等各种现代化的除雪设施及时清理线路, 用以满足列车正常运行需要。

芬兰的赫尔辛基在转向架和底架区域使用金属多孔管的装置, 如图 2 所示, 这些多孔管与热水管相连, 为列车转向架区域提供融冰水, 每个转向架通常需要使用两个管路进行喷洒。此套装置一般需要 30 min 来设置系统, 并且需要两名工作人员同时进行操作。图 3 为位于瑞典北部地区的苏瓦帕瓦拉市建立的热风融冰房, 入口和出口均设有阀门, 利用点燃的液化丙烷气体进行加热, 一般这种液化石油气都是利用油罐车进行储存。加热以后管道的热空气融除列车正中央的冰雪, 而管道两边稍向后弯曲的地方则喷射



图 2 赫尔辛基除冰控制系统^[16]
Fig.2 Helsinki deicing control system^[16]

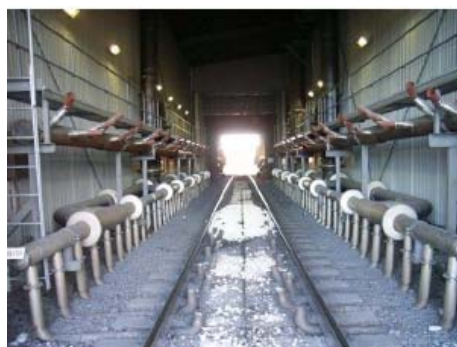


图 3 苏瓦帕瓦拉热风融冰房^[16]
Fig.3 Suva Pavara hot wind melting room^[16]

热空气来加热车体的前面和侧面。融化的冰雪通过轨道时被储存箱收集,而多余的热量则被天花板和回收装置回收到加热系统中。在融冰过程中,热风的温度为 200 ℃ 左右,热管风速为 30 m/s,燃烧器功率为 1.8 MW^[16]。

2.3 国内除冰雪技术发展

中国北方冬季一些地区列车服役环境恶劣的实际情况,对高速列车转向架的服役性能提出了新的考验。为此,铁路总公司组织成立了由多个科研院所、专业公司、机车车辆厂、铁路设计院组成的技术攻关团队,针对高速列车转向架结冰积雪问题,对高寒铁路及高寒列车转向架进行了防冰雪设计研究,成功研制了一批防结冰作业方式及高效融冰除雪装置,满足高速列车的使用需求,有效保证高寒地区在冬季正常通车^[17]。

转向架特殊零部件的防冰雪措施对于列车安全运行至关重要。徐芳等^[18]设计出两种利用热缩橡胶性能安装的弹簧防冰雪装置,安装简便,无需复杂的连接结构,经过冬季的考验证明可以有效防止转向架内部积雪堆积问题,保证车辆运行安全及稳定。辛志强等^[19]提出了基础制动防冰雪吹风系统方案,通过型式试验和环境模拟试验表明,能够切实有效地改善高寒地区高速列车运行过程中制动装置的异常甚至失效的情况,解决制动盘异常损耗的问题。李俊民等^[20]针对降雪天气列车转向架车下设备舱导流罩处的覆冰现象,给某车型的导流罩结构进行设计改进,改善

导流罩区域的流场状况,有效减小该区域进风量。对转向架特殊零部件的防冰雪设计研究,归纳总结各类复杂结构除冰雪不同的处理方式,是找出转向架易结冰区域和总体防护设计的有效途径。

3 超疏水材料在防冰雪方面的应用

3.1 超疏水材料的疏水融冰性能

近些年来,新型材料的研发及表面技术有了新的进展,“超疏水材料”概念被提出。超疏水材料本身就具有高接触角与低滚动角,可以减小水滴在材料表面的接触面积,从而有效减少水滴与材料表面的接触时间,让水滴尽快滑落机体表面,避免了水滴与机体表面进行热传导而结冰^[21]。如图 4 所示,自然界中拥有类似于超疏水表面的生物十分常见,例如一些昆虫的绒毛、植物的叶片、动物的皮表面等。超疏水材料的疏水性能是满足要求的低表面能表面及表面微/纳米级粗糙结构两个方面的因素共同作用的结果。表面能低于 100 dynes/cm 的材料称为低表面能材料^[24],不同物质的表面能见图 5,有机硅材料的表面能在 20~25 dynes/cm 范围之内,含氟化合物材料的表面能在 15~20 dynes/cm 范围之内。相比其他材料,两者具有较低的表面能,疏水融冰性能很好,冰雪的附着强度也较低^[26]。此外,超疏水材料具有的微/纳米级粗糙结构(见图 6),能够延缓与基体表面进行热量传递,从而对水滴延缓结冰及加速冰雪整体冻结前脱离材料表面有很大的作用。

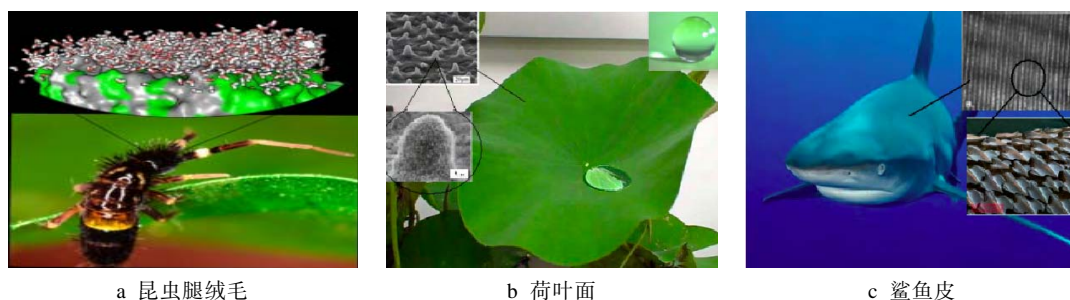


图 4 自然界中类似超疏水表面的生物^[22-23]

Fig.4 Super-hydrophobic surface creatures in nature^[22-23]: a) fluff of insect legs; b) lotus leaf; c) shark skin

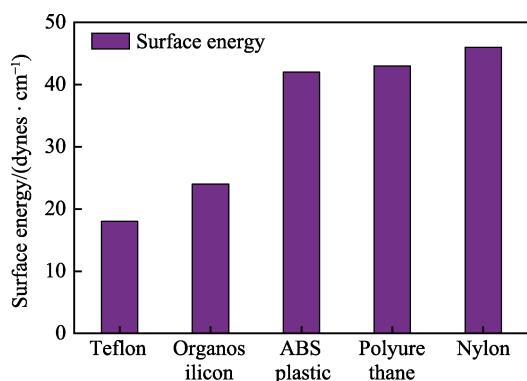


图 5 不同物质表面能^[25]

Fig.5 Surface energy of different substances^[25]

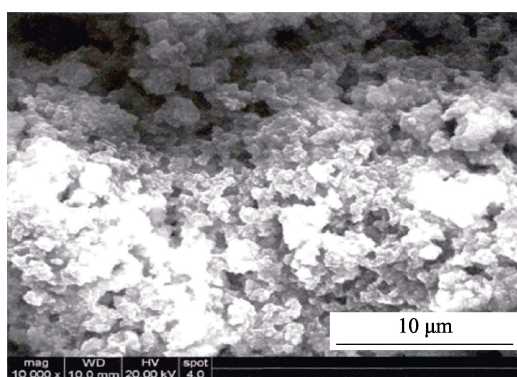


图 6 超疏水涂层微/纳米粗糙结构^[25]

Fig.6 Super-hydrophobic coating micro/nano rough structure^[25]

3.2 低表面能表面及微/纳米粗糙结构的制备方式

低表面能物质会大大降低在基体表面液滴的附着力及冰雪的粘结强度。近年来, 基于降低材料表面能的目的, 合成低表面能材料技术在制备方式上取得了丰硕的成果, 在科学研究和生产生活等诸多领域中具有广泛的应用^[25-29]。目前的研究大多通过化学方法改性材料表面的组成来降低材料表面的自由能, 增加静态接触角使基体呈现出高的疏水性。A. J. KESSMAN 等^[27]通过溶胶-凝胶法利用氟硅烷与硅醇盐的共聚缩合反应合成疏水-疏油性二氧化硅薄膜, 这种方法通常会使固-气界面层富集氟化部分, 这是由于这些复合物中含氟的成分的热力学驱动迁移到低表面能界面。涂层在开始时的浸润性非常差, 并且表面能较低, 但是在受到摩擦磨损而暴露表面后, 薄膜的功能将大大降低。为了解决这个问题, 用氟硅烷充当模板辅助表面活性剂, 显著降低水的表面张力, 作为硅醇盐涂层框架内的细观分散相, 使涂层即使在受到磨损后也能保持较差的湿润功能。S. W. CHO 等^[28]通过将微米级棒状粗糙结构的硅表面与表面氟碳薄膜的沉积相结合, 成功实现了超疏水性硅表面的制备。图 7 显示出了具有不同长宽比的微米级棒状结构的硅表面有无氟碳膜的接触角大小对比, 可以看出, 裸硅表面与沉积氟碳膜的硅表面的接触角相差约 70° , 沉积氟碳膜的硅表面达到了疏水接触角, 因此氟碳薄膜可以大幅增加材料表面的疏水性。值得注意的是, 图 7b 的平面表示只在硅表面沉积氟碳薄膜, 而没有微米级的粗糙结构, 通过其与复合涂层表面对比可以得出, 添加微米级粗糙结构可以使接触角提高至少 24° 。当氟碳薄膜沉积在这些表面上时, 随着微米级棒状结构的长宽比增加至 1.5, 接触角从 95° 左右增加到 165° , 此后保持近似恒定。因此, 使用传统的等离子刻蚀法进行表面微结构粗糙化是实现低表面能表面的一种实用方法。R. V. LAKSHMI 等^[29]将甲基三乙氧基硅烷 (MTEOS) 在酸催化的溶胶中分别加入不同径粒的纳米二氧化硅微粒, 制造超疏水性的纳米复合材料, 再通过添加氟烷基硅烷作为疏水剂进行改性处理, 结果如图 8 所示, 可以看出制备的四种涂层的接触角随二氧化硅纳米粒子浓度的增加而增加, 最佳的二氧化硅质量分数约为 8.6%, 此时所有涂层均开始显现出超疏水性。两种含有氟烷基硅烷溶液的二氧化硅纳米微粒含量为 0% (质量分数) 时, 接触角比无氟烷基硅烷的溶液要高出约 $16^\circ\sim 18^\circ$, 说明氟烷基硅烷的引入进一步提高了涂层的疏水性能。当涂层具有 160° 的接触角、滚动角小于 2° 且在自然环境条件下储存时, 发现制备的涂层可以保持疏水性能稳定超过一年。由此可推断出, 含氟化合物和有机硅材料能够有效降低水滴的附着性。

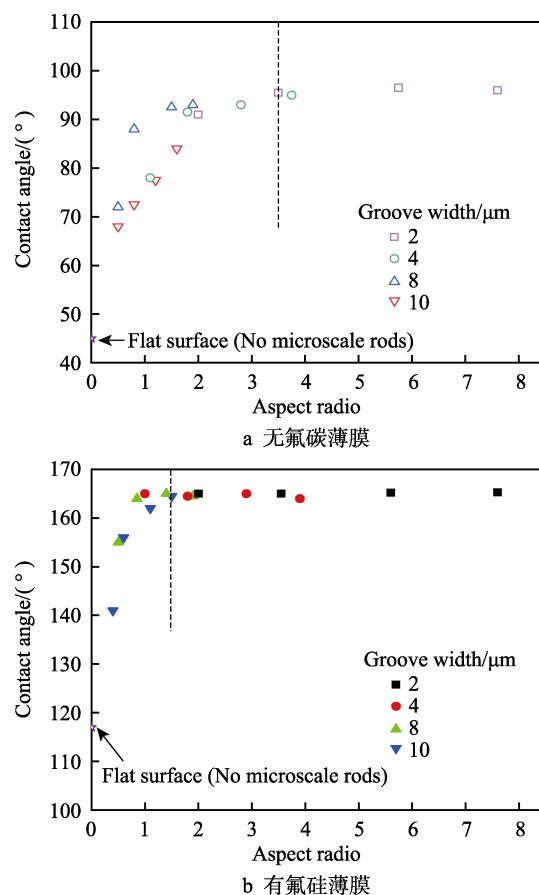


图 7 具有不同长宽比的微米级棒状结构的硅表面无氟碳薄膜和有氟硅薄膜接触角^[28]

Fig.7 Contact angles on the Si surface having fluorocarbon-free films (a) and fluorocarbon films (b) with microscale rods of various aspect ratios^[28]

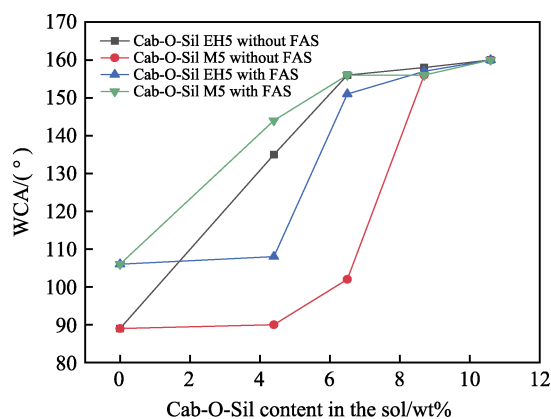


图 8 不同二氧化硅微粒及有无氟烷基硅烷的涂层接触角对比^[29]

Fig.8 Comparison of the WCA of the coatings with respect to the Cab-O-Sil type and FAS^[29]

基体表面的微/纳米级粗糙结构在转向架区域防结冰方面的作用, 主要表现为减小基体与水滴的接触面积, 避免水滴的浸润, 从而加快水滴脱离。需要注意的是, 粗糙度在超疏水材料的疏水效果中起到的作用比低表面能更加明显。构造粗糙结构的方法主要包括化学腐蚀法、溶胶-凝胶法、模板法、电喷涂法和

静电纺丝法等^[30-35]。LI 等^[36]首先利用化学腐蚀法在 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 水溶液中进行简单的水热处理制备纳米结构,在 2024 型铝表面形成了超亲水表面,然后采用低表面能化合物十二氟庚基丙基三甲氧基硅烷对 2024 型铝进行表面改性,使其表面性质由超亲水性转变为超疏水性,表现出优异的超疏水性能,静态水接触角为 160° 。此外,所制备的超疏水表面在空气中储存及热环境下具有高的稳定性,并且具有很强的抗紫外辐射、耐腐蚀和耐磨性。董伟等^[37]通过使用溶胶-凝胶工艺,利用甲基三乙氧基硅烷 (MTES) 和正硅酸乙酯 (TEOS) 共同改性处理聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 材料形成 MT-PET 超疏水性表面,静态接触角达到 158.8° 左右。模板法适用于制备聚合物基体的超疏水表面, B. ZHOU 等^[38]将具有超疏水性质的生物微结构作为模板,聚二甲硅氧烷 (PDMS) 为疏水剂,在基体表面复制获得了类似于生物模板的粗糙结构。静电纺丝是产生直径在微米至纳米范围内的连续聚合物串的最简单和最有用的技术之一^[39],该聚合物串累积可形成具有特征性表面粗糙度的表面结构^[40]。A. K. AN 等^[41]利用静电纺丝法制备了聚偏氟乙烯-六氟丙烯 (E-PH) 电纺薄膜。实验测量结果表明, E-PH 电纺薄膜的静态接触角为 155.4° ,表面粗糙度为 1285 nm,二者均显著增强。LIN 等^[42]将含氟二氧化硅纳米粒子喷涂在基体表面来制备聚偏氟乙烯 (PVDF) 超疏水薄膜,表征结果显示,改性 PVDF 膜具有优异的超疏水性,表面含氟的纳米二氧化硅粒子使超疏水薄膜的接触角高达 172° 左右,并且在热水、强酸强碱、超声波和高速冲洗等恶劣条件下,保持了相对稳定的超疏水性。

尽管上述方法都是构造表面粗糙结构的基本方法,但各自的优劣势十分明显。化学腐蚀法成本低,产生的改性表面接触角很高并且疏水融冰效果良好,但通常是危险系数较高、环保性差的强酸强碱作为腐蚀液且需要二次改性处理,限制了其成为制备超疏水表面未来的发展方向^[36,43]。溶胶-凝胶法通过调控各物质的物质的量之比,获得不同微观形貌的表面粗糙结构,可适用于制备新型材料并且拥有很好的抗腐蚀效果,缺点是制作周期较长^[27,37]。模板法利用传统机械加工工艺,操作简单无需后续改性处理^[38,43]。电喷涂法与静电纺丝法相似,不一样的是,静电纺丝与纤维有关,而电喷涂用于生产介于固体小滴和细丝之间的薄膜^[44],这些方法并不是很昂贵,但是难以制造大规模的超疏水性涂层。将静电纺丝技术与电喷涂技术相结合,可进一步制备疏水性能更好的微纳米复合材料。

3.3 金属基体表面防冰雪的应用

当运行在高寒地区的高速列车遇到降雪天气,冰雪堆积在转向架区域被电机等发热部件融化成雪水时,一个更有效的措施是防止冰的形成而不是阻止冰

的堆积,超疏水材料可以使基体表面快速而有效地脱离水滴,避免雪水受周围冷空气影响再次冻结成冰。因此,制作仿生超疏水材料的研究是当前的热点方向,众多铁路运输工作者从降低冰雪在金属基体表面的附着力和延缓水滴的结冰时间两方面着手,都在开展相关的工作^[45-63]。首先,降低冰层在基体表面的附着力,对防止冰雪的堆积影响显著。Y. H. YEONG 等^[47]首先在铝母材上进行激光微变形,然后分别利用不同类型的氟乙烯-丙烯 (FEP) 进行热压处理,研究 FEP 热压处理后的微激光变形铝材表面的覆冰状况。结果证明, FEP 薄膜的微结构压纹程度取决于三个参数:压纹质量/压力、压纹时间和压纹温度,当压纹质量/压力和持续时间分别固定为 2 kg/30 kPa 和 5 min、压纹温度设定为 310°C 时,所得铝基材表面是超疏水的。覆冰实验显示,制备的超疏水表面冰块分离的平均强度约为 20 kPa,小于铝基板冰分离强度的 2% 及光滑无纹 FEP 板冰分离强度的 33%,是在表 4 给出的各研究人员数据记录的超疏水冰附着强度中最低的之一。然而由于使用的金属基体材料的不同,表面形貌、导热性能等存在明显差异,因此冰层在转向架表面的附着强度相比于在铝表面也会有差别。至于差别是否大到会影响其在转向架区域的疏水融冰性能,有待通过使用转向架材料开展进一步研究。其存在的缺陷是,不同表面张力液体对超疏水薄板的润湿性研究显示,当液体表面张力低于 68 mN/m 时,超疏水性能就会丧失。关于降低冰雪附着强度的研究主要停留在对表面张力存在局面性阶段,仍需要开展进一步的研究探索和试验验证。

表 4 各研究人员报告的超疏水涂层的冰雪附着强度值
Tab.4 Reported ice adhesion strength values of super-hydrophobic coatings by various researchers

Authors	Year of publication	Ice adhesion strength/kPa
KULINNICH S et al. ^[48]	2009	~65
FARHADI S et al. ^[49]	2011	55~100
ZOU M et al. ^[50]	2011	~30
GE L et al. ^[51]	2013	~40
SUSOFF M et al. ^[52]	2013	~78
FU Q et al. ^[53]	2014	~75
MOMEN G et al. ^[54]	2015	~65
BEEMER D L et al. ^[55]	2016	~5.2
HE Z W et al. ^[56]	2017	~5.7
WANG C Y et al. ^[57]	2018	20~50
IRAJIZAD P et al. ^[58]	2019	~1

控制金属基表面结冰时间也是区域防冰雪的重要影响因素。J. KIM 等^[59]为了定量分析超疏水涂层表面与未涂覆涂层铝合金表面的防冰特性,在多种操作条件下通过将液滴置于铝合金表面,对表面的延缓

结冰特性进行了实验研究。使用实验结果计算冻结延迟时间,再采用随机抽样方法进行分析。此外,提出了在宏观水平上初始冰核的形成时间和冻结传播速度作为表面防覆冰特性的量度,通过初始的冰核形成时间定量地证实了超疏水表面的优异延迟结冰性能,该时间被延迟了 22%~92%,而冻结传播速度则降低了 17%~30%。Y. Z. SHEN 等^[60]设计并制造了一种高性能的超疏水性氟化二氧化硅聚二甲基硅氧烷 (F-SiO₂@PDMS) 涂层,改善冰与基材的粘合强度并保持高延缓结冰性能。试验结果表明,与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 涂层和无涂层铝基材的冰冻延迟时间分别为 81.9 s 和 4.8 s 相比, F-SiO₂@PDMS 超疏水涂层显示出更长的时间 (276.2 s)。这些结果的主要原因有以下两个:首先,超疏水的 F-SiO₂@PDMS 涂层具有明显的低表面能和表面粗糙结构,大大减少了水滴和基材表面之间的接触面积;第二,超疏水涂层达到 Cassie-Baxter 润湿状态,并且可能陷入在水滴下的具有 0.024 W/(m·K) 超低导热系数的大量气穴中^[61],从而显现出更长的结冰时间。此外,结冰延迟时间主要取决于预冷却过程,如图 9 所示。从预冷时间来看, F-SiO₂@PDMS 超疏水涂层约为 250 s,远超 PDMS 涂层和无涂层铝基表面;开始结冰时间方面,无涂层铝基材表面所需时间最短,而其余两者相差并不悬殊。最后的结果是,复合涂层的完全结冰时间比其余两组涂层长的多。从以上结果分析可以得出,复合材料涂层在延缓结冰方面显示出巨大潜力。HEYDARIG 等^[62]采用液体火焰喷涂 (LFS) 技术在基体表面沉积二氧化钛纳米颗粒,制备出多尺度的粗糙度,随后通过施加等离子体聚合物薄层使涂层变成非极性。通过在 -4 °C 和 -7 °C 温度下的验证实验,发现这种超疏水表面也具有延迟结冰的效果,而且在冷却过程中,粗糙度越大的基体,表面接触角越高,这同时验证了粗糙度对超疏水表面的影响。然而,考虑实际环境和摩

擦磨损等因素,在应对转向架区域恶劣的使用条件时,这种涂层延迟结冰性能的稳定性是否持续高效仍需进一步改进和验证。

综上所述,超疏水材料对金属基体表面防冰工作有很好的效果,低表面能材料与在基体表面构造的微/纳米级粗糙结构结合在一起,对降低冰的附着力及延缓结冰有明显作用。目前,常用于制造金属基表面防覆冰积雪超疏水涂层的基本原料,包括含氟化合物、含硅化合物、纳米硅颗粒、碳纳颗粒等,越来越多新型材料的出现为基材防冰雪提供了新的研究思路。

与传统的金属基体表面融冰除雪方法相比,涂覆超疏水涂层达到防冰雪目的的方式具有性价比高、施工简单、节能环保等独特的优势,已经在公路路面防结冰积雪、高压电气设备防冰闪、去除飞机表面冰霜积雪和汽车表面制造等领域都获得了应用^[63-66]。不过,虽然大量数据已经证实超疏水表面具有降低冰附着力、延缓结冰的作用,但利用超疏水材料实现防结冰和防积雪差别很大,从表面界面角度来说,前者属于固-液界面问题,后者属于固-固界面问题,固-液界面和固-固界面的润湿方式非常复杂,并且取决于许多因素,例如尺寸、形态、温度等^[60],低能表面固体与液体接触后,液体会收缩来降低系统表面能,使固体表面不易被润湿,而固体与冰雪之间粘附界面的稳定性随结冰过程中产生的相变膨胀力变化而变化^[67]。并且由于列车转向架要在高速高寒、风雪低温等苛刻环境下长时间持续运行,在复杂的实际工况下要起到既防冰又防雪的效果,对所需设计的超疏水涂层提出了更高的标准。到目前为止,在转向架区域构造表面粗糙结构获得超疏水性能的涂层以提高防结冰、防积雪的运用方面,还没有从实验研究迈向实际中来,但结合已有的研究成果,对制备工艺展开深入研究,未来有望成为转向架防冰的导向。

4 总结和展望

高寒地区列车转向架防冰雪一直是铁路运输业亟待解决的难题,目前尚无高效解决的方案。本文对国内外转向架区域防冰雪研究方法、技术应用及超疏水材料的疏水性能进行了分析,对今后高寒列车组转向架区域除冰雪的科学研究提供了重要的理论参考。从本文的综述内容来看,完全解决该问题还有很长的路要走,根据目前的研究状况,融冰除雪技术未来可从减少冰雪进入转向架方面考虑,进一步改善列车转向架区域的流场状况。

此外,在未来可加大开展对新型材料的开发和表面技术的研究,利用各种新型材料的特有属性并加以组合,制造可以涂覆在转向架表面的功能涂层,使转向架材料在保持良好的机械性能的前提下具有更好的防冰雪效果,这样可以取代污染环境的化学除冰、费用高的大型机械除冰的试验研究。但在材料的选

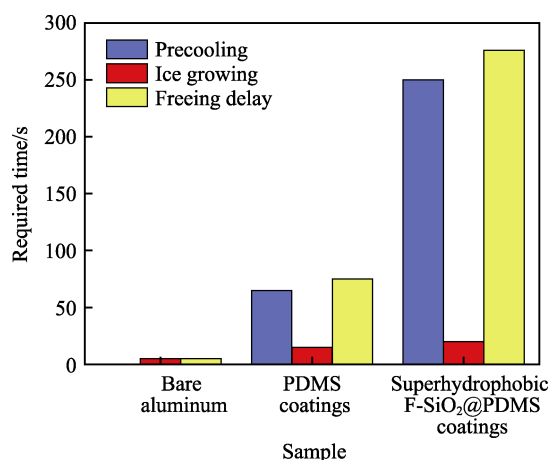


图 9 三种表面上水滴预冷、结冰和完全结冰过程所需的时间^[60]

Fig.9 Required time for water droplets precooling, icing growing and freezing on three sample surfaces

择、涂层的制备及后续处理方面,还需深入研究解决。特别是列车要在恶劣环境条件下高速运行,要同时起到转向架区域防冰和防雪的效果,又须满足列车的各项安全性能指标,对超疏水材料的研究提出了新的挑战。

参考文献:

- [1] KLOOW L. High-speed train operation in winter climate [J]. Foreign rolling stock, 2015, 52(1): 1-10.
- [2] 孟庆宇. 看国外铁路如何抵御冰雪[J]. 铁道知识, 2008(2): 16-19.
MENG Qing-yu. Research on how foreign railways resistice[J]. Railway knowledge, 2008(2): 16-19.
- [3] 张雪磊, 张良辰. 国外铁路应对冰雪灾害的技术举措[J]. 轨道交通, 2009(4): 48-49.
ZHANG Xue-lei, ZHANG Liang-chen. Technical measures for foreign railways to respond theice and snow disasters [J]. Rail traffic, 2009(4): 48-49.
- [4] 韦皓. 高寒地区动车组融冰除雪技术研究[C]//高寒地区高速铁路技术研讨会. 北京: 中国铁道学会, 2017: 31-39.
WEI Hao. Study on removing technology of ice and snow on EMU in cold regions[C]// High speed railway technology seminar in coldregion. Beijing: China Railway Society, 2017: 31-39.
- [5] 苗秀娟, 何侃. 高速列车转向架区域积雪形成原因及防积雪研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 252-259.
MIAO Xiu-juan, HE Kan. Cause analysis of snow packing in high-speed train's bogie regions and anti-snow packing design[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2018, 49(3): 252-259.
- [6] 时光磊. 风吹雪跃移和悬移运动的综合模型[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
SHI Guang-lei. A general model of blowing snow: saltation and suspension[J]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [7] 周晷毅, 刘长卿, 顾明. 跃移雪颗粒运动特性的数值模拟研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 522-529.
ZHOU Xuan-yi, LIU Chang-qing, GU Ming. Numerical simulation on movement characteristics of saltating snow particles[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2013, 41(4): 522-529.
- [8] 张乐, 李田, 蔡路, 等. 雪粒参数对高速列车转向架区域雪粒堆积的影响[J]. 机械工程学报, 2020(3): 1-9.
ZHANG Le, LI Tian, CAI Lu, et al. Effect of snow parameters on snow accumulation in high-speed train bogies[J]. Journal of mechanical engineering, 2020(3): 1-9.
- [9] 王东屏, 尤明, 范军, 等. 高速动车组转向架积雪特性数值仿真及优化设计[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 25-32.
WANG Dong-ping, YOU Ming, FAN Jun, et al. Numerical simulation on snowpack characteristics of high-speed EMU bogie and optimization design[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 25-32.
- [10] IGLESIAS E L, THOMPSON D J, SMITH M G. Component- based model for aerodynamic noise of high-speed trains[J]. Notes on numerical fluid mechanics and multi-disciplinary design, 2015, 126(1): 481-488.
- [11] 蔡华闽, 张继业, 李田. 高速列车转向架区域气动特性及流场规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 49-57.
CAI Hua-min, ZHANG Ji-ye, LI Tian. Research on aerodynamic performance and flow field of high speed train bogie region[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(12): 49-57.
- [12] PAZ C, SUAREZ E, GIL C. Numerical methodology for evaluating the effect of sleepers in the underbody flow of a high-speed train[J]. Journal of wind engineering & industrial aerodynamics, 2017, 167: 140-147.
- [13] FRAISSE P, PIERROT F, DAUCHEZ P. Virtual environment for robot force control[C]//IEEE international conference on robotics & automation. London: IEEE, 1993: 219-224.
- [14] KOTOKU T. A predictive display with force feed break and its application to remote manipulation with transmission time delay[C]// IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Berlin: IEEE, 1992: 239-246.
- [15] 张骥. 日本铁路防冰雪灾害举措[J]. 中国铁路, 2009(1): 69-73.
ZHANG Ji. Measures to prevent snow and ice disasters of Japan railway[J]. China railway, 2009(1): 69-73.
- [16] 石航. 列车组融冰防冰技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
SHI Hang. Research on de-icing and anti-icing technology for trains and wagons[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
- [17] 钱耀东, 刘护宪. 关于动车组冬季融冰除雪的分析与对策[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(6): 79-82.
QIAN Yao-dong, LIU Hu-xian. Analysis and countermeasures on ice-snow removing in winter for EMU[J]. Railway locomotive & car, 2016, 36(6): 79-82.
- [18] 徐芳, 戴晓超, 张文斌. 高速高寒型动车组转向架弹簧系统防冰雪措施[J]. 机车车辆工艺, 2016(6): 41-42.
XU Fang, DAI Xiao-chao, ZHANG Wen-bin. Anti-icing measures for spring system of bogie of high-speed alpine type EMU[J]. Locomotive and rolling stock, 2016(6): 41-42.
- [19] 辛志强. 高速动车组转向架基础制动防冰雪吹风系统[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 80-82.
XIN Zhi-qiang. Icing against system of bogie fundamental brake device for EMU[J]. Railway locomotive stock, 2015, 35(3): 80-82.
- [20] 李俊民. 高速动车组转向架防冰雪导流罩的空气动力学性能分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 20-26.
LI Jun-min. Analysis on aerodynamic performance of anti-ice/snow dome of high speed motor train unit bogie[J].

- Computer aided engineering, 2013, 22(2): 20-26.
- [21] 于竞尧, 薛磊, 陶海岩, 等. 基于疏水功能表面的飞机防覆冰机理研究进展[J]. 航空制造技术, 2017(17): 55-59.
- YU Jing-yao, XUE Lei, TAO Hai-yan, et al. Research on anti-icing mechanism of aircraft based on hydrophobic functional surface[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017(17): 55-59.
- [22] LARS S, ZHANG W, MICHAEL M, et al. The role of surface chemistry for the super-hydrophobicity of the springtail orchesellacincta[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 1944-8252: 12294-12304.
- [23] 马国佳, 刘星, 张伟, 等. 超疏水仿生表面制造及其应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(6): 1866-1871.
- MA Guo-jia, LIU Xing, ZHANG Wei, et al. Manufacturing and application of super-hydrophobic bionic surface[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(6): 1866-1871.
- [24] 颜肖慈. 界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- YAN Xiao-ci. Interface chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2005.
- [25] 赵云行, 李紫千, 陈梦, 等. 高速动车组车底防冰涂料探究[J]. 中国铁路, 2016(6): 58-63.
- ZHAO Yun-xing, LI Zi-qian, CHEN Meng, et al. Research on anti-icing coatings on high-speed EMUs[J]. China railway, 2016(6): 58-63.
- [26] HUI Peng. Synthesis and application of fluorine-containing polymers with low surface energy[J]. Journal of macromolecular science part C, 2019, 59(4): 739-757.
- [27] KESSMANA J, CAIRNS D R. Template-assisted encapsulation of fluorinated silanes in silica films for sustained hydrophobic-oleophobic functionality[J]. Journal of colloid & interface science, 2011, 360(2): 785-792.
- [28] CHO S W, KIM J H, LEE H M, et al. Super-hydrophobic Si surfaces having microscale rod structures prepared in a plasma etching system[J]. Surface and coatings technology, 2016, 306: 82-86.
- [29] LAKSHMI R V, BERA P, ANANDAN C, et al. Effect of the size of silica nanoparticles on wettability and surface chemistry of sol-gel super-hydrophobic and oleophobic nanocomposite coatings[J]. Applied surface science, 2014, 320: 780-786.
- [30] CALDONA E B, SIBAEN J W, TACTAY C B, et al. Preparation of spray-coated surfaces from green-formulated superhydrophobic coatings[J]. SN applied sciences, 2019, 1(12): 1-9.
- [31] ZHANG S, LI W, WANG W, et al. Reactive superhydrophobic paper from one-step spray-coating of cellulose-based derivative[J]. Applied surface science, 2019: 497.
- [32] BALORDI M, CAMMI A, MAGISTRIS G S D, et al. Role of micrometric roughness on anti-ice properties and durability of hierarchical super-hydrophobic aluminum surfaces[J]. Surface & coatings technology, 2019, 54: 374.
- [33] 仇伟, 刘见祥, 曾舒, 等. 超疏水涂料的制备及其防覆冰性能[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 108-110.
- CHOU Wei, LIU Jian-xiang, ZENG Shu, et al. Preparation and anti-icing properties of super-hydrophobic coating[J]. Surface technology, 2012, 41(6): 108-110.
- [34] MANDROVSKIY K P, SADOVNIKOVA Y S. Modeling the uniform treatment of coatings with an anti-icing liquid reagent[J]. Mathematical models and computer simulations, 2019, 11(5): 842-849.
- [35] LV L N, LIU H, ZHANG W, et al. Facile UV-curable fabrication of robust, anti-icing superhydrophobic coatings based on polyurethane[J]. Materials letters, 2020: 258.
- [36] LI L, HUANG T, LEI J, et al. Robust biomimetic-structural super-hydrophobic surface on aluminum alloy[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 7(3): 1449.
- [37] 董伟, 钱付平, 李晴, 等. 聚对苯二甲酸乙二醇酯滤料超疏水表面的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 1-9.
- DONG Wei, QIAN Fu-ping, LI Qing, et al. Preparation and properties of superhydrophobic surface of polyethylene terephthalate filter material[J]. Journal of composite materials, 2020, 37(2): 1-9.
- [38] ZHOU B, TIAN J, WANG C, et al. A facile and cost-effective approach to engineer surface roughness for preparation of large-scale superhydrophobic substrate with high adhesive force[J]. Applied surface science, 2016, 389: 679-687.
- [39] ZHU M, ZUO W, YU H, et al. Super-hydrophobic surface directly created by electrospinning based on hydrophilic material[J]. Journal of membrane science, 2006, 41: 3793-3797.
- [40] TUTEJA A, CHOI W, MA M, et al. Designing super-oleophobic surfaces[J]. Science, 2007, 318: 5856.
- [41] AN A K, GUO J, LEE E J, et al. PDMS/PVDF hybrid electrospun membrane with super-hydrophobic property and drop impact dynamics for dyeing wastewater treatment using membrane distillation[J]. Journal of membrane science, 2017, 525: 57-67.
- [42] LIN J Y, LIN F, LIU R R, et al. Scalable fabrication of robust superhydrophobic membranes by one-step spray-coating for gravitational water-in-oil emulsion separation [J]. Separation and purification technology, 2020, 231: 9.
- [43] 丁元迪, 周潼, 王若云, 等. 金属基体上超疏水表面的制备及其机械耐久性的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 68-86.
- DING Yuan-di, ZHOU Tong, WANG Ruo-yun, et al. Preparation of superhydrophobic surface on metal substrate and its mechanical durability[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 68-86.
- [44] ZHENG J, HE A, LI J, et al. Studies on the controlled morphology and wettability of polystyrene surfaces by electrospinning or electrospraying[J]. Polymer, 2006, 47(20): 7095-7102.
- [45] 陈小娇, 武卫东, 汪德龙. 超疏水表面抑制结霜研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 87-92.
- CHEN Xiao-jiao, WU Wei-dong, WANG De-long. Research

- progress of super-hydrophobic surface anti frosting[J]. Surface technology, 2015, 44(2): 87-92.
- [46] 李杰, 郭浩正, 石文天. 镁合金超疏水表面制备技术的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 15-22.
- LI Jie, GUO Hao-zheng, SHI WEN-tian. Research progress of super-hydrophobic surface preparation technology of magnesium alloy[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 15-22.
- [47] YEONG Y H, GUPTA M C. Hot embossed micro-textured thin super-hydrophobic Teflon FEP sheets for low ice adhesion[J]. Surface & coatings technology, 2017, 313: 17-23.
- [48] KULINICH S, FARZANEH M. How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces[J]. Langmuir, 2009, 25(16): 8854-8856.
- [49] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S. Anti-icing performance of super-hydrophobic surfaces[J]. Applied surface science, 2011, 257(14): 6264-6269.
- [50] ZOU M, BECKFORD S, WE R, et al. Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength[J]. Applied surface science, 2011, 257(8): 3786-3792.
- [51] GE L, DING G, WANG H, et al. Anti-icing property of super-hydrophobic octadecyltrichlorosilane film and its ice adhesion strength[J]. Journal of nanomaterials, 2013, 213: 1-5.
- [52] SUSOFF M, SIEGMANN K, PFAFFENROTH C, et al. Evaluation of icephobic coatings-screening of different coatings and influence of roughness[J]. Applied surface science, 2013, 282: 870-879.
- [53] FU Q, WU X, KUMAR D, et al. Development of sol-gel icephobic coatings: effect of surface roughness and surface energy[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(23): 20685-20692.
- [54] MOMEN G, JAFARI R, FARZANEH M. Ice repellency behavior of super-hydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness[J]. Applied surface science, 2015, 349: 211-218.
- [55] BEEMER D L, WANG W, KOTA A K. Durable gels with ultra-low adhesion to ice[J]. Journal of materials chemistry A, 2016, 4(47): 18253.
- [56] HE Z W, VÅGENES E T, DELABAHAN C, et al. Room temperature characteristics of polymer-based low ice adhesion surfaces[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 42181.
- [57] WANG C Y, GUPTA M C, YEONG Y H, et al. Factors affecting the adhesion of ice to polymer substrates[J]. Journal of applied polymer science, 2018, 135(24): 45734.
- [58] IRAJIZAD P, AL-BAYATI A, ESLAMI B, et al. Stress-localized durable icephobic surfaces[J]. Materials horizons, 2019, 6(4): 758.
- [59] KIM J, JEON J, KIM D R, et al. Quantitative analysis of anti-freezing characteristics of super-hydrophobic surfaces according to initial ice nuclei formation time and freezing propagation velocity[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 126: 109-117.
- [60] SHEN Y Z, WUY, ZHUC L, et al. Spraying fabrication of durable and transparent coatings for anti-icing application: Dynamic water repellency, icing delay, and ice adhesion[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11(3): 3590-3598.
- [61] FALZON B G, HAWKINS SC, YAOX D. An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs[J]. Carbon, 2018, 136: 130-138.
- [62] HEYDAR I G, MOGHADDAM M S, TUOMINE N M, et al. Wetting hysteresis induced by temperature changes: Supercooled water on hydrophobic surfaces[J]. Journal of colloid and interface science, 2016, 468: 21-33.
- [63] 张迅, 曾华荣, 田承越, 等. 大气压等离子体制备超疏水表面及其防冰抑霜研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5289-5296.
- ZHANG Xun, ZENG Hua-rong, TIAN Cheng-yue, et al. Super-hydrophobic surface prepared by atmospheric-pressure plasma and its anti-icing, anti-frosting performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5289-5296.
- [64] WANG N, TANG L, TONG W, et al. Fabrication of robust and scalable superhydrophobic surfaces and investigation of their anti-icing properties[J]. Materials & design, 2018, 156: 320-328.
- [65] FENG L, YAN Z, SHI X, et al. Anti-icing/frosting and self-cleaning performance of superhydrophobic aluminum alloys[J]. Applied physics A, 2018, 124(2): 142.
- [66] LATTHE S S, SUTAR R S, BHOSALE A K, et al. Recent developments in air-trapped superhydrophobic and liquid-infused slippery surfaces for anti-icing application[J]. Progress in organic coatings, 2019, 137: 568.
- [67] 陈廷坤. 基于干扰冰-固界面粘附稳定性的主动防/除冰方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- CHEN Ting-kun. Research on active/de-icing method based on disturbing the adhesion stability of ice-solid interface [D]. Changchun: Jilin University, 2019.